

4.3 Caractérisation d'un haut-parleur

H. Lissek

12 décembre 2024

Objectifs

Ce cours met en pratique les connaissances acquises sur les haut-parleurs électrodynamiques. Les objectifs principaux de ce cours sont:

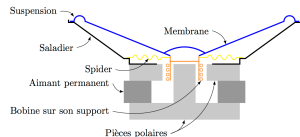
- de définir les paramètres de Thiele & Small (ou paramètres en petits signaux)
- de proposer une méthode de mesure usuelle des paramètres physiques d'un haut-parleur

Prérequis

On suppose connu le schéma électrique équivalent en basse fréquence et l'expression de l'impédance électrique d'entrée du haut-parleur électrodynamique.

Rappel: le haut-parleur électrodynamique peut être modélisé aux basses fréquences par un modèle à constantes localisées, dont les composants sont:

- l'impédance électrique de la bobine:
 R_e
- le facteur de force du moteur électrodynamique:
 $B\ell$
- l'impédance mécanique de la partie mobile:
 R_{ms}, M'_{ms}, C_{ms}
- la surface de couplage de la membrane:
 S_d



Notes:

- l'inductance L_e est négligée aux basses fréquences
- la masse M'_{ms} inclut ici la masse de rayonnement (avant + arrière)!

Ces paramètres peuvent dépendre des conditions de mesure, et il est important de les mesurer précisément si on souhaite dimensionner correctement le HP et son enceinte acoustique. Les paramètres génériques donnés par le constructeur peuvent différer de ceux du HP dont on dispose.

Paramètres de Thiele et Small

Le modèle basses fréquences du haut-parleur, pour des "petits signaux", nécessite six paramètres d'entrée appelés **paramètres de Thiele et Small**:

- 1 f_s : fréquence de résonance de l'équipage mobile.
- 2 S_d : la surface projetée de la membrane, donnant un débit équivalent à celui obtenu par un piston plan.
- 3 V_{as} , le volume d'air présentant une souplesse équivalente à celle C_{ms} de l'équipage mobile.
- 4 R_e , la résistance électrique de la bobine.
- 5 Q_{es} , le facteur de qualité électrique représentant l'effet des pertes électriques pour un système sans pertes mécaniques ($R_{ms} = 0$).
- 6 Q_{ms} , le facteur de qualité mécanique représentant l'effet des pertes mécanique pour un système sans pertes électriques ($R_{es} = 0$).

Paramètres de Thiele et Small: calculs

Introduction

Modèle de Thiele et Small

Application à 1 HP réel

Bibliographie

- f_s : fréquence de résonance de l'équipage mobile.

$$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{C'_s L_s}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{M'_{as} C_{as}}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{M'_{ms} C_{ms}}}$$

- V_{as} , le volume d'air présentant une souplesse équivalente à celle C_{ms} de l'équipage mobile.

$$V_{as} = \rho_0 c^2 S_d^2 C_{ms} = \rho_0 c^2 C_{as}$$

- Q_{es} , le facteur de qualité électrique représentant l'effet des pertes électriques pour un système sans pertes mécaniques ($R_{ms} = 0$).

$$Q_{es} = \omega_s C'_s R_e = \frac{1}{\omega_s C_{as} R_{ae}} = \frac{1}{R_{ae}} \sqrt{\frac{M'_{as}}{C_{as}}} = \frac{R_e}{(B\ell)^2} \sqrt{\frac{M'_{ms}}{C_{ms}}}$$

- Q_{ms} , le facteur de qualité mécanique représentant l'effet des pertes mécanique pour un système sans pertes électriques ($R_e = 0$).

$$Q_{ms} = \omega_s C'_s R_s = \frac{1}{\omega_s C_{as} R_{as}} = \frac{1}{R_{as}} \sqrt{\frac{M'_{as}}{C_{as}}} = \frac{1}{R_{ms}} \sqrt{\frac{M'_{ms}}{C_{ms}}}$$

Paramètres de Thiele et Small: calculs

- On utilise également le facteur de qualité total Q_{ts} qui représente l'effet de toutes les pertes du haut-parleur.

$$Q_{ts} = \frac{1}{\omega_s C_{as} (R_{ae} + R_{as})} = \frac{Q_{ms} Q_{es}}{Q_{ms} + Q_{es}}$$

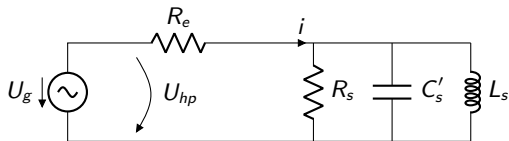
Note: ces facteurs ont été calculés pour un haut-parleur branché sur un générateur de tension parfait. Si l'on utilise un générateur de Thévenin d'impédance R_g , les nouveaux facteurs Q_e et Q_t sont calculés pour une impédance électrique valant $R_e + R_g$.

- Le facteur de force $B\ell$ peut se calculer à partir de paramètres de Thiele & Small.

$$B\ell = \sqrt{\frac{R_e S_d^2 \rho_0 c^2}{2\pi f_s Q_{es} V_{as}}}$$

Exercice: impédance électrique d'entrée Z_{hp}

Exprimer l'impédance électrique d'entrée Z_{hp} en fonction des paramètres de Thiele & Small



Pourquoi mesurer Z_{hp} ?

Les mesures acoustiques étant très sensibles à l'environnement de mesure, il faut trouver des méthodes peu intrusives.

- les mesures mécaniques non destructives ne sont pas simples et onéreuses à mettre en place
- On utilise plutôt une mesure de l'impédance électrique libre du haut-parleur
 - bonne sensibilité aux paramètres mécaniques du HP en basse fréquence ;
 - relative innocuité de la mesure à l'environnement acoustique (attention tout de même, le HP fonctionne également en microphone) ;
 - Grande précision des mesures de tensions électriques.

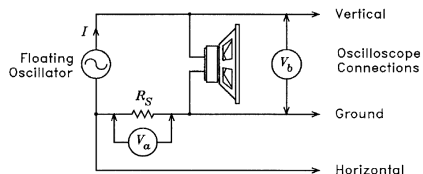
Mesure de R_e

R_e est la résistance DC de la bobine du haut-parleur. Elle peut être simplement mesurée avec un multimètre aux bornes électriques du haut-parleur, en prenant soin de bloquer mécaniquement la membrane (autrement la résistance DC peut varier sensiblement).

Mesure de Z_{hp}^*

Exemple de dispositif de mesure

- Si l'on dispose d'un système d'acquisition d'au moins deux voies (mesure ou audio), la mesure sur toute la bande de fréquence considérée peut être effectuée en une fois.
- Z_{hp}^* est alors obtenue par
$$Z_{hp}^* = \frac{R_s V_b(f)}{V_a(f)}.$$
- Signal d'excitation : bruit blanc filtré, sinus glissant (Farina), séquence LMS...



- Attention à ne pas relier les masses des différents signaux si pas d'entrées flottantes.

Mesure des facteur de qualité et de f_s

Méthode

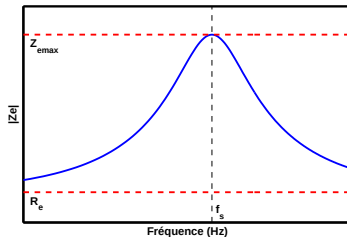
- On se place en basse fréquence où l'inductance est négligeable ($L_e = 0$).

- L'impédance électrique d'entrée vaut alors :

$$Z_{hp}^* = R_e + \frac{(B\ell)^2}{R_{ms} + \frac{1}{j\omega C_{ms}} + j\omega M_{ms}}$$

- Elle est maximale pour $f = f_s$ et vaut

$$Z_{hp,max} = R_e + \frac{(B\ell)^2}{R_{ms}}$$



Mesure des facteur de qualité et de f_s

Méthode

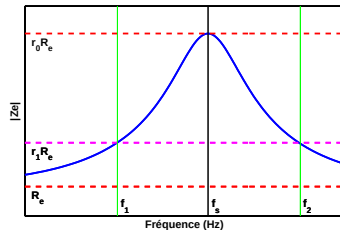
- On définit $r_0 = \frac{Z_{emax}}{R_e} = 1 + \frac{(B\ell)^2}{R_e R_{ms}}$,
- On choisit un rapport r_1 compris entre 1 et r_0
- On définit les fréquences f_1 et f_2 pour lesquelles $|Z_{hp}^*| = r_1 R_e$.

- On peut montrer que ▶ Demonstration :

$$\sqrt{f_1 f_2} = f_s$$

et que, si l'on choisit $r_1 = \sqrt{r_0}$ ▶ Demonstration :

$$Q_{ms} = \frac{f_s}{f_2 - f_1} r_1$$



Mesure des facteur de qualité et de f_s

Démonstration(1)

Il s'agit de trouver les solutions de l'équation $|Z_{hp}^*(f_{1,2})| = r_1 R_e$ ce qui implique:

$$|Z_{hp}^*(f_{1,2})|^2 = r_1^2 R_e^2 \text{ then } \left(\frac{f_{1,2}}{f_s}\right)^4 - \left(2 + \frac{1}{Q_{ms}^2} r_1^2\right) \left(\frac{f_{1,2}}{f_s}\right)^2 + 1 = 0$$

$$\text{Ainsi: } \left(\frac{f_{1,2}}{f_s}\right)^2 = \frac{1}{2} \left[\left(2 + \frac{1}{Q_{ms}^2} r_1^2\right) \pm \sqrt{\left(2 + \frac{1}{Q_{ms}^2} r_1^2\right)^2 - 4} \right]$$

$$\text{et donc: } f_1^2 f_2^2 = \frac{1}{4} f_s^4 \left[\left(2 + \frac{1}{Q_{ms}^2} r_1^2\right)^2 - \left(\left(2 + \frac{1}{Q_{ms}^2} r_1^2\right)^2 - 4 \right) \right]$$

Finalement après simplifications: $f_1 f_2 = f_s^2$

Mesure des facteur de qualité et de f_s

Démonstration(2)

On peut observer que

$$\left(\frac{f_2 - f_1}{f_s}\right)^2 = \left(\frac{f_2}{f_s}\right)^2 + \left(\frac{f_1}{f_s}\right)^2 - 2\frac{f_1 f_2}{f_s^2} = \left(\frac{f_2}{f_s}\right)^2 + \left(\frac{f_1}{f_s}\right)^2 - 2$$

Comme

$$\left(\frac{f_2}{f_s}\right)^2 + \left(\frac{f_1}{f_s}\right)^2 = 2 + \frac{1}{Q_{ms}^2} r_1^2$$

avec $r_0 = 1 + \frac{R_s}{R_e}$, et sachant que $f_1 f_2 = f_s^2$

$$\text{alors } \left(\frac{f_2 - f_1}{f_s}\right)^2 = \frac{r_1^2}{Q_{ms}^2}, \text{ soit } Q_{ms} = \left(\frac{f_s}{f_2 - f_1}\right) r_1$$

Mesure des facteur de qualité et de f_s

Méthode

- Si l'on choisit $r_1 = \sqrt{r_0}$, Q_{ms} est alors donné par :

$$Q_{ms} = \sqrt{r_0} \frac{f_s}{f_2 - f_1}$$

- Le facteur de qualité Q_{es} est quant à lui donné par :

$$Q_{es} = \frac{Q_{ms}}{r_0 - 1}$$

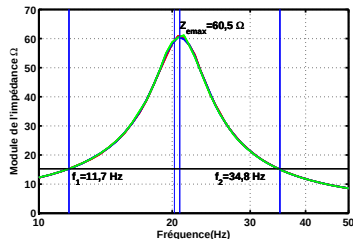
- Q_{ts} est obtenu par la formule habituelle :

$$Q_{ts} = \frac{Q_{ms} Q_{es}}{Q_{ms} + Q_{es}}$$

Mesure des facteur de qualité et de f_s

Illustration sur un haut-parleur Peerless 269SWR51 XLS

- Courbes : 3 mesures successives de Z_{hp}^* .
- Sur la courbe on lit $Z_{hp,max} = 60,5 \Omega$ que l'on divise par $R_e = 3,85 \Omega$ (mesuré au multimètre) qui donne $r_0 = 15,71$.
- $r_1 = \sqrt{r_0}$
- On obtient alors $r_1 R_e = 3,85 \sqrt{15,71} = 15,26 \Omega$.
- On lit alors les valeurs de f_1 et f_2
 $f_1 = 11,7 \text{ Hz}$ et $f_2 = 34,8 \text{ Hz}$.
- $f_s = \sqrt{f_1 f_2} = 20,2 \text{ Hz}$
 (lecture directe : $20,8 \text{ Hz}$).



Mesure des facteur de qualité et de f_s

Illustration sur un haut-parleur Peerless 269SWR51 XLS

- Les facteurs de qualité valent alors :

- $Q_{ms} = \sqrt{r_0} \frac{f_s}{f_2 - f_1} = \sqrt{15,71} \frac{20,2}{34,8 - 11,7} = 3,43$

- $Q_{es} = \frac{Q_{ms}}{r_0 - 1} = \frac{3,43}{15,71 - 1} = 0,24$

- $Q_{ts} = \frac{Q_{ms} Q_{es}}{Q_{ms} + Q_{es}} = 0,22$

- Récapitulatif :

	R_e	f_s	Q_{ms}	Q_{es}	Q_{ts}
Mesure	3,85	20,2	3,43	0,24	0,22
Fabricant	3,43	19,8	2,63	0,18	0,17

- Causes d'erreurs : haut-parleurs différents dans une série, modification de la série par le fabricant, niveau d'excitation, conditions de rayonnement ...

Mesure du volume équivalent V_{as}

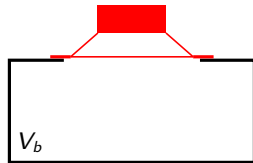
Méthodes de mesure

- Il existe de nombreuses méthodes de mesures permettant de calculer V_{as} .
- Celles qui reposent sur la mesure de la fréquence de résonance de l'équipage mobile (via Z_{hp}^*) doivent utiliser au moins deux conditions (assez) différentes afin d'éliminer la grandeur M'_{ms} inconnue.
- Deux techniques courantes :
 - La **méthode de l'enceinte close** : mesure du haut-parleur seul puis du haut-parleur monté sur une enceinte close ;
 - La **méthode de la masse ajoutée** : mesure du haut-parleur seul, puis du haut-parleur avec masse additionnelle.

Mesure du volume équivalent V_{as}

Méthode de l'enceinte close

- **Première mesure** : haut-parleur seul (sur écran), détermination de f_s et Q_{es} .
- **Deuxième mesure** : haut-parleur monté sur une enceinte close, détermination de f_c et Q_{ec} .
La fréquence de résonance du haut-parleur en enceinte close doit augmenter d'au moins 50 % par rapport à la configuration HP seul.



- Le volume V_b comprend le volume du trou dans l'enceinte ainsi que le volume du cône du HP.

On rappelle la définition du rapport de compliance $\alpha = \frac{C_{as}}{C_{ab}}$, où $C_{ab} = \frac{V_b}{\rho c^2}$

soit $\alpha = \frac{V_{as}}{V_b}$ (V_{as} : volume d'air équivalent à la suspension du HP).

Mesure du volume équivalent V_{as}

Méthode de l'enceinte close

- La fréquence de resonance f_c d'une enceinte close est reliée à f_s par :

$$f_c = \sqrt{\frac{M'_{as}}{M'_{ac}}} \sqrt{1 + \alpha} f_s$$

- Le facteur de qualité Q_{ec} d'une enceinte close est relié à Q_{es} par :

$$Q_{ec} = \sqrt{\frac{M'_{ac}}{M'_{as}}} \sqrt{1 + \alpha} Q_{es}$$

- Le produit des deux équations précédentes conduit à :

$$f_c Q_{ec} = \sqrt{\frac{M'_{as}}{M'_{ac}}} \sqrt{1 + \alpha} f_s \sqrt{\frac{M'_{ac}}{M'_{as}}} \sqrt{1 + \alpha} Q_{es} = (1 + \alpha) f_s Q_{es}$$

Mesure du volume équivalent V_{as}

Méthode de l'enceinte close

- Qui se réécrit :

$$Q_{ec} f_c = (1 + \alpha) f_s Q_{es} \Rightarrow \alpha = \frac{f_c Q_{ec}}{f_s Q_{es}} - 1$$

- Or, $\alpha = V_{as}/V_b$, d'où :

$$V_{as} = V_b \left(\frac{f_c Q_{ec}}{f_s Q_{es}} - 1 \right)$$

- On notera que la modification des impédances de rayonnement $M'_{as} \Rightarrow M'_{ac}$ n'intervient pas dans le calcul (grâce à l'utilisation des facteurs de qualités électriques).

Mesure du volume équivalent V_{as}

Illustration sur un haut-parleur Peerless 269SWR51 XLS

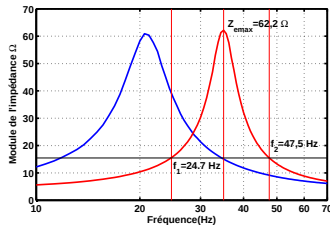
On reprend la mesure du haut-parleur sur écran: $f_s = 20,2$ Hz, et $Q_{es} = 0,24$.

On fait ensuite la mesure sur une enceinte V_b :

- Volume $V_b = 37$ l.
- Détermination de f_c et Q_{ec} par la même méthode que précédemment : $f_c = 34,3$ Hz et $Q_{ec} = 0,4$.

- V_{as} vaut alors :

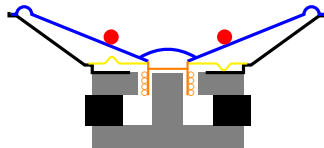
$$V_{as} = V_b \left(\frac{f_c Q_{ec}}{f_s Q_{es}} - 1 \right) = 37 \left(\frac{34,3 \times 0,4}{20,3 \times 0,23} - 1 \right) = 72 \text{ l.}$$



Mesure du volume équivalent V_{as}

Méthode de la masse ajoutée

- **Première mesure** : haut-parleur seul, détermination de f_s .
- **Deuxième mesure** : haut-parleur avec masse ajoutée connue M_{add} , détermination de f'_s .
- La fréquence de résonance du HP sur l'enceinte doit chuter d'au moins 25 % par rapport à la configuration HP seul sans excéder la valeur de M'_{ms} .



- La masse ajoutée M_{add} est souvent constituée de boules de mastic collées symétriquement par rapport à l'axe du HP.

Mesure du volume équivalent V_{as}

Méthode de la masse ajoutée

- Les fréquences de résonance dans les deux conditions sont données par :

$$f_s = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{M'_{ms} C_{ms}}} \text{ et } f'_s = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{(M'_{ms} + M_{add}) C_{ms}}}$$

où M_{add} est la masse supplémentaire utilisée pour la deuxième condition.

- De ces deux équations, on obtient :

$$M'_{ms} = \frac{1}{4\pi^2 f_s^2 C_{ms}} \text{ et } M'_{ms} + M_{add} = \frac{1}{4\pi^2 f_s'^2 C_{ms}}$$

Mesure du volume équivalent V_{as}

Méthode de la masse ajoutée

- En remplaçant M_{ms} dans la deuxième équation :

$$M_{add} = \frac{1}{4\pi^2 f_s'^2 C_{ms}} - \frac{1}{4\pi^2 f_s^2 C_{ms}} = \frac{1}{4\pi^2 C_{ms}} \left(\frac{1}{f_s'^2} - \frac{1}{f_s^2} \right)$$

- C_{ms} est alors donné par :

$$C_{ms} = \frac{1}{4\pi^2 M_{add}} \left(\frac{1}{f_s'^2} - \frac{1}{f_s^2} \right)$$

- Le volume équivalent vaut alors (si S_d est connu) :

$$V_{as} = \rho_0 c^2 S_d^2 C_{ms} = \frac{\rho_0 c^2 S_d^2}{4\pi^2 M_{add}} \left(\frac{1}{f_s'^2} - \frac{1}{f_s^2} \right)$$

Mesure du volume équivalent V_{as}

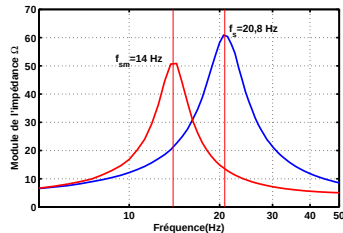
Illustration sur un haut-parleur Peerless 269SWR51 XLS

- Masse ajoutée $M_{add} = 181$ g.
- Surface équivalente $S_d = 352$ cm².
- Lecture de f_s et f'_s sur la courbe d'impédance :
 $f_s = 20,8$ Hz et $f'_s = 14$ Hz.

- V_{as} vaut alors :

$$V_{as} = \frac{1,2 \times 342^2 \times 0,0352^2}{4\pi^2 \times 181} \left(\frac{1}{14^2} - \frac{1}{20,8^2} \right)$$

$$= 72 \text{ l.}$$



Mesure des autres paramètres

Bilan des techniques précédentes :

- Multimètre de précision : R_e .
- Mesure de l'impédance électrique du HP seul : f_s , Q_{ms} , Q_{es} et Q_{ts} .
- HP sur enceinte close : V_{as} .
- HP + masse additionnelle : V_{as} , si S_d connu. Cette dernière méthode permet toutefois de mesurer les valeurs de M'_{ms} et C_{ms} sans avoir à connaître S_d .
- Il est donc possible avec des mesures, HP seul, HP sur une enceinte close et HP avec une masse additionnelle d'obtenir les valeurs de V_{as} et C_{ms} , et donc d'en déduire S_d .

Mesure des autres paramètres

Mesure de M'_{ms} et C_{ms}

- On utilise la méthode de la masse ajoutée, pour la valeur de C_{ms} (voir transparent n°25).
- La détermination de la masse M'_{ms} s'effectue à partir des deux fréquences de résonances f_s et f'_s .
- En remplaçant, $C_{ms} = \frac{1}{(4\pi^2 f_s^2 M'_{ms})}$ dans

$$M'_{ms} + M_{add} = \frac{1}{4\pi^2 f_s'^2 C_{ms}} = \frac{\cancel{4\pi^2} f_s^2}{\cancel{4\pi^2} f_s'^2} M'_{ms} = \frac{f_s^2}{f_s'^2} M'_{ms}$$

- On a alors :

$$M'_{ms} = \frac{M_{add}}{f_s^2 / f_s'^2 - 1}$$

- Application au haut-parleur Peerless 269SWR51 XLS : $M_{ms} = 150$ g (donnée constructeur 135,3 g).

Mesure des autres paramètres

Mesure de S_d

- Si l'on suppose f_s , M'_{ms} et V_{as} déjà mesurés, la surface équivalente S_d s'obtient par :

$$S_d = \sqrt{\frac{V_{as}}{\rho_0 c^2 C_{ms}}} = S_d = \sqrt{\frac{4\pi^2 f_s^2 M'_{ms} V_{as}}{\rho_0 c^2}} = \frac{2\pi f_s}{\sqrt{\rho_0 c}} \sqrt{M'_{ms} V_{as}}$$

- Soit :

$$S_d = 0,0168 f_s \sqrt{M_{ms} V_{as}}$$

- Application au haut-parleur Peerless 269SWR51 XLS : $S_d = 353 \text{ cm}^2$ (donnée constructeur 352 cm^2).
- Les six paramètres de Thiele et Small sont donc déterminés (possibilité de déduire les autres, ex : facteur $B\ell$, rendement...).

Dispositifs de mesure

- L'estimation d'une impédance électrique requiert la mesure précise d'une tension **et** d'un courant électriques.
- Généralement, pour des raisons pratiques (disponibilité, prix, utilisation de cartes son), l'intensité est estimée par la mesure d'une tension sur une résistance de valeur connue (à moins de 1%).
- Si l'on utilise le même appareil de mesure pour les deux tensions électriques, certaines erreurs systématiques disparaissent effectuant le rapport des tensions.
- Une technique alternative consiste à charger le haut-parleur par une résistance de charge $R_c \gg Z_{hp}^*$, ainsi l'intensité est constante quelque soit les variations de Z_{hp}^* , un voltmètre et une résistance calibrée suffisent donc pour la mesure (attention au bruit).

Bibliographie

- ① M. Rossi, *Audio*, Presses Polytechniques Romandes, Lausanne, 2007
- ② J. DAppolito, *Le haut-parleur : Manipulations et mesures électroacoustiques*, Publitrone/Elektor, 1998.