

Identification de l'étudiant(e)				Réservé
Nom :		Prénom :		Q1
Signature :		Matricule :	Groupe :	/7
Q2				/12
Q3				/9
Q4				/7
				/35
Sigle et titre du cours		Groupe	Trimestre	
MTR2000 Matériaux métalliques		Tous	Hiver 2011	
Professeurs		Local	Téléphone	
Richard Lacroix		A-476	4771	
Jour	Date	Durée	Heures	
Mercredi	16 mars 2011	1 h 30	18 h 30 - 20 h 00	
Documentation		Calculatrice		
<input checked="" type="checkbox"/> Aucune <input type="checkbox"/> Toute <input type="checkbox"/> Voir directives particulières		<input type="checkbox"/> Aucune <input type="checkbox"/> Toutes <input checked="" type="checkbox"/> Non programmable		Les cellulaires, agendas électroniques ou téléavertisseurs sont interdits.
Directives particulières				
1. Les nombres entre parenthèses indiquent le nombre de points accordés à la question, le total est de 35 points. 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. 3. Utilisez les espaces prévus ou la page opposée pour vos calculs. 4. Des annexes et un formulaire général sont fournis aux pages 8 à 12. Vous pouvez détacher ces pages.				
Important	Cet examen contient <input type="text" value="4"/> questions sur un total de <input type="text" value="12"/> 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			

Question N°1

Durcissement structural

(7 points)

Les alliages de magnésium sont intéressants de par leur faible masse volumique; certains d'entre eux, tel que l'alliage Mg + 9% Al + 2% Zn, sont susceptibles de répondre au traitement de durcissement structural (voir figures données en annexe, p. 8). Vous devez utiliser cet alliage Mg + 9% Al + 2% Zn dans un état tel qu'il ait les propriétés mécaniques suivantes :

Des contraintes techniques vous imposent une durée fixe de traitement de 6 h à trois températures possibles fixes (150, 175 ou 225 °C).

$$R_{e0,2} \geq 160 \text{ MPa} \quad R_m \geq 170 \text{ MPa} \quad A \geq 4 \%$$

a) À quelle température θ_{ss} ferez-vous le traitement de mise en solution solide ? *Justifiez votre réponse.* (2 points)

$\theta_{ss} =$	375	$^{\circ}\text{C}$
-----------------	------------	--------------------

Justification :

La température de mise en solution doit se trouver dans le domaine monophasé α pour une composition de 9 %Al, c'est-à-dire pour toute température entre la température de solvus (320 °C) et de solidus (470 °C).

Pour éviter les risques de brûlure de l'alliage dus à la ségrégation des éléments d'addition, on choisira une température inférieure à la température de l'eutectique (390 °C).

b) Quelle sera la température de vieillissement θ_v que vous choisirez pour satisfaire aux propriétés mécaniques requises ? *Justifiez votre réponse.* (2 points)

$\theta_v =$	175	$^{\circ}\text{C}$
--------------	------------	--------------------

Justification :

Pour un vieillissement dont la durée est fixée à 6 heures, c'est seulement à 175 °C qu'on pourra respecter les 3 critères imposés concernant les propriétés mécaniques $R_{e0,2}$, R_m et A . Car :

- à 150 °C, $R_{e0,2}$ est inférieur à 160 MPa, donc rejeté;
- à 225 °C, A est inférieur à 4%, donc aussi rejeté.

c) Au cours du vieillissement, vers quelle composition chimique évoluera la composition des précipités qui apparaissent ? (1 point)

Réponse : $\text{Mg}_{17}\text{Al}_{12}$ qui est la composition des précipités à l'équilibre.

- d) Si, sur des pièces faites de cet alliage, vous devez faire des opérations de mise en forme par déformation plastique (par ex., pliage), à quelle étape du traitement thermique les ferez-vous ? Justifiez votre réponse. (2 points)

Réponse :

À l'état brut de trempe (et avant le vieillissement) car, pour réaliser la mise en forme par déformation plastique des pièces, il faut que l'alliage possède une bonne ductilité (afin de se déformer sans se rompre) et une limite d'élasticité faible (afin de minimiser la puissance des outils de mise en forme – presses, plieuses, etc. –). C'est dans cet état que l'alliage présente les propriétés mécaniques requises pour être aisément mis en forme ($R_{e0,2} = 110$ MPa, $R_m = 125$ MPa et $A = 17,5$ %).

Question N°2 Traitement thermique d'un acier (12 points)

Une pièce en acier 4140 a été traitée thermiquement pour obtenir à la fin du traitement une dureté de 47 HRC. En annexe, aux pages 9 et 10, on dispose : des courbes TTT de l'acier 4140, une courbe montrant la variation de la dureté de cet acier au cours d'un revenu qui suit une trempe martensitique ainsi que le diagramme d'équilibre Fe-C.

- a) Décrivez un traitement thermique qui permet de conférer cette dureté à l'acier 4140. Précisez les différentes étapes ainsi que leurs caractéristiques (température et temps). Pour chacune des étapes, précisez l'état microstructural de l'acier à la fin de l'étape considérée. (3 points)

Deux traitements thermiques différents sont possibles:

- Un traitement qui, d'après les courbes TTT fournies, conduit à une structure bainitique qui aura la dureté requise;

Nom de l'étape	Température (° C)	Durée (s)	Microstructure
Austénitisation	$\approx 850 (A_3 + 50^\circ \text{C})$	Selon dimensions de la pièce. Tout l'acier doit être transformé en austénite stable.	Austénite γ stable [CFC] contenant le carbone en solution solide.
Trempe	350	Instantanée (≈ 0)	Austénite γ instable [CFC] contenant le carbone en solution solide sursaturée
Maintien isotherme	350	200 (minimum)	Phases d'équilibre : ferrite α [CC] et fins carbures de fer. Bainite

ou

- Un traitement qui conduit à une structure martensitique revenue.

Nom de l'étape	Température (° C)	Durée (s)	Microstructure
Austénitisation	≈ 850 (A ₃ + 50° C)	Selon dimensions de la pièce. Tout l'acier doit être transformé en austénite stable.	Austénite γ stable [CFC] contenant le carbone en solution solide.
Trempe	20	Instantanée (≈ 0)	Transformation instantanée de l'austénite γ [CFC] en martensite quadratique centrée contenant le carbone en solution solide sursaturée (dureté = 61 HRC)
Revenu	360	2 heures	Décomposition partielle de la martensite revenue et formation de fins précipités de carbure de fer

- b) Quel traitement devrait-on appliquer à l'acier 4140 pour obtenir une dureté égale à 20 HRC ? Décrivez en détails les étapes de ce traitement thermique, en précisant l'état de l'acier (phases en présence) au cours du temps. À la fin de ce traitement thermique, quelle est la microstructure de l'acier ? (4 points)

Nom de l'étape	Température (° C)	Durée (s)	Phases
Austénitisation	≈ 850 (A ₃ + 50° C)	Selon dimensions de la pièce. Tout l'acier doit être transformé en austénite stable.	Austénite γ stable [CFC] contenant le carbone en solution solide.
Trempe	645	Instantanée (≈ 0)	Austénite γ instable [CFC] contenant le carbone en solution solide sursaturée
Maintien isotherme	645	de 0 à 6	Austénite γ instable [CFC] contenant le carbone en solution solide sursaturée
		de 6 à 50	Austénite γ instable [CFC] se décomposant progressivement en ferrite α (pauvre en carbone) et s'enrichissant donc en carbone. Ferrite α + Austénite γ instable
		de 50 à 700	Le reste d' austénite γ instable , riche en carbone, se transforme progressivement et simultanément en ferrite α et en cémentite Fe₃C , sous forme de perlite
		> 700	Phases d'équilibre : ferrite α [CC] et cémentite Fe₃C

Microstructure finale : Ferrite primaire (ou proeutectoïde) + Perlite

- c) Quel traitement devrait-on appliquer à l'acier 4140 pour obtenir une microstructure ferrito-martensitique à la fin du traitement ? (2 points)

Réponse :

Mise en solution dans le domaine biphasé $\alpha + \gamma$ en portant l'acier 4140 à une température entre A_1 et A_3 (appelé aussi domaine intercritique) où on reste suffisamment longtemps pour avoir l'équilibre. On a de la ferrite et de l'austénite.

On trempe ensuite l'acier à la température ambiante (20°C). L'austénite se transforme en martensite.

- d) L'acier 4140 contient du chrome, est-ce que cela en fait un acier inoxydable ? Dites pourquoi ? (2 points)

Réponse : Non, il faut au moins 12% de chrome pour avoir un acier inoxydable.

- e) Pour quelle raison a-t-on ajouté du chrome dans cet acier ? (1 point)

Réponse :

Dans l'acier 4140, l'ajout de chrome a pour effet de retarder les réactions d'équilibre et de faciliter la trempe martensitique.

Question n° 3 Diagramme d'équilibre (9 points)

Un superalliage de nickel peut être durci à l'aide d'un traitement de durcissement structural. Le principal élément d'alliage ajouté au nickel (Ni) pour obtenir un durcissement structural efficace est le niobium (Nb). Le diagramme d'équilibre Ni-Nb est donné en annexe à la page 11.

- a) Ce superalliage de nickel contient 10 % de niobium. Quelle est la température minimale de mise en solution solide θ_{sv} de cet alliage ? (1 point)

$$\theta_{sv} = 585^{\circ}\text{C} \pm 15^{\circ}\text{C}$$

(Il faut obtenir la température du solvus pour un alliage contenant 10% de Ni tel que montré sur le graphique.)

- b) Après la mise en solution solide, nommez les autres étapes du traitement thermique nécessaires pour obtenir un durcissement structural efficace ? (2 points)

Réponse : II. La trempe
III. Le vieillissement

- c) De façon générale, est-ce que le durcissement par solution solide est plus efficace que le durcissement structural ? Justifiez votre réponse. (1 point)

Réponse :

Le durcissement par solution solide est moins efficace car les solutés (atomes en solution) entravent moins le mouvement des dislocations que les précipités.

- d) Identifiez une réaction eutectique en écrivant la réaction (sous la forme phase A + phase B + ... → phase C + phase D + ...) et la température de la réaction. Spécifiez aussi pour chaque phase à l'équilibre, sa composition chimique. (3 points)

Réaction :	Liquide → (Ni) + Ni ₃ Nb
Température :	1282 °C

phase	composition de la phase (% massique Nb)
Liquide	21,6
(Ni)	18,3
Ni ₃ Nb	31,8

ou

Réaction :	Liquide → Ni ₃ Nb + Ni ₆ Nb ₇
Température :	1175 °C

phase	composition de la phase (% massique Nb)
Liquide	52,3
Ni ₃ Nb	37,5
Ni ₆ Nb ₇	61,8

- e) Quelle est la solubilité maximale du nickel dans la phase la plus riche en niobium ? (1 point)

Réponse : On peut dissoudre au plus 2,7 % massique de Ni dans la phase (Nb).
Calculs ou justifications :
Le diagramme d'équilibre montre que l'on peut dissoudre au maximum 2,7 % de Ni (100 % Nb - 97,3 % Nb = 2,7 % Ni) dans la phase riche en niobium, (Nb).

- f) À partir de quelle température doit-on tenir compte du phénomène de fluage dans le niobium pur ? Dites pourquoi. (1 point)

Réponse :

Le phénomène de fluage est important lorsque la température d'utilisation d'un alliage métallique dépasse la moitié de la température de fusion exprimée en kelvins. Ici, pour le niobium pur (Nb), $T_f = 2477 \text{ °C}$.

$$\text{Alors : } T_{\text{fluage}} \cong \frac{T_f(K)}{2} = \frac{(2477+273)K}{2} = \frac{2750K}{2} = 1375K .$$

Ce qui correspond à une température d'environ 1100 °C.

d) Y a-t-il une propagation des fissures sous ce chargement cyclique ?

(2 points)

Calculs ou justifications :

Premièrement, on constate que $K_{max} < K_c$.

$$K_{max} = \alpha \sigma_{max} \sqrt{\pi a} = (1,12)(325 \text{ MPa}) \sqrt{\pi(3 \times 10^{-3} \text{ m})} = 35,3 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}} < K_c$$

car $K_c = 39 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$

Donc, il n'y a pas de rupture brutale lors du premier cycle de chargement.

Toutefois, il pourrait y avoir une propagation de la fissure à chaque cycle de chargement si la variation du facteur d'intensité de contrainte ΔK est supérieure au seuil de propagation ΔK_{seuil} .

$$\text{Ici, } \Delta K = \alpha(\Delta\sigma)\sqrt{\pi a} = (1,12)(25 \text{ MPa})\sqrt{\pi(3 \times 10^{-3} \text{ m})} = 2,72 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$$

et $\Delta K_{seuil} = 5 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$

Il n'y aura pas de propagation de fissure puisque $\Delta K < \Delta K_{seuil}$.

Propagation des fissures : **NON**

propagation des fissures (répondre par oui ou non) :

non

Cette aube de turbine hydraulique est fabriquée en acier inoxydable martensitique recouvert d'un acier inoxydable austénitique.

e) Quelle(s) est(sont) la(les) principale(s) raison(s) pour laquelle(lesquelles) on fait ce type d'assemblage ? (2 points)

Réponse :

Pour la résistance à la corrosion. Les aciers inoxydables austénitiques possèdent une meilleure résistance à la corrosion que les aciers inoxydables martensitiques car leur teneur en chrome est plus élevée.

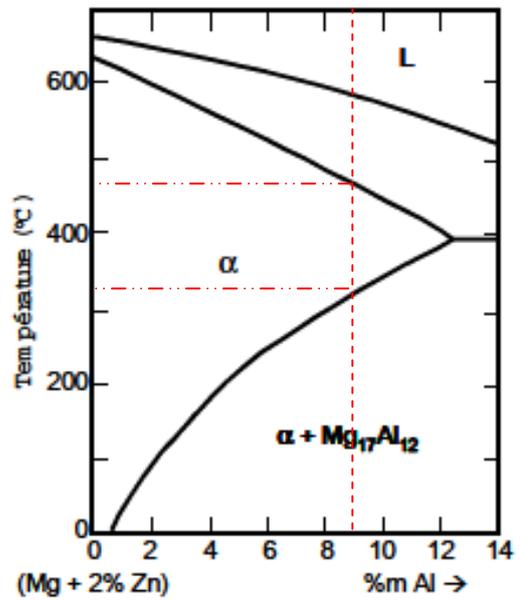
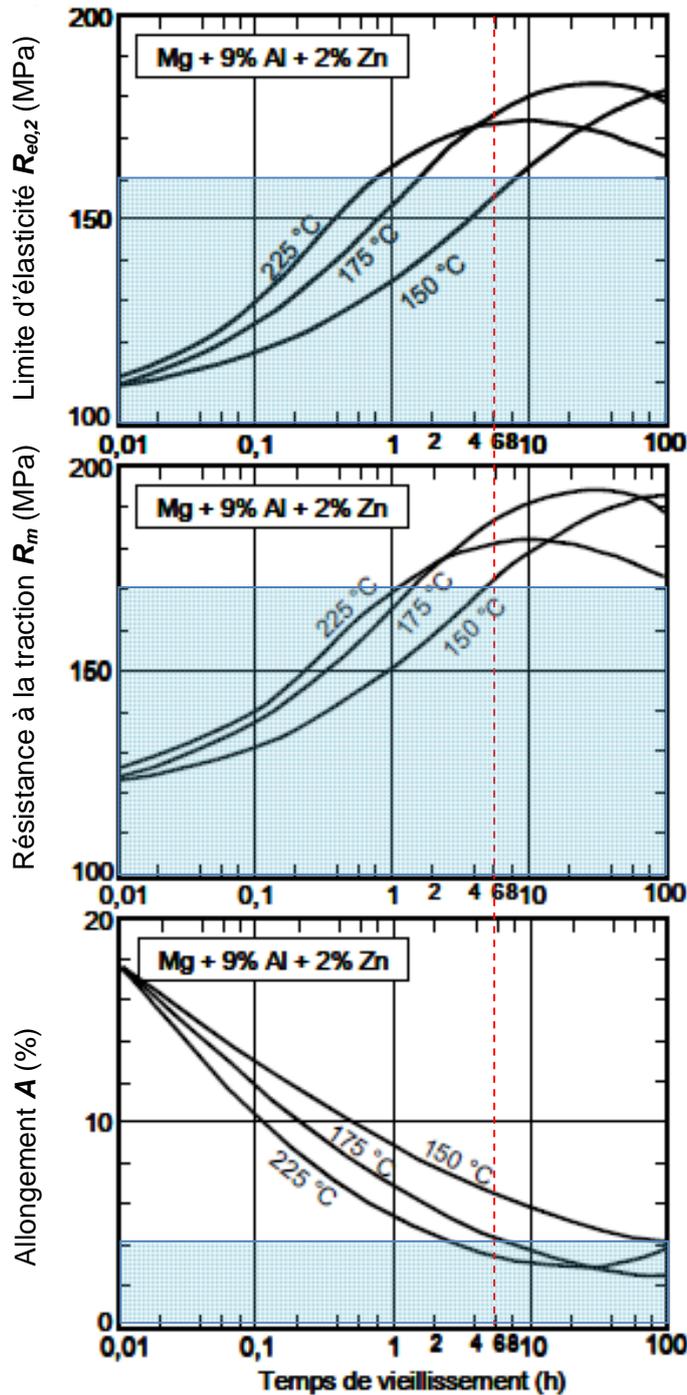
Pour cette raison, ils sont aussi plus coûteux que les aciers inoxydables martensitiques. Avec un revêtement d'acier inoxydable austénitique qui protège le reste de la structure d'acier inoxydable martensitique de la corrosion, on peut réduire les coûts de la turbine.

Bonne Chance,

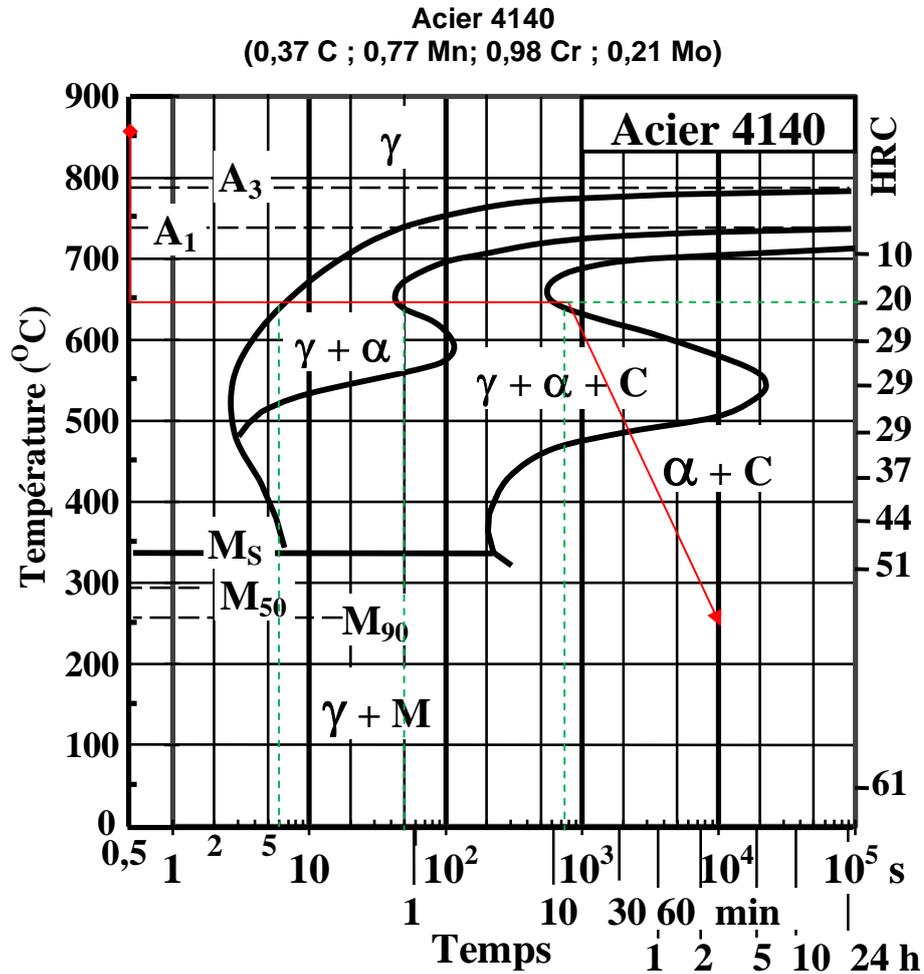
Richard Lacroix, chargé de cours.

ANNEXES

Question 1



Question 2



Acier 4140 : Courbe de revenu après trempe martensitique

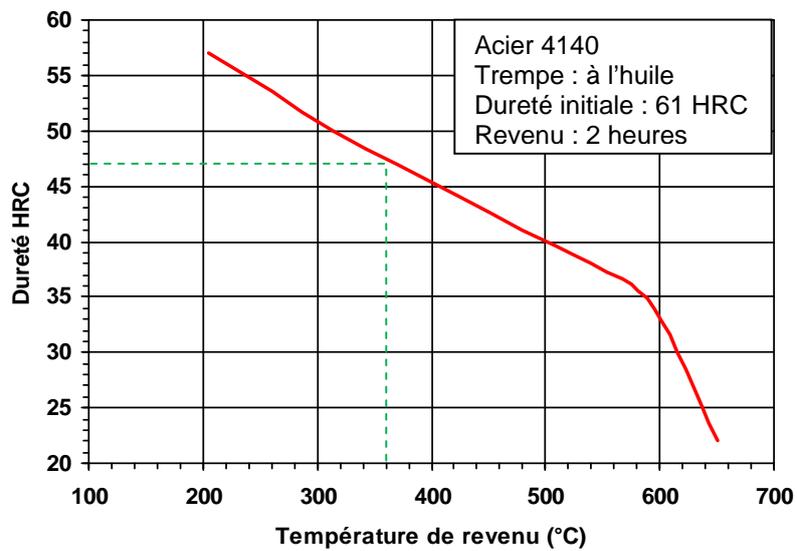
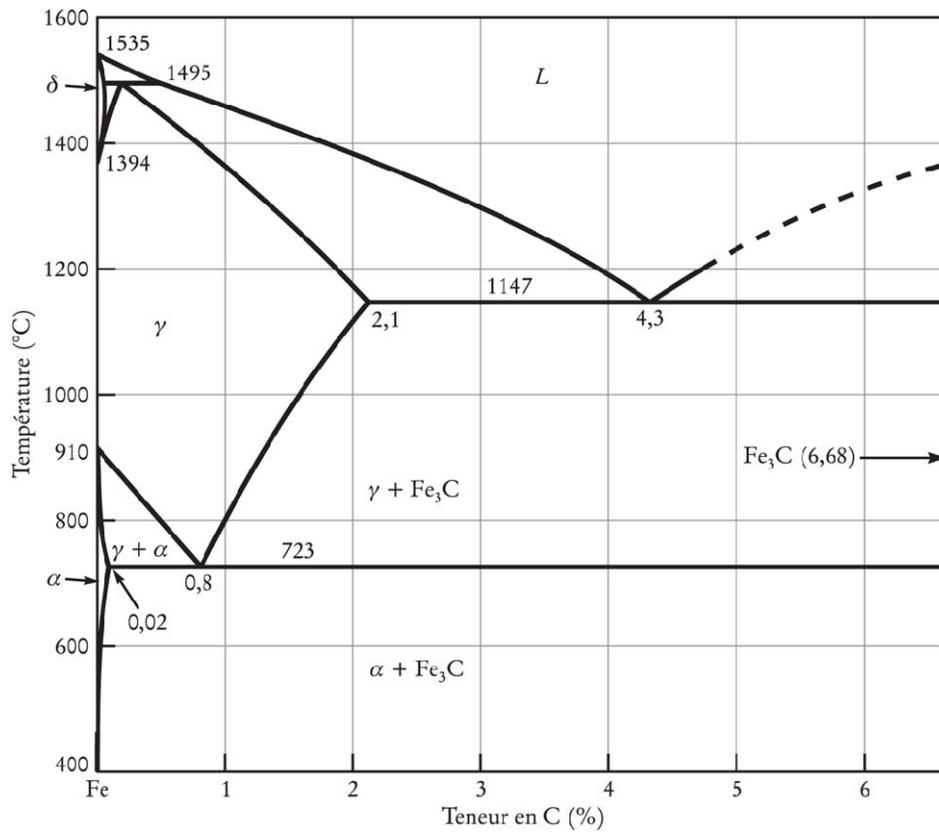
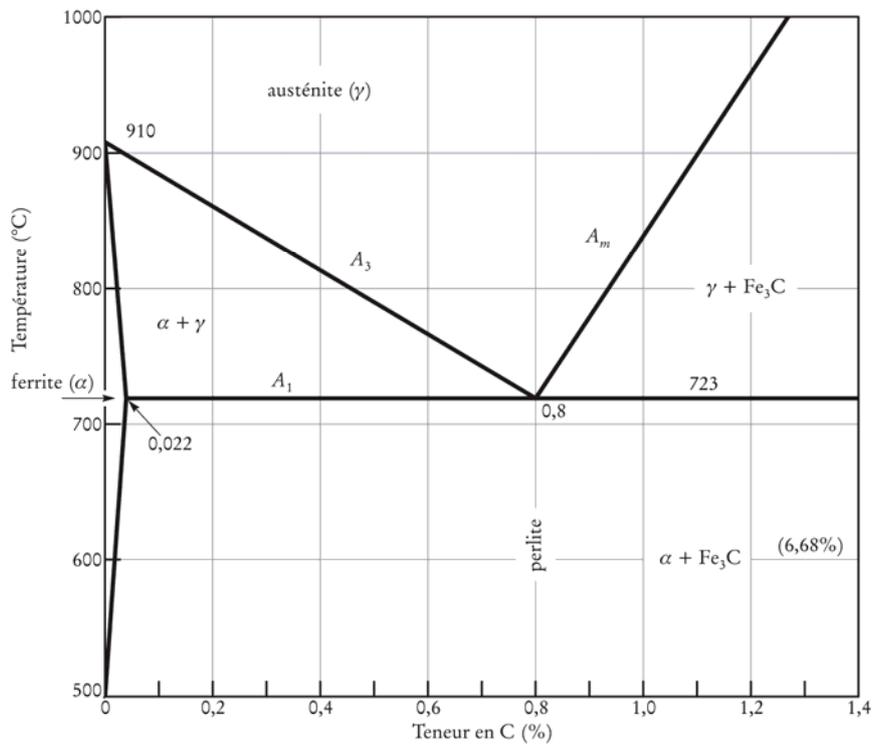


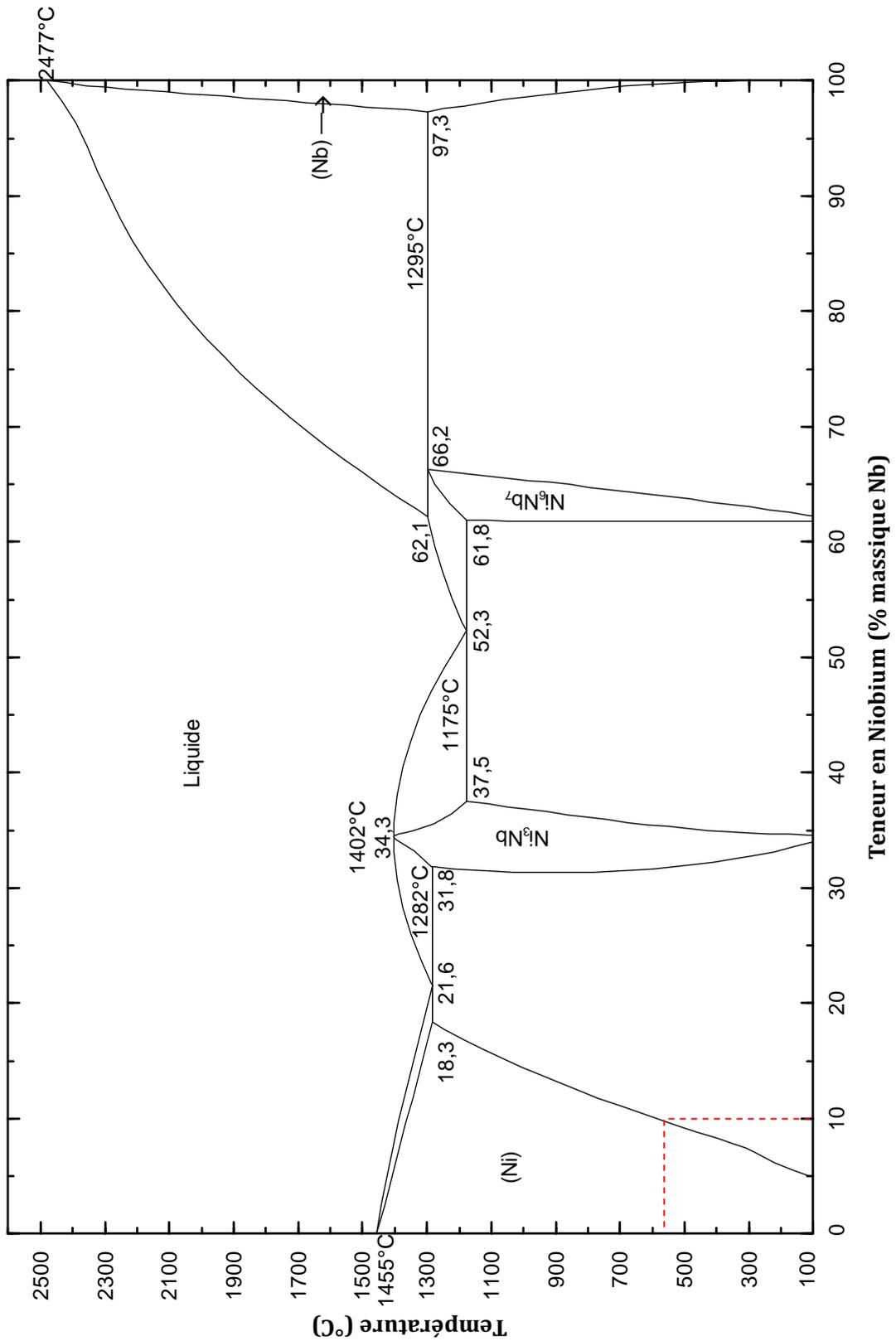
Diagramme Fe-C



Portion du diagramme précédent



Question 3 : diagramme d'équilibre Ni-Nb



Formulaire général :

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

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

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

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

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

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

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

$$f_S C_S + f_L C_L = C_0$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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