

DS n°3 (CCP - e3a)
(Samedi 12 novembre 2022 - Durée 4h)

L'utilisation des calculatrices est autorisée. Toute réponse non justifiée ne sera pas considérée. La précision, la clarté ainsi que les efforts de présentation (résultats encadrés ou soulignés) seront pris en compte dans la note. Les efforts d'explication (schémas) seront valorisés.

1 CHIMIE (30% de la note)

Partie 1 : ATOMISTIQUE et CRISTALLOGRAPHIE

Cette partie aborde quelques aspects de la chimie du silicium.

Données spécifiques :

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

Masse volumique du silicium : $\rho = 2,33 \cdot 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

Masse molaire du silicium : $M = 28,1 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$

Rayon de l'ion nitrure N^{3-} : $r(\text{N}^{3-}) = 140 \text{ pm}$

Rayons de l'ion Si^{4+} : $r(\text{Si}^{4+}) = 27 \text{ pm}$ (si coordinence = 4) ou 40 pm (si coordinence = 6)

Électronégativités : $\chi(\text{O}) = 3,44$ $\chi(\text{Si}) = 1,93$ $\chi(\text{Cl}) = 3,16$

A. Structure du silicium

- A.1. Écrire la configuration électronique à l'état fondamental de l'atome de silicium Si ($Z = 14$). Préciser ses électrons de cœur et de valence.
- A.2. En déduire sa position dans la classification périodique de Mendeleïev (numéro de période ; numéro de colonne). Citer un élément chimique très répandu qui possède la même configuration de valence. Quel sera l'élément le plus électronégatif des deux ? Justifier.
- A.3. Le silicium intervient naturellement dans de nombreux composés : SiO_2 , $\text{Si}(\text{OH})_4$, SiCl_4 . Donner la structure de Lewis pour chacun de ces composés. Quel est le nombre d'oxydation du silicium dans chacun des cas ?

B. Cristallographie du silicium et du nitrure de silicium

Le silicium forme une structure de type diamant, c'est à dire une structure cubique faces centrées d'atomes de silicium, avec occupation d'un site tétraédrique (noté T) sur deux par un atome de silicium.

- B.1. Dans une structure cubique faces centrées (cfc), préciser le nombre de sites T et de sites O appartenant en propre à la maille.
- B.2. En déduire la population de la maille de type diamant du silicium en détaillant le calcul. Préciser la coordinence de l'atome de silicium dans la structure.
- B.3. Écrire la relation entre le paramètre de la maille a et le rayon $r(\text{Si})$ de l'atome de silicium dans la structure de type diamant.
- B.4. À partir de la masse volumique fournie, établir que la valeur du rayon $r(\text{Si})$ est de 118 pm .
- B.5. Calculer la compacité de la structure. Commenter.

B.6. Comment expliquer que le silicium soit un matériau très dur ? Pour ce faire, on détaillera la nature de la liaison Si-Si dans la structure.

Le nitrure de silicium, quant à lui, cristallise sous trois variétés dont l'une est appelée gamma. Cette dernière est une structure spinelle, c'est-à-dire une structure cubique faces centrées d'ions nitrure N^{3-} , dans laquelle les ions de Si^{4+} occupent 1/8 ème des sites tétraédriques (notés T) et la moitié des sites octaédriques (notés O).

B.7. Le nitrure de silicium peut exister à l'état solide sous différentes variétés cristallines. Comment appelle-t-on ce phénomène ?

B.8. L'occupation des sites T et O est-elle cohérente avec la stœchiométrie de Si_3N_4 ?

B.9. Dans une structure cfc, l'habitabilité des sites T est inférieure à celle des sites O. Déterminer l'habitabilité des sites T en détaillant le calcul. Sachant que les alliages Si_3N_4 sont des alliages d'insertion, en déduire le rayon maximal de l'ion Si^{4+} . Est-ce cohérent avec les données ?

B.10. Quelle est la nature de la liaison entre Si^{4+} et N^{3-} ?

Partie 2 : CINÉTIQUE CHIMIQUE

Donnée : Constante des gaz parfaits : $R = 8,314 \text{ J.K}^{-1}.\text{mol}^{-1}$

On étudie une réaction totale d'équation bilan : $RBr + I^- \rightarrow RI + Br^-$ où R est un radical carbone-hydrogène. On suppose que cette réaction admet un ordre par rapport à chaque réactif.

Notations et définitions :

- On note $[A]_0$ la concentration de l'espèce A à l'instant $t = 0$.
- Si A est le réactif limitant d'une réaction chimique, on définit le taux d'avancement τ de cette réaction par la relation :

$$\tau = \frac{n_A(0) - n_A(t)}{n_A(0)}$$

où $n_A(t)$ est le nombre de moles de A à l'instant t et $n_A(0)$ le nombre de moles de A à l'instant $t = 0$.

Les résultats expérimentaux (la réaction ayant lieu à volume et à température constante) sont présentés dans les tableaux I à III.

Tableau I : $T = 298 \text{ K}$ $[RBr]_0 = 4,35 \cdot 10^{-2} \text{ mol.L}^{-1}$ $[I^-]_0 = 2,1 \cdot 10^{-3} \text{ mol.L}^{-1}$

t (en h)	0	1	2	3	4	5	8
$[I^-]$ (mol.L^{-1})	$2,10 \cdot 10^{-3}$	$1,61 \cdot 10^{-3}$	$1,23 \cdot 10^{-3}$	$9,45 \cdot 10^{-4}$	$7,24 \cdot 10^{-4}$	$5,55 \cdot 10^{-4}$	$2,50 \cdot 10^{-4}$

Tableau II : $T = 298 \text{ K}$ $[RBr]_0 = [I^-]_0 = 4,20 \cdot 10^{-3} \text{ mol.L}^{-1}$

t (en h)	0	0,5	1	2	4	8	12
τ	0	0,114	0,204	0,340	0,507	0,673	0,755

Tableau III

Température (K)	$[RBr]_0$ (mol.L^{-1})	$[I^-]_0$ (mol.L^{-1})	temps de demi-réaction
323	$1,0 \cdot 10^{-2}$	$1,7 \cdot 10^{-2}$	199 h 40 min
353	$2,5 \cdot 10^{-2}$	$2,5 \cdot 10^{-2}$	3 h 54 min

1. Donner l'expression de la vitesse de réaction en fonction des dérivées des concentrations de chaque espèce du milieu réactionnel. Donner d'autre part l'expression de cette vitesse en fonction des concentrations des réactifs et des ordres partiels. On notera α l'ordre partiel par rapport à RBr et β celui par rapport à I^- .
2.
 - a) Montrer à partir du **tableau I** qu'il y a dégénérescence de l'ordre par rapport à RBr.
 - b) Justifier que la réaction est d'ordre 1 par rapport à l'ion I^- .
 - c) Déterminer la constante de vitesse apparente k_{app} correspondant aux concentrations de ce tableau.
3. On s'intéresse maintenant aux données du **tableau II**.
 - a) Exprimer [RBr] et $[I^-]$ en fonction des concentrations initiales et du taux d'avancement τ .
 - b) Déterminer à partir du **tableau II** si l'ordre partiel α par rapport à RBr est égal à 0 ou 1.
 - c) En déduire la constante de vitesse k de la réaction à la température de 298 K.
4. On utilise le **tableau III**.

On rappelle que le temps de demi-réaction est défini par rapport au réactif limitant (par rapport aux coefficients stoechiométriques de l'équation bilan).

On donne :

$$\frac{1}{(a_0 - x)(b_0 - x)} = \frac{1}{(b_0 - a_0)} \left(\frac{1}{a_0 - x} - \frac{1}{b_0 - x} \right)$$

- a) En supposant un ordre partiel $\alpha = 1$ par rapport à RBr, déterminer la relation entre l'avancement volumique, noté x , et le temps t , en partant des concentrations initiales : $[RBr]_0 = a_0$ et $[I^-]_0 = b_0 \neq a_0$.
- b) En déduire la constante de vitesse k en fonction du temps de demi-réaction $t_{1/2}$, de a_0 et de b_0 . Application numérique : calculer la constante de vitesse $k(323K)$ à 323 K.
- c) Déterminer de même, lorsque $T = 353$ K, la relation entre $t_{1/2}$ et la constante de vitesse $k(353K)$. Application numérique : calculer la valeur de $k(353K)$.
- d) En déduire l'énergie d'activation E_a de cette réaction (énergie supposée constante).

2 ÉTUDE DE CONDENSATEURS (40% de la note)

Donnée : $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F.m}^{-1}$

PARTIE A. – ÉTUDE D'UN MICROPHONE ÉLECTROSTATIQUE

Un microphone électrostatique (Figure 1) est constitué d'une membrane P_1 de surface S , extrêmement légère de masse m_e . Celle-ci, réalisée en métal (ou en polyester rendu conducteur par un saupoudrage de métal), est mobile et constitue l'une des armatures d'un condensateur plan. L'espace entre la membrane P_1 et l'armature fixe P_2 est entièrement rempli d'air de permittivité électrique ε_0 . Au repos, la distance entre les deux armatures parallèles est notée e . En mouvement, la liaison entre l'isolant et la membrane peut être modélisée par une force de rappel élastique de constante de raideur k_e .

Les variations de pression provoquées par l'onde sonore font varier la distance entre les deux armatures par un déplacement de la membrane parallèlement à l'axe Ox . Ce déplacement induit une variation de la capacité et cet effet est exploité dans le circuit électrique de la Figure 1 de manière à récupérer le signal $u(t)$ aux bornes de la résistance $R = 10 \text{ k}\Omega$. Les variations de $u(t)$ sont à l'image de celles de la pression acoustique

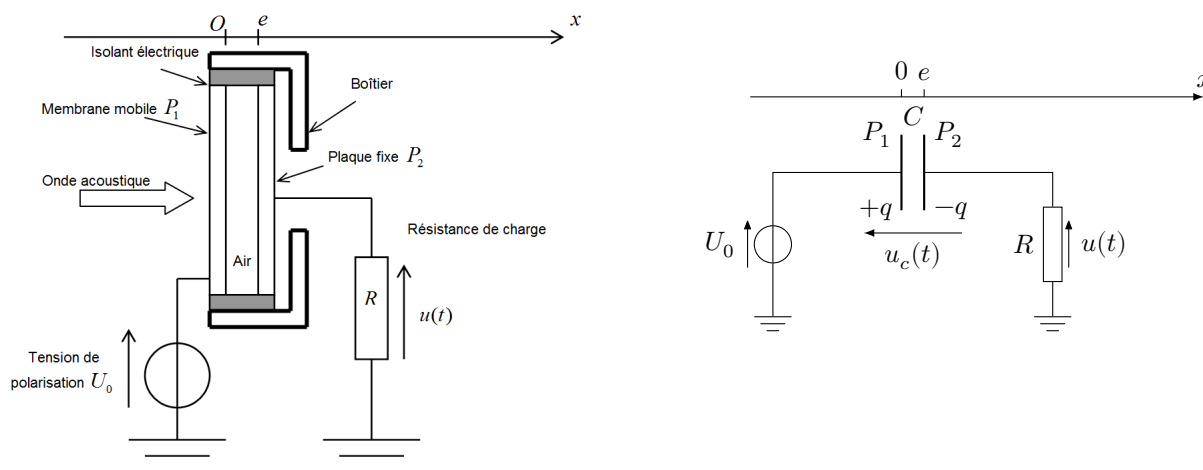


FIGURE 1 – Microphone électrostatique

La membrane P_1 et l'armature fixe P_2 sont assimilées à des plans chargés uniformément par les charges $+q$ et $-q$. On associe à P_1 et P_2 les densités surfaciques uniformes de charges $+\sigma = +q/S$ pour $-\sigma = -q/S$ pour P_2 . De plus, on assimile les deux plaques à des plans infinis afin de négliger par la suite les effets de bord.

I. Capacité du condensateur au repos

- 1) Montrer, par des considérations de symétrie et d'invariance, que le champ électrique $\vec{E}_1(M)$ créé par la plaque P_1 en tout point de l'espace est perpendiculaire à ce plan et ne dépend que d'une variable d'espace.
- 2) Justifier que $\vec{E}_1(M) = -\vec{E}_1(M')$ où M et M' sont deux points placés symétriquement par rapport au plan P_1 .
- 3) En appliquant le théorème de Gauss sur une surface clairement indiquée, exprimer le champ électrique $\vec{E}_1(M)$.

- 4) Dédire du résultat précédent l'expression du champ électrique total $\vec{E}(M) = \vec{E}_1(M) + \vec{E}_2(M)$ créé par les deux plaques P_1 et P_2 en tout point de l'espace.
- 5) Montrer que la différence de potentiel $u_C = V_{P_1} - V_{P_2}$ entre les deux plaques peut se mettre sous la forme $u_C = \frac{q}{C_0}$, où C_0 est la capacité du condensateur au repos. Déterminer l'expression de C_0 en fonction de ε_0 , S et e .

II. Introduction d'une plaque métallique entre les deux armature du condensateur

On introduit entre les deux plaques du condensateur plan précédent une plaque métallique \mathcal{P} parallélépipédique d'épaisseur $d < e$, de même surface S que P_1 et P_2 et parallèle aux armatures du condensateur (Figure 2). Les effets de bords sont toujours négligés et, du point de vue des symétries, on pourra considérer que P_1 , P_2 et \mathcal{P} sont d'extension infinie selon Oy et Oz .

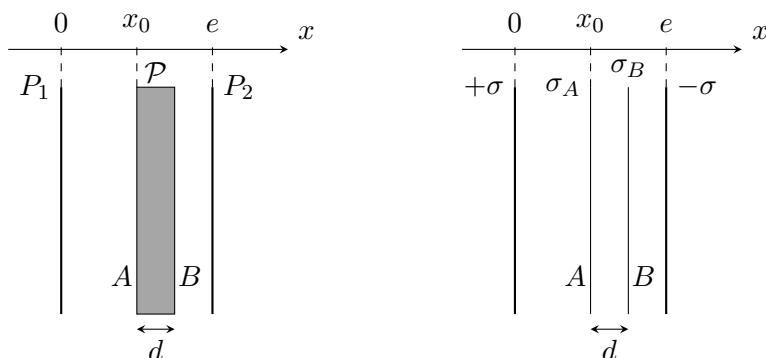


FIGURE 2 – Introduction d'une plaque entre les armatures

Avant son introduction dans le condensateur, la plaque métallique \mathcal{P} n'est pas chargée. Cependant, sous l'influence du champ électrique du condensateur, les électrons de conduction de \mathcal{P} vont se déplacer et venir s'accumuler sur l'une des faces (A ou B sur le schéma), créant ainsi une distribution de charges surfacique. Il y a alors un défaut d'électrons sur la face opposée, ce qui est équivalent à une distribution surfacique de charges de signe opposé.

Un état d'équilibre finit par s'installer où les charges s'immobilisent dans le référentiel d'étude. L'ensemble condensateur et plaque se comporte alors comme quatre plans infinis comme indiqué sur la Figure 2, avec des densités surfaciques $+\sigma$, σ_A , σ_B et $-\sigma$.

- 1) Préciser les signes des densités σ_A et σ_B . Quelle est la relation entre σ_A et σ_B ?
- 2) On admet que les charges se répartissent sur les deux faces A et B de \mathcal{P} de sorte à ce que le champ électrostatique total $\vec{E}(x)$ soit nul dans \mathcal{P} , c'est à dire pour $x_0 \leq x \leq x_0 + d$. Déterminer l'expression de $\vec{E}(x)$ pour $x_0 \leq x \leq x_0 + d$ et en déduire la relation entre σ_A et σ .
- 3) Déterminer l'expression du champ électrostatique pour $x \in [0, x_0]$ d'une part et pour $x \in [x_0 + d, e]$ d'autre part, en fonction de σ et de ε_0 . En déduire la différence de potentiel $u_C = V(x=0) - V(x=e)$ entre les deux armatures du condensateur, en fonction de σ , e , d et ε_0 .
- 4) En déduire la capacité C' du condensateur ainsi obtenu (avec la plaque métallique). On exprimera C' en fonction de e , d , S et ε_0 . Conclure quant à l'influence de la plaque métallique sur la capacité du condensateur.

III. Réponse du circuit électrique en régime permanent sinusoïdal

On revient dans cette partie à la configuration du condensateur plan étudié dans la partie I., sans plaque métallique. Lorsque celui-ci est au repos (écartement e entre les armatures), sa capacité est C_0 déterminée à la question I.5).

En raison du passage d'une onde acoustique créant surpression sinusoïdale de pulsation ω , la membrane mobile P_1 oscille autour de sa position d'équilibre O selon l'équation $x_1(t) = X_1 \cos(\omega t)$ avec une amplitude de déplacement $X_1 \ll e$.

- 1) À l'aide d'un développement limité, montrer que la capacité $C(t)$ du condensateur s'exprime par $C(t) = C_0 + C_1 \cos(\omega t)$. Préciser l'expression de C_1 en fonction de C_0 , X_1 et e .

La Figure 3 rappelle les équations caractéristiques reliant l'intensité électrique $i(t)$ traversant un condensateur, la charge électrique $q(t)$ sur son armature, la tension $u_c(t)$ à ses bornes et sa capacité $C(t)$:

$$\begin{array}{c}
 \begin{array}{c}
 \xrightarrow{i(t)} \\
 \text{---} \text{---} \\
 \text{---} \text{---} \\
 \xleftarrow{u_c(t)}
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{c}
 q(t) \\
 | \\
 | \\
 \text{---} \text{---}
 \end{array}
 \quad
 i(t) = \frac{dq(t)}{dt} \text{ et } u_c(t) = \frac{q(t)}{C(t)}
 \end{array}$$

FIGURE 3 – Relations générales entre i , q , u_c et C pour un condensateur.

- 2) a) Quelle est la relation entre $i(t)$, $u_c(t)$ et $C(t)$?
 b) On note $u(t)$ la tension aux bornes de la résistance R et U_0 la tension constante délivrée par le générateur sur le schéma électrique de la Figure 1. Établir la relation liant $u(t)$, U_0 , R et $C(t)$.
- 3) En déduire, en précisant les approximations faites, l'équation différentielle traduisant l'évolution temporelle de la tension $u(t)$ sous la forme

$$\frac{du}{dt} + \omega_0 u = \omega A \cos\left(\omega t + \frac{\pi}{2}\right) \quad \text{avec} \quad A = \frac{U_0 X_1}{e} \quad \text{et} \quad \omega_0 = \frac{1}{RC_0}$$

En régime sinusoïdal forcé, la solution est de la forme $u(t) = U \cos(\omega t + \varphi_u)$.

- 4) Exprimer l'amplitude U en fonction de ω , ω_0 , X_1 , e et U_0 .
 5) Montrer qu'en dessous de 10 kHz le graphe $20 \log U$ en fonction de ω est compatible avec la réponse relative du microphone en fonction de la fréquence donnée Figure 4.
 6) Estimer alors l'ordre de grandeur de C_0 .

Le modèle étudié précédemment ne prend pas en considération le couplage électromécanique du système dans les hautes fréquences. Celui-ci, devient prépondérant au-delà de 10 kHz, la réponse du microphone présente alors une résonance causée par les oscillations mécaniques de la membrane au voisinage de sa position d'équilibre.

- 7) Donner un ordre de grandeur de $\sqrt{k_e/m_e}$.

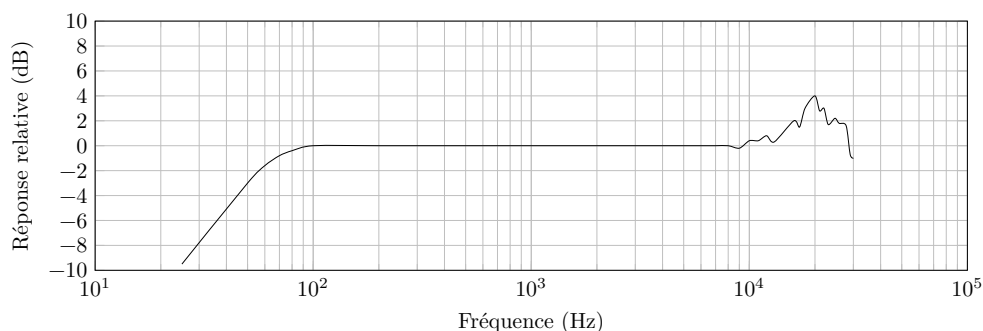


FIGURE 4 – Réponse du microphone électrostatique en fonction de la fréquence : $20 \log U$ en fonction de la fréquence (échelle logarithmique)

PARTIE B. – CONDENSATEUR CYLINDRIQUE

On considère un condensateur cylindrique à air formé de deux armatures coaxiales de hauteur h , de rayons respectifs R_1 et R_2 avec $R_1 < R_2$ (Figure 5). On néglige les effets de bords, ce qui signifie que, du point de vue des symétries, tout se passe comme si le condensateur était de hauteur infinie.

L'armature interne de rayon R_1 porte la charge électrique q , uniformément répartie sur la surface latérale du cylindre, avec une densité σ_1 . L'armature externe est un cylindre très mince de rayon R_2 portant la charge opposée $-q$, avec une densité surfacique σ_2 .

Un point M sera repéré par ses coordonnées cylindriques (r, θ, z) et on notera $(\vec{e}_r, \vec{e}_\theta, \vec{e}_z)$ la base cylindrique associée.

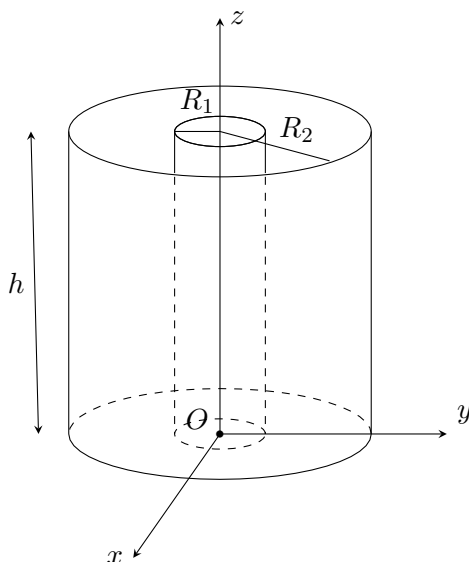


FIGURE 5 – Condensateur cylindrique

- 1) Préciser les expressions de σ_1 et de σ_2 en fonction de q , des rayons R_1 et R_2 et de h
- 2) Par une étude des symétries, préciser la direction de $\vec{E}(M)$ et indiquer de quelles coordonnées il dépend.

- 3) Déterminer $\vec{E}(M)$ en tout point M , c'est à dire pour $r \in [0, R_1[$, $r \in]R_1, R_2[$ et $r \in]R_2, +\infty[$. Représenter $\|\vec{E}\|$ en fonction de r . Commenter.

On note V_1 le potentiel électrique de l'armature de rayon R_1 et V_2 celui de l'armature de rayon R_2 .

- 4) Déterminer la relation entre la tension $U = V_1 - V_2$, q , ε_0 , R_1 , R_2 et h . On mettra le résultat sous la forme : $q = CU$, où C est la capacité du condensateur. Calculer C pour $R_1 = 10$ cm, $R_2 = 20$ cm et $h = 50$ cm.
- 5) Que devient l'expression de C si les rayons des armatures sont très voisins, c'est à dire si $R_2 - R_1 = e \ll R_1$? Montrer que le condensateur cylindrique est alors équivalent à un condensateur plan dont on donnera les caractéristiques : épaisseur e' , surface S' .
- 6) Pour quelle valeur de r la norme de \vec{E} est-elle maximale? On souhaite que cette valeur ne dépasse pas une valeur limite E_0 afin d'éviter un claquage du condensateur. Calculer alors la valeur maximale U_{\max} de la tension pouvant être appliquée entre les armatures? Application numérique : calculer U_{\max} si $E_0 = 30$ kV.cm⁻¹.

3 PIÈGES ÉLECTRONIQUES (30% de la note)

Les pièges électroniques sont des dispositifs qui permettent, à l'aide de champs électriques et magnétiques, de confiner un électron (masse m_e et charge $-e$) dans une très petite région de l'espace. Les mouvements de l'électron seront rapportés à un référentiel galiléen \mathcal{R} , muni du repère d'espace $(Oxyz)$.

On donne les constantes physiques suivantes :

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

Masse de l'électron : $m_e = 0,91 \cdot 10^{-30}$ kg

I. Piège 1 dimension

On considère un champ électrostatique \vec{E} dont le potentiel V associé a pour expression, en un point M de coordonnées (x, y, z) :

$$V(M) = V_0 \frac{2z^2 - x^2 - y^2}{4d^2} \quad (1)$$

où V_0 et d sont des constantes.

- 1) Montrer que ce potentiel, appelé potentiel quadrupolaire, satisfait à l'équation de Laplace $\Delta V = 0$, où Δ est le laplacien.
- 2) On suppose dans cette question que $V_0 < 0$.

- a) Représenter le graphe du potentiel $V(z)$ le long de l'axe Oz .
- b) Représenter la courbe équipotentielle $V = V_1 > 0$ dans le plan (Oxy) .

- 3) Concrètement, le potentiel $V(M)$ donné par l'équation (1) est produit par trois électrodes métalliques : l'une en forme d'anneau d'axe Oz et les deux autres en forme de coupelles d'axe Oz , symétriques par rapport au plan Oxy (figure 1). On désigne par $2r_0$ le diamètre minimal de l'électrode annulaire et par $2z_0$ la distance entre les deux coupelles.

Un générateur idéal de tension établit une différence de potentiel V_0 entre les coupelles et l'anneau. En admettant que chaque électrode métallique est équipotentielle, établir la relation qui en résulte entre r_0 , z_0 et d .

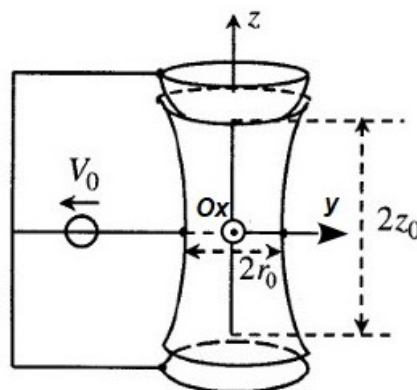


Figure 1

- 4) Un électron de coordonnées (x, y, z) est soumis à la force électrostatique exercée par le champ électrostatique associé au potentiel donné par l'équation (1).

- a) Établir les trois équations différentielles de son mouvement, vérifiées par x , y et z . À quelle condition sur le signe de V_0 le mouvement axial suivant Oz de l'électron est-il confiné dans une région limitée de l'espace ?

Le mouvement transversal, dans le plan Oxy , est-il alors lui-aussi confiné ? On justifiera la réponse.

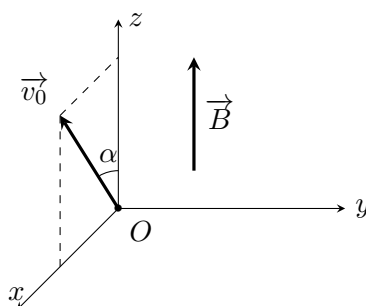
- b) Exprimer, en fonction de V_0 et d , la pulsation ω_z du mouvement confiné le long de Oz . Calculer numériquement ω_z dans le cas où $V_0 = -5$ V et $d = 6$ mm ; en déduire la fréquence correspondante f_z en MHz.

II. Piège 2 dimensions

Un électron se déplace dans un champ magnétique uniforme et constant $\vec{B} = B\vec{u}_z$ avec $B > 0$. On suppose dans cette question que $\vec{E} = \vec{0}$. L'électron est repéré par ses trois coordonnées cartésiennes (x, y, z) .

- 5) Écrire dans le cadre de la dynamique newtonienne, les trois équations différentielles couplées vérifiées par x , y et z . On introduira la quantité $\omega_c = eB/m_e$ que l'on calculera pour $B = 5,0$ mT, en précisant son unité. En déduire la fréquence correspondante f_c en MHz.

L'origine O est choisie au point où se trouve l'électron à l'instant $t = 0$ et sa vitesse initiale \vec{v}_0 est déterminée selon le schéma ci-dessous :



On notera v_0 la norme de \vec{v}_0 .

- 6) Établir l'expression de $z(t)$. Le mouvement est-il confiné suivant Oz ?
 7) On introduit la grandeur complexe $\underline{u} = x + iy$ où i est le nombre complexe de module 1 et d'argument $+\pi/2$. Établir l'équation différentielle vérifiée par \underline{u} .

En déduire sa solution puis les expressions de $x(t)$ et $y(t)$.

- 8) Montrer que le mouvement de l'électron dans le plan (Oxy) est un cercle dont on donnera le rayon R . Application numérique : calculer R dans le cas où $v_0 = 1,0 \cdot 10^5$ m.s⁻¹ et $\alpha = \pi/2$.

III. Piège 3 dimensions

On soumet simultanément un électron aux forces exercées par le champ magnétique uniforme décrit en **II**) et par le champ électrostatique quadrupolaire décrit en **I.4**) On réalise ainsi un piège à trois dimensions, appelé piège de Penning.

- 8) Écrire les trois équations différentielles du mouvement vérifiées par les coordonnées x , y et z dans le référentiel \mathcal{R} en fonction de ω_c et ω_z .
 9) À quelle équation différentielle satisfait la grandeur complexe $\underline{u} = x + iy$?
 10) En déduire que la solution générale de cette équation différentielle s'écrit sous la forme :

$$\underline{u}(t) = A \exp(i\omega_1 t) + B \exp(i\omega_2 t)$$

où A et B sont deux constantes complexes qu'on ne cherchera pas à déterminer et où ω_1 et ω_2 sont deux pulsations dont on donnera les expressions en fonction de ω_c et ω_z .

Application numérique : calculer les fréquences f_1 et f_2 associées.

- 11) Montrer que le mouvement est maintenant confiné à la fois dans le plan (Oxy) et le long de l'axe Oz .