

COURS ING1035 - MATÉRIAUX

EXAMEN FINAL

du 16 décembre 2003

de 9h30 à 12h00

QUESTIONNAIRE

NOTES :

- ◆ Aucune documentation permise.
- ◆ Calculatrice non programmable autorisée.
- ◆ Les nombres en marge indiquent le nombre de points accordés à la question, le total est de **60** points. La note maximale de l'examen étant de 50 points, tout point supplémentaire sera transformé en point de bonus.
- ◆ Pour les questions nécessitant des calculs, aucun point ne sera accordé à la bonne réponse si le développement n'est pas écrit. Utilisez les espaces prévus ou la page blanche opposée pour vos calculs.
- ◆ Le questionnaire comprend **15** pages, en incluant les annexes (si mentionnés) et le formulaire général.
- ◆ Le formulaire de réponses comprend **10** pages.
- ◆ **Vérifiez le nombre de pages du questionnaire et du formulaire de réponses.**

Remarque : les 5 premiers exercices sont relatifs aux unités facultatives 8, 9, 10, 11 et 12.
Les exercices suivants couvrent les unités obligatoires (unités 1 à 7)

Exercice n° 1 (Dégradation)

Une tôle d'aluminium 2024 non protégée est plongée en permanence dans l'eau de mer. L'eau de mer peut être considérée comme un électrolyte légèrement acide contenant de l'oxygène dissous. En annexe, vous disposez de la série galvanique des métaux et alliages métalliques dans l'eau de mer.

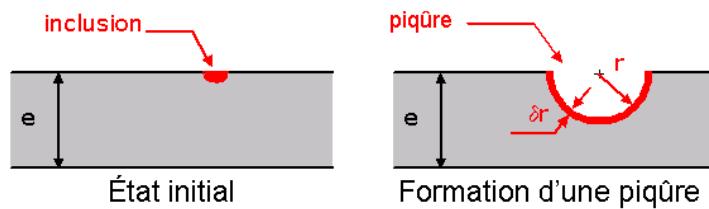
- a) Quelles sont les réactions anodique et cathodique qui se produisent ? Sur le formulaire de réponse, **répondez (1 pt) par A pour anodique et par C pour cathodique dans les cases appropriées.**

Dans l'eau de mer, les réactions anodique et cathodique sont caractérisées par les grandeurs suivantes associées à leurs courbes de polarisation respectives:

Réaction	Courant d'échange		Pente de Tafel β (V/décade)
	E_0 (V)	j_0 (A/dm ²)	
Cathodique	+ 1,20	5×10^{-6}	- 0,4507
Anodique	- 1,67	3×10^{-6}	+ 0,333

- b) À quel potentiel absolu E_{Al} se trouve la tôle lorsqu'elle est plongée dans l'eau de mer ? Conseil: utilisez un papier graphique approprié pour obtenir votre réponse. (1 pt)
- c) Quelle est la valeur de la densité de courant de corrosion j_{Al} qui affecte cette tôle ? Conseil: utilisez un papier graphique approprié pour obtenir votre réponse. (1 pt)

La présence d'inclusions dans l'aluminium entraîne une corrosion par piqûres de la tôle et l'on suppose que la corrosion se localise uniquement à la surface des piqûres. Ces piqûres de corrosion peuvent être considérées comme des demi-sphères, de rayon r (voir figure ci-contre).



- d) Si j_{Al} est la densité du courant de corrosion de l'aluminium, laquelle des équations proposées au formulaire de réponse donne l'intervalle de temps δt requis pour que le rayon r d'une piqûre augmente de δr avec, pour conséquence, une perte de masse δm d'aluminium au niveau de la piqûre ? (1 pt)
- e) En supposant qu'il se forme une (1) piqûre par cm^2 de tôle, calculez le temps t requis (en mois) pour qu'il y ait perforation de la tôle, c'est-à-dire quand le rayon r de la piqûre devient égal à l'épaisseur e de la tôle. (1 pt) L'épaisseur de la tôle est égale 4 mm et l'on supposera qu'au début le rayon r de la piqûre est nul.
NB: 1 mois = 720 h.

Données : Constante de Faraday $F = 9,648 \times 10^4$ C/mole

Aluminium (Al)	
Massé volumique (g/cm ³)	2,8
Massé atomique (g/mole)	26,98
Valence	+ 3

Exercice n° 2 (Propriétés physiques)

L'arséniure de gallium **GaAs** est un semi-conducteur très prometteur. À température ambiante (20 °C = 293 K), sa semiconduction intrinsèque est caractérisée par les grandeurs suivantes :

$$\text{Bande interdite } E_g = 1,4 \text{ eV}$$

$$\text{Mobilité des électrons } \mu_e = 0,65 \text{ m}^2/\text{V.s}$$

$$\text{Conductivité } \sigma = 10^{-6} \text{ S/m}$$

$$\text{Mobilité des trous } \mu_t = 0,04 \text{ m}^2/\text{V.s}$$

Données :

$$\sigma = e(N_e N_t)^{1/2} (\mu_e + \mu_t) \exp\left(-\frac{E_g}{2kT}\right)$$

$$n_e n_t = (N_e N_t) \exp\left(-\frac{E_g}{kT}\right)$$

$$e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$$

$$k = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$$

- a) Calculez les densités N_e et N_t des niveaux d'énergie (exprimées en nombre) dans la bande de conduction et dans la bande de valence du **GaAs** intrinsèque à 20 °C ? (1 pt)
- b) Quel est le nombre n_e d'électrons libres (ou de trous n_t) par unité de volume (nombre donné en 1012 par m³) du **GaAs** intrinsèque à 20 °C ? (1 pt)
- c) À quelle température (en °C) doit-on porter le GaAs pour que sa conductivité intrinsèque soit alors 1000 (10³) fois plus élevée qu'à 20 °C ? (2 pts)

À température ambiante, on peut obtenir une telle conductivité si l'on dope le **GaAs** avec un élément étranger.

- d) Afin de minimiser le taux de dopage (concentration atomique en élément dopant), vaut-il mieux utiliser le cadmium (répondre **Cd**) ou le sélénium (répondre **Se**) pour obtenir un semi-conducteur extrinsèque ayant, à 20 °C, une conductivité 1000 fois plus élevée que celle du **GaAs** intrinsèque à cette même température ? Justifiez votre réponse. (1 pt)

Données : tableau périodique en annexe.

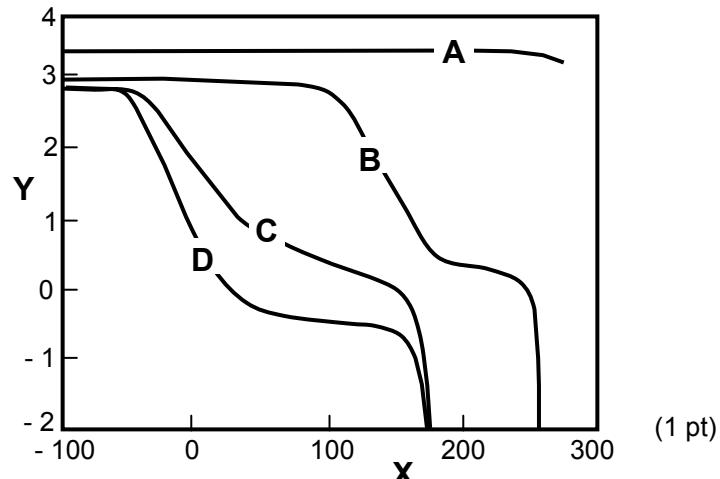
Exercice n° 3 (Matières plastiques)

Considérez les trois polymères suivants :

- ◆ Polyéthylène (**PE**)
- ◆ Polystyrène atactique (**PS**)
- ◆ Phénolformaldhéhyde (**PF**) Bakélite

La figure ci-contre donne la variation d'une propriété **Y** du polymère en fonction d'une certaine variable **X** extérieure.

- a) Quelles est la variable **X** et la fonction **Y** de cette figure (1 pt)
- b) En cochant les cases appropriées du formulaire de réponses, complétez le tableau en indiquant quel(s) polymère(s) sont :
- | | | | |
|-----------------------|-------------------|---------------------|-------------------|
| ◆ à chaînes linéaires | ◆ cristallisables | ◆ thermodurcissable | ◆ thermoplastique |
|-----------------------|-------------------|---------------------|-------------------|
- c) À chacun de ces trois polymères, associez une des courbes $Y = f(X)$ représentées ci-dessus. (1 pt)
- d) Comparée à la microstructure du polymère associé à la courbe **D**, quelle est la différence de microstructure du polymère associé à la courbe **C** ? Cochez la (les) case(s) appropriée(s) sur le formulaire de réponses. (1 pt)



Exercice n° 4 (Céramiques)

Le carbure de silicium (SiC) est une céramique ayant des propriétés semi-conductrices, qui lui permettent d'être utilisé comme élément chauffant dans des fours industriels. Le carbure de silicium massif a un module d'Young E égal à 450 GPa. Sa résistance à la traction R_{m0} est égale à 1800 MPa. On supposera que les défauts présents dans le SiC massif sont de forme elliptique et que le coefficient géométrique α qui leur est associé est égal à 2. Le rayon de courbure r de ces défauts est égal à la distance interatomique, soit 0,2 nm.

- a) Quelle est la profondeur a (en nm) des plus grands défauts présents dans le SiC massif? (1 pt)

Le coût de production du silicium polycristallin massif étant très élevé, on décide d'utiliser plutôt une méthode de fabrication des éléments chauffants par frittage sous pression isostatique d'une poudre de SiC, ce qui conduit toujours à un produit contenant un certain taux p de porosité. Si la porosité p est exprimée en %, la résistance à la traction R_m du SiC fritté dépend du pourcentage p de porosité selon l'équation suivante:

$$R_m = R_{m0} \cdot e^{-5p}$$

- b) Quel est le pourcentage maximal p_{max} de porosité (en %) que l'on peut tolérer dans les pièces frittées si leur résistance à la traction R_m doit au moins être égale à 1200 MPa ? (1 pt)
- c) Si les pores présents dans le SiC fritté sont considérés comme des défauts internes de grand axe $2a$, ayant un rayon de courbure minimal de 10 nm et caractérisés par un facteur de forme $\alpha = 2,5$, quelle est la dimension $2a_{max}$ (en μm) du pore le plus gros qui entraîne la rupture en traction du SiC fritté ? (1 pt)
- d) Après les premiers essais de fabrication, on constate que les pièces de SiC fritté n'atteignent pas la résistance à la traction minimale recherchée, soit 1200 MPa. Quel(s) paramètre(s) de frittage devra-t-on faire varier et dans quel sens (augmentation, diminution, maintenu constant) pour obtenir la résistance à la traction recherchée? Justifiez vos réponses. (1 pt)

Une fois les paramètres de frittage bien contrôlés pour obtenir la résistance à la traction R_m égale à 1200 MPa, on fabrique donc des éléments chauffants pour un four industriel. Ces éléments ont alors une résistance en compression R_{mc} égale à 1500 MPa. Au cours de leur utilisation, un élément peut subir des refroidissements brusques, considérés comme infiniment sévères et l'on supposera que l'élément ne peut pas se contracter librement.

- e) Quelle différence maximale de température $\Delta\theta$ (en $^{\circ}\text{C}$) pourra supporter un élément chauffant au cours d'un tel refroidissement ? (1 pt)

Données :

$$v = 0,25$$

$$f(v) = (1 - v)$$

$$\alpha = 6 \times 10^{-6} \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-1}$$

Exercice n° 5 (Composites)

Considérez un composite « Epoxy – Fibres de verre ». Les fibres de verre sont continues et alignées. Le tableau suivant résume les propriétés mécaniques des composants.

Composant	E (GPa)	R_e (MPa)	R_m (MPa)	A (%)	ρ (g/cm ³)
Epoxy	4	70	80	3,5	1,32
Verre	76	---	2 000	nd*	2,54

*nd = non disponible

- a) Calculez la fraction volumique de fibres V_f pour que la résistance à la traction R_{mc} du composite soit au moins égale à dix (10) fois la limite d'élasticité R_{em} de la matrice ? (2 pts)
- b) Quelle est alors la valeur du module d'Young E_c du composite ? (1 pt)
- c) Quelle est alors la masse volumique ρ_c du composite réalisé ? (1 pt)
- d) Quelle est la limite d'élasticité R_{ec} du composite ainsi réalisé ? (1 pt)

Remarque : Les exercices suivants couvrent les unités obligatoires (unités 1 à 7)

Exercice n° 6

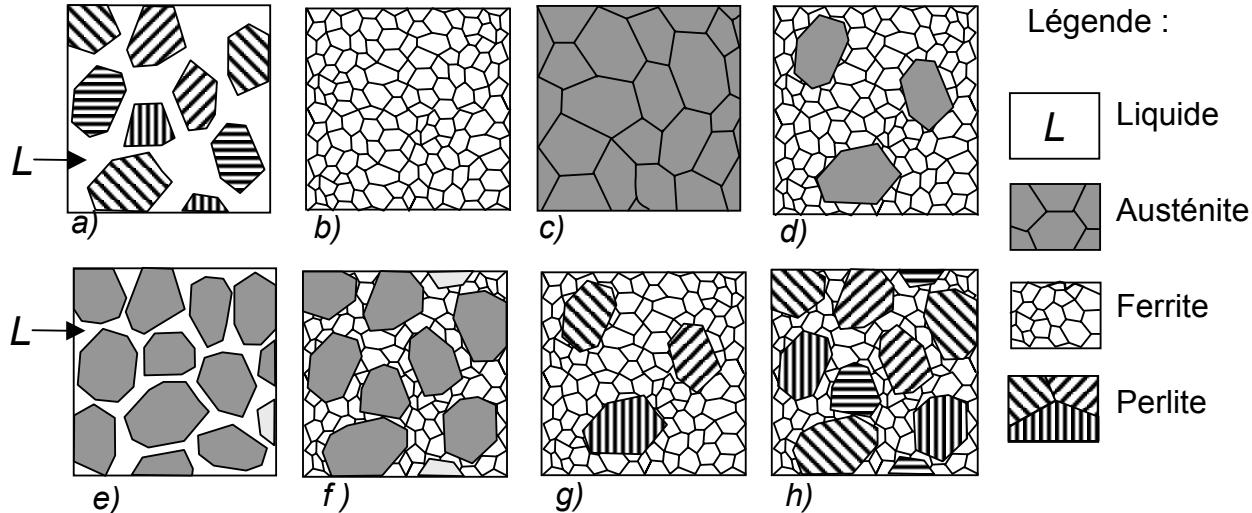
Considérez le diagramme d'équilibre « fer – carbone » (Fe – C) donné en annexe. La cémentite Fe_3C a une composition massique en carbone égale à 6,68% m. La phase α a une structure cubique centrée (C.C.), alors que la phase γ a une structure cubique à faces centrées (C.F.C.). Vous disposez aussi des données suivantes :

Données : Rayon atomique du fer $r = 0,128$ nm.
Masse atomique du fer $A_{\text{Fe}} = 55,8$ g/mole
Nombre d'Avogadro $N_A = 6,022 \times 10^{23}$ atomes/mole

- À quelle(s) température(s) le fer pur subit-il une transformation allotropique au chauffage ? Précisez le changement de phase qui se produit au cours de la transformation allotropique. (2 pts)
- Quelles est la composition \mathbf{C}_E (en %m de C) et la température θ_E caractérisant un point eutectique de ce diagramme ? (1 pt)
- Lors d'un chauffage, le passage de la phase α à la phase γ ($\alpha \rightarrow \gamma$) s'accompagne-t-il d'une augmentation ou d'une diminution de la masse volumique ρ du fer ? Justifiez quantitativement votre réponse. (5 pts)

Un alliage « fer – carbone » contenant 0,6% m C est refroidi à l'équilibre depuis l'état liquide jusqu'à la température ambiante (20 °C).

- Lequel des schémas présentés ci-dessous représente la microstructure de cet alliage aux températures suivantes : 1460 °C, 1400 °C, 724 °C et 20 °C ? Justifiez vos réponses. (4 pts)



Exercice n° 7

L'alliage d'aluminium 2014 (Al + 4,5 %m de Cu) est un alliage fréquemment utilisé en aéronautique et dans les transports et vous trouverez en annexe des données relatives à cet alliage. Cet alliage se prête bien aux traitements thermiques et on lui impose les traitements suivants :

Traitements	Caractéristiques du traitement
A	Chauffage pendant 1h à une température égale à 550 °C
B	Traitement A suivi d'un refroidissement très lent à l'équilibre jusqu'à 20 °C
C	Traitement A suivi d'une trempe à l'eau (20 °C)
D	Traitement C puis chauffage à une température T pendant un temps t .

- a) Quelle est la formule chimique de la phase θ ? (1 pt)
- b) Quelles sont les phases en présence, leur composition chimique (%m Cu) et leur proportion massique (%m) après les traitements **A** et **B** ? (4 pts)
- c) Quel est le constituant de l'alliage 2014 après le traitement **C** ? Justifiez votre réponse. (1 pt)

En appliquant le traitement **D** à l'alliage 2014, vous désirez obtenir les propriétés mécaniques suivantes :

$$R_{e,02} = 400 \text{ MPa}$$

$$R_m = 460 \text{ MPa}$$

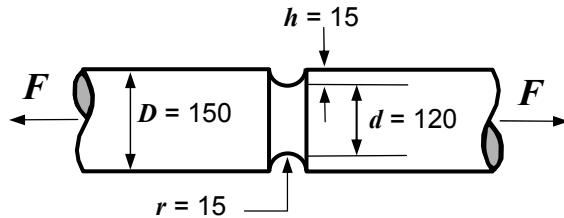
$$A = 12 \%$$

- d) À quelle température **T** (en °C) effectuez-vous le traitement **D** et quelles sont les valeurs minimale t_{min} et maximale t_{max} du temps de traitement à cette température ? (3 pts)
- e) Comment nomme-t-on le traitement **D** ? (1 pt)

Exercice n° 8

Un axe de section circulaire (voir figure ci-dessous) est fait d'acier et est soumis en service à une sollicitation mécanique alternée symétrique engendrant le phénomène de fatigue. En annexe, vous disposez de la courbe de fatigue de cet acier. Cette courbe a été obtenue sur des échantillons lisses (sans gorge) pour des conditions semblables de sollicitation. Vous disposez aussi d'un abaque relatif aux concentrations de contrainte (voir annexe).

Les cotes sont en mm
 $\sigma_{nom} = 4F/\pi d^2$



L'amplitude maximale F_{max} de la force alternée symétrique appliquée à l'axe est égale à 3,015 MN.

- a) Quelle est la valeur du rapport **R** caractérisant la sollicitation en fatigue de cet axe ? (1 pt)
- b) Quelle est la durée de vie **N_f** de l'axe pour ces conditions de sollicitation ? (3 pts)

On désire toutefois que cet axe ait une durée de vie infinie. Pour atteindre cet objectif, deux solutions s'offrent :

Solution 1: changer les diamètres minimal **d** et maximal **D** en maintenant les dimensions de la gorge constantes ($r = 15$ mm, $h = 15$ mm).

Solution 2: changer le rayon de courbure **r** en maintenant les autres dimensions **D**, **d** et **h** constantes.

- c) Si la solution 1 est adoptée, quelles seront les nouvelles dimensions (D et d) de l'axe ? (2 pts)
- d) Si la solution 2 est adoptée, quelle sera la valeur minimale de rayon de courbure r (en mm) de la gorge ? (2 pts)

Exercice n° 9

Quelles sont les affirmations, présentées au tableau du formulaire de réponses, qui sont vraies (V) ? (5 pts)

Attention ! Une mauvaise réponse en annule une bonne !

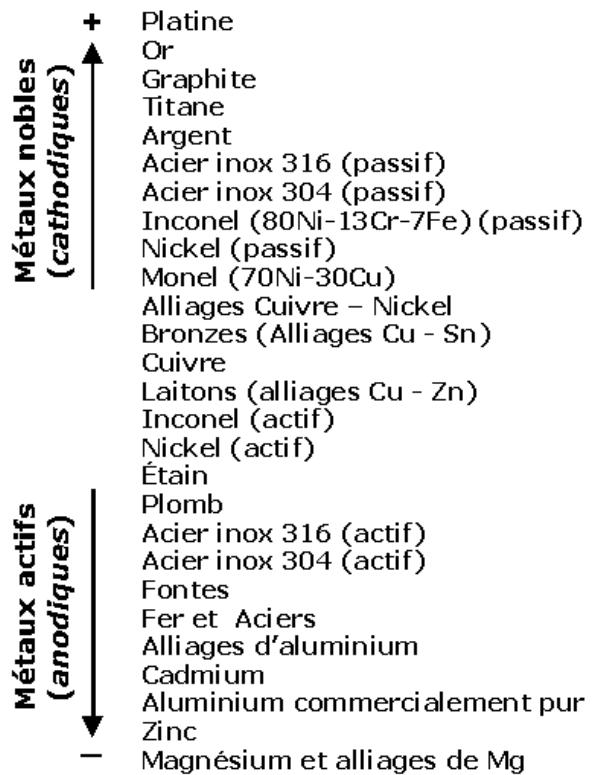
Pour l'équipe de professeurs, le coordonnateur: Jean-Paul Baïlon

M E I L L E U R S V C E U X P O U R 2 0 0 4 !

ANNEXES

Exercice n° 1 : Dégradation

Série galvanique des métaux et alliages dans l'eau de mer



ANNEXES

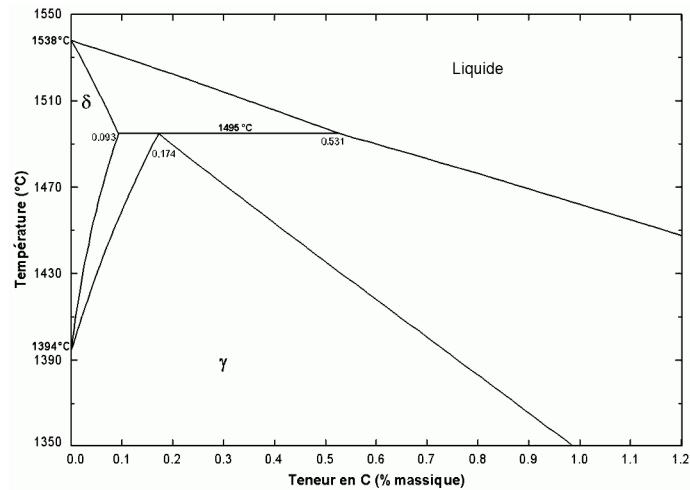
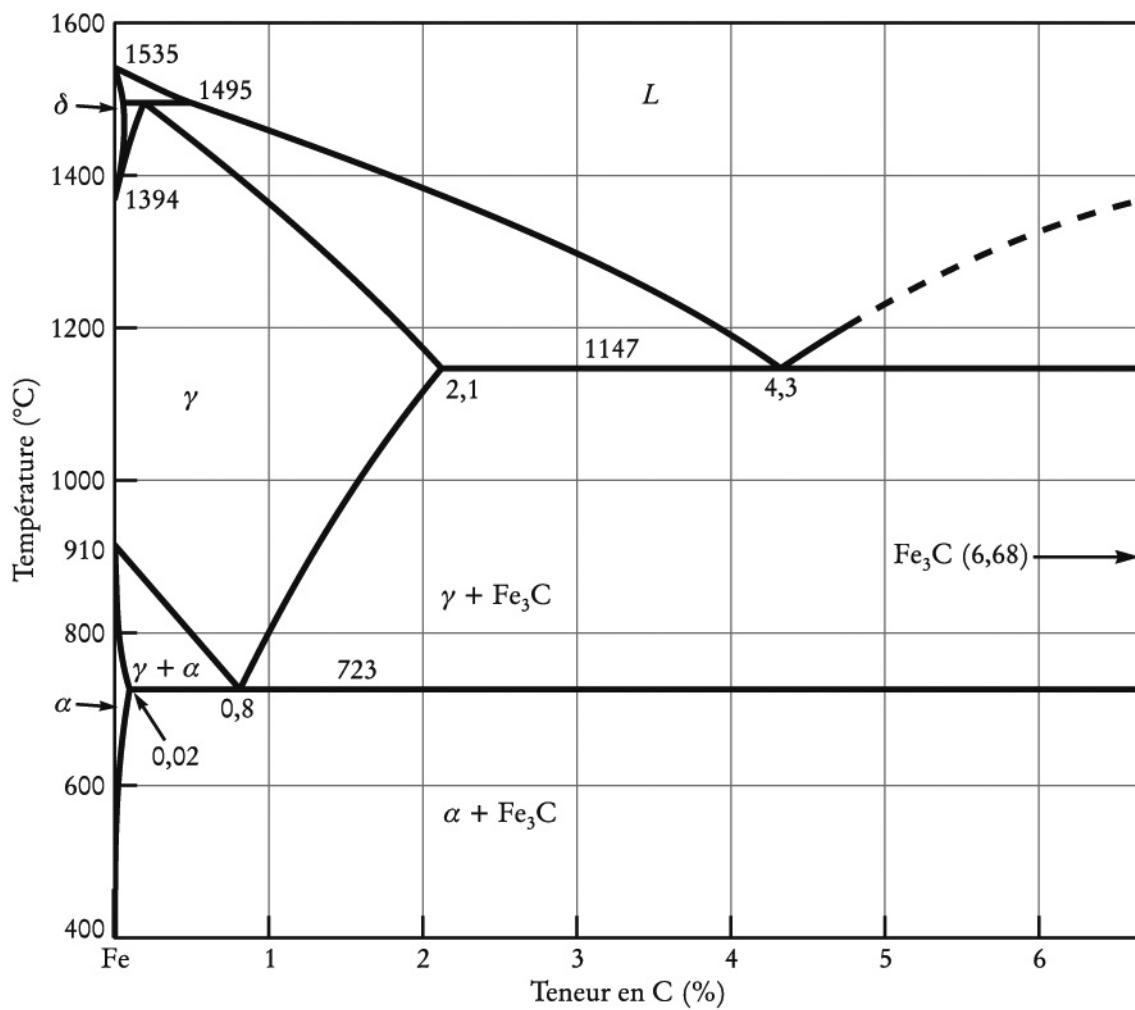
Exercice n° 1 : Dégradation

ANNEXES

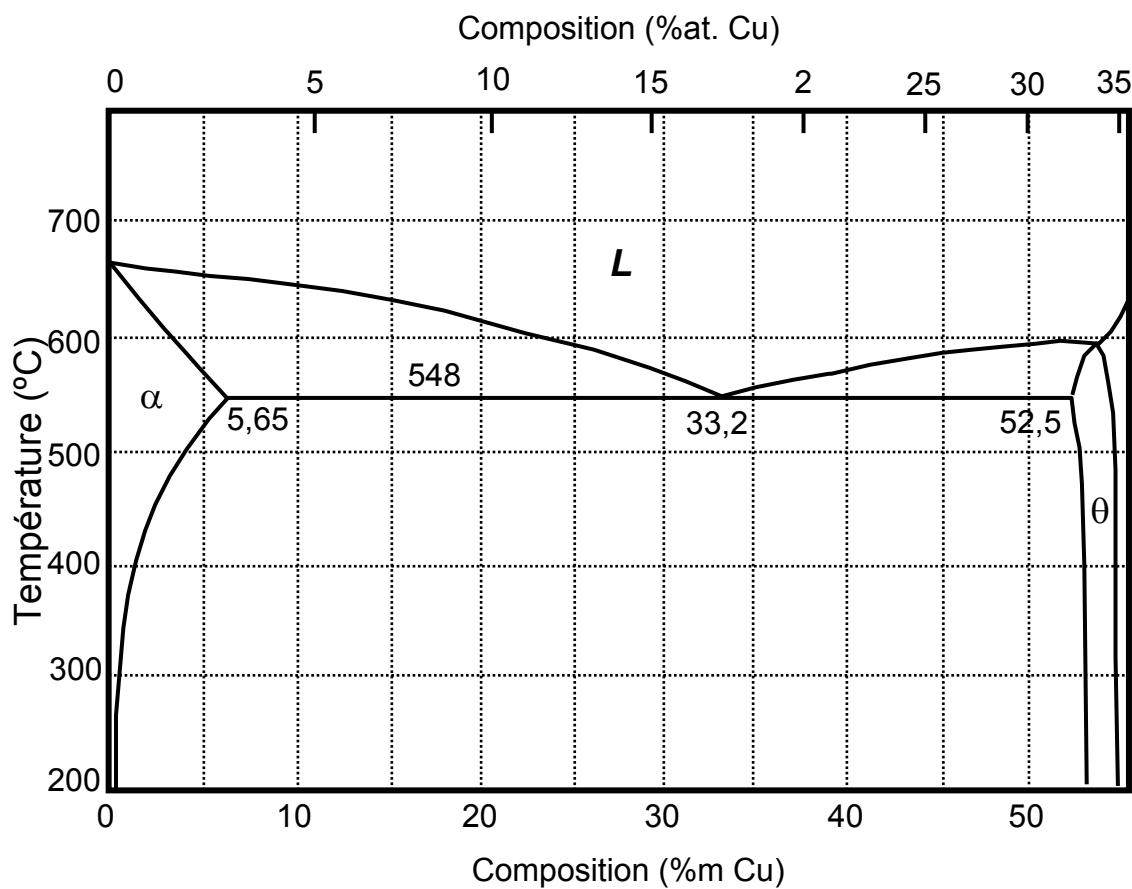
Exercice n° 2 : Propriétés physiques

Tableau périodique des éléments																		
1 IA		Groupe														18 VIIIB		
1	H 1,008	2	VIIIA														2 He 4,003	
1	3 Li 6,939	4 Be 9,012	5 Na 23,00	6 Mg 24,31	7 VIA	8 VIIA	VIIIA				11 IB	12 IIB	13 IIIB	14 IVB	15 VB	16 VIB	17 VIIIB	
2	3 Li 6,939	4 Be 9,012	5 Na 23,00	6 Mg 24,31	7 VIA	8 VIIA	9	10	11	12	13 IIIB	14 IVB	15 VB	16 VIB	17 VIIIB	18 VIIIB		
3	19 K 39,10	20 Ca 40,08	21 Sc 44,96	22 Ti 47,90	23 V 50,94	24 Cr 52,00	25 Mn 54,94	26 Fe 55,85	27 Co 58,93	28 Ni 58,71	29 Cu 63,54	30 Zn 65,37	31 Ga 69,72	32 Ge 72,59	33 As 74,92	34 Se 78,96	35 Br 79,91	36 Kr 83,80
4	37 Rb 85,47	38 Sr 87,62	39 Y 88,90	40 Zr 91,22	41 Nb 92,91	42 Mo 95,94	43 Tc (97)	44 Ru 101,1	45 Rh 102,9	46 Pd 106,4	47 Ag 107,9	48 Cd 112,4	49 Cd 114,8	50 In 118,7	51 Sn 121,8	52 Sb 127,6	53 Te 126,9	54 Xe 131,3
5	55 Cs 132,9	56 Ba 137,3	57 La 138,9	72 Hf 178,5	73 Ta 180,9	74 W 183,8	75 Re 186,2	76 Os 190,2	77 Ir 192,2	78 Pt 195,1	79 Au 197,0	80 Hg 200,6	81 Tl 204,4	82 Pb 207,2	83 Bi 209,0	84 Po (209)	85 At (210)	86 Rn (222)
6	87 Fr (223)	88 Ra (226)	89 Ac (227)	58 Ce 140,1	59 Pr 140,9	60 Nd 144,2	61 Pm (145)	62 Sm 150,4	63 Eu 152,0	64 Gd 157,2	65 Tb 158,9	66 Dy 162,5	67 Ho 164,9	68 Er 167,3	69 Tm 168,9	70 Yb 173,0	71 Lu 175,0	
7	90 Th 232,0	91 Pa (231)	92 U 238,0	93 Np (237)	94 Pu (244)	95 Am (243)	96 Cm (247)	97 Bk (247)	98 Cf (247)	99 Es (251)	100 Fm (252)	101 Md (253)	102 No (256)	103 Lw (257)				

ANNEXES
Exercice 6 : Diagramme Fer – Carbone

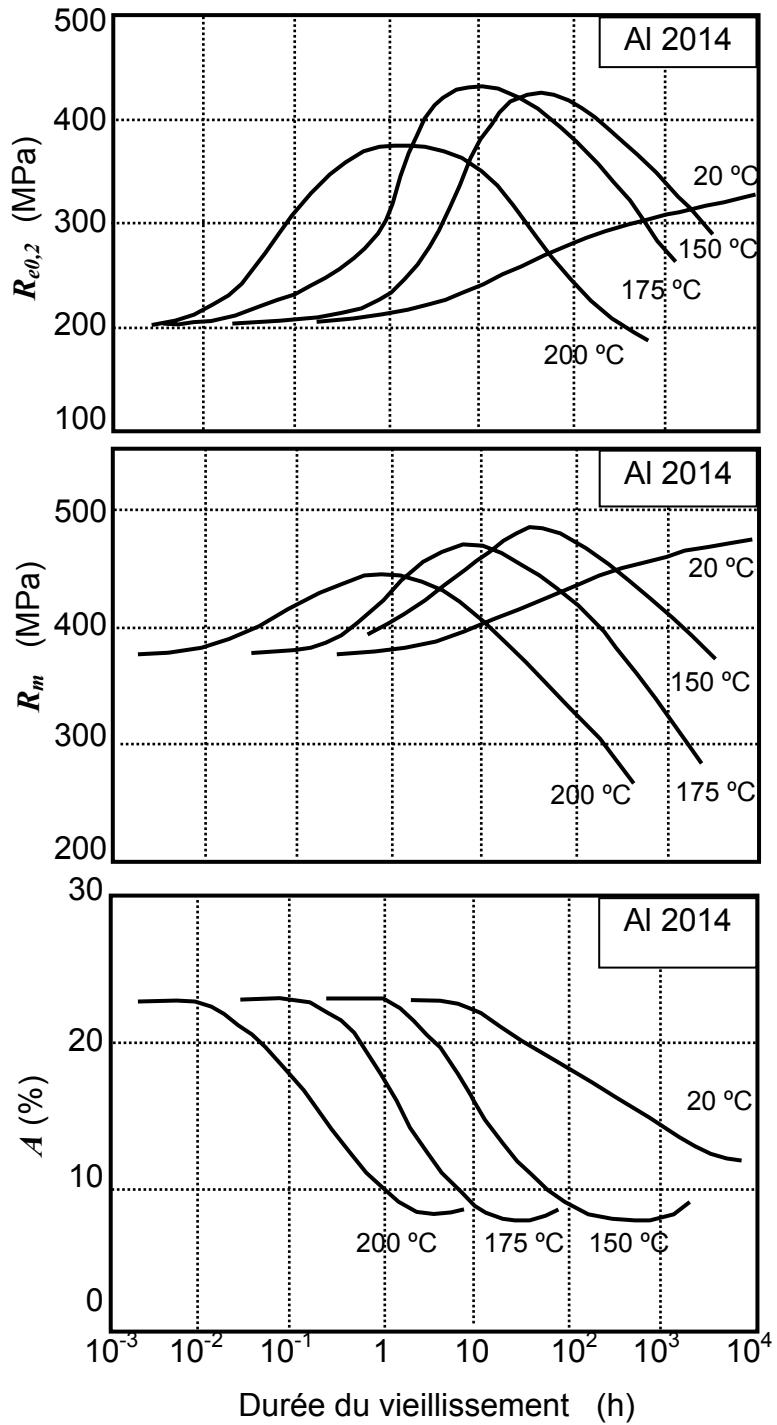


ANNEXES
Exercice n° 7 : Alliage d'aluminium 2014

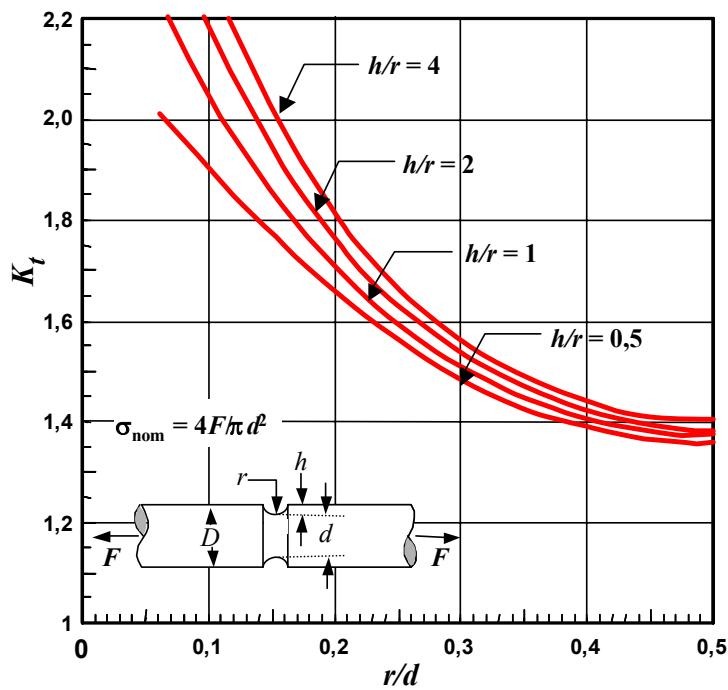
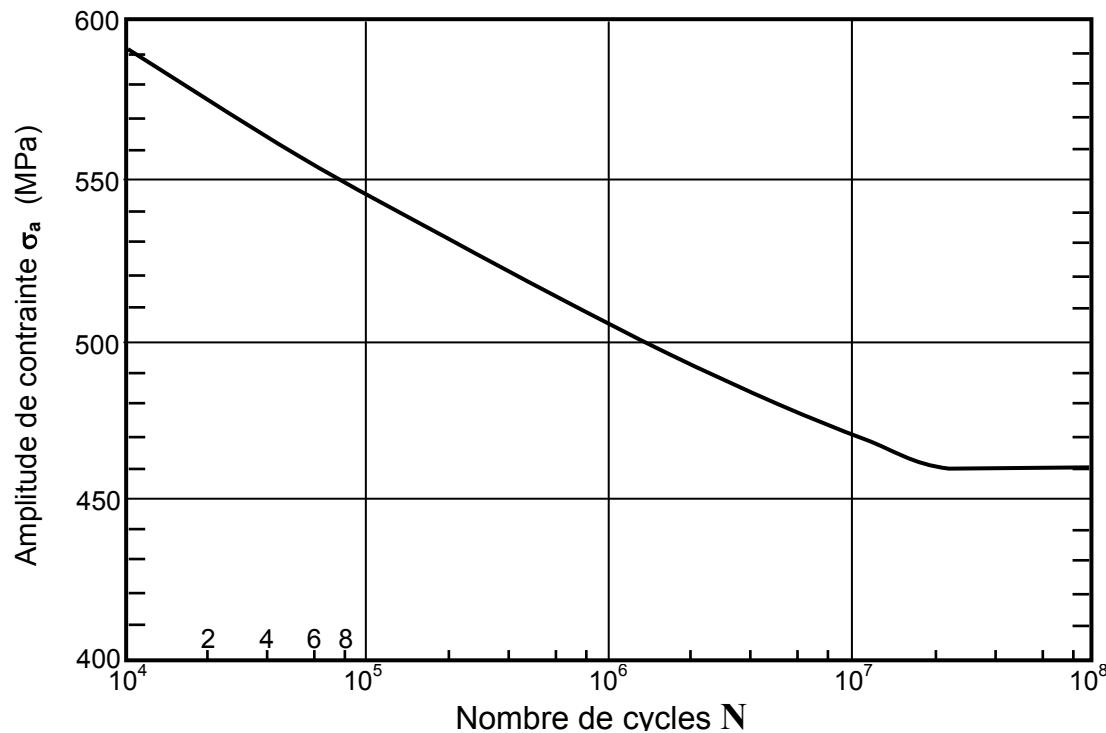


ANNEXES

Exercice n° 7 : Alliage d'aluminium 2014



ANNEXES
Exercice n° 8 : Axe soumis à des sollicitations de fatigue



Abaque de concentration de contrainte pour une gorge

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

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

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

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

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

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

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

$$R = \frac{\rho l}{S}$$

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

$$\sigma = n_e e \mu_e$$

$$1 = \frac{hx}{na} + \frac{ky}{nb} + \frac{lz}{nc}$$

$$\sigma = (n_e e \mu_e + n_t e \mu_t)$$

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

$$\sigma = \sigma_0 \exp\left(\frac{-E_g}{2kT}\right)$$

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

$$E = E_0 (0,9 P^2 - 1,9 P + 1)$$

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

$$R_m = (R_m)_0 e^{-nP}$$

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

$$\Delta\theta^* = R_1 = \frac{R_m \cdot f(v)}{E\alpha}$$

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

$$R_3 = \frac{E}{R_m^2 \cdot f(v)}$$

$$\ell_c = \frac{2E\gamma_s}{\pi\sigma^2}$$

$$R_4 = \frac{E\gamma_s}{R_m^2 \cdot f(v)} = \gamma_s R_3$$

$$K_C = \alpha \sigma \sqrt{\pi a}$$

$$(R_m)_c = V_f (R_m)_f + (1 - V_f) \sigma_m$$

$$f_S C_S + f_L C_L = C_0$$

$$(R_m)_C = V_f \sigma_f + (1 - V_f) (R_m)_m$$

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

$$E_C = V_f E_f + V_m E_m$$

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

$$(R_m)_C = kV_f (R_m)_f + V_m \sigma_m$$