

## Induction : Haut-parleur et courants de Foucault

Prenez en note tout élément pouvant figurer dans un compte-rendu de TP : mesures, calculs d'incertitude, observations (schémas) et interprétations, méthodes expérimentales...

### Améliorer mesure constante de couplage (Laser ?)

## I. Mesure des coefficients de Thiele-Small d'un haut-parleur électro-dynamique

### I.1. Introduction

Les calculs du cours ont montré que le haut-parleur électrodynamique se comporte du point de vue électrique comme la somme d'une impédance d'origine électrique  $\underline{Z}_e$  et d'une *impédance motionnelle* d'origine mécanique  $\underline{Z}_m$  :

$$\underline{Z} = \frac{e}{i} = \underline{Z}_e + \underline{Z}_m \quad \text{avec} \quad \underline{Z}_e = R_e + j\omega L_e \quad \text{et} \quad \underline{Z}_m = \frac{\ell^2 B^2}{\underline{Z}_{\text{meca}}}$$

Dans cette expression apparaît le *facteur de couplage électromécanique* (ou *facteur de force*)  $B\ell$ , ainsi qu'une *impédance mécanique* (qui relie la vitesse à la force),

$$\underline{Z}_{\text{meca}} = \alpha + \frac{1}{j\omega C_m} + jm\omega$$

où  $\alpha$  est appelée *résistance mécanique* (coefficient de frottement fluide appliqué à l'équipage mobile),  $C_m$  est la *souplesse* des suspensions (l'inverse d'un coefficient de raideur de ressort), et  $m$  est la masse de l'équipage mobile.<sup>1</sup> **Les paramètres de Thiele et Small sont les 6 constantes intervenant dans cette impédance électrique :  $R_e$ ,  $L_e$ ,  $B\ell$ ,  $\alpha$ ,  $C_m$  et  $m$ .** Dans la suite on propose un protocole pour mesurer ces 6 paramètres.

On peut récrire l'impédance motionnelle sous forme canonique en faisant apparaître un facteur de qualité  $Q_m$  et une fréquence de résonance  $f_s$  :

$$\underline{Z}_m = \frac{\ell^2 B^2}{\alpha} \frac{1}{1 + jQ_m \left(x - \frac{1}{x}\right)} \quad \text{avec} \quad Q_m = \frac{1}{\alpha} \sqrt{\frac{m}{C_m}}, \quad x = \frac{f}{f_s} \quad \text{et} \quad f_s = \frac{1}{2\pi \sqrt{mC_m}}.$$

### I.2. Variations de l'impédance en fonction de la fréquence

#### • MANIP 1 : Résistance électrique $R_e$

Mesurer la résistance  $R_e$  avec un ohm-mètre. Est-ce conforme à la valeur indiquée ?

#### • MANIP 2 : Réponse en fréquence

- Réaliser un montage pour mesurer le module de l'impédance en fonction de la fréquence. Matériel : 1 haut-parleur, 1 GBF, 1 boîte de résistances variables, 2 multimètres. On placera une résistance  $R$  de l'ordre de 1 k $\Omega$  en série avec le haut-parleur, pour limiter le courant (et donc le volume sonore...) et le maintenir à peu près constant lorsqu'on fait varier la fréquence<sup>a</sup>.
- Relever les valeurs de tension efficace et de courant efficace pour des fréquences variant sur une échelle logarithmique entre 10 Hz et 20000 Hz. Tracer la courbe de  $|\underline{Z}|$  en fonction de la fréquence, et mesurer la fréquence de résonance  $f_s$ .

*Attention : la résonance étant très aigüe, on prendra de nombreuses mesures au voisinage de  $f_s$ .*

<sup>a</sup>. On transforme ainsi le GBF en générateur de courant, donc l'impédance se lit presque directement sur les variations de tension.

<sup>1</sup>. En réalité on doit prendre en compte aussi l'interaction avec l'air qui se traduit par une *impédance de rayonnement* qui s'ajoute à  $\underline{Z}_{\text{meca}}$ . Cela se traduit essentiellement d'une part par une masse effective  $m'$  supérieure à la masse réelle  $m$ , d'autre part par une résistance mécanique additionnelle proportionnelle à la surface de la membrane et que l'on ne prend en compte qu'au voisinage de la résonance.

• **MANIP 3 : Mesure de l'inductance propre  $L_e$**

D'après l'étude théorique, on remarque qu'à haute fréquence, on a  $|\underline{Z}| \approx |\underline{Z}_e| = \sqrt{R_e^2 + L_e^2 \omega^2}$ .

À partir des mesures précédentes, effectuer une régression linéaire permettant de déterminer  $L_e$ .

Pour obtenir la masse  $m$  de l'équipage mobile, on la modifie en accolant une masse additionnelle  $m_{\text{add}}$  à l'enveloppe. Cela provoque une modification de la fréquence de résonance, qui devient

$$f'_s = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\sqrt{(m + m_{\text{add}})C_m}}$$

• **MANIP 4 : Mesure de la masse  $m$  à l'aide d'une masse additionnelle**

- Coller délicatement une masse connue  $m_{\text{add}}$  de patafix<sup>a</sup> au milieu de l'enveloppe, en prenant soin de ne pas la déformer.

*Remarque : prendre  $m_{\text{add}}$  du même ordre de grandeur que  $m$  ( $\sim 5$  g).*

- Mesurer la nouvelle fréquence de résonance.
- En déduire  $m$ , puis  $C_m$ .

---

a. S'il est difficile de la coller sans forcer, on utilisera du scotch.

Pour mesurer le facteur de force  $B\ell$ , on ajoute un objet non métallique posé sur l'enveloppe (après avoir ôté  $m_{\text{add}}$ ), et on augmente le courant jusqu'à atteindre un niveau permettant de soulever la masse posée<sup>2</sup>. Lorsqu'on atteint ce seuil, l'accélération maximale de la membrane compense celle de la pesanteur :

$$\omega V_{\text{max}} = g.$$

On se place à basse fréquence, de sorte que  $\underline{Z}_e \approx R_e$ . L'équation électrique en RSF s'écrit alors  $\underline{e} = R_e \underline{i} - B\ell v$ , ce qui donne en valeurs maximales :

$$E_{\text{max}} = R_e I_{\text{max}} - B\ell V_{\text{max}} \quad \text{avec} \quad V_{\text{max}} = \frac{g}{2\pi f} \quad \Rightarrow \quad B\ell = \frac{R_e I_{\text{max}} - E_{\text{max}}}{V_{\text{max}}} = \frac{2\sqrt{2}\pi f}{g} (R_e I_{\text{eff}} - E_{\text{eff}}).$$

La dernière égalité permet d'accéder à  $B\ell$  directement par la mesure des valeurs efficaces obtenues aux multimètres.

**Q1.** À quelle fréquence est-il préférable de travailler pour effectuer cette mesure ? Vérifier que l'on a bien  $\underline{Z}_e \approx R_e$ .

• **MANIP 5 : Mesure du facteur de force  $B\ell$**

- Poser un bouchon en plastique ou un jeton (de supermarché ou de casino...) au centre de la membrane.
- Mesurer les valeurs efficaces de la tension  $E_{\text{eff}}$  aux bornes du haut-parleur et du courant  $I_{\text{eff}}$  qui le traverse lorsque l'amplitude seuil est atteinte pour laquelle le bouchon se met à vibrer.
- En déduire la valeur de  $B\ell$ .

**Q2.** Grâce à la valeur de  $|\underline{Z}|$  à la résonance, en déduire la valeur de  $\alpha$ .

---

2. Il est nécessaire de réduire  $R$  à quelques dizaines d'ohms pour atteindre un courant suffisant.

## II. Mesure de la conductivité d'un métal via le freinage par courants de Foucault

On lâche un aimant de masse  $m$  de forme cylindrique dans un tube métallique en cuivre ou en aluminium. En modélisant l'aimant par un dipôle magnétique de moment  $\vec{\mu}$ , des calculs théoriques (accessibles en SPE) montrent que l'effet de la dissipation des courants de Foucault se traduit par une force de frottement fluide additionnelle de coefficient  $\alpha$ . On obtient donc par le PFD l'équation différentielle suivante (avec un axe vertical ascendant) :

$$\frac{dv}{dt} + \frac{v}{\tau} = -g \quad \text{avec} \quad v = \dot{z} \quad \text{et} \quad \tau = \frac{m}{\alpha} = \frac{1024m}{45e\sigma} \left( \frac{R^2}{\mu_0\mu} \right)^2,$$

où  $\sigma$  est la conductivité du métal,  $e$  l'épaisseur du tube, et  $R$  le rayon moyen du tube. L'aimant atteint donc une vitesse limite  $v_\ell = -g\tau$  au bout de quelques  $\tau$ .

### • MANIP 6 : Mesure de la conductivité du métal

- À l'aide d'un teslamètre, mesurer le champ magnétique au contact de l'aimant. En déduire une évaluation du moment dipolaire  $\mu$  de l'aimant.
- Mesurer la vitesse limite de chute  $v_\ell$ . En déduire la conductivité du métal. Comparer avec les autres groupes.

### • MANIP 7 : Vérification de la loi en $R^4$

- En utilisant des tubes de rayons différents et de même matière, vérifier la dépendance en  $R^4$  du temps caractéristique.

TP Induction : Haut-parleur et courants de Foucault  
**Liste de matériel - 6 postes**

Matériel pour chaque poste :

- Un oscilloscope analogique-numérique ;
- 2 multimètres numériques (1 à main et l'autre sous l'oscillo) ;
- Fils coaxiaux BNC-banane et BNC-BNC ;
- Un haut-parleur électro-dynamique à nu ;
- Un bouchon en plastique (ou autre matériau non magnétique) qui se place sur la membrane centrale.
- Patafix ou adhésif+bouchon (pour fixation d'une masse additionnelle)
- Une boîte à décade de résistances.
- Un aimant fort de forme cylindrique (ou quelques petits aimants en forme de disque empilés pour former un cylindre de 2-3cm de long)
- 2 tubes métalliques de environ 1 m de long, l'un en cuivre, l'autre en aluminium (ou l'un ou l'autre).
- Un chronomètre.
- Un teslamètre.
- Un règlet (double décimètre pour mesure du volume de l'aimant, ou éprouvette graduée pour mesure du volume par immersion).
- une balance de précision.

Matériel partagé (éventuellement) :

- teslamètre ;
- balance de précision ;
- tubes métalliques (6 de chaque métal) ;