

Nom :

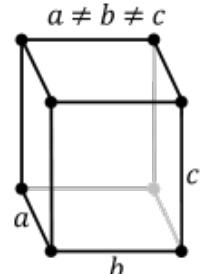
Prénom :

Vendredi 28 juin 2024 : Métaux/Thermique pour le Génie Civil

Préparez vos réponses sur des brouillons et reportez celles-ci sur la feuille présente. N'oubliez pas de mentionner **les unités**. Ecrivez le plus **lisiblement** possible dans les lignes imparties. Réfléchissez avant d'écrire, restez concis et faites apparaître seulement ce qui est essentiel. **Cette partie compte pour 50 points.**

Exercice 1 Structures cristallines du fer pur et de la cémentite (12 pts sur 50)

La cémentite de formule Fe_3C possède une structure cristalline quasi-orthorhombique (parallélépipède rectangle représenté sur la figure de droite) avec les paramètres de mailles suivant : $a = 0,45 \text{ nm}$, $b = 0,51 \text{ nm}$ et $c = 0,67 \text{ nm}$. Dans la maille élémentaire se trouvent exactement 4 atomes de carbone, les autres atomes étant du fer. L'austénite notée γ a une structure cristallographique cubique à faces centrées CFC avec un paramètre de maille $a_\gamma = 0,358 \text{ nm}$. On rappelle $1 \text{ nm} = 1 \text{ nanomètre}$.



Répondez aux questions suivantes en notant N_A le nombre d'Avogadro ($N_A = 6 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$), M_{Fe} la masse molaire du fer ($M_{\text{Fe}} = 55,85 \text{ g/mol}$) et M_C la masse molaire du carbone ($M_C = 12 \text{ g/mol}$).

Quel est le volume de la maille élémentaire de la cémentite (formule littérale) ?

$$V =$$

Quelle est le nombre d'atomes de Fe dans cette maille élémentaire ?

$$n_{\text{Fe}} =$$

Ecrire la formule littérale donnant la masse volumique de la cémentite :

$$\rho_{\text{Fe}_3\text{C}} =$$

Calculez en kg/m^3 la masse volumique de la cémentite :

$$\rho_{\text{Fe}_3\text{C}} =$$

Que vaut la densité de la cémentite ?

$$d_{\text{Fe}_3\text{C}} =$$

Lors du refroidissement du fer pur, celui-ci subit une transformation allotropique au passage de 900°C : la maille austénitique devient une maille ferritique notée α de structure cubique centré et de paramètre de maille a_α . Ecrire la formule littérale donnant la masse volumique de la ferrite α :

$$\rho_\alpha =$$

Calculez le changement de volume relatif au passage des 900°C sachant que $2(a_\alpha/a_\gamma)^3 = 1.003$. Pour ce faire, on considérera une masse m donnée de fer et on traduira la variation de volume (V_γ au-dessus de 900°C , V_α en-dessous) en termes de variation de masse volumique.

$$\Delta V/V = (V_\alpha - V_\gamma)/V_\gamma =$$

Sachant que la déformation linéaire associée à la transformation allotropique et notée ε_{tr} vaut un tiers de la variation de volume et que le coefficient α de dilation thermique de l'austénite est de $12 \cdot 10^{-6} /K$, à quelle variation de température correspond cette déformation de transformation ?

-

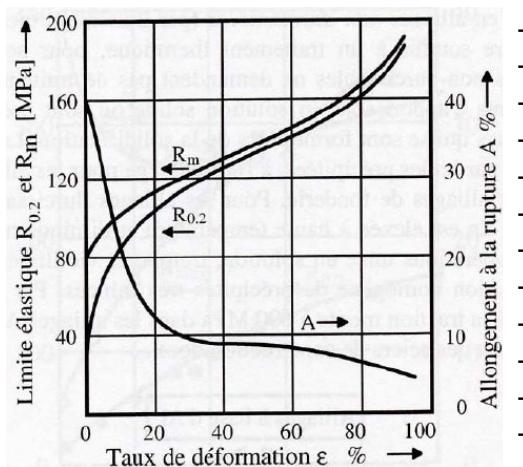
-

Bonus : pour caractériser les aciers, on utilise fréquemment une technique basée sur la mesure des déformations thermiques et de transformations de phase. Comment s'appelle cette technique ?

-

Exercice 2 (10 pts sur 50)

Explicitez et commentez les courbes ci-dessous obtenues sur de l'**aluminium pur** coulé puis déformé en **compression** par laminage à différents taux. R_m et $R_{0.2}$ représentent respectivement la limite à la rupture et la limite élastique à 0.2 %. Quel mécanisme y est illustré ? Quel est son inconvénient ? Pourquoi R_m augmente-t-il avec le taux de déformation ?



Citez un autre moyen d'augmenter $R_{0.2}$ pour ce métal pur.

-

-

Citez deux autres moyens d'augmenter $R_{0.2}$ pour ce métal en lui ajoutant des éléments d'alliage.

-

-

-

Exercice 3 Alliage Fe-C (12 pts sur 50)

On s'intéresse à un acier à 0.5 pds% de carbone et on considère donc le diagramme de phase Fe-C reporté ci-après.

1- On austénitise cet acier dans un four à 1000°C . Quel est le but de cette opération ? Aidez-vous du diagramme de phase Fe-C pour répondre.

-

-

-

2- On arrête le four pour refroidir lentement notre acier depuis 1000°C jusqu'à 20°C . A quelle température la ferrite α va-t-elle germer aux joints de grains austénitiques ?

-

-

-

-

3- Nommez et détaillez la réaction qui a lieu à 727°C lors du refroidissement lent de l'acier.

-

-

-

-

4- A $727^{\circ}\text{C} + \varepsilon$, quelles sont les proportions de phase en présence ?

-
-
-
-

5- A $727^{\circ}\text{C} - \varepsilon$, quelles sont les proportions globales de phases en présence ?

-
-
-
-

6- Toujours à $727^{\circ}\text{C} - \varepsilon$, quelles sont les proportions de ferrite et de cémentite dans la perlite ?

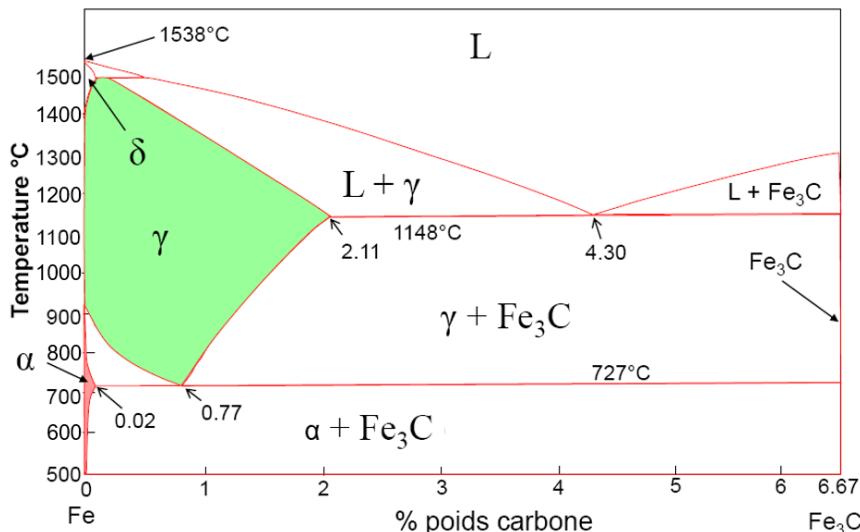
-
-
-
-

7- Ces proportions de ferrite et de cémentite dans la perlite à $727^{\circ}\text{C} - \varepsilon$ varient-elles d'un acier à un autre ? Justifiez votre réponse.

-
-
-
-

8- Retrouvez enfin la proportion globale de ferrite en sommant la ferrite proeutectoïde et celle présente dans la perlite.

-
-
-



9- Quelle est la proportion massique de perlite dans cet acier ferrito-perlitique à 20°C ? On néglige le changement de solubilité de C dans la ferrite α entre 727°C et 20°C .

-
-

Exercice 4 : simple, double ou triple vitrage ? (16 pts sur 50)

La loi de Fourier décrivant la diffusion de chaleur s'écrit : $\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$ où $T(t,z)$ est la température dépendante du temps t et de la dimension d'espace z (à travers l'épaisseur d). Le paramètre α est la diffusivité thermique du mur. Le flux thermique vaut $-k \frac{\partial T}{\partial z}$ avec k la conductivité thermique du milieu. On considère l'intérieur d'une maison que l'on souhaite maintenir à une température T_1 supérieure à la température extérieure T_2 .

1) Quelle est l'unité de la diffusivité thermique α ?

-

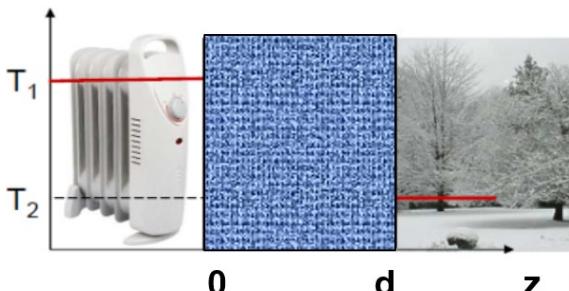
2) Ecrire l'équation de Fourier pour une vitre d'épaisseur d dans le cas d'un régime stationnaire (permanent).

3) Résoudre cette équation pour trouver le profil de température dans la vitre (formule littérale) :

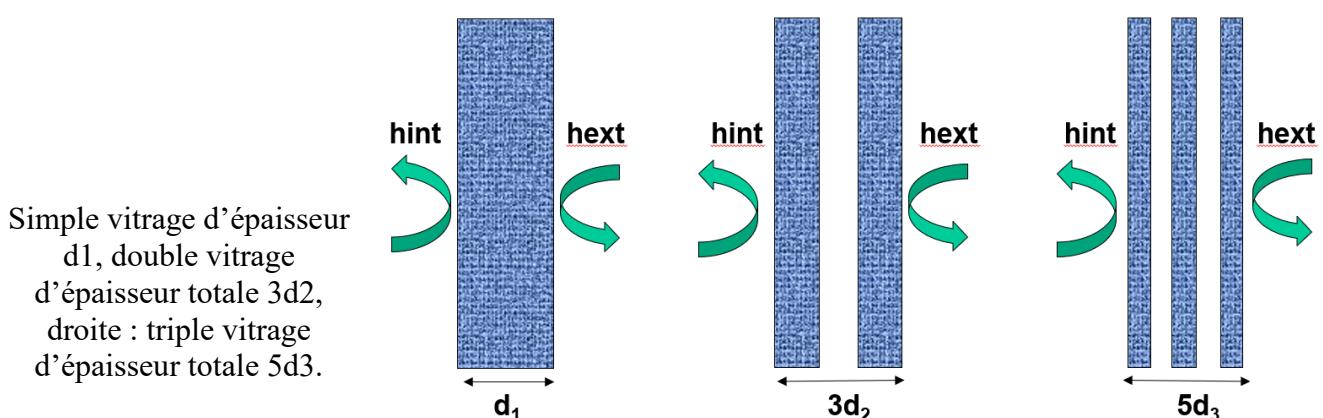
4) Que vaut le flux thermique traversant le mur ?

Flux =

5) Calculez alors la résistance thermique R de cette vitre sachant que Flux = $(T_1 - T_2)/R$.



On va maintenant utiliser ce résultat pour calculer la résistance thermique obtenue avec un simple, double et triple vitrage de fenêtre utilisant la même quantité de verre et dans le même environnement. On note k la conductivité du verre et a_k la conductivité de l'air avec $a < 1$. Le double vitrage est fait de 2 épaisseurs de verre et d'une lame d'air toutes trois de même épaisseur, d_2 . Le triple vitrage est fait de 5 épaisseurs identiques notées d_3 , trois épaisseurs de verre et deux épaisseurs d'air. De chaque côté des fenêtres, les coefficients d'échange convectif de chaleur en $\text{W}/\text{m}^2\text{K}$ sont notés h_{int} du côté logement et h_{ext} du côté extérieur. On rappelle que la résistance thermique de surface vaut $1/h$ pour une surface avec un coefficient d'échange h .



6- Remplir le tableau des résistances thermiques globales des 3 vitrages (formule littérale)

Vitrage	simple	double	triple
Résistance thermique	R ₁ =	R ₂ =	R ₃ =

7- Exprimez d_2 et d_3 en fonction de d_1 si on utilise la même quantité de verre dans chaque vitrage.

8- Montrer que $(R_2 - R_1)$ et $(R_3 - R_2)$ sont bien positifs (gain en résistance thermique donc en performance d'isolation) et donner un minorant de ces deux quantités ($a < 1$).

9- Application numérique : Calculer $(R_3 - R_2)$ avec $d_1 = 2 \text{ cm}$, $k = 0.1 \text{ W/mK}$ et $a = 0.25$