



ÉCOLE
POLYTECHNIQUE
MONTREAL

*Le génie
sans frontières*

Questionnaire
Contrôle
périodique 2

MTR2000

Sigle du cours

CORRIGÉ

Identification de l'étudiant(e)				Réservé
Nom :		Prénom :		Q1
Signature :		Matricule :	Groupe :	/21
				Q2
				/13
				Q3
				/9
				Q4
				/7
				/50
Sigle et titre du cours	Groupe		Trimestre	
MTR2000 Matériaux métalliques	Tous		Automne 2010	
Professeurs	Local		Téléphone	
Richard Lacroix				
Jour	Date	Durée	Heures	
Mercredi	3 novembre 2010	1 h 30	18 h 30 - 20 h	
Documentation		Calculatrice		
<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			
Directives particulières				
<p>1. Les nombres entre parenthèses indiquent le nombre de points accordés à la question, le total est de 50 points.</p> <p>2. Pour les questions nécessitant des calculs ou une justification, aucun point ne sera accordé à la bonne réponse si le développement n'est pas écrit.</p> <p>3. Utilisez les espaces prévus ou la page opposée pour vos calculs.</p> <p>4. Les annexes (figures) et un formulaire général sont dans les 5 dernières pages. Vous pouvez détacher ces pages.</p>				
Important	Cet examen contient <input type="text" value="4"/> questions sur un total de <input type="text" value="14"/> pages. (excluant cette page)			
	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.

Question N°1

Alliages Fe-C

(21 points)

On considère trois alliages Fe-C de compositions massiques 0,2 %C, 0,9 %C et 3,0 %C. À l'aide du diagramme d'équilibre Fe-C donné en annexe, déterminez les phases en présence, leur composition et leur proportion :

- a) À 1146 °C ? (5 points)
 (vous n'êtes pas obligés de remplir toutes les cases du tableau)

Alliage	phase(s)	composition(s)	proportion(s)
0,2 %C (Voir la ligne rouge sur le diagramme Fe-C de la page 11)	γ (austénite)	0,2 %C	100 %
	—	—	—
	—	—	—
<i>Justifications ou calculs:</i>			

Alliage	phase(s)	composition(s)	proportion(s)
0,9 %C (Voir la ligne bleue sur le diagramme Fe-C de la page 11)	γ (austénite)	0,9 %C	100 %
	—	—	—
	—	—	—
<i>Justifications ou calculs:</i>			

Alliage	phase(s)	composition(s)	proportion(s)
3,0 %C (Voir la ligne verte sur le diagramme Fe-C de la page 11)	γ (austénite)	2,1 %C	80,3 %
	Fe_3C (cémentite)	6,68 %C	19,7 %
	—	—	—
<i>Justifications ou calculs:</i>			
$f_{\gamma} = \frac{6,68 \%C - 3,0 \%C}{6,68 \%C - 2,1 \%C} = 80,3 \% \text{ et } f_{Fe_3C} = 1 - f_{\gamma} = 19,7 \%$			

b) À 722 °C ?

(8 points)

(vous n'êtes pas obligés de remplir toutes les cases du tableau)

Alliage	phase(s)	composition(s)	proportion(s)
0,2 %C (Voir la ligne rouge sur le diagramme Fe-C de la page 11)	α (ferrite)	0,022 %C	97,3 %
	Fe ₃ C (cémentite)	6,68 %C	2,7 %
	—	—	—
Justifications ou calculs:			
$f_{\alpha} = \frac{6,68 \%C - 0,2 \%C}{6,68 \%C - 0,022 \%C} = 97,3 \% \text{ et } f_{Fe_3C} = 1 - f_{\alpha} = 2,7 \%$			

Alliage	phase(s)	composition(s)	proportion(s)
0,9 %C (Voir la ligne bleue sur le diagramme Fe-C de la page 11)	α (ferrite)	0,022 %C	86,8 %
	Fe ₃ C (cémentite)	6,68 %C	13,2 %
	—	—	—
Justifications ou calculs:			
$f_{\alpha} = \frac{6,68 \%C - 0,9 \%C}{6,68 \%C - 0,022 \%C} = 86,8 \% \text{ et } f_{Fe_3C} = 1 - f_{\alpha} = 13,2 \%$			

Alliage	phase(s)	composition(s)	proportion(s)
3,0 %C (Voir la ligne verte sur le diagramme Fe-C de la page 11)	α (ferrite)	0,022 %C	55,3 %
	Fe ₃ C (cémentite)	6,68 %C	44,7 %
	—	—	—
Justifications ou calculs:			
$f_{\alpha} = \frac{6,68 \%C - 3,0 \%C}{6,68 \%C - 0,022 \%C} = 55,3 \% \text{ et } f_{Fe_3C} = 1 - f_{\alpha} = 44,7 \%$			

c) Comment nomme-t-on généralement chacun de ces alliages ?

(1,5 point)

alliage	nom
Fe-0,2 %C	acier hypoeutectoïde
Fe-0,9 %C	acier hypereutectoïde
Fe-3,0 %C	fonte

d) Pour l'alliage Fe-3,0 % C, quels sont les constituants de la microstructure, leur composition et leur proportion à 1146° C ? (2 points)

constituant(s)	composition(s)	proportion(s)
γ primaire	2,1 %C	59,1 %
eutectique γ et Fe₃C	4,3 %C	40,9 %
—	—	—

Justifications ou calculs:

$$f_{\text{constituant eutectique à } 1146^{\circ}\text{C}} = f_{\text{phase liquide à } 1148^{\circ}\text{C}}$$

$$f_L = \frac{3,0\%C - 2,1\%C}{4,3\%C - 2,1\%C} = 40,9\% \text{ et } f_{\gamma \text{ primaire}} = 1 - f_L = 59,1\%$$

e) Pour l'alliage Fe-0,9 %C, à partir d'une mise en solution dans le domaine austénitique, quels sont les constituants de la microstructure et leur composition : (4,5 points)

1. après un refroidissement lent jusqu'à la température ambiante (20° C) ?

constituant(s)	composition(s)
Fe₃C primaire	6,68 %C
perlite (eutectoïde α et Fe₃C)	0,8 %C
—	—

2. après une trempe à 20° C ?

constituant(s)	composition(s)
γ résiduel	0,9 %C
Martensite	0,9 %C
—	—

3. après un refroidissement lent jusqu'à 724°C puis une trempe à 20° C ?

constituant(s)	composition(s)
Fe₃C primaire	6,68 %C
γ résiduel	0,8 %C
Martensite	0,8 %C

Note : Pour traiter des cas 2 et 3, référez-vous au graphique en annexe qui donne les variations des températures de début (M_s) et de fin (M_{90}) de transformation martensitique en fonction de la composition en carbone.

Question N°2

Alliages d'aluminium

(13 points)

Dans le diagramme d'équilibre Al-Cu présenté en annexe, la phase θ correspond au composé intermétallique Al_2Cu dont la composition massique est $C_{massique} \approx 53\%Cu$. La solubilité du cuivre dans la phase α est négligeable à température ambiante. Pour un alliage d'aluminium 2014 (Al - 4,4 %Cu) :

- a) Quelles sont les phases en présence, leur composition et leur proportion après que l'alliage ait été mis en solution solide puis trempé à la température ambiante (20° C) ? (2 points)

phase(s)	composition(s)	proportion(s)
α	4,4 %Cu	100 %
—	—	—
—	—	—

Justifications ou calculs:

La phase α est sursaturée en cuivre.

- b) Quelles sont les phases en présence, leur composition et leur proportion après que l'alliage ait été mis en solution solide puis refroidi lentement jusqu'à la température ambiante (20° C) ? (2 points)

phase(s)	composition(s)	proportion(s)
α	0 %Cu	91,7 %
θ	53 %Cu	8,3 %
—	—	—

Justifications ou calculs:

$$f_{\alpha} = \frac{53\%C - 4,40\%C}{53\%C - 0\%C} = 91,7\% \text{ et } f_{\theta} = 1 - f_{\alpha} = 8,3\%$$

- c) Selon les courbes de vieillissement de l'alliage 2014 présentées en annexe, quel est l'état métallurgique ou l'état de la microstructure : (3 points)

1. Au début du vieillissement :

Solution solide α sursaturée en cuivre.

2. Au pic de dureté :

**Présence de précipités fins et cohérents (θ' et θ'') dans une matrice de phase α .
 État métallurgique T4 ou T6.**

3. Pour un temps de vieillissement très grand :

**Présence de gros précipités d'équilibre θ dans une matrice de phase α .
État métallurgique O.**

- d) Pourquoi le pic de dureté est-il atteint plus rapidement à température élevée ? (1 point)

Réponse : _____

La diffusion du cuivre est plus rapide à haute température qu'à basse température.

Les alliages d'aluminium de la série 1000 ont une composition en aluminium supérieure à 99 % (éléments d'alliage ≤ 1 %). Ceux-ci ont des limites d'élasticité et des résistances à la traction plus faibles que celles des alliages de la série 2000 mais ils ont d'autres propriétés pratiques qui sont supérieures à celles des alliages de la série 2000.

- e) Citez une de ces propriétés pratiques qui est supérieure dans les alliages de la série 1000 par rapport aux alliages de la série 2000. (1 point)

Réponse : _____

Résistance à la corrosion, conductibilité électrique, conductibilité thermique, ductilité, soudabilité

- f) Comment peut-on durcir un alliage de la série 1000 ? (1 point)

Réponse : _____

Par écrouissage (ou par affinement de la taille de grains).

Les alliages d'aluminium utilisés pour la fabrication par fonderie-moulage ont souvent une teneur élevée en silicium, parfois supérieure à 10 %.

- g) Quel est l'intérêt d'avoir une composition riche en silicium ? (1 point)

Réponse : _____

Diminution de la température de fusion (eutectique), meilleure coulabilité (meilleure fluidité de l'alliage liquide), diminution de la contraction à la solidification.

- h) Comment peut-on durcir ces alliages après fabrication ? (1 point)

Réponse : _____

Par durcissement structural.

- i) À résistance égale, comment se compare la ductilité des alliages de fonderie avec celle des alliages corroyés ? (1 point)

Réponse : _____

La ductilité des alliages de fonderie est très souvent inférieure à 5 %. Elle est bien inférieure à celle des alliages corroyés.

Question N°3

Corrosion

(9 points)

En milieu aqueux, les aciers ordinaires (aciers au carbone et aciers faiblement alliés) sont sujets à un phénomène de corrosion uniforme ou généralisée tandis que les aciers ayant une teneur en chrome supérieure à 12 % sont inoxydables.

- a) Pourquoi les aciers ordinaires sont-ils sujets à la corrosion en milieu aqueux ? (1,5 point)

Réponse : _____

Le potentiel de la réaction anodique (dissolution du métal) est inférieur à celui de la réaction cathodique.

- b) Quelle loi physique permet de calculer la vitesse de corrosion du métal (perte d'épaisseur par unité de temps) ? (1 point)

Réponse : _____

La loi de Faraday.

- c) Pourquoi les aciers ayant un teneur en Cr supérieure à 12 % sont-ils inoxydables ? (2 points)

Réponse : _____

La formation d'un film passif ralentit considérablement la vitesse de corrosion.

Différents revêtements métalliques peuvent être appliqués aux aciers ordinaires pour les protéger de la corrosion.

- d) Donnez un exemple de revêtement métallique sur un acier ordinaire. (1 point)

Réponse : _____

Revêtement de zinc (galvanisation) ou revêtement de chrome (chromatation).

e) Précisez pourquoi cette protection peut faire défaut après un certain temps. (1,5 point)

Réponse :

Le zinc (Zn) agit comme une anode sacrificielle qui se dissout rapidement. Le chrome (Cr) est plus stable mais si une rayure expose l'acier au milieu de corrosion, ce dernier devient l'anode d'un couple de corrosion galvanique.

Même s'il n'est pas en contact avec un autre métal et que la concentration des espèces dissoutes dans l'électrolyte est uniforme, un acier inoxydable en milieu aqueux peut être sujet à un phénomène de corrosion localisée qui l'endommagera rapidement.

f) Donnez le nom d'un tel phénomène et faites-en une brève description. (2 points)

Réponse :

Piqûration : le fond de la piqûre est l'anode d'une micropile galvanique.

Corrosion intergranulaire : causée par la précipitation de carbures de chrome aux joints de grains qui entraîne un appauvrissement en chrome des zones voisines qui deviennent anodiques par rapport aux zones où la concentration de Cr n'a pas diminué.

Corrosion sous contrainte : Les zones sous fortes contraintes sont cathodiques par rapport aux zones faiblement sollicitées. Création de micropiles galvaniques.

Question N°4

Fatigue

(7 points)

Dans une voiture de course de Formule 1, une pièce du moteur est soumise à des efforts de fatigue, qui sont caractérisés par une variation de contrainte $\Delta\sigma$ égale à 700 MPa et par une contrainte moyenne σ_{moy} nulle. L'alliage métallique utilisé pour cette pièce a une matrice de structure cristalline cubique et sa courbe de fatigue – endurance (courbe de Wöhler) est donnée en annexe. Pour parcourir un tour de piste en un temps moyen de 2 minutes et 45 secondes, le pilote maintient un régime moteur moyen de 18 000 tours/min. Le nombre de tours requis pour compléter la course est de 60.

a) En considérant la courbe de Wöhler du matériau, dites quel est le réseau de Bravais de l'alliage métallique ? (1,5 point)

Réseau de Bravais : cubique à faces centrées (C.F.C.)

Justification :

Puisque la courbe de fatigue-endurance (courbe de Wöhler) du matériau ne présente pas une limite d'endurance parfaitement définie (c'est-à-dire un palier horizontal aux grands nombres de cycles), on en déduit que cette courbe est caractéristique d'un alliage de structure cristalline cubique à faces centrées.

b) Quelle est la valeur du rapport R caractérisant le chargement cyclique ?

(1,5 point)

Calculs :

Par définition, la contrainte moyenne σ_{moy} est égale à :

$$\sigma_{moy} = (\sigma_{max} + \sigma_{min})/2 \text{ et ici } \sigma_{moy} = 0$$

alors, on trouve que : $\sigma_{max} = -\sigma_{min}$ [1]

Le rapport de contrainte est, par définition, égal à : $R = \sigma_{min} / \sigma_{max} = -1$

R = -1

c) Cette pièce pourra-elle résister mécaniquement en fatigue durant toute une course ? Répondez par **OUI** ou **NON** dans la case et justifiez votre réponse. (2 points)

OUI ou NON :

NON

Calculs :

Par définition, la variation de contrainte $\Delta\sigma$ est égale à :

$$\Delta\sigma = \sigma_{max} - \sigma_{min}$$

Avec les résultats de la réponse en b), on trouve facilement que la pièce est soumise à une amplitude de contrainte est de 350 MPa car la valeur de la contrainte maximale σ_{max} et celle de l'amplitude de contrainte σ_a sont égales à :

$$\sigma_{max} = \Delta\sigma/2 = 350 \text{ MPa} = \sigma_a$$

Le nombre N de cycles auxquels est soumis la pièce durant une course complète est de :

$$N = \left(\frac{18\,000 \text{ cycles}}{\text{min}} \right) \left(\frac{2,75 \text{ min}}{\text{tour de piste}} \right) (60 \text{ tours de piste}) = 2,97 \times 10^6 \text{ cycles}$$

En se référant à la courbe de fatigue – endurance de l'alliage (voir figure en annexe, ligne en tirets rouges), on constate que, pour une amplitude de contrainte de 350 MPa, la durée de vie est égale à 2×10^6 cycles, ce qui est inférieur au nombre de cycles subis durant une course complète.

Par conséquent, il est fort probable que la pièce se rompera par fatigue avant que la course n'ait été complétée.

- d) Quelle est la variation maximale de contrainte que pourra subir la pièce si on veut qu'elle résiste pendant deux courses complètes ? (2 points)

Calculs :

Pour compléter deux courses, la pièce doit subir :

$$(2 \times 2,97 \times 10^6) \text{ cycles} = 5,94 \times 10^6 \text{ cycles} \cong 6 \times 10^6 \text{ cycles}$$

En se référant à la courbe de fatigue – endurance de l'alliage, on constate que, pour un tel nombre de cycles (ligne en tirets bleus), l'amplitude maximale de contrainte tolérable est égale à 280 MPa.

La variation de contrainte est alors de : $\Delta\sigma = 2\sigma_a = 560 \text{ MPa}$.

$$\Delta\sigma = \mathbf{560} \text{ MPa}$$

Bonne Chance,
Richard Lacroix, chargé de cours.

Formulaire général :

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu (\sigma_y + \sigma_z)]$$

$$\tau = \frac{F}{S_0} \cos \theta \cos \chi$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{E} [\sigma_y - \nu (\sigma_x + \sigma_z)]$$

$$R_{e0.2} = \sigma_0 + kd^{-1/2}$$

$$\varepsilon_z = \frac{1}{E} [\sigma_z - \nu (\sigma_x + \sigma_y)]$$

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

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

$$f_S C_S + f_L C_L = C_0$$

$$\nu = -\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_z} = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_z}$$

$$D = D_0 \exp\left(-\frac{Q_0}{kT}\right)$$

$$R_{\text{th}} = \sqrt{\frac{2E\gamma_s}{a_0}}$$

$$\varepsilon_{\text{vél}} = \frac{\sigma_t}{K_2} \left[1 - \exp\left(-\frac{K_2 t}{\eta_2}\right) \right]$$

$$\mathbf{r} = u\mathbf{a} + v\mathbf{b} + w\mathbf{c}$$

$$\frac{da}{dN} = C\Delta K^n$$

$$l = \frac{hx}{na} + \frac{ky}{nb} + \frac{lz}{nc}$$

$$R = \frac{\sigma_{\text{min}}}{\sigma_{\text{max}}}$$

$$\sigma_y = \sigma_{\text{nom}} \left(1 + 2 \sqrt{\frac{a}{r}} \right)$$

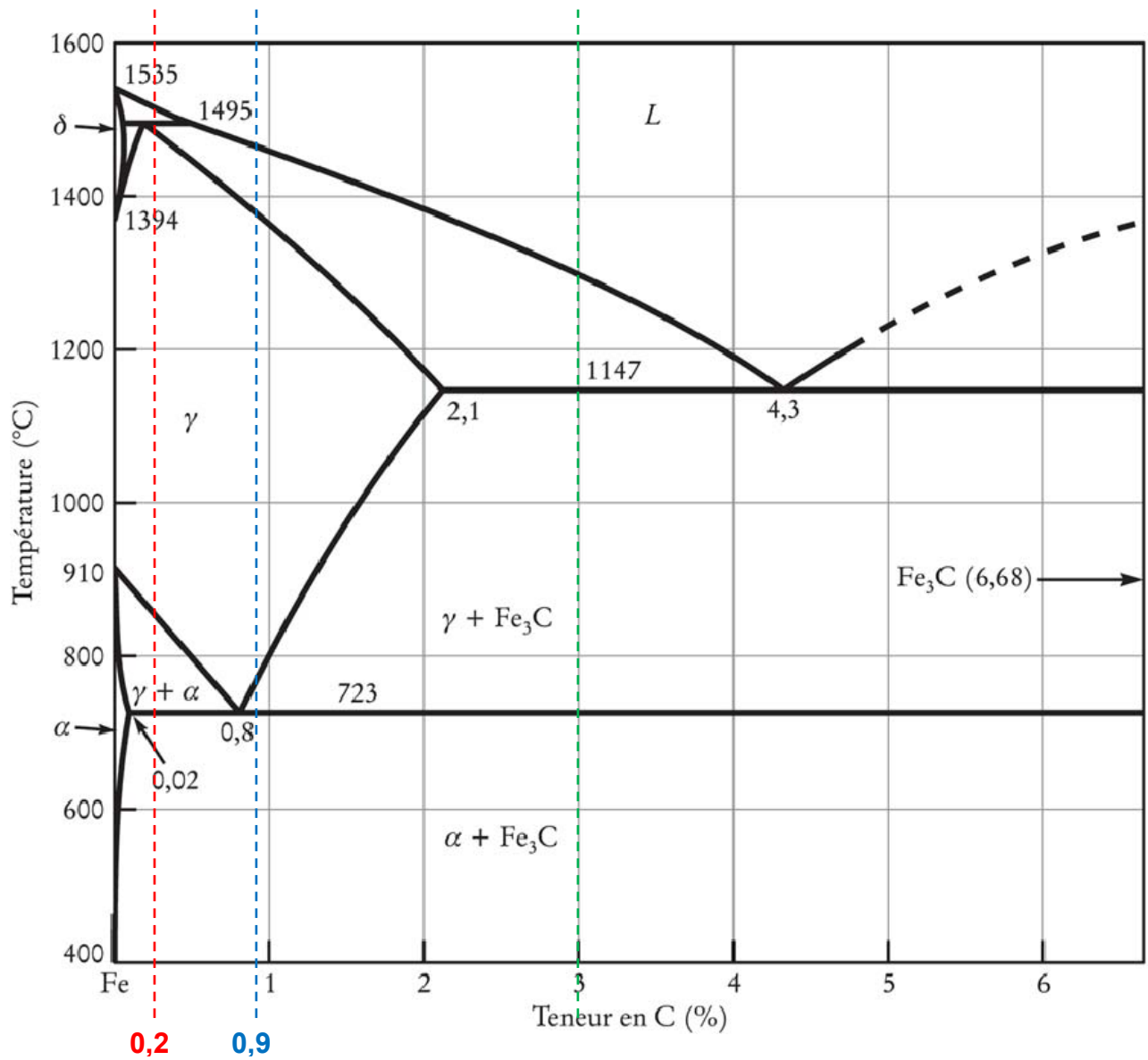
$$m = \frac{Ai_{\text{corr}} t}{nF}$$

$$\tau_{\text{th}} = \frac{G}{2\pi} \frac{b}{a}$$

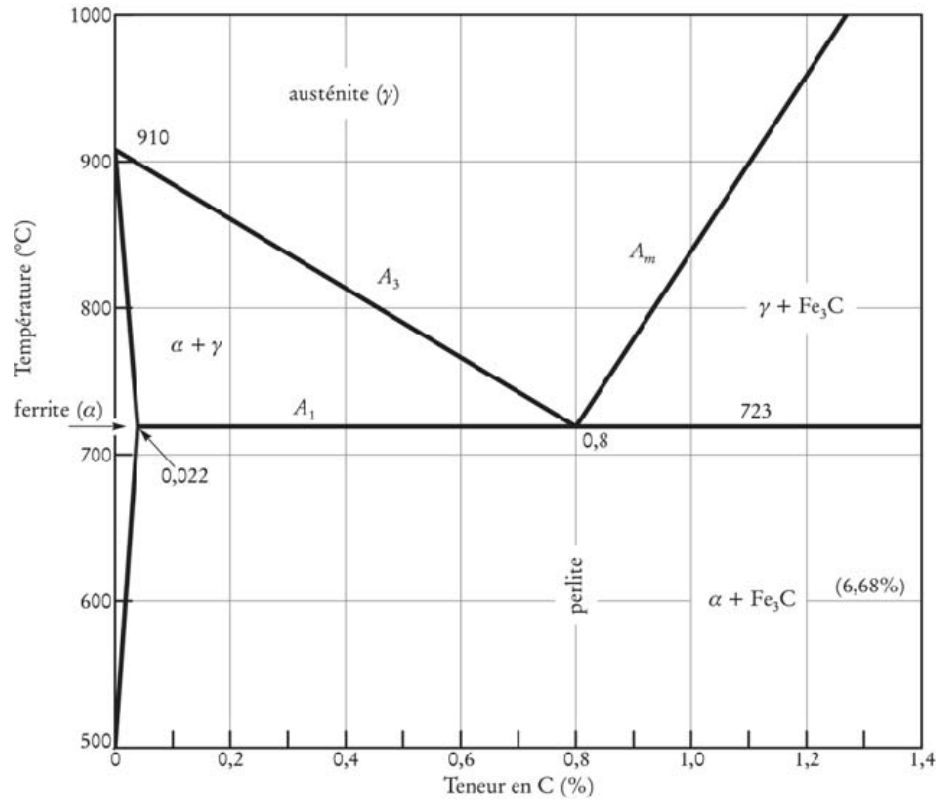
$$\Delta = \frac{(m_a)_{\text{ox}} \rho_M}{(m_a)_M \rho_{\text{ox}}}$$

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

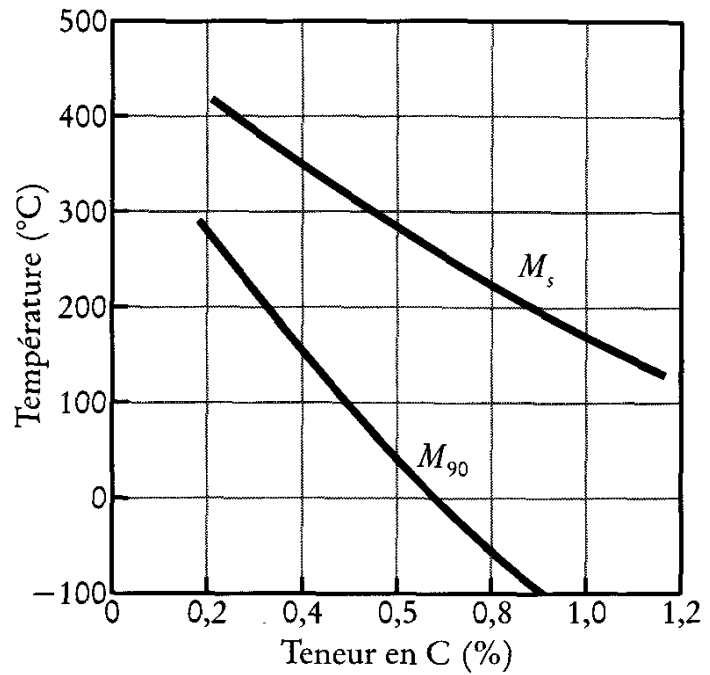
N°1: Diagramme Fe-C



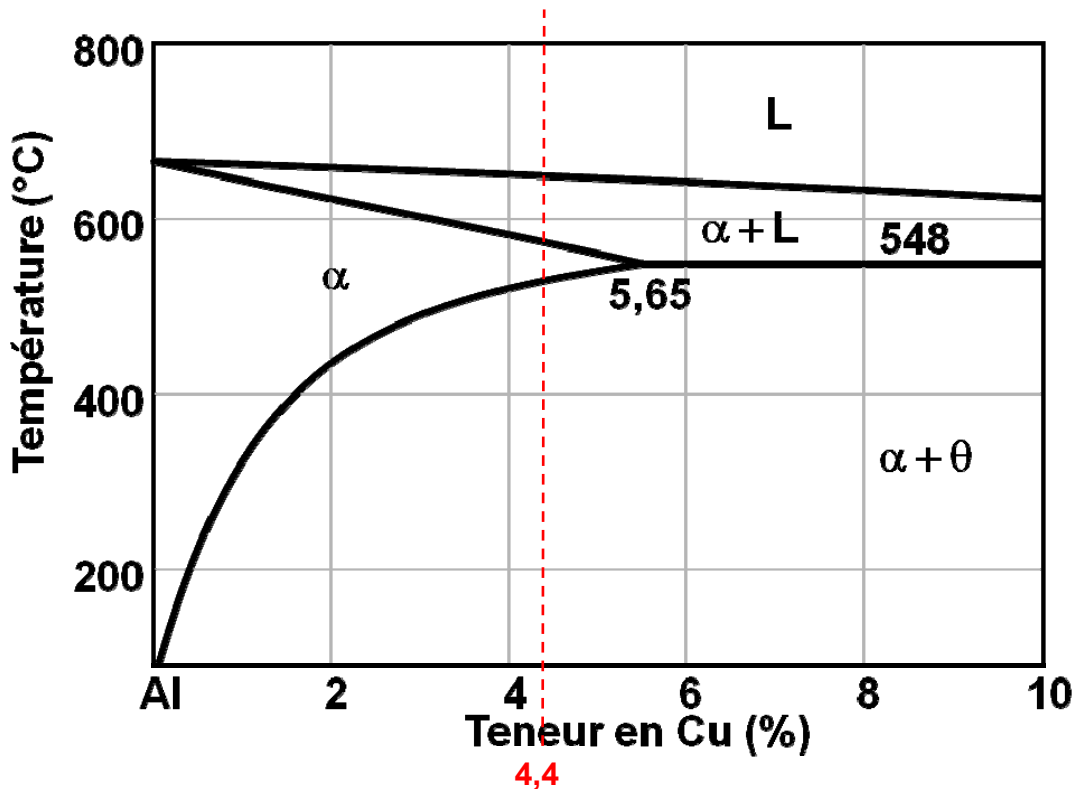
N°1: Diagramme Fe-C, agrandissement



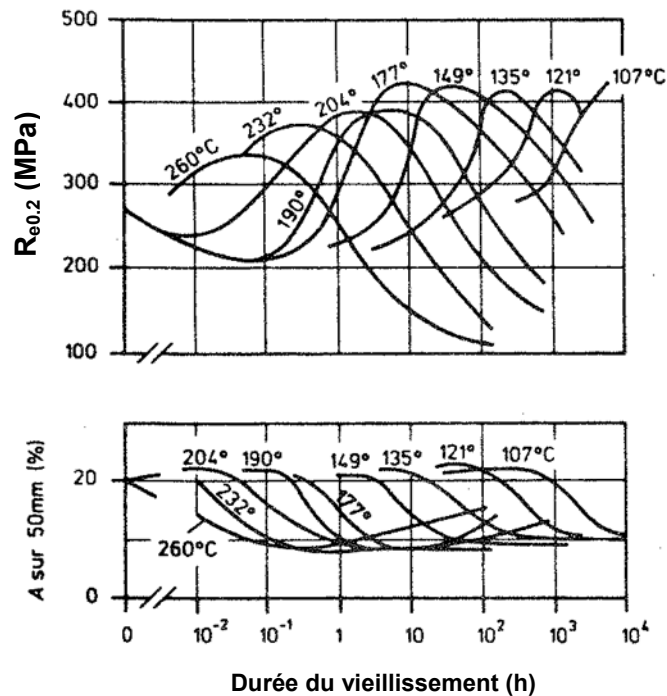
N°1: Variations des températures M_s et M₉₀ des aciers au carbone en fonction de leur teneur en carbone



N°2: Diagramme Al-Cu, région riche en aluminium



N°2: Courbes de vieillissement de l'alliage 2014



N°4: Courbe de fatigue – endurance de l’alliage métallique

