

Comportement Mécanique des Matériaux

EPFL - Cours MSE 234, Edition 2025

Exercices du chapitre 3

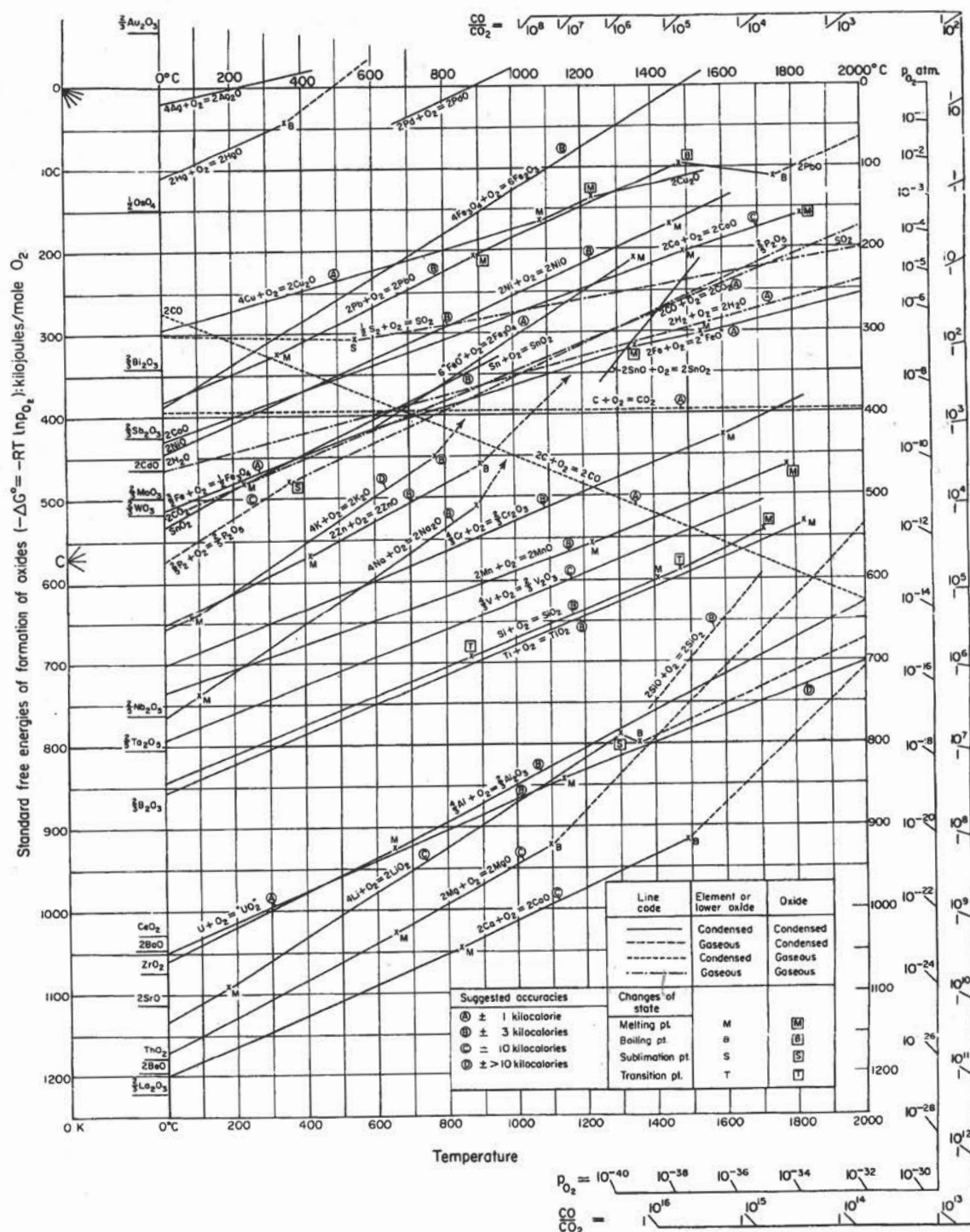


FIGURE IV-7 – Diagramme d'Ellingham.

Exercice 3-1

vrai ou faux ?

- a) Les ressources mondiales d'aluminium ont chuté brutalement en 1974 avec l'augmentation du prix du pétrole.
- b) Les réserves mondiales de cobalt, dont il existe des gisements importants au Congo (ex-Zaïre), peuvent être diminuées par les guerres civiles dans ce pays.
- c) Une augmentation du prix du pétrole rend l'aluminium moins attrayant que l'acier car la réduction de l'oxyde d'aluminium consomme nettement plus d'énergie que celle de l'oxyde de fer; donc quand le prix du pétrole augmente, la consommation d'aluminium décroît par rapport à celle de l'acier.

Exercice 3-2

Vous trouverez en première page le diagramme d'Ellingham.

Pour rappel : ce graphe donne le changement d'énergie libre ΔG accompagnant la formation de l'oxyde du métal M à partir de métal M et d'oxygène O_2 , la réaction étant écrite à chaque fois pour une mole d'oxygène O_2 . Les courbes sont tracées en supposant que tout gaz, y compris O_2 , intervenant dans la réaction est à une pression d'une atmosphère.

Comme vous l'avez aussi vu, le changement d'énergie libre ΔG correspondant à chacune de ces réactions est la somme du changement d'enthalpie ΔH (qui est la chaleur absorbée ou dégagée par la réaction, un dégagement de chaleur correspondant à $\Delta H < 0$), moins la température T (en degrés K) fois le changement d'entropie ΔS , lequel mesure le changement dans le degré de « désordre », ou en d'autres mots du nombre de configurations possibles, des atomes entre leur état au sein des réactifs et au sein des produits de la réaction:

$$\Delta G_{\text{réaction}} = G_{\text{produits de réaction}} - G_{\text{réactifs}} = \Delta H_{\text{réaction}} - T \Delta S_{\text{réaction}}$$

Avec

$$G_{\text{produits de réaction}} = H_{\text{produits de réaction}} - T S_{\text{produits de réaction}}$$

$$G_{\text{réactifs}} = H_{\text{réactifs}} - T S_{\text{réactifs}}$$

Comme vous le voyez ces courbes sont des segments de droite, avec pour implication que, le long de chacun de ces segments, $\Delta H_{\text{réaction}}$ et $\Delta S_{\text{réaction}}$ sont relativement constants.

- a – Quel est le changement d'énergie libre $\Delta G_{\text{réaction}}$ correspondant à l'oxydation du magnésium à $1'000^\circ\text{C}$, en kJ/mole O_2 ?
- b – Quel est le changement d'énergie libre $\Delta G_{\text{réaction}}$ correspondant à l'oxydation du magnésium à 1000°C , en kJ/mole **Mg** ?
- c – Quel est le changement d'énergie libre $\Delta G_{\text{réaction}}$ correspondant à la réaction suivante à 1000°C , en kJ/mole Mg ?
 $\text{MnO} + \text{Mg} \Rightarrow \text{Mn} + \text{MgO}$?

d – Au vu de ce qui est énoncé au début de ce problème, pouvez-vous donner la raison pour laquelle presque toutes les courbes correspondant à des réactions où le métal et l'oxyde sont tous deux solides ont une pente positive ?

e – Une seule courbe a une pente nulle, et une seule (autre) courbe a une pente négative : pourquoi ces courbes ont-elles ces pentes ?

Exercice 3-3

Vous trouverez en première page le diagramme d'Ellingham.

Jacques a trouvé une mine à partir de laquelle il peut, après enrichissement du minerai, extraire de l'oxyde de nickel, NiO, à l'état de granulés relativement purs.

Près de sa mine Sophie a monté une usine produisant, par voie électrochimique à partir d'énergie solaire et à bas prix, de l'hydrogène H₂ à une pression d'une atmosphère.

Jacques vous demande s'il lui serait possible de produire du nickel (Ni) à partir de son minerai en circulant à 1000°C, à travers un lit poreux d'oxyde de nickel produit à partir de sa mine, l'hydrogène de Sophie.

- (a) Ecrivez la réaction chimique par laquelle ce procédé produirait du nickel métallique.
(b) Que lui répondez-vous ? Cette extraction du nickel est-elle thermodynamiquement possible ou non ?

Nota: Justifiez votre réponse par référence au diagramme d'Ellingham, en marquant sur le diagramme le changement d'énergie libre correspondant à cette réaction et en écrivant ci-dessous votre raisonnement.

- (c) Il s'avère que le NiO extrait de ce minerai contient un peu d'oxyde de manganèse (MnO). Est-ce que Jacques risque de trouver du manganèse dans le produit du procédé d'exposition du NiO à l'hydrogène de Sophie à 1000°C ?

Nota: Justifiez votre réponse par référence au diagramme d'Ellingham.

Exercice 3-4

Vous trouverez en première page le diagramme d'Ellingham.

- a - Supposez que je construis un four à charbon de bois dans lequel
- j'arrive à réduire l'oxyde d'étain (SnO₂) pour produire de l'étain (Sn),
 - mais je n'arrive pas à réduire l'oxyde de zinc (ZnO) pour produire du zinc (Zn).
 -

Mon four serait-il capable de

- produire du cuivre (Cu) à partir de son oxyde (Cu₂O) ?
- produire de l'aluminium (Al) à partir de son oxyde (Al₂O₃) ?

- b - Supposez que dans un haut-fourneau le minerai de fer qui est utilisé comporte des oxydes de nickel en plus d'oxyde de fer. Vous attendez-vous à ce que l'alliage fondu qui coule du bas du haut fourneau contienne aussi du nickel ?

Exercice 3-5

Vous trouverez en première page le diagramme d'Ellingham.

Au-dessus de quelle température environ peut-on produire de l'étain (Sn) par réduction de son oxyde, cette réduction étant produite en chauffant l'oxyde d'étain avec du carbone (en pratique du charbon de bois, du charbon ou du coke) ?

Supposez que tous les gaz intervenant dans les réactions d'oxydoréduction sur ce diagramme sont à une pression d'une atmosphère.

Pour répondre montrez en les entourant sur le diagramme les réactions qui vous permettent de répondre, et écrivez votre raisonnement avant de donner la température en question.

Exercice 3-6

Vous trouverez en première page le diagramme d'Ellingham.

a – Quel est le changement d'énergie libre standard $\Delta G_{\text{réaction}}$ correspondant à l'oxydation du manganèse (Mn) pour produire l'oxyde MnO à 1600°C, en kJ/(mole O₂) ? Cette réaction peut-elle avoir lieu spontanément ?

b – Quel est le changement d'énergie libre standard $\Delta G_{\text{réaction}}$ correspondant à la réduction (inverse de l'oxydation) de l'oxyde MnO pour produire de l'oxygène (O₂) et du manganèse (Mn) à 1600°C, en kJ/mole Mn ?

c – Le point de fusion du silicium est de 1414°C. Que se passera-t-il en principe si on verse du silicium (Si) liquide sur un lit de particules d'oxyde de manganèse (MnO) et pourquoi ?

d – Le point de fusion du nickel est de 1455°C. Que se passera-t-il en principe si on verse du nickel (Ni) liquide sur un lit de particules d'oxyde de manganèse (MnO) et pourquoi ?

3-7 – Avec les données dans les diapositives du cours y compris le diagramme d'Ellingham, pouvez-vous calculer le contenu énergétique, voulant dire l'énergie thermodynamiquement requise, en MJ/kg et en kWh/kg, pour

a – produire un kilogramme d'aluminium par transformation de l'alumine Al₂O₃ en aluminium métal à 900°C (et donc à l'état fondu) ?

b - convertir un kilogramme d'aluminium solide recyclé en métal fondu à 900°C ?

Données:

chaleur latente de l'aluminium = 10.7 kJ/mole;

capacité calorifique massique de l'aluminium: 0.89 J/g°C, densité de l'aluminium = 2.7 · 10³ kg/m³.

c - Quel est le rapport entre l'énergie minimale requise pour recycler l'aluminium et l'énergie minimale requise pour produire de l'aluminium par réduction de son oxyde, en fixant pour état de référence le métal à 900°C ?

d – Dans le procédé de Selective Laser Melting, des paramètres typiques de l'élaboration de pièces en aluminium sont (i) une puissance du laser de 230 W, pour une vitesse de balayage de 800 mm/s fondant une bande de poudre mesurant dans la pièce d'aluminium dense ainsi

produite 70 μm de large et 30 μm de profondeur. Quelle est l'énergie dépensée par kg d'aluminium ?

Exercice 3-8

a - Pourquoi la production d'aluminium est-elle souvent située à proximité de barrages hydroélectriques ?

b – Peut-on actuellement transformer la bauxite en aluminium sans émission de dioxyde de carbone ?

Exercice 3-9

Un métal voit sa production mondiale augmenter de 5% chaque année. Supposez pour simplifier que la durée de vie de tout ce qui est produit avec ce métal soit uniformément de 25 ans et qu'au bout de 25 ans le métal soit ou recyclé ou jeté.

Quelle est la valeur maximale possible du taux de recyclage de ce métal si on définit le taux de recyclage comme étant le pourcentage du métal produit à une date donnée qui est produit à partir de métal recyclé ?

Exercice 3-10

Comment feriez-vous pour reproduire en métal une fine structure végétale comme une feuille de laurier ou une branche de persil ?



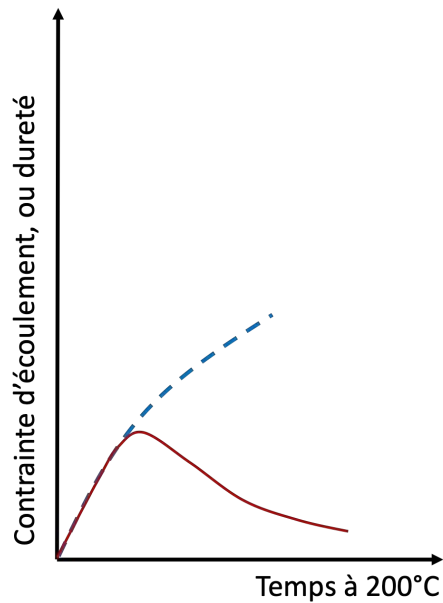
Exercice 3-11

Le Lasagnium est un alliage des atomes Patium et Tomatium. Il s'y forme des précipités To_3Pa_2 qui durcissent efficacement l'alliage après mis en solution, trempe et traitement de précipitation à 200°C.

Il a ceci de particulier que dans la gamme Pa-1%To à Pa-3%To, les mêmes précipités se forment, germinent à un taux (nombre de germes/ m^3s) proportionnel à la teneur en To, puis croissent (par précipitation ou maturation) à la même vitesse quelle que soit la composition de l'alliage.

Ci-dessous vous voyez la courbe de durcissement de l'alliage Pa-1%To. Pouvez-vous esquisser ce à quoi devrait ressembler la même courbe pour l'alliage Pa-3%To ? Justifiez votre esquisse par le raisonnement.

Le temps de durcissement maximal est-il le même pour les deux alliages ?



Exercice 3-12

Vous travaillez pour l'entreprise Metal Rigolade & Co. Votre chef, Jacques Wunderboss, vous envoie le mémorandum suivant.

“Nous avons un problème avec une pièce de fuselage d'un avion, que nous avons conçue et assemblée dans nos usines. Elle mesure 5 mètres de long, 2 de large, et est entièrement en alliage d'aluminium 2024 T6 (revenu à 190°C pendant une heure). La pièce avait été déformée accidentellement pendant l'assemblage et rectifiée manuellement par l'ouvrier (pour cela il a fallu la chauffer à 350°C car elle était trop dure à plier sinon).

Le client s'est plaint car cette pièce s'est déformée en service. Nous avons mesuré la résistance mécanique du métal de la pièce, et la limite d'élasticité est en effet inférieure à ce qu'elle devrait être: sa valeur est $R_e = 260$ MPa au lieu de la valeur $R_e = 340$ MPa

caractéristique de l'alliage 2024 T6.

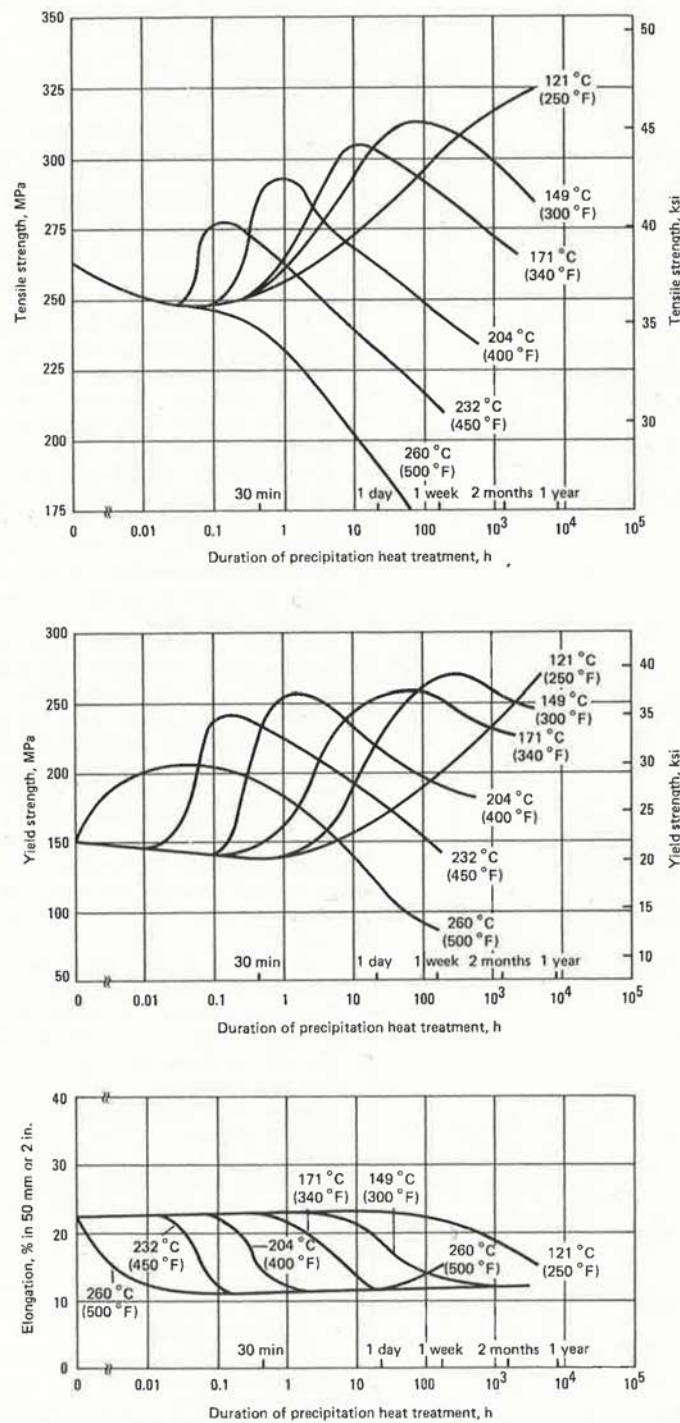
Pouvez-vous m'expliquer ce qui a pu se passer ? La déformation accidentelle, ou la rectification ont-ils pu entraîner une telle chute des propriétés ? Est-ce réversible ?”

Que lui répondez-vous ?

Exercice 3-13

Ci-dessous vous trouverez trois courbes donnant l'évolution de la résistance mécanique en traction (tensile strength), de la limite d'élasticité (yield strength) et de l'élongation à rupture (elongation) de l'alliage 6061 en fonction du temps de revenu après homogénéisation (à 529°C) et trempe à l'eau.

Fig. 9c Typical artificial precipitation hardening aging curves for alloy 6061 sheet



(a) Quels sont les atomes formant des précipités durcissants dans cet alliage ?

(b) Sur la figure ci-dessus, indiquez (sur l'axe horizontal de la figure du haut) la gamme de temps de revenu à 149°C permettant d'obtenir une résistance mécanique en traction (tensile strength) égale ou supérieure à 300 MPa

(c) Du temps le plus court et du temps le plus long dans la gamme de temps de revenu à 149°C indiquée en (b), lequel donne la meilleure limite d'élasticité et quelle est la valeur de celle-ci ? (2 points).

(d) Du temps le plus court et du temps le plus long dans la gamme de temps de revenu à 149°C indiquée en (b), lequel donne le meilleur allongement à rupture et quelle est la valeur de celui-ci ?

(e) Si après un revenu à 149°C l'alliage 6061 est déformé pour être allongé de quelque %, comment est-ce que cela va affecter qualitativement la limite d'élasticité et la résistance en traction ?

Exercice 3-14

Sur la page suivante vous trouverez des données et graphes extraits du «ASM Handbook », livre de référence pour les propriétés des métaux et alliages, ici pour l'alliage 6061.

L'état O désigne un alliage qui n'a pas subi d'autre traitement thermique qu'un recuit complet visant à minimiser sa dureté après déformation.

L'état T4 désigne un alliage qui a été soumis à un traitement de mise en solution puis a été trempé.

L'état T6 désigne un alliage qui a été soumis à un traitement de mise en solution puis a été trempé, comme pour l'état T4, puis a été soumis à un traitement de revenu (« aging ») jusqu'au maximum de dureté à la température de revenu en question.

a – L'alliage 6061 est-il un alliage de corroyage ou de fonderie ?

b – Pourquoi pouvez-vous dire en regardant sa composition (ou le premier chiffre de sa désignation) que c'est un alliage que l'on peut durcir par durcissement structural ?

c – Quelle est la raison physique pour laquelle l'état T6 donne un alliage plus dur que l'état T4 ?

d – Pouvez-vous donner une explication au fait que la limite d'élasticité et la contrainte à rupture de l'alliage à l'état T6 commencent à chuter de façon plus abrupte au-delà de 150 °C (Tableau 84)?

e – Quelle est l'utilité de l'état O pour cet alliage; en d'autres mots quand est-il bénéfique que l'alliage soit dans cet état de dureté minimale ?

6061 Alclad 6061
1.0Mg-0.6Si-0.30Cu-0.20Cr

Specifications

AMS. See Table 82.

ASTM. See Table 82.

UNS. A96061

Government. See Table 82.

Foreign. Canada: CSA GS11N. France: NF A-G5UC. United Kingdom: BS H20. ISO: AlMg1SiCu

Chemical Composition

Composition limits of 6061. 0.40 to 0.8 Si, 0.7 Fe max, 0.15 to 0.40 Cu, 0.15 Mn max, 0.8 to 1.2 Mg, 0.04 to 0.35 Cr, 0.25 Zn max, 0.15 Ti max, 0.05 max other (each), 0.15 max others (total), bal Al

Composition limits of Alclad 6061. 7072 cladding—0.7 Si max + Fe, 0.10 Cu max, 0.10 Mn max, 0.10 Mg max, 0.8 to 1.3 Zn, 0.05 max other (each), 0.15 max others (total), bal Al

Fabrication Characteristics

Solution temperature. 530 °C (985 °F)

Aging temperature. Rolled or drawn products: 160 °C (320 °F); hold at temperature for 18 h. Extrusions or forgings: 175 °C (350 °F); hold at temperature for 8 h

Applications

Typical uses. Trucks, towers, canoes, railroad cars, furniture, pipelines, and other structural applications where strength, weldability, and corrosion resistance are needed

Mechanical Properties

Tensile properties. See Tables 83 and 84.

Shear strength. See Table 83.

Hardness. O temper: 30 HB; T4, T451 tempers: 65 HB; T6, T651 tempers: 95 HB. Data obtained using 500 kg load, 10 mm diam ball, and 30 s duration of loading

Elastic modulus. Tension, 68.9 GPa (10.0×10^6 psi); compression, 69.7 GPa (10.1×10^6 psi)

Fatigue strength. O temper: 62 MPa (9 ksi). T4, T451, T6, and T651 tempers: 97 MPa (14 ksi). Data correspond to 5×10^8 cycles of completely reversed stress in R.R. Moore type tests.

Mass Characteristics

Density. 2.70 g/cm³ (0.098 lb/in.³) at 20 °C (68 °F)

Table 83 Typical mechanical properties of alloy 6061

Temper	Tensile strength		Yield strength		Elongation, %		Shear strength	
	MPa	ksi	MPa	ksi	1.6 mm (1/16 in.) thick specimen	13 mm (1/2 in.) diam specimen	MPa	ksi
Bare 6061								
O.....	124	18	55	8	25	30	83	12
T4, T451	241	35	145	21	22	25	165	24
T6, T651	310	45	276	40	12	17	207	30

Table 84 Typical tensile properties of alloy 6061-T6 or T651 at various temperatures

Temperature		Tensile strength(a)		Yield strength (0.2% offset)(a)		Elongation, %
°C	°F	MPa	ksi	MPa	ksi	
-196	-320.....	414	60	324	47	22
-80	-112.....	338	49	290	42	18
-28	-18.....	324	47	283	41	17
24	75.....	310	45	276	40	17
100	212.....	290	42	262	38	18
149	300.....	234	34	214	31	20
204	400.....	131	19	103	15	28
260	500.....	51	7.5	34	5	60
316	600.....	32	4.6	19	2.7	85
371	700.....	24	3	12	1.8	95

(a) Lowest strength for exposures up to 10 000 h at temperature, no load; test loading applied at 35 MPa/min (5 ksi/min) to yield strength and then at strain rate of 5%/min to fracture

Exercice 3-15

La densité de l'aluminium est de 2.7 g/cm^3 ; celle de la phase $\beta = \text{Al}_3\text{Mg}_2$, est de 2.3 g/cm^3 .
A 100°C , quelle est la fraction volumique de phase Al_3Mg_2 au sein d'un alliage d'Al-5%pdsMg ?

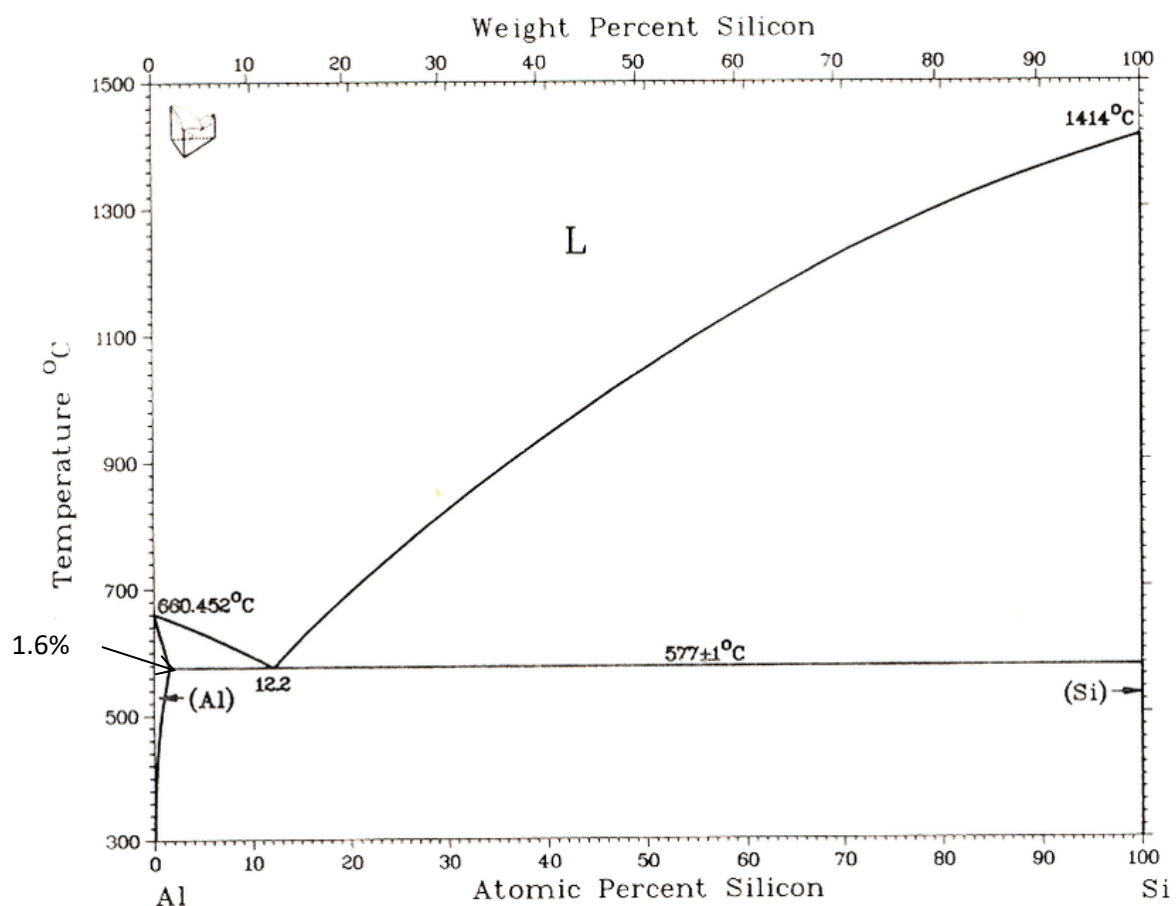
(Nota: la loi du levier utilisée avec des compositions en % massique donne les fractions massiques; de même avec les compositions en % atomique on obtient les fractions atomiques)

Exercice 3-16

Sur la page suivante vous trouverez des données et graphes extraits du «ASM Handbook», livre de référence pour les propriétés des métaux et alliages. Ce sont les pages portant sur l'alliage 356 (j'y ai masqué ce qui se rapporte à d'autres alliages), dont la composition est en moyenne Al avec 7%pdsSi et 0.3%pdsMg. C'est un des alliages de fonderie les plus usuels (sinon le plus usuel).

a – Qu'est-ce qui dans sa désignation vous indique que c'est un alliage de fonderie et non de corroyage ?

b – On y voit que c'est un alliage qui se prête au durcissement structural (« aging » = revenu de précipitation); que contiennent les précipités ?



c – Ci-dessus vous trouverez le diagramme de phase Al-Si (vu en cours). Pour décrire sa solidification, assimilez l'alliage à un alliage binaire Al-Si (donc ignorez ici la présence de

magnésium dans l'alliage). Quelle est la fraction massique de l'eutectique dans cet alliage et quelles phases l'eutectique contient-il ?

d - Pouvez-vous faire dans ce petit rectangle sous le diagramme de phase un sketch de la microstructure de cet alliage après coulée et solidification (ne vous souciez pas de l'échelle) ?



e - Le Tableau 36 de la feuille de données reproduite du ASM Handbook ci-dessous vous donne les température de mises en solution (solution temperature) et de revenu (aging temperature). En Tableau 31 les propriétés en traction en fonction de la température de l'alliage à l'état de traitement thermique T6.

Pour une utilisation de l'alliage à 170°C, pourquoi vaut-il mieux l'utiliser à l'état T7 qu'à l'état T6 ?

**356.0, A356.0
7Si-0.3Mg**

Specifications

AMS. 356.0: 4217, 4260, 4261, 4284, 4285, 4286. A356.0: 4218
Former ASTM. 356.0, SG70A; A356.0, SG70B
SAE. 356.0: J452, 323
UNS number. 356.0: A03560. A356.0: A13560
Government. 356.0: QQ-A-601, QQ-A-596. A356.0: MIL-C-21180 (class 12)
Foreign. ISO: AISi7Mg

Chemical Composition

Composition limits. 356.0: 0.25 Cu max, 0.20 to 0.45 Mg, 0.35 Mn max, 6.5 to 7.5 Si, 0.6 Fe max, 0.35 Zn max, 0.25 Ti max, 0.05 other (each) max, 0.15 others (total) max, bal Al. A356.0: 0.20 Cu max, 0.25 to 0.45 Mg, 0.10 Mn max, 6.5 to 7.5 Si, 0.20 Fe max, 0.10 Zn max, 0.20 Ti max, 0.05 other (each) max, 0.15 others (total) max, bal Al
Consequence of exceeding impurity limits. High copper or nickel decreases ductility and resistance to corrosion. High iron decreases strength and ductility.

Applications

Typical uses. 356.0: aircraft pump parts, automotive transmission cases, aircraft fittings and control parts, water-cooled cylin-

der blocks. Other applications where excellent castability and good weldability, pressure tightness, and good resistance to corrosion are required. A356.0: aircraft structures and engine controls, nuclear energy installations, and other applications where high-strength permanent mold or investment castings are required

Mechanical Properties

Tensile properties. See Tables 29 through 33.
Compressive yield strength. See Table 29.
Poisson's ratio. 0.33
Elastic modulus. Tension, 72.4 GPa (10.5 × 10⁶ psi); shear, 27.2 GPa (3.95 × 10⁶ psi)
Creep-rupture characteristics. See Table 34.

Mass Characteristics

Density. 2.685 g/cm³ (0.097 lb/in.³) at 20 °C (68 °F)

Fabrication Characteristics

Melting temperature. 675 to 815 °C (1250 to 1500 °F)
Casting temperature. 675 to 790 °C (1250 to 1450 °F)
Solution temperature. See Table 36.
Aging temperature. See Table 36.
Joining. Same as alloy 514.0

Table 31 Typical tensile properties of separately cast test bars of alloy 356.0-T6

Temperature		Tensile strength(a)		Yield strength(a)		Elongation(a)(b), %
°C	°F	MPa	ksi	MPa	ksi	
24	75	230	33	165	24	3.5
150	300	160	23	140	20	6.0
205	400	85	12	60	8.5	18
260	500	50	7.5	35	5.0	35
315	600	30	4.0	20	3.0	60

(a) Strengths and elongations remain unchanged or improve at low temperatures. (b) In 50 mm or 2 in.

Table 36 Heat treatments for separately cast test bars of alloys 356.0 and A356.0

Purpose (and resulting temper)	Temperature		Time at temperature, h
	°C	°F	
Sand castings			
Solution	535–540	995–1005	12(a)(b)
Aging			
T51(c)	225–230	435–445	7–9
T6(d)	150–155	305–315	2–5
T7(d)(e)	225–230	435–445	7–9
T71(d)	245–250	470–480	2–4
Permanent mold castings			
Solution	535–540	995–1005	8(a)(b)
Aging(f)			
T6(d)	150–155	305–315	3–5

(a) Soaking-time periods required for average casting after load has reached specified temperature. Time can be decreased or may have to be increased, depending on experience with particular castings. (b) Cool in water at 65 to 100 °C (150 to 212 °F). (c) No solution heat treatment. (d) Start with solution heat-treated material. (e) U.S. Patent 1,822,877. (f) Except for temper listed under this head, temperature values for all tempers are the same as for sand castings.

Exercice 3-17

La microstructure initiale de trois échantillons ayant la forme de plaques à section rectangulaire de dimensions 15 x 15 x 5 mm, en aluminium pur à 99.5%, déformés puis recuits à 600 °C pendant 6h, est représentée en Fig. 3 ci-dessous.

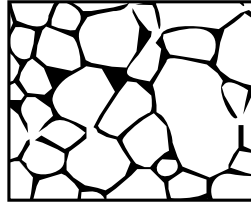


Fig. 3 : Microstructure des échantillons d'aluminium pur 99.5 % recuits à 600 °C pendant 6h. Grossissement 100X (1 cm correspond à 100 µm)

Ces trois échantillons subissent ensuite les traitements suivants :

- 1) L'échantillon 1 est déformé à froid à l'aide d'un laminoir pour réduire son épaisseur à 4.6 mm, ce qui correspond à un taux de déformation en compression de $e = 8.3 \%$. Cet échantillon 1 subit ensuite un recuit d'1h à 500 °C.
- 2) L'échantillon 2 est déformé à froid à l'aide d'un laminoir pour réduire son épaisseur à 4.4 mm, ce qui correspond à un taux de déformation en compression de $e = 12.8 \%$. Cet échantillon 2 subit ensuite un recuit d'1h à 500 °C.
- 3) L'échantillon 3 subit uniquement un recuit d'1h à 500 °C.

a) - À quel numéro d'échantillon correspondent chacune des trois microstructures ci-dessous, prises au même grossissement que la Fig. 3 ?

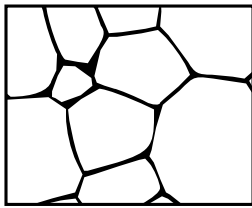


Fig. 4

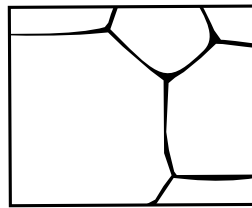


Fig. 5

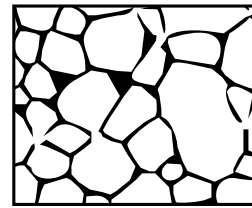


Fig. 6

Figure 4: Echantillon n° ____ car _____

Figure 5: Echantillon n° ____ car _____

Figure 6: Echantillon n° ____ car _____

b) - Lequel de ces trois échantillons aura la dureté la plus élevée et pourquoi ?
L'échantillon n° ____

Exercice 3-18

Considérons l'alliage d'aluminium 2014.

Son module d'Young est de $E = 72 \text{ GPa}$ et son coefficient de Poisson est $\nu = 0.33$.

Sa limite d'élasticité σ_y à l'état T4 (= homogénéisé et trempé) est $\sigma_y = 300 \text{ MPa}$ à 20°C.

Quand la température augmente, σ_y diminue jusqu'à environ $\sigma_y = 40 \text{ MPa}$ à 300°C et jusqu'à

$\sigma_y = 20 \text{ MPa}$ à 400°C . Le coefficient de dilatation thermique α moyen de l'alliage entre 500 et 20°C est

$$\alpha = 25 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}.$$

a – Quel est l'élément d'alliage principal de cet alliage d'aluminium ?

b – Cet alliage est « durcissable », voulant dire apte au durcissement structural.

L'homogénéisation de cet alliage se fait à $T_{\text{hom}} = 502^\circ\text{C}$.

Pourquoi l'alliage est-il refroidi rapidement (ou en d'autres mots trempé = quenched en anglais) après son homogénéisation ?

c – Si les pièces trempées de cet alliage sont relativement épaisses, suite à leur trempe après homogénéisation, elles peuvent contenir des contraintes internes conséquentes. Pour illustration, la figure ci-dessous donne le profil et les valeurs des contraintes internes longitudinales, tangentiels et radiales dans un barreau cylindrique, de rayon environ égal à 13 cm et de longueur nettement supérieure à son rayon, en alliage 2014 trempé à partir de sa température d'homogénéisation à 502°C dans l'eau à 20°C .

Par analogie avec la trempe du verre (que vous avez vue en cours), pouvez-vous expliquer pourquoi et comment ces contraintes thermiques résiduelles se sont formées pendant la trempe ?

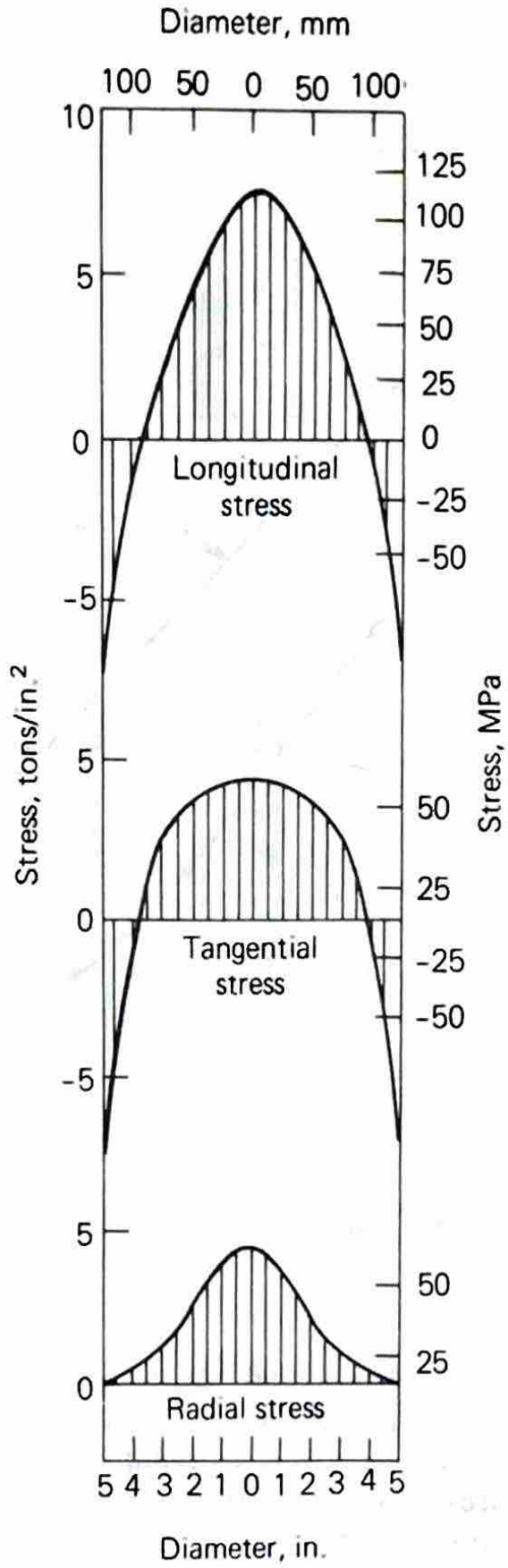


Fig. 31. Residual stress diagram for 2014 alloy quenched in cold water from 500 °C (935 °F).

d – Dans la figure ci-dessus, les contraintes de compression sont-elles comptées comme négatives ou positives ?

e – Montrez que, si la contraction thermique (en raison de la trempe décrit en c)) est entièrement compensée par une déformation purement élastique, on prévoit des contraintes internes qui dépassent la limite d'élasticité de l'alliage.

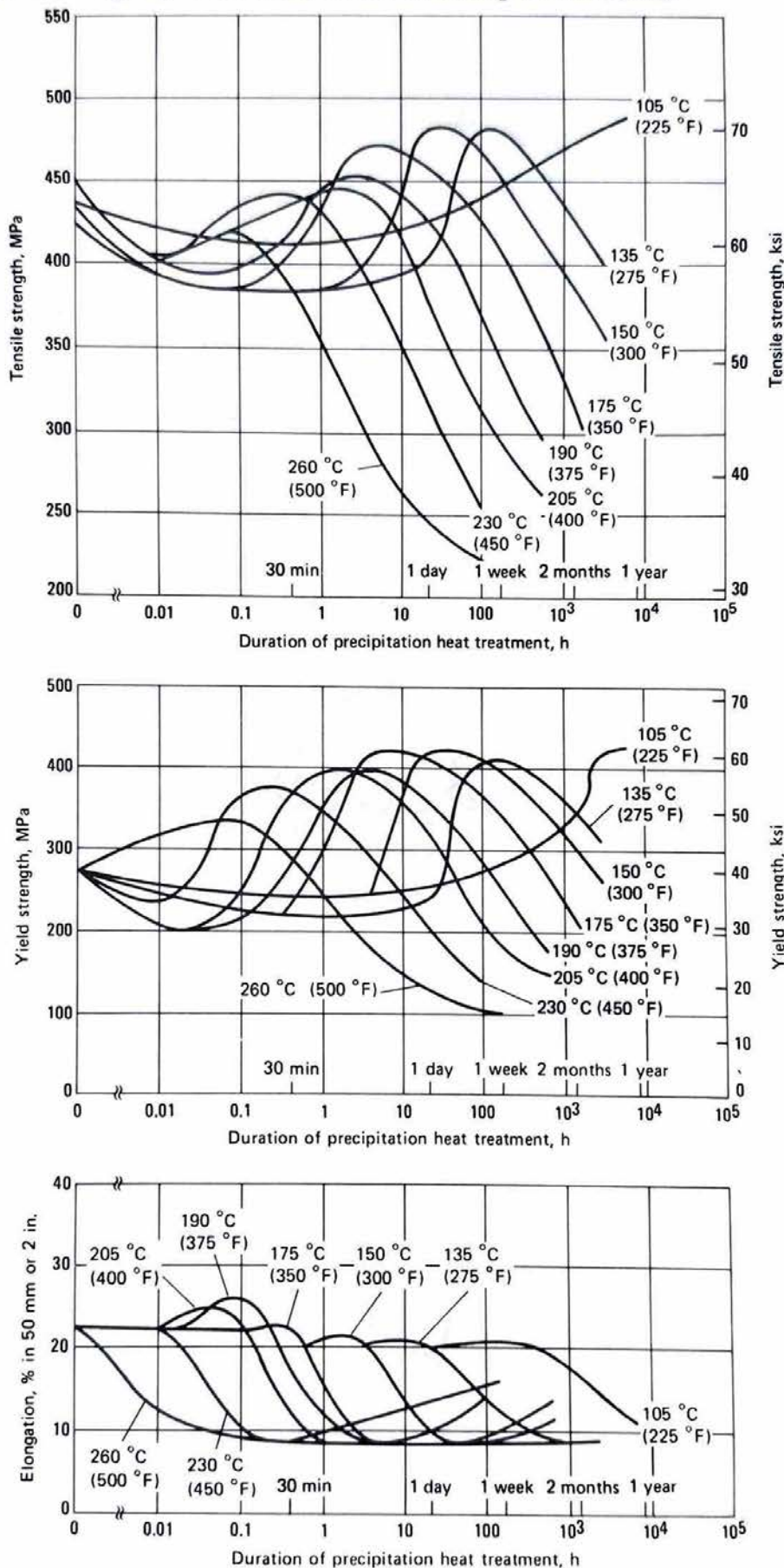
f – Quelle est la conséquence du résultat en (e) ?

g - Pouvez-vous donner un exemple de situation où ces contraintes internes d'origine thermique créent des problèmes pendant l'élaboration de pièces à partir de ce cylindre ?

h – Après homogénéisation et trempe, on procède habituellement à un revenu de l'alliage, afin de former les précipités qui vont durcir l'alliage. La figure ci-dessous donne l'évolution des trois propriétés mécaniques principales en traction (résistance mécanique en traction = tensile strength, limite d'élasticité = yield strength = σ_y et élongation à rupture = elongation-to-failure) de l'alliage 2014 en fonction du temps de revenu, pour plusieurs températures de revenu.

Pour quelle température de revenu obtient-on la meilleure élongation à rupture avec une limite d'élasticité $\sigma_y = 400$ MPa et quelle est cette élongation ?

Fig. 20a Aging characteristics of alloy 2014 sheet



i – Dans l'industrie, un revenu de 8 à 16 heures à 190°C est généralement pratiqué. Pourquoi ?

Exercice 3-19 – page suivante vous voyez un cliché, pris au microscope électronique à transmission, d'un alliage d'aluminium de la série 7xxx durci par mise en solution, trempe et revenu. On y voit ce qu'on appelle une zone libre de précipités (precipitate free zone, PFZ): les joints de grain contiennent de gros précipités, l'intérieur des grains contient des précipités plus petits et entre les deux on trouve une bande d'aluminium exempte de précipités.

a – La présence de précipités le long du joint de grain indique que leur germination y a été facilitée. Supposez que le précipité ait, y compris à l'état de germe, et tant au cœur du cristal d'aluminium que le long d'un joint de grains d'aluminium, à tout instant la forme d'une sphère.

Quelle est la différence d'énergie libre interne entre un précipité formé dans le cristal loin d'un joint de grain, et un précipité identique logé symétriquement (à son équateur) le long d'un joint de grain (nota: en réalité le précipité va changer de forme le long du joint de grain pour équilibrer les forces capillaires, mais ne nous soucions pas de cela ici) ?

b – Supposez que les précipités germinent pendant le revenu plus tôt le long du joint de grain qu'ailleurs. Pourquoi cela pourrait-il expliquer la présence d'une bande le long des joints de grain exempte de précipités en volume ?

c - A votre avis la présence de telles PFZ est-elle bonne pour les propriétés mécaniques de l'alliage et pourquoi ?

d – Certains éléments d'alliage additionnels (autres que les éléments d'alliage de la série 7xxx, à savoir Zn et Mg) ont tendance à ségréger vers les joints de grain car ils abaissent l'énergie d'interface de ces derniers. A votre avis de tels éléments ont-ils le potentiel de réduire la formation de ces PFZs dans les alliages de la série 7xxx ?

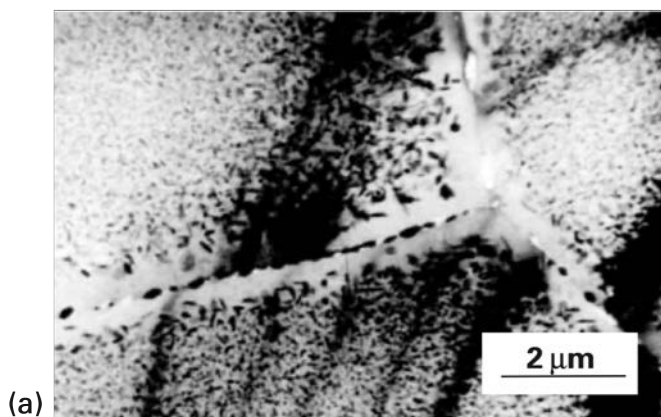


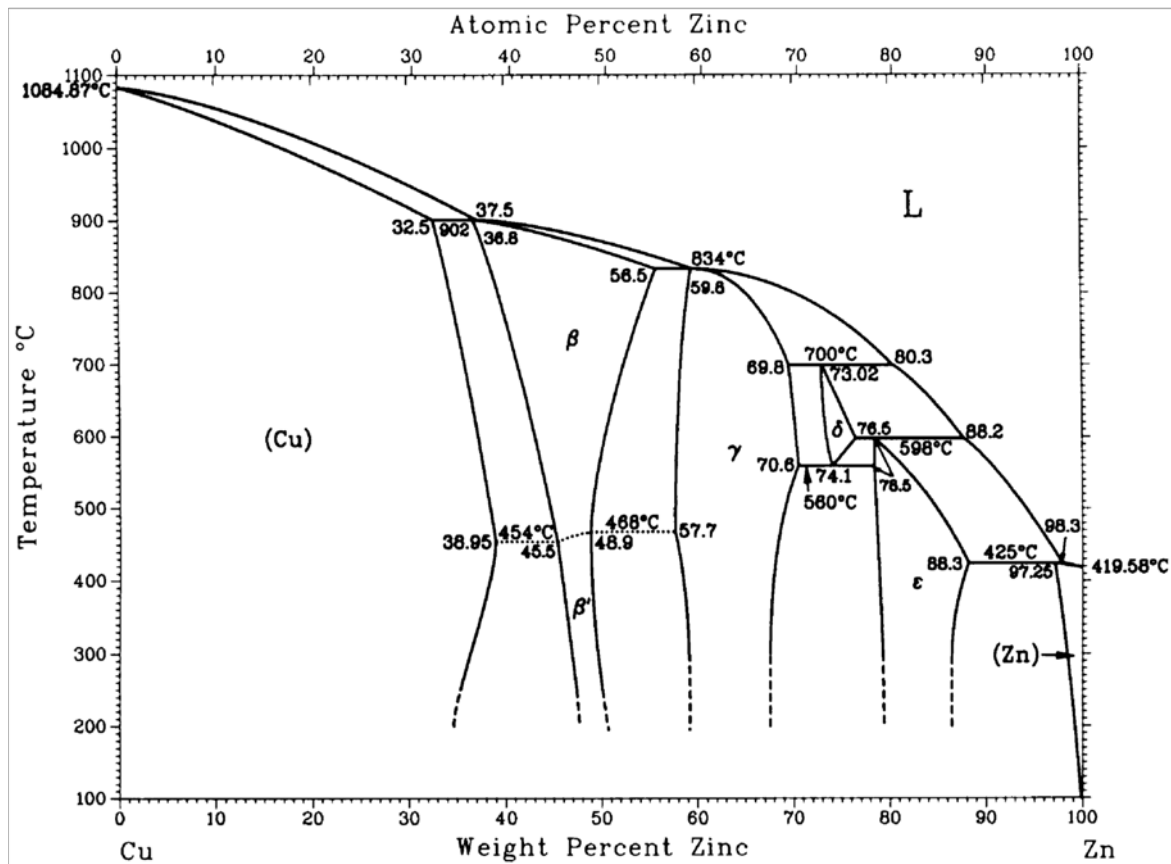
Fig. 10.17 (a) Al-Zn-Mg alloy showing precipitate-free zone along grain boundaries. (b) Spinodally decomposed Cu-Ni-Fe alloy resulting from aging within the ternary miscibility gap. The light phase is Cu rich, the dark phase, Ni-Fe rich. (Courtesy of G. Thomas.)

Figure : cliché pris au microscope électronique à transmission d'un alliage d'aluminium de la série 7xxx durci par mise en solution, trempe et revenu montrant ce qu'on appelle une zone libre de précipités (precipitate free zone, PFZ).

Exercice 3-20

Ci-dessous vous trouverez le diagramme binaire Cu-Zn. Pour rappel, le fait que les lignes verticales du diagramme sont en pointillé en dessous d'une certaine température dans le diagramme indique que dans ces gammes de température inférieures la composition des phases en présence cesse d'évoluer car la diffusion devient trop lente. En d'autres mots, quand la ligne

verticale devient pointillée la microstructure cesse d'évoluer lors du refroidissement de l'alliage.



Pouvez-vous répondre aux questions suivantes:

a – Quelle est la teneur en zinc maximale des laitons monophasés ?

b – quelle est la teneur en zinc habituelle du laiton biphasé ?

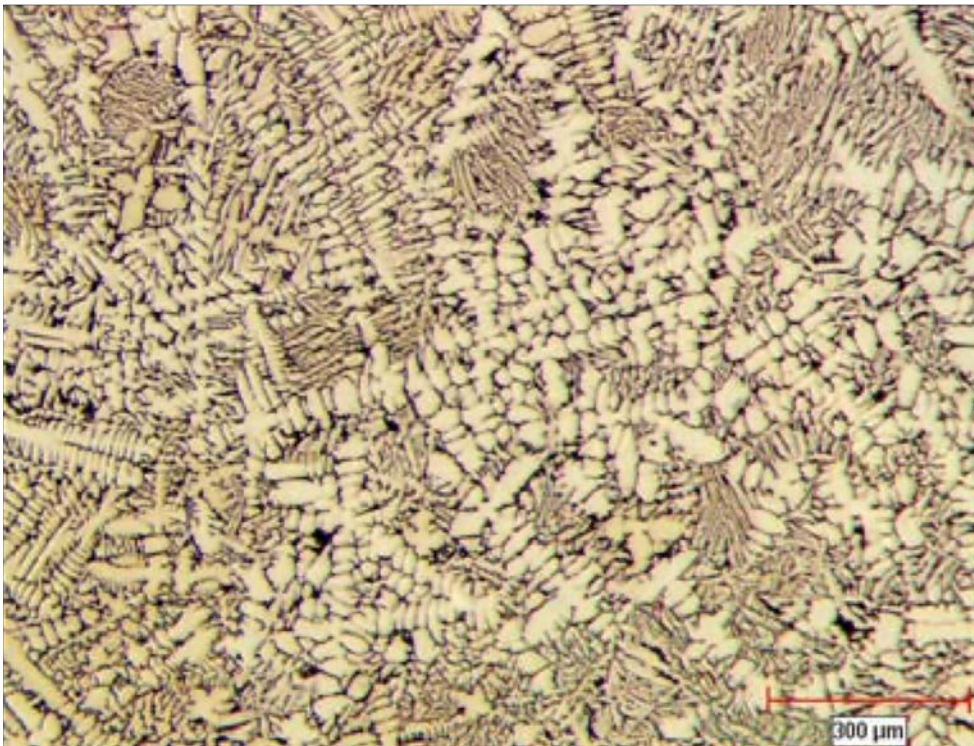
c - quelle est la différence entre les phases β et β' ?

d – Pourquoi le laiton biphasé est-il habituellement mis en forme à température élevée (“à chaud”) ?

e – La pièce en laiton ci-dessous a été mise en forme par emboutissage puis a servi dans un environnement comportant de l'ammoniaque en solution aqueuse. Par quel mécanisme s'est-elle fissurée et quelle solution pouvez-vous proposer pour que cet alliage puisse être utilisé dans cet environnement sans se fissurer ?



f – Ci-dessous vous trouverez une microstructure de l’alliage Cu-36% Zn brut de coulée. La structure a été polie puis soumise à une attaque chimique qui rend la couleur du métal d’autant plus foncée que sa teneur en zinc est élevée.

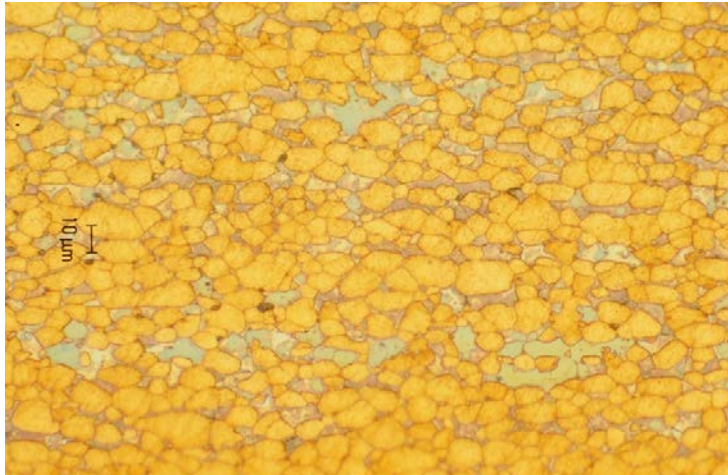


On voit des variations dans la couleur de ce métal et donc de la teneur en zinc, au sein de cette structure brute de coulée d’un métal censé être monophasé selon le diagramme de phase. Comment ce phénomène s’appelle-t-il et à quoi est-il dû ?

g – Est-il possible que l’on trouve la phase β' au sein de cette microstructure et pourquoi ?

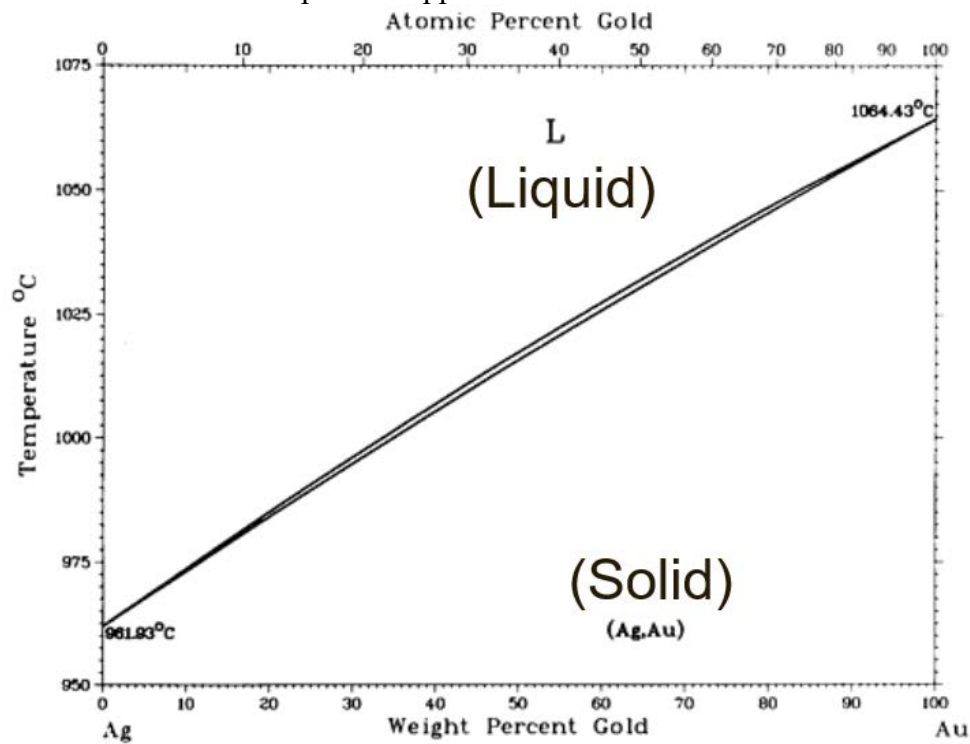
h - Quel traitement préconiseriez-vous pour réduire ou supprimer les gradients de concentration en zinc au sein de cette structure de l’alliage Cu-36%Zn ? (donnez les valeurs de paramètres là où vous le pouvez) ?

i – ci-dessous vous trouverez la microstructure d’un laiton biphasé. Pouvez-vous indiquer les phases en présence dans cette microstructure (marquez-les directement sur la micrographie) ?



Exercice 3-21

Le diagramme de phase Au-Ag* est donné ci-dessous. En dessous de 950 °C il ne montre rien : la solubilité mutuelle reste totale entre ces deux métaux de structure cristalline cubique à faces centrées et aucune autre phase n'apparaît.



(*ces alliages d'or et d'argent, souvent avec un peu d'autres métaux comme le cuivre ou le platine et connus sous le nom d' "electrum", sont produits depuis l'antiquité (3^{ème} millénaire avant JC en Egypte); la pièce en "electrum" dont l'image apparaît à gauche date de la civilisation Lydienne au 6^{ème} siècle avant JC).

a – Quelle est à 20°C la structure d'équilibre de ces alliages ?

b – Si on les déforme après solidification, ces alliages peuvent être durcis par trois mécanismes de durcissement. Nommez ces trois mécanismes et détaillez comment vous feriez pour les appliquer tous dans une même pièce de ce métal fortement déformée en phase solide.

c – Pouvez-vous nommer un alliage du cuivre et un alliage du fer, tous deux vus dans ce cours et qui ont une structure d'équilibre similaire à celle des alliages Au-Ag ?

Exercice 3-22

Ci-dessous vous trouverez des données extraites du *Metals Handbook*, décrivant un alliage de cuivre allié avec du chrome et du zirconium, plus 400 ppm de magnésium.

Table 38 Nominal mechanical properties of C18100 strip and wire

Temper	Tensile strength		Yield strength		Elongation in 50 mm (2 in.), %
	MPa	ksi	MPa	ksi	
Strip					
Cold worked (40% reduction)	460	67	430	62	6
Cold worked (40% reduction), aged	495	72	455	66	10
Wire					
Cold worked (60% reduction)	480	70	435	63	6
Cold worked (60% reduction), aged	515	75	470	68	11
Cold worked (75% reduction)	495	72	455	66	5
Cold worked (75% reduction), aged	550	80	475	69	12
Cold worked (90% reduction)	500	73	455	66	4
Cold worked (90% reduction), aged	585	85	515	75	13

C18100

99Cu-0.8Cr-0.16Zr-0.04Mg

Chemical Composition

Composition limits. 0.4 to 1.2 Cr, 0.05 to 0.3 Zr, 0.03 to 0.06 Mg

Applications

Typical uses. Resistance welding electrodes and wheels, switches, circuit breakers, high-temperature wire, semiconductor bases, heat sinks, and continuous casting molds

Mechanical Properties

Tensile properties. See Table 38.

Hardness. See Table 38.

Elastic modulus. 125 GPa (18.2 × 10⁶ psi)

Mass Characteristics

Density. 8.88 g/cm³ (0.319 lb/in.³) at 20 °C (68 °F)

Thermal Properties

Liquidus temperature. 1075 °C (1967 °F)

Thermal conductivity. 324 W/m · K (187 Btu/ft · h · °F) at 20 °C (68 °F)

Coefficient of linear thermal expansion. 16.7 μm/m · K (9.3 μin./in. · °F) at 20 to 100 °C (68 to 212 °F); 18.4 μm/m · K (10.2 μin./in. · °F) at 20 to 200 °C (68 to 392 °F); 19.3 μm/m · K (10.7 μin./in. · °F) at 20 to 300 °C (68 to 572 °F)

Electrical Properties

Electrical conductivity. Volumetric, 80% IACS at 20 °C (68 °F), annealed

Electrical resistivity. 21.7 nΩ · m at 20 °C (68 °F), annealed

Fabrication Characteristics

Formability. Excellent capacity for both cold and hot forming

Weldability. Solderability, excellent; brazing and gas-shielded arc welding, good; butt resistance welding, fair. Oxyacetylene, spot, and seam resistance welding are not recommended.

Annealing temperature. 600 to 700 °C (1110 to 1300 °F)

Heat-treating temperatures. Solution treatment: 900 to 975 °C (1650 to 1790 °F) for 1 h. Aging treatment: 400 to 500 °C (750 to 930 °F) for 1 h

Hot-working temperature. 790 to 925 °C (1450 to 1700 °F)

a – Pouvez-vous définir ce à quoi correspond le terme « réduction » utilisé dans la première colonne de ce tableau de données ?

b – Quel est l'allongement relatif (engineering strain) ϵ total du métal après une « réduction » de X% ?

c – L'étape de précipitation (aging) du traitement thermique de durcissement structural a lieu après écrouissage (cold work). A quoi voit-on dans ces données que l'augmentation de la limite d'élasticité obtenue dans cet alliage après durcissement structural dépend de l'état d'écrouissage du métal ? Pouvez-vous donner une explication (sous forme d'un mécanisme physique) à cela ?

d – Cet alliage est un bon conducteur, aux propriétés mécaniques élevées, faisant qu'il est utilisé pour des applications telles que des électrodes de soudure, des composants de circuits électriques, ou des éléments devant conduire la chaleur.

Qu'est-ce qui indique, parmi les caractéristiques données ici (autres que ses applications), qu'il est bon conducteur ?

e – A votre avis cet alliage est-il susceptible à la maladie de l'hydrogène ?

f – A votre avis la mise en solution de l'alliage est-elle faite avant ou après écrouissage ?

Exercice 3-23

Quelle sera la microstructure d'un alliage de Cu-10%pdsAl refroidi lentement après un maintien prolongé à la température de 900°C ?

(Nota: le diagramme de phase s'arrête à 350 degrés: la raison est qu'en-dessous de 400-350°C, selon la vitesse de refroidissement, la cinétique de transformation est si lente que les transformations de phase correspondantes progressent trop lentement pour être observées.

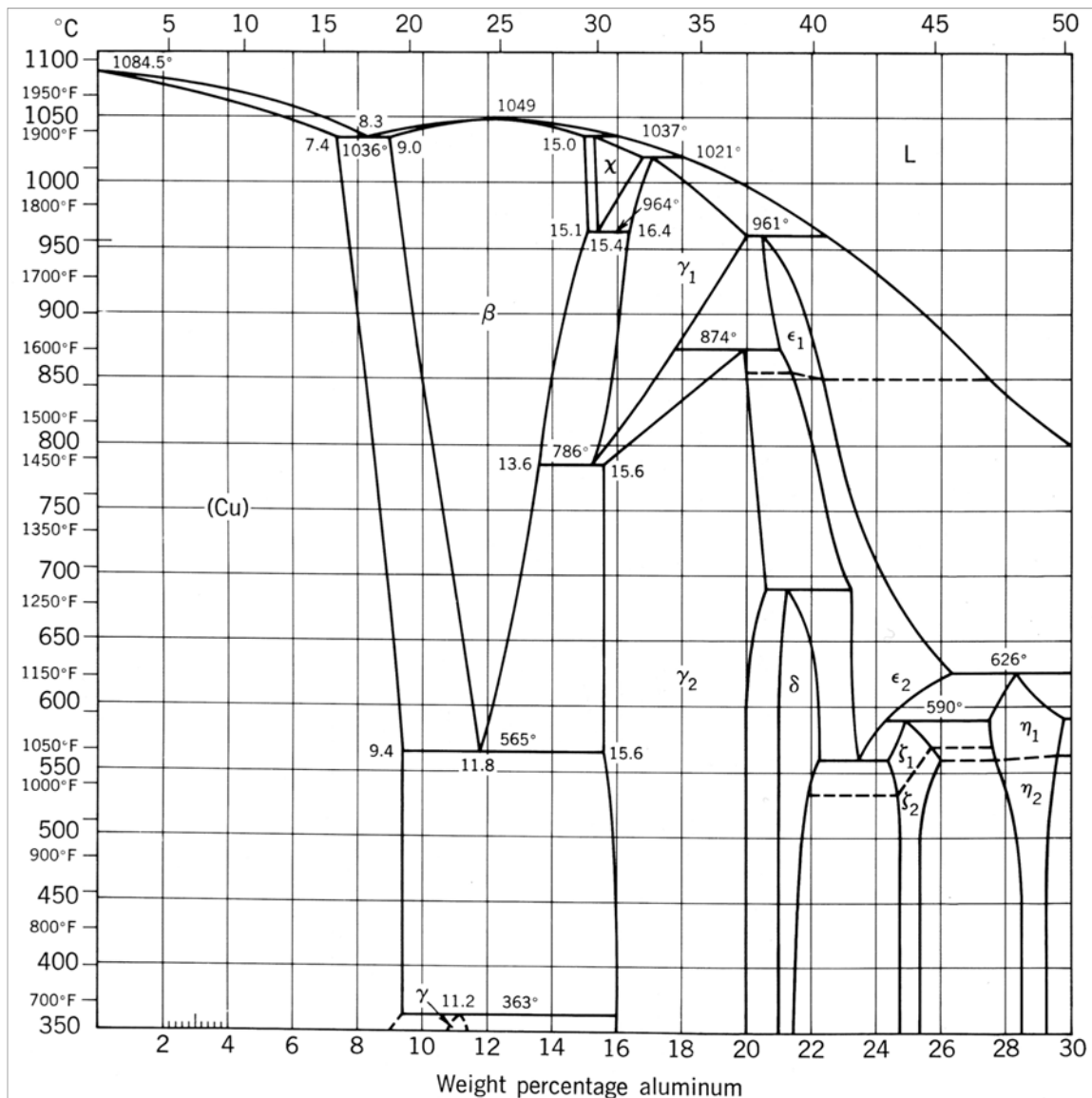


FIGURE III-40 – Diagramme de phase d'équilibre du système Cu-Al pour les alliages riches en Cu.
 Source: R.M. Brick, A.W. Pense, R.B. Gordon, *Structure and Properties of Engineering Materials*, 4th Edition, McGraw-Hill, USA, 1977.

Exercice 3-24

Vous travaillez toujours pour l'entreprise Metal Rigolade & Co, laquelle s'est reconvertie dans les alliages du cuivre. Votre chef, Jacques Wunderboss, vous envoie le mémorandum suivant.

“Nous avons un problème avec un de nos clients. Il a livré pour un grand hotel une centaine d'éviers produits avec notre laiton 70-30. Ces éviers de salle de bain sont produits par emboutissage à froid et polis sur leur surface interne, puis sont montés sans autre opération. Ce client n'est pas content car ces éviers se fissurent, tout seuls, surtout s'ils sont nettoyés souvent. Il nous accuse de lui avoir livré un laiton défectueux.

Que lui répondez-vous ?

b - Jacques Wunderboss vous demande aussi si vous pouvez trouver une solution pour remédier à la situation. Que lui répondez-vous ?