

Mesures de caractéristiques d'un haut-parleur*

par Brigitte JUNCKER et Anne PAULUS
IUFM d'Alsace

INTRODUCTION

Un haut-parleur doit satisfaire des critères différents suivant son utilisation.

Ainsi, un haut-parleur de radio doit reproduire l'ensemble des fréquences sonores audibles (haut-parleur dit à large bande) même si la qualité du son reproduit n'est pas parfaite, alors qu'un haut-parleur d'une enceinte de chaîne Hi-fi doit reproduire une étroite gamme de fréquences avec grande précision.

C'est pourquoi, les constructeurs établissent les caractéristiques d'un tel émetteur afin de mettre en évidence ses qualités et ses défauts.

Grâce à des manipulations facilement réalisables au lycée, nous nous proposons de tracer quelques-unes de ces caractéristiques : la courbe de réponse, de linéarité, de directivité et la courbe d'impédance d'un haut-parleur.

Ces manipulations sont d'autant plus motivantes pour les élèves que ceux-ci pourront confronter leurs résultats aux courbes indiquées dans les fiches techniques.

1. COURBE DE RÉPONSE

1.1. Objectif

Tracer la courbe de réponse d'un haut-parleur, c'est-à-dire le niveau acoustique émis par le haut-parleur en fonction de la fréquence de la tension d'amplitude constante imposée à ses bornes.

* N.D.L.R. : Cet article est un extrait représentatif d'un mémoire professionnel d'étudiants en deuxième année à l'IUFM de Strasbourg 1993/1994.
Titre du mémoire : *«Étude du haut-parleur électrodynamique, expérience réalisables par un élève de seconde»*.

1.2. Matériel

- Haut-parleur.
- Sonomètre.
- Générateur basse fréquence.
- Fréquencemètre.
- Oscilloscope.

1.3. Montage

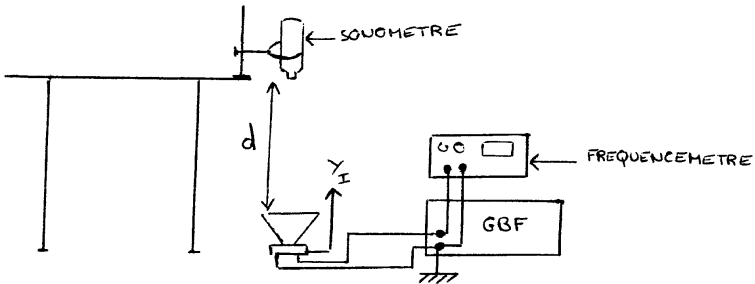


Figure 1

1.4. Protocole expérimental

Mesurer à l'aide du sonomètre le niveau acoustique délivré à un mètre du haut-parleur pour différentes valeurs de la fréquence de la tension d'alimentation, comprise entre 20 Hz et 20 kHz, tout en maintenant l'amplitude de cette tension constante.

1.5. Expérience

Conditions expérimentales

- Haut-parleur de diamètre égal à 12 cm.
- $U_{c.à.c} = 4 \text{ V}$.
- Distance d (sonomètre / haut-parleur) = 1 m.
- Niveau de bruits de fond < 50 dB.

Résultats

f (Hz)	20	50	100	200	400	600	800	1000	1500
L (dB)	< 50	< 50	< 50	57	72	85	94	98	104

f (Hz)	2000	2500	3000	3500	4000	5000	6000	7000	8000
L (dB)	98	98	94	100	96	90	93	94	96

f (Hz)	10000	12000	14000	16000	18000	20000
L (dB)	94	95	82	79	56	< 50

Conditions expérimentales

- $U_{c.à.c} = 1,4 \text{ V}$.
- d (sonomètre / haut-parleur) = 1 m.
- Diamètre du haut-parleur = 9 cm.
- Niveau de bruits de fond < 34 dB.

Résultats

f (Hz)	20	52	70	102	151	200	300	350
L (dB)	34	34	36	38	44	48	52	58

f (Hz)	400	500	600	700	800	900	1000	1517
L (dB)	60	62	68	74	74	74	78	80

f (Hz)	2003	2504	3000	3507	4026	4491	5072	6055
L (dB)	80	78	76	72	66	70	74	60

f (Hz)	8000	10016	12057	12750	13302	13730	14000	15000
L (dB)	66	62	58	54	50	46	42	34

1.6. Exploitation des résultats

- Tracer la courbe $L = g(f)$ à tension d'alimentation constante sur papier semi-logarithmique (cf. figure 2).
- Entre quelles valeurs de l'intensité varie la réponse du haut-parleur sur la partie supérieure de la courbe ? En déduire la «réponse moyenne» L_m , ainsi que les variations ΔL par rapport à cette moyenne.

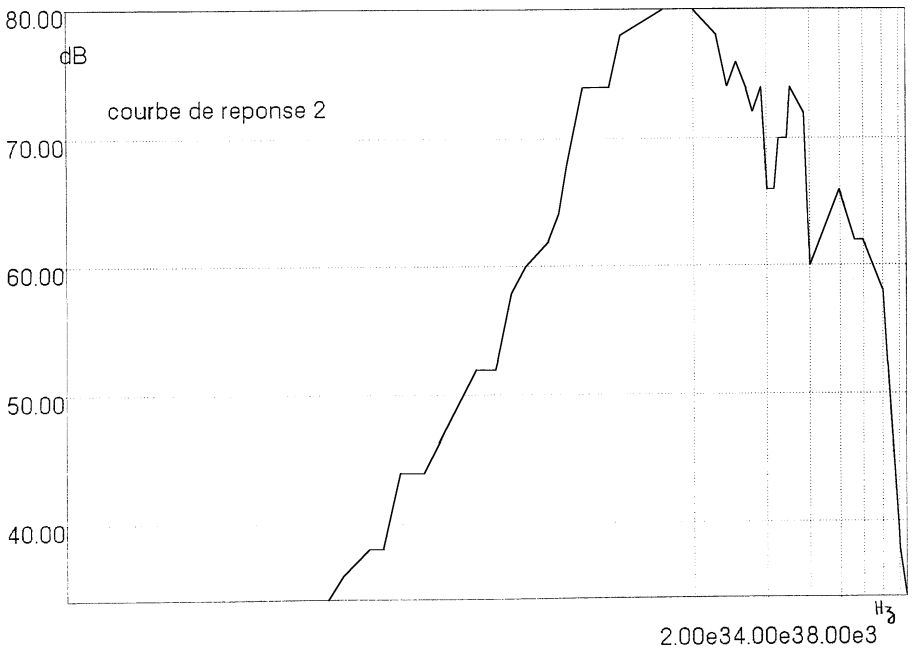
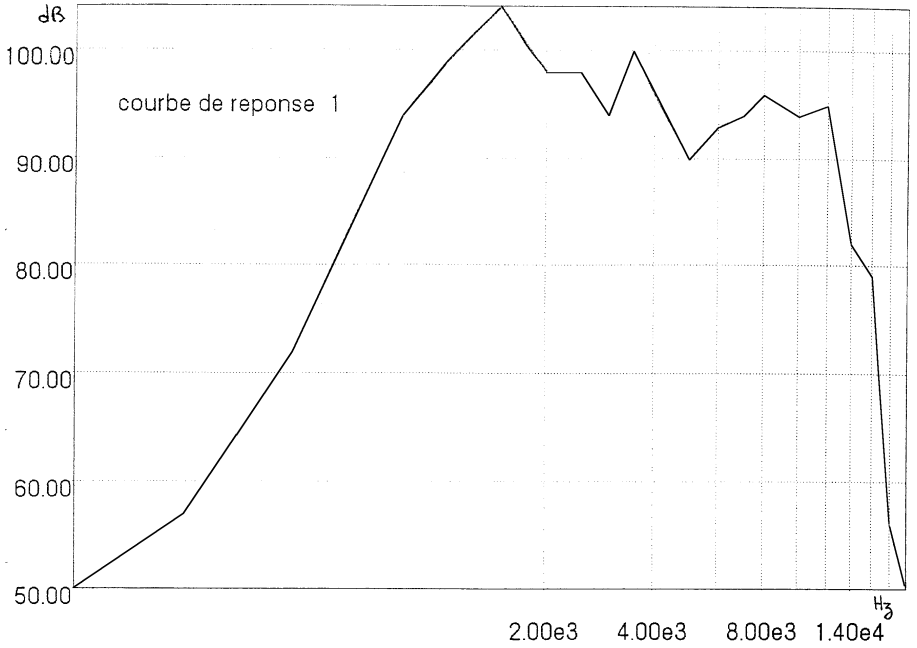


Figure 2

– Donner alors la bande passante du haut-parleur, sachant que la droite horizontale $L = L_m - \Delta L$ donne les valeurs extrêmes de la bande passante (cf. figure 2).

Difficultés rencontrées

Remarques :

- cette manipulation doit être effectuée dans une salle très calme (l'idéal serait de la faire en chambre sourde). Il faut donc avoir le silence complet dans sa classe,
- il faut placer le haut-parleur et le sonomètre de manière à avoir le moins de réflexions parasites sur des éléments de la salle (table, mur, plafond, ...). Il vaut donc mieux mettre le sonomètre à la verticale du haut-parleur,
- cette manipulation est souvent désagréable car le son émis par le haut-parleur est, à certaines fréquences, très déplaisant (vivement les expériences avec des émetteurs ultrasonores !).

2. LINÉARITÉ DU HAUT-PARLEUR

2.1. Objectif

Vérifier que l'intensité acoustique (en $W \cdot m^{-2}$) est liée à l'amplitude des vibrations sonores c'est-à-dire à l'amplitude des vibrations de la membrane du haut-parleur, ou encore à l'amplitude de la tension excitatrice.

2.2. Matériel

Le même que pour l'expérience 1.

2.3. Montage

Même montage que pour la mesure de la courbe de réponse.

2.4. Protocole expérimental

A **fréquence constante**, augmenter progressivement l'amplitude de la tension d'alimentation du haut-parleur. Relever pour plusieurs valeurs de la tension, l'intensité acoustique à l'aide du sonomètre.

Conditions expérimentales

- Diamètre du haut-parleur : 12 cm.
- Distance sonomètre / haut-parleur : $d = 1$ m.
- Niveau de bruits de fond < 50 dB.

Résultats

- $f = 2000$ Hz

$U_{c.a.c}$ (V)	0,027	0,058	0,114	0,18	0,38	0,55
L (dB)	54	61,5	67	69	75	79

$U_{c.a.c}$ (V)	0,76	1,1	1,6	2,5	4
L (dB)	83	88	91	94	99

- $f = 8000$ Hz

$U_{c.a.c}$ (V)	0,04	0,08	0,16	0,4	0,8	1,6	4,0	6,0	8,0	10
L (dB)	56	62,5	68	77	82	89	96	100	102	104

2.5. Exploitation des résultats**Théorie**

On veut vérifier que l'intensité acoustique I de l'onde sonore est proportionnelle au carré de son amplitude A , donc également au carré de l'amplitude U_m de la tension d'alimentation :

$$I = K U_m^2$$

Avec le sonomètre, on mesure le niveau acoustique :

$$L = 10 \log (I/I_0) \text{ en dB}$$

où $I_0 = 10^{-12} \text{ W.m}^{-2}$ est l'intensité acoustique minimale audible.

$$L = 10 \log \left((K U_m^2) / (K U_0^2) \right) = 20 \log \left((U_m) / (U_0) \right)$$

D'où :
$$U_m = U_0 10^{L/20}$$

Donc : U_m et $10^{L/20}$ doivent être proportionnelles.

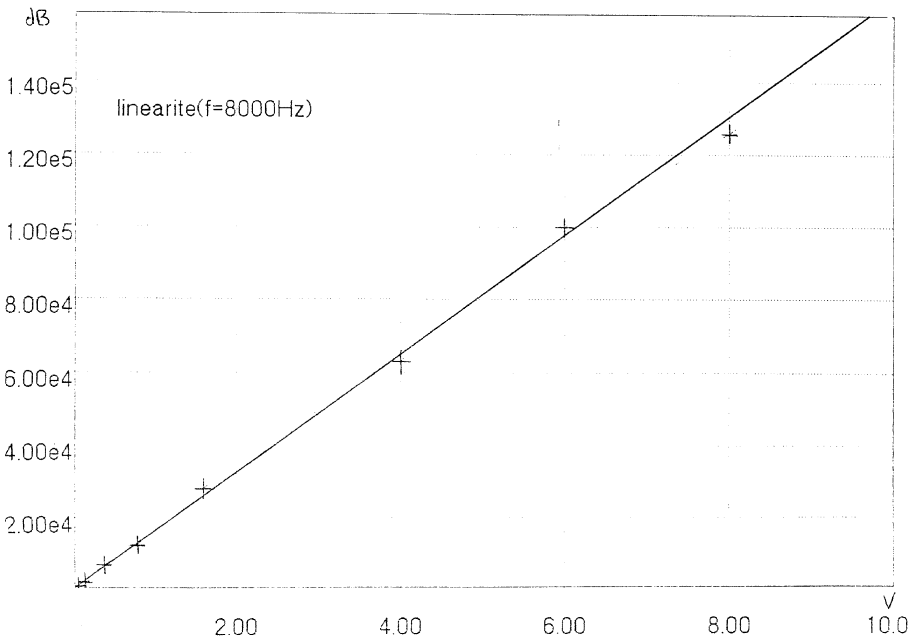
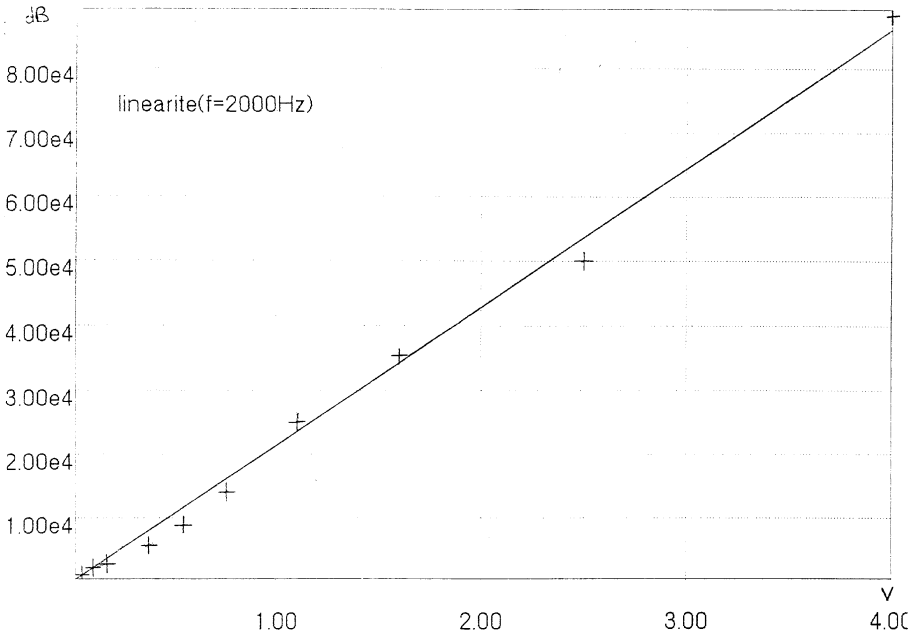


Figure 3

Conséquence (cf. figure 3)

- Tracer $10^{L/20}$ en fonction de U_m .
- Vérifier que cette courbe est une droite.

3. DIRECTIVITÉ

3.1. Objectifs

- Montrer le rôle des enceintes.
- Montrer qu'un haut-parleur n'émet pas de la même façon dans les graves et dans les aigus.

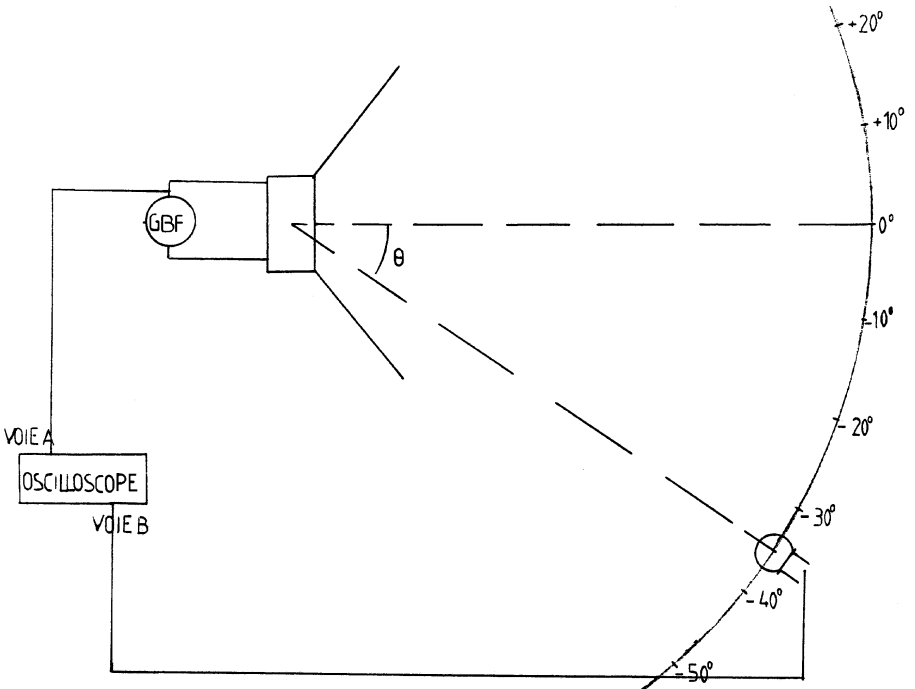


Figure 4

3.2. Matériel

- Un haut-parleur sans enceinte.
- Un haut-parleur avec enceinte (de même type que celui sans enceinte).
- Un microphone.
- Un oscilloscope.
- Un GBF.
- Une grande feuille de papier.
- Un rapporteur.

3.3. Montage (cf. figure 4)

3.4. Protocole expérimental

- Tracer un cercle de rayon 1 m sur la grande feuille de papier.
- A l'aide d'un rapporteur, repérer les angles de 10° en 10° sur tout le cercle.
- Disposer le haut-parleur au centre du cercle.
- Disposer le microphone en face sur le cercle (l'angle θ entre le haut-parleur et le microphone est de 0°).
- Alimenter le haut-parleur à l'aide du GBF, et relier celui-ci à la voie A de l'oscilloscope.
- Fixer la valeur de la tension d'alimentation U_e du haut-parleur (il faudra vérifier qu'elle reste constante au cours de l'expérience).
- Fixer la fréquence f .
- Relever la tension U_s délivrée par le microphone sur l'oscilloscope en fonction de l'angle θ ; le microphone se déplaçant sur le cercle, de manière à maintenir constante la distance haut-parleur, microphone.
- Recommencer pour plusieurs fréquences, et avec le haut-parleur sans enceinte et le haut-parleur avec enceinte.

3.5. Exploitation

Tracer le diagramme de rayonnement. Pour cela tracer un cercle, repérer les angles de 10° en 10° . Pour chaque valeur de θ porter un segment dont la longueur est proportionnelle à la tension U_s correspondante (cf. figures 5a, 5b et 5c).

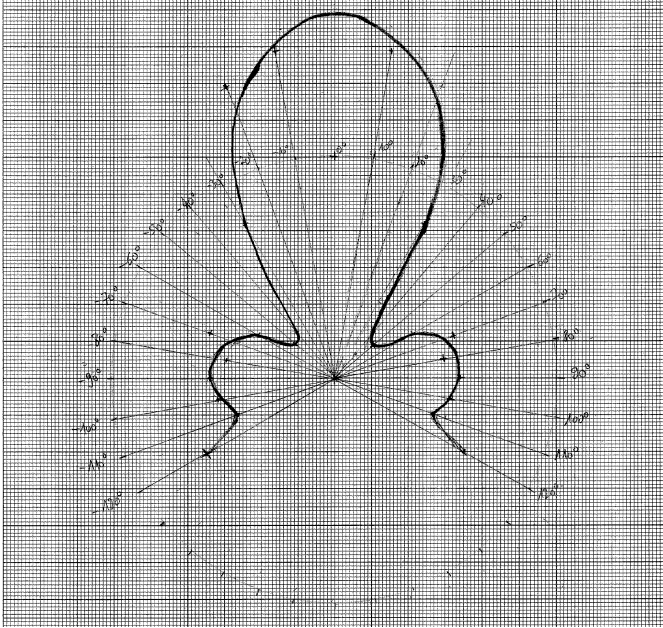


Figure 5a : Diagramme de rayonnement - Haut-parleur sans enceinte - $f = 6800$ Hz.

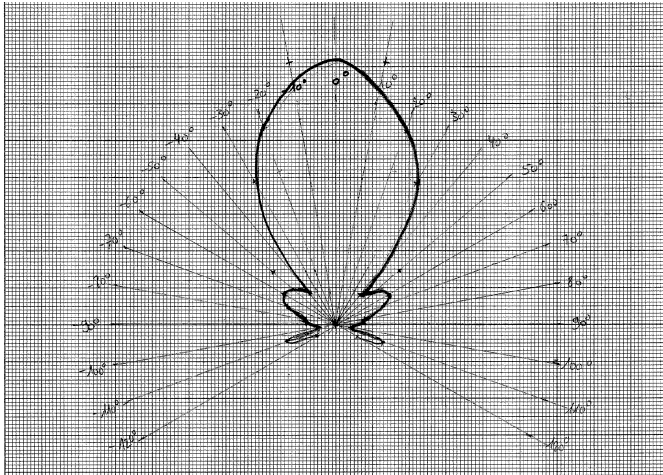


Figure 5b : Diagramme de rayonnement - Haut-parleur avec enceinte - $f = 6800$ Hz.

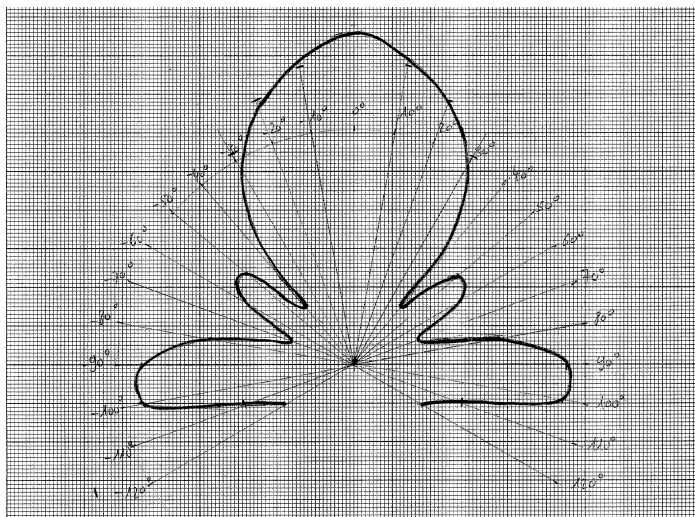


Figure 5c : Diagramme de rayonnement - Haut-parleur avec enceinte - $f = 500$ Hz.

3.6. Conclusions

- Le diagramme de rayonnement d'un haut-parleur sans enceinte montre l'existence d'une onde arrière et d'une onde avant.
- Le haut-parleur avec enceinte, émettant à la même fréquence que le haut-parleur sans enceinte, ne présente plus cette onde arrière, onde qui a été supprimée par la présence de l'enceinte.
- Les diagrammes de rayonnement d'un haut-parleur avec enceinte à basses fréquences et à hautes fréquences montrent nettement qu'à basses fréquences le rayonnement est peu directif, alors qu'à haute fréquence au contraire il est très directif.

4. COURBE D'IMPÉDANCE

4.1. Préliminaire

Jusqu'à présent, un élève de seconde n'a utilisé que l'ohmmètre pour mesurer la résistance d'un conducteur ohmique. Mais un ohmmètre ne convient pas pour mesurer l'impédance d'un haut-parleur. Cet appareil mesure une résistance r en courant continu, alors que l'impédance Z est, par définition, une résistance en courant alternatif : $Z = u(t)/i(t)$.

Il n'est donc pas étonnant qu'en examinant un haut-parleur à l'ohmmètre, on trouve une valeur r inférieure à celle qu'annonce le fabricant. Pour notre haut-parleur étudié d'impédance, d'après la fiche technique, égale à 8Ω , l'ohmmètre indique $r = 2.4 \Omega$.

4.2. Origine de la différence entre la résistance en continu et en alternatif d'un haut-parleur

Nous savons qu'un des organes le plus important d'un haut-parleur est la bobine mobile, qui comporte quelques dizaines de centimètres de fil de cuivre fin (ou d'aluminium). La longueur, le diamètre et la nature du fil déterminent sa résistance r au courant continu : $r = \rho l/s$ où ρ est la résistivité du fil, l sa longueur et s sa section.

Mais une bobine possède également une **inductance L** (exprimée en Henry) qui contribue, en courant alternatif, à son impédance. Comme un haut-parleur est toujours alimenté en alternatif, la réactance $\chi = 2 \pi f L$ («résistance», en ohms, en courant alternatif d'une inductance L) va jouer un rôle.

Ainsi l'impédance Z du haut-parleur est formée par la résistance r en continu et la réactance χ :

$$Z = (r^2 + (\chi)^2)^{1/2}$$

D'où la différence entre l'impédance donnée pour le haut-parleur et la valeur mesurée par l'ohmmètre.

4.3. Montages destinés à mesurer l'impédance d'un haut-parleur

L'appareil adéquat pour déterminer une impédance est un **impédancemètre**, instrument injectant un courant alternatif de fréquence variable. Mais rares sont les lycées détenant un tel appareil !

Il faut donc avoir recours à des montages permettant de mesurer à la fois la tension u_{HP} aux bornes du haut-parleur et l'intensité i du courant qui le traverse.

4.4. Objectif des montages

Mesurer la tension aux bornes du haut-parleur u_{HP} et une tension proportionnelle à l'intensité i pour différentes fréquences.

4.5. Montage 1

Matériel

- Un générateur basse fréquence (GBF) à sortie différentielle.
- Une résistance $R = 10 \Omega$ (ou 100Ω).
- Un haut-parleur.
- Un fréquencemètre.
- Un oscilloscope (ou deux voltmètres).

Montage

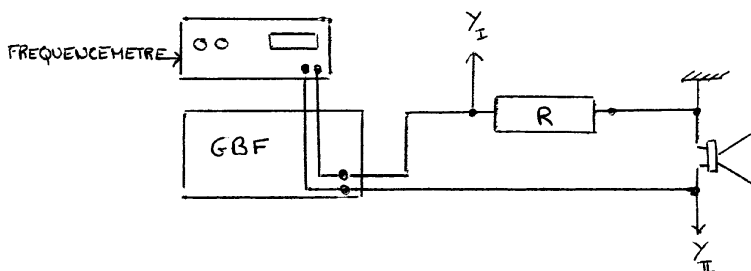


Figure 6

L'oscilloscope détecte :

- sur la voie I : $u_R = R i$,
- sur la voie II : $-u_{HP}$.

Remarque : Nous avons choisi une faible valeur de la résistance R afin de ne pas avoir une intensité trop faible dans le circuit.

4.6. Montage 2

Pour des raisons de sécurité, peu de lycées disposent de générateur à sortie différentielle. Généralement, l'une des bornes de sortie est, par construction, mise au potentiel Terre.

Pour imposer la masse (qui est reliée à la terre par la prise de terre des appareils) entre la résistance et le haut-parleur, il devient alors nécessaire d'isoler le générateur avec un transformateur d'isolement.

Matériel

- Un générateur de basse fréquence (GBF).
- Une résistance $R = 10 \Omega$ (ou 100Ω).
- Un haut-parleur.
- Un fréquencemètre.
- Un oscilloscope (ou deux voltmètres).
- Un transformateur d'isolement.

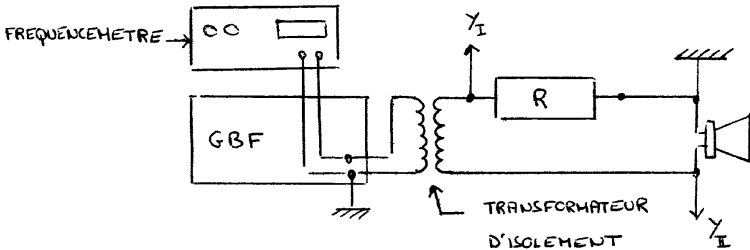
Montage

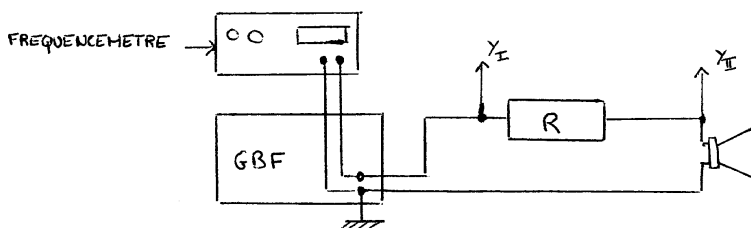
Figure 7

4.7. Problème

Le transformateur d'isolement est normalement conçu pour fonctionner à une fréquence égale à 50 Hz. On ne peut donc l'utiliser ni aux très basses fréquences (< 20 Hz), ni à des fréquences supérieures à 10 kHz (où des effets capacitifs parasites dus aux rapprochements des fils constituant l'enroulement des bobines prennent naissance).

4.8. Montage 3**Matériel**

- Un générateur basse fréquence (GBF).
- Une résistance $R = 1 \text{ k}\Omega$.
- Un haut-parleur.
- Un fréquencemètre.
- Un oscilloscope (ou deux voltmètres).

Montage**Figure 8****4.9. Choix de la valeur de la résistance R**

Nous mesurons :

- sur la voie I : $u_I = (Z + R) i$,
- sur la voie II : $u_{II} = u_{HP}$.

Ainsi, nous obtenons sensiblement une tension proportionnelle à l'intensité i , si la résistance R est bien supérieure à l'impédance Z du haut-parleur. Dans ces conditions, $u_I = R i$.

Comme l'impédance Z d'un haut-parleur reste généralement inférieure à 50Ω (sauf aux fréquences très élevées), on pourra prendre $R = 1 \text{ k}\Omega$. Ainsi, l'erreur due à l'approximation restera inférieure à 5 %.

Cette grande valeur de R transforme la source de tension en une source de courant délivrant une intensité i environ constante.

Remarque : Suivant le haut-parleur utilisé et la fréquence à laquelle on se trouve, on adoptera une valeur adéquate pour la résistance R . Pour des fréquences où $Z = 8 \Omega$, la valeur $R = 100 \Omega$ suffira ; celle-ci limitera moins l'intensité dans le circuit.

Protocole expérimental

- Augmenter progressivement la fréquence du générateur de 10 Hz à 25 kHz, et relever les valeurs des tensions u_{HP} et u_R pour différentes valeurs de la fréquence (suivant une progression logarithmique).

Attention : Les appareils de mesure (oscilloscope ou voltmètre) doivent fonctionner dans la gamme de fréquence utilisée (de 0 à 25 kHz).

– En déduire l'impédance $Z = u_{HP}/i$ en fonction de la fréquence.

Résultats expérimentaux

(déterminés avec le montage 3 av $R = 1000 \Omega$)

f (Hz)	10	25	51	71	90	95	100	110
$U_{c.\grave{a}.c.HP}$ (mV)	44	35	38	41	57	76	116	94
$U_{c.\grave{a}.c.R}$ (V)	5,8	5,4	5,2	5,2	5,2	5,2	5,3	5,3
$I = U_{c.\grave{a}.c.R}/R$ (mA)	5,8	5,4	5,2	5,2	5,2	5,2	5,3	5,3
Z (Ω)	7,59	6,48	7,31	7,88	10,96	14,6	21,90	17,73

f (Hz)	120	150	200	500	1000	3000	5000	7000
$U_{c.\grave{a}.c.HP}$ (mV)	56	37	34	112	112	134	156	175
$U_{c.\grave{a}.c.R}$ (V)	5,2	5,2	5,2	18	18	18	18	18
$I = U_{c.\grave{a}.c.R}/R$ (mA)	5,2	5,2	5,2	18	18	18	18	18
Z (Ω)	10,77	7,12	6,53	6,22	6,22	7,44	8,67	9,72

f (Hz)	10^4	12.10^3	14.10^3	17.10^3	19000	25000
$U_{c.\grave{a}.c.HP}$ (mV)	200	220	235	265	280	325
$U_{c.\grave{a}.c.R}$ (V)	18	18	18	18	18	18
$I = U_{c.\grave{a}.c.R}/R$ (mA)	18	18	18	18	18	18
Z (Ω)	11,1	12,22	13,06	14,72	15,56	18,06

Exploitation des résultats

- Tracer l'impédance Z en fonction de la fréquence.
- En déduire la bande de fréquence sur laquelle le haut-parleur doit être utilisé.
- Quelle est la valeur moyenne de l'impédance dans cette gamme de fréquence ? Comparer avec la valeur donnée par le constructeur.

Réponse : La courbe $Z = g(f)$ obtenue (cf. figure 9) montre bien que l'impédance d'un haut-parleur augmente avec la fréquence. Le haut-

parleur n'est destiné à fonctionner que sur la plage de fréquence où son impédance est environ **constante** pour qu'il ne favorise pas certaines fréquences aux dépens des autres. La valeur de l'impédance donnée par le fabricant est alors une valeur moyenne de l'impédance sur cette gamme de fréquence.

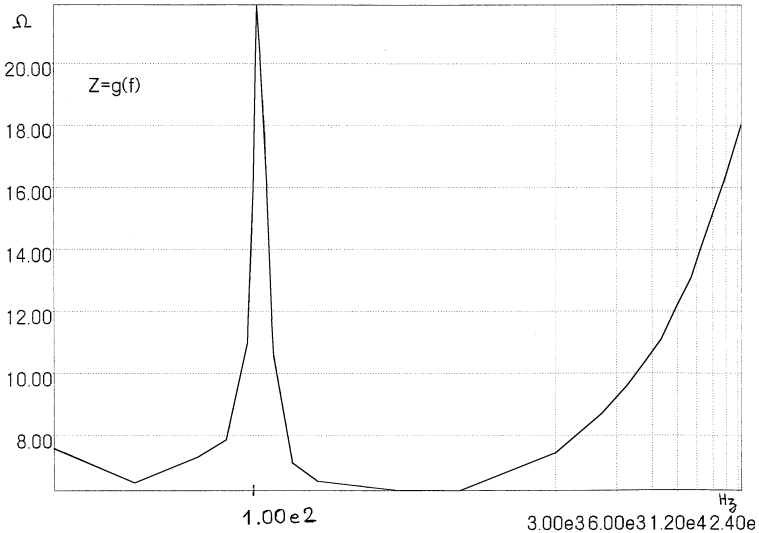


Figure 9 : Variation de l'impédance en fonction de la fréquence.

Applications de cette courbe

Quelle est l'utilité de connaître l'impédance d'un haut-parleur ?

- Tout d'abord, il ne faut jamais connecter un haut-parleur d'impédance inférieure à celle pour laquelle l'amplificateur est prévu, sous risque de détérioration de l'amplificateur.
- Ensuite, l'impédance des haut-parleurs joue sur le calcul des filtres de séparation des voies pour une enceinte acoustique ; en effet, les caractéristiques des filtres dépendent de l'impédance de la charge.