

Exam - BA5 - Electroacoustique

Hervé Lissek

Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne

26 janvier 2024 / 15h15 - 18h15 / DIA 004

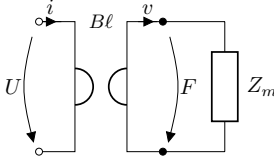
Notes préliminaires : Rédigez vos réponses au stylo à encre (pas de crayon papier) directement sur les feuilles d'énoncé (inscrivez vos nom et prénom dans l'en-tête de chaque page impaire).

Vous avez droit à tous les documents écrits (livres, notes de cours, exercices et corrigés, etc.). Les calculatrices sont également autorisées (et recommandées). Seuls les moyens de communication (ordinateurs portables, tablettes, smartphones, etc.) doivent rester éteints durant tout l'examen.

Dans les exercices suivants, les valeurs suivantes de la masse volumique ρ_{air} , de la célérité du son c_{air} et du coefficient de viscosité dynamique η_{air} de l'air seront considérées :

Données numériques : $\rho_{air} = 1.2 \text{ kg.m}^{-3}$, $c_{air} = 340 \text{ m.s}^{-1}$, $\eta_{air} = 1.810.10^{-5} \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$.

Questions (1 point)

Q1 (0.2 pt)	Quelle affirmation est correcte ? ☐ L'impédance caractéristique de l'air est plus petite que celle de l'eau. ☐ L'impédance caractéristique de l'air est égale à celle de l'eau. ☐ L'impédance caractéristique de l'air est plus grande que celle de l'eau.
Q2 (0.2 pt)	Quelle est la limite supérieure de la bande de tiers d'octave centrée à 160 Hz ? ☐ 170 Hz ☐ 180 Hz ☐ 200 Hz
Q3 (0.2 pt)	Quelle note peut-on jouer avec un Boomwhacker de longueur $L = 36.5\text{cm}$ et de diamètre $\varnothing = 7\text{cm}$, fermé à une extrémité ? ☐ 220 Hz (La2 ou A3) ☐ 440 Hz (La3 ou A4) ☐ 660 Hz (La4 ou A5)
Q4 (0.2 pt)	Quelle est l'impédance ramenée électrique $Z_e = \frac{U}{i}$ du moteur électrodynamique suivant ?  ☐ $Z_e = (Bl)^2 Z_m$ ☐ $Z_e = \frac{1}{(Bl)^2 Z_m}$ ☐ $Z_e = \frac{(Bl)^2}{Z_m}$
Q5 (0.2 pt)	Quelle est la résistance acoustique d'un réseau (faisceau) de 1000 tubes capillaires cylindriques de rayon 0.7mm et de longueur 5 cm ? ☐ 9.6 kPa.s/m ☐ 9.6 MPa.s/m ☐ 9.6 GPa.s/m

Exercice 1 : Capteur d'impédance (3 points)

Nous considérons le dispositif de la Figure 1. Ce dispositif cylindrique est constitué de deux conduits remplis d'air, désignés (1) et (2), séparés par un haut-parleur, considéré comme un piston rigide d'épaisseur nulle et de paramètres de Thiele-Small (R_{ms}, M_{ms}, C_{ms}), agissant comme une source de **débit volumique** q_0 , qui dépend de la fréquence angulaire ω . Le conduit arrière (de longueur l_1 et de rayon r_1) est fermé par une paroi rigide, alors que le conduit avant (de longueur l_2 et de rayon $r_2 = r_1$) est fixé à un porte-échantillon (un matériau acoustique ou tout autre système acoustique). Nous voulons déterminer l'impédance acoustique Z_{mat} de l'échantillon présenté sur la face avant du dispositif.

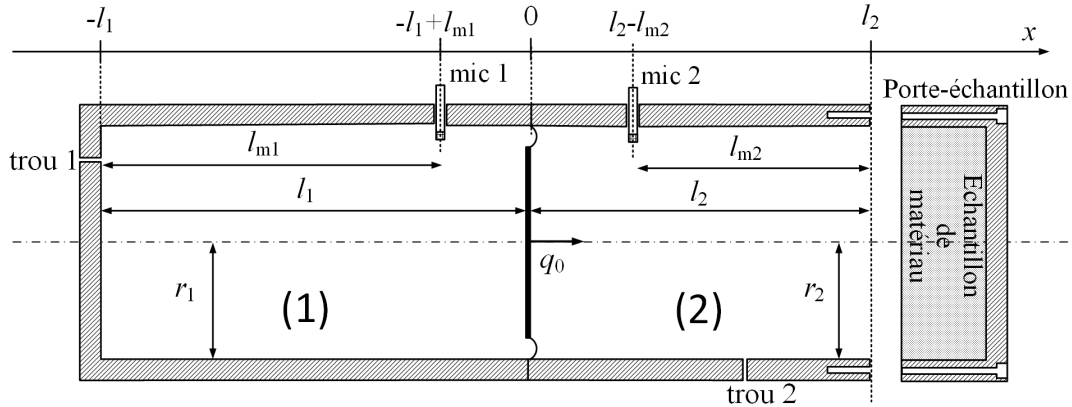


FIGURE 1 – Capteur d'impédance

Dans ce qui suit, nous supposons que les longueurs d'ondes acoustiques sont très grandes devant les rayons r_1 et r_2 des deux cavités, mais pas nécessairement devant leurs longueurs l_1 et l_2 .

1. Questions générales

1.1 A quoi servent les deux petits trous (désignés par "trou 1" et "trou 2") de la Figure 1 ?

1.2 Quelle est la nature des ondes acoustiques se propageant dans les deux conduits du dispositif ?

1.3 Rappeler l'expression des solutions générales de l'équation des ondes acoustiques (c'est à dire la pression $p_i(x, t)$ et le débit volumique $q_i(x, t)$ ($i \in (1, 2)$)) dans un conduit (i). On définira les impédances **acoustiques** caractéristiques $Z_{ci} = \frac{\rho_{air} c_{air}}{\pi r_i^2}$ dans chaque domaine (i).

Nom et Prénom:

Dans la suite, nous ne nous intéressons qu'aux variations spatiales $P_i(x)$ et $Q_i(x)$.

2. Conduit 1

2.1 Quelles sont les conditions aux limites en $x = -l_1$ et $x = 0^-$?

2.2 Déterminez la **solution exacte** de la pression acoustique $P_1(x)$ dans la cavité (1) en fonction du débit volumique q_0 , de l'impédance acoustique caractéristique Z_{c1} , de l_1 et du nombre d'onde k .

2.3 Quelle est la pression acoustique P_{m1} mesurée par le microphone 1 ?

3. Conduit 2 fermé par le porte-échantillon

Le porte-échantillon est fixé sur le dispositif, présentant désormais un matériau d'impédance **acoustique** Z_{mat} en $x = l_2$.

3.1 Quelles sont les conditions aux limites en $x = 0^+$ et $x = l_2$?

3.2 Quelle est la pression acoustique P_{m2} mesurée par le microphone 2 ?

Nom et Prénom:

On désigne $H_{21} = \frac{P_{m2}}{P_{m1}}$ la fonction de transfert entre les pressions mesurées par le microphone 1 et le microphone 2.

- 3.3 Montrez que $H_{21} = \frac{Z_{c2} Z_{mat} \sin(k.l_1) \cdot \cos(k.l_{m2}) + jZ_{c2} \sin(k.l_1) \sin(k.l_{m2})}{Z_{c1} jZ_{c2} \cos(k.l_2) \cos(k.l_{m1}) - Z_{mat} \sin(k.l_2) \cos(k.l_{m1})}$.
A quoi peut servir ce dispositif ?

4. Approximation aux basses fréquences

4.1 Que devient l'expression de H_{21} aux basses fréquences ($k.l_i \ll 1$ et $k.l_{mi} \ll 1$) ? On supposera également que Z_{mat} est du même ordre de grandeur que Z_{c2} ($\frac{Z_{mat}}{Z_{c2}} \approx 1$).

4.2 Toujours dans l'approximation basses fréquences, dessinez le schéma acoustique du dispositif de la Figure 1. Donner l'expression de la compliance acoustique C_{a1} de la cavité arrière. Retrouvez-vous le résultat de la question précédente ?

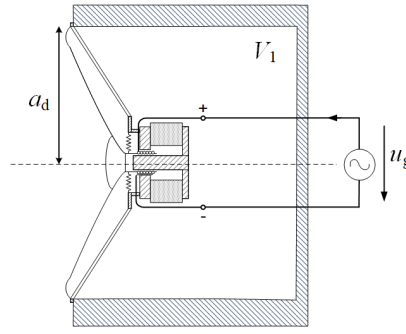


FIGURE 2 – Haut-parleur sur enceinte close

Exercice 2 : Enceinte électroacoustique (2 points)

Un système haut-parleur est constitué d'un haut-parleur de paramètres de Thiele-Small connus (électriques : R_e, L_e ; facteur de force $B\ell$; mécaniques : R_{ms}, C_{ms}, M_{ms} ; surface effective $S_d = \pi a_d^2$), chargé à l'arrière par une enceinte cylindrique close de volume V_1 , de même rayon a_d que le haut-parleur (voir Figure 2). Le haut-parleur est alimenté par une source de tension idéale u_g (d'impédance de sortie $R_g = 0$). Dans la suite, nous nous placerons aux basses fréquences (dimensions petites devant la longueur d'onde), et négligerons également l'inductance électrique de la bobine L_e .

Nous supposons enfin que ce système rayonne dans un angle solide de 4π steradians ("full-space").

1. a) Dessinez le schéma acoustique équivalent de ce système haut-parleur, en tenant compte de l'égalité entre les rayons de la membrane et de la cavité arrière.
- b) Rappelez les définitions de chaque composant acoustique du schéma acoustique équivalent, y compris la fréquence (angulaire) de résonance ω_c et les facteurs de qualité électrique Q_{ec} , mécanique Q_{mc} et total Q_{tc} .
- c) Rappelez enfin l'expression de la pression acoustique rayonnée à 1m de la membrane $p_c(r = 1\text{m})$ (supposé dans le champ lointain).

Ce système haut-parleur est modifié de manière à ce que la face avant débouche sur un deuxième volume cylindrique V_2 (de même rayon a_d que le haut-parleur), ouvert vers l'extérieur par l'intermédiaire d'un évent de rayon $a_p \ll a_d$ et de longueur l_p .

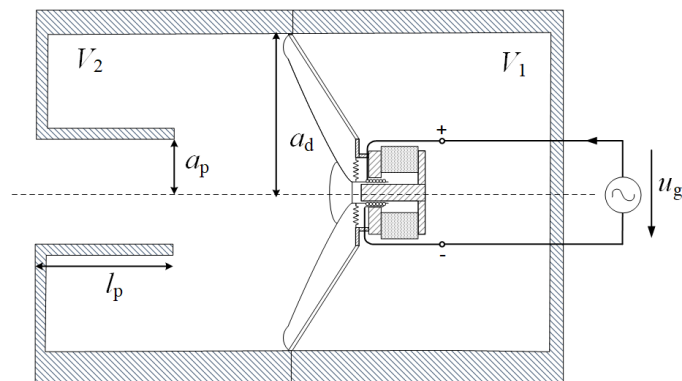


FIGURE 3 – Enceinte électroacoustique

2. Quelle est l'expression de l'impédance acoustique de rayonnement (parties réelle et imaginaire) devant l'ouverture de l'évent, dans l'hypothèse "full-space"? En négligeant toutes les résistances dans l'évent (et de rayonnement), quelle est l'expression de l'impédance acoustique totale de l'évent m'_{ap} ?

Nom et Prénom:

Dans ce qui suit, on supposera que les résistances dans l'évent sont négligeables.

3. Dessinez le schéma acoustique équivalent du système haut-parleur de la Figure 3. Définissez tous les nouveaux composants acoustiques ajoutés par la nouvelle charge avant, ainsi que la **fréquence de résonance** ω_p du résonateur de Helmholtz constitué du volume V_2 et de l'évent.

4. Montrez que le débit volumique dans l'évent est de la forme

$$q_p = q_{c,0} \frac{\frac{j\omega}{\omega_c}}{\left(\frac{j\omega}{\omega_c}\right)^4 \cdot \frac{\omega_c^2}{\omega_p^2} + \frac{1}{Q_{tc}} \left(\frac{j\omega}{\omega_c}\right)^3 \cdot \frac{\omega_c^2}{\omega_p^2} + \left(\frac{j\omega}{\omega_c}\right)^2 \left(\frac{\omega_c^2}{\omega_p^2} + 1 + \frac{m'_{ap}}{M_{as}}\right) + \frac{1}{Q_{tc}} \frac{j\omega}{\omega_c} + 1}, \text{ avec } q_{c,0} \text{ un débit de référence (à définir).}$$

Déduisez-en celle de la pression rayonnée à 1m de l'évent $p_p(r = 1\text{m})$ (supposé dans le champ lointain).

Quelle est la fonction de ce système haut-parleur ?