

TP 7 : Haut-parleur électromécanique

1 Principe

2 Mesures des grandeurs caractéristiques du haut-parleur

2.1 Mesure de k

2.1.1 Montage - Protocole

- ✘ On réalise le montage donné par la figure (1)

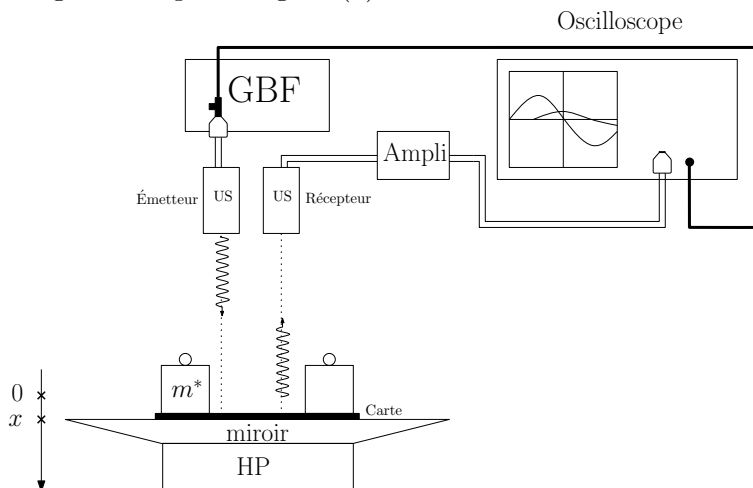


Figure 1

- ✘ Les cellules piézoélectriques ont une bande passante étroite centrée sur 40×10^3 Hz : on règle la fréquence du GBF sur cette valeur.
- ✘ Afin d'augmenter la précision de la mesure (stabiliser le signal reçu par le détecteur), on amplifie le signal reçu et on règle l'oscilloscope de façon à ce que les courbes affichées soient moyennées.
- ✘ Dans un premier temps on positionne l'émetteur et le récepteur de façon à ce que les signaux émis et reçus soient en phase (la carte étant déjà posée sur la membrane).
- ✘ On dispose alors de manière symétrique deux masses sur la carte (de façon à ce que celle-ci reste horizontale, on note m la masse totale) : l'équipage descend alors d'une distance x . La distance parcourue par l'onde sonore reçue s'est donc allongée de $\delta = 2x$. A l'équilibre, on a :

$$k = \frac{mg}{x}$$

- ✘ Les deux courbes à l'oscilloscope sont alors déphasées, on note ϕ le déphasage et Δt le décalage temporel correspondant :

$$\phi = \frac{2\pi\delta}{\lambda} = \frac{2\pi(2x)}{\lambda} = \frac{2\pi\Delta t}{T}$$

D'où :

$$x = \frac{c\Delta t}{2}$$

Soit :

$$k = \frac{2mg}{c\Delta t}$$

2.1.2 Mesures - incertitudes

Première méthode : Incertitudes de type A

- ✘ Pour une même valeur de m , on répète N fois la même mesure de Δt . On en déduit N valeurs de k .
- ✘ On en déduit alors la valeur de k mesurée ainsi que son incertitude type.
- ✘ Exemple de valeurs obtenues :

Δt (μs)	4.2	4.6	4.0	4.9	4.8	4.7	3.8	4.0	4.3	4.4
k ($\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$)	573.9	524.0	602.6	491.9	502.2	512.8	634.3	602.6	560.5	547.8

On en déduit :

$$k = 1.11 \times 10^3 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1} \text{ et } u_k = 0.05 \times 10^3 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$$

$$k = (1.1 \pm 0.1) \times 10^3 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}$$



VALIDATION : Comparer la valeur trouvée à celle donnée par le constructeur

Deuxième méthode : Régression linéaire avec Régressi

- ✘ Pour différentes valeurs de m , on mesure Δt avec $m = \frac{kc}{2g}\Delta t$
- ✘ On trace alors m en fonction de Δt .
- ✘ La pente de la droite obtenue nous permet de déterminer k . et son incertitude type.
- ✘ Exemple de valeurs obtenues :

m (g)	20	40	60	80	100	120	150	180	200	220	240
Δt (μs)	1.5	2.2	3.2	3.6	3.0	3.5	5.5	5.9	6.2	7.9	8.3

On trace $m = f(\Delta t)$: la droite obtenue par régression linéaire a pour équation : $y = ax$ avec $a = 27.9 \pm 2\text{g}\cdot\mu\text{s}^{-1}$

On en déduit :

$$k = \frac{2ag}{c} = 1.61 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-1}$$

$$u_k = k \frac{u_a}{a} = 0.12 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-1}$$



VALIDATION : Comparer la valeur trouvée à celle donnée par le constructeur

Mesure de k 09/01/2022
 $dx = ((\phi + 6.47) * 0.0085821) / (2 * 360)$

i	m	phi	dx
	kg	°	
0	0,000	-5,00	$1,752 \cdot 10^{-5}$
1	0,0200	9,000	0,0001844
2	0,0400	20,00	0,0003155
3	0,0900	48,00	0,0006493
4	0,1400	77,00	0,0009949
5	0,1900	108,0	0,001364
6	0,2400	145,0	0,001805
7	0,3400	210,0	0,00258
8			

Modélisation
 $dx = a1 * m$

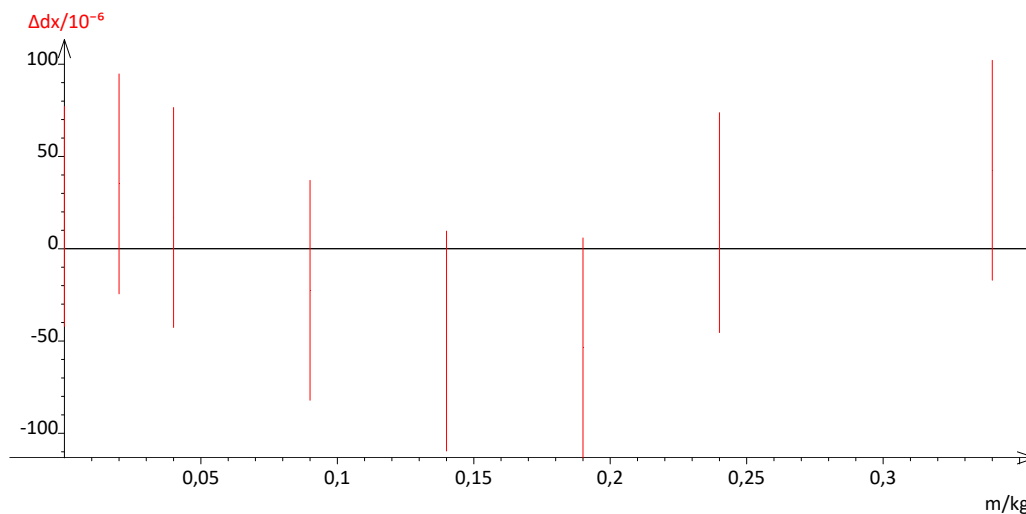
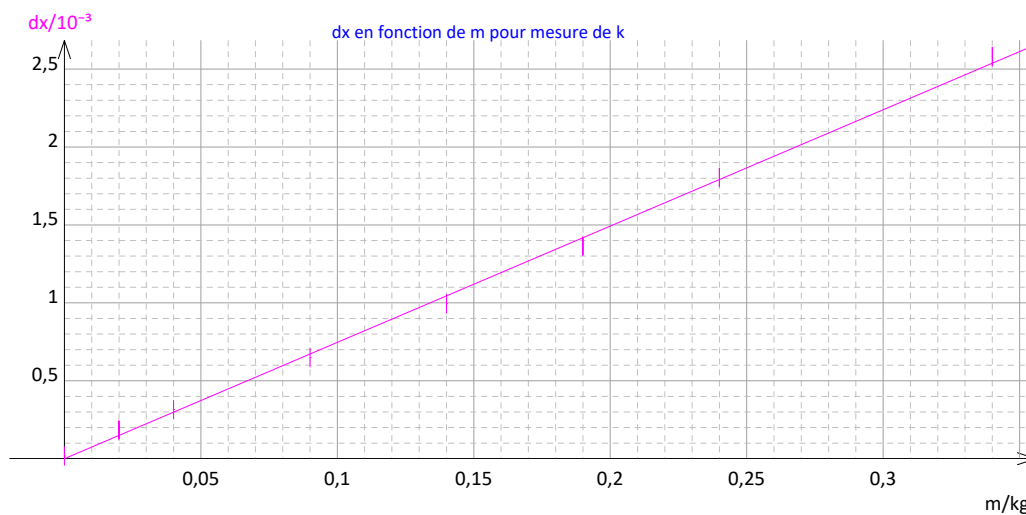


Figure 2

Troisième méthode : Régression linéaire avec Python

- ✘ On reprend la méthode précédente : on trace Δt en fonction de m sous python et on détermine a à l'aide d'une simulation Monté Carlo.
- ✘ On force la régression linéaire (et non affine) en utilisant la fonction *curve_fit* plutôt que *linregress*.

✘ la droite obtenue par régression linéaire a pour équation : $t = am$ avec $a = 34.4 \pm 9 \times 10^{-5} \text{ s}\cdot\text{kg}^{-1}$

```
# -*- coding: utf-8 -*-
"""Régression linéaire."""

# Importation des bibliothèques
import numpy as np
import numpy.random as rd
import matplotlib.pyplot as plt
import scipy.optimize as so

# Données
# Dans cet exemple, on connaît :
# * les demi-étendues pour m ;
# * l'incertitude-type pour t.
m = np.array([0.02,0.04,0.06,0.08,0.1,0.12,0.15,0.18,0.2,0.22,0.24])
Dm = m*5/100
um = Dm/np.sqrt(3)
t = np.array([1.5,2.2,3.2,3.6,3.0,3.5,5.5,5.9,6.2,7.9,8.3])*10**(-6)
ut = np.array([0.5,0.5,0.5,0.5,0.5,0.5,0.5,0.5,0.5,0.5,0.5])*10**(-6)

print(ut)
#forcer la regression linéaire (on utilise ensuite curfit)
def fct(x,k):
    return k*x

# Nombre de simulations
N = 10000
# Détermination des pentes et ordonnées à l'origine
asim, bsim = [], []
for i in range(N):
    msim = m + Dm*rd.normal(0, 1, len(m))
    tsim = t + ut*rd.uniform(-1, 1, len(t))
    p = so.curve_fit(fct,msim, tsim)
    asim.append(p[0])
    bsim.append(p[1])
ma, ua = np.mean(asim), np.std(asim, ddof=1)

print("a =", ma)
print("u(a) =", ua)

# Tracé des points et du modèle
tmod = ma*m
plt.figure(figsize=(10, 5), dpi=200)
plt.subplot(1, 2, 1)
plt.errorbar(m, t, xerr=um, yerr=ut, fmt='bo', label="Points expérimentaux")
plt.plot(m, tmod, 'c--', label="Modèle linéaire")
plt.xlabel(r"$m$")
plt.ylabel(r"$t$")
plt.grid(), plt.legend(loc='best')
```

Figure 3

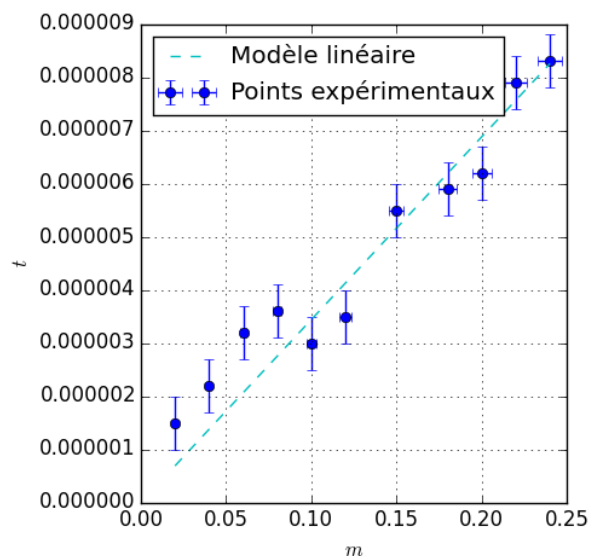


Figure 4

On en déduit :

$$k = \frac{2g}{ac} = 1.67 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-1}$$

$$u_k = k \frac{u_a}{a} = 0.44 \text{ kN}\cdot\text{m}^{-1}$$



VALIDATION : Comparer la valeur trouvée à celle donnée par le constructeur

2.2 Mesure du produit Bl

2.2.1 Montage - Protocole

- ✗ On réalise le montage donné par la figure (5)

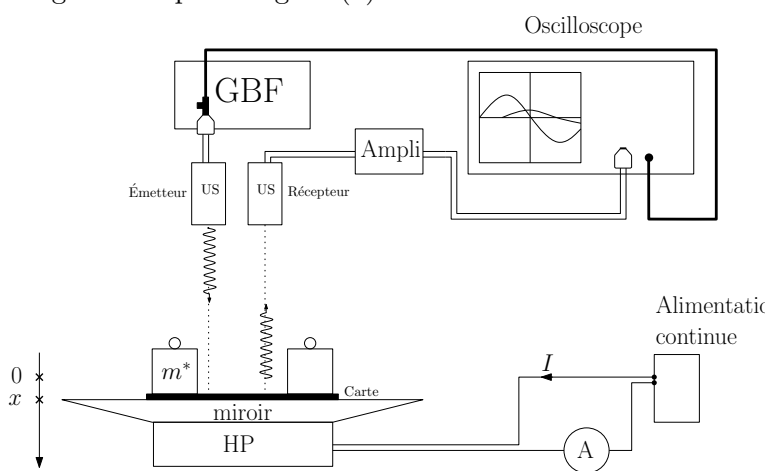


Figure 5

- ✗ Afin de ne pas détériorer le HP en lui imposant une intensité trop importante, on insère un ampèremètre dans le circuit : on veillera à ce que le courant dans le HP ne dépasse pas 500 mA.
- ✗ Dans un premier temps on positionne l'émetteur et le récepteur de façon à ce que les signaux émis et reçus soient en phase (la carte seule étant posée sur la membrane).
- ✗ On dispose alors de manière symétrique deux masses sur la carte (de façon à ce que celle-ci reste horizontale, on note m la masse totale) : l'équipage descend alors d'une distance x .
- ✗ On allume le générateur de tension continu (alimentation stabilisée en courant et en tension) : on impose un courant I de façon à ce que les deux courbes soient à nouveau en phase. La force de Laplace compensant la masse rajoutée, on a alors :

$$Bl = \frac{mg}{I}$$

- ✗ Si la membrane ne remonte pas après application du courant, c'est que le courant imposé n'est pas dans le bon sens et que la force de Laplace s'exerce sur l'équipage est orientée vers le bas : inverser alors les polarités du générateur stabilisé.
- ✗ Si, pour une valeur maximale du courant délivré par l'alimentation stabilisée, l'équipage ne remonte pas à sa position initiale (signaux en phase), c'est que la masse ajoutée est trop importante. Il faut alors la diminuer.

2.2.2 Mesures - incertitudes

Première méthode : Incertitudes de type A

- ✘ Pour une même valeur de m , on répète N fois la même mesure de I . Sachant que $Bl = \frac{mg}{I}$, on en déduit N valeurs de Bl .
- ✘ On en déduit alors la valeur de Bl mesurée ainsi que son incertitude type.

Deuxième méthode : Régression linéaire

- ✘ Pour différentes valeurs de m , on mesure I avec $I = \frac{mg}{Bl}$
- ✘ On trace alors I en fonction de Bl .
- ✘ La pente de la droite obtenue nous permet de déterminer Bl .

2.3 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).

Première méthode : utilisation d'un multimètre

2.3.1 Montage - Protocole

- ✘ On réalise le montage donné par la figure (fig3).

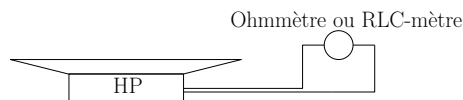


Figure 6

- ✘ On règle le multimètre en position ohmmètre et on mesure la valeur de R pour différentes valeurs de la fréquence.
- ✘ On règle le multimètre en position inductance-mètre et on mesure la valeur de L pour différentes valeurs de la fréquence.

2.3.2 Mesures - incertitudes

- ✘ On utilise la documentation constructeur pour avoir les incertitudes relatives aux deux mesures (de la forme : $u_X = aX_{lue} + bUR$).

Deuxième méthode : utilisation de la carte SYSAM

2.3.3 Montage - Protocole

- ✘ On réalise le montage donné par la figure (7)

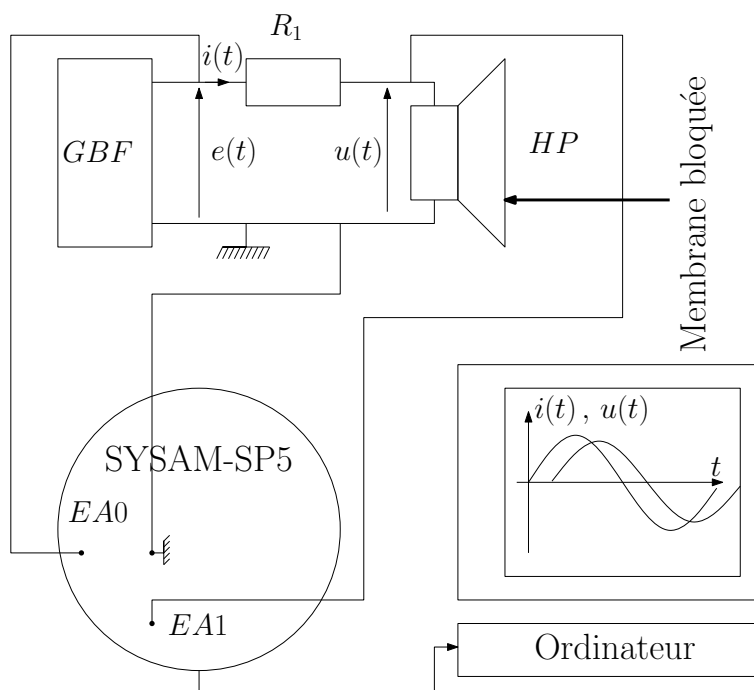


Figure 7

- ✘ Dans la feuille de calcul, on définit $u(t) = EA1$ et $i(t) = (EA0 - EA1)/R_1$
- ✘ Dans le tableau, on définit f la fréquence, U et I les valeurs efficaces de $u(t)$ et $i(t)$.
- ✘ Dans la feuille de calcul, on définit Z_e :

$$Z_e = \frac{U}{I}$$

Ne pas oublier de cliquer sur calculs.

- ✘ On ouvre une fenêtre permettant de visualiser $u(t)$ et $i(t)$ en fonction du temps et une autre fenêtre permettant de visualiser Z_e en fonction de f .
- ✘ Dans l'onglet outils, on va chercher les mesures automatiques de $u(t)$ et $i(t)$.
- ✘ On fixe une valeur de la fréquence f , on règle la fréquence d'échantillonnage ($f_e \approx 10f$) et le temps d'acquisition de façon à ce qu'au moins 10 périodes soient affichées et on lance l'acquisition de EA0 et EA1.
- ✘ Pour la valeur de f choisie, on note dans le tableau la valeur de f et les valeurs efficaces de $u(t)$ et $i(t)$, la valeur de Z_e se remplissant automatiquement.

2.3.4 Mesures - incertitudes

- ✘ On obtient, par exemple, le tableau ci-dessous.

f (Hz)	U (V)	I (A)	Z_e (Ω)	$\log f$	$\log Z_e$
40	0.2130	0.02886	7.380	1.602	0.8681
62.5	0.1660	0.02174	7.636	1.796	0.8828
100	0.1650	0.02173	7.593	2.000	0.8804
125	0.1150	0.01442	7.976	2.097	0.9018
250	0.1160	0.0144	8.054	2.398	0.9060
500	0.1240	0.01435	8.641	2.699	0.9366
1×10^3	0.1390	0.01424	9.763	3.000	0.9896
2×10^3	0.1630	0.01405	11.60	3.301	1.065
4×10^3	0.2100	0.01323	15.87	3.602	1.201
8×10^3	0.2740	0.01319	20.77	3.903	1.318
1.6×10^4	0.3530	0.0125	28.24	4.204	1.451
2.5×10^4	0.6210	0.01807	34.37	4.398	1.536
4.0×10^4	0.7340	0.01723	42.59	4.602	1.629

- ✘ La courbe représentant Z_e en fonction de f (ou $\log(Z_e)$ en fonction de $\log f$) se trace automatiquement au fur et à mesure que l'on ajoute des valeurs de f , U et I .

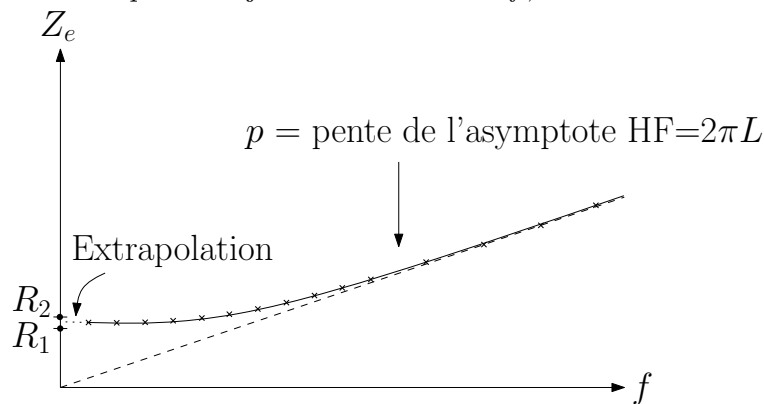


Figure 8

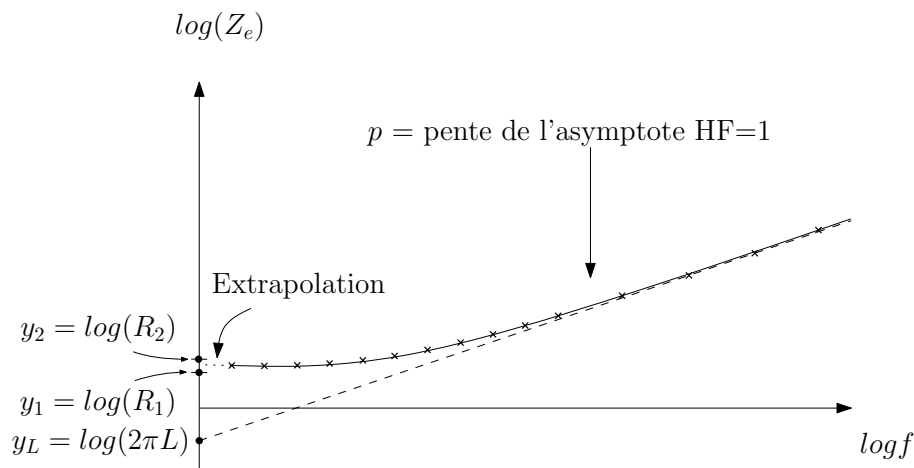


Figure 9

- ✘ On détermine R par extrapolation : c'est l'intersection de la courbe obtenue avec l'axe des ordonnées. Lors de cette interpolation, on réalise un encadrement de façon à déterminer l'incertitude sur R par encadrement

• Échelle linéaire :

$$R = \frac{R_1 + R_2}{2} \text{ et } u_R = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{R_2 - R_1}{2}$$

- Échelle logarithmique :

$$y_1 = \log R_1 \Rightarrow R_1 = 10^{y_1}$$

$$y_2 = \log R_2 \Rightarrow R_2 = 10^{y_2}$$

$$R = \frac{R_1 + R_2}{2} \quad \text{et} \quad u_R = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{R_2 - R_1}{2}$$

- ✘ On détermine L en traçant l'asymptote de la courbe obtenue à haute fréquence :

- Échelle linéaire :

la pente de l'asymptote est :

$$p = 2\pi L$$

Le logiciel propose une incertitude sur la pente, on en déduit une incertitude sur L :

$$(p, u_p) \Rightarrow \left(L = \frac{p}{2\pi}, u_L = L \frac{u_p}{p} \right)$$

- Échelle logarithmique : la pente de l'asymptote est 1 et l'ordonnée à l'origine vaut :

$$y_L = \log(2\pi L)$$

Le logiciel propose une incertitude cette l'ordonnée, on en déduit une incertitude sur L :

$$(y_L, u_{y_L}) \Rightarrow \left(L = \frac{10^{y_L}}{2\pi}, u_L = L u_{y_L} \right)$$

2.4 Mesure de m et λ - Étude fréquentielle de l'impédance du HP

2.4.1 Montage - Protocole

- ✘ On réalise le même montage que précédemment, mais on débloque la membrane du HP afin de lui permettre de vibrer.
- ✘ Le protocole est identique également, à cela près que l'on concentre les mesures autour du pic de résonance de l'impédance mécanique.

2.4.2 Mesures - incertitudes

- ✘ On obtient le même tableau que précédemment :

f (Hz)	U (V)	I (A)	Z_e (Ω)	$\log f$	$\log Z_e$
...

- ✘ La courbe représentant Z_e en fonction de f se trace automatiquement au fur et à mesure que l'on ajoute des valeurs de f , U et I . On obtient la courbe représentée figure (10).

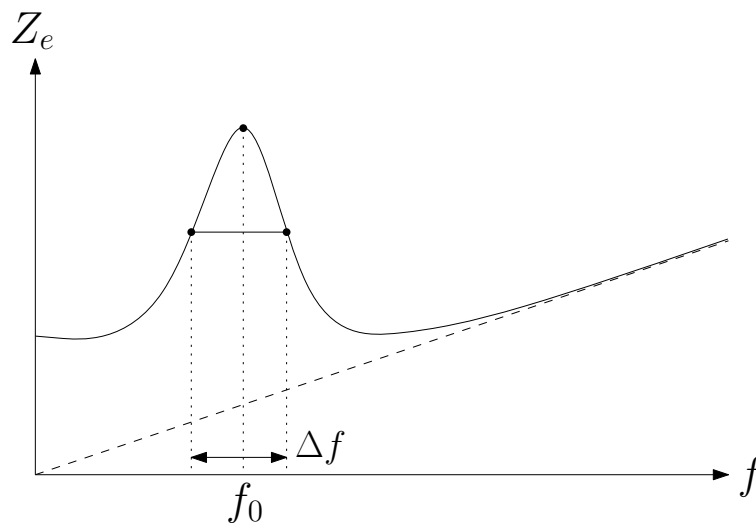


Figure 10

- ✘ On détermine f_0 et Δf en étudiant le pic de résonance : celui-ci est centré sur $f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$ et sa bande passante vaut $\Delta f = \sqrt{\frac{f_0}{Q}} = \frac{1}{2\pi} \frac{\lambda}{m}$. Lors de ces deux mesures, on évalue les incertitudes types sur f_0 et Δf par encadrement.
- ✘ On en déduit :

$$m = \frac{k}{4\pi f_0^2} \text{ et } \frac{u_m}{m} = \sqrt{\left(\frac{u_k}{k}\right)^2 + 4\left(\frac{u_{f_0}}{f_0}\right)^2}$$

$$\lambda = 2\pi \Delta f m \Rightarrow \text{ et } \frac{u_\lambda}{\lambda} = \sqrt{\left(\frac{u_{\Delta f}}{\Delta f}\right)^2 + \left(\frac{u_m}{m}\right)^2}$$

2.5 Mesure de ω_0 et λ : étude indicielle

2.6 Montage - Protocole

- ✘ On branche directement le HP à l'oscilloscope ou à la carte SYSAM-SP5 : l'impédance d'entrée de ces deux dispositifs étant de l'ordre du $M\Omega$, on peut considérer qu'aucun courant ne traverse le HP. L'équation électrique vérifiée par le circuit électrique équivalent au HP est alors :

$$\ddot{z}(t) + \frac{\omega_0}{Q} \dot{z}(t) + \omega_0^2 z(t) = 0$$

\Rightarrow Il s'agit de l'équation d'un oscillateur linéaire amorti.

- ✘ On frappe alors la membrane et on observe la relaxation pseudo-périodique à l'oscilloscope (ou à la carte SYSAM-SP5). Le signal obtenu est alors de la forme :

$$u(t) = U_0 \exp\left(-\frac{\omega_0 t}{2Q}\right) \cos(\Omega t + \phi)$$

avec :

- Ω la pseudo-pulsation :

$$\Omega = \omega_0 \sqrt{1 - \frac{1}{4Q^2}}$$

Soit, avec la pseudo-période :

$$T = \frac{2\pi}{\omega} = \frac{2\pi}{\omega_0 \sqrt{1 - \frac{1}{4Q^2}}} \Rightarrow \omega_0 = \frac{2\pi}{T \sqrt{1 - \frac{1}{4Q^2}}}$$

• δ , le décrement logarithmique :

$$\delta = \ln \left(\frac{u(t)}{u(t+T)} \right) = \frac{\omega_0 T}{2Q} = \frac{2\pi}{\sqrt{4Q^2 - 1}} \Rightarrow Q = \sqrt{\frac{1}{4} + \frac{\pi^2}{\delta^2}}$$

✘ On mesure alors T et δ à l'oscilloscope (en estimant leur incertitudes par encadrement), et on en déduit Q puis ω_0

2.6.1 Résultats - exploitation

✘ Ci-dessous un exemple de résultat et d'exploitation :

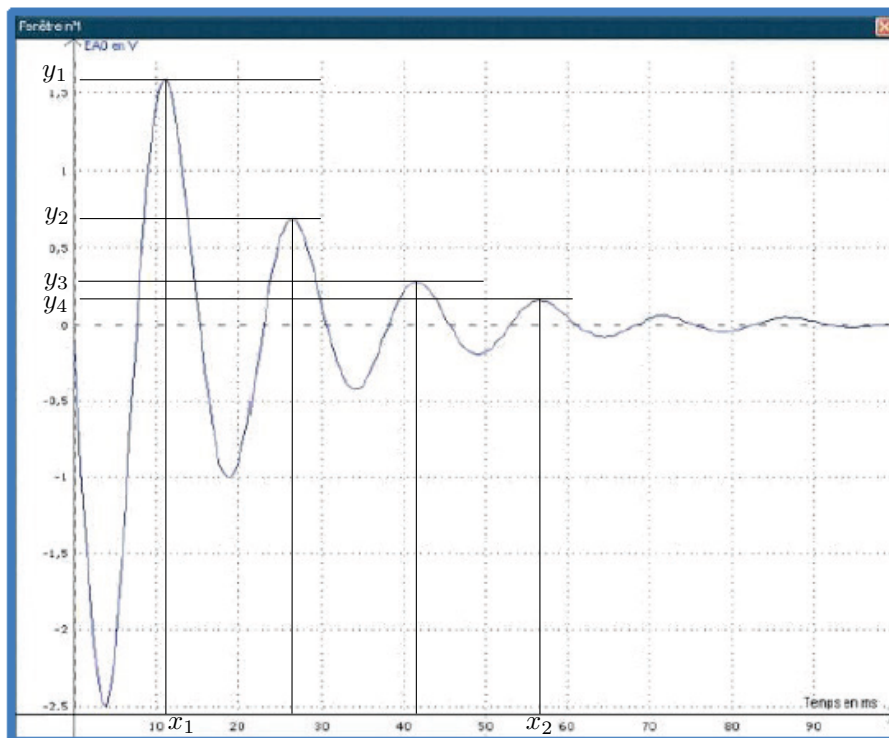


Figure 11

✘ On estime les incertitudes sur les différents x_i et y_i par encadrement :

$$x_i = \frac{x_{i1} + x_{i2}}{2} \quad \text{et} \quad u_{x_i} = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{x_{i2} - x_{i1}}{2}$$

✘ Dans l'exemple ci-dessus, on détermine T et u_T en utilisant 4 pseudo-périodes :

$$T = \frac{x_2 - x_1}{4} \Rightarrow u_T = \frac{1}{4} \sqrt{u_{x_2}^2 - u_{x_1}^2}$$

✘ Dans l'exemple ci-dessus, on peut déterminer δ sur trois oscillations :

$$\bullet \delta = \frac{1}{3} \ln \left(\frac{y_1}{y_4} \right)$$

$$\bullet u_\delta = \frac{1}{3} \sqrt{\left(\frac{u_{y_1}}{y_1} \right)^2 + \left(\frac{u_{y_4}}{y_4} \right)^2}$$

2.7 Diagramme de Rayonnement du HP

2.7.1 Montage - Protocole

- ✘ On réalise le montage donné par la figure (12)

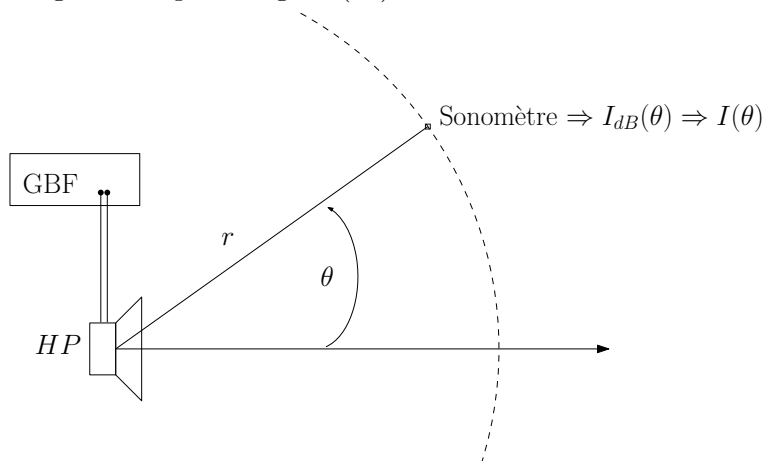


Figure 12

- ✘ On choisit une fréquence f pour le signal délivré par le GBF et on en déduit la valeur de $\lambda = \frac{c}{f}$.
- ✘ On choisit une distance r pour le tracé du diagramme de rayonnement en vérifiant que $r \gg \lambda$.
- ✘ A l'aide d'un rapporteur, on mesure l'angle θ que fait le sonomètre avec la droite (Ox) .
- ✘ Pour θ variant de 0 à 2π , on mesure $I_{dB}(\theta)$ et on en déduit $I(\theta)$ grâce à la formule :

$$I(\theta) = I_0 \times 10^{\frac{I_{dB}(\theta)}{10}}$$

Attention aux réflexions des ondes sonores sur les obstacles situés à proximité!

2.7.2 Mesures

- ✘ Pour chaque valeur de θ , on mesure $I(\theta)$ et on en déduit $X(\theta) = I(\theta) \cos \theta$ et $Y(\theta) = I(\theta) \sin \theta$.
- ✘ On obtient le tableau de valeur suivant :
- ✘ On trace alors $Y(\theta)$ en fonction de $X(\theta)$ et on obtient le graphe donné par la figure ().
- ✘ On relève alors la valeur de θ_m , angle délimitant le cône dans lequel l'essentiel de la puissance délivrée par le HP est contenue.

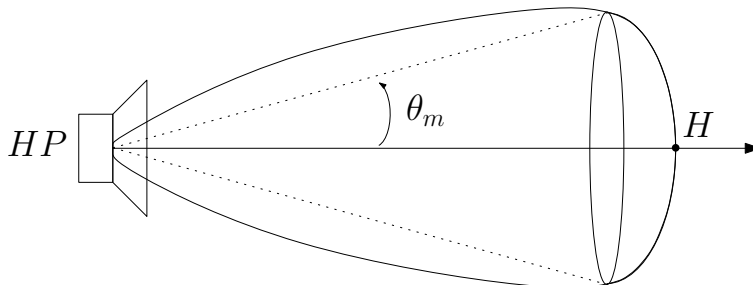


Figure 13

2.8 Rendement du HP

2.8.1 Montage - Protocole

- ✘ On réalise le montage donné par la figure (14)

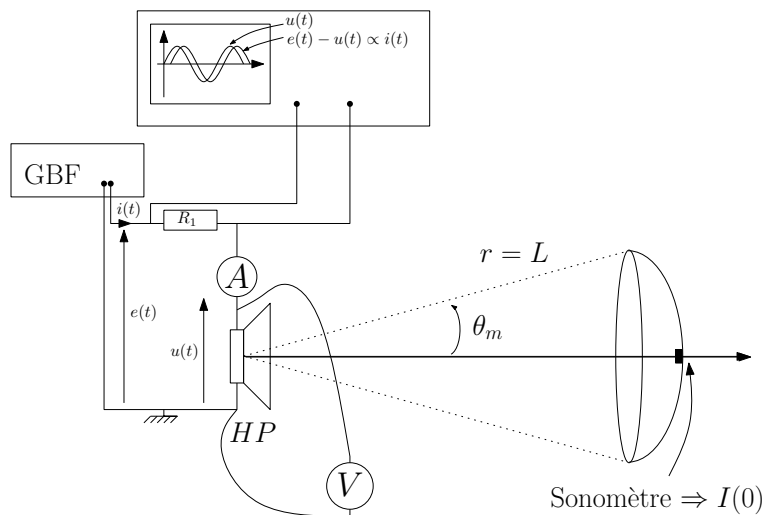


Figure 14

2.8.2 Mesures - incertitudes

- ✘ On considère que la puissance acoustique délivrée par le HP est contenue dans le cône de demi-angle au sommet θ :

$$P_a = I \times 2\pi L^2 (1 - \cos \theta_m)$$

On détermine I grâce au sonomètre placé à la distance L du HP et en face du HP ($\theta = 0$).

- ✘ La puissance électrique reçue par le HP est :

$$P_r = UI \cos \phi$$

Où U est la valeur efficace de la tension aux bornes du HP, I est la valeur efficace du courant traversant le HP et où ϕ est le déphasage entre la tension aux bornes du HP et le courant traversant le HP.

- ✘ On mesure U et I (Attention ! valeurs efficaces !) au multimètre et on mesure ϕ à l'oscilloscope.
- ✘ On en déduit le rendement :

$$\rho = \frac{P_a}{P_r}$$