



**MTR 1035A**

**Sigle du cours**

<i>Identification de l'étudiant(e)</i>				<i>Réservé</i>
Nom :		Prénom :		Q1 /2
Signature :		Matricule :		Q2 /6
				Q3 /5
<i>Sigle et titre du cours</i>		<i>Groupe</i>	<i>Trimestre</i>	Q4 /7
MTR1035A - Matériaux		01	Hiver 2015	
<i>Professeur</i>		<i>Local</i>	<i>Téléphone</i>	Q5 /5
Gilles L'Espérance		Voir directives particulières	4532	
<i>Jour</i>	<i>Date</i>	<i>Durée</i>	<i>Heure</i>	
Lundi	23 mars	1 h 20	10 h 00	
<i>Documentation</i>		<i>Calculatrice</i>		
<input checked="" type="checkbox"/> Aucune		<input type="checkbox"/> Aucune		Les cellulaires, agendas électroniques ou téléavertisseurs sont interdits.
<input type="checkbox"/> Toute		<input type="checkbox"/> Toutes		
<input type="checkbox"/> Voir directives particulières		<input checked="" type="checkbox"/> Non programmable		
<b>/25</b>				
<i>Directives particulières</i>				
<b>Important</b>	Cet examen contient <input type="text" value="5"/> questions sur un total de <input type="text" value="14"/> pages			
	La pondération de cet examen est de <input type="text" value="25"/> %			
	Vous devez répondre sur : <input checked="" type="checkbox"/> le questionnaire <input type="checkbox"/> le cahier <input type="checkbox"/> les deux			
	Vous devez remettre le questionnaire : <input checked="" type="checkbox"/> oui <input type="checkbox"/> non			

L'étudiant doit honorer l'engagement pris lors de la signature du code de conduite.

**Exercice N°1****(2 points)**

- a) Une plaque de verre relativement grande est soumise à une contrainte de traction de 50MPa. L'énergie de surface et le module d'élasticité de ce verre sont respectivement de 0.3 J/m<sup>2</sup> et de 69 GPa. Cette plaque possède une entaille de forme semi-elliptique de profondeur **a**. En supposant que la concentration de contrainte créée par ce défaut est suffisante pour que la condition mécanique de rupture soit remplie, quelle est la longueur maximale **a** (en μm) que peut avoir l'entaille sans provoquer la rupture de la plaque ? **(1 point)**

$$I_c = a^* = \frac{2E\gamma_s}{\pi\sigma^2}$$

$$I_c = a^* = \frac{2 * 69 \times 10^9 * 0.3}{\pi(50 \times 10^6)^2}$$

$$I_c = a^* = 5.271 \times 10^{-6}m$$

$$I_c = a^* = 5.271\mu m$$

<b>a</b> =	5.27	μm
------------	------	----

- b) Un acier allié 4140 à l'état trempé et revenu est pressenti pour la fabrication de câbles pour un nouveau pont. Les propriétés de cet acier sont données dans le tableau suivant :

E (GPa)	Re <sub>0,2</sub> (MPa)	R <sub>M</sub> (MPa)	A %	KIC (MPa√m)	ρ (g/cm <sup>3</sup> )
207	1550	1700	10	73	7.85

Lors de la manipulation et l'installation des câbles, des rayures (fissures) superficielles seront inévitablement produites. Quelle serait la profondeur maximale, en mm, de telles rayures (fissures) pour éviter que les câbles se brisent de façon brutale? Vous pouvez supposer que ces rayures peuvent être caractérisées par un facteur géométrique  $\alpha = 1,12$ . **(1 point)**

La longueur maximale de la fissure qu'on pourra tolérer dans le câble sans qu'il y ait de rupture brutale est celle d'une fissure qui demeurera stable sous des contraintes pouvant atteindre le limite d'élasticité de l'acier du câble. Au delà de Re<sub>0,2</sub>, il n'y a pas de rupture brutale du câble.

$$K_C = \alpha\sigma_{nom}\sqrt{\pi a}$$

$$a = \left(\frac{73}{1.12 * 1550}\right)^2 \frac{1}{\pi}$$

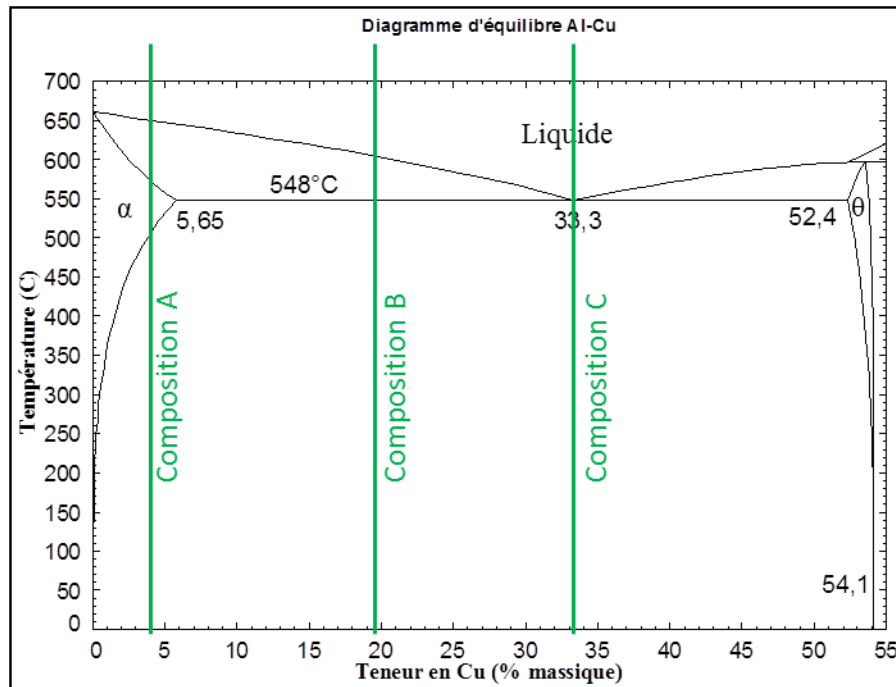
$$a = 5.629 \times 10^{-4}m$$

$$a = 0.5629 mm$$

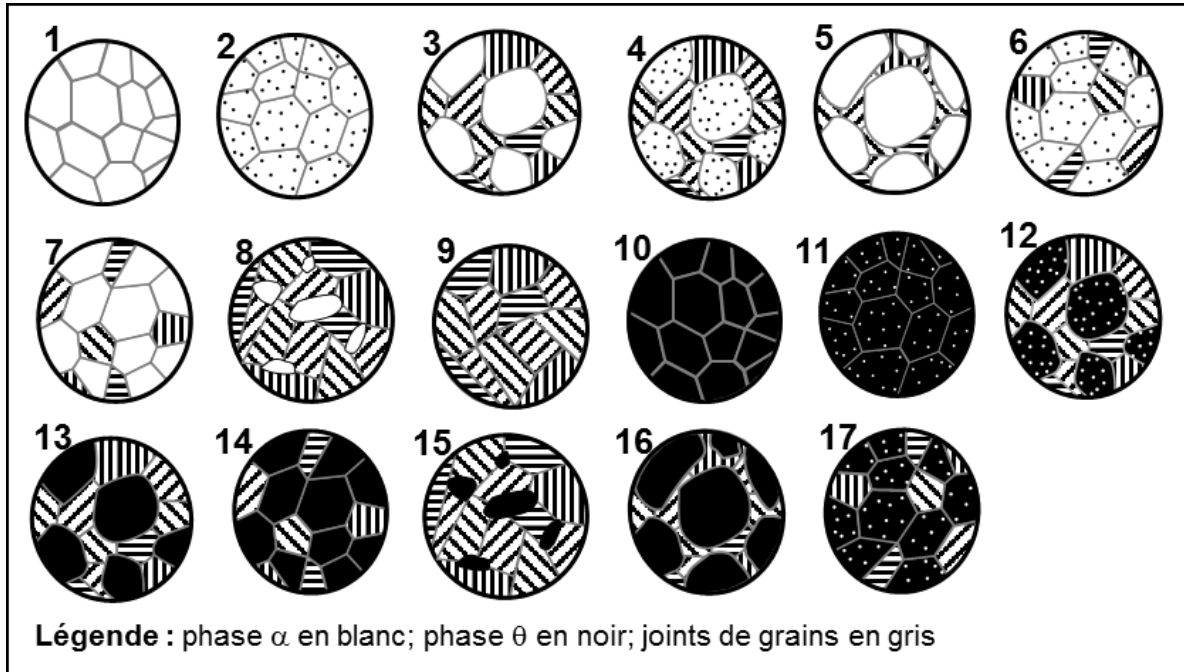
<b>a</b> =	0.56	mm
------------	------	----

**Exercice N°2****(6 points)**

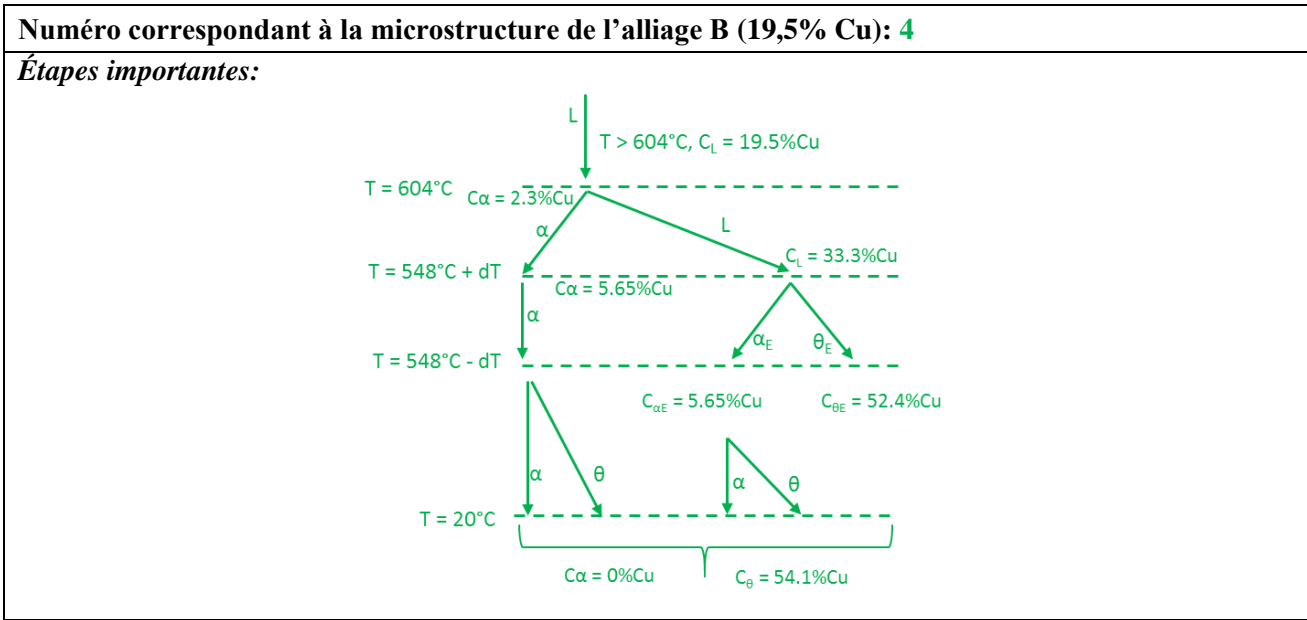
Trois alliages binaires d'aluminium et de cuivre : A, B et C, dont les teneurs (% massique) en cuivre sont respectivement de 4 %, 19,5 % et 33,3 %, sont refroidis très lentement à partir de l'état liquide jusqu'à la température ambiante. Vous disposez d'une portion du diagramme binaire Al-Cu ci-dessous.

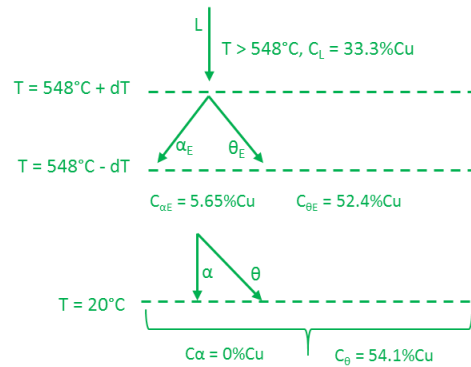


a) Parmi les microstructures suivantes, indiquez la microstructure qui correspond à chacun de ces alliages à l'ambiante (20°C). Décrire les étapes importantes se produisant lors de la solidification et du refroidissement des alliages B et C jusqu'à l'ambiante (20°C) en précisant la température et la composition des phases formées à chacune de ces étapes. (4 points)



**Numéro correspondant à la microstructure de l'alliage A (4% Cu): 2**  
 Nul besoin de décrire les étapes de solidification de cette microstructure.



**Numéro correspondant à la microstructure de l'alliage C (33,3% Cu): 9****Étapes importantes:**b) Pour les alliages B et C, calculez la proportion de la phase  $\alpha$  présente à  $20^\circ\text{C}$ .

(2 points)

**Alliage B (19,5% Cu):****Calculs:**

$$f_\alpha \text{ à } 20^\circ\text{C} = \frac{54.1 - 19.5}{54.1 - 0} = 64.0\%$$

**Alliage C (33,3% Cu):****Calculs:**

$$f_\alpha \text{ à } 20^\circ\text{C} = \frac{54.1 - 33.3}{54.1 - 0} = 38.5\%$$

**Exercice N°3****(5 points)**

Un alliage d'aluminium ayant une teneur (% massique) de 4 % en cuivre, se prête bien aux traitements thermiques. On lui impose des traitements thermiques dont les trois principales étapes sont :

Étape	Caractéristiques de l'étape du traitement thermique
#1	Chauffage pendant <b>1 h</b> à une température de <b>550°C</b>
#2	Trempe à l'eau ( <b>25°C</b> )
#3	Vieillessement à 190°C pendant un temps <b>t</b> .

Vous disposez du diagramme Al-Cu de la question précédente (p. 3).

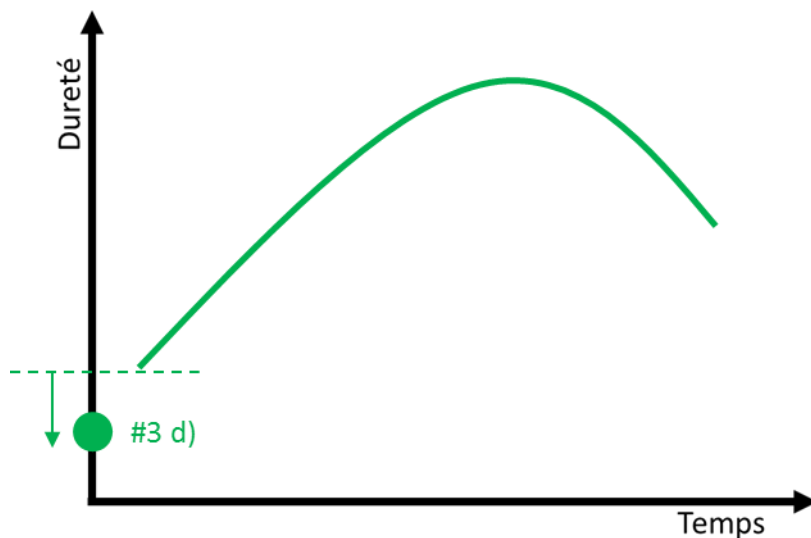
- a) Quel est le constituant microstructural de cet alliage après la 2<sup>e</sup> étape ? *Justifiez votre réponse.* (1 point)

**Constituant : Une solution solide de alpha ( $\alpha$ ) sursaturée en cuivre.**

**Justification :**

La mise en solution solide de l'alliage a été faite à l'étape # 1. La trempe à 25°C (étape # 2) empêche la diffusion du cuivre et la précipitation du cuivre. La phase  $\alpha$  contient 4 % de cuivre à 25°C au lieu d'en être dépourvue (la solubilité du cuivre dans la phase  $\alpha$  à l'équilibre et à 25°C est presque nulle). On se retrouve donc avec une phase  $\alpha$  sursaturée en cuivre.

- b) Tracez sur la figure suivante l'évolution de la dureté en fonction du temps lors d'un vieillissement (étape #3) réalisé à 190°C. (1 point)



Note : Un vieillissement réalisé à 190°C permettrait, pour un temps de vieillissement optimum, d'obtenir le maximum de dureté possible pour ce genre d'alliage (communément appelé l'état T6).

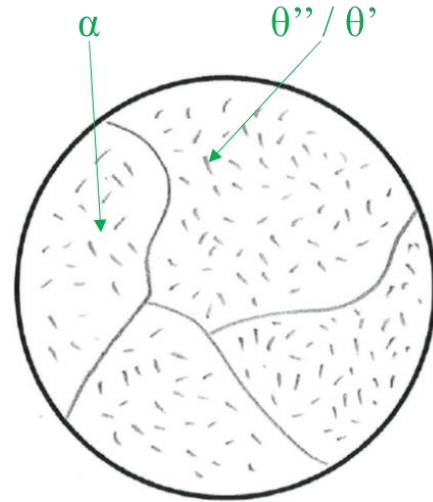
- c) Décrivez en détail et dessinez la microstructure de l'alliage à l'état T6. Votre réponse doit inclure une discussion des phases en présence, de leur taille, de leur nombre et de leur distribution spatiale relativement au même alliage, mais ayant une microstructure prévue par le diagramme d'équilibre (solidification et refroidissement lents). (2 points)

Phases :  $\alpha$  et  $\theta'' / \theta'$ .

Grains micrométriques pour alpha

Précipités de 10 à 100 nm pour les  $\theta'' / \theta'$ .

Les précipités  $\theta'' / \theta'$  sont très nombreux et rapprochés.



- d) Sur la même figure de la question 3(b), indiquez, sur l'axe des y, la dureté qu'aurait le même alliage (Al-4%Cu) après une solidification et un refroidissement lent (conditions d'équilibre). Justifiez votre réponse. (1 point)

**Justification :**

Aucun mécanisme de durcissement des matériaux n'est disponible dans la microstructure de celui qui a été refroidi lentement tandis que celui qui a été trempé est durci par solution solide (sursaturation du Cu dans  $\alpha$ ).

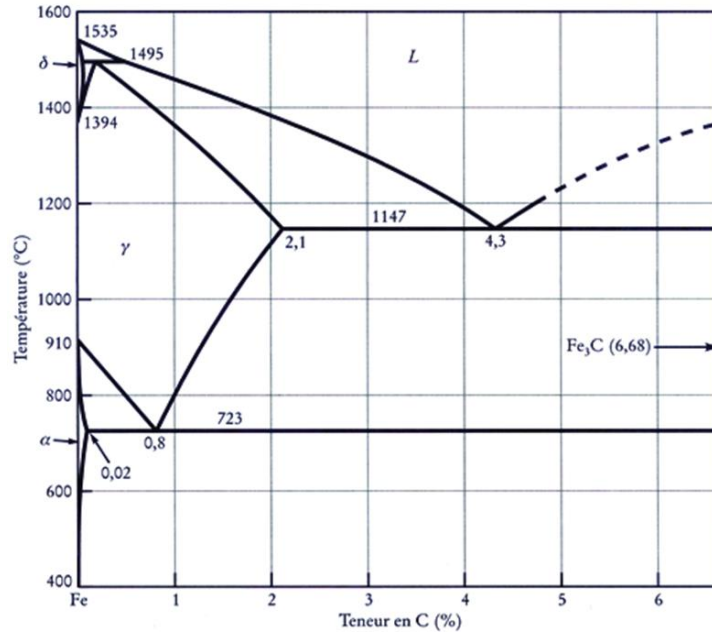
Ainsi, l'alliage d'aluminium qui a été refroidi lentement est moins dur que celui qui a été trempé à partir de 550°C.

**Exercice N°4**

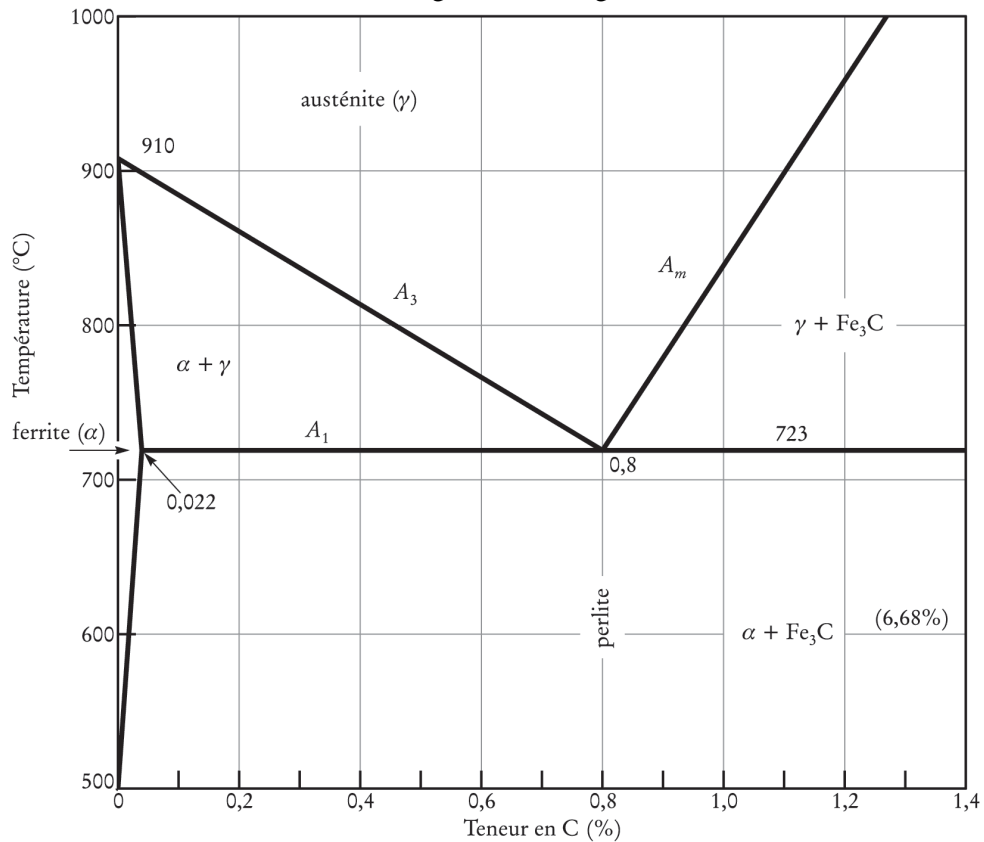
**(7 points)**

Servez-vous du diagramme d'équilibre Fe-C pour répondre aux questions 4(a) à 4(d) suivantes.

Partie riche en fer du diagramme Fe-C



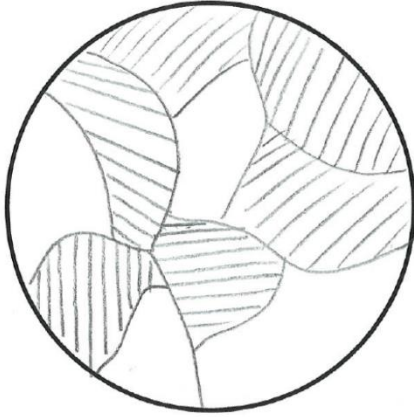
Partie inférieure gauche du diagramme Fe-C





- a) Dessinez la microstructure à 600°C d'un acier contenant 0.5% de carbone obtenu suite à un refroidissement très lent à partir de 950°C (conditions d'équilibre). Votre réponse doit inclure les constituants en présence et un calcul de la proportion de chaque constituant. (2 points)

Attention, le nombre de lignes du tableau suivant n'est pas nécessairement égal au nombre de constituants présents.



Constituant	Proportion
Ferrite primaire	38.56 %
Perlite (constituant eutectoïde)	61.44 %

Calcul de la proportion de chaque constituant

Calcul de la proportion d'alpha primaire qui précipite avant que l'alliage n'atteigne la température de la réaction eutectoïde (formation de la perlite).

$$f_{\alpha_1} \text{ à } 723^\circ\text{C} = \frac{0.8 - 0.5}{0.8 - 0.022} = 38.56\%$$

Calcul de la proportion du constituant eutectoïde (perlite).

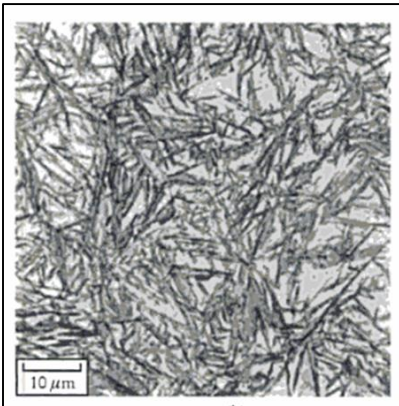
$$f_{perlite} \text{ à } 723^\circ\text{C} = \frac{0.5 - 0.022}{0.8 - 0.022} = 61.44\%$$

- b) Donnez dans le tableau suivant toutes les phases en présence (toujours à 600°C) ainsi que leur composition chimique. Encore une fois, le nombre de lignes de ce tableau ne correspond pas nécessairement au nombre de phases. (1 point)

Phase	Composition chimique
Ferrite	≈ 0.01 %C
Fe <sub>3</sub> C	6.68 %C

- c) Dessinez la microstructure du même acier qu'en (4a) (Fe-0.5%C) obtenu suite à une trempe à l'eau à partir de 950°C. Complétez également le tableau et donnez les détails de vos calculs de la proportion de chaque phase ou constituant. Vous trouverez le diagramme TTT de cet alliage en annexe. (1 point)

Calcul du pourcentage de chaque phase ou constituant:



Le diagramme TTT de l'alliage Fe-0.5%C en annexe permet de conclure que la trempe à l'eau jusqu'à la température de la pièce permet d'obtenir une microstructure 100% martensitique semblable à celle présentée à gauche. La microstructure est constituée à 100% d'aiguilles de martensite.

L'image est tirée du livre des matériaux 3<sup>e</sup> édition page 253.

Phase ou constituant	Composition chimique	Proportion
Martensite	0.5 %C	100%

d) L'ingénieur des matériaux qui travaille pour vous recommande de faire un revenu à 400°C pendant 1 heure de la pièce obtenue après la trempe décrite à la question précédente (c).

Il s'agit maintenant de remplir le tableau suivant pour comparer les propriétés mécaniques ( $E$ ,  $R_e$ ,  $R_m$ , dureté, allongement à la rupture en traction uniaxiale et la ténacité) du même acier (Fe-0.5%C), mais après les traitements décrits aux questions 4(a)(microstructure d'équilibre), 4(c)(après trempe à l'eau) et 4(d)(après trempe et revenu).

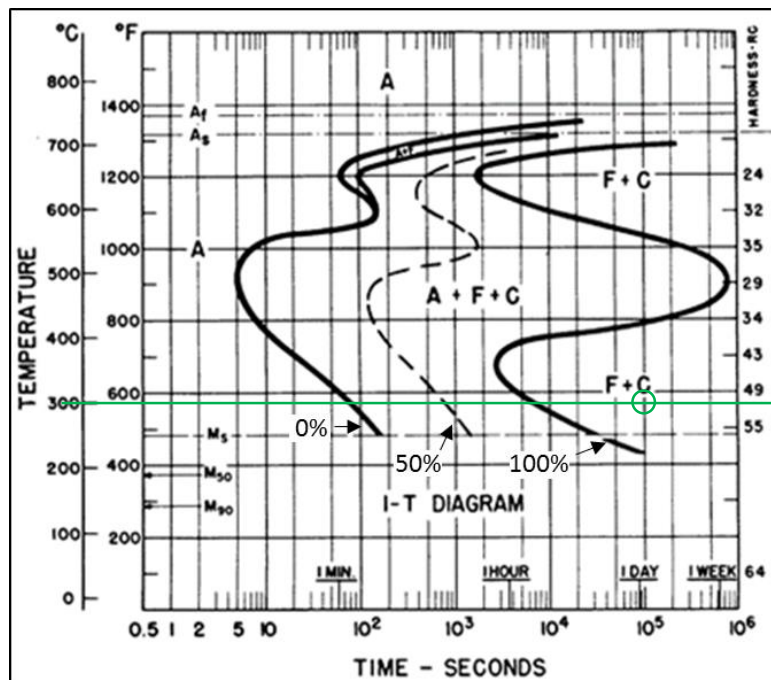
Note : Puisqu'il s'agit de comparer les propriétés de l'acier Fe-0.5%C pour trois conditions de traitement thermique, vous n'avez qu'à utiliser le symbole « ↑ » pour le traitement qui donne la valeur de la propriété la plus élevée, « ↓ » pour le traitement qui donne la valeur la plus faible et le symbole « — » pour le traitement qui donne la valeur intermédiaire. Si deux ou trois traitements donnent la même valeur, utiliser le symbole « = ». (2 points)

	E	$R_e$	$R_m$	Dureté	Allongement à la rupture	Ténacité
Traitement décrit en (a)	=	↓	↓	↓	↑	↑
Traitement décrit en (c)	=	↑	↑	↑	↓	↓
Traitement décrit en (d)	=	—	—	—	—	—

e)

Utilisez la courbe TTT suivante de l'acier 8660 pour répondre à la question 4(e).

Courbes TTT de l'acier 8660



- e) Quelle serait la microstructure et la dureté d'un acier allié 8660 obtenu suite à une trempe de 950°C à 300°C suivi d'un maintien à 300°C pendant 24 heures. Expliquez votre réponse. (1 point)

Dureté  $\approx$  50.9 HRC, lecture du TTT. La microstructure est 100% bainitique.

La trempe rapide de 950°C à 300°C donne une microstructure totalement austénitique puisque la température 300°C est au-dessus de la température de début de transformation martensitique. Au cours du maintien à 300°C, l'austénite tente de retourner vers l'équilibre par la réaction eutectoïde Austénite  $\rightarrow$  Ferrite + Fe<sub>3</sub>C. Cependant, la faible vitesse de diffusion des éléments d'alliage à 300°C fait en sorte qu'au lieu d'obtenir une microstructure eutectoïde plus ou moins grossière (perlite), on obtient une microstructure relativement fine (bainite). La durée du maintien (24h) permet de transformer la totalité de l'austénite en bainite.

### Exercice N°5

(5 points)

Indiquez par un " V " les affirmations vraies de ce tableau. Les autres cases devraient être laissées vides.

Attention : une mauvaise réponse annule une bonne réponse.

Une aube de turbine monocristalline sera caractérisée par une vitesse de fluage secondaire plus faible que celle d'une aube polycristalline.	V
La surface de rupture d'un matériau dont la résilience mesurée par un essai Charpy est élevée sera caractérisée par des cupules et des ligaments ductiles.	V
Dans un matériau fragile, l'énergie élastique libérée suite à l'apparition d'une fissure doit compenser l'énergie de surface $\gamma_s$ associée aux surfaces de la fissure.	V
La désorientation cristallographique aux joints de grains est efficace pour bloquer le mouvement des dislocations.	V
L'effet des éléments d'alliage tels que le Mo, V, Cr etc. est de déplacer vers des temps plus longs le "nez" de la transformation bainitique d'un diagramme TTT (transformation, température, temps) d'un acier allié.	V
La qualité de l'aiguisage des outils de coupe utilisés pour usiner des pièces peut influencer le facteur de concentration des contraintes auquel les pièces finies seront soumises en service.	V
Les métaux purs, les composés stoechiométriques et les alliages de composition eutectoïde ont tous un point de fusion unique.	
Une réduction de la taille des grains augmente la limite d'élasticité ( $R_e$ ) et la ténacité, le durcissement structural diminue la ductilité, mais augmente la limite d'élasticité ( $R_e$ ) et des éléments en solution solide interstitielle augmentent la limite d'élasticité ( $R_e$ ).	V
Dans le stade II du fluage, l'augmentation de la densité de dislocations entraînant une consolidation est compensée par la diminution de la densité de dislocations entraînant un adoucissement du matériau si bien que la vitesse de déformation est nulle.	
Une vitesse de déformation plus élevée diminue la température de transition ductile-fragile.	

## ANNEXE 1

$\varepsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu(\sigma_y + \sigma_z)]$	$\frac{da}{dN} = C\Delta K^n$	$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}$
$\varepsilon_y = \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu(\sigma_x + \sigma_z)]$	$m = \frac{A_{i_{corr}} t}{nF}$	$R = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$
$\varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu(\sigma_x + \sigma_y)]$	$\Delta = \frac{(m_a)_{ox} \rho_M}{(m_a)_M \rho_{ox}}$	$W_{\acute{e}l} = \frac{1}{2} \sigma \varepsilon_{\acute{e}l} = \frac{\sigma^2}{2E}$
$G = \frac{E}{2(1+\nu)}$	$R_{th} = \sqrt{\frac{2E\gamma_s}{a_0}}$	$\sigma_y = \sigma_{nom} \left( 1 + 2\sqrt{\frac{\bar{a}}{r}} \right)$
$1 = \frac{hx}{na} + \frac{ky}{nb} + \frac{lz}{nc}$	$\varepsilon_{v\acute{e}l} = \frac{\sigma_t}{K_2} \left[ 1 - \exp\left(-\frac{K_2 t}{\eta_2}\right) \right]$	$\nu = -\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_z} = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_z}$
$r = ua + vb + wc$	$R = \frac{\rho l}{S}$	$\cos(\vec{u}, \vec{v}) = \frac{u_1 v_1 + u_2 v_2 + u_3 v_3}{\sqrt{u_1^2 + u_2^2 + u_3^2} \sqrt{v_1^2 + v_2^2 + v_3^2}}$
$\tau = \frac{F}{S_0} \cos \theta \cos \chi$	$\sigma = n_e e \mu_e$	$(R_m)_C = kV_f(R_m)_f + V_m \sigma_m$
$\tau_{th} = \frac{G}{2\pi} \frac{b}{a}$	$\sigma = (n_e e \mu_e + n_t e \mu_t)$	$D = D_0 \exp\left(-\frac{Q_0}{kT}\right)$
$Re_{0.2} = \sigma_0 + kd^{-1/2}$	$\sigma = \sigma_0 \exp\left(\frac{-E_g}{2kT}\right)$	$(R_m)_C = V_f(R_m)_f + (1 - V_f)\sigma_m$
$I_c = a^* = \frac{2E\gamma_s}{\pi\sigma^2}$	$E = E_0(1 - 1,9P + 0,9P^2)$	$(R_m)_C = V_f\sigma_f + (1 - V_f)(R_m)_m$
$K_C = \alpha \sigma_{nom} \sqrt{\pi a}$	$R_m = (R_m)_0 \exp^{-nP}$	$R_3 = \frac{E}{R_m^2 f(\nu)}$
$f_S C_S + f_L C_L = C_0$	$\Delta\theta^* = R_1 = \frac{R_m f(\nu)}{E\alpha}$	$R_4 = \frac{E\gamma_s}{R_m^2 f(\nu)} = \gamma_s R_3$
$E_C = V_f E_f + V_m E_m$	$E_C \cong \frac{3}{8} V_f E_f + V_m E_m$	

## ANNEXE 2

Diagramme TTT d'un alliage Fe-0.5%C

