

Le sujet comporte trois parties indépendantes.

Les calculatrices sont interdites

Partie I — La lévitation acoustique

La lévitation acoustique consiste à maintenir de la matière en suspension au sein d'un milieu fluide ambiant, l'air par exemple, en opposant au poids de l'objet lévitant la force résultant de la pression de radiation d'ondes sonores intenses. La possibilité de mettre en lévitation des échantillons solides ou liquides, de faible masse, est maintenant bien établie, et des avancées récentes laissent entrevoir des applications concrètes de ce procédé.

En 2013, une équipe de chercheurs suisses a mis au point un dispositif de lévitation acoustique permettant un transport contrôlé de petits objets. Ils sont ainsi parvenus à mélanger une gouttelette d'eau et un granulé de café soluble. Cette expérience a priori ludique recèle en réalité des applications technologiques et industrielles extrêmement précieuses, telle que le contrôle de certains procédés chimiques ou biologiques.

En 2015, c'est une équipe de recherche sud-américaine qui a mis au point un dispositif de lévitation acoustique permettant de transporter des objets avec une grande stabilité donc sans aucun risque d'en perdre le contrôle mécanique, ce qui intéresse particulièrement les secteurs sensibles du nucléaire et de la chimie, où la dangerosité de la matière transportée impose de prendre en compte les risques inhérents aux chocs ou à la dissémination.

Ce problème aborde le principe de la lévitation acoustique de manière simplifiée.

Les vecteurs seront surmontés d'un chapeau s'ils sont unitaires ($\hat{e}$) et d'une flèche dans le cas général ($\vec{a}$). Ainsi dans l'espace cartésien on notera $\vec{a} = a_x \hat{e}_x + a_y \hat{e}_y + a_z \hat{e}_z$. À l'exception de j , tel que $j^2 = -1$, les nombres complexes seront soulignés.

Dans tout le problème, **exprimer** signifie donner l'expression littérale et **calculer** signifie donner la valeur numérique avec deux chiffres significatifs.

Le dispositif de lévitation acoustique est présenté et modélisé sur la figure I-1.

Un transducteur, de surface $S = 10 \text{ cm}^2$, est en vibration au voisinage de la hauteur h à la vitesse $\vec{u}_m(t) = U_m \sin(\omega t) \hat{e}_z$ avec $U_m = 10 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$. Il génère une onde sonore de fréquence $f = 20 \text{ kHz}$ supposée plane, harmonique, et progressive selon la verticale descendante. Cette onde est *totalelement réfléchi*e par une paroi fixe placée en $z = 0$.

Le milieu de propagation est de l'air, supposé homogène et compressible. Il est caractérisé au repos (en l'absence d'onde sonore) par une masse volumique $\mu_0 = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$ uniforme. Les champs de température et de pression sont eux aussi stationnaires, la température T_0 étant en outre uniforme alors que la pression est une fonction de z , soit $P_0 = P_0(z)$.

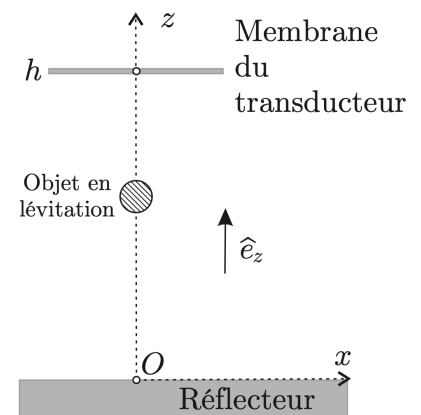


FIGURE I-1 – À gauche : lévitation acoustique de particules de polystyrène expansé. À droite : schéma de principe du dispositif de lévitation acoustique.

On suppose que la propagation est unidimensionnelle, de célérité $c = 3,4 \times 10^2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ dans le milieu. Dans l'approximation acoustique, les champs de pression, masse volumique et vitesse sont alors décrits respectivement par

$$\begin{cases} P(z, t) &= P_0(z) + p_1(z, t) \\ \mu(z, t) &= \mu_0 + \mu_1(z, t) \\ \vec{v}(z, t) &= v_1(z, t) \hat{e}_z \end{cases}$$

Les termes p_1 et μ_1 sont perturbatifs : pour toutes les valeurs de t et de z concernées on a donc $|p_1| \ll |P_0|$ et $|\mu_1| \ll |\mu_0|$. L'évolution du fluide mis en mouvement par l'onde sonore est supposée adiabatique et réversible. Le coefficient de compressibilité isentropique sera noté χ_S et assimilé à une constante.

□ 1 — Rappeler les hypothèses de l'approximation acoustique. Sauf mention contraire, on suppose que ces hypothèses vérifiées par la suite.

□ 2 — On considère une particule fluide, de volume $d\tau$, mise en mouvement par le passage de l'onde sonore. Montrer que, dans l'approximation acoustique, son accélération peut s'écrire $\vec{a} = \frac{\partial \vec{v}}{\partial t}$.

□ 3 — Écrire l'équation aux dérivées partielles obtenue en appliquant la relation fondamentale de la dynamique à une particule de fluide de volume $d\tau$ et de masse $\mu_0 d\tau$ et en déduire une équation aux dérivées partielles reliant les seules grandeurs μ_0 , v_1 et p_1 .

□ 4 — Donner les expressions linéarisées des relations locales traduisant d'une part la conservation de la masse, et d'autre part le caractère isentropique de l'évolution du fluide sous l'effet de l'onde acoustique.

□ 5 — Montrer que le champ des vitesses $v_1(z, t)$ vérifie une équation de propagation de la forme

$$\frac{\partial^2 v_1}{\partial z^2} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 v_1}{\partial t^2} = 0.$$

Quelle est le nom de cette équation? Exprimer c en fonction des paramètres pertinents.

□ 6 — On note λ la longueur d'onde associée au phénomène propagatif décrit à la question précédente. On suppose que les transferts thermique dans le milieu sont de type diffusif. On note $\kappa = 3,0 \times 10^{-2} \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ la conductivité thermique de l'air et $c_p = 1,0 \times 10^3 \text{ J} \cdot \text{K}^{-1} \cdot \text{kg}^{-1}$ sa capacité thermique massique à pression constante. Par un raisonnement en ordre de grandeur, montrer que l'hypothèse d'adiabaticité n'est valide que si la fréquence f de l'onde est inférieure à une valeur $f_{\max}$ que l'on exprimera en fonction de κ , μ_0 , c_p et c . Qu'en est-il dans le cadre de cette expérience?

□ 7 — On note $z_m(t)$ la position de la membrane du transducteur au voisinage de h . Exprimer puis calculer l'amplitude Z_m de vibration de $z_m(t)$. On pourra prendre $(4\pi)^{-1} = 8,0 \times 10^{-2}$.

□ 8 — On s'intéresse à l'onde sonore résultante entre le transducteur et le réflecteur. Justifier la condition aux limites

$$u_m \approx v_1(h, t).$$

□ 9 — Déterminer complètement la vitesse $v_1(z, t)$ dans l'espace $0 \leq z \leq h$ et exprimer son amplitude maximale V_1 en fonction de U_m , h , ω et c .

□ 10 — Déterminer les positions spatiales des maxima de vitesse en fonction de λ et d'un entier n . Commenter ce résultat. Montrer que l'amplitude V_1 des maxima diverge pour certaines pulsations ω_n . En pratique, quels phénomènes limitent la valeur de V_1 ?

□ 11 — Exprimer la surpression $p_1(z, t)$ associée à $\vec{v}_1(z, t)$. On considère une bille, de rayon $a \ll \lambda$ et donc assimilable à un volume élémentaire sans influence sur la propagation de l'onde acoustique. Déterminer la résultante $\vec{F}$ des forces de pression s'exerçant sur la bille, ainsi que sa moyenne temporelle $\langle \vec{F} \rangle$. Le modèle étudié jusqu'à présent permet-il d'interpréter la lévitation de cette bille?

□ 12 — On règle dorénavant la valeur de h de manière à obtenir $V_1 = 50 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Pourquoi n'est-il plus possible de se placer dans l'approximation acoustique?

On pose maintenant

$$\begin{cases} P(z, t) &= P_0(z) + p_1(z, t) + p_2(z, t) \\ v(z, t) &= v_1(z, t) + v_2(z, t) \end{cases}$$

où les termes d'indice 0 sont les grandeurs constantes au repos (en l'absence d'onde sonore), les termes d'indice 1 sont les solutions étudiées précédemment et les termes d'indice 2 sont des corrections d'ordre 2, résultant des termes non linéaires des équations aux dérivées partielles décrivant le phénomène.

□ 13 — On admet que la surpression $p_2(z, t)$ est de la forme

$$p_2(z, t) = \frac{1}{4} \mu_0^\ell V_1^q \cos\left(\frac{2\omega z}{c}\right) + f(z) \cos(2\omega t)$$

où $f(z)$ est une fonction dont il n'est pas nécessaire de connaître l'expression.

Déterminer les valeurs des entiers ℓ et q . Déterminer la moyenne temporelle $\langle F_z \rangle(z)$ de la résultante des forces de pression qui s'exercent sur la bille.

□ 14 — Montrer, sans les déterminer explicitement, qu'il existe des positions d'équilibre tant que la masse volumique μ_b de la bille reste inférieure à une valeur $\mu_{b, \max}$ dont on précisera l'expression. En vous appuyant sur une représentation graphique de la force moyenne $\langle F_z \rangle(z)$, discuter la stabilité des positions d'équilibre.

- 15 — Calculer $\mu_{b,\max}$ et proposer une estimation de la masse maximale $m_{b,\max}$ d'une bille susceptible de léviter avec le dispositif présenté ici. Commenter les valeurs numériques.
- 16 — Comme on le voit sur la figure I-1 le dispositif permet de faire léviter plusieurs objets. Quelle est la distance qui les sépare? Estimer le nombre maximal de ces objets en fonction de λ et h .
- 17 — On observe que les objets en lévitation dans ce dispositif ont un petit mouvement d'oscillation de pulsation $\tilde{\omega}$ au voisinage de leurs positions d'équilibre. Déterminer l'expression de $\tilde{\omega}$ en fonction des paramètres du problème.

Partie II – Motifs de vibration sur une plaque : figures de Chladni

Données numériques

accélération de la pesanteur terrestre : $g = 9,8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$

masse volumique de l'air : $\rho_a = 1,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

masse volumique de l'aluminium : $\rho = 2,7 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

module de Young de l'aluminium : $E = 6,9 \times 10^{11} \text{ Pa}$

coefficient de Poisson de l'aluminium : $\nu = 3,3 \times 10^{-1}$

Lorsque l'on fait vibrer une plaque sur laquelle on place des particules comme du sel ou du sable, on observe des endroits où elle ne vibre pas et d'autres où, au contraire, les vibrations sont fortes.

Ceci entraîne une agglomération de particules dans les lieux non vibrants, faisant émerger des formes baptisées figures de CHLADNI, en hommage au physicien E. CHLADNI qui les a découvertes en 1787. Ces figures dépendent en particulier de la fréquence de vibration, de la forme et des dimensions de la plaque choisie. Lors de sa dernière mission dans la station spatiale internationale, Thomas PESQUET a eu l'occasion de revisiter cette expérience en trois dimensions, en plaçant dans un tube des particules et en les soumettant à des ondes ultrasonores, en l'absence de gravité. Cette expérience a été réalisée grâce au démonstrateur technologique TetrISS et sur proposition d'un groupe d'étudiants ayant participé au concours « Génération ISS ».

1 — Propagation d'ondes acoustiques dans les solides

La propagation des ondes acoustiques dans les solides peut être décrite par un modèle permettant d'exprimer la célérité des ondes en fonction de grandeurs physiques mésoscopiques, à savoir la masse volumique et le module de YOUNG. Le module de YOUNG, noté E , est défini à partir de la loi de HOOKE, exprimant la norme de la force élémentaire δF à appliquer à une portion de solide de surface élémentaire dS pour créer un allongement relatif $\partial \xi / \partial x$ dans la direction x , orthogonalement à dS :

$$\delta F = E \frac{\partial \xi}{\partial x} dS. \quad (1)$$

Dans cette loi, ξ représente le déplacement de la surface dS par rapport à sa position d'équilibre.

On se propose de retrouver l'équation (1) en effectuant un raisonnement à l'échelle microscopique. Considérons un modèle simplifié dans lequel tous les atomes sont disposés sur les nœuds d'un réseau cubique. On note r_0 la distance entre atomes au repos et δN le nombre de liaisons traversant une section droite d'aire dS normale à la force mésoscopique appliquée. On suppose que la force de résistance à la traction microscopique de chaque liaison, faiblement étirée de r_0 à r , peut être modélisée par un rappel élastique de la forme $k(r - r_0)$ avec k la constante de raideur de la liaison exprimée en $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$.

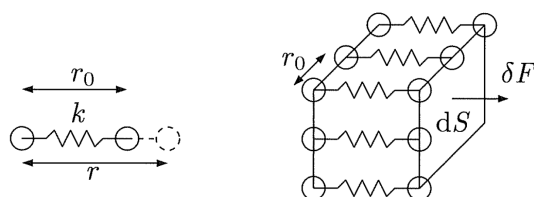


FIGURE II-1 – Modélisation microscopique des liaisons entre atomes dans un réseau cubique

- 1 — Exprimer δN en fonction de dS et r_0 . Déterminer l'expression de la force δF et en déduire l'expression du module de YOUNG E en fonction des paramètres microscopique k et r_0 .

□ 2 — Donner un ordre de grandeur du paramètre de maille d'un métal. Pour une liaison métallique pure, on donne $k \in [14, 40] \text{ N} \cdot \text{m}^{-1}$. En déduire une estimation numérique de E . Comparer à la valeur tabulée de l'aluminium.

On étudie dans la suite la propagation d'une onde acoustique dans un solide de masse volumique ρ , de module de YOUNG E , de longueur L et de section S uniforme, dans le référentiel terrestre supposé galiléen. On considère une fine tranche initialement comprise entre les surfaces d'abscisses x et $x+dx$. À un instant t quelconque, ces surfaces sont respectivement situées en $x + \xi(x, t)$ et $x + dx + \xi(x + dx, t)$. Les déformations sont supposées suffisamment petites pour pouvoir se limiter à l'ordre le plus bas non nul en la perturbation $\xi(x, t)$.

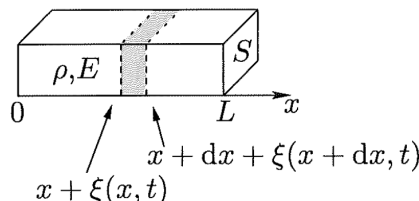


FIGURE II-2 – Propagation d'une onde dans un solide de masse volumique ρ et de module de YOUNG E . La partie grisée du solide représente la portion du solide comprise entre les abscisses $x + \xi(x, t)$ et $x + dx + \xi(x + dx, t)$.

□ 3 — Justifier que la largeur de la tranche à l'instant t reste approximativement égale à dx , puis déterminer la résultante des forces exercées sur la tranche considérée de la part des tranches adjacentes.

□ 4 — Montrer que la perturbation $\xi(x, t)$ obéit à l'équation de d'ALEMBERT. Exprimer la célérité c associée en fonction de E et ρ , et vérifier sa dimension.

□ 5 — Calculer numériquement c dans le cas de l'aluminium.

2 — Vibration d'une plaque en flexion pure

Dans un second modèle, on propose de modéliser les vibrations de la plaque dans l'expérience de CHALDNI par des déformations en flexion. Selon la théorie des plaques minces de KIRCHHOFF-LOVE, le déplacement vertical $z(x, y, t)$ de la plaque est régi par l'équation suivante

$$D\Delta(\Delta z) + \rho h \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} = 0. \quad (2)$$

Dans cette équation, Δ représente l'opérateur laplacien et $\Delta(\Delta z)$ est donc le laplacien du laplacien du champ z . Par ailleurs, ρ désigne la masse volumique, h l'épaisseur de la plaque et D la rigidité en flexion de la plaque, elle-même définie par

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}, \quad (3)$$

avec ν , un coefficient sans dimension, appelé coefficient de POISSON. Lorsqu'un effort est appliqué dans une direction, le matériau peut se déformer selon d'autres directions. Le coefficient de POISSON d'un matériau est donc défini comme le rapport du rétrécissement relatif dans une direction orthogonale à l'effort (compté positivement si le matériau est effectivement rétréci) sur l'allongement relatif dans la direction de l'effort.

Considérons un matériau isotrope, de forme cubique, de côté ℓ et de volume V . On l'allonge d'une quantité $\delta\ell = \varepsilon\ell$ (avec $|\varepsilon| \ll 1$) selon l'une de ses directions principales. Son volume augmente alors d'une quantité δV .

□ 6 — Pour de petites déformations, montrer que la variation relative de volume s'écrit

$$\frac{\delta V}{V} = \varepsilon(1 - 2\nu). \quad (4)$$

En déduire la valeur de ν pour un matériau parfaitement incompressible.

On cherche une solution de l'équation des ondes de flexion de type onde plane progressive harmonique, de pulsation ω et de vecteur d'onde $\vec{K} = K\vec{u}$ avec $\vec{u}$ un vecteur unitaire dans le plan (xy) .

□ 7 — Déterminer la relation de dispersion $\omega = f(K)$, puis les vitesses de phase v_ϕ et de groupe v_g de ces ondes en fonction de ω , D , ρ et h . Expliquer, en justifiant, si les ondes se propagent avec ou sans dispersion, avec ou sans atténuation.

On suppose que la plaque est carrée de côté a . Afin de tenir compte de la présence des bords, on propose la solution suivante :

$$z(x, y, t) = A \sin(K_x x + \varphi_x) \sin(K_y y + \varphi_y) \sin(\omega t). \quad (5)$$

Dans le cas d'une plaque simplement supportée sur tous ses bords, il faut imposer un déplacement vertical nul sur tous les bords de la plaque.

□ 8 — Établir l'expression mathématique de K_x et K_y et montrer que ces grandeurs sont quantifiées par des entiers naturels, notés respectivement m et n . En déduire les pulsations propres ω_{mn} en fonction de E , ρ , ν , h , a , m et n .

3 — Comparaison avec les résultats expérimentaux

On cherche à confronter les modèles théoriques précédents à l'expérience. On dispose de trois plaques carrées en aluminium, de côté $a = 24,0$ cm et d'épaisseurs respectives $h_1 = 1$ mm, $h_2 = 2$ mm et $h_3 = 5$ mm. On visse la plaque d'épaisseur h_1 en son centre à une tige métallique. Après avoir saupoudré la plaque de billes de silice de diamètre 0,3 mm, on la place sous une cloche à vide et on impose à la tige un mouvement vertical sinusoïdal, dont l'amplitude et la fréquence sont contrôlées *via* un générateur de tension. Pour certaines fréquences particulières, notées f_i où i est un entier naturel, on observe des figures de CHLADNI sur la plaque. La figure II-3 illustre certains motifs observés expérimentalement.

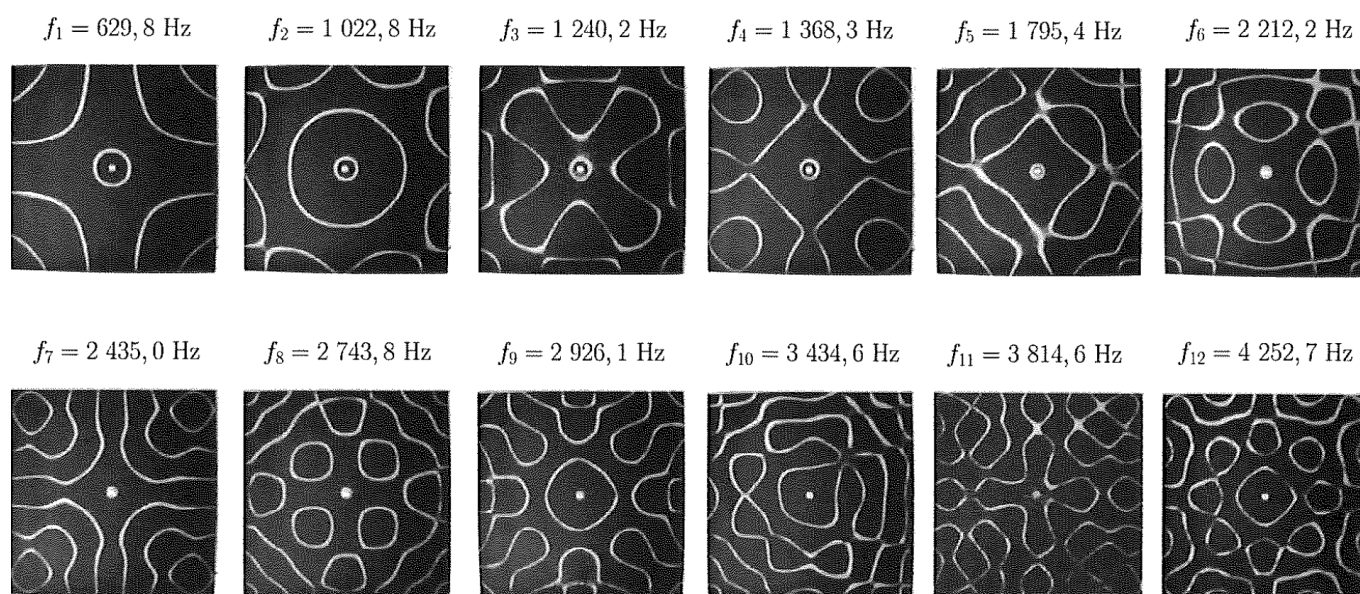


FIGURE II-3 – Figures de CHLADNI observées avec la plaque d'épaisseur $h_1 = 1$ mm. Pour chaque mode de résonance (un motif spatial), on précise la fréquence f_i associée, avec $i = 1, \dots, 12$. Source : *The Journal of Acoustical Society of America* 137 (2015).

□ 9 — Pour une onde stationnaire harmonique (monochromatique) solution de l'équation de d'ALEMBERT, rappeler l'expression de la distance entre deux nœuds de vibration consécutifs en fonction de la longueur d'onde λ . En estimant numériquement l'écart moyen entre deux lignes nodales voisines sur l'une des photos de la figure II-3, montrer que le modèle décrit dans la première partie est à exclure.

On considère à présent le modèle de vibration en flexion. On cherche à tester la validité de la relation de dispersion obtenue à la question 8.

On étudier tout d'abord l'influence de l'épaisseur h , pour une valeur de K fixée. On reporte dans le tableau ci-après les fréquences qu'il a fallu imposer pour obtenir la même figure de CHLADNI représentée en haut à gauche sur la figure II-3, pour chacune des plaques.

Épaisseur de la plaque	$h_1 = 1$ mm	$h_2 = 2$ mm	$h_3 = 5$ mm
f_1 (Hz)	630	1300	3200

TABLE 1 – Influence de l'épaisseur de la plaque sur la fréquence d'un mode donné

□ 10 — Analyser la cohérence des résultats avec le modèle. Expliquer les origines des éventuels écarts au modèle.

On étudie à présent l'influence de K , pour une épaisseur de la plaque fixée, avec $h = h_1 = 1$ mm. Les conditions aux limites n'étant pas celles d'une plaque simplement supportée (les bords sont libres de vibrer), les expressions de K_x et K_y sont plus complexes que celles obtenues à la question 8. Par des simulations numériques non décrites dans ce sujet, il est toutefois possible de remonter aux valeurs de K_i , associées à chacun des modes présentés sur la figure II-3, et exprimées en fonction de a^{-1} sur la figure II-4. On reporte les résultats expérimentaux obtenus sur la figure II-5.

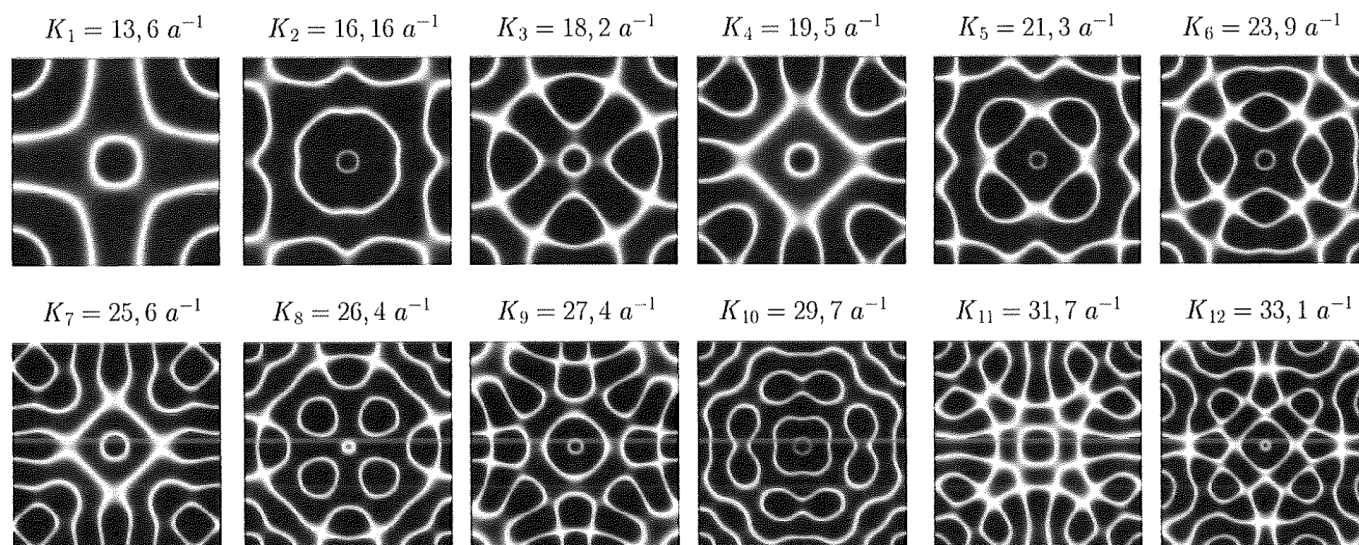


FIGURE II-4 – Valeurs de K_i correspondant aux modes associés aux figures de CHLADNI illustrées sur la figure II-3. Source : *The Journal of Acoustical Society of America* 137 (2015).

□ 11 — Comparer quantitativement l'ajustement tiré des résultats expérimentaux de la figure II-5 et la relation de dispersion trouvée à la question 7. Conclure.

L'expérience embarquée à bord de l'ISS a pour but d'observer des figures de Chladni en trois dimensions, en l'absence de gravité. Deux émetteurs à ultrasons de fréquence 40 kHz permettent de générer des ondes stationnaires dans tube, et des billes en acier placées à l'intérieur sont susceptibles de s'immobiliser sur les nœuds de vibration. Un moteur pas à pas permet de faire varier la distance entre les émetteurs, modifiant ainsi les figures observées.

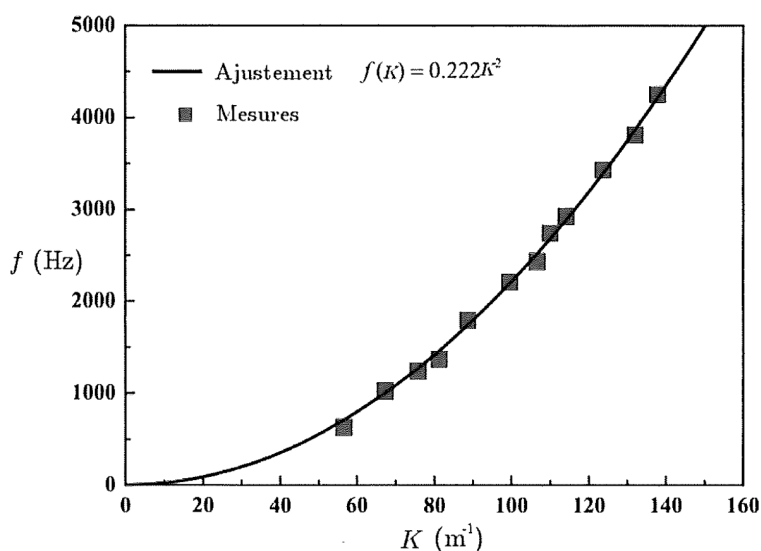


FIGURE II-5 – Évolution de la fréquence f_i des modes de résonance en fonction du nombre d'onde K_i . L'ajustement en traits plein a pour équation $f(K) = 0,222K^2$. Source : *The Journal of Acoustical Society of America* 137 (2015).

□ 12 — Proposer une hypothèse permettant d'assurer que l'agitation thermique de l'air ne va pas perturber l'observation d'une figure de CHLADNI dans ce cas de figure.

□ 13 — Rappeler l'ordre de grandeur de la célérité du son dans l'air dans les conditions usuelles de température et de pression. En supposant des transferts thermiques purement conductifs, vérifier la validité de l'hypothèse précédente à partir d'un raisonnement en ordre de grandeur.

Partie III — Les bouées houlographes Waverider : prévention de la corrosion

Depuis la fin des années 1960, la société néerlandaise Datawell développe des bouées houlographes commercialisées sous le nom de Waverider. Flottant à la surface de la mer, une telle bouée se déplace au gré des vagues de sorte qu'en enregistrant son mouvement, on accède aux caractéristiques de la houle.



FIGURE III-1 – Photographies d'une bouée houlographe Waverider

La coque des bouées Waverider est faite d'acier AISI 316, un alliage de fer, de carbone (moins de 1 %) et de chrome. L'oxydation du chrome permet la formation d'une couche superficielle de passivation et rend en principe l'acier « inoxydable », donc apte à demeurer longtemps en milieu marin. Cependant, la présence d'ions chlorures entraîne une dégradation locale de la couche de passivation, déclenchant irrémédiablement la corrosion du fer. Dans cette partie, on étudie la corrosion de l'acier en milieu marin et le moyen choisi par Datawell pour s'en prémunir.

1 Thermodynamique de la corrosion du fer

La figure A du document réponse est un diagramme potentiel-pH du fer tracé pour la concentration en espèces dissoutes $C_{\text{tra}} = 1,0 \times 10^{-6} \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$. Les espèces prises en compte sont Fe(s) , FeOOH(s) , $\text{Fe(OH)}_2(\text{s})$, $\text{Fe}^{2+}(\text{aq})$, $\text{Fe}^{3+}(\text{aq})$ et $\text{HFeO}_2^-(\text{aq})$. Les frontières associées aux couples d'oxydoréduction de l'eau ont été superposées en pointillés gris.

- 1 — Compléter ce diagramme potentiel-pH en attribuant à chaque domaine une espèce contenant Fe.
- 2 — À partir du diagramme, déterminer le potentiel standard du couple $\text{Fe}^{2+}(\text{aq})/\text{Fe(s)}$ et le pK_s de $\text{Fe(OH)}_2(\text{s})$.
- 3 — Sans utiliser le diagramme, déterminer la pente de la frontière séparant Fe^{2+} et FeOOH(s) .
- 4 — À partir du diagramme, écrire la réaction se produisant quand une pièce de fer est laissée à l'abandon dans une solution aqueuse saturée en dioxygène et dont le pH vaut 7.

2 Cinétique de la corrosion de l'acier

Dans une étude publiée en 2016 dans la revue *Ocean Engineering*, Kim *et al.* analysent la corrosion de l'acier dans une solution aqueuse de chlorure de sodium modélisant l'eau de mer, saturée en dioxygène et de pH égal à 8,2. Afin de relever la courbe courant-potentiel d'une pièce d'acier, ils utilisent une contre électrode en platine et une électrode de référence au calomel saturée, de potentiel $E_{\text{réf}} = 0,25 \text{ V}$.

- 5 — Donner précisément le schéma du dispositif permettant d'enregistrer la courbe courant-potentiel.
- 6 — La courbe obtenue, en raisonnant en densité de courant, est représentée sur la figure III-2. Quelles sont les réactions électrochimiques se produisant sur les portions repérées par les lettres (a), (b) et (c) ?
- 7 — Estimer numériquement la surtension cathodique associée au couple H^+/H_2 .

Dans leur étude, Kim *et al.* publient différentes courbes courant-potentiel obtenues pour le même modèle, en modifiant la vitesse d'écoulement de l'eau salée autour des électrodes (figure B du document réponse). En les exploitant, ils montrent que la densité de courant de corrosion j_{corr} dépend de la vitesse d'écoulement de l'eau salée autour de l'électrode. Les résultats sont rassemblés dans le tableau 2 où seule la vitesse d'écoulement change entre les différentes mesures effectuées.

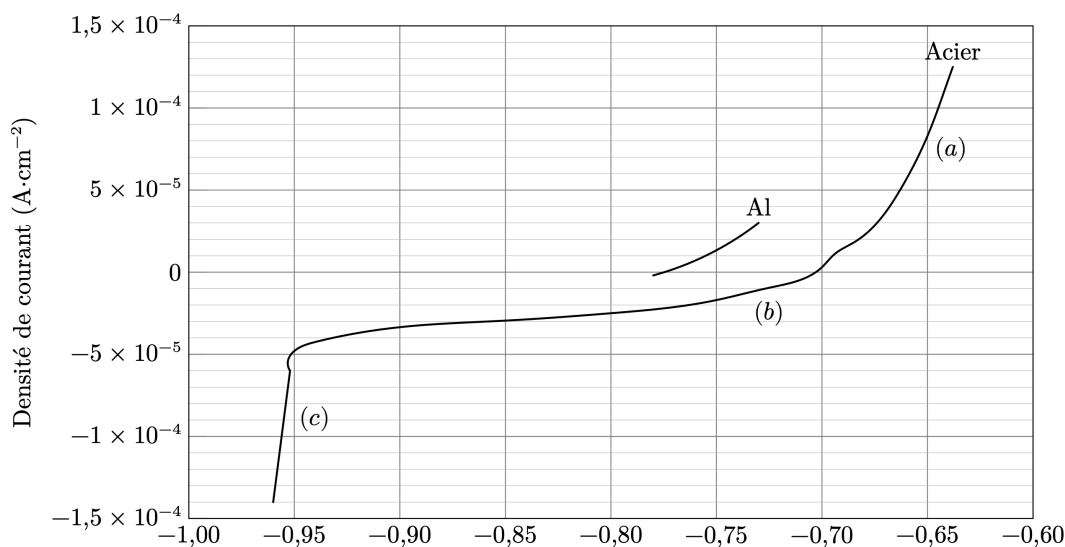


FIGURE III-2 – Courbe densité de courant-potential d’une pièce d’acier plongeant dans une solution modélisant le milieu marin et courbe densité de courant-potential anodique pour l’aluminium

vitesse d’écoulement ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	0	2	5
densité de courant de corrosion ($\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$)	$1,79 \times 10^{-5}$	$2,46 \times 10^{-4}$	$8,49 \times 10^{-4}$

TABLE 2 – Valeurs des densités de courant de corrosion en fonction de la vitesse d’écoulement du fluide autour de l’électrode

❑ 8 — Pour chacune des courbes représentées sur la figure B, entourer la partie correspondant à un phénomène de limitation du courant lié à la cinétique du transport du dioxygène dissout dans l’eau.

❑ 9 — Proposer une interprétation qualitative à l’augmentation de la densité de courant de corrosion avec la vitesse d’écoulement du fluide autour de l’électrode.

3 Protection par anode sacrificielle

Pour protéger de la corrosion la coque en acier inoxydable du Waverider, on lui associe une anode sacrificielle en aluminium. L’aluminium s’oxyde en Al^{3+} .

Pour comprendre le rôle de la pièce d’aluminium, on s’appuie sur la figure III-2 sur laquelle la courbe de densité de courant-potential anodique d’une pièce d’aluminium a été juxtaposée à celle de l’acier.

❑ 10 — Afin de décrire les phénomènes se produisant lorsque l’acier en contact avec l’aluminium est laissé à l’abandon dans un milieu marin, compléter le schéma de la figure C du document réponse en portant dans chaque cadre rectangulaire le nom d’une espèce physico-chimique.

On suppose que les pièces d’acier et d’aluminium présentent la même surface active et que les réactions électrochimiques s’y répartissent uniformément.

❑ 11 — Estimer numériquement la densité de courant de corrosion j_{corr} associée à cette situation, en $\text{A} \cdot \text{cm}^{-2}$.

Dans ces conditions, une certaine épaisseur Δe_{Al} d’aluminium est consommée pendant une durée Δt .

❑ 12 — Déterminer l’expression de $\Delta e_{\text{Al}}/\Delta t$ en fonction de j_{corr} , $\mathcal{F}$, ρ_{Al} et M_{Al} , puis calculer numériquement l’épaisseur d’aluminium consommée en une année.

❑ 13 — La sphère d’acier inoxydable présente un diamètre de 70 cm et les anodes d’aluminium une surface de l’ordre de 30 cm^2 et une épaisseur de 3 cm. Le constructeur recommande de renouveler ces anodes tous les trois ans. Confronter ces données aux résultats de la question précédente et proposer une explication aux éventuelles divergences.

Données numériques

Produit ionique de l’eau : $K_e = 1 \times 10^{-14}$; masse molaire aluminium : $M_{\text{Al}} = 27,0 \text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$; masse volumique aluminium : $\rho_{\text{Al}} = 2,72 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$; constante de Faraday $\mathcal{F} = 96500 \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1}$; $\frac{RT}{\mathcal{F}} \ln 10 = 0,06 \text{ V}$;
Potentiels standard : $E^\circ(\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}) = 1,23 \text{ V}$; $E^\circ(\text{H}^+/\text{H}_2) = 0 \text{ V}$.