Le haut-parleur du physicien et celui du futur élève de seconde

par R. MOREAU
33170 Gradignan

1. INTRODUCTION

Nous allons tout d'abord montrer comment déterminer rapidement, simplement et de manière fiable, tous les élément du modèle d'un haut parleur courant, à l'aide d'expériences que chacun peut réaliser dans le laboratoire de son lycée. Nous donnerons des exemples numériques concernant deux haut-parleurs très différents, distribués par Électrome : l'un, que nous noterons H.P.1 est un appareil de qualité (Philips 3.349.520), à la suspension très souple : c'est un haut-parleur à large bande (« woofer») de prix relativement élevé (110 F) ; l'autre (HP2) est un appareil de bas de gamme (Bukdoo 100 SF 05, 8 Ω, 5 W), fabriqué en Corée, peu coûteux (29 F) mais très intéressant lui aussi, et mieux adapté, même, à certaines démonstrations expérimentales.

Dans la pratique du laboratoire, les choses ne sont pas aussi simples que dans les problèmes d'examen (elles sont aussi, heureusement, beaucoup plus belles) : il y a souvent plusieurs voies (plus ou moins rapides, plus ou moins précises) pour atteindre une grandeur inconnue, aussi proposerons-nous des expériences redondantes permettant de crontrôler la validité des premières déterminations. La démarche exposée ici fait peu appel aux mathématiques, car un des objectifs visés est sa transposition matérielle en classe de Seconde ; elle se propose ayant tout d'être rapide et assez précise. Elle se prête par ailleurs à l'utilisation de logiciels performants, comme Actilab de Jeulin ou Regressi de Micrelec etc., qui, par des voies différentes, permettent d'estimer rapidement des paramètres pertinents que les méthodes classiques sont un peu plus longues à appréhender.

En fin d'article, nous proposons un ensemble de démarches pédagogiques qui nous semblent compatibles avec les projets de programme du G.T.D. de Physique pour la classe de Seconde publiés en janvier 1992 dans le B.U.P. nº 740.

2. MODÉLISATION DU HAUT-PARLEUR

2.1. Partie mécanique

La partie mobile est supposée se déplacer en translation ; son déplacement à l'instant t est x(t). Il s'agit d'une modélisation car les différentes zones de la membrane et du spider ont des amplitudes de vibration différentes. En fait x(t) est le déplacement de la bobine. Celui de tout point M de l'équipage mobile est alors de la forme a(M).x(t) avec $0 \leq a \leq 1$. De ce fait, si nous remplaçons par la pensée le système réel par un modèle en translation dont le déplacement de tous les points est x(t), système ayant les mêmes fréquences caractéristiques que le haut-parleur réel, nous devons affecter à l'équipage mobile une masse m qui est une masse «effective» inférieure à la masse réelle m* que l'on trouve en pesant, après l'avoir découpé, tout ce qui se déplace peu ou prou.

La constante de rappel de l'équipage mobile est notée k.

Nous admettons que l'action de l'air sur la membrane introduit une «force de frottement visqueux» d'intensité égale à – f(dx/dt) ou – f $\dot{x}$ ou – fv, $v = \dot{x}$ étant la vitesse de la bobine.

Classiquement, nous notons ω_0 la pulsation propre de l'équipage mobile, avec la relation :

$$\omega_0^2 = \frac{k}{m}$$

Nous introduisons enfin la constante d'amortissement α, telle que :

$$2\,\alpha\,\omega_0 = \frac{f}{m}$$

Dans ces conditions, nous savons que si le circuit électrique du haut-parleur est ouvert, les variations de x sont régies par l'une ou l'autre des équations équivalentes :

$$E_1 : m\ddot{x} + f\dot{x} + kx = 0 \;;\; E_2 : \ddot{x} + 2\,\alpha\,\omega_0\,\dot{x} + \omega_0^2\,x = 0$$

2.2. Partie électrique

La bobine a une résistance R et une inductance L.

2.3. **Couplage électro-magnétique**

Nous supposons que, dans l'entrefer où se meut la bobine, le champ magnétique est uniforme et nous notons B son intensité. La longueur totale du fil de cuivre constituant la bobine est noté 1.

L'intensité du courant qui parcourt la bobine étant notée i, nous choisissons les orientations du circuit électrique et de l'axe des déplacements de manière que la force algébrique de Laplace qui s'exerce sur la bobine s'écrive $F_L = B\ i\ l$; dans ces conditions, on sait que lorsque la bobine a une vitesse v, elle est le siège d'une f.é.m. algébrique $e = -B\ l\ v$.

2.4. **Quelques résultats connus**

Lorsqu'une tension u est appliquée au haut-parleur (figure 1) on peut écrire :

$$E_3 : u - B\ l\ \dot{x} = R\ i + L\frac{di}{dt} ; E_4 : m\ \ddot{x} + F\ \dot{x} + k\ x = B\ i\ l$$

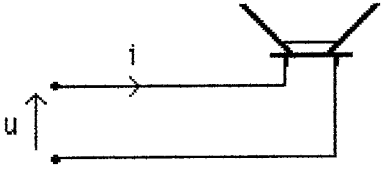

Figure 1

En régime sinusoïdal, l'élimination de x, conduit à l'expression de l'impédance $\underline{Z}$ du haut parleur :

$$\underline{Z} = R + j\ L\ \omega + \frac{(B\ l)^2}{f + j\left(m\omega - \frac{k}{\omega}\right)}$$

On voit que le couplage électromagnétique a pour effet d'ajouter à l'impédance électrique du circuit $(R + j\ L\ \omega)$, une impédance supplémentaire, appelée «impédance motionnelle», qui se réduit à l'expression réelle $(B\ l)^2/f$ lorsque la pulsation ω de la tension u est égale à la pulsation propre ω_0. En fait nous montrerons que $\underline{Z}$ qui est égale à R en courant continu, redevient réelle pour deux valeurs de la pulsation :

– pour une pulsation ω_1 très légèrement supérieure à ω_0, elle est égale à $R + (B\ l)^2/f$;

– pour une pulsation $\omega_2 > \omega_1$ que l'on détermine expérimentalement, elle est très légèrement supérieure à R.

3. DÉTERMINATION DES ÉLÉMENTS DU MODÈLE

3.1. Détermination de la constante de raideur k

Principe : On dépose au centre de l'équipage mobile une masse marquée μ de 50 g, par exemple, en laiton, correspondant à un poids P de 0,49 N. On mesure le déplacement x correspondant qui est généralement inférieur au millimètre. Il est possible d'utiliser des méthodes directes, soit à l'aide d'un vernier ou d'un pied à coulisse, soit en amplifiant mécaniquement le petit mouvement de la membrane. Nous utilisons ici une méthode acoustique indirecte facile à mettre en œuvre.

Sur l'équipage mobile (figure 2), nous disposons, sur un support prenant lui-même appui près de la bobine, un émetteur d'ultrasons, alimenté à 40,00 kHz par une tension sinusoïdale v(t). Un récepteur adapté, fixe, situé à une dizaine de centimètres au-dessus de l'émetteur, fournit le signal sinusoïdal s(t). Les tensions v(t) et s(t) sont appliquées à une oscilloscope qui est synchronisé sur v(t).

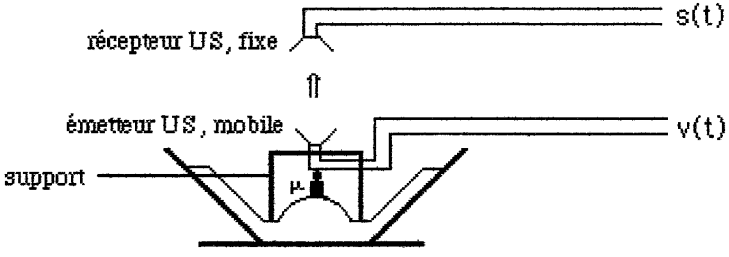

Figure 2

Supposons que l'on travaille à la température de 15° C : la longueur d'onde λ de l'onde ultrasonore émise est alors égale à 8,50 mm. Réglons la base de temps de l'oscilloscope de manière qu'une demi-période (ou une variation de phase de π radians) de v(t) corresponde à 8,5 carreaux. Lorsque, sous l'action du poids P de la masse μ, l'équipage mobile descend de x mm, la différence de phase entre v(t) et s(t) s'accroît de la quantité $2\pi(x/\lambda)$, ce qui se traduit sur l'écran de l'oscilloscope par un glissement de s(t) par rapport à v(t).

Comment un déphasage de π se traduit par un glissement de 8,5 carreaux, le glissement g qui correspond à un déplacement de l'équipage de x mm vaut : g (carreaux) = 2 . 8,5. (x/8,5) = 2 x. On obtient donc le résultat suivant :

Un déplacement de l'équipage mobile du haut parleur de 1,0 mm se traduit par un glissement de deux carreaux sur l'écran de l'oscilloscope ce qui correspond à une amplification de 20.

On apprécie donc le vingtième de millimètre de déplacement de la bobine.

Résultats

μ = 50 g ; pour HP1, $x_1 = 0{,}85$ mm $\Rightarrow k_1 = 5{,}8.10^2$ N/m

pour HP2, $x_2 = 0{,}35$ mm $\Rightarrow k_2 = 1{,}4.10^3$ N/m

3.2. Détermination du coefficient d'amortissement α

Principe : on relie simplement les bornes du haut-parleur à un oscilloscope, ou mieux à un oscilloscope à mémoire, ou, mieux encore, à un dispositif d'enregistrement couplé à une ordinateur par un interface convenable.

On dispose d'une perle en bois que l'on laisse tomber d'une dizaine de centimètres sur la partie centrale de l'équipage mobile ; elle y rebondit après l'avoir frappé (un fil très souple permet de ne pas la perdre). Au cours du choc, très bref, elle ne provoque pas de déplacement de l'équipage mobile mais lui communique seulement une vitesse initiale $v(0) = V_0$. Ensuite, la vitesse v de la bobine obéit à l'équation différentielle obtenue en dérivant l'équation E_2 :

$$\ddot{v} + 2\,\alpha\,\omega_0\,\dot{v} + \omega_0^2\,v = 0$$

Par conséquent v(t) est de la forme :

$$v(t) = \frac{V_0}{\cos\psi}\, e^{-(\alpha\,\omega_0 t)} \cos\left(\omega'_0\, t + \psi\right), \text{ avec} \sin\psi = \alpha \text{ et } \omega'_0 = \omega_0\sqrt{1-\alpha^2} = \omega_0 \cos\psi$$

Or, ce que lon observe sur l'écran de l'oscilloscope ou de l'ordinateur, c'est la f.é.m. induite e = Blv (au signe près), on a donc directement l'image de la vitesse de la bobine.

Si l'on pose $T'_0 = 2\pi/\omega'_0$, les maximums V_1, V_2,... V_n de cette vitesse forment une suite :

$$V_1, V_2 = V_1 e^{-(\alpha \omega_0 T_0)} = V_1 e^{-\left(2\pi \frac{\alpha}{\sqrt{1-\alpha^2}}\right)} = V_1 e^{-2\pi \tan \psi}$$

$$V_3 = V_1 e^{-4\pi \tan\psi}, V_4 = V_1 e^{-6\pi \tan \psi}, ..., V_{n+1} = V_1 e^{-2n\pi \tan\psi}$$

En comparant les amplitudes de deux maximums (ou de deux minimums) on en déduit très rapidement la valeur de tan ψ, puis de $\alpha = \sin \psi$.

Résultats

La photo n°1 est relative à un haut-parleur du même type que HP1. Sur l'écran de l'oscilloscope, l'amplitude du premier maximum est égale à 4,05 cm, celle du second à 0,80 cm.

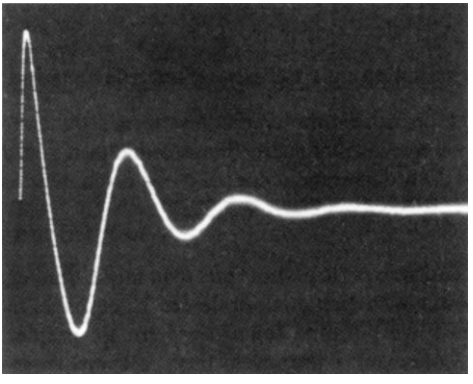

Photo n° 1 : oscillogramme de la f.é.m. e(t) pour H.P.1 en circuit ouvert.

Donc : exp (2π tan ψ) = 4,05 : 0,8 = 5,06 ; $\Rightarrow$ tan ψ = 0,258.

On en déduit la valeur de α_1 : $\alpha_1 = 0,25$.

La photo n° 2 concerne un haut-parleur du type de H.P.2. Les amplitudes des maximums successifs sont :
4,05 cm ; 2,81 cm ; 1,96 cm ; 1,36 cm ; 0,95 cm ; 0,67 cm ; 0,46 cm...
On en déduit : exp (2π tan ψ) = $\sqrt{\frac{4,05}{0,46}}\ \sqrt{8,8}$ = 1,44 ; soit :
$\alpha_2 = \sin \psi = 5,8.10^{-2}$.

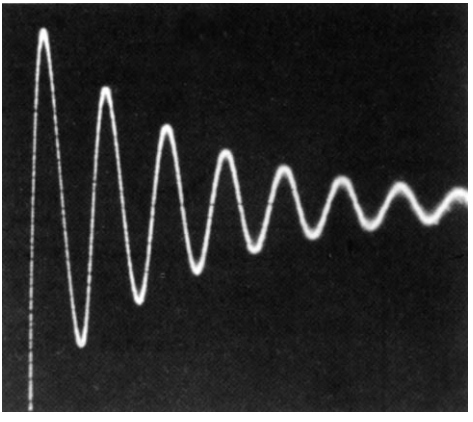

Photo n° 2 : e(t) pour H.P.2 en circuit ouvert.

3.3 Détermination de la pulsation propre ω_0

Principe : on dispose de l'enregistrement de v(t) en régime libre. On peut déterminer la pseudo-période T'_0 qui est reliée à ω_0 par la relation : $T'_0 = 2\pi / \left\{\omega_0 \left(\sqrt{1-\alpha^2}\right)\right\} = 2\pi / \left(\omega_0 \cos \psi\right)$.

On en déduit l'expression de ω_0 et donc le principe de sa mesure : $\omega_0 = \dfrac{2\pi}{T'_0 \cos \psi}$.

Remarque n° 1 : Les logiciels actuels de traitement automatique des données permettent de déterminer très rapidement et avec une très bonne précision ces deux paramètre α et ω_0, mais le seul enregistrement des valeurs numériques de la tension e(t) permet aussi, grâce aux calculs simples que nous avons indiqués, de parvenir au résultat. En ce qui concerne H.P.2, par exemple, on constate très bien que les maximums (ou les minimums, ou les valeurs absolues de l'ensemble des extremums) forment une progression géométrique dont il est aisé de déterminer la raison.

Remarque n° 2 : nous avons déjà dit au paragraphe 2.4. (nous le justifierons plus loin) que l'impédance du haut-parleur redevient réelle pour la première fois (en partant de la fréquence nulle), pour une pulsation ω_1 très proche de ω_0 : cette remarque permet donc de déterminer très rapidement ω_0.

Il suffit en effet de réaliser le montage de la figure 3 pour mesurer, à l'aide d'un fréquencemètre, la fréquence f_1 pour laquelle u(t) et i(t) sont en phase.

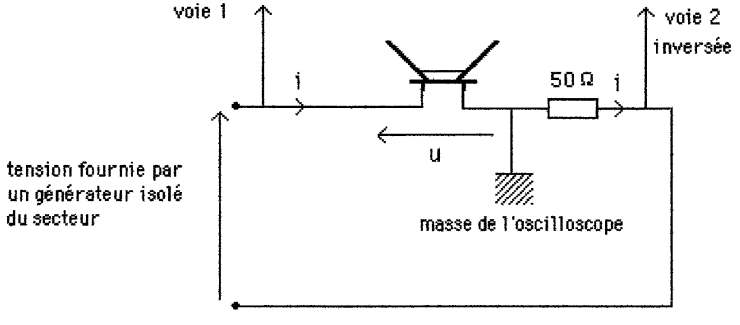

Figure 3

Résultats

Pour H.P.1, T'_{01} = 23,0 ms ; puisque α_1 = 0,25, on en déduit T_{01} = 22,3 ms et f_{01} = 44,8 Hz soit :

$$\omega_{01} = 282 \text{ rad/s}$$

Vérification : avec le montge de la figure 3, u et i sont en phase pour f_{11} = 45 Hz.

Pour H.P.2., T'_{02} = 7,1 ms ; puisque $\alpha_2 = 5{,}5.10^{-2}$, $f_{02} \approx f'_{02}$ = 141 Hz soit :

$$\omega_{02} = 9{,}0.10^2 \text{ rad/s}$$

Vérification : l'ensemble fréquencemètre + oscilloscope, permet d'estimer (à 1 Hz près) que c'est pour la fréquence f_{12} = 142 Hz que Z est réelle.

Conclusion : la concordance est très bonne, surtout si l'on dispose de valeurs numériques provenant de l'utilisation d'un logiciel adapté, mais même dans ce cas, la méthode consistant à chercher la coïncidence de phase de u(t) et i(t) est plus rapide.

3.4. Calcul du coefficient de frottement visqueux f

Principe : $f = 2\,\alpha\,\omega_0\,m = 2\,\alpha\,\omega_0\,\frac{k}{\omega_0^2} = \frac{2\,\alpha\,k}{\omega_0}$

Résultats :

Pour H.P.1 : $f_1 = 1{,}0$ kg/s ; pour H.P.2 : $f_2 = 0{,}18$ kg/s.

3.5. Calcul de la masse effective m

Principe : $m = k/\omega_0^2$; **Résultats** : $m_1 = 7{,}1$ g ; $m_2 = 1{,}5$ g. (En pesant l'ensemble mobile, on trouve respectivement $m_1^* = 9{,}6$ g et $m_2^* = 1{,}75$ g).

3.6. Détermination du produit (Bl)

Principe : Il s'agit d'une manipulation recommandée par l'Inspection Générale dans le cadre des programmes actuels des classes terminales C et E. Pour la réaliser, nous proposons ici une nouvelle méthode dont la précision est bonne et dont nous estimons les résultats reproductibles à 3% près pour des bonnes valeurs de paramètres (figure 4).

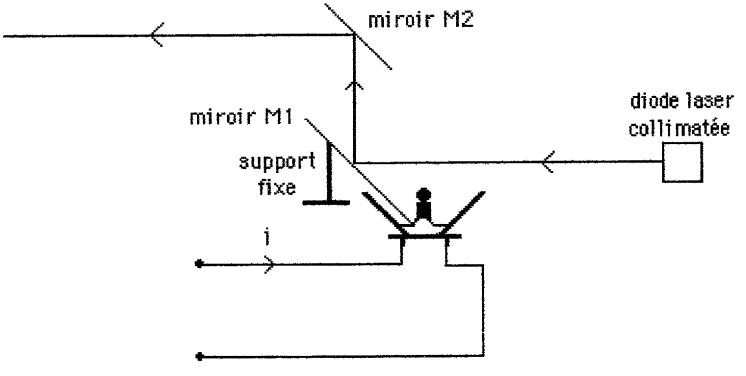

Figure 4

Un miroir parallélépipédique de 1,5 cm × 10 cm (découpé au diamant dans un miroir du commerce) s'appuie d'une part sur le bas de l'équipage mobile et d'autre part sur un support fixe. Ce miroir reçoit la lumière parallèle d'une diode laser collimatée. On repère la position

du faisceau lumineux lorsque l'équipage est libre et le courant nul, soit directement sur le plafond de la salle, soit sur écran plus éloigné, en utilisant un deuxième miroir. En plaçant sur l'équipage mobile une masse marquée μ de 50 g, par exemple, on obtient, pour une bonne inclinaison du ou des miroirs, un déplacement rectiligne du spot témoin de 20 ou 30 cm (tout dépend des dimensions de la pièce dans laquelle on réalise l'expérience). On mesure alors l'intensité du courant nécessaire pour que la trace lumineuse reprenne sa place initiale (en ramenant i à zéro et en enlevant la masse μ, on doit également retrouver le repère de départ, c'est le critère de fidélité). Lorsque l'on a retrouvé ce repère, si P est le poids de la masse marquée, on a : $P = B\,i\,l$.

Résultat :

$\mu = 50$ g ;

H.P.1 : on retrouve le repère initial pour $i_1 = 0{,}14$ A $\Rightarrow (Bl)_1 = 3{,}5$ Tm ;

H.P.2 : on retrouve le repère pour $i_2 = 0{,}19$ A $\Rightarrow (Bl)_2 = 2{,}6$ Tm.

Remarque : Le produit Bl est la véritable constante de couplage électromécanique de la machine simple qu'est le haut parleur. La détermination précédente ne préguje rien des propriétés du spider ou de la menbrane puisque l'équipage revient à sa position initiale : c'est une méthode de zéro.

3.7. Mesure de B_{moyen}

Principe : A partir de la détermination précédente, il faut malheureusement sacrifier un haut-parleur de chaque type et en débobiner l'enroulement pour mesurer la longueur l de fil de cuivre.

Résultats : H.P.1 : $l_1 = 7{,}25$ m $\Rightarrow B_1 = 0{,}48$ T ;
H.P.2 : $l_2 = 3{,}31$ m $\Rightarrow B_2 = 0{,}79$ T (!).

3.8. Premier contrôle de la cohérence des résultats précédents

Principe : Par des mesures électriques (de valeurs efficaces de tension et de courant), on détermine la quantité $\rho = (Bl)^2/f$ homogène à une résistance. Pour cela on utilise le montage de la figure 3, et pour la plus petite fréquence pour laquelle u et i sont en phase, on note leurs valeurs efficaces U et I. Nous avons déjà vu au § 2.4. que l'impédance $\underline{Z} = \underline{U}/\underline{I}$ est alors réelle et égale à $R + \rho$.

Il est d'ailleurs possible de relever l'ensemble de la courbe donnant $\underline{Z}(f)$ dans le plan complexe, en mesurant pour diverses fréquences le module U/I et l'argument de $\underline{Z}$. Ce dernier est égal au déphasage de i par rapport à u : pour H.P.1, par exemple, on trouve le diagramme ayant la forme dessinée sur la figure 5.

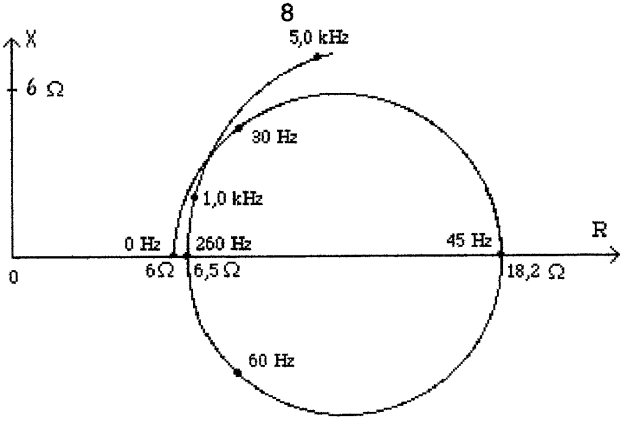

Figure 5 : Diagramme de H.P.1, haut-parleur «de 6,5 Ω».

Ce diagramme nous montre que pour H.P.1, notre modèle simple est approximativement valable jusqu'à une fréquence de 1 kHz, car l'expression de $\underline{Z}$ rappelée au § 2.4. conduit bien à un diagramme (dit de Kennely) commençant par une courbe très proche d'un cercle et qui, pour les fréquences élevées (supérieures ici à 260 Hz), se prolonge par un segment de droite verticale. Or la figure 6 nous montre que pour f > 0,5 kHz, la partie réelle de l'impédance, qui devrait rester constante, augmente : cela est dû - au moins en partie - aux pertes par hystérésis et par courants de Foucault dans le circuit magnétique massif traversé par le champ magnétique variable produit par la bobine ; de ce fait R augmente avec la fréquence.

Pour H.P.2, plus petit, le modèle reste valable jusqu'à 2 kHz (figure 6).

Ensuite, comme pour H.P.1, R augmente mais la partie imaginaire de $\underline{Z}$ ne croît que très lentement (l'inductance L diminue car les courants de Foucault créent un flux antagoniste). De ce fait, pour H.P.2, la partie du diagramme correspondant aux fréquences élevées reste sous la première partie relative aux basses fréquences.

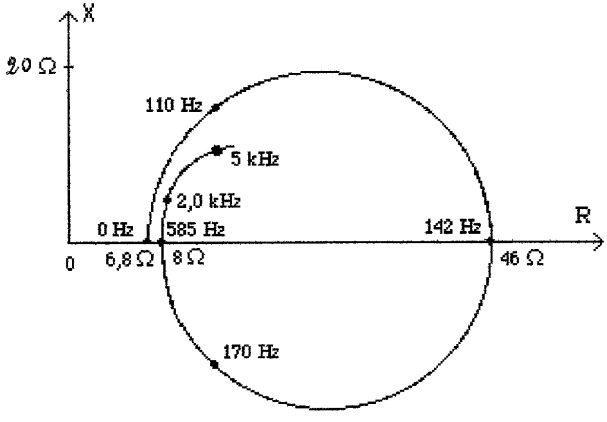

Figure 6 : Diagramme de H.P.2, haut-parleur «de 8 Ω».

Résultats : Pour H.P.1, alors que le calcul de ρ à l'aide des résultats précédents (Bl = 3,5 Tm et f = 1,0 kg/s) donne $\rho_1 = 12{,}2\ \Omega$, les mesures électriques donnent exactement le même résultat : en effet, u et i sont en phase pour la fréquence 45 Hz et on a alors $Z = R_1 + \rho_1 = 18{,}2\ \Omega$; par ailleurs la mesure de R_1 à l'ohmmètre donne $R_1 = 6{,}0\ \Omega$, donc $\rho_1 = 12{,}2\ \Omega$.

Pour H.P.2, les déterminations précédentes permettent de donner à la grandeur $\rho = (Bl)^2/f$ la valeur $\rho_2 = 38\ \Omega$. Les mesures électriques ($U/I = 46\ \Omega$ à la fréquence $f_{12} = 142$ Hz pour laquelle $\underline{Z}$ est réelle ; $R_2 = 6{,}8\ \Omega$), donnent de leur côté $\rho_2 \approx 39\ \Omega$.

L'accord entre les deux résultats est donc excellent mais cela est dû au fait que le coefficient f a pu être déterminé de manière précise grâce à un relevé des valeurs de e(t) à l'ordinateur ; un oscilloscope à mémoire conduit à une mesure de α moins précise.

3.9. **Détermination de l'inductance L**

Principe : Mesurons la deuxième fréquence, f_2, pour laquelle $\underline{Z}$, après avoir été capacitive, redevient réelle. Comme f_2 est nettement supérieure à f_0 pour laquelle $m\omega = k/\omega$, nous pouvons, au voisinage de f_2, négliger k/ω, devant $m\omega$ dans l'expression de $\underline{Z}$.

$$\text{De ce fait, } \underline{Z} \approx R + j L\omega + \frac{(B l)^2}{f + j m \omega} \approx R + j\left(L\omega - \frac{B^2 l^2}{m\omega}\right)$$

La dernière écriture vient de ce qu'au voisinage de la fréquence f_2, le terme m ω est très supérieur (dix mille fois) au coefficient f. Dans ces conditions, pour la fréquence f_2 on a :

$$L = \frac{B^2 l^2}{m \omega^2}$$

Résultats :

Pour H.P.1, f_{21} = 260 Hz. On en déduit L_1 = 0,65 mH.

En ce qui concerne H.P.2, f_{22} = 585 Hz. On trouve alors L_2 = 0,33 mH.

3.10. **Discusion des approximations**

Nous avons admis que pour $\omega = \omega_0$, on pouvait négliger j L ω devant $R + (B l)^2/f$.

Pour H.P.1 cela revient à négliger une réactance de 0,18 Ω devant une résistance de 18 Ω, ce qui est parfaitement justifié, et, pour H.P.2, on néglige une réactance de 0,3 Ω devant une résistance de 39 Ω, ce qui est également légitime.

En fait, si au voisinage de ω_0, on pose $\omega = \omega_0 + \delta\omega$, on montre que $\underline{Z}$ peut s'écrire :

$$\underline{Z} = R + \frac{(B l)^2}{f} + j\left(L\omega_0 - \frac{(B l)^2}{\alpha f}\,\frac{\delta \omega}{\omega_0}\right)$$

Cette expression permet de montrer que le fait de confondre la fréquence f_1 pour laquelle l'impédance $\underline{Z}$ est réelle pour la première fois, avec la fréquence propre f_0, entraîne une erreur de 0,4 % pour H.P.1 et 0,04 % pour H.P.2. Ceci correspond à des différences indécelables avec les moyens dont nous disposons.

Nous en tirons la conclusions que pour $f < f_0$, l'inductance L joue un rôle négligeable.

3.11. Application : calcul de l'amortissement supplémentaire dû au courant induit

Nous avons vu qu'en régime libre, le système mobile oscille de manière plus ou moins amortie selon le type de haut-parleur, avec la pseudo pulsation $\omega'_0 < \omega_0$.

Dans ces conditions, nous pouvons négliger l'influence de L et les équations E_3 et E_4 du § 2.4 deviennent :

$$E_3 : u = R\,i + B\,l\,\dot{x}\ ;\ E_4 : m\,\ddot{x} + f\,\dot{x} + k\,x = B\,i\,l$$

Fermons simplement le circuit du haut-parleur sur une résistance extérieure R_{ext}, (figure 7). Posons $R_t = R + Rext$; puisque u = 0, l'équation E_3 devient encore : $R_t\,i = -\,B\,l\,\dot{x}$.

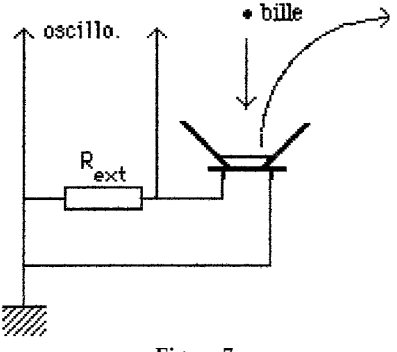

Figure 7

On peut alors remplacer i par son expression en fonction de x dans E_4 ; on obtient :

$$m\,\ddot{x} + \left(f + \frac{B^2\,l^2}{R_t}\right)\dot{x} + k\,x = 0 \Rightarrow m\,\ddot{v} + \left(f + \frac{B^2\,l^2}{R_t}\right)\dot{v} + k\,v = 0$$

On voit donc que le fait de faire débiter le haut-parleur dans une résistance extérieure, renforce le coefficient de frottement visqueux et amortit davantage les oscillations de l'équipage.

En utilisant une résistance extérieure de 10 Ω, par exemple, le coefficient d'amortissement α, déterminé selon la méthode exposée en 3.2, passe pour H.P.1 de la valeur $\alpha = 0{,}25$ à $\alpha' = 0{,}43$.

Pour H.P.2, avec R_{ext} = 10 Ω, α passe de 0,058 à α' = 0,18 (photo n° 3).

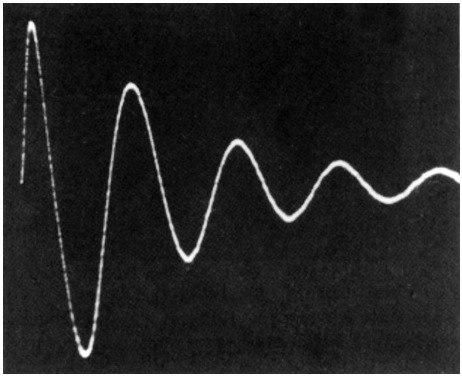

Photo n° 3 : H.P.2 débite dans R_{ext} = 10 Ω ; la tension observée vaut $R_{ext}/(R_{ext} + R).e(t)$.

Ces nouvelles expériences permettent aussi de contrôler une nouvelle fois avec succès les résultats précédents. On peut montrer en effet que l'on a :

$$(B\ l)^2 = 2\ (\alpha' - \alpha)\ \frac{k}{\omega_0}\ R_t$$

et tous les termes de cette équation sont mesurables.

Conclusion :

Nous espérons avoir donné à ceux qui voudraient bien connaître les appareils qu'ils vont utiliser avec leurs élèves, des outils d'analyse à leur portée. Plus simplement, les mesures qui viennent d'être décrites fournissent de bons ordres de grandeur. En reprenant ces mesures pour des haut-parleurs du même type on ne s'étonnera toutefois pas de trouver des résultats différents : pour les deux types étudiés, nous avons travaillé chaque fois sur deux spécimens et dans chaque cas, d'un spécimen à l'autre, certains paramètres différaient de 10 %.

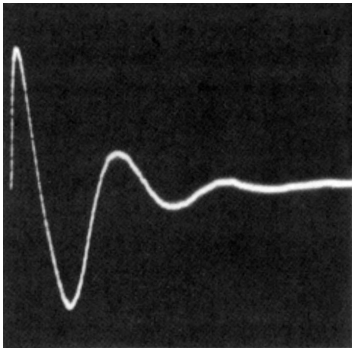

Photo n° 4 : H.P.1 débite dans R_{ext} = 10Ω ; il y a encore des oscillations car $R_t = R_{ext} + R$ est supérieure à la résistance critique R_c. En général, la résistance R de la bobine du haut-parleur est, à elle seule, supérieure à R_c.

4. LE HAUT-PARLEUR POUR L'ÉLÈVE DE SECONDE

Véritable machine électrique, il est certain que le haut-parleur, plus simple qu'un moteur électrique, doit pouvoir motiver les élèves... à condition qu'ils manipulent effectivement, qu'une assez grande liberté d'action leur soit accordée à cette occasion et que le goût des mesures aussi présices que possible leur ait été donné.

Indiquons quelques objectifs qu'on peut raisonnablement se fixer grâce au maniement de cet appareil :

4.1. Illustration de la loi de Laplace : F = Ki

C'est la manipulation du point 3.6, illustrée par la figure 4, qui permet le mieux d'illustrer cette loi. On la reprendra donc pour diverses masses (20 g ; 50 g ; 100 g si la bobine supporte le courant correspondant). Cette manipulation nécessite une diode laser, mais, à notre avis, compte tenu du nouveau programme, cet appareil devra être acquis par tous les lycées à raison d'une douzaine d'exemplaires par établissement (attirer l'attention des élèves sur les précautions qu'ils doivent prendre pour leurs yeux). On devra néanmoins se satisfaire d'une vérification approximative de la loi F = K i.

4.2. Étude des propriétés de l'équipage mobile

Dès que la bobine se déplace, le spider développe une force de rappel caractérisée par la raideur k déterminée au § 3.1. La méthode

utilisée ici, très précise, si l'on est attentif (notamment aux courants d'air générés par les mouvements ou la respiration) ne peut être proposée d'emblée, car elle utilise la notion de longueur d'onde qui est bien au programme mais ne pourra être vue en début d'année. Des méthodes directes, faisant appel à l'amplification mécanique des mouvements, pourront alors être développées. Avec un matériel peu coûteux, on peut très bien mesurer des déplacements d'un demi millimètre. Plus tard dans l'année, on pourra utiliser la méthode décrite ci-dessus.

4.3. **Étude de la déformation statique i ⇒ x**

C'est encore le montage de la figure 4 qui permet de tracer la courbe donnant le déplacement statique x en fonction de i, avec possibilité d'algébriser pour représenter commodément le résultat. Dans ce cas, on constate que la courbe obtenue, pour les fortes valeurs absolues de x, est loin d'être symétrique : si l'on convient de compter positivement une intensité qui a pour effet de soulever l'équipage du haut-parleur, on obtient souvent une courbe comme celle de la figure 8. Il est en effet plus facile de soulever la bobine que de l'enfoncer ; cette propriété doit provenir de l'inhomogénéité du champ magnétique : celui-ci est plus important dans la région où se trouve la bobine au repos (vers la partie libre de l'entrefer, figure 9) qu'au pied de l'aimant. Pour les grands déplacements, le haut-parleur n'est donc pas linéaire : on peut vérifier cela par des considérations purement électriques : en basses fréquences, pour de fortes amplitudes, si l'intensité i est sinusoïdale, la tension u ne l'est pas (ce phénomène pourrait encore être dû à une élasticité dissymétrique du spider, mais c'est moins probable).

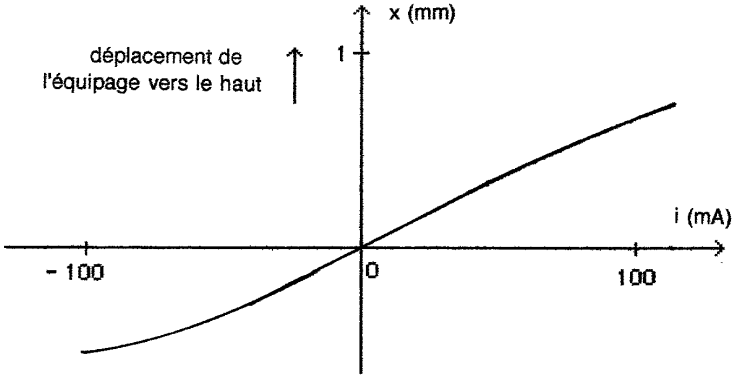

Figure 8

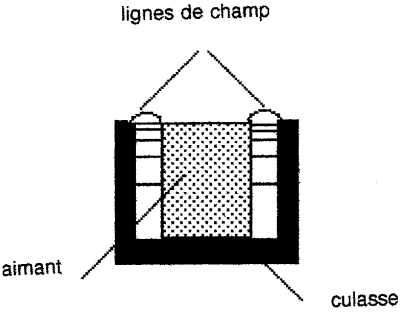

Figure 9

4.4. **Mise en évidence de la f.é.m. induite**

Le haut-parleur peut être un générateur. Les photos 1 et 2 montrent qu'il génère une f.é.m. lorsque sa membrane se déplace (en tapotant celle-ci avec le doigt, par exemple). On peut utiliser la tension produite pour transformer le travail mécanique du doigt en énergie électrique utilisable (figure 10).

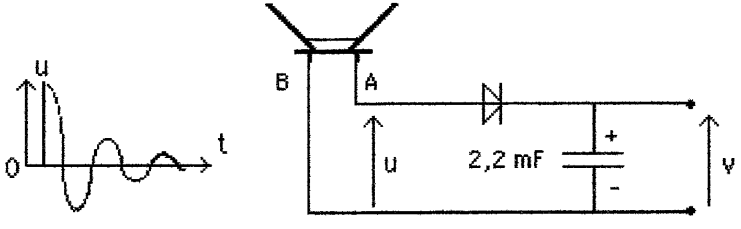

Figure 10

Il suffit pour cela de repérer les bornes A et B du haut-parleur de manière à obtenir une tension u dont les premières valeurs, lorsque l'on frappe la membrane, soient positives. En disposant un condensateur de 2200 μF, comme l'indique la figure 10, on voit alors, à chaque tapotement, augmenter la tension continue v que l'on peut amener ainsi à 2 ou 3 V selon les haut-parleurs (utiliser de préférence une diode au germanium pour laquelle la tension de seuil est plus faible). Cette tension v et l'énergie ainsi accumulée sont alors suffisantes pour actionner suffisamment longtemps l'un de ces nombreux circuits intégrés (Électrome : U66 ; 8 francs) qui, associés à une «buzzer» génèrent diverses mélodies (figure 11).

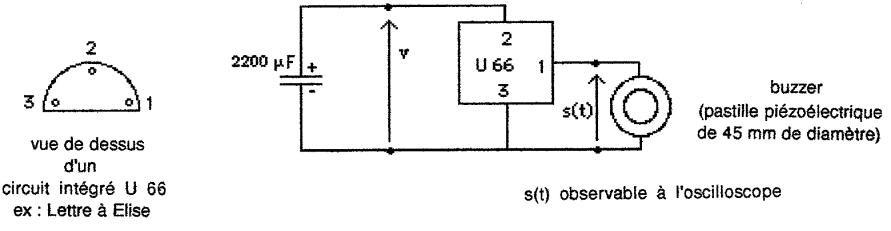

Figure 11

Plus simplement, à la place du dispositif précédent, on peut placer une diode électroluminescente très lumineuse qui émet, à chaque tapotement, un éclair lumineux de 3 ou 4 candelas ! Ces différentes manipulations mettent l'accent sur les transformations d'énergie que permet de réaliser le convertisseur qu'est le haut-parleur.

4.5. **Première approche de la loi de Faraday :** La f.é.m. induite est proportionnelle à la vitesse de déplacement de la bobine.

Voici comment on peut par exemple mettre cela en évidence : on utilise un petit moteur muni d'un réducteur ; sur l'arbre de ce moteur, on monte un disque légèrement excentré (d'un ou deux millimètres), ou ovalisé. Ce disque, qui frotte sur une planchette déposée sur l'équipage mobile, de manière à protéger la membrane, impose à la bobine un mouvement d'amplitude donnée dont la fréquence est réglable grâce à la tension appliquée au moteur (figure 12).

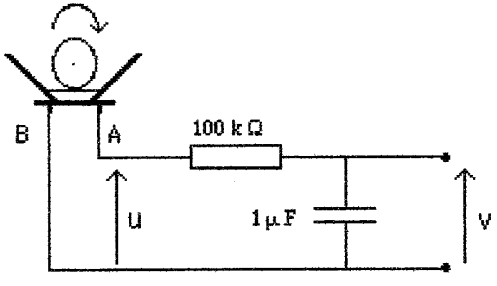

Figure 12

L'amplitude de la tension alternative u devrait alors être proportionnelle à la vitesse de rotation du moteur, malheureusement on ne voit rien de semblable car, l'expérience marche trop bien. En effet, les vibrations rapides du réducteur, de très faible amplitude, certes, mais de fréquences élevées, génèrent des f.é.m. supérieures à celle que l'on veut mettre en évidence et dont la fréquence est de quelques hertz.

Il suffit cependant d'élimier ces f.é.m. parasites, à l'aide d'un filtre passe-bas très simple comme celui de la figure 12 pour que le phénomène désiré apparaisse au niveau de la tension v.

Cette expérience peut être le point de départ d'intéressantes explications données aux élèves de Seconde, car, en l'exploitant, on peut mettre l'accent sur la notion de déplacement des tranches d'air dans une onde sonore. Les élèves, en effet, sont généralement surpris, lorsqu'ils observent par stroboscopie (par exemple) le mouvement d'un haut-parleur, de constater qu'aux fréquences musicales, l'amplitude a du déplacement de la membrane est très faible. Or l'amplitude V de la vitesse est reliée à a par la relation $V = a\,\omega$, et, par conséquent, la vitesse des tranches d'air peut-être élevée même si a est très faible : il suffit que la pulsation ω soit grande. Comme dans une onde acoustique progressive plane, c'est à la vitesse des tranches de gaz que la pression acoustique p est proportionnelle, on comprend pourquoi un haut-parleur qui semble ne pas vibrer (mais qui vibre vite !) génère cependant des sons audibles.

4.6. **Effet des courants induits**

L'expérience décrite sur la figure 7 permet de mettre en évidence l'effet de frein produit pas les courants induits. L'enregistrement et l'exploitation, par ordinateur, de la tension aux bornes du haut-parleur, montrera que l'amortissement est accru par la présence des courants induits. Il n'est pas question de faire calculer aux élèves un coefficient d'amortissement, comme nous l'avons fait au paragraphe 3.2, cependant, ils pourront observer que l'amplitude des oscillations amorties décroît toujours dans le même rapport ($V_5/V_4=V_4/V_3 =V_3/V_2=V_2/V_1$). En fait ce rapport caractérise bien l'amortissement, et s'il décroît, c'est que le système est plus amorti.

A cet égard, on pourra rapprocher le phénomène précédent d'un autre du même genre (figure 13).

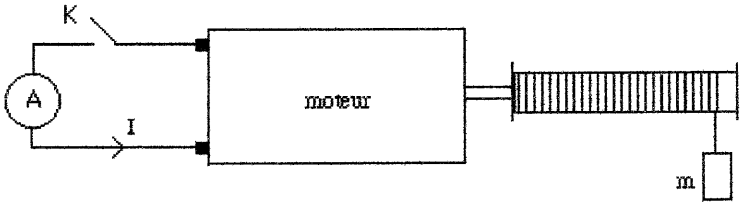

Figure 13

Une petite masse marquée m est accrochée, par l'intermédiaire d'un fil très souple, au mandrin monté sur l'axe d'un petit moteur. Lorsque le circuit d'induit du moteur est ouvert, la masse descend très vite lorsqu'on la lâche, provoquant la rotation rapide de la petite machine et l'apparition d'une tension à ses bornes. Si, en revanche, on ferme le circuit d'induit, la descente de la masse m est énergiquement freinée, car le courant circulant alors dans l'induit, s'oppose alors, selon la loi qualitative de Lenz, à la rotation du moteur (fonctionnant ici en génératrice mise en court-circuit).

Ainsi, les haut-parleurs, différents d'un appareil à l'autre, au point qu'il est bon de disposer de plus d'un type pour illustrer au mieux les différents aspects de leur fonctionnement, peuvent être rapprochés d'autres appareils électromagnétiques dont l'étude est également passionnante.