

VII – Le haut-parleur

L'objectif de ce TP consiste à étudier les différentes caractéristiques d'un haut-parleur de puissance modérée. On confrontera notre modèle aux résultats expérimentaux en mesurant : l'inductance propre L et la résistance R de la bobine, le produit Bl (champ magnétique de l'aimant permanent, longueur du fil enrobé), la raideur k de la membrane, la masse m de l'équipage mobile...

Matériel à disposition :

- 1 Oscilloscope numérique Keysight avec câbles coaxiaux, et T...
- 1 interface Sysam-SP5 avec PC équipé de Latis-Pro.
- 1 GBF
- 1 sonomètre et 1 microphone
- 1 alimentation RAD 88.
- 1 émetteur et 1 récepteur US montés sur potence et noix.
- 2 multimètres.
- Un jeu de masse de 10 à 100g (Possibilité de monter à 300g)
- Les différentes notices des appareils de mesure.
- 1 Support élévateur

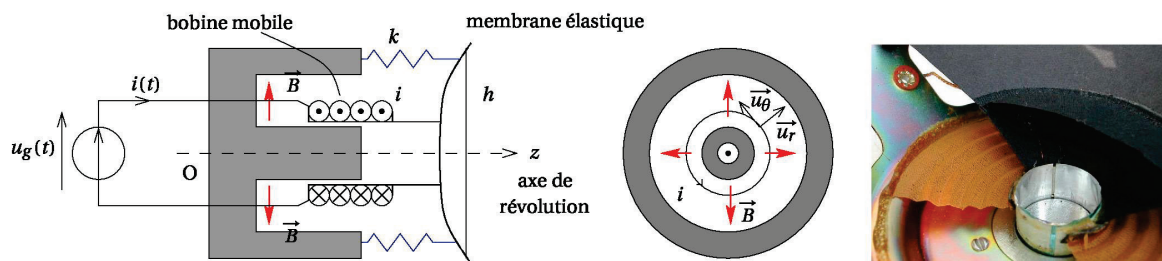
I – Présentation

I-1) Document 1 : Modèle du haut-parleur

Lorsque la bobine d'un haut-parleur est alimentée par une source de tension $u_g(t)$, elle est traversée par un courant $i(t)$. La bobine parcourue par un courant $i(t)$ plongée dans un champ magnétique B est donc soumise aux forces de Laplace : $\vec{F}_l = -Bli \vec{u}_z$ qui la met en mouvement.

La mise en mouvement de l'ensemble équipage mobile {bobine + membrane} engendre une onde sonore par déplacement de l'air au voisinage de la membrane. C'est l'action de l'air sur la membrane qui est représentée par la force de frottement visqueux : $\vec{F}_f = -\lambda \vec{v}$.

Le circuit électrique qui constitue la bobine et qui est en mouvement ($\vec{v} = \frac{dz}{dt} \vec{u}_z$) dans un champ magnétique permanent $\vec{B}$ est le siège d'un phénomène d'induction ; une force électromotrice induite $e(t)$ apparaît.



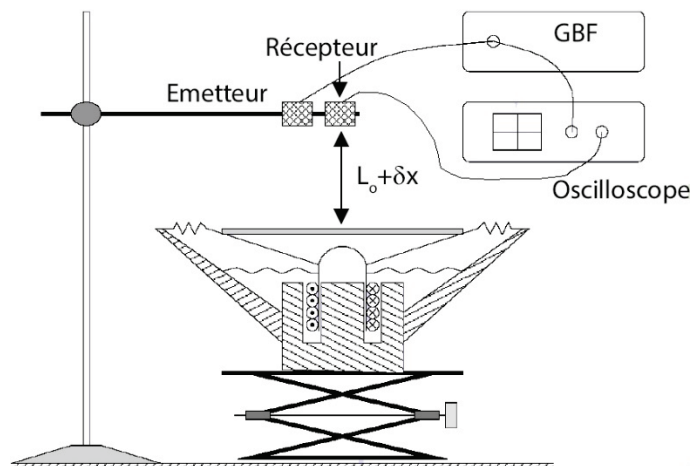
Un haut-parleur est un dispositif fonctionnant sur le principe d'un couplage électromagnétique : l'énergie électrique fournie par le générateur est transformée en énergie mécanique, puis en énergie sonore. Selon le modèle étudié, le comportement d'un haut-parleur électrodynamique est régi par deux équations électromagnétiques couplées :

$$\text{Equation mécanique : } m \frac{dv}{dt} + \lambda v + kz = -Bli \Leftrightarrow \frac{d^2 z}{dt^2} + \frac{\omega_0}{Q} \frac{dz}{dt} + \omega_0^2 z = -\frac{Bli}{m} \text{ où } Q = \frac{\sqrt{km}}{\lambda}$$

$$\text{Equation électrique : } L \frac{di}{dt} + Ri + e_{ind} = u(t) \text{ avec } e_{ind} = -bli$$

II – Mesures de k et Bl

II-1) Mesure de k



Le haut-parleur est posé sur un support élévateur, pavillon vers le haut. Afin de mesurer précisément le déplacement de la membrane on utilise une paire Émetteur-Récepteur d'ultrasons à 40 kHz. L'émetteur (alimenté par le GBF en sinusoïdal à 40 kHz) émet une onde sonore harmonique, détectée par le récepteur. Notons $c = 340 \text{ m/s}$ la célérité de l'onde sonore. Lorsque le haut-parleur se déplace de δx les signaux de l'émetteur et du récepteur s'en trouvent décalés dans le temps de :

$$\delta\tau = 2 \frac{\delta x}{c}$$

Il s'agit de mesurer le déplacement δx de l'équipage mobile à l'équilibre lorsqu'on place une surcharge de masse m sur le haut-parleur. À l'équilibre, la force de rappel du ressort équivalent doit compenser le poids de la surcharge :

$$k\delta x = mg$$

- Mettre en œuvre le montage proposé dédié à la mesure du déplacement δx .
- Ajuster la fréquence du GBF autour de 40 kHz afin d'avoir un signal d'amplitude maximale au niveau du récepteur.
- Adapter la sensibilité horizontale et verticale de l'oscilloscope afin de maximiser la précision de vos mesures.
- Compléter le tableau suivant : on effectuera les mesures en deux séries. Entre les deux séries modifier la position du récepteur et la hauteur du support élévateur d'au moins une longueur d'onde.
- Donnez la valeur moyenne de k avec son incertitude.

m (g)	100	150	200		100	150	200
δt (s)							
δx (m)							
k (N/m)							

II-2) Mesures de Bl

Lorsque l'on dépose une surcharge m sur l'équipage mobile, celui-ci s'abaisse. L'idée est de faire circuler un courant continu I dans le haut-parleur qui va créer une force de Laplace proportionnelle à Bl . Cette force fait remonter l'équipage mobile jusqu'à la position initiale. À l'équilibre la force de Laplace compense le poids de la surcharge : $mg = IBl$ où $l = 2\pi aN$. On parle de méthode par compensation.

La mesure de l'intensité sera faite à l'aide d'un ampèremètre (calibre A/mA). On commencera par le calibre 10A puis si nécessaire on passera sur celui en mA.

La méthode de mesure est la même que précédemment

- Déposer successivement les masses proposées puis compenser à l'aide du courant adéquat. Vérifier que le courant tende à soulever la membrane, sinon inverser les branchements.
- Compléter le tableau suivant : couper le courant et retirer la masse dès que vous avez pris la mesure.

m (g)	100	150	200
I (A)			
Bl (Tm)			

- Calculer la moyenne Bl de ces 3 valeurs puis l'incertitude-type sur la mesure de Bl .

III – Mesures de R et L

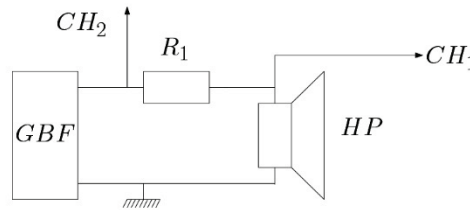
III-1) Au RLC-mètre

Vous disposez :

- D'un multimètre avec fonction Ω -mètre pour une mesure en courant continue la résistance du bobinage.
- D'un RLC-mètre pour une mesure de l'inductance à 1 kHz.
- Déterminer R et L et estimer les incertitudes à l'aide de la notice des appareils.
- A partir de quelle fréquence la partie inductive de l'impédance électrique n'est-elle plus négligeable devant la partie résistive ?

III-2) A l'aide de Sysam

Pour mesurer $\underline{Z}_e$, il faut utiliser un HP bloqué (dont la membrane ne bouge plus). Le montage donné par la figure permet de déterminer $\underline{Z}_e$ à l'aide de Latis-Pro ou du menu mathématiques de l'oscilloscope.



- Proposer un protocole permettant de déterminer R et L

Noter, 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.

IV – Mesures de m et λ

IV-1) Etude fréquentielle

I-1) Document 2 : Impédance motionnelle

L'impédance du haut-parleur, est par définition : $\underline{Z} = \frac{\underline{E}}{\underline{I}}$. Les équations mécanique et électrique, en représentation complexe, s'écrivent :

$$\begin{cases} \underline{E} = (R + jL\omega)\underline{I} - j\omega B l \underline{z} \\ \underline{z} \left(-\omega^2 + \frac{j\omega\omega_0}{Q} + \omega_0^2 \right) = -\frac{Bl}{m} \underline{I} \end{cases}$$

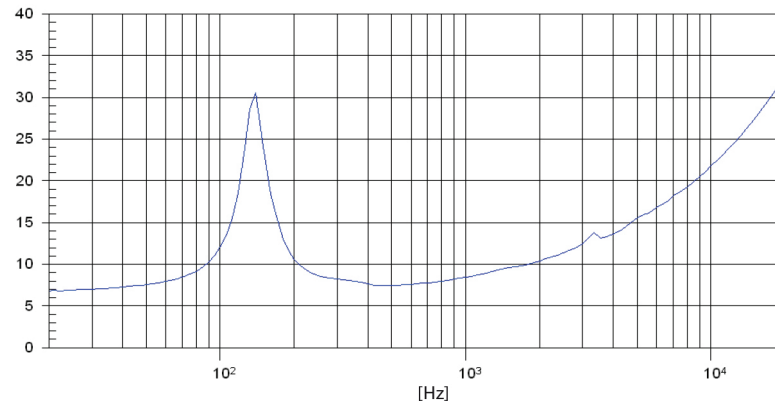
$$\Rightarrow \underline{E} = (R + jL\omega)\underline{I} + \frac{j\omega B^2 l^2}{m \left(-\omega^2 + \frac{j\omega\omega_0}{Q} + \omega_0^2 \right)} \underline{I} \Rightarrow \underline{Z} = R + jL\omega + \frac{\frac{j\omega B^2 l^2}{m\omega_0^2}}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^2 + \frac{j\omega}{Q\omega_0}}$$

$$\Rightarrow \underline{Z} = R + jL\omega + \frac{\frac{j\omega B^2 l^2}{\lambda Q \omega_0}}{1 + \frac{j\omega}{Q\omega_0} - \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^2} \Rightarrow \underline{Z} = \underline{Z}_e + \underline{Z}_m \text{ où } \begin{cases} \underline{Z}_e = R + jL\omega \\ \underline{Z}_m = \frac{B^2 l^2}{\lambda} \frac{\frac{j\omega}{Q\omega_0}}{1 + \frac{j\omega}{Q\omega_0} - \left(\frac{\omega}{\omega_0} \right)^2} \end{cases}$$

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, appelée impédance motionnelle $\underline{Z}_m$.

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

(Vous avez la notice de ce Haut-parleur sur le site pcjoffre.fr)



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 $f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$

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 .

Pour mesurer $|Z|$, 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 $|Z(f)|$ en fonction de f .
- Représenter graphiquement $|Z(f)|$.
- A partir du graphe obtenu déterminer :
 - o La pulsation de résonance, en déduire la masse m de l'équipage.
 - o La bande passante du pic de résonance Δf , en déduire le facteur de qualité Q ainsi que le coefficient de frottements λ .

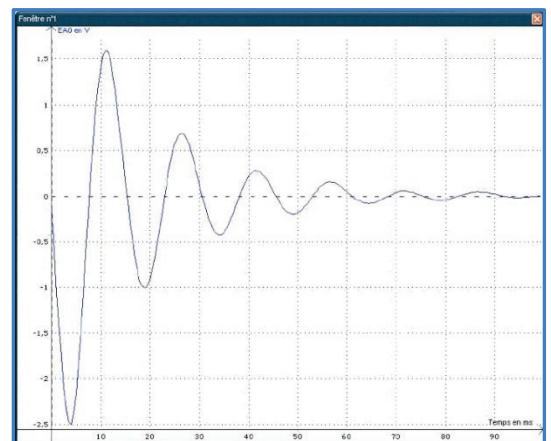
On veillera à insérer un amplificateur entre le GBF et le HP afin que l'impédance motionnelle, que l'on cherche à mettre en évidence, soit suffisamment grande.

IV-2) Réponse indicielle

Lorsqu'on excite l'équipage mobile (par exemple en le frappant délicatement avec un stylo), il se met à osciller. Le mouvement pseudopériodique amorti peut-être relevé par l'intermédiaire de la force électromotrice induite qui apparaît aux bornes de la bobine lors de son mouvement dans le champ magnétique de l'aimant.

- Démonter le dispositif de mesure précédent.
- Relier le haut-parleur à l'interface Sysam.
- Faire un premier test puis ensuite optimiser les réglages à l'aide d'une synchronisation.
- À l'aide des curseurs mesurer la pseudo-période du mouvement et le décroissement logarithmique.
- En déduire la valeur des paramètres de l'oscillateur ω_0 et Q , puis la valeur de m et λ à l'aide de la valeur de k déterminée précédemment.

Remarque : Vous pouvez aussi utiliser le modèle « Sinus amorti » sous Latis-Pro.



Document 3 : Décrément logarithmique

On rappelle que le décrément logarithmique est défini par :

$$\delta = \text{Ln} \left(\frac{x(t)}{x(t+T)} \right)$$

On démontre alors que ;

$$Q = \sqrt{\frac{\pi^2}{\delta^2} + \frac{1}{4}} \sim \frac{\pi}{\delta} \text{ si } Q \gg 1$$

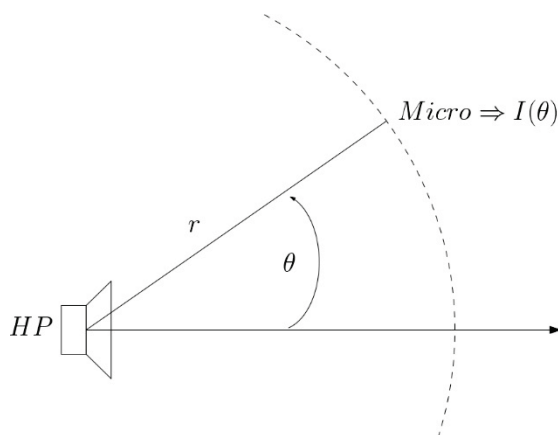
IV-3) Conclusion sur l'étude électrique et mécanique du HP

- Rassemblez dans un tableau les différentes valeurs obtenues pour votre haut-parleur. Comparez-les aux valeurs « théoriques » de la fiche constructeur de votre haut-parleur (A trouver sur le net).

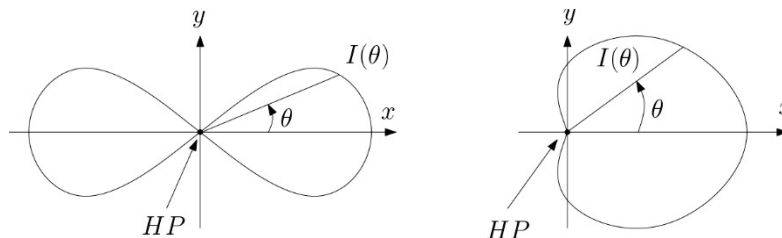
	$k \text{ (N m}^{-1}\text{)}$	$Bl \text{ (Tm)}$	$Q_{\text{méca}}$	$\omega_{0,m} \text{ (s}^{-1}\text{)}$	$\Delta\omega \text{ (s}^{-1}\text{)}$	$m \text{ (g)}$	$\lambda \text{ (kg s}^{-1}\text{)}$	$R \text{ (}\Omega\text{)}$	$L \text{ (mH)}$
Mesures									
Fiche technique									

V – Diagramme de rayonnement

Le diagramme de rayonnement d'un HP est 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 ci-dessous.



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.



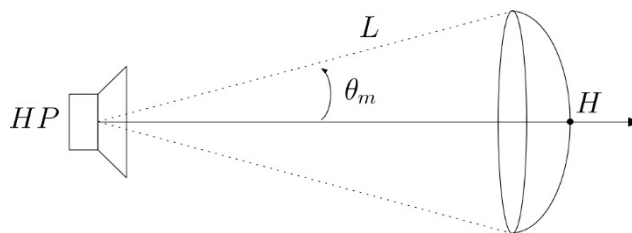
- Décrire le protocole utilisé.
- Représenter la courbe de rayonnement pour deux valeurs de r . Conclure sur la dépendance par rapport à r de l'onde sonore produite par le haut-parleur.

VI - Rendement du HP

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

$$I_{dB} = 10 \log \left(\frac{\langle \Pi \rangle}{I_0} \right) \text{ où } \Pi \text{ est le vecteur de Poynting sonore}$$

- Mesurer au sonomètre le niveau sonore en H pour une fréquence pas trop « stridente » :



- 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_a totale rayonnée par le HP sachant que l'aire d'une calotte sphérique est :

$$S_m = 2\pi L^2(1 - \cos \theta_m)$$
- Proposer un protocole pour mesurer la puissance électrique reçue par le HP.
- En déduire le rendement défini par :

$$\eta(\omega) = \frac{P_a}{P_{elec}}$$

Le rendement dépend de la fréquence, refaites les manipulations pour d'autres fréquences et caractériser votre haut-parleur par un des termes suivants :

- o Woofer (restitue les basses fréquences)
- o Medium (restitue les fréquences moyennes dans l'audible)
- o Tweeter (restitue les hautes fréquences)

Ci-dessous, la courbe de sensibilité d'une enceinte formée d'un woofer et d'un boomer. Afin d'obtenir une bonne restitution musicale la plupart des enceintes comportent plusieurs HP. La sensibilité est la mesure de pression sonore d'un HP (ou d'une enceinte) à 1m de distance pour une puissance électrique de 1W en fonction de la fréquence.

