

BREVET DE TECHNICIEN SUPÉRIEUR

TRAITEMENTS DES MATÉRIAUX

SCIENCES PHYSIQUES APPLIQUÉES

Sous-épreuve spécifique à chaque option

Option A : Traitements Thermiques

- U4.3A -

SESSION 2024

Durée : 2 heures

Coefficient : 2

Matériel autorisé :

- L'usage de la calculatrice avec mode examen actif est autorisé.
- L'usage de la calculatrice sans mémoire, « type collège » est autorisé.

Documents à rendre avec la copie :

- Annexes 1.....page 09/10
- Annexes 3.....page 10/10

Dès que le sujet vous est remis, assurez-vous qu'il est complet.
Le sujet comporte 10 pages, numérotées de 1/10 à 10/10.

Le premier exercice porte sur un traitement thermochimique usuel dans le domaine des traitements thermiques : la cémentation.

Par ailleurs, dans le domaine du traitement des matériaux, il est parfois nécessaire de pousser certaines investigations afin de déterminer la structure cristalline des matériaux sur lesquels on est amené à travailler. Pour ce faire on utilise la méthode Debye - Scherrer, une technique qui utilise la diffraction des rayons X. Cette technique fait l'objet d'un second exercice.

Les deux exercices de cette épreuve sont totalement indépendants et peuvent être traités séparément.

Données pour l'ensemble du sujet

Constante des gaz parfaits : $R = 8,31 \text{ J}\cdot\text{K}^{-1}\cdot\text{mol}^{-1}$.

Charge élémentaire : $e = 1,60\cdot 10^{-19} \text{ C}$.

Constante de Planck : $h = 6,62\cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$.

Vitesse de la lumière : $c = 3,00\cdot 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Électronvolt : $1 \text{ eV} = 1,60\cdot 10^{-19} \text{ J}$.

Température : $T_i(\text{K}) = \theta(^{\circ}\text{C}) + 273$

Énergie d'un photon de fréquence $\nu_{i \rightarrow j}$ relatif à la transition entre deux niveaux d'énergie E_i et E_j est donné par la relation de Planck :

$$\Delta E_{i \rightarrow j} = |E_i - E_j| = h \nu_{i \rightarrow j} = \frac{h \cdot c}{\lambda_{i \rightarrow j}}$$

avec pour longueur d'onde $\lambda_{i \rightarrow j}$ en m et E en J.

Exercice 1 - Cémentation d'un acier - 11 points

1. Définir ce qu'est une cémentation et préciser quelles sont les propriétés mécaniques visées.

Partie A : Étude d'une atmosphère de cémentation.

Principe de génération de l'atmosphère dans un générateur dit « endothermique » :

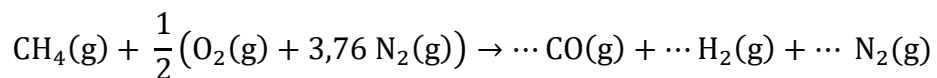
Un mélange de gaz hydrocarbure (hydrocarbures à l'état gazeux) et d'air, contrôlé en débit et en proportions est amené au contact d'un catalyseur porté à environ 1050 °C. Il se produit une réaction de combustion par le dioxygène de l'air. Le défaut d'air provoque la formation d'un mélange gazeux à forte teneur en monoxyde de carbone CO et en dihydrogène H₂ qui s'ajoutent au diazote N₂ de l'air. Le rapport R entre les débits d'air et de gaz hydrocarbure est optimisé de manière à obtenir le maximum de monoxyde de carbone et des teneurs résiduelles en dioxyde de carbone CO₂ et en eau H₂O.

Au terme de la transformation, cette atmosphère endothermique est constituée d'environ 40 % de diazote, 40 % de dihydrogène, 20 % de monoxyde de carbone et de moins de 0,1 % de dioxyde de carbone.

D'après notices de sociétés

Pour produire une atmosphère de cémentation satisfaisante, on utilise un générateur dit « endothermique » dans lequel on réalise la combustion catalytique du méthane CH₄ dans l'air.

L'équation de la réaction modélisant la combustion s'écrit alors :



2. Recopier l'équation de la combustion ci-dessus sur votre copie.

On admet que l'air est composé de 21 % de dioxygène et de 79 % de diazote, la formule chimique de l'air s'écrit alors : (O₂ + 3,76 N₂).

3. Justifier que la valeur du facteur est égale à 3,76.

4. En considérant que cette transformation est totale et que les réactifs sont introduits dans les proportions stœchiométriques, déterminer les fractions molaires $x(\text{CO})$, $x(\text{N}_2)$ et $x(\text{H}_2)$ dans le mélange de gaz produits.

Comparer à la composition de l'atmosphère endothermique décrite en introduction.

On étudie, à l'équilibre thermodynamique, la composition de la phase gazeuse résultant de la combustion du méthane en fonction du facteur d'air n_a à 1 050 °C **annexe 1 page 9**.

On rappelle que le facteur d'air n_a est donné par la relation :

$$n_a = \frac{\text{quantité d'air utilisée}}{\text{quantité d'air nécessaire pour une combustion complète}}$$

5. À partir de la composition établie dans la question 4 et en utilisant le document en **annexe 1 page 9**, montrer que la valeur du facteur d'air n_a est proche de 0,25.
Faire apparaître un tracé sur **l'annexe 1 page 9 à rendre avec la copie**.
6. Écrire l'équation de la réaction modélisant la combustion complète du méthane dans l'air.
En s'appuyant sur les réponses précédentes, montrer que le facteur d'air n_a vaut 0,25. Détailler le calcul.
7. Si n_a est plus grand que cette valeur, indiquer quels sont les produits obtenus par réaction entre le méthane et l'air.
Indiquer, en justifiant la réponse, une conséquence de la présence de ces produits lors de la cémentation.

Partie B : Durée d'un traitement de cémentation.

8. Définir le phénomène de diffusion de particules dans les solides. Un mécanisme proposé est dit « mécanisme lacunaire » ; expliquer son principe.

On montre que le phénomène de diffusion est thermiquement activé. En effet, le coefficient de diffusion D dépend de la température T selon la loi :

$$D = D_0 \times e^{\left(\frac{-E_a}{RT}\right)}$$

- D_0 : facteur de fréquence en $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.
- E_a : énergie d'activation de diffusion supposée indépendante de la température en $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1}$.
- R : constante des gaz parfaits en $\text{J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.

Pour la diffusion du carbone dans l'austénite : $E_a = 134 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$.

On étudie les valeurs D_1 et D_2 du coefficient de diffusion à deux températures, respectivement T_1 et T_2 .

9. Montrer que le rapport des coefficients de diffusion $\frac{D_1}{D_2}$ s'exprime par la relation :

$$\frac{D_1}{D_2} = e^{\left(\frac{-E_a}{R} \times \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2}\right)\right)}$$

10. Déterminer la valeur du rapport $\frac{D_1}{D_2}$ pour les températures $\theta_1 = 900^\circ\text{C}$ et $\theta_2 = 920^\circ\text{C}$.

Commenter.

Pour une même teneur en carbone, la profondeur x (en m) et la durée de cémentation Δt (en s) sont liées par la relation :

$$x = 2 u \sqrt{D \Delta t} \quad \text{avec } u \text{ facteur lié à la teneur en carbone.}$$

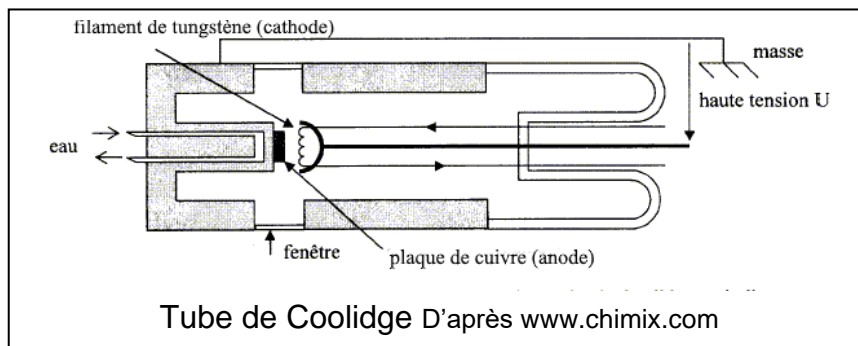
11. Pour obtenir la même teneur en carbone, à une **même profondeur** x , et pour une même valeur de u , donner la relation entre les durées Δt_1 et Δt_2 et les coefficients de diffusion D_1 et D_2 .

Une entreprise réalise un maintien de $\Delta t_1 = 4$ heures à 900°C pour obtenir une profondeur conventionnelle de cémentation de 0,7 mm de profondeur. Elle envisage de faire varier la température.

12. Indiquer quelle serait l'incidence d'une augmentation de température sur la durée du maintien. Justifier la réponse sans calcul.
13. Si la température est montée à 920°C , à l'aide de la relation déterminée à la question 11, calculer la durée Δt_2 du maintien pour obtenir le même résultat qu'à 900°C . Le gain de productivité serait-il significatif ?

Exercice 2 - Radiocristallographie - 9 points

Dans un tube à rayons X règne un vide poussé (environ 10^{-4} Pa). Les électrons sont émis par un filament de tungstène chauffé par la traversée d'un courant électrique (effet Joule). Ce filament joue le rôle de cathode.



Une tension électrique U_{AC} élevée existe entre la cathode et l'anode ; celle-ci permet l'accélération des électrons émis par le filament. Les électrons accélérés frappent l'anode. Le travail moteur W de la force électrique est converti en énergie cinétique transférée aux électrons. Cette énergie cinétique peut être modélisée par l'expression :

$$W = e \cdot U_{AC} \quad (e : \text{charge élémentaire positive})$$

Partie A : Émission des rayons X.

Des électrons émis sans vitesse initiale, par un filament chauffé, sont accélérés par une tension $U_{AC} = 40$ kV et vont percuter l'anode qui est une plaque de cuivre.

1. Déterminer la valeur de l'énergie cinétique W en eV et en J, acquise au niveau de l'anode par un électron.

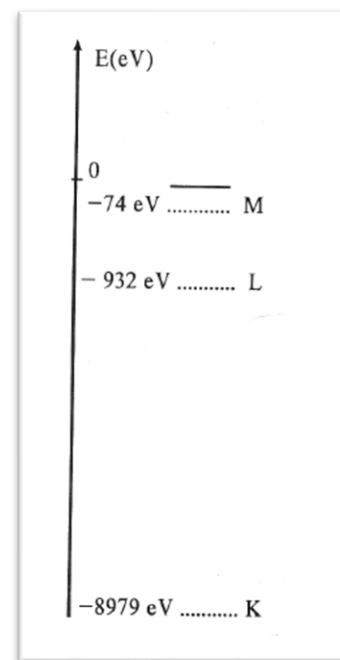
Un électron incident arrache un électron de la couche K. Cet électron K étant arraché, il y a une place vacante (libre) sur la couche K. Ainsi un électron provenant de la couche M ou de la couche L peut passer au niveau K.

Le diagramme d'énergie de l'atome de cuivre est donné ci-contre.

2. En déduire les valeurs des deux longueurs d'onde λ_{L-K} et λ_{M-K} qui sont alors émises et qui sont caractéristiques du spectre émis par le tube à rayons X.

Un spectre des ondes électromagnétiques est donné en **annexe 2 page 9**.

3. Indiquer le domaine des ondes électromagnétiques auquel appartiennent les longueurs d'onde λ_{L-K} et λ_{M-K} . Justifier.



Niveaux d'énergie de l'atome de cuivre

Partie B : Radiocristallographie du nickel par la méthode de Debye Scherrer.

La cristallisation du Nickel peut être modélisée par un réseau cubique. On souhaite affiner ce résultat en définissant le mode de réseau cubique (centré ou faces centrées) et le paramètre de maille.

Lors d'une analyse de radiocristallographie, un pinceau de rayons X est diffracté par un échantillon composé d'un grand nombre de microcristaux d'orientation aléatoire. La taille des cristaux est de l'ordre de 0,001 à 0,01 nm (c'est-à-dire de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde des rayons X, voire plus petit).

Lorsque l'on envoie un faisceau de rayons X sur un cristal, les plans d'atomes ou plans réticulaires vont réfléchir les rayons avec formation d'interférences liées à la différence de marche des rayons X diffractés entre deux plans voisins.

Chaque fois que la différence de marche $2 \cdot d \cdot \sin(\theta)$ (avec θ angle entre un plan de l'échantillon et le faisceau de rayons X) entre le faisceau réfléchi sur un plan et le faisceau réfléchi sur un plan voisin, est égale à $n \cdot \lambda$, un multiple entier de la longueur d'onde, on obtient une interférence constructive.

Il s'agit de la **loi de Bragg** : $2 \cdot d \cdot \sin(\theta) = n \cdot \lambda$

avec $\lambda = 0,15418 \text{ nm}$

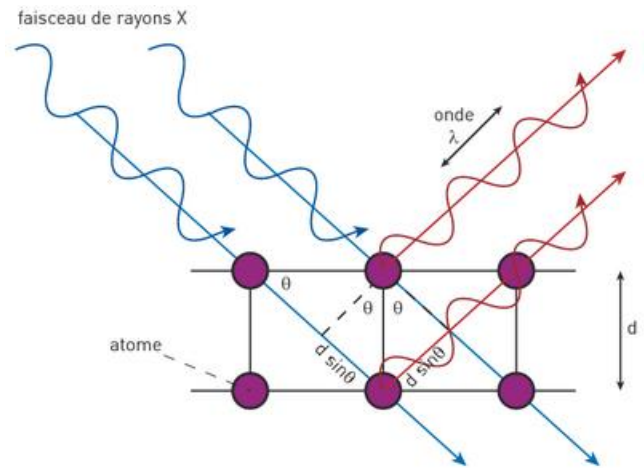


Image issue du site : <http://lookfordiagnosis>.

Les plans réticulaires sont caractérisés par les indices de Miller (h,k,l).

La distance d entre les différents plans réticulaires dans le système cubique est liée à la taille de l'arrête a de la maille par la relation :

$$d = d_{hkl} = \frac{a}{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}}$$

Les plans réticulaires qui diffractent, diffèrent selon le mode de réseau :

- dans le réseau cubique centré (CC) si la somme des carrés des indices ou bien la somme des indices est paire ;
- dans le réseau cubique à faces centrées (CFC) si les indices sont de même parité.

4. En utilisant le tableau rapportant les mesures obtenues par radiocristallographie du nickel (**annexe 3 page 10**), montrer que le nickel cristallise dans un réseau cubique à faces centrées.

5. En combinant la loi de Bragg et la formule exprimant la distance inter réticulaire d_{hkl} en fonction des indices de Miller, montrer que le paramètre a de la maille est donné par l'expression :

$$a = \lambda \times \frac{\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}}{2 \sin \theta}$$

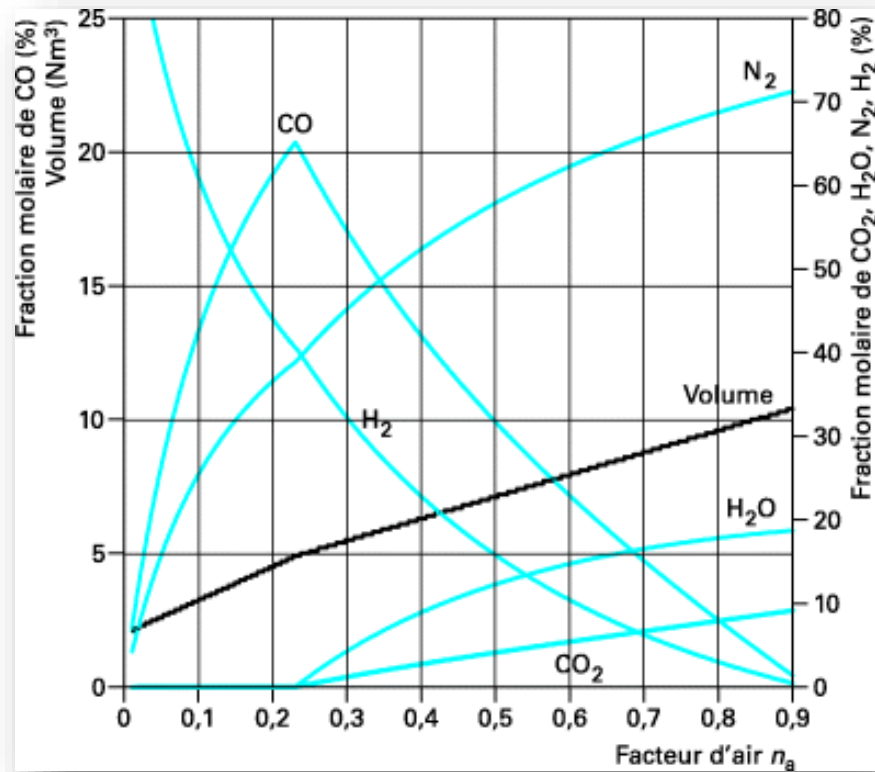
6. Compléter les valeurs du tableau situé en **annexe 3 page 10 à rendre avec la copie** et donner la valeur moyenne de a avec 4 chiffres significatifs.

On rappelle que $a = \frac{4r}{\sqrt{2}}$ dans un réseau CFC.

La valeur moyenne de la taille de l'arrête a de la maille du réseau CFC modélisant le nickel est proche de 0,353 nm.

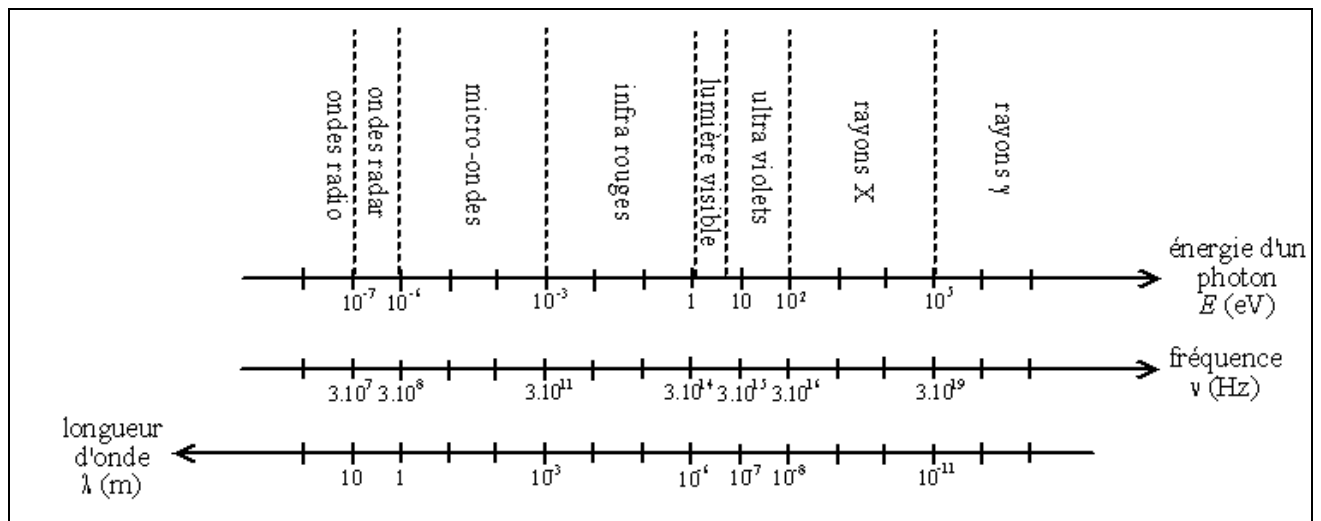
7. Déterminer la valeur le rayon atomique r du nickel.

ANNEXE 1 – Document réponse à rendre avec la copie.



Source : Théorie des traitements chimiques (Jacky Dulcy et Michel Gantois) Techniques de l'Ingénieur

ANNEXE 2 – Spectre des ondes électromagnétiques.



NOM DE FAMILLE (naissance) :
(en majuscules)

[illegible]

(en majuscules)

[illegible][illegible]

--	--	--



(Les numéros figurent sur la convocation, si besoin demander à un surveillant.)

--	--	--	--

ANNEXE 3 – Document réponse à rendre avec la copie.

Des mesures obtenues sur un cliché correspondant à du nickel (Ni) ont permis de relever pour les anneaux du premier ordre ($n = 1$) les valeurs précises de θ dans le tableau ci-dessous :

Anneau i	θ	hkl	$\sqrt{h^2 + k^2 + l^2}$	a (nm)
1	22,28°	111		
2	25,93°	200		
3	38,19°	220		

NOM DE FAMILLE (naissance) :
(en majuscules)

[illegible]

(en majuscules)

[illegible][illegible]

--	--	--



(Les numéros figurent sur la convocation, si besoin demander à un surveillant.)

--	--	--	--