

TP : Haut-parleur électro-mécanique

1 Principe

1.1 Description

Le schéma de principe du haut-parleur électromécanique est représenté figures (1) et (2).

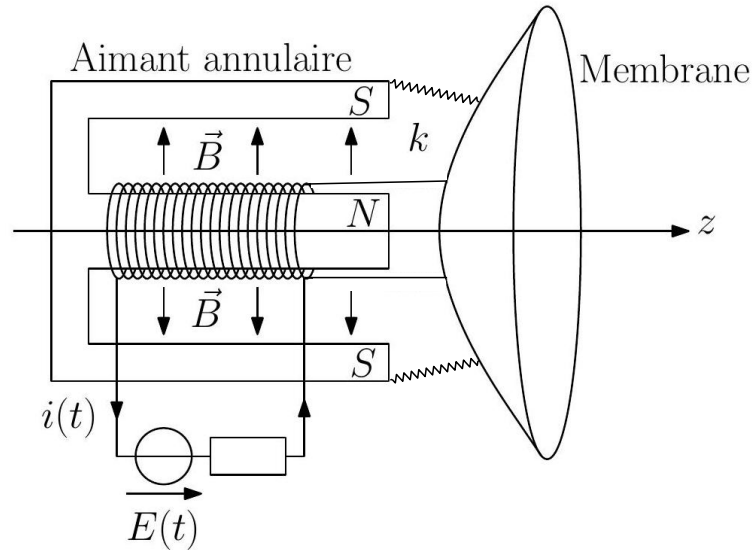


Figure 1

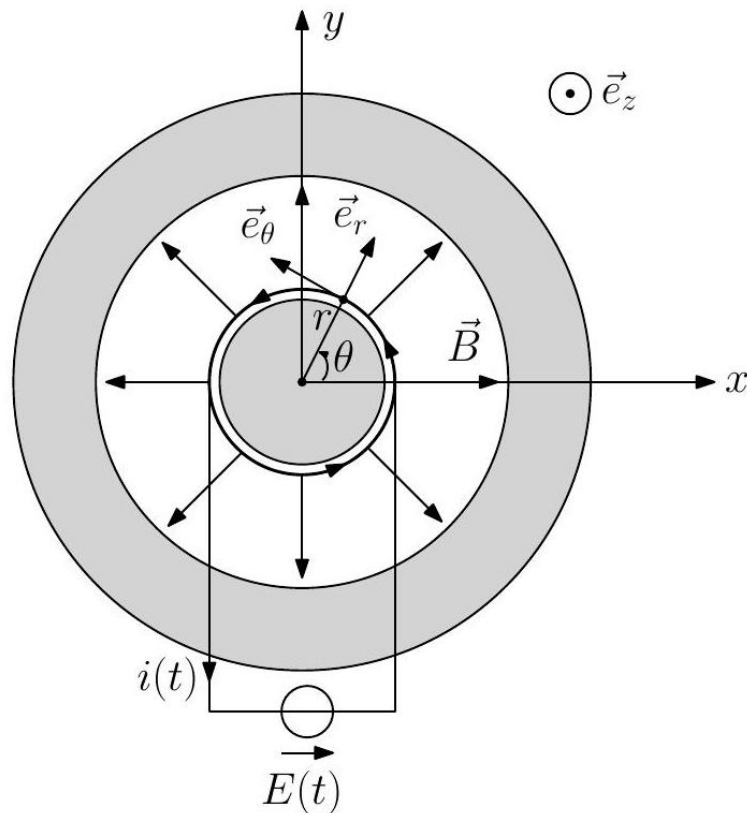


Figure 2

Ce système, comme nous allons le voir est réversible : il peut fonctionner en haut-parleur ou en

microphone.

Ce dispositif comprend :

- ✕ Une bobine de masse m , d'inductance propre L , de base de rayon a , en translation parallèle à l'axe (Oz) horizontal.
- ✕ un circuit électrique comprenant un générateur de tension éventuel (fonctionnement en haut-parleur), une résistance équivalente R et l'inductance L en série.
- ✕ Une membrane reliée à la bobine par une liaison élastique que l'on peut modéliser par un ressort équivalent de raideur k .
- ✕ Un aimant annulaire, d'axe de révolution (Oz) créant un champ magnétique stationnaire radial : $\vec{B} = B\vec{e}_r$.

Le bilan des actions mécaniques agissant sur la bobine est :

- ✕ La force de rappel élastique de la membrane : $\vec{F}_{el} = -kz\vec{e}_z$.
- ✕ La force de frottement fluide modélisant les frottements dus à l'air : $\vec{F}_f = -\lambda\dot{z}\vec{e}_z$.
- ✕ La force de Laplace exercée sur la bobine : $\vec{F}_L$

Le fonctionnement du dispositif est alors le suivant :

- ✕ Fonctionnement en haut-parleur : En présence d'un générateur de tension, la bobine est alimentée et un courant $i(t)$ la traverse. Ce circuit étant placé dans un champ magnétique, il apparaît une force de Laplace, orientée suivant (Oz) qui permet la translation de la bobine suivant l'axe (Oz). La membrane, par l'intermédiaire de la liaison élastique, est à son tour mise en mouvement. Mouvement qui génère une onde sonore
- ✕ Fonctionnement en microphone : une onde acoustique arrive sur la membrane. Celle-ci se met en mouvement. La bobine, via la liaison élastique entre la membrane et la bobine, est à son tour mise en mouvement : Le déplacement de la bobine dans le champ magnétique $\vec{B}$ entraîne l'apparition d'une force électromotrice induite (induction de Lorentz) et donc l'apparition d'un courant induit si le circuit est fermé.

Dans la suite, on se placera dans le cas du fonctionnement en haut-parleur du dispositif.

2 Équation mécanique

En considérant que la bobine est constituée de N spires identiques circulaires de rayon a , on calcule la force de Laplace exercée sur la bobine :

$$\vec{F}_L = \int_{N \text{ spires}} i(t) \vec{dl} \wedge \vec{B} = N \int_{1 \text{ spire}} i(t) \vec{dl} \wedge \vec{B}$$

Sachant que $\vec{dl} = rd\theta\vec{e}_\theta$ et que $\vec{B} = B\vec{e}_r$, on obtient :

$$\vec{F}_L = Ni(t)aB \left(\int_0^{2\pi} d\theta \right) \vec{e}_z = -i(t)lB\vec{e}_z$$

Où $l = 2\pi aN$ et la longueur totale du bobinage.

Le bilan des actions mécanique ayant déjà été fait, on applique le principe fondamentale de la dynamique et on le projette sur l'axe (Oz) :

$$m\ddot{z}(t) = -kz(t) - \lambda\dot{z}(t) - i(t)lB$$

Soit :

$$\ddot{z}(t) + \frac{\omega_0}{Q} \dot{z}(t) + \omega_0^2 z(t) = -\frac{i(t)lB}{m}$$

Où : $\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$ est la pulsation propre de l'oscillateur mécanique et où $Q = \frac{\sqrt{km}}{\lambda}$ est le facteur de qualité de l'oscillateur.

3 Équation électrique

Le schéma électrique équivalent du circuit nous permet d'écrire la loi des mailles :

$$E(t) = Ri(t) + L \frac{di}{dt} - e(t)$$

La force électromotrice induite e ne peut pas être calculée par loi de Faraday, le flux de $\vec{B}$ à travers une spire étant constamment nul. Pour déterminer e , on utilise la relation de conversion électromagnétique :

$$P_L + P_e = F_L \times \dot{z}(t) + e(t) \times i(t) = 0$$

Soit :

$$e(t) = -\frac{F_L \dot{z}(t)}{i(t)} = l \dot{z}(t) B$$

L'équation électrique est donc :

$$E(t) = Ri(t) + L \frac{di}{dt} - l \dot{z}(t) B$$

La tension E , représentative du son que l'on souhaite émettre, est une tension dont le spectre comprend à priori de nombreuses fréquences (comprises entre 20 Hz et 20kHz) : pour étudier la réponse du haut-parleur en fonction de ces différentes fréquences, on considère que E est une tension sinusoïdale de pulsation ω et on étudie les grandeurs caractéristiques du haut parleur (comme l'impédance, l'efficacité) en fonction de ω . Dans la suite, on utilisera la représentation complexe.

3.1 Impédance motionnelle

L'impédance du haut-parleur, est par définition :

$$\underline{Z} = \frac{\underline{E}}{\underline{I}}$$

Où $\underline{E} = E_0$ et $\underline{I}$ sont les amplitudes complexes de E et de i .

Les équations mécanique et électrique, en représentation complexe, s'écrivent :

$$\begin{aligned} E_0 &= (R + jL\omega)\underline{I} - j\omega B l \\ \underline{Z} \left((j\omega)^2 + \frac{j\omega\omega_0}{Q} + \omega_0^2 \right) &= -\frac{lB}{m} \underline{I} \end{aligned}$$

On introduit $\underline{Z}_e = R + jL\omega$, l'impédance électrique de la bobine, et on calcule le rapport $\frac{\underline{E}}{\underline{I}}$:

$$\underline{Z} = \underline{Z}_e + \underbrace{\frac{B^2 l^2}{\lambda} \cdot \frac{\frac{1}{Q} \frac{j\omega}{\omega_0}}{1 + \frac{1}{Q} \frac{j\omega}{\omega_0} + \left(\frac{j\omega}{\omega_0}\right)^2}}_{\underline{Z}_m = \text{impédance motionnelle}}$$

L'impédance du haut-parleur est donc la somme d'une impédance électrique $\underline{Z}_e$ et d'une impédance due au mouvement de la bobine $\underline{Z}_m$, appelée impédance motionnelle. Cette impédance dépend de la pulsation, tout comme l'impédance électrique.

La figure (3), représente l'évolution de l'impédance d'un haut-parleur électromécanique (Beyma CM-6).

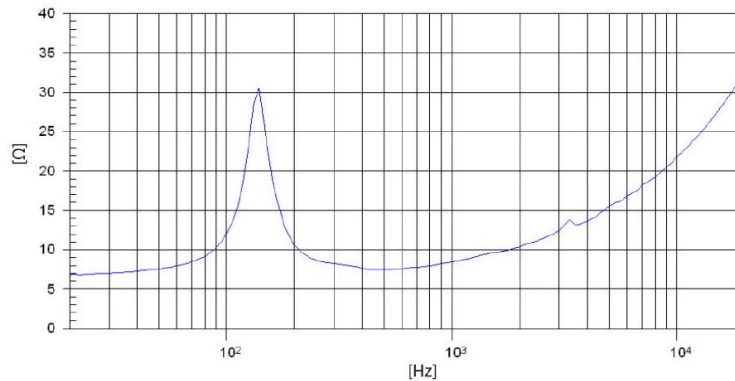


Figure 3 – Impédance d'un HP en fonction de la fréquence

Cette courbe permet d'identifier certains paramètres électromécaniques du haut-parleur. En particulier :

- ✗ Le module de l'impédance tend en très basses fréquences vers la valeur de la résistance R .
- ✗ La pente de la courbe en hautes fréquences correspond à la valeur de l'inductance L
- ✗ La fréquence du pic de résonance correspond à la fréquence de résonance mécanique de l'équipage mobile c'est à dire à $f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi}$

En pratique, les constructeurs indiquent, dans les caractéristiques d'un haut-parleur, la valeur nominale de l'impédance, c'est à dire la valeur de l'impédance du haut parleur pour des fréquences situées entre le pic de résonance et les hautes fréquences (l'impédance est alors quasiment constante). Le haut-parleur décrit ci-dessus a donc une impédance nominale de 8Ω

3.2 Efficacité

On définit ici l'efficacité du haut parleur par :

$$\underline{\eta} = \frac{\underline{V}}{\underline{E}}$$

Les équations précédentes, nous permettent de l'exprimer en fonction de $\underline{Z}_M$ et $\underline{Z}_e$:

$$\underline{\eta} = \frac{-Bl}{B^2 l^2 + \underline{Z}_M \underline{Z}_e}$$

Cette efficacité dépend donc de ω : Le haut-parleur ne restitue pas toutes les fréquences de la même manière et des distorsions peuvent donc apparaître.

En pratique, les haut parleurs vendus dans le commerce sont souvent caractérisés par leur sensibilité : elle indique la pression sonore d'une enceinte à 1 mètre de distance pour une puissance de un watt

transmise par le générateur et est souvent exprimée en dB. La figure (4) représente la sensibilité d'un haut-parleur (Audax HM170G0) ainsi que son impédance.

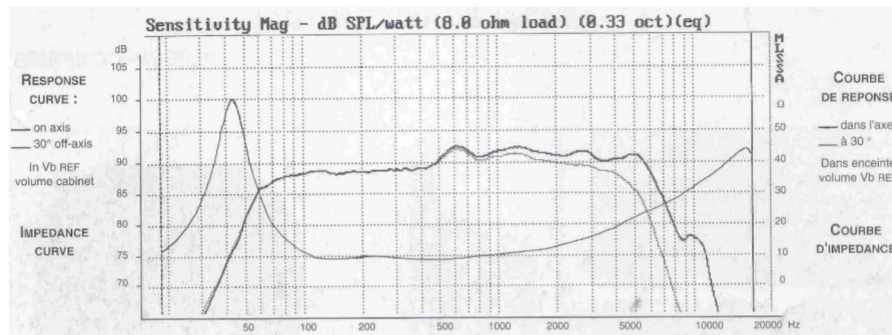


Figure 4 – Efficacité d'un HP

4 Mesures des grandeurs caractéristiques du haut-parleur

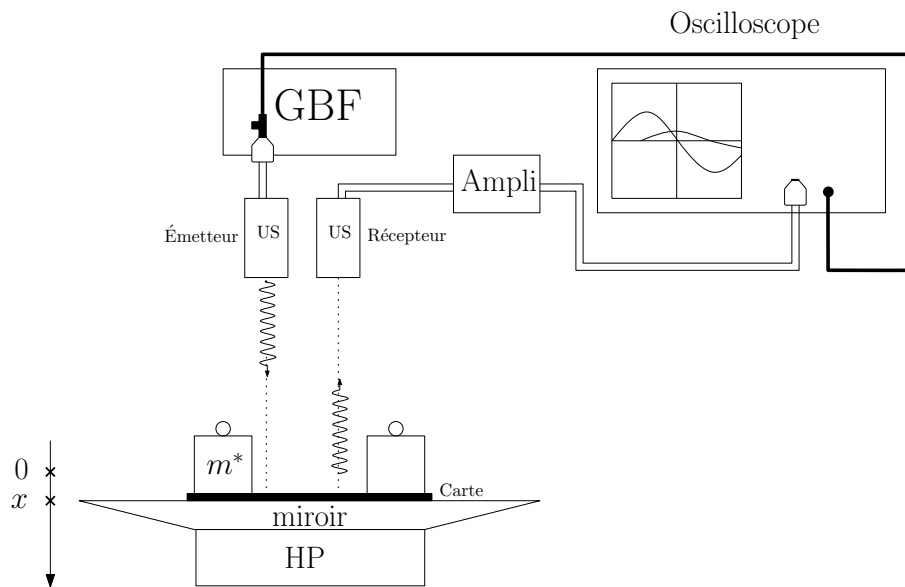
Dans cette partie, on cherche à mesurer les grandeurs caractéristique d'un haut-parleur.

4.1 Matériel mis à disposition

- ✗ Haut-parleur électromécanique.
- x masses marquées.
- ✗ petit miroir plan, laser.
- ✗ GBF, amplificateur.
- ✗ Boîtes de résistances.
- ✗ Oscilloscope différentiel.
- ✗ Carte SYSAM, ordinateur.
- ✗ Sonomètre.
- ✗ Microphone.
- ✗ Règle.

4.2 Mesure de k

La mesure de k peut se faire de la manière suivante : on place une masse m^* sur la membrane et on mesure le déplacement x de l'équipage, le HP n'étant pas alimenté. Pour mesurer x on utilise la mesure du déplacement d'une onde ultrasonore se réfléchissant sur la surface d'un objet déposé sur la membrane (carton, carte de cantine ...) comme indiqué figure (5).

Figure 5 – Protocole pour déterminer k

4.3 Mesure du produit Bl

Pour mesurer le produit lB où $l = 2\pi aN$, on utilise le montage précédent et on mesure le courant I qu'il faut envoyer dans le HP pour que l'équipage revienne à sa position initiale.

4.4 Mesure de l'impédance électrique $\underline{Z}_e$

Pour mesurer $\underline{Z}_e$, il faut utiliser une HP bloqué (dont la membrane ne bouge plus). Le montage donné par la figure (6), permet de déterminer $\underline{Z}_e$, en sachant que l'oscilloscope utilisé est un oscilloscope différentiel. Si l'on ne dispose pas d'oscilloscope différentiels, on peut utiliser une carte SYSAM et effectuer une différence des potentiels mesurés dans la feuille de calcul.

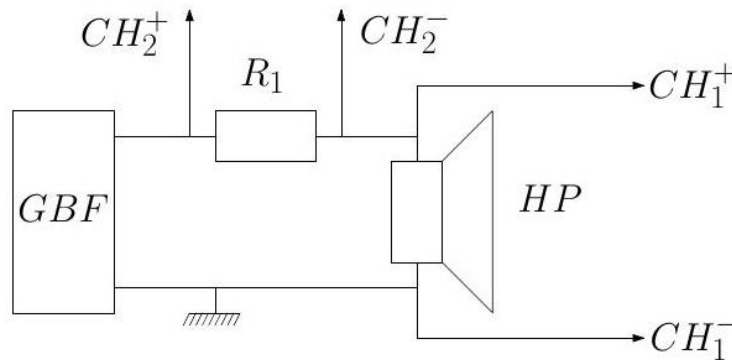


Figure 6 – Protocole pour déterminer l'impédance d'un HP

Proposer alors un protocole permettant de déterminer R et L .

Noter enfin, que l'on peut mesurer $\underline{Z}_e$ sans bloquer la membrane, en veillant à ce que le signal envoyé au HP soit suffisamment faible pour que la membrane ne bouge pas.

5 Étude fréquentielle de l'impédance du HP - mesure de m et λ

Pour mesurer $\underline{Z}$, on utilise le montage précédent le HP étant débloqué.

Proposer un protocole pour déterminer la réponse fréquentielle de l'impédance du HP, et plus précisément déterminer $|Z(\omega)|$ en fonction de ω

A partir du graphe obtenu déterminer :

- ✗ La pulsation de résonance ω_r , en déduire la masse m de l'équipage.
- ✗ La bande du pic de résonance $\Delta\omega$, en déduire le facteur de qualité Q ainsi que le coefficient de frottements λ .

On veillera à insérer un amplificateur entre le GBF et le HP afin que l'impédance motionnelle, que l'on cherche à mettre en évidence, soit suffisamment grande.

5.1 Diagramme de Rayonnement du HP

Le diagramme diagramme de rayonnement d'un HP, obtenu en mesurant l'intensité sonore émise par le HP à une distance r fixée (se placer dans la zone du rayonnement du HP, c'est à dire dans le cas où $r \gg \lambda$) pour différentes valeurs de θ , comme représenté figure (7).

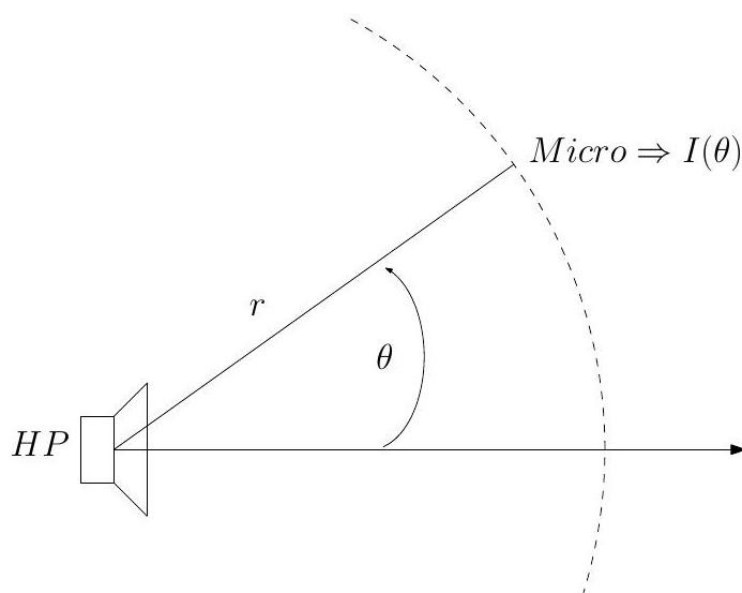


Figure 7 – Protocole pour tracer le diagramme de rayonnement d'un HP

La courbe obtenue, en traçant $I(\theta)$ en fonction de θ est appelée diagramme de rayonnement.

Suivant la taille de l'enceinte, la courbe polaire obtenue présente deux lobes ou se présente sous la forme d'un cardioïde, comme indiqué figure (8).

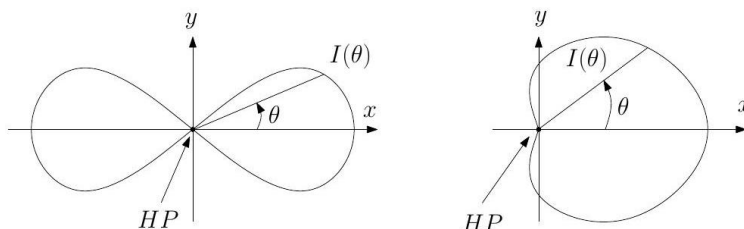


Figure 8 – Allures des diagrammes de rayonnement d'un HP

5.2 Rendement du HP

Pour déterminer le rendement du HP, on utilise un sonomètre : dispositif mesurant le niveau sonore d'une onde acoustique :

$$I_{dB} = 10 \log \left(\frac{\langle \|\vec{\Pi}_a\| \rangle}{I_0} \right)$$

- ✗ Mesurer au sonomètre le niveau sonore en H, comme indiqué figure (9).
- ✗ En déduire la puissance acoustique par unité de surface en H .
- ✗ En supposant l'émission isotrope sur le cône de rayonnement $\theta \in [0, \theta_m]$, θ_m étant un angle que l'on définira, en déduire la puissance P totale rayonnée par le HP.
- ✗ Proposer un protocole pour mesurer la puissance électrique reçue par le HP.
- ✗ En déduire le rendement du HP.

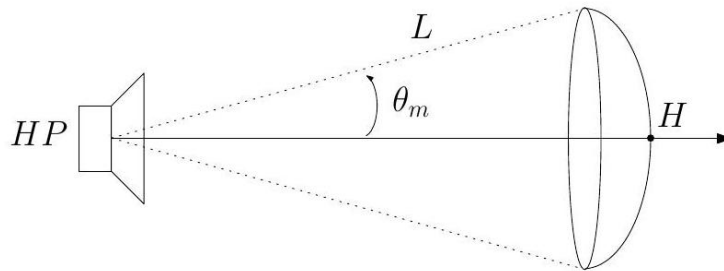


Figure 9 – Protocole pour déterminer le rendement d'un HP

On donne : Aire d'un calotte sphérique de demi-angle au sommet θ_m : $2\pi L^2 (1 - \cos \theta_m)$