

COURS ING1035 - MATÉRIAUX

EXAMEN FINAL

du 17 décembre 2001

de 9h30 à 12h00

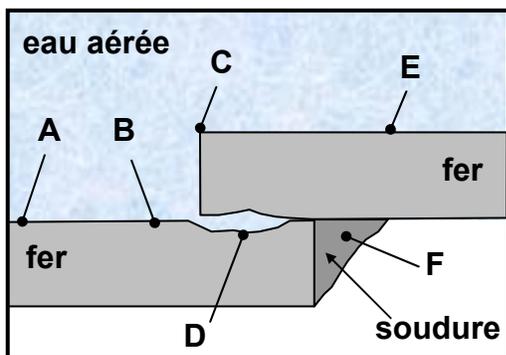
QUESTIONNAIRE

- NOTES :**
- ◆ Aucune documentation permise.
 - ◆ Calculatrices non programmables autorisées.
 - ◆ Les nombres entre parenthèses indiquent le nombre de points accordés à la question, le total est de **60** points.
 - ◆ La cote maximale de l'examen est égale à **50** pts.
 - ◆ **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.**
 - ◆ **Utilisez les espaces prévus ou la page opposée pour vos calculs.**
 - ◆ Le questionnaire comprend **11** pages, 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.

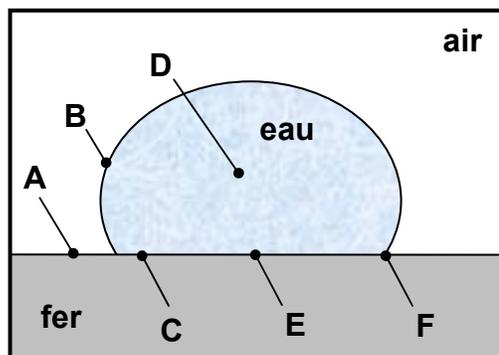
Les exercices 1 à 5 portent sur les unités au choix n° 8 à 12.

Exercice n° 1 : Dégradation des matériaux

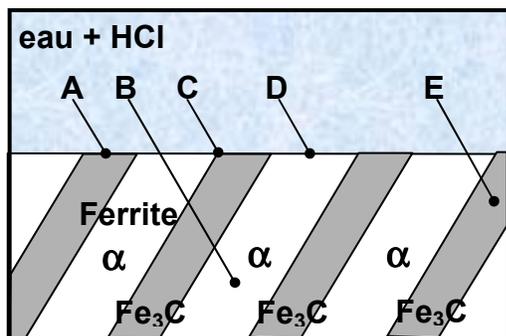
Considérez les quatre figures suivantes (1, 2, 3, 4) qui présentent des cas typiques de corrosion.



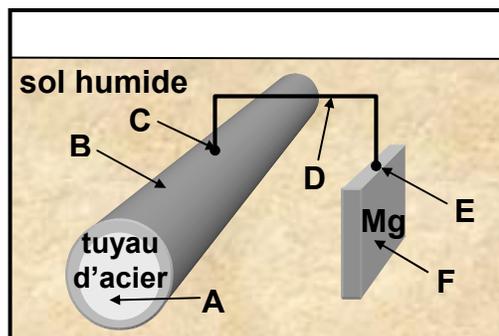
Cas 1



Cas 2



Cas 3



Cas 4

- Pour chacun de ces cas, dites quel est le mode de corrosion (voir tableau au formulaire de réponse) ? (2 pts)
- Pour chacun de ces cas, quelles sont les zones (repérées par une lettre) qui sont le siège de la réaction anodique et celui de la réaction cathodique. (3 pts)

Exercice n° 2 : Propriétés physiques

Vous devez relier deux localités séparées d'une distance l par une ligne électrique. Les pylônes de cette ligne ont une certaine capacité portante et la masse totale de conducteurs électriques utilisés sur cette ligne ne peut dépasser une certaine valeur. Comme matériau à utiliser pour les fils conducteurs, vous avez le choix entre l'aluminium et le cuivre et vous désirez limiter les pertes par effet Joule dans la ligne en utilisant le matériau qui a la plus faible résistance électrique par unité de longueur de ligne.

- Choisissez-vous le cuivre (**Cu**) ou l'aluminium (**Al**) comme conducteur de cette ligne ? Justifiez votre réponse par des calculs ou des équations appropriés. (3 pts)

Lorsque cette ligne électrique fonctionne à pleine puissance en service, on constate que la résistance de la ligne augmente de 8% à cause de l'échauffement des conducteurs.

- b) Calculez l'élévation théorique $\Delta\theta$ de température (en °C) des conducteurs quand la ligne fonctionne à pleine puissance. (2 pts)

Données :

Matériau	Masse volumique (g/cm ³)	Résistivité ρ à 20 °C (10 ⁻⁸ Ω.m)	Coeff. β de variation de la résistivité en fonction de la température (10 ⁻⁶ °C ⁻¹)
Cu	8,96	1,673	+ 4270
Al	2,70	2,655	+ 4290

Exercice n° 3 : Matières plastiques

- a) Dites laquelle ou lesquelles des affirmations suivantes sont vraies :
Attention : une mauvaise réponse en annule une bonne.

Comparé à un polyéthylène à basse densité (**PEBD**), un polyéthylène à haute densité (**PEHD**) se distingue par :

- 1) un module d'Young plus élevé à l'état vitreux ;
- 2) un degré de réticulation plus élevé ;
- 3) un degré de ramification plus élevé ;
- 4) un degré moyen de polymérisation plus élevé ;
- 5) l'absence d'un comportement caoutchoutique.

(2 pts)

- b) Considérez les trois polymères suivants :

- Polyéthylène (**PE**)
- Polystyrène atactique (**PS**)
- Phénolformaldéhyde (**PF**), appelé aussi *Bakélite*.

Complétez le tableau (donné au formulaire de réponse) en répondant dans chaque case par **Oui** ou **Non**.

(3 pts)

Exercice n° 4 : Matériaux céramiques

Des essais de compression ont été réalisés à température ambiante sur deux matériaux céramiques:

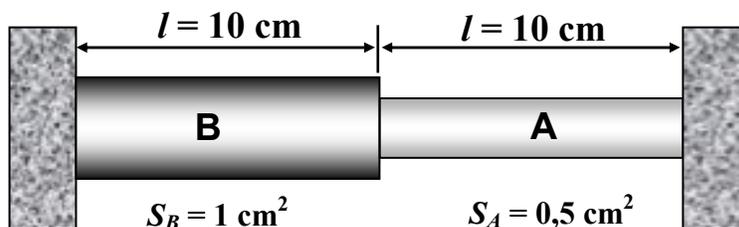
- ♦ une alumine Al₂O₃ (matériau **A**)
- ♦ une porcelaine (matériau **B**).

Les éprouvettes de compression étaient de forme cylindrique, avec une hauteur initiale $h_0 = 50$ mm et une section initiale $S_0 = 200$ mm². Les résultats des essais de compression sont compilés au tableau suivant. F_R est la force de rupture en compression et h_R est la hauteur de l'éprouvette à l'instant de cette rupture. α est le coefficient de dilatation thermique des matériaux **A** et **B**.

Matériau	F_R (kN)	h_R (mm)	α (10 ⁻⁶ °C ⁻¹)
A : Alumine	420	49,650	4
B : Porcelaine	200	49,625	7,5

- a) Calculez la résistance en compression R_{mC} (en MPa) et le module d'Young E (en GPa) de l'alumine et de la porcelaine. (2 pts)

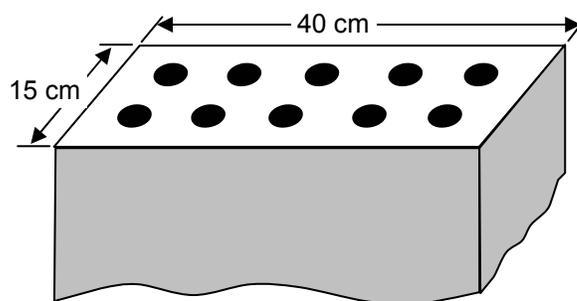
Avec ces deux matériaux **A** et **B**, on réalise le montage ci-dessous. À la température ambiante, les deux barreaux sont placés bout à bout entre appuis infiniment rigides.



- b) Si l'on chauffe brusquement les deux barreaux de ce montage, lequel des barreaux (**A** ou **B**) limitera la température maximale pouvant être atteinte sans rupture du barreau ? Justifiez votre choix par des calculs appropriés. (1 pt)
- c) Dans les conditions d'un chauffage extrêmement rapide décrit ci-dessus, calculez l'augmentation maximale de température tolérable $\Delta\theta$ (en °C), c'-à-d. n'entraînant pas la rupture d'un des barreaux. (2 pts)

Exercice n° 5 : Matériaux composites

Le béton armé peut être considéré comme un matériau composite, dont la matrice (le béton) est une céramique ayant un comportement fragile et dont le renfort est l'acier ayant un comportement ductile. On réalise un pilier en béton armé dont le plan (en coupe) est donné ci-contre, les dimensions étant en cm. Les tiges d'acier, au nombre de dix (10), ont un diamètre de 2 cm. Les propriétés mécaniques (en compression) du béton et de l'acier sont données au tableau ci-dessous.



Matériau	E (GPa)	R _e (MPa)	R _m (MPa)
Béton	40	-----	50
Acier	210	280	-----

- a) Quelle est la fraction volumique V_f (en %) de renfort (acier) dans ce composite ? (1 pt)
- b) Calculez le module d'Young E_c (en GPa) du pilier. (1 pt)
- c) Calculez la force de compression F_c (en kN) pour laquelle il y aura rupture du pilier. (2 pts)
- d) À l'instant de cette rupture, l'acier est-il déformé plastiquement ? Justifiez quantitativement votre réponse. (1 pt)

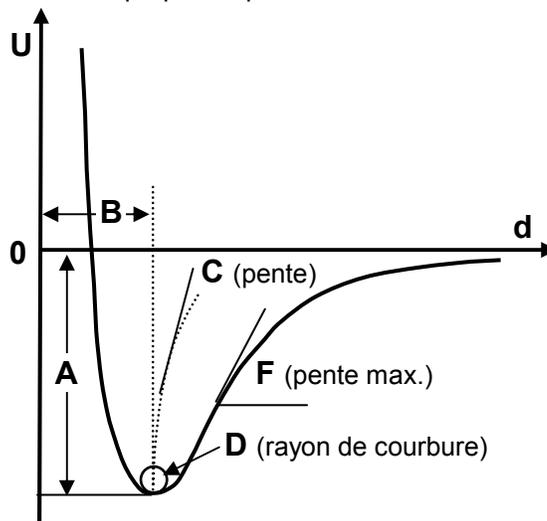
Les exercices suivants portent sur les unités obligatoires n° 1 à 7.

Exercice n° 6

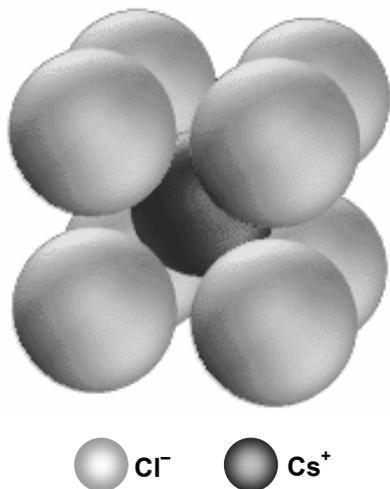
Considérez la figure ci-dessous qui représente la variation de l'énergie interne U des atomes d'un solide en fonction de la distance d'équilibre d entre ces atomes. Cette courbe est caractérisée par certaines grandeurs **A**, **B**, **C**, **D** et **F**.

Dans la liste des propriétés d'un matériau données ci-dessous, associez la propriété qui est directement reliée à chacune des grandeurs **A**, **B**, **C**, **D** et **F**. (5 pts)

- 1) Distance interatomique à la température de fusion
- 2) Distance interatomique au zéro degré absolu
- 3) Résistance théorique à la traction
- 4) Conductivité thermique
- 5) Énergie de déformation élastique
- 6) Module d'Young
- 7) Coefficient de dilatation linéique
- 8) Ductilité
- 9) Température de vaporisation
- 10) Température de transition allotropique



Exercice n° 7



La structure cristalline du chlorure de césium (**CsCl**) est représentée ci-contre.

- a) Quel est le réseau de Bravais du **CsCl** ? (1 pt)
- b) Quelle est la compacité (en %) du **CsCl** ? (1 pt)
- c) Quelle est la masse volumique théorique (en g/cm^3) du **CsCl** ? (1 pt)
- d) Calculez la densité surfacique en ions Cs^+ et en ion Cl^- dans le plan (011). (1 pt)
- e) Quel type de site occupent les ions Cs^+ dans **CsCl** ? (1 pt)

Données : Nombre d'Avogadro : $N_A = 6,022 \times 10^{23} \text{ mole}^{-1}$

	Masse atomique (g/mole)	Rayon ionique (nm)
Cs	132,9	0,165
Cl	35,5	0,181

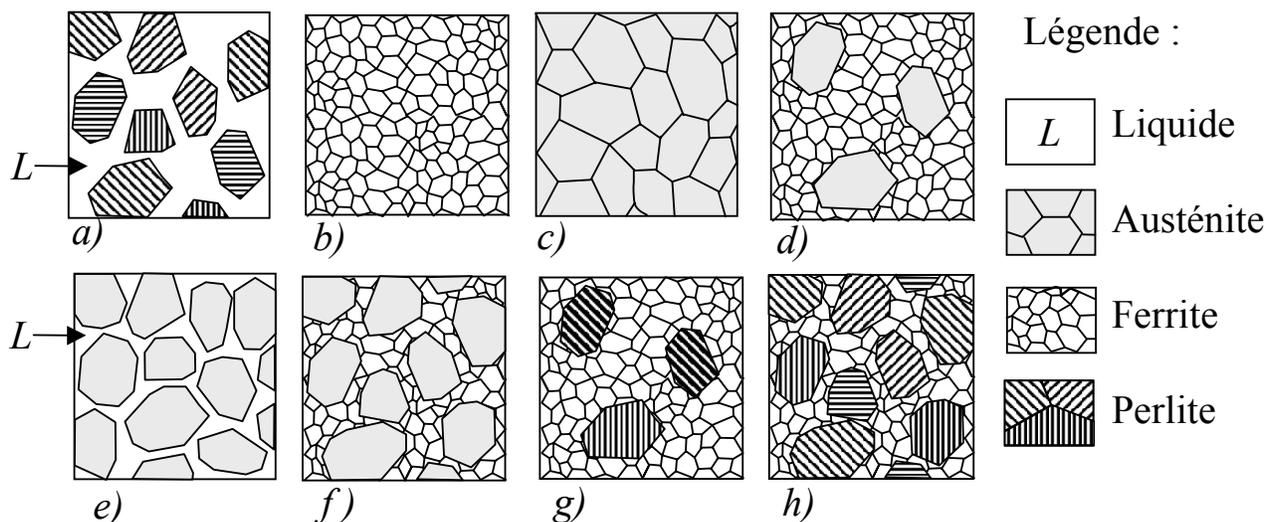
Exercice n° 8

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.

- a) À quelle(s) température(s) le fer pur solide subit-il une transformation allotropique au chauffage ? Précisez le changement de phase qui se produit au cours de la transformation allotropique. (1 pt)

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

- b) Lequel des schémas présentés ci-dessous représente la microstructure de cet alliage aux températures suivantes : 1460 °C, 1400 °C, 724 °C et 20 °C ? (2 pts)



Considérez maintenant un acier de composition eutectoïde.

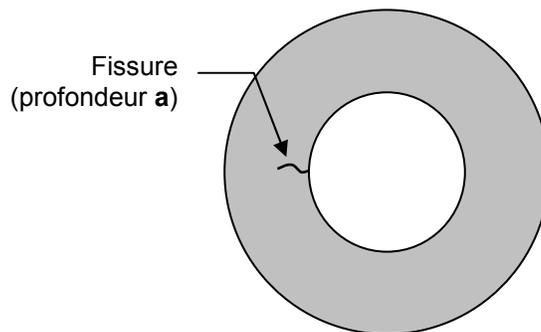
- c) Quelles sont les phases en présence et leur proportion à la température ambiante (20 °C) ? (2 pts)
 d) Quelles sont les températures de début et de fin de solidification de cet acier ? (1 pt)
 e) Lequel des schémas (proposés ci-dessus) représente la microstructure de cet acier à 1420 °C ? (1 pt)

Exercice n° 9

Au cours de la fabrication du fût d'un canon, un défaut, assimilable à une fissure, s'est formé sur la surface interne du fût, tel que schématisé ci-contre. Le fût a un diamètre intérieur de 80 mm et un diamètre extérieur de 160 mm. La fissure, de profondeur initiale $a = 0,5$ mm, a un facteur géométrique α égal à 1,2.

Lors d'un tir du canon, la contrainte de tension s'exerçant à la racine de la fissure est égale à 300 MPa.

L'acier dont est fait le fût a les propriétés mécaniques suivantes :



$$R_{e,0.2} = 1100 \text{ MPa}$$

$$R_m = 1250 \text{ MPa}$$

$$K_{Ic} = 125 \text{ MPa.m}^{1/2}$$

$$\text{Seuil de propagation en fatigue } \Delta K_S = 10 \text{ MPa.m}^{1/2}$$

- a) Est-ce que la fissure est susceptible de se propager lorsque le canon sera mis en service ? *Justifiez quantitativement votre réponse.* (1 pt)
- b) Quelle sera la profondeur critique a^* de la fissure (en mm) qui entraînera la rupture brutale (apparemment fragile) du fût ? (1 pt)

La relation de Paris caractérisant le comportement de cet acier en fatigue-propagation est la suivante :

$$da/dN \text{ (m/cycle)} = 8 \times 10^{-11} \Delta K^{2.5}$$

- c) Quelle est la valeur du rapport R caractérisant le chargement en fatigue du fût au cours des tirs du canon ? (1 pt)
- d) Si la fréquence de tir du canon est de 10 tirs par jour, au bout de combien de jours il aura rupture brutale du canon ? (4 pts)

Exercice n° 10

Grâce à leurs propriétés mécaniques intéressantes et modulables par un traitement de durcissement structural, les alliages cuivre – béryllium (Cu - Be) sont souvent utilisés en mécanique de précision et en horlogerie (ressorts) ainsi que pour des applications électriques (lames et ressorts de contact électrique). Considérez un alliage **Cu + 1,9 %m. Be**. Aux pages suivantes, vous disposez de la partie requise du diagramme Cu – Be et des courbes de vieillissement de cet alliage. À l'équilibre et à la température ambiante (20°C), la phase α contient 0,05 %m. de béryllium et la phase γ est le composé intermétallique **CuBe**, contenant 11,8 %m. de béryllium.

- a) Quelle est la composition (en %at. Be) de la phase γ ? (1 pt)
- b) Quelle sont les proportions des phases présentes à l'équilibre à 20 °C dans l'alliage considéré ? (1 pt)
- c) À quelle température (°C) doit-on porter l'alliage considéré pour faire le traitement de mise en solution solide du béryllium avant la trempe ? (1 pt)
- d) Parmi les quatre températures offertes pour effectuer le vieillissement de l'alliage après sa trempe, laquelle choisissez-vous pour obtenir les propriétés mécaniques suivantes de l'alliage, sachant que le temps maximal de vieillissement ne doit pas excéder 1 heure pour des raisons pratiques ? Quelle sera la durée du vieillissement (comprise entre le temps minimal et le temps maximal) à la température choisie ? (2 pts)

$$R_{e0,2} \geq 900 \text{ MPa}$$

$$R_m \geq 1050 \text{ MPa}$$

$$A \geq 15\%$$

- e) Après ce traitement de vieillissement et trempe à 20 °C, quelle est la composition (%m. Be) de la phase α ? *Justifiez votre réponse.* (2 pts)

Exercice n° 11

Dites si les affirmations présentées au tableau du formulaire de réponses sont vraies (V) ou fausses (F). (4 pts)

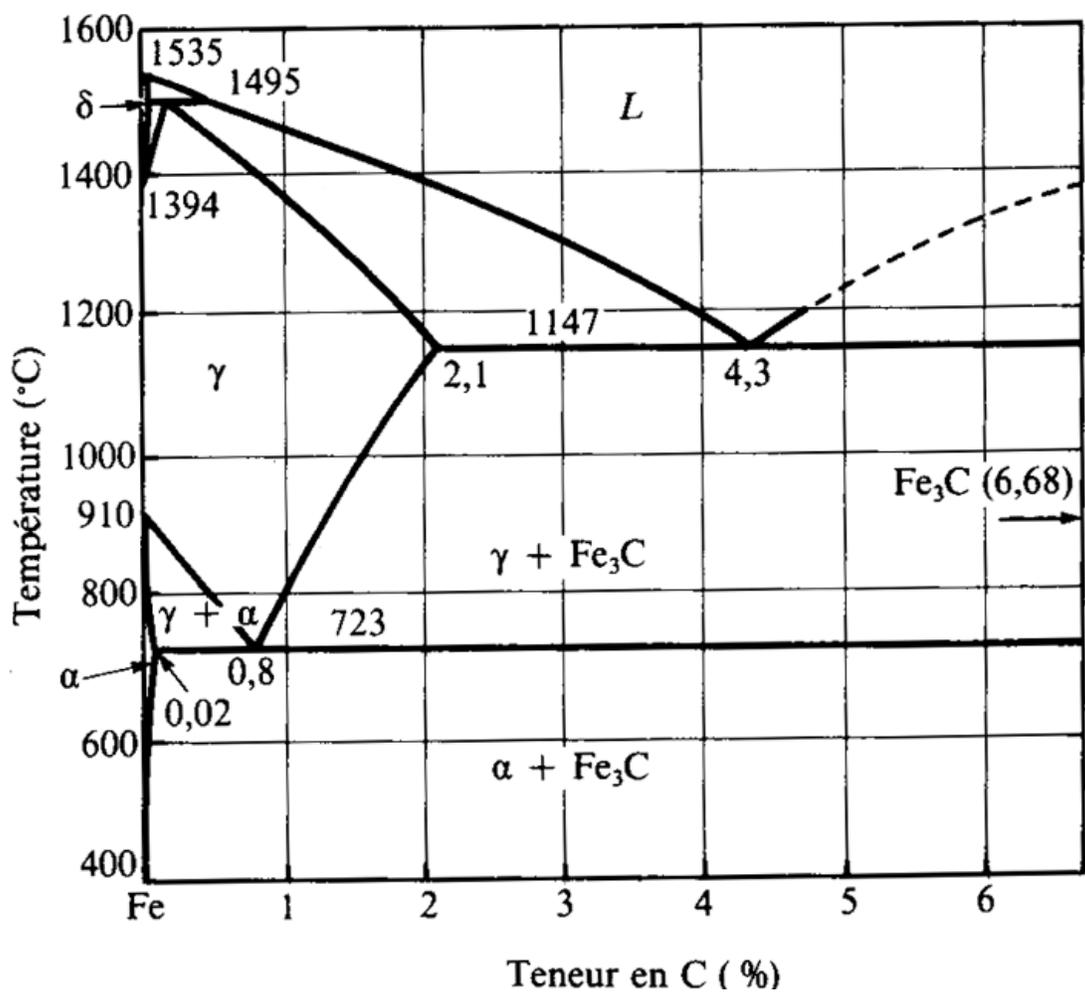
Attention ! Une mauvaise réponse en annule une bonne.

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

Joyeux Noël et Meilleurs Voeux !

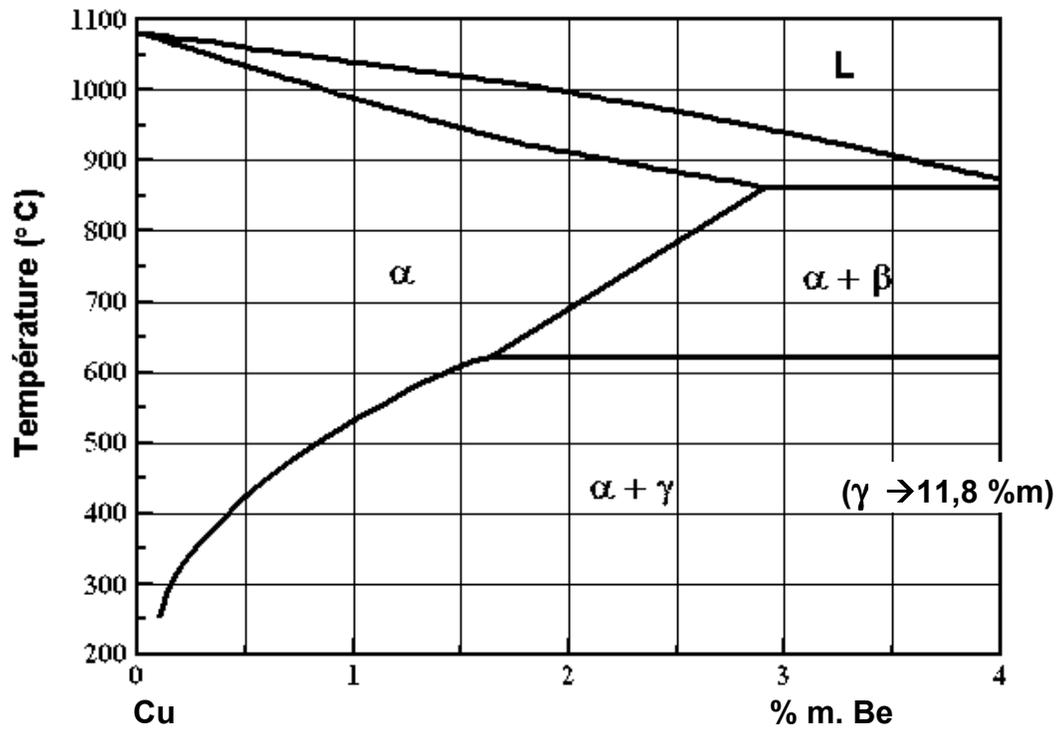
ANNEXES

Diagramme fer – carbone



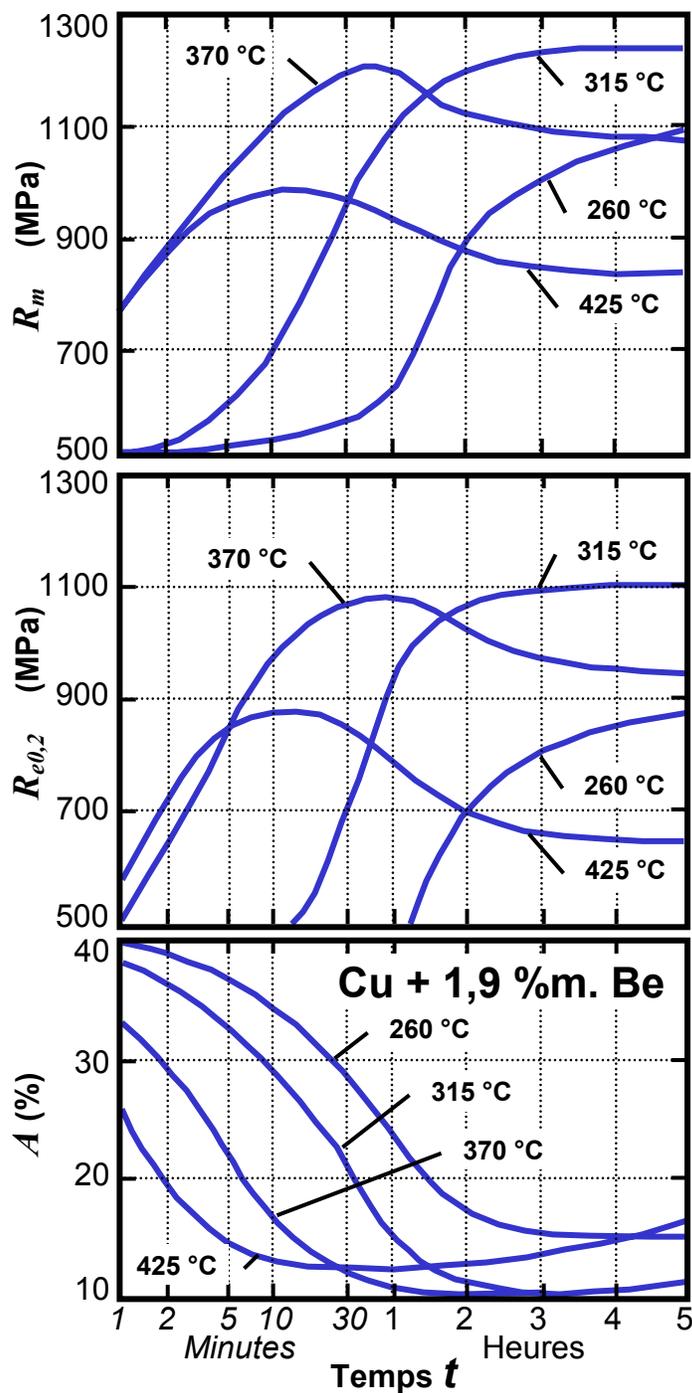
ANNEXES

Diagramme cuivre – béryllium



ANNEXES

Durcissement structural de l'alliage Cu + 1,9 %m Be



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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$f_S C_S + f_L C_L = C_0$$

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

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

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

$$m = \frac{A i_{corr} t}{nF}$$

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

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

$$\sigma = n_e e \mu_e$$

$$\sigma = (n_e e \mu_e + n_i e \mu_i)$$

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

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

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

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

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

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

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

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

$$E_C = V_f E_f + V_m E_m$$

$$E_C \cong \frac{3}{8} V_f E_f + V_m E_m$$

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