



Systèmes électroacoustiques

On se propose de tester quelques dispositifs de reproduction du son (voir données constructeur en **Annexe 1**) :



enceinte A

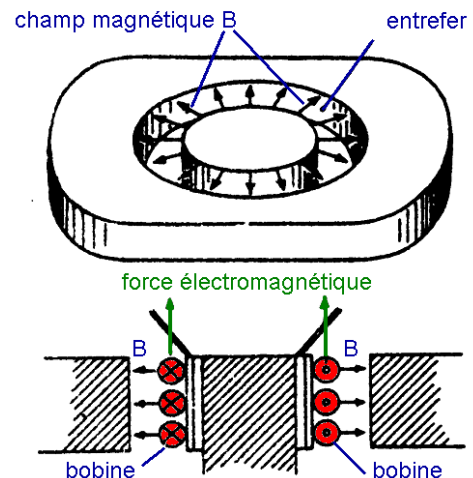
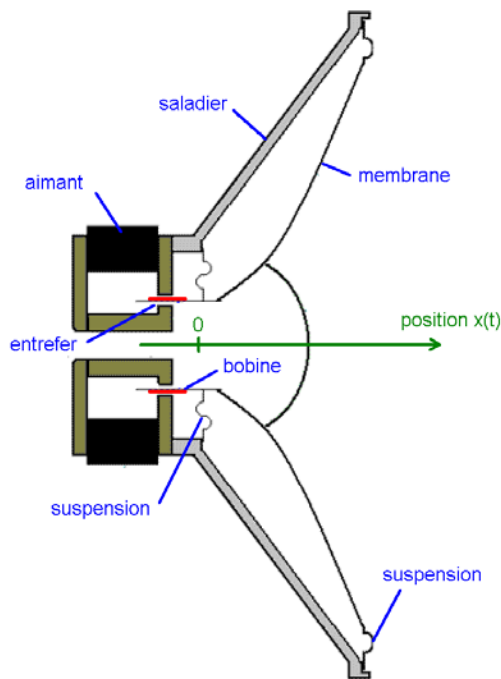
enceinte B
(3 voies)



caisson de
graves actif C

Pour l'enceinte A, on dispose aussi d'un haut-parleur grave-médium nu pour les mesures sans caisson acoustique (activités 4 – 5 – 6).

Rappels sur le fonctionnement du haut-parleur :



⇒ la bobine, placée dans un champ magnétique B et parcourue par un courant i , est soumise à une force électromagnétique f_1 , vers l'avant ou vers l'arrière suivant le sens du courant, qui fait varier sa position $x(t)$.

La **force motrice** f_1 a pour expression : $f_1(t) = Bli(t)$ avec l : longueur du fil constituant la bobine

⇒ pour maintenir l'équipage mobile, l'équipage mobile est relié au saladier par deux suspensions souples.

La **force de rappel élastique** s'écrit : $f_2(t) = k \cdot x(t)$ où k est la raideur de la suspension

⇒ la résistance de l'air s'oppose au mouvement.

La **force de résistance de l'air** s'écrit : $f_3(t) = a \cdot v(t)$ où a est le coefficient de frottement visqueux

⇒ à cause de son déplacement dans un champ magnétique, il apparaît dans la bobine une **tension induite** $e(t)$

La **fem** induite a pour expression : $e(t) = Blv(t)$ où v est la vitesse de la membrane en m/s

Activité 1 : équation mécanique du haut-parleur

La loi fondamentale de la dynamique suivant l'axe de déplacement de la membrane s'écrit :

$$\text{somme algébrique des forces} = f_1 - f_2 - f_3 = m \cdot dv/dt$$

On rappelle que :

- en mécanique, la vitesse $v(t)$ est la dérivée de la position $x(t)$: $v(t) = \frac{dx(t)}{dt}$
- en notation complexe, la dérivation devient une multiplication par $j\omega$: $\underline{V}(j\omega) = j\omega \underline{X}(j\omega)$

Ecrire la relation fondamentale de la dynamique pour le haut-parleur. Passer des grandeurs temporelles aux grandeurs complexes et en déduire une relation entre la vitesse $\underline{V}(j\omega)$ et le courant $\underline{I}(j\omega)$

Activité 2 : équation électrique du haut-parleur

On appelle $u(t)$ la tension aux bornes du haut-parleur, R la résistance de la bobine mobile et L son inductance.

Sachant que la bobine en mouvement est aussi le siège d'une fem induite $e(t)$, dessiner le schéma équivalent du haut-parleur.

Ecrire la loi d'Ohm pour la bobine et en déduire une deuxième relation entre $\underline{U}(j\omega)$, $\underline{I}(j\omega)$ et la vitesse $\underline{V}(j\omega)$.

Activité 3 : impédance du haut-parleur

En éliminant la vitesse $\underline{V}(j\omega)$ entre les deux équations, montrer que l'impédance du haut-parleur $\underline{Z}(j\omega)$ s'écrit :

$$\underline{Z}(j\omega) = R + jL\omega + \frac{(Bl)^2}{a + j(m\omega - \frac{k}{\omega})} = R + jL\omega + \underline{Z}_m \quad \text{où } \underline{Z}_m \text{ est l'impédance motionnelle}$$

On montre que le module de l'impédance motionnelle $\underline{Z}_m(j\omega) = \frac{(Bl)^2}{a + j(m\omega - \frac{k}{\omega})}$ passe par un maximum à la

fréquence f_0 telle que : $m\omega_0 = \frac{k}{\omega_0}$.

En déduire l'expression de la fréquence de résonance f_0 en fonction de m et k .

Activité 4 : mesure de la résistance R du haut-parleur

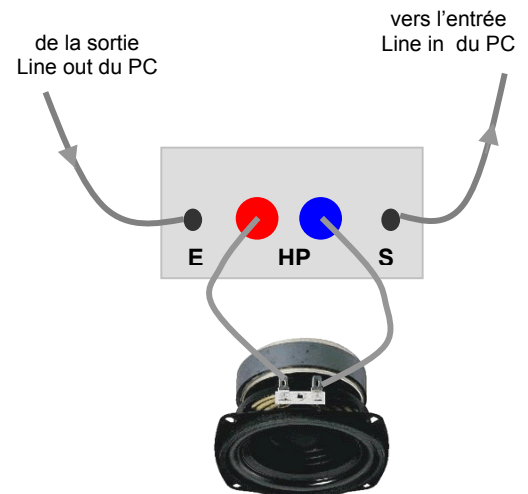
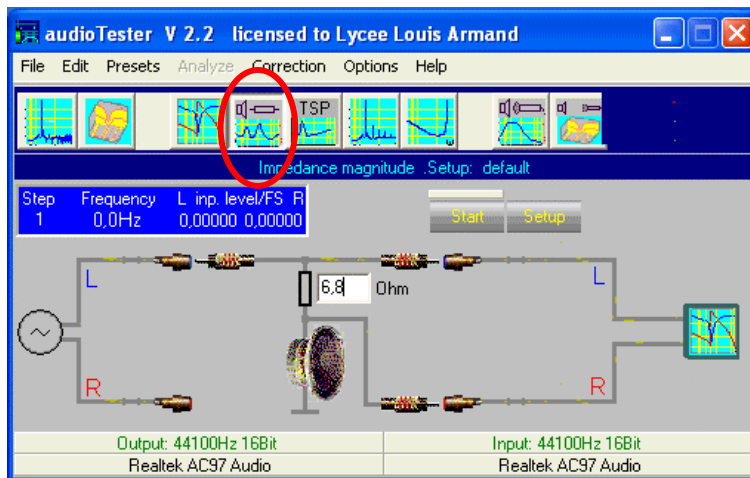
Mesurer à l'ohmmètre la résistance R de la bobine en continu.

Remarques : un haut-parleur n'est pas une résistance pure, son impédance dépend de la fréquence :

- dire qu'un haut-parleur « fait 8Ω » n'a donc pas beaucoup de sens
- cette valeur de 8Ω n'est pas autre chose qu'une valeur moyenne très approximative
- on trouve dans le commerce des haut-parleurs de 8Ω et plus rarement des haut-parleurs de 4Ω (autoradios)
- les haut-parleurs de 8Ω n'ont pas une impédance de 8Ω , et les haut-parleurs de 4Ω « ne font pas » 4Ω !

Activité 5 : courbe d'impédance du haut-parleur seul

Le logiciel Audiotester permet de relever de manière automatique la courbe du module de l'impédance $|Z(j\omega)|$ en fonction de la fréquence grâce au boîtier adaptateur fourni.



Réaliser le montage, entrer dans Audiotester la bonne valeur pour la résistance en série avec le haut-parleur (6,8 Ω) et relever la courbe d'impédance du haut-parleur.

Déterminer grâce à cette courbe la fréquence de résonance f_0 et le module de l'impédance $|Z(j\omega)|$ à 10 kHz et 20 kHz.

En déduire la valeur de l'inductance L du haut-parleur (on négligera l'impédance motionnelle dans ce calcul).

Activité 6 : masse de l'équipage mobile

Placer sur la membrane du haut-parleur une surcharge m' connue (pièce de monnaie de 10 centimes : $m' = 2,9952$ g) et relever une nouvelle courbe d'impédance avec sa nouvelle résonance à f'_0 .

A partir des valeurs de f_0 et f'_0 , déterminer la masse m de l'équipage mobile et la raideur k de la suspension.

Activité 7 : courbe d'impédance du haut-parleur dans l'enceinte A

Réaliser le montage avec l'enceinte A et relever la courbe d'impédance de l'enceinte bass-reflex (voir **Annexe 2**). Que constate-t-on au niveau de la résonance du haut-parleur ? Relever les deux fréquences de résonance f_1 et f_2 .

Pour une enceinte bass-reflex bien conçue, les deux pics de résonance ont à peu près la même amplitude : est-ce le cas pour cette enceinte ?

Boucher hermétiquement l'évent avec la paume de la main et relever la nouvelle courbe d'impédance. Que constate-t-on ? L'air contenu dans l'enceinte est élastique et se comporte comme un ressort. Expliquer le déplacement de la résonance par rapport au haut-parleur nu.

Calculer la nouvelle raideur k' qui tient compte à la fois de l'élasticité de la suspension et de l'élasticité de l'air dans le volume intérieur de l'enceinte.

Activité 8 : courbe d'impédance de l'enceinte B

Relever la courbe d'impédance de l'enceinte B. Relever les valeurs des différentes fréquences de résonance et expliquer les points particuliers de la courbe.

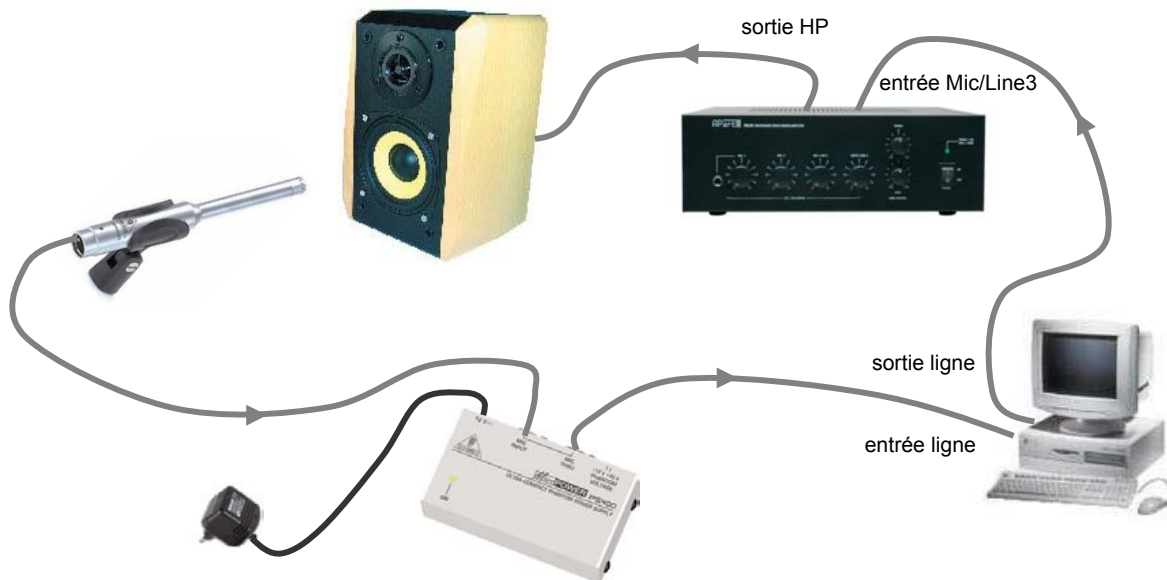
Activité 9 : courbe de réponse d'une enceinte bass-reflex

On utilise maintenant la fonction « Impulse 2D Measurement » d'Audiotester pour relever la courbe de réponse d'une enceinte.

Les avantages de cette mesure impulsionnelle sont nombreux :

- pas de pollution sonore de l'environnement proche, comme avec une fréquence glissante
- insensibilité de la mesure par rapport aux réflexions sur les murs

Appliquer à l'enceinte A le signal produit par Audiotester par l'intermédiaire d'un amplificateur de puissance et placer un microphone **devant le haut-parleur** médium-grave.



Visualiser la courbe de réponse entre 20 Hz et 20 kHz, puis ajuster la fréquence maximale au domaine de fonctionnement du haut-parleur et relever sa courbe de réponse pour une impulsion de Dirac, puis pour un bruit blanc.

La courbe de réponse est-elle régulière ? Evaluer l'amplitude des variations de niveau. Evaluer les fréquences de coupure à -3dB ou à -6dB .

Placer un microphone **devant l'évent** de l'enceinte bass-reflex. Visualiser la courbe de réponse entre 20 Hz et 200 Hz et relever sa courbe de réponse.

La courbe de réponse est-elle régulière ? Evaluer l'amplitude des variations de niveau. Evaluer les fréquences de coupure à -3dB ou à -6dB .

L'émission acoustique de l'évent élargit-elle l'émission du haut-parleur vers les fréquences graves ?

Activité 10 : distorsion d'une enceinte acoustique

Injecter dans l'amplificateur un signal sinusoïdal de fréquence 250 Hz et placer un microphone devant le haut-parleur médium-grave de l'enceinte A.

Relever le spectre du son émis par le haut-parleur et mesurer la distorsion harmonique totale du haut-parleur à 250 Hz.

Même question pour l'enceinte B.

Activité 11 : caractéristiques du caisson de graves C

En injectant le signal de test d'Audiotester directement à l'entrée de l'amplificateur de puissance du caisson C, relever les courbes de réponse du haut-parleur et de l'évent. Commenter.

Mesurer la distorsion harmonique du caisson C à 150 Hz. Commenter.

Annexe 1 : caractéristiques des enceintes

Enceinte A :

- **enceintes 2 voies**
- finition bois naturel
- $P_{\max} = 20$ WRMS / 60W pointe
- impédance 8 ohms
- plage de fréquence 60 à 20.000 Hz
- dimensions 23 x 17 x 15 cm
- masse unitaire 2,8 kg



Enceinte colonne B :

- **enceintes 3 voies**
- finition bois naturel
- $P_{\max} = 180$ W
- impédance 8 ohms
- plage de fréquence 38 à 20.000 Hz
- rendement 98 dB/W

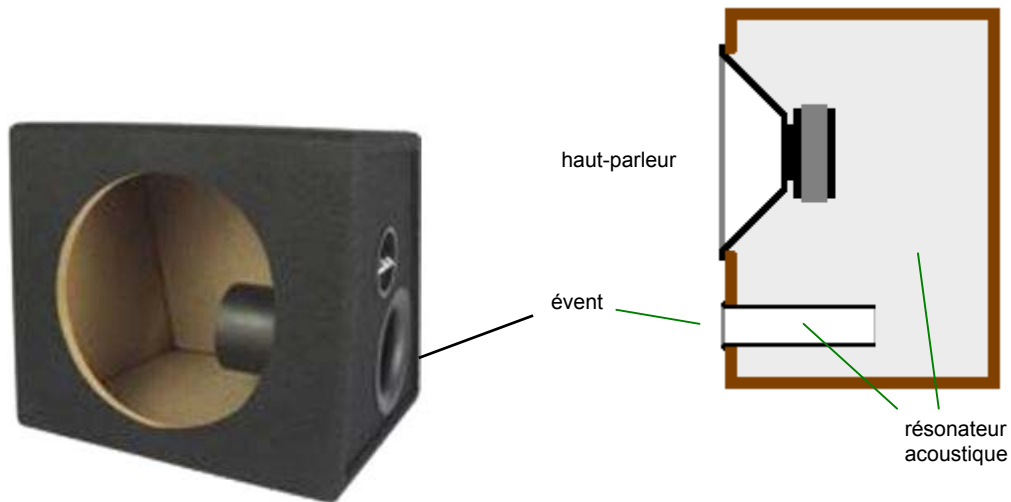


Caisson de grave actif C :

- amplificateur Mosfet 85 watts RMS intégré
- système bass-reflex
- bande passante 40-250 Hz
- protection contre les surcharges et surchauffes
- alimentation 12 volts avec + de commande
- entrées bas niveau RCA ou haut-niveau (HP)
- réglage de niveau de sortie
- réglage de fréquence de coupure
- boomer hautes performances 31 cm, bobine 38 mm
- membrane PVC avec suspension caoutchouc
- dimensions : 280 x 400mm x 365mm
- masse : 12,5 Kg

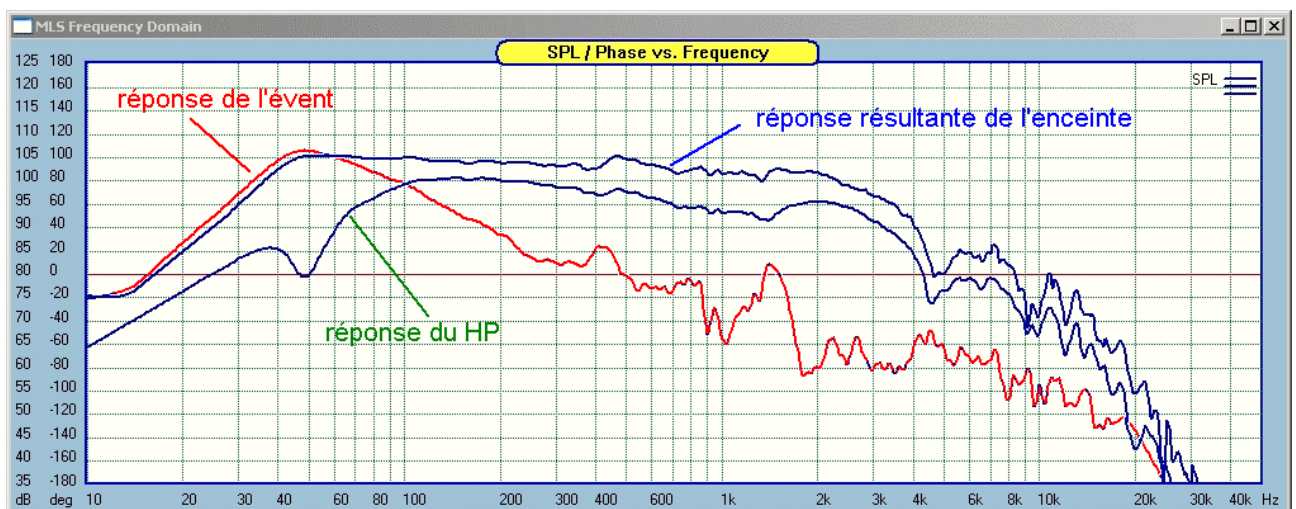


Annexe 2 : principe de l'enceinte Bass-Reflex



L'enceinte Bass-reflex :

- elle se reconnaît à l'ouverture pratiquée sur une de ses faces appelée **évent**
- le volume de l'enceinte et le tube de l'évent forment un résonateur acoustique caractérisé par sa fréquence de résonance f_r
- si on dimensionne l'évent pour que $f_r \approx f_0$ c'est l'évent qui va émettre le son au voisinage de f_0 , à la place du HP
- la résonance du haut-parleur est dédoublée en 2 pics symétriques de part et d'autre de f_0
- on améliore ainsi le rendement aux fréquences basses et on abaisse un peu la fréquence de coupure basse de l'enceinte
- il faut que l'ensemble soit bien calculé pour éviter les résonances trop marquées qui donnent un son de tonneau



Annexe 3 : microphone de mesure ECM8000

MEASUREMENT MICROPHONE

FEATURES

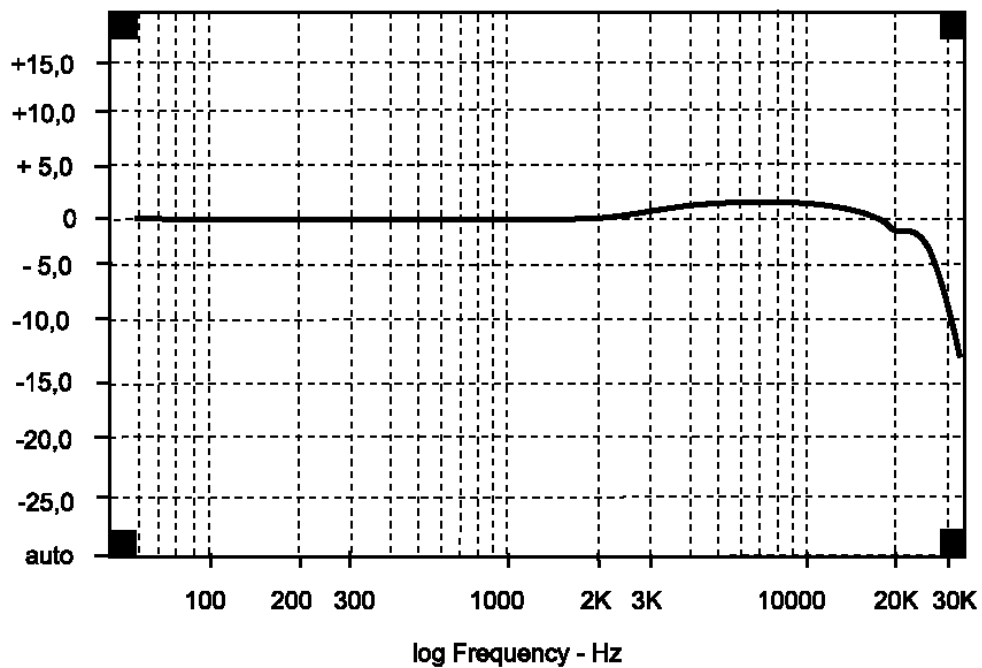
- ▲ Precise electret condenser measurement microphone
- ▲ Ultra-linear frequency response
- ▲ Well-balanced, true omni-directional pattern
- ▲ Optimally suited for room correction applications
- ▲ Phantom powered, +15 V to +48 V
- ▲ Rugged construction and sleek, modern design
- ▲ Microphone stand adapter and windscreen for outdoor measurement included
- ▲ Perfect for use with the ULTRA-CURVE DSP8000 / ULTRA-CURVE PRO DSP8024 or any other real-time analyzer
- ▲ Manufactured under the BEHRINGER quality control

SPECIFICATIONS

Type	electret condenser, omni-directional
Impedance	600 Ohms
Sensitivity	-60 dB
Frequency response	15 Hz to 20 kHz
Connector	gold-plated XLR
Phantom power	+15 V to +48 V
Weight	app. 120 g



Transfer Function Mag - dB volts/volts (0.33 oct) (eg)



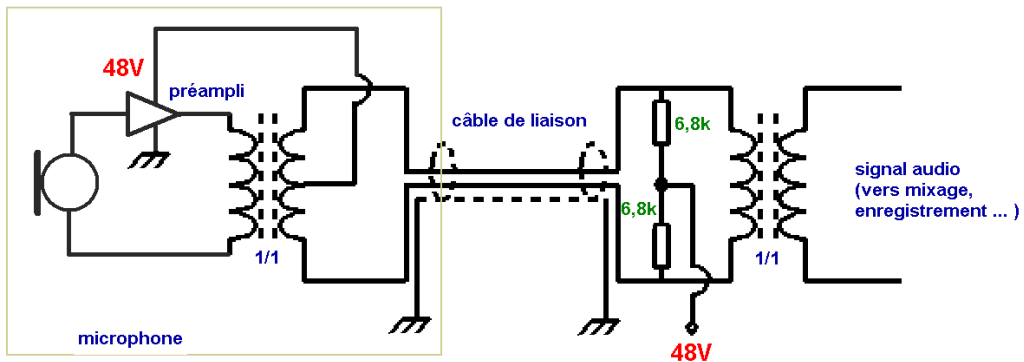
Annexe 4 : alimentation « fantôme » du microphone

De nombreux types de microphones (par exemple les microphones à condensateur ou électret) contiennent aujourd'hui un préamplificateur et nécessitent donc d'être alimentés.

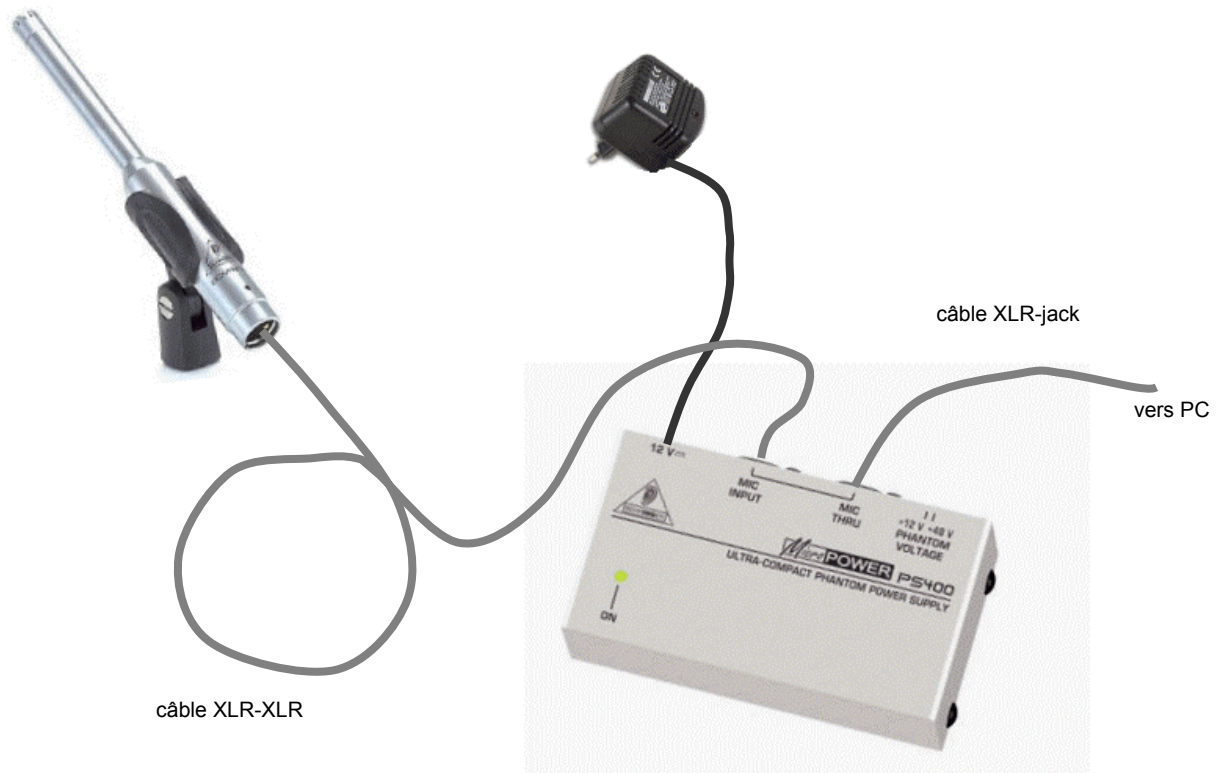
Pour éviter la pile à l'intérieur du microphone, ceux-ci sont téléalimentés par la table de mixage ou l'enregistreur, au moyen d'une alimentation appelée « fantôme » (phantom pour les anglo-saxons) :

- le câble du microphone comporte 2 conducteurs + le blindage
- le signal audio est appliqué entre les deux conducteurs
- la tension d'alimentation (48V en standard) est appliquée entre les deux conducteurs et la masse

Le schéma de l'alimentation « fantôme » est le suivant :



Le microphone ECM800 sera relié à son « alimentation fantôme » PS400 de la manière suivante :



► Systèmes électroacoustiques : réponses

Rédacteur :

Binôme :

Date :

Activité 1 : équation mécanique du haut-parleur

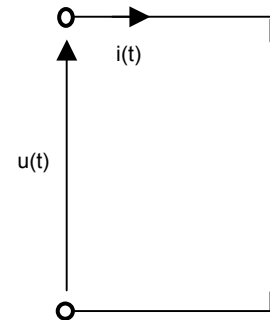
Relation fondamentale de la dynamique pour le haut-parleur :

$$f_1 - f_2 - f_3 = m \cdot dv/dt \quad \text{soit}$$

Activité 2 : équation électrique du haut-parleur

Loi d'Ohm pour la bobine :

schéma équivalent du haut-parleur :



Activité 3 : impédance du haut-parleur

Impédance $\underline{Z}(j\omega)$:

Formule de la fréquence de résonance : $f_0 =$

Activité 4 : mesure de la résistance R du haut-parleur

Résistance de la bobine en continu $R = \dots\dots\dots$

Activité 5 : courbe d'impédance du haut-parleur seul

⇒ **Courbe d'impédance du haut-parleur** : > voir courbe n° $\dots\dots\dots$

Fréquence de résonance : $f_0 = \dots\dots\dots$

Module de l'impédance $|Z(j\omega)|$: à 10 kHz $Z = \dots\dots\dots$ à 20 kHz $Z = \dots\dots\dots$

Si on néglige l'impédance motionnelle, l'impédance s'écrit : $Z(j\omega) \approx R + jL\omega$

⇒ calcul de L (à 10 kHz) : 	⇒ calcul de L (à 20 kHz) :
Valeur moyenne de l'inductance : $L = \dots\dots\dots$	

Activité 6 : masse de l'équipage mobile

⇒ **Courbe d'impédance du haut-parleur avec surcharge** : > voir courbe n° $\dots\dots\dots$

Fréquence de résonance : $f_0 = \dots\dots\dots$

La fréquence de résonance s'écrit : ⇒ sans surcharge $f_0 = \dots\dots\dots$ ⇒ avec surcharge : $f_0 = \dots\dots\dots$

Calcul de m et de k :

Activité 7 : courbe d'impédance du haut-parleur dans l'enceinte A

⇒ **Courbe d'impédance du haut-parleur monté dans l'enceinte** : > voir courbe n°

fréquences de résonance : $f_1 = \dots\dots\dots$ et $f_2 = \dots\dots\dots$

Commentaire :
.....

⇒ **Courbe d'impédance du haut-parleur dans l'enceinte (évent bouché)** : > voir courbe n°

Commentaire :
.....

Calcul de la nouvelle raideur k' qui tient compte de l'élasticité de l'air contenu dans l'enceinte :

Activité 8 : courbe d'impédance de l'enceinte B

⇒ **Courbe d'impédance** : > voir courbe n°

Commentaires :
.....
.....
.....

Activité 9 : courbe de réponse d'une enceinte bass-reflex

⇒ **Courbe de réponse en impulsion** : > voir courbe n°

Plage de fréquences couverte : de à

Commentaire :
.....

⇒ **Courbe de réponse en bruit blanc** : > voir courbe n°

Plage de fréquences couverte : de à

Commentaire :
.....

⇒ **Courbe de réponse de l'évent (impulsion ou bruit blanc)** : > voir courbe n°

Plage de fréquences couverte : de à

Commentaire :
.....
.....

Activité 10 : distorsion d'une enceinte acoustique

⇒ **Spectre du son émis par le haut-parleur (enceinte A) à 250 Hz** : > voir courbe n°

Distorsion harmonique : THD =

Commentaire :
.....

⇒ **Spectre du son émis par le haut-parleur (enceinte B) à 250 Hz** : > voir courbe n°

Distorsion harmonique : THD =

Commentaire :
.....

Activité 11 : caractéristiques du caisson de graves C

⇒ **Courbe de réponse du haut-parleur (impulsion ou bruit blanc)** : > voir courbe n°

Plage de fréquences couverte : de à

Commentaire :
.....
.....

⇒ **Courbe de réponse de l'évent (impulsion ou bruit blanc)** : > voir courbe n°

Plage de fréquences couverte : de à

Commentaire :
.....
.....

⇒ **Spectre du son émis par le haut-parleur à 150 Hz** : > voir courbe n°

Distorsion harmonique : THD =

Commentaire :
.....