

Problème n°1 :**I.3 - Récupération d'or résiduel**

L'ion aurocyanure $\text{Au}(\text{CN})_2^-$ constitue un complexe, formé du cation central Au^+ , et de deux ligands CN^- .

On s'intéresse ici à des effluents que l'on cherche à nettoyer.

Suivant le domaine d'activité, les effluents traités peuvent contenir de l'or qu'il est économiquement intéressant de récupérer avant l'acheminement vers le décanteur.

Une électrolyse sélective permet de récupérer l'or solide $\text{Au}_{(s)}$, par réduction des ions aurocyanure $\text{Au}(\text{CN})_2^-$. Le choix du potentiel de la cathode est déterminant et doit être optimisé.

On se propose d'abord de relever la courbe intensité-potentiel du couple $\text{Au}(\text{CN})_2^-/\text{Au}_{(s)}$ sur électrode de platine. On réalise alors un montage qui contient un générateur de tension réglable e , un milliampèremètre (mA), un millivoltmètre (mV) et trois électrodes :

- une électrode en platine couverte d'or, aussi dénommée électrode de travail (E.T.), qui travaille ici seulement sur sa branche cathodique. C'est cette électrode qui sera étudiée ;
- une électrode en métal inerte appelée contre électrode (C.E.), qui assure la circulation du courant ;
- une électrode de référence (E.réf.) de potentiel connu et qui doit être traversée par un courant négligeable.

- Q7.** Faire le schéma du dispositif expérimental qui permet de relever la courbe intensité-potentiel du couple $\text{Au}(\text{CN})_2^-/\text{Au}_{(s)}$ sur électrode de platine.
- Q8.** Quelle attention particulière faut-il prendre en termes d'impédance quant au choix du millivoltmètre ?
- Q9.** Préciser la demi-équation rédox qui se produit sur l'électrode de travail en mode cathodique lors de la réduction des ions aurocyanure $\text{Au}(\text{CN})_2^-$.
- Q10.** On rappelle que par convention, la flèche du courant est toujours orientée de l'électrode de travail vers la solution. Préciser le signe de ce courant algébrique lorsque l'électrode de travail fonctionne en cathode.

La **figure 3** représente une partie de la courbe intensité-potentiel du couple $\text{Au}(\text{CN})_2^-/\text{Au}_{(s)}$ sur électrode de platine.

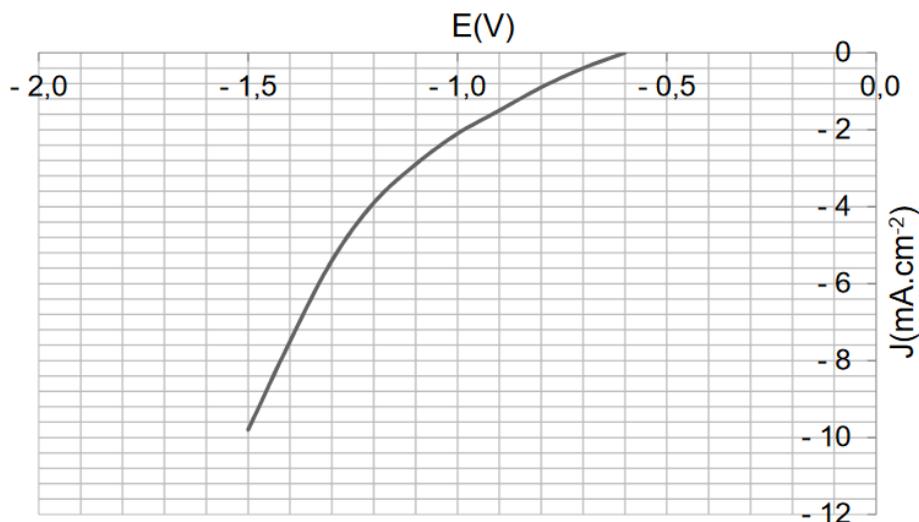


Figure 3 - Courbe intensité-potentiel du couple $\text{Au}(\text{CN})_2^-/\text{Au}_{(s)}$ sur électrode de platine

- Q11.** Le couple $\text{Au}(\text{CN})_2^-/\text{Au}_{(s)}$ sur électrode de platine correspond-il à un couple lent ou rapide ? D'un point de vue cinétique, est-il préférable de fortement baisser le potentiel de la cathode en dessous de $-0,6 \text{ V}$ ou non ? Éventuellement, quel est le risque d'imposer une valeur trop faible ?
- Q12.** L'électrolyse d'un bain est effectuée pendant une durée Δt , en maintenant le potentiel de la cathode à $-1,4 \text{ V}$. On note S la section de l'électrode de travail, et J la densité du courant qui la traverse. On considère le rendement faradique de 100%. Préciser la valeur numérique de J exprimée en $\text{A}\cdot\text{m}^{-2}$. Puis, exprimer en fonction de J , S , Δt , de la masse molaire $M(\text{Au}_{(s)})$ et de la constante F de Faraday, la masse d'or solide $m(\text{Au}_{(s)})$ récupérée.
- Q13.** Pour augmenter la masse d'or produite pendant Δt , vaut-il mieux augmenter $|J|$ ou S ? Expliquer.

Données

Potentiels standard d'oxydoréduction à 298 K :

$$E^\circ(\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}/\text{Cr}^{3+}) = 1,33 \text{ V}$$

$$E^\circ(\text{SO}_4^{2-}/\text{HSO}_3^-) = 0,17 \text{ V}$$

$$E^\circ(\text{CNO}^-/\text{CN}^-) = -0,13 \text{ V}$$

$$E^\circ(\text{Au}(\text{CN})_2^-/\text{Au}_{(s)}) = -0,6 \text{ V}$$

Problème n°2 : Capteur de niveau**FORMULAIRE D'ANALYSE VECTORIELLE****Composition d'opérateurs :**

$$\text{rot}(\text{grad } f) = \vec{0}$$

$$\text{div}(\text{rot } \vec{a}) = 0$$

$$\text{div}(\text{grad } f) = \Delta f$$

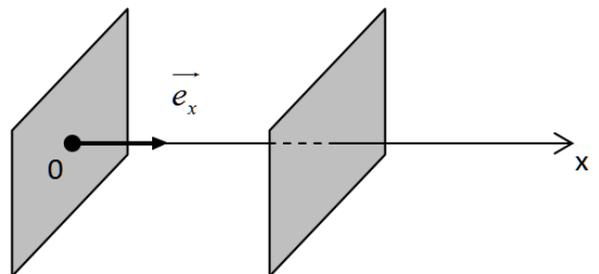
$$\text{rot}(\text{rot } \vec{a}) = \text{grad}(\text{div } \vec{a}) - \Delta \vec{a}$$

A / Champ électrostatique d'un condensateur plan

Considérons 2 plaques métalliques planes, de surface S , perpendiculaires à l'axe (Ox) , caractérisées par les abscisses respectives $x = 0$ et $x = e$ et portées respectivement aux potentiels V_1 et V_2 .

Nous supposons que les dimensions transversales de ces plaques sont assez grandes pour pouvoir négliger les effets de bord. Ainsi nous supposons que le potentiel entre les 2 plaques ne dépend que de x et s'écrit $V(x)$.

En outre, on suppose que ces 2 plaques constituent un condensateur : l'espace entre ces 2 armatures est vide et elles portent des charges électriques opposées ($Q_2 = -Q_1$ avec Q_2 charge portée par la plaque d'abscisse $x = e$).



A1. Rappel l'équation de Poisson pour le potentiel V , et la redémontrer à partir de la définition du potentiel V et de l'équation de Maxwell nécessaire.

A2. Entre les plaques, il n'y a pas de charges. Que devient l'équation de Poisson (appelée alors équation de Laplace) ?

A3. En déduire l'équation différentielle vérifiée par le potentiel $V(x)$ entre les plaques du condensateur.

A4. Résoudre cette équation différentielle en utilisant les potentiels V_1 et V_2 et la distance e .

A5. En déduire une première expression du champ électrostatique \vec{E} entre les 2 plaques à l'aide de V_1 , V_2 et e . Quelles sont les propriétés de ce champ ? Quelle est l'allure des lignes de champ en supposant $V_1 > V_2$?

A6. Le champ étant nul à l'extérieur, établir une deuxième expression du champ électrostatique \vec{E} entre les 2 plaques en fonction de Q_1 , S et ϵ_0 où ϵ_0 est la permittivité du vide.

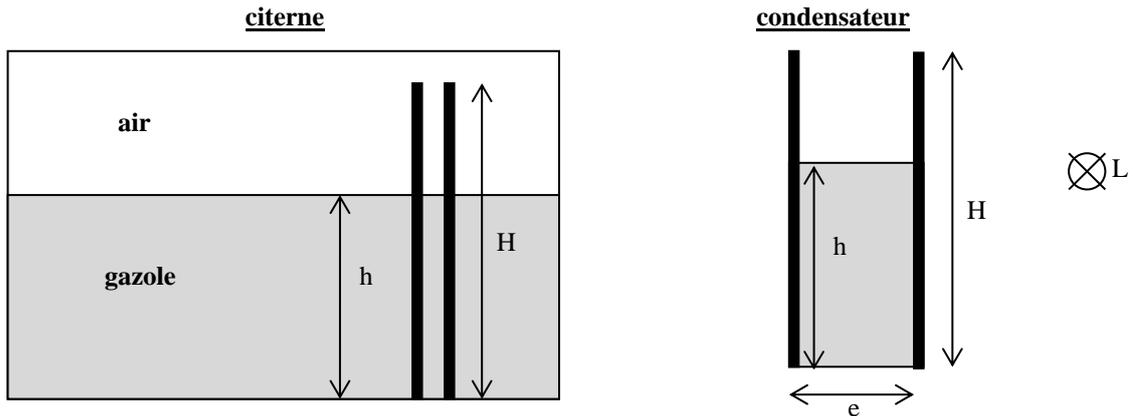
A7. En déduire l'expression de la capacité C_0 du condensateur plan à l'aide de e , S et ϵ_0 .

B / Capacité du capteur

On souhaite mesurer la hauteur h de gazole dans une citerne à l'aide d'un capteur capacitif. Ce dernier peut être assimilé à un condensateur plan de capacité $C(h)$, fonction de h et constitué de 2 armatures rectangulaires en cuivre de hauteur H , de largeur L et distantes de e .

H correspond également à la hauteur maximale de gazole dans la citerne.

L'espace entre les armatures est rempli en partie de gazole sur une hauteur h et en partie d'air.



On admet que la capacité d'un condensateur plan rempli d'un isolant de permittivité relative ϵ_r vaut $C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_r S}{e}$

B1. Montrer que l'association en parallèle de deux condensateurs de capacités C_1 et C_2 est équivalente à un seul condensateur de capacité $C_{eq} = C_1 + C_2$.

B2. En déduire l'expression de $C(h)$ en fonction de h, H, L, e, ϵ_r (permittivité relative du gazole) et ϵ_0 .

B3. Vérifier que $C(h)$ peut s'écrire numériquement suivant la formule suivante :

$$C(h) = 118.(1,00 + 4,00.h) \text{ avec } C(h) \text{ en pF et } h \text{ en m}$$

Calculer les valeurs C_{min} et C_{max} de $C(h)$ quand la citerne est respectivement vide et pleine.

DONNEES NUMÉRIQUES

Permittivité du vide :	$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F.m}^{-1}$
Permittivité relative du gazole :	$\epsilon_r = 5,00$
Hauteur du capteur capacitif :	$H = 1,00 \text{ m}$
Largeur du capteur capacitif :	$L = 4,00 \text{ cm}$
Distance entre les armatures :	$e = 3,00 \text{ mm}$

Problème n°3 : Ligne coaxiale

Pour les applications numériques, on prendra : $C_1 = 0,934 \text{ pF.cm}^{-1}$, $L_1 = 0,231 \text{ μH.m}^{-1}$.

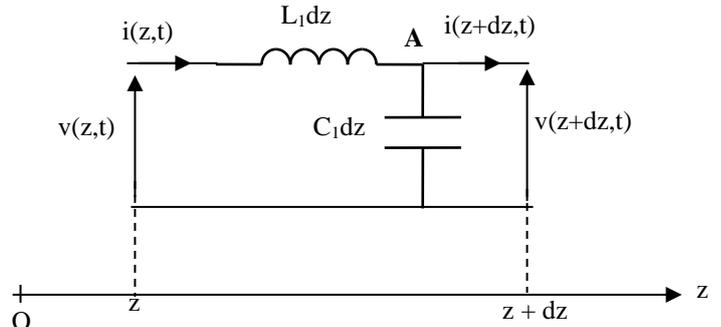
Propagation des signaux dans une ligne sans perte

Pour tenir compte des phénomènes de propagation dans un câble coaxial, on modélise une portion du câble de longueur élémentaire dz par le circuit suivant (modèle de la ligne sans perte) :

L_1 correspond à l'inductance propre par unité de longueur de la ligne.

C_1 correspond à la capacité par unité de longueur de la ligne.

Dans toute la suite, on suppose que les fonctions $v(z,t)$ et $i(z,t)$ sont, sur le plan mathématique, de classe C^2 .



A) Equation de propagation

- 1- Dédire de la loi des nœuds au point **A** une première équation aux dérivées partielles reliant $v(z,t)$, $i(z,t)$ et C_1 .
- 2- En appliquant la loi des mailles, montrer que $v(z,t)$ et $i(z,t)$ vérifient une autre équation aux dérivées partielles reliant $v(z,t)$, $i(z,t)$ et L_1 .
- 3- Montrer que $v(z,t)$ et $i(z,t)$ vérifient une équation de d'Alembert : $\frac{\partial^2 f}{\partial z^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 f}{\partial t^2}$, la notation c désignant la vitesse de propagation des signaux dans cette ligne, et préciser l'expression de cette vitesse c de propagation, en fonction de L_1 et C_1 . Calculer sa valeur numérique.
- 4- Vérifier l'homogénéité de ce dernier résultat.

On admet que les solutions générales de l'équation de propagation peuvent s'écrire :

$$\begin{cases} v(z, t) = v_a \left(t - \frac{z}{c} \right) + v_b \left(t + \frac{z}{c} \right) \\ i(z, t) = i_a \left(t - \frac{z}{c} \right) + i_b \left(t + \frac{z}{c} \right) \end{cases}$$

- 5- Quelle est la signification physique de ces solutions ?

6- On se place dans le cas où $\begin{cases} v(z, t) = v_a \left(t - \frac{z}{c} \right) \\ i(z, t) = i_a \left(t - \frac{z}{c} \right) \end{cases}$. On pose : $u = t - \frac{z}{c}$.

En utilisant l'équation aux dérivées partielles donnée à la question 2, montrer l'existence d'une quantité R_c , fonction de L_1 et de c , telle que : $v_a \left(t - \frac{z}{c} \right) = R_c i_a \left(t - \frac{z}{c} \right) + V_{a0}$, V_{a0} étant une constante qu'on ne demande pas de déterminer.

- 7- Etablir de la même façon, et en posant $w = t + \frac{z}{c}$, que $v_b \left(t + \frac{z}{c} \right) = -R_c i_b \left(t + \frac{z}{c} \right) + V_{b0}$ (attention au signe devant R_c !), V_{b0} étant une constante qu'on ne demande pas de déterminer.

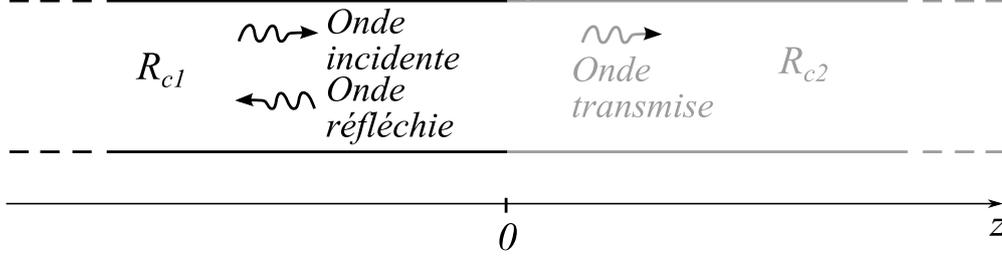
- 8- R_c est appelée résistance caractéristique du câble coaxial. Exprimer R_c en fonction de L_1 et de C_1 . Calculer la valeur numérique de R_c .

Dans toute la suite du problème, on suppose que les constantes V_{a0} et V_{b0} sont nulles.

B) Raccordement entre deux lignes.

On considère un tronçon de ligne bifilaire, d'impédance caractéristique R_{c1} , s'étendant de $z = -\infty$ à $z = 0$, et un second tronçon de ligne bifilaire, d'impédance caractéristique R_{c2} , s'étendant de $z = 0$ à $z = \infty$. Les deux fils des deux tronçons sont raccordés en $z = 0$ comme le montre la figure ci-dessous.

La célérité des ondes est c_1 dans le tronçon de gauche, et c_2 dans le tronçon de droite.



B.1. Une onde plane progressive harmonique qualifiée d'incidente se propage dans le tronçon $z < 0$ dans le sens des z croissants. On note $v_i(z, t) = A_i e^{j(\omega t - k_1 z)}$ la composante de type tension de cette onde.

- 9- Écrire la relation de dispersion pour cette onde dans le tronçon $z < 0$.
- 10- Exprimer le nombre d'onde k_1 . En quelle unité S.I. s'exprime un nombre d'onde ?
- 11- Quelle est l'expression de la composante de type courant $i_i(z, t)$ de cette onde incidente ?

12- Montrer que si les célérités sont différentes ($c_1 \neq c_2$), cette onde incidente ne peut pas se propager dans le tronçon de droite.

On admet qu'il existe, en plus de l'onde incidente, une onde transmise.

- 13- Montrer que cette onde transmise est aussi harmonique et de même pulsation que l'onde incidente.
- 14- Écrire les formes que doivent avoir la tension $v_t(z, t)$ et le courant $i_t(z, t)$ de l'onde transmise.
- 15- Quelles sont les deux conditions de raccordement que l'on doit avoir en $z = 0$?
- 16- Montrer que si $R_{c2} \neq R_{c1}$, il est impossible d'avoir dans le tronçon de gauche uniquement l'onde incidente et dans celui de droite uniquement l'onde transmise.
- 17- On admet qu'il existe, en plus, une onde réfléchie. Écrire les formes que doivent avoir la tension $v_r(z, t)$ et le courant $i_r(z, t)$ de cette onde réfléchie.

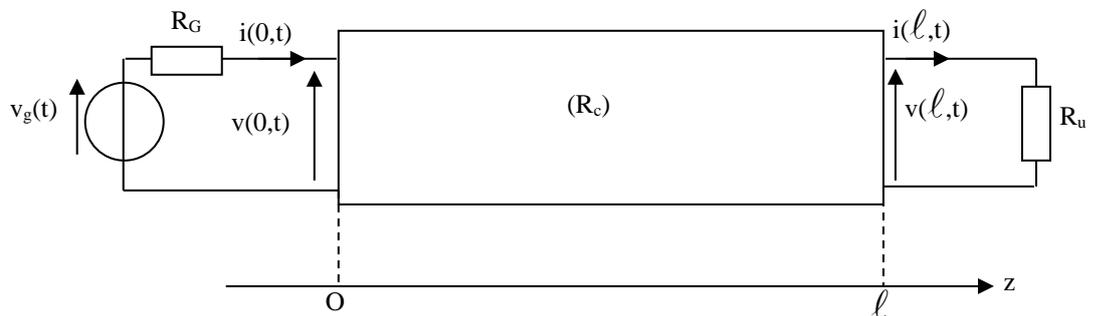
18- Déterminer, en $z = 0$, le coefficient de réflexion pour la tension $\underline{r} = \frac{v_r(0,t)}{v_i(0,t)}$ et le coefficient de transmission pour la tension $\underline{\tau} = \frac{v_t(0,t)}{v_i(0,t)}$.

19- L'onde de tension transmise en $z = 0$ est-elle déphasée par rapport à l'onde incidente en $z = 0$? Si oui, de combien ? Mêmes questions pour les ondes de tension réfléchie et incidente.

20- Pour une onde de tension incidente plane progressive non harmonique, quel serait le coefficient de transmission en $z = 0$? Tracer son évolution en fonction de $\frac{R_{c1}}{R_{c2}}$.

B.2. Ligne en régime impulsionnel

La ligne est « chargée » en $z = \ell$ par une résistance R_u . La fém $v_g(t)$ fournie par le générateur est un échelon de tension d'amplitude E .

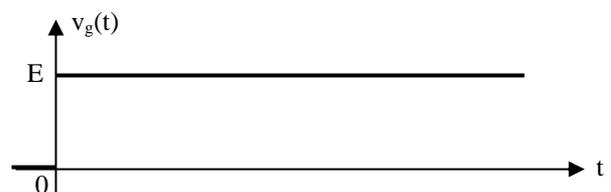


La résistance interne du générateur est réglée de telle sorte que $R_G = R_c$: la ligne est adaptée côté générateur.

On note $v_+(z,t) = v_a(t-z/c)$, et $v_-(z,t) = v_b(t+z/c)$.

On admet que le rapport $\Gamma = \frac{v_-(\ell, t)}{v_+(\ell, t)} = \frac{v_b(t + \ell/c)}{v_a(t - \ell/c)}$

est donné par : $\Gamma = \frac{R_u - R_c}{R_u + R_c}$.



21- Que représente le coefficient Γ ?

22- Etablir une relation entre la fém $v_g(t)$, R_G (égale à R_c), les tension $v(z=0,t)$ et intensité $i(z=0,t)$ à l'entrée de la ligne.

23- La tension $v_g(t)$ étant nulle pour tout $t < 0$, il n'existe pas d'onde réfléchie en $z=0$ avant un certain instant $t=t_1$, marquant l'arrivée en $z=0$ du front de l'onde réfléchie. Exprimer t_1 en fonction de ℓ et c .

Problème n°4 : Ondes acoustiques dans un fluide parfait

Le fluide est supposé parfait, son mouvement est décrit sans prendre en compte les effets de viscosité et les échanges thermiques à l'intérieur du fluide. Les détentes et compressions locales du fluide sont isentropiques ; $V(P)$ étant le volume du fluide et P sa pression, le coefficient de compressibilité isentropique, constant pour le fluide, s'écrit :

$$\chi_S = -\frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial P} \right)_S.$$

Les effets de pesanteur ne sont pas pris en compte.

Un tuyau cylindrique horizontal infini de section S_0 constante et d'axe $x'x$ (figure 1) contient un fluide parfait compressible qui, au repos, possède une masse volumique μ_0 et se trouve à la pression P_0 et à la température T_0 . Ces grandeurs sont uniformes dans l'espace.

L'équilibre est perturbé par le passage d'une onde acoustique plane qui se propage dans le cylindre suivant la direction Ox . La perturbation unidirectionnelle ne dépend ainsi que de l'abscisse x le long du « tuyau sonore » et du temps t . Dans le milieu perturbé, $u(x,t)$ représente le déplacement à l'instant t du fluide situé au repos à l'abscisse x .

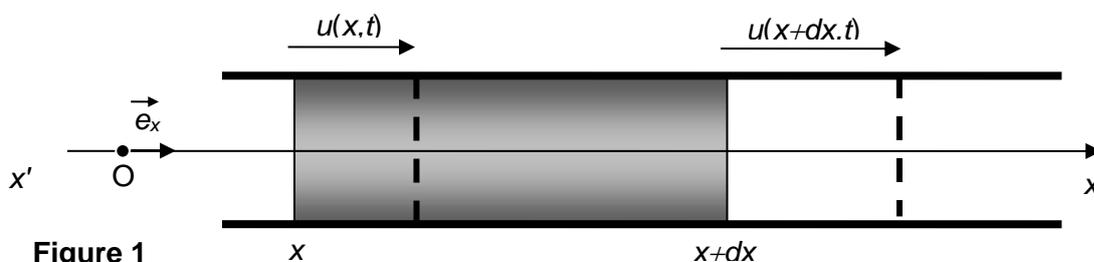


Figure 1

Les champs de pression et de masse volumique dans le fluide dépendent du temps et de l'espace ; ils peuvent s'écrire sous la forme :

$$\begin{aligned} P(x,t) &= P_0 + p(x,t) & |p(x,t)| &\ll P_0 \\ \mu(x,t) &= \mu_0 + \mu_1(x,t) & |\mu_1(x,t)| &\ll \mu_0 \end{aligned}$$

La vitesse acoustique, ou vitesse vibratoire en un point d'abscisse x , est liée au déplacement du fluide et définie par :

$$\vec{v}(x,t) = \frac{\partial u(x,t)}{\partial t} \vec{e}_x.$$

L'étude est effectuée dans le cadre de « l'approximation acoustique » limitée aux mouvements de faible amplitude : le déplacement $u(x,t)$, la vitesse acoustique $v(x,t)$, la pression acoustique (ou surpression) $p(x,t)$ et la variation de masse volumique du fluide $\mu_1(x,t)$ ainsi que leurs dérivées sont des infiniment petits du premier ordre.

A / CÉLÉRITÉ DU SON

La linéarisation consiste à ne garder dans les équations que les termes d'ordre un en p , v et μ_1 .

A1. En appliquant le principe fondamental de la dynamique à la tranche de fluide de volume $S_0 dx$ subissant la perturbation, établir à l'ordre un l'équation aux dérivées partielles suivante : $\frac{\partial p}{\partial x} = -\mu_0 \frac{\partial v}{\partial t}$.

A2. Exprimer l'accroissement relatif δ du volume de la tranche de fluide $S_0 dx$ entre l'état de repos et l'état perturbé. En déduire que la surpression correspondante est : $p(x,t) = -\frac{1}{\chi_S} \frac{\partial u}{\partial x}$ puis exprimer sa dérivée par rapport au

temps $\frac{\partial p(x,t)}{\partial t}$ à l'aide de χ_S et d'une dérivée partielle de v .

A3. Etablir l'équation de propagation relative à la surpression $p(x,t)$: $\frac{\partial^2 p(x,t)}{\partial x^2} = \frac{1}{C^2} \frac{\partial^2 p(x,t)}{\partial t^2}$.

Donner l'expression de la célérité C de l'onde acoustique le long de Ox en fonction de χ_S et μ_0 .

A4. Le fluide est de l'air assimilé à un gaz parfait à la température $T_0 = 293 \text{ K}$. Après avoir déterminé χ_S en fonction du rapport γ des capacités thermiques molaires du gaz et de la pression P_0 , établir l'expression de C en fonction de T_0 , du rapport γ , de la masse molaire M du fluide et de la constante R des gaz parfaits.

❖ Dans ces conditions, la célérité du son dans l'air est $C_{\text{air}} = 340 \text{ m.s}^{-1}$.

A6. Comparer la célérité dans l'air C_{air} à la célérité C_{eau} du son dans l'eau dont le coefficient de compressibilité isentropique est $\chi_S = 5,0 \cdot 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}$ et la masse volumique $\mu_0 = 1,0 \cdot 10^3 \text{ kg.m}^{-3}$.

B / IMPÉDANCES EN ACOUSTIQUE

Une onde plane progressive harmonique acoustique se propage dans le sens des x croissants au sein d'une conduite de section constante S_0 .

➤ L'impédance caractéristique Z du fluide où se propage l'onde, est définie par le rapport de la pression acoustique sur la vitesse acoustique suivant : $Z = \frac{p(x,t)}{v(x,t)}$.

B1. Montrer que l'impédance caractéristique du fluide est une constante Z_c à préciser en fonction de μ_0 et C . Donner son unité dans le Système International.

La relation $p(x,t) = Z v(x,t)$ est-elle encore valable pour une onde non harmonique ? expliquer.

Calculer Z_{air} dans le cas de l'air à 20°C , sa masse volumique étant $\mu_{\text{air}} = 1,3 \text{ kg.m}^{-3}$.

B2. Comparer, sans préciser les valeurs numériques, les impédances caractéristiques d'un gaz, et d'un liquide.

B3. Etablir le lien entre la surpression et la vitesse pour une onde plane progressive se propageant dans le sens des x décroissants.

➤ L'impédance acoustique Z_a de la conduite est définie par le rapport de la pression acoustique sur le débit volumique du fluide. Pour un tuyau de section constante S_0 , elle s'écrit, pour une onde se propageant selon x croissant : $Z_a = \frac{p(x,t)}{S_0 v(x,t)}$.

B4. Justifier à l'aide d'une analogie électrocinétique ce terme « impédance » adopté pour caractériser la propagation du son dans la conduite. Donner l'expression de l'impédance acoustique Z_a d'un tuyau sonore cylindrique, en fonction de sa section S_0 , de la masse volumique μ_0 du fluide qu'il contient et de la vitesse C du son dans le fluide.

C / INTENSITÉ SONORE

La puissance sonore instantanée $P(x,t)$ transportée par l'onde plane progressive à travers une surface $\vec{S} = S \vec{e}_x$ orthogonale à la direction de propagation \vec{e}_x , est définie par : $P(x,t) = \vec{\pi}(x,t) \cdot \vec{S}$, où $\vec{\pi}(x,t)$ est le vecteur densité volumique de courant d'énergie ou puissance surfacique transportée : $\vec{\pi}(x,t) = p(x,t) \vec{v}(x,t)$.

L'intensité $I(x)$ de l'onde sonore est, par définition, la valeur de la puissance moyenne temporelle transférée par l'onde sonore à travers une surface unité d'abscisse x perpendiculaire à sa direction de propagation Ox : $I(x) = \langle \pi \rangle$, avec $\pi = |\vec{\pi}|$

► Si $a(M,t)$ et $b(M,t)$ sont deux fonctions sinusoïdales de même pulsation, \underline{a} et \underline{b} leurs représentations complexes associées, alors la valeur moyenne temporelle, notée $\langle \underline{a} \cdot \underline{b} \rangle$, du produit $a(M,t) \cdot b(M,t)$, est obtenue par la relation :

$$\langle \underline{a} \cdot \underline{b} \rangle = \frac{1}{2} \Re \left[\underline{a} \underline{b}^* \right] = \frac{1}{2} \Re \left[\underline{a}^* \underline{b} \right], \text{ le symbole } * \text{ représente le complexe conjugué.}$$

$$\text{et en particulier } \langle \underline{a}^2 \rangle = \frac{1}{2} |\underline{a}|^2. \quad |\underline{a}| = \sqrt{\underline{a} \underline{a}^*} \text{ est le module de la grandeur complexe } \underline{a}.$$

Le domaine de fréquences accessibles à l'oreille humaine s'étend de 20 Hz à environ 20 kHz . A une fréquence de 1 kHz , l'oreille est capable de percevoir un son dont la densité de courant énergétique vaut $10^{-12} \text{ W.m}^{-2}$ et la perception devient douloureuse à 1 W.m^{-2} . Vu l'énorme différence d'ordre de grandeur entre ces valeurs extrêmes, une échelle logarithmique s'impose. Le seuil de perception $I_0 = 10^{-12} \text{ W.m}^{-2}$ est pris comme référence et, à une densité de courant énergétique I (en W.m^{-2}), est associée une intensité sonore en décibel définie par : $I_{dB} = 10 \log \left(\frac{I}{I_0} \right)$.

L'émetteur, en $x = 0$, génère une vibration sinusoïdale de pulsation ω de la forme :

$$u(0,t) = U_m \cos(\omega t).$$

U_m représente l'amplitude du déplacement. L'onde plane progressive qui se propage le long du tuyau supposé infini selon la direction Ox est représentée par :

- en notation réelle :
$$u(x, t) = U_m \cos(\omega t - kx),$$
- en notation complexe :
$$\underline{u}(x, t) = U_m \exp[j(\omega t - kx)].$$

- C1.** Déterminer le nombre d'onde k en fonction de ω et de la célérité C de l'onde. Que représente-t-il ? Déterminer P_m et V_m , les valeurs maximales de $p(x, t)$ et $v(x, t)$, en fonction de ω , μ_0 , C et de l'amplitude U_m .
- C2.** Quelle est l'expression de l'intensité acoustique $I = \langle \pi \rangle$ pour l'onde plane progressive harmonique en fonction de P_m et de l'impédance caractéristique du fluide Z ?
- C3.** Exprimer la puissance moyenne $\langle P \rangle$ transportée à travers une conduite de section constante S_0 , en fonction de P_m et de l'impédance acoustique de la conduite Z_a .
- C4.** L'onde sonore de fréquence 1 kHz se propage dans l'air d'impédance caractéristique Z_{air} . Le tableau suivant donne, au seuil de perception et au seuil de douleur, les ordres de grandeur des intensités I_{dB} en décibel, ainsi que les pression, vitesse et amplitude maximales des vibrations notées respectivement P_m , V_m et U_m :

	I (en W.m^{-2})	I (en dB)	P_m (en Pa)	V_m (en m.s^{-1})	U_m (en m)
seuil de perception	$1,0 \cdot 10^{-12}$	0	$3 \cdot 10^{-5}$	$0,70 \cdot 10^{-7}$	$1,0 \cdot 10^{-11}$
seuil de douleur	1,0	120	30	$0,70 \cdot 10^{-1}$	$1,0 \cdot 10^{-5}$

Justifier « l'approximation acoustique ».
