

DS de Physique/Chimie 12 novembre 2025

PSI - Lycée du Parc des Loges

Durée 4H

N.B. : le candidat attachera la plus grande importance à la clarté, à la précision et à la concision de la rédaction. Si un candidat est amené à repérer ce qui peut lui sembler être une erreur d'énoncé, il le signalera sur sa copie et devra poursuivre sa composition en expliquant les raisons des initiatives qu'il a été amené à prendre.

Les calculatrices sont autorisées

- Les résultats numériques exprimés sans unité ou avec une unité fautive ne seront pas comptabilisés.
- Les explications qualitatives des phénomènes interviennent dans la notation au même titre que les calculs.
- Tout résultat fourni dans l'énoncé peut être admis et utilisé par la suite, même s'il n'a pas été démontré par le candidat ou la candidate.

Partie I – Détection synchrone pour la mesure de vitesse par effet Doppler

Les cinémomètres laser sont utilisés pour mesurer la vitesse des cyclistes depuis la route. Ils sont un outil d'analyse des performances instantanées des cyclistes. Leur principe de fonctionnement repose sur le double effet Doppler.

On se propose ici de valider le fonctionnement du cinémomètre à double effet Doppler dans le cadre du laboratoire de sciences physiques en utilisant des voiturettes.

Les voiturettes acquièrent une vitesse en descendant d'une piste inclinée de dénivelé h , où elles sont lâchées avec une vitesse initiale nulle, puis roulent sur un support horizontal (figure 6).

Le principe de l'effet Doppler est le suivant pour une voiture se déplaçant à la vitesse v et une célérité c_0 des ondes sonores dans le milieu :

Un émetteur envoie une onde sonore de fréquence f_E . Le récepteur reçoit l'onde réfléchie par la voiture, de fréquence $f_R = f_E \left(1 - 2 \frac{v}{c_0}\right)$, mais aussi une onde réfléchie par les obstacles fixes.

L'émetteur et le récepteur sont des transducteurs piézoélectriques de fréquence de résonance égale à 40 kHz.

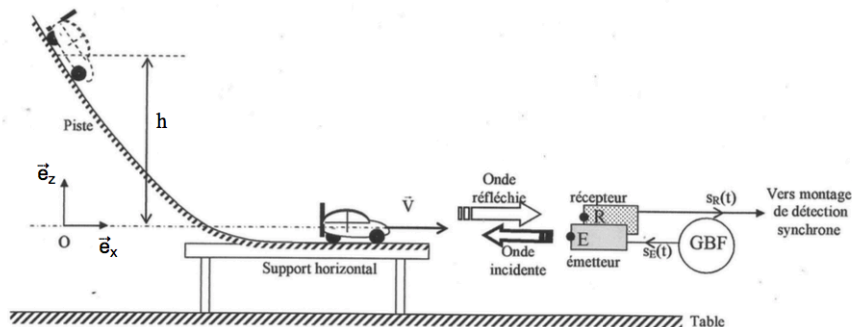


Figure 6 - Maquette du laboratoire

Le récepteur reçoit plusieurs signaux réfléchis : celui qui nous intéresse obtenu par réflexion sur la voiture et ceux réfléchis par les obstacles fixes environnants. Pour distinguer tous ces signaux, il faut utiliser une méthode indirecte : la détection synchrone.

- Q16. En négligeant tout frottement, déterminer l'expression de la vitesse de la voiturette une fois arrivée sur la portion horizontale de la piste, en fonction de g et de h . Évaluer cette vitesse avec un chiffre significatif en prenant $h \approx 50$ cm.

On prendra pour la suite la valeur $v = 3 \text{ m.s}^{-1}$

- Q15. En prenant pour célérité $c_0 = 340 \text{ m.s}^{-1}$, évaluer la variation relative de fréquence due à l'effet Doppler, qui impose une détection spécifique de cet effet.

Le principe du montage à détection synchrone est décrit sur le synoptique suivant (figure 7) :

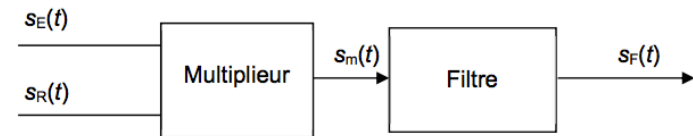


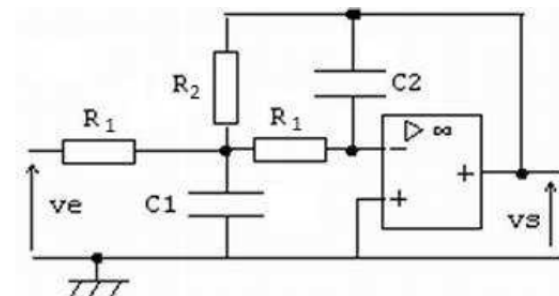
Figure 7 - Détection synchrone

Les tensions électriques $s_E(t)$ et $s_R(t)$ issus du GBF et du récepteur sont envoyées sur un multiplieur de constante $k = 0,1 \text{ V}^{-1}$. On a : $s_m(t) = k s_E(t) s_R(t)$. La tension $s_m(t)$ est alors filtrée avant d'être envoyée sur l'oscilloscope.

On se propose d'abord d'étudier quelques aspects liés au filtre.

Le montage électronique du filtre est décrit par la figure 8. L'A.Li. est considéré comme parfait et fonctionne en régime linéaire.

Figure 8 – Filtre



- Q18. Déterminer sans calcul de la fonction de transfert la nature du filtre. Préciser, en justifiant et toujours sans calcul de la fonction de transfert, parmi les deux fonctions de transfert

$H_1(j\omega)$ et $H_2(j\omega)$, laquelle correspond à ce montage :

$$H_1(j\omega) = \frac{G_0}{1 + 2jm\frac{\omega}{\omega_0} - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2} \quad \text{et} \quad H_2(j\omega) = \frac{-G_0\left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}{1 + 2jm\frac{\omega}{\omega_0} - \left(\frac{\omega}{\omega_0}\right)^2}$$

Q19. Déterminer le gain G_0 de ce filtre en fonction de R_1 et R_2 .

Q20. Donner l'allure du diagramme de Bode de ce filtre, en supposant un facteur de qualité faible $Q < 1/\sqrt{2}$. Etablir l'expression des droites asymptotiques, préciser leur pulsation d'intersection. On confondra cette pulsation avec la pulsation de coupure du filtre.

Q20 Bis. On considérera que le signal réfléchi $s_R(t)$ est composé par deux composantes sinusoïdales : le signal réfléchi utile, de fréquence f_R , d'amplitude $A_R = r A_E$ et un signal « parasite » de fréquence f_E et d'amplitude A_p avec A_p bien plus faible que A_R . Le déphasage de ces deux signaux par rapport au signal émis sera noté φ , il est identique pour ces deux composantes.

Le signal émis $s_E(t)$ est sinusoïdal de fréquence f_E et d'amplitude A_E .

Déterminer l'expression du signal $s_m(t)$ et représenter son spectre.

Relation trigo

$$\cos a \cdot \cos b = \frac{1}{2} (\cos(a - b) + \cos(a + b))$$

Expliquer quel est alors le rôle du filtre utilisé et

Exprimer, sous la forme de deux inégalités fortes faisant intervenir les grandeurs v , c_0 et f_E , les deux contraintes que doivent vérifier la pulsation ω_0 . Proposer en fonction de v , c_0 et de f_E , une expression de ω_0 qui satisfasse le compromis précédent.

Les valeurs choisies pour les composants sont $R_1 = 1 \text{ k}\Omega$, $C_1 = 3,2 \text{ nF}$ et $C_2 = 1,2 \text{ nF}$ de sorte que

ω_0 vérifie la relation précédente avec $m = \frac{\sqrt{2}}{2}$.

Un signal sinusoïdal délivré par un GBF est envoyé en entrée du filtre et est enregistré sur la voie 1 de l'oscilloscope (**figure 9**).

On enregistre sur la voie 2 de l'oscilloscope le signal issu du filtre.

La base de temps est de 1 ms par division comme indiqué en bas de l'écran. Les sensibilités verticales sont de 100 mV par division pour la voie 1 et de 5 V par division pour la voie 2.

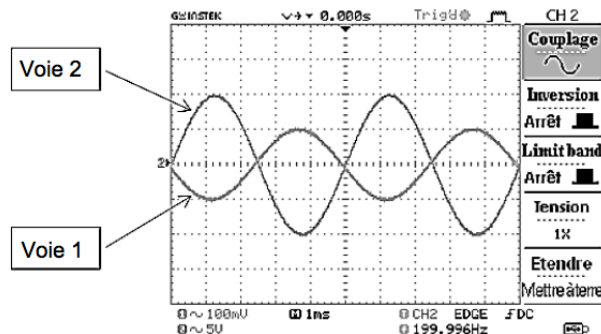


Figure 9 - Oscillogramme 1

Q21. Qu'est ce qui permet de qualifier cet essai d'essai en basse fréquence ? Déterminer, à l'aide de l'oscillogramme 1, la valeur numérique de la résistance R_2 .

Q22. Deux autres essais ont été réalisés en envoyant les tensions sinusoïdales suivantes en entrée du filtre :

$$e_1(t) = E_{01} \cos(\omega_0 t) ;$$

$$e_2(t) = E_{02} \cos(100\omega_0 t).$$

Soit Amplitude et phase des tensions

Déterminer les expressions analytiques des tensions $s_1(t)$ et $s_2(t)$ recueillies en sortie du filtre.

On considère maintenant le montage complet lié à la détection synchrone.

Lorsque la tension $s_m(t)$, issue du multiplieur, est envoyée en entrée du filtre, on obtient les oscillogrammes 2 et 3, représentés sur les **figures 10 et 11**.

Pour l'oscillogramme 2, la base de temps est de 5 ms par division et la sensibilité verticale est de 5 V par division, comme indiqué en bas de l'écran.

Pour l'oscillogramme 3, la base de temps est de 1 ms par division et la sensibilité verticale est de 5 V par division, comme indiqué en bas de l'écran.

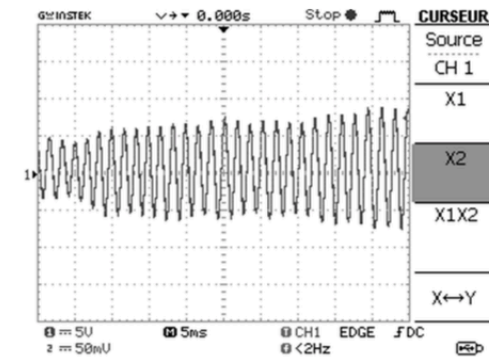


Figure 10 - Oscillogramme 2

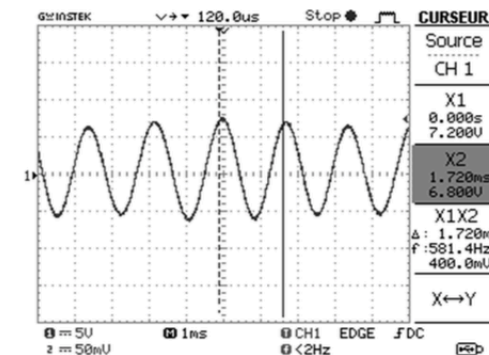


Figure 11 - Oscillogramme 3

Q23. À l'aide des oscillogrammes 2 et 3, évaluer avec un seul chiffre significatif, la vitesse v de la voiturette, lorsqu'elle roule sur le support horizontal.

Bonus : expliquer l'évolution globale de l'amplitude aux temps longs, observée sur l'oscillogramme 2, lors du déplacement du véhicule.

Deuxième partie – Conduction électrique et effet Hall (durée conseillée 1H30)

La découverte de l'effet Hall quantique en 1980 a bouleversé la physique de la matière condensée. Les retombées de ces découvertes sont énormes, allant de l'étalon standard de résistance électrique au développement de nouveaux concepts en physique.

Constantes physiques

Vitesse de la lumière : $c = 3,0 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$

Charge élémentaire : $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

Masse d'un électron : $m = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$

Permittivité du vide : $\epsilon_0 = 8,8 \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$

Perméabilité du vide : $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$

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

Constante de Planck réduite : $\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1,1 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$

Nombre d'Avogadro : $N_A = 6,02 \cdot 10^{23} \text{ mol}^{-1}$

Constante de Boltzmann : $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$

L1 - Mécanisme de la conduction électrique

On considère une plaque conductrice parallélépipédique de largeur a , d'épaisseur b et de longueur L traversée par un courant d'intensité $I > 0$ uniformément réparti sur sa surface $S = a \times b$ (figure 7).

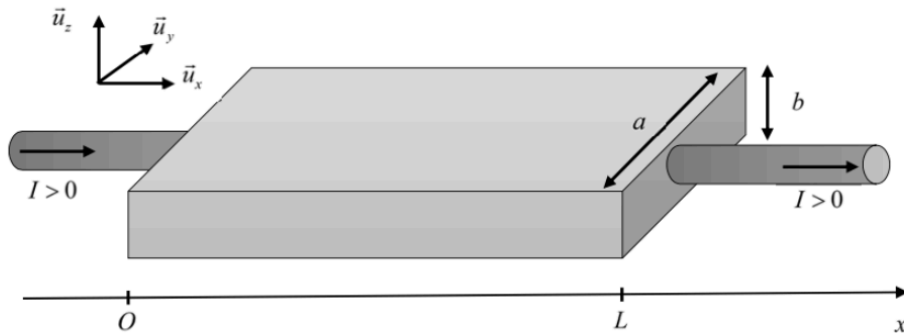


Figure 7 - Plaque conductrice

La plaque constitue un milieu homogène isotrope de conductivité γ , comprenant entre autres des électrons mobiles de densité volumique n_e . On exclut l'influence de tout autre type de porteurs de charge participant à la conduction.

Ces électrons de masse m et de charge $-e$ sont tous supposés se déplacer à la même vitesse $\vec{v} = -v\vec{u}_x$.

Ces électrons, supposés non relativistes, sont soumis à l'action d'un champ électrique $\vec{E} = E_0\vec{u}_x$ responsable de leur mise en mouvement.

On modélise les interactions des électrons mobiles avec le milieu lors de leur déplacement par une force de frottement fluide $\vec{F}_f = -\alpha\vec{v}$, avec α un coefficient caractéristique du milieu.

On négligera le poids des particules devant les autres forces.

Q16. Que signifie l'expression " non relativiste " pour les électrons ?

Q17. Exprimer le vecteur densité volumique de charges \vec{j} en fonction de n_e , e et \vec{v} , puis montrer que l'intensité du courant s'écrit :

$$I = n_e e v a b.$$

Q18. Montrer que l'équation différentielle vérifiée par la vitesse \vec{v} d'un électron s'écrit :

$$\frac{d\vec{v}}{dt} + \frac{\vec{v}}{\tau} = -\frac{e}{m}\vec{E}$$

où on donnera l'expression de τ . Quelle est la signification physique de τ ?

Q19. En déduire l'équation différentielle reliant le vecteur densité de courant \vec{j} et le champ électrique \vec{E} .

Q20. Montrer qu'en régime stationnaire, on obtient la loi $\vec{j} = \gamma\vec{E}$, où l'on donnera l'expression de γ en fonction de τ , m , e et n_e . Quel nom porte cette loi ?

Q21. Application numérique.

- à l'aide du **document 3**, calculer la valeur de τ en montrant au préalable que chaque atome d'aluminium possède 3 électrons de valence jouant le rôle d'électrons de conduction, en déterminant le nombre d'entités par maille et l'expression du paramètre de maille a en fonction de r_{Al} : $a = \frac{4r_{Al}}{\sqrt{2}}$
- conclure quand au domaine de fréquence sur lequel la loi d'Ohm locale reste valable

Document 3 - L'aluminium

Symbole : Al

Numéro atomique : $Z = 13$

Masse molaire : $M_{Al} = 27 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$

Système cristallin : cubique face centrée

Rayon atomique : $r_{Al} = 125 \text{ pm}$

Conductivité électrique : $\gamma = 37,7 \cdot 10^6 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$



Source : Handbook of Chemistry and Physics

Q22. Rappeler l'équation de conservation de la charge reliant la densité volumique de charge ρ au vecteur densité volumique de courant \vec{j} .

I.2 - L'effet Hall

L'effet Hall repose sur le fait qu'une particule chargée en mouvement dans un champ magnétique subit la force dite de Lorentz.

Document 4 - Effet Hall classique

En 1879, Edwin Hall découvre que lorsqu'un courant électrique I traverse un barreau conducteur plongé dans un champ magnétique \vec{B} , il apparaît une différence de potentiel, appelée tension Hall et notée U_H , dans la direction perpendiculaire au courant et au champ (figure 8). Son origine est la force que le champ magnétique exerce sur les porteurs de charge qui participent au courant (force de Lorentz).

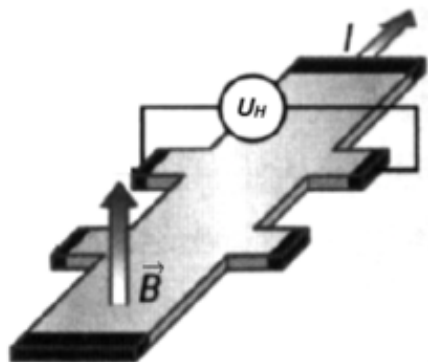


Figure 8 - Mesure de la tension de Hall

Dans les conducteurs usuels, U_H vérifie alors la relation : $U_H = R_H I$ avec R_H la résistance Hall.

De plus, la résistance Hall R_H est proportionnelle à la norme du champ \vec{B} et à l'inverse du nombre n_v de porteurs de charge par unité de volume. L'effet Hall fournit donc un moyen de mesure du nombre de porteurs de charges, utilisé en particulier pour caractériser les matériaux semiconducteurs. Il est aussi à la base du fonctionnement des dispositifs les plus couramment utilisés pour la mesure des champs magnétiques.

Source : Gilbert Pietryk, *Panorama de la Physique*, 2007

I.2.a - Aspect qualitatif

On soumet désormais la plaque à un champ magnétique extérieur $\vec{B} = B\vec{u}_z$ uniforme et stationnaire (figure 9). On négligera le champ magnétique créé par le passage du courant dans le milieu.

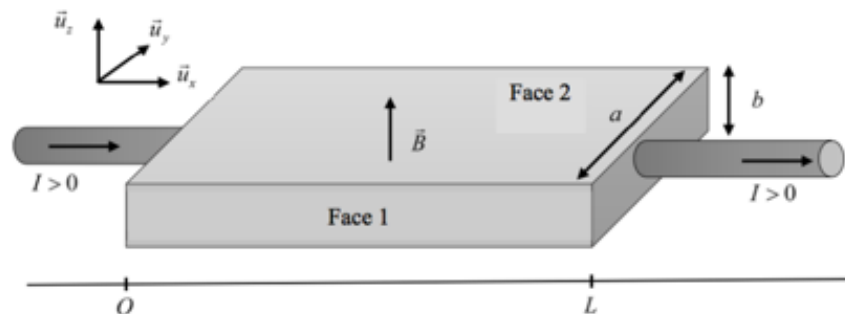


Figure 9 - Plaque conductrice en présence de champ magnétique

Sous l'effet de ce champ magnétique, il y a une accumulation d'électrons mobiles sur une face et, par conséquent, un défaut d'électrons sur l'autre face.

On rappelle ici l'expression de la composante magnétique F_m de la force de Lorentz, s'exerçant sur une particule de charge q se déplaçant à la vitesse \vec{v} et plongée dans un champ magnétique \vec{B} :

$$\vec{F}_m = q\vec{v} \wedge \vec{B}$$

Q26. Calculer la puissance de cette force et commenter le résultat obtenu.

Q27. Reproduire le schéma de la figure 10 et y représenter les symboles \oplus et \ominus indiquant l'accumulation de charges positives et négatives sur les faces.

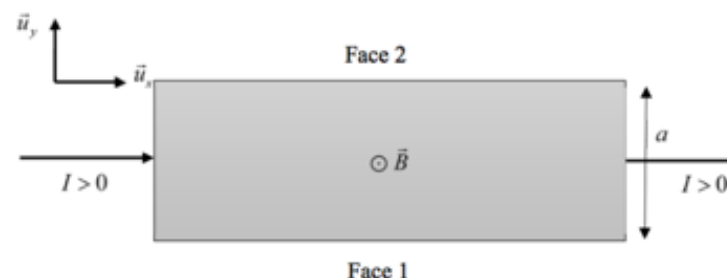


Figure 10 - Plaque conductrice vue du dessus

Q28. Justifier alors l'apparition d'un champ électrique orthogonal aux lignes de courant I . Dessiner sur le schéma précédent l'allure des lignes de champ électrique correspondantes.

I.2.b - Modélisation

Ce déséquilibre de charges dû à la présence du champ magnétique impose, en plus du courant longitudinal selon \vec{u}_x , un courant transversal selon \vec{u}_y . Le champ électrique et le vecteur densité volumique de courant comportent alors une composante selon \vec{u}_x et une selon \vec{u}_y .

On note désormais :

- $\vec{E} = E_x \vec{u}_x + E_y \vec{u}_y$
- $\vec{j} = j_x \vec{u}_x + j_y \vec{u}_y$.

On suppose que les interactions des électrons mobiles avec le milieu sont toujours modélisées par une force $\vec{F}_f = -\alpha \vec{v}$ et que le champ magnétique s'écrit toujours $\vec{B} = B \vec{u}_z$.

Q29. Déterminer la nouvelle équation différentielle vérifiée par la vitesse \vec{v} d'un électron.

Q30. Montrer que le vecteur densité volumique de courant \vec{j} vérifie l'équation différentielle suivante :

$$\frac{d\vec{j}}{dt} + \frac{\vec{j}}{\tau} - \vec{\omega}_c \wedge \vec{j} = \frac{\gamma}{\tau} \vec{E}$$

où l'on donnera l'expression de la pulsation ω_c en fonction de e , m et B .

Q31. Donner une signification physique à ω_c par analogie au mouvement d'un électron mobile soumis à la seule force magnétique.

Q32. Montrer qu'en régime permanent les composantes du champ électrique sont données par l'écriture matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \rho_{xx} & \rho_{xy} \\ \rho_{yx} & \rho_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} j_x \\ j_y \end{bmatrix}$$

pour laquelle on donnera les expressions des ρ_{ij} en fonction notamment de τ , ω_c et γ .

Quelle est l'unité des coefficients ρ_{ij} ?

Q33. On suppose que la largeur de la plaque a est suffisamment faible pour que les lignes de courant restent parallèles à la direction Ox ($j_y = 0$). Déterminer l'expression du champ transversal E_y , puis montrer que la résistance Hall décrite dans le **document 4** s'écrit :

$$R_H = \frac{B}{n_e e b}.$$

Q34. Justifier les utilités d'une sonde à effet Hall décrites dans le **document 4**.

Q35. Application numérique

Déterminer quelle serait la valeur de U_H pour mesurer un champ magnétique de l'ordre du tesla avec une plaque en aluminium ($n_e = 2,7 \cdot 10^{29} \text{ m}^{-3}$) d'épaisseur $b = 0,1 \text{ mm}$ parcourue par un courant $I = 1,0 \text{ A}$. Commenter la valeur obtenue.

Q36. Les matériaux semi-conducteurs sont des matériaux dont la densité de porteur de charges est entre autres donnée par la loi :

$$n_e = n_0 \exp\left(-\frac{\xi}{k_B T}\right)$$

avec $n_0 = 7,8 \cdot 10^{24} \text{ m}^{-3}$ et $\xi = 172 \text{ meV}$ pour un matériau à base de silicium par exemple.

Expliquer l'intérêt des semi-conducteurs pour des sondes à effet Hall permettant la mesure de champ magnétique.

Q37. Calculer la variation relative de la résistance Hall $\frac{\Delta R_H}{R_H}$ pour la sonde précédente à base du semi-conducteur lorsque la température varie de 10 K autour de la température ambiante. Quel inconvénient possède alors ce type de sonde ?

Partie 3 – Purification du nickel

Données de la sous-partie IX-B

On supposera toujours les enthalpies standard et les entropies standard de réaction indépendantes de la température dans des domaines entre deux changements d'état successifs.

Le tétracarbonyle de nickel $\text{Ni}(\text{CO})_4$ est caractérisé par une température d'ébullition $T_{\text{vap}} = 316 \text{ K}$ sous 1 bar et une enthalpie standard de vaporisation égale à $\Delta_{\text{vap}}H^0 = 30 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$.

Espèces chimiques	Ni(s)	CO(g)	$\text{Ni}(\text{CO})_4(\text{l})$
$\Delta_f H_{298}^0 (\text{kJ} \cdot \text{mol}^{-1})$		-111	-632
$S_{298}^0 (\text{J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{mol}^{-1})$	30	198	320

Le nickel est le cinquième élément le plus important de la Terre. C'est un métal dur, malléable et ductile ce qui est à l'origine de sa principale utilisation dans les aciers inoxydables et dans les alliages de nickel comme par exemple dans les pièces de monnaie. De nos jours, les toitures des immeubles, les alliages contenant du nickel sont omniprésents dans notre quotidien. La pointe du Chrysler Building à New York est faite en grande partie de nickel, ce qui lui a permis de rester brillante jusqu'à aujourd'hui.

En association avec le cuivre ou le chrome, il est indispensable dans l'aéronautique ou l'électronique. Et avec du cadmium ou du zinc, il est utilisé dans les accumulateurs qui équipent de plus en plus les voitures hybrides et électriques. Ces utilisations concernent des applications de hautes technologies.



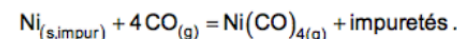
Le « nickel » étasunien



1 rouble transnitrien hommage à Léonov

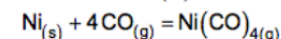


Q21. Le procédé Mond est un procédé de purification à 99,9 % du métal qui utilise la facilité unique du nickel à former du tétracarbonyle $\text{Ni}(\text{CO})_4$. Le nickel, obtenu par réduction du minerai, est un produit solide impur contenant du cobalt, du fer et du cuivre. Le résidu métallique est traité au monoxyde de carbone CO à une température d'environ 50 à 60 °C car seul le nickel réagit au CO dans ces conditions pour former un carbonyle gazeux :



Le mélange gazeux de monoxyde de carbone et de tétracarbonyle de nickel est alors chauffé à une température d'environ 220 à 250 °C pour décomposer le $\text{Ni}(\text{CO})_4$, qui donne du nickel métallique : $\text{Ni}(\text{CO})_{4(\text{g})} \rightarrow \text{Ni}_{(\text{s})} + 4 \text{CO}_{(\text{g})}$, le nickel étant, cette fois, pur.

a) Établir l'expression de l'enthalpie libre $\Delta_r G^0(T) = \alpha + \beta T$ associée à la réaction :



au-dessus de 316 K, où α et β sont des constantes numériques à déterminer.

Pour quelle température T_i , obtient-on $\Delta_r G^0 = 0$? Calculer la constante d'équilibre de cette réaction à 50 °C et à 160 °C.

b) Commenter les signes de α et β . Quel est l'effet d'une augmentation isobare de température ? Quel est l'effet d'une augmentation isotherme de pression ?

c) La carbonylation industrielle est réalisée dans des fours à tambours rotatifs, à la température $T_1 = 316 \text{ K}$ et à la pression standard $P^0 = 1 \text{ bar}$. Pourquoi le four doit-il donc être vigoureusement refroidi à l'eau pour rester à 50 °C ? Évaluer la quantité de chaleur évacuée par l'eau de refroidissement pour la transformation d'une tonne de nickel en carbonyle. Évaluer la fraction molaire x du tétracarbonyle dans ces conditions, une fois l'équilibre atteint, en supposant que la réaction est très avancée dans le sens de l'écriture.

Mais la pénétration du monoxyde de carbone dans l'alliage de nickel au cours de la carbonylation est très lente à 50 °C. Pour augmenter la vitesse de réaction, on travaille à une plus haute température égale à $T_2 = 433 \text{ K} = 160 \text{ °C}$ et à une plus forte pression $P = 20 \text{ bars}$.

d) Quel sera l'état physique du tétracarbonyle de nickel ? On rappelle que l'équilibre de phase obéit à la loi de Van't Hoff.

e) Vérifier que la fraction molaire de tétracarbonyle vaut environ 0,66 à l'équilibre. Commenter.

Masse molaire $M(\text{Ni}) = 59 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$

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

Masses molaires en $\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$: $M(\text{H}) = 1$, $M(\text{C}) = 12$ et $M(\text{O}) = 16$.

