

## Exam - BA5 - Electroacoustique

Hervé Lissek  
Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne

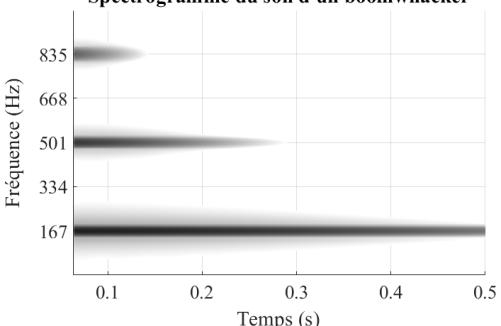
24 janvier 2025 / 9h15 - 12h15 / INM 202

**Notes préliminaires :** Rédigez vos réponses au stylo à encre (pas de crayon papier) directement sur les feuilles d'énoncé (inscrivez votre 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. Prenez le temps de bien lire l'ensemble des énoncés avant de commencer à répondre.

Dans les exercices suivants, les valeurs suivantes de la masse volumique  $\rho_{air}$ , de la vitesse du son  $c_{air}$  et du coefficient de viscosité dynamique  $\eta_{air}$  de l'air seront considérées :

**Données numériques :**  $\rho_{air} = 1.2 \text{ kg.m}^{-3}$ ,  $c_{air} = 343 \text{ m.s}^{-1}$ ,  $\eta_{air} = 1.810.10^{-5} \text{ kg.m}^{-1}.s^{-1}$ .

### Questions (1 point) - utilisez le verso pour justifier les réponses Q2 à Q5

Q1 (0.2 pt)	Où se situent les cellules ciliées les plus sensibles à 100 Hz ? <input type="checkbox"/> à la base de la cochlée <input type="checkbox"/> au centre de la cochlée <input type="checkbox"/> à l'apex de la cochlée
Q2 (0.2 pt)	Laquelle de ces propositions qualifie le mieux l'intervalle fréquentiel [100Hz - 500Hz] ? <input type="checkbox"/> 7 tiers-d'octave <input type="checkbox"/> 2 octaves <input type="checkbox"/> 2,5 octaves
Q3 (0.2 pt)	La fréquence de résonance d'une bouteille vide de volume inconnu est $f_1 = 270 \text{ Hz}$ . Lorsqu'on verse 20 cl d'eau dans la bouteille, on mesure une nouvelle fréquence de résonance $f_2 = 430 \text{ Hz}$ . Quel est le volume (à vide) de la bouteille ? <input type="checkbox"/> 20 cl <input type="checkbox"/> 25 cl <input type="checkbox"/> 33 cl
Q4 (0.2 pt)	On mesure le niveau de pression acoustique $L_p(2m) = 84 \text{ dB}$ (re. $20 \mu\text{Pa}$ ) généré à 2 m d'un haut-parleur, en salle anéchoïque. Quel est le niveau à une distance de 5 m du haut-parleur ? <input type="checkbox"/> 70 dB (re. $20 \mu\text{Pa}$ ) <input type="checkbox"/> 76 dB (re. $20 \mu\text{Pa}$ ) <input type="checkbox"/> 82 dB (re. $20 \mu\text{Pa}$ )
Q5 (0.2 pt)	On mesure le spectrogramme d'un boomwhacker, qui présente des fréquences de résonance à 167 Hz, 334 Hz, 501 Hz et 835 Hz. Quelle est approximativement la longueur du boomwhacker ? <p style="text-align: center;"><b>Spectrogramme du son d'un boomwhacker</b></p>  <p style="text-align: right;"> <input type="checkbox"/> 25 cm  <input type="checkbox"/> 50 cm  <input type="checkbox"/> 100 cm     </p>



## Exercice 1 : (3 points)

Nous disposons d'un haut-parleur dont nous cherchons à calculer les paramètres en petits signaux. A ce stade, le seul paramètre en petit signaux que nous pouvons estimer est la résistance dc que l'on mesure avec un simple ohmmètre, donnant la valeur  $R_e = 5.6\Omega$ .

Dans ce qui suit, nous considérerons que la masse mobile  $M_{ms}$  du haut-parleur inclut la masse de rayonnement totale. Afin d'estimer les paramètres en petits signaux du haut-parleur, nous effectuons 3 mesures successives de l'impédance électrique d'entrée du haut-parleur  $Z_{hp}$ , en excitant le haut-parleur avec un bruit blanc et en mesurant simultanément la tension électrique d'entrée et le courant électrique circulant dans la bobine, dans les 3 conditions suivantes :

1. une mesure sur baffle CEI (Commission Electrotechnique Internationale),
2. une mesure dans une enceinte close de volume  $V_b=15$  l,
3. une mesure sur baffle CEI avec une masse additionnelle  $M_{add}=11$  g.

La Figure ?? représente l'amplitude de l'impédance électrique  $|Z_{hp,i}|$  dans les 3 conditions ( $i = 1, 2, 3$ ) définies précédemment. Nous observons pour chacune un maximum  $Z_{0,i} = \max(|Z_{hp,i}|) = 50.4 \Omega$ , dont la valeur est la même dans les 3 conditions de mesure, mais à des fréquences différentes que l'on notera  $f_s$  (sur écran infini),  $f_c$  (en enceinte close) et  $f_m$  (avec masse additionnelle).

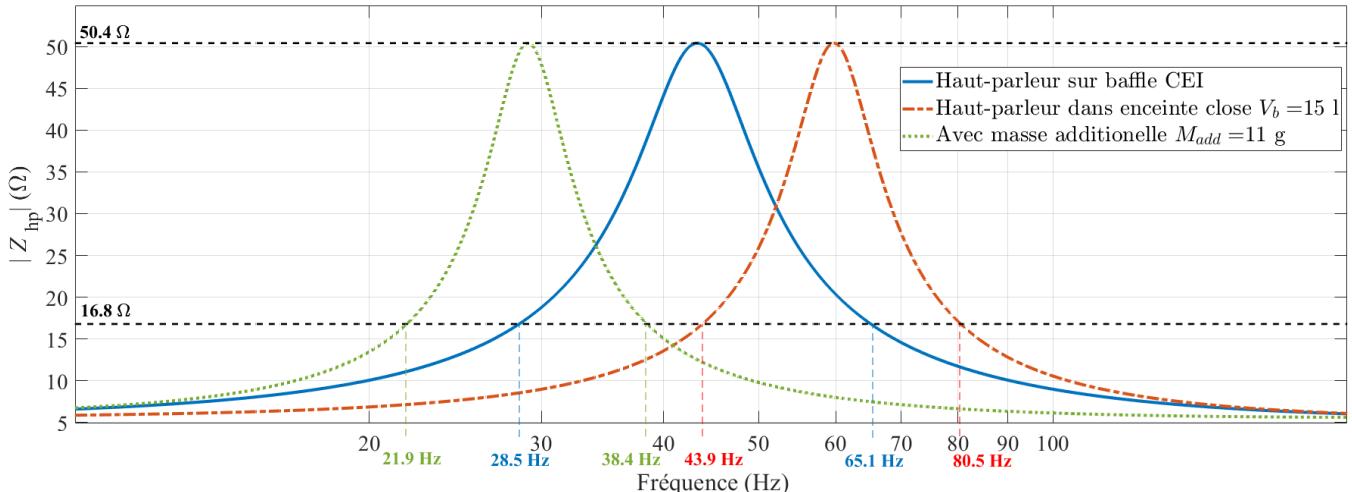


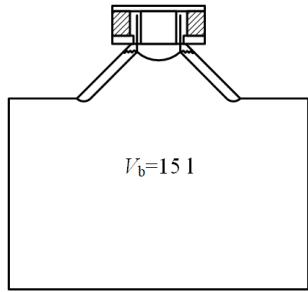
FIGURE 1 – Impédance électrique du haut-parleur (trait plein bleu : sur écran infini ; trait discontinu rouge : dans une enceinte de volume  $V_b=15$  l, sans masse additionnelle ; pointillés verts : sur écran infini, avec masse additionnelle  $M_{add} = 11$  g

### A. Mesure sur baffle CEI

La première mesure  $Z_{hp,1}$  sur baffle CEI donne la courbe en trait plein bleu de la Figure 1. Pour déterminer la fréquence  $f_s$ , nous choisissons une valeur d'impédance intermédiaire  $Z_1 = 16,8 \Omega \in [1, Z_1]$  et identifions 2 fréquences  $f_{s-} = 28,5 \text{ Hz}$  et  $f_{s+} = 65,1 \text{ Hz}$  pour lesquelles  $|Z_{hp,1}(f_{s\pm})| = Z_1$ .

1. A quoi correspond  $f_s$ ? Exprimez  $f_s$  en fonction de la masse mobile  $M_{ms}$  et de la compliance mécanique  $C_{ms}$  du haut-parleur.
2. Rappelez l'expression de  $f_s$  en fonction de  $f_{s-}$  et  $f_{s+}$  et calculez sa valeur numérique.
3. Rappelez l'expression des facteurs de qualité mécanique  $Q_{ms}$ , électrique  $Q_{es}$  et total  $Q_{ts}$  du haut-parleur en fonction de  ~~$Z_0$~~ ,  $R_e$ ,  $f_s$ ,  $f_{s-}$  et  $f_{s+}$  et calculez leurs valeurs numériques.  
 ~~$Z_0$~~

B. Mesure sur enceinte close



Nous faisons ensuite une mesure d'impédance électrique avec le haut-parleur monté sur une enceinte close de volume  $V_b = 15 \text{ l}$ . Le montage est effectué selon le schéma de la Figure 2.

La courbe en trait discontinu rouge de la Figure 1 représente l'amplitude de l'impédance électrique du haut-parleur dans ces conditions. De manière similaire à l'exercice précédent, nous observons deux fréquences  $f_{c-} = 43,9 \text{ Hz}$  et  $f_{c+} = 80,5 \text{ Hz}$  pour lesquelles  $|Z_{hp,2}(f_{c\pm})| = Z_1$ .

FIGURE 2 – Montage sur une enceinte

1. Calculez les valeurs de la fréquence de résonance  $f_c$  et du facteur de qualité électrique  $Q_{ec}$  du haut-parleur en enceinte close de volume  $V_b = 15 \text{ l}$ .

2. Rappelez l'expression de la compliance mécanique  $C_{ab}$  équivalente au volume  $V_b$  de l'enceinte close en fonction de  $V_b$ ,  $\rho_{air}$  et  $c_{air}$ .

*acoustique*

3. Si on définit  $\alpha = \frac{C_{as}}{C_{ab}}$  le rapport de compliance, retrouvez la valeur du volume d'air  $V_{as}$  équivalent à la suspension du haut-parleur.

### C. Mesure avec masse additionnelle

Nous faisons une troisième mesure d'impédance électrique en collant une masse additionnelle  $M_{add} = 11$  g sur la membrane du haut-parleur, à nouveau monté sur le baffle CEI. La mesure donne la courbe en pointillés verts de la Figure 1. Nous observons les deux fréquences  $f_{m-} = 21,9$  Hz et  $f_{m+} = 38,4$  Hz pour lesquelles  $|Z_{hp,3}(f_{m\pm})| = Z_1$ .

1. Trouvez la masse mobile  $M_{ms}$ , la compliance mécanique  $C_{ms}$ , ainsi que la résistance mécanique  $R_{ms}$ , du haut-parleur.

2. Trouvez alors la surface effective  $S_d$  du haut-parleur.

3. Retrouvez finalement la valeur du facteur de force  $B\ell$  du haut-parleur.

## Exercice 2 : Enceinte Bass-reflex à radiateur passif (2 points)

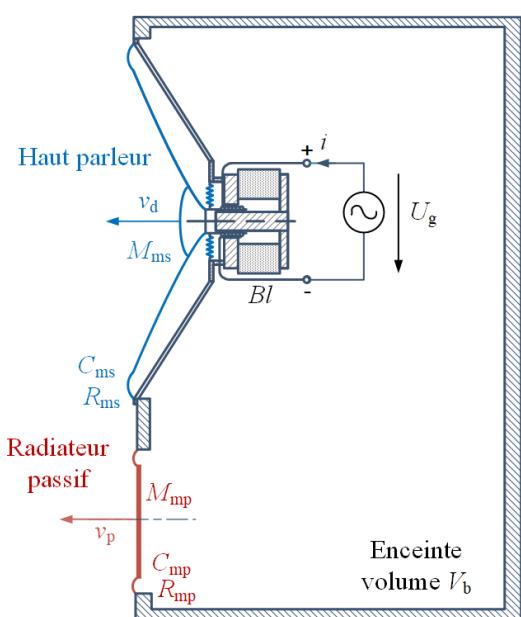


FIGURE 3 – Bass-reflex à radiateur passif

Un haut-parleur de paramètres :

- électriques :  $R_e, L_e,$
- facteur de force  $B\ell,$
- mécaniques :  $R_{ms}, C_{ms}, M_{ms},$
- surface effective  $S_d,$

alimenté par une source de tension électrique  $U_g$  (supposée idéale) est monté sur une enceinte de volume  $V_b.$

Un radiateur passif constitué d'un piston circulaire rigide de surface  $S_p$ , de masse  $M_{mp}$  suspendu sur son pourtour par une suspension annulaire de compliance  $C_{mp}$  et de résistance mécanique  $R_{mp}$ , est également fixé sur la même face de l'enceinte que le haut-parleur. On désigne  $v_d$  la vitesse vibratoire du haut-parleur et  $v_p$  celle du radiateur passif.

Dans ce qui suit, nous négligerons les pertes acoustiques dans l'enceinte (pas de matériau poreux, ni de fuites). Par ailleurs, nous limiterons l'étude du système aux basses-fréquences.

1. Dessinez le schéma **acoustique** (pressions  $p_i$  et débits volumiques  $q_i$ ) du système constitué du haut-parleur et de l'enceinte avec radiateur passif, en rappelant l'expression de tous les composants acoustiques du circuit en fonction des paramètres du haut-parleur.



Nom et Prénom :

2. En négligeant la résistance  $R_{mp}$  et en vous inspirant d'un exemple vu en cours, **démontrez** que la pression  $p_{r=1m}(j\omega)$  à 1m du bass-reflex à radiateur passif est de la forme :

$$p_{r=1m}(j\omega) = p_m \frac{a_4.(j\omega)^4 + a_2.(j\omega)^2}{b_4.(j\omega)^4 + b_3.(j\omega)^3 + b_2.(j\omega)^2 + b_1.(j\omega) + b_0},$$

où  $p_m$  ainsi que les coefficients  $a_i$  et  $b_j$  sont des constantes que vous exprimerez en fonction des composants acoustiques de la question précédente ?

Quelle fonction effectue le système bass-reflex à radiateur passif ?

