



PSL 



SORBONNE
UNIVERSITÉ

université
PARIS-SACLAY

Centre interuniversitaire de préparation à l'agrégation de Montrouge

ONDES I : ACOUSTIQUE

2022-2023



This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits distribution, and reproduction in any medium, provided the original author and source are credited. This license does not permit commercial exploitation or the creation of derivative works without specific permission.

Table des matières

1	Propagation des ultrasons	3
1.1	[1P] Propagation libre	3
1.2	[2P] Propagation dans l'eau	3
1.3	[1P] Propagation guidée	4
2	Le haut-parleur	5
2.1	Bibliographie	5
2.2	Introduction	5
2.3	Modèle du haut-parleur	6
2.4	Impédance du haut-parleur	8
2.5	[1P] Mesures des caractéristiques du haut-parleur	9
2.6	[1P] Étude de l'impédance électrique	10
2.7	[2P] Puissance acoustique rayonnée	13
2.8	[2P] Directivité du haut-parleur	14
2.9	[2P] Rendement d'un haut-parleur	14
3	Annexe : Les différents types de microphones	15
3.1	Différentes techniques	15
3.2	Relation entre nature de la sensibilité et directivité	15

Bibliographie :

- BUP 801 (février 1998) : Résonance aigüe et auto-oscillation d'un diapason
- Livres de prépa 2ème année

- Kinsler, Frey, Coppens & Sanders, *Fundamentals of Acoustics*
- Morse & Ingard, *Theoretical acoustics*
- G. Asch, "Les capteurs en instrumentation industrielle "

Outre le fait qu'ils soit largement utilisés par le monde vivant, par l'industrie et la recherche, l'utilisation d'ultrasons pour des TPs d'acoustique présente un certain nombre d'avantages. D'une part, leur longueur d'onde dans l'air est de l'ordre du centimètre, ce qui la rend facilement mesurable. D'autre part, leur production et détection par des piézoélectriques est très facile à mettre en œuvre. Enfin, leur fréquence n'est pas audible par définition ($f > 20$ kHz), ce qui est vite appréciable. Ainsi, pour l'étude de la propagation des ondes sonores, on utilisera de préférence les ultrasons. Toutefois, si c'est un haut-parleur (ou un microphone) qui est étudié, on travaillera dans sa bande passante, donc à des fréquences audibles ($f \approx 20$ Hz-20 kHz), pour lesquelles les longueurs d'ondes sont entre 1 cm et 10 m.

1 Propagation des ultrasons

La célérité du son est donnée par $c_s = 1/\sqrt{\rho\chi_s}$, où ρ est la masse volumique du milieu et χ_s sa compressibilité adiabatique. Pour l'air sec, dans les conditions usuelles¹ (20°C, 1 bar) : $c_s = 343$ m.s⁻¹.

1.1 [1P] Propagation libre

Les transducteurs utilisés sont des céramiques piézoélectriques² qui fonctionnent à la fréquence de 40 kHz. Voir la notice d'emploi de l'émetteur et du récepteur.

Placer les éléments piézoélectriques sur un banc d'optique. Brancher un émetteur sur un GBF à 40 kHz, et lisez les signaux émetteur et récepteur sur l'oscilloscope. On mesure la célérité des ultrasons dans l'air en utilisant une onde progressive harmonique en mesurant la longueur d'onde à une fréquence donnée. Faites plusieurs points en déplaçant le récepteur le long du banc. Observer l'amplitude et le déphasage entre les deux sinusoïdes. En déduire la longueur d'onde (avec la meilleure précision possible), puis la célérité de l'onde acoustique. Comparer avec la valeur attendue. Attention à l'influence de la température. Quelle est l'incertitude sur la valeur attendue ? Cette expérience simple demande un protocole expérimental fiable pour les mesures de longueurs pour obtenir une bonne précision de la célérité.

Quelques interrogations : la connaissance de la position précise de l'émetteur et du récepteur est-elle nécessaire dans cette expérience ? Placer le récepteur proche de l'émetteur et l'éloigner. Observer la variation d'intensité reçue. Justifier : 1) une décroissance globale, 2) des oscillations lorsque les deux piezo sont proches. Justifier que l'alignement horizontal est crucial pour cette expérience. A-t-on mesuré la vitesse de phase ou de groupe de l'onde ?

1.2 [2P] Propagation dans l'eau

Avec la nouvelle paire d'éléments piezoélectriques étanches, il est possible de faire l'expérience équivalente de la mesure de la vitesse de phase des ondes acoustiques dans l'eau.

Pour cela, remplir un grand contenant d'eau, placer les deux piezo face-à-face, et envoyer un signal sinusoïdal à 40kHz sur l'un des piezo. On mesure la vitesse de phase en mesurant la longueur d'onde de l'onde acoustique. Pour plus de précision, on mesurera plusieurs longueurs d'onde.

Comparer la valeur de la vitesse de phase trouvée avec une valeur tabulée. La température est-elle un facteur pertinent ?

Remarques :

1. En pratique, la valeur de c_s peut être légèrement différente du fait que la température de la salle diffère de $T = 293$ K. Par contre, l'influence de l'humidité de l'air est très faible car ρ et χ_s ont des variations qui se compensent (cf. Handbook à "Sound velocity"). Noter aussi l'approximation linéaire dans l'air : $c_s = (331,6 + 0,6\theta)$ m.s⁻¹ avec θ en °C.

2. Un matériau piézoélectrique se déforme sous l'effet d'un champ électrique. Le matériau est le siège de l'effet réciproque : sous l'effet d'une contrainte, il apparaît des charges électriques à la surface du matériau. Ces matériaux sont donc beaucoup utilisés comme émetteurs/récepteurs ultrasonores, soit sous forme de monocristaux, soit sous forme de céramiques comportant un grand nombre de cristallites orientées électriquement à chaud, puis frittées (c'est-à-dire comprimées durant le refroidissement) de façon à se déformer de manière cumulative.

- La cuve est ici très limitée spatialement par rapport à la longueur d'onde des ondes acoustiques. On peut donc avoir de nombreuses réflexions parasites (sur l'interface air/liquide, entre les piezo, sur le fond de la cuve, sur les bords, etc.) Il est donc normal de voir l'amplitude du signal reçu varier drastiquement sur la plage de mesure des longueurs d'onde.
- La mesure de la vitesse de groupe (en envoyant un train d'onde) n'est pas aisée dans cette situation. L'absorption est plus grande dans l'eau, mais surtout les piezo sont nettement moins efficaces à cause d'une augmentation importante des frottements visqueux. Leur conversion électromécanique est nettement moins bonne, et concrètement cela rend les mesures très difficiles.

1.3 [1P] Propagation guidée

(Voir la Notice qui reproduit l'article de R. Moreau du B.U.P. 742 (mars 1992), ou *Morse & Ingard* § 9.2.)

Généralités Dans un tuyau cylindrique de **rayon intérieur** a , supposé rigide, les ondes acoustiques se propageant parallèlement à l'axe sont solutions de l'équation de Helmholtz, avec comme condition aux limites l'annulation de la vitesse normale sur la paroi. Il est naturel de se placer en coordonnées cylindriques (r, θ, z) , l'axe z étant celui du cylindre. Les modes propres pour la pression sont de la forme :

$$p(r, \theta, z, t) = AJ_m(k_r r) \cos(m\theta) e^{i(\omega t - k_g z)} \quad (1)$$

où J_m est la fonction de Bessel de première espèce et d'ordre m , $\lambda_g = 2\pi/k_g$ la longueur d'onde guidée et k_r le vecteur d'onde transversal, avec $k_r^2 + k_g^2 = (\omega/c_s)^2$. La condition aux limites sur la paroi impose que $k_r a$ corresponde à un extremum de J_m . Les solutions notées μ_{mn} correspondent au n -ième extremum de J_m . On peut poser $k_r = k_{mn} = \mu_{mn}/a$. On obtient alors la relation de dispersion du mode mn :

$$k_g^2 = (\omega/c_s)^2 - (\mu_{mn}/a)^2 \quad (2)$$

Si la longueur d'onde dans l'air libre est $\lambda = 2\pi c_s/\omega$, on a, dans le mode mn :

$$\frac{1}{\lambda_g^2} = \frac{1}{\lambda^2} - \frac{\mu_{mn}^2}{(2\pi a)^2} \quad (3)$$

Les valeurs des μ_{mn} sont tabulées dans la notice, et celles inférieures à 10,5 sont rappelées ci-dessous :

Extrema des fonctions de Bessel J_m				
Ordre m de la fonction de Bessel	$\mu_{m,1}$	$\mu_{m,2}$	$\mu_{m,3}$	$\mu_{m,4}$
0	0	3,83	7,02	10,2
1	1,84	5,33	8,54	-
2	3,05	6,71	9,97	-
3	4,20	8,02	-	-
4	5,32	9,28	-	-
5	6,42	10,5	-	-
6	7,50	-	-	-
7	8,58	-	-	-
8	9,65	-	-	-

FIGURE 1 –

On a $\mu_{01} = 0$, ce qui correspond au mode fondamental du tuyau, qui est une onde plane [$J_0(0) = 1$] se propageant sans dispersion à la célérité c_s . La vitesse de groupe du mode mn est égale à

$$V_g = \frac{d\omega}{dk_g} = c_s \sqrt{1 - \left(\frac{\mu_{mn} c_s}{a\omega}\right)^2} \quad (4)$$

avec a le rayon du tuyau. Elle peut être nettement inférieure à la célérité du son dans l'air libre, $c_s = 343$ m/s. Comme dans cette expérience on travaille à fréquence fixée, le nombre de modes susceptibles de se propager (λ_g réelle) augmente avec le rayon du tuyau. Pour $a < 0,293\lambda = 2,5$ mm ($\mu_{11} = 1,84$, à reporter dans l'équation donnant λ_g -- ou dans celle donnant V_g), seul le mode fondamental 01 peut se propager (transmission monomode).

Expérience Pour mesurer une vitesse de groupe, il faut travailler en trains d'ondes avec un générateur qui permet cette fonction. Utiliser par exemple le GX 320 en choisissant la fonction *Burst*. La durée de ces trains d'ondes est un compromis entre la nécessité d'avoir de l'énergie et une durée suffisamment courte pour accéder au temps de vol des différents modes.³

Expérience préalable : Placer l'émetteur et le récepteur à environ 20 cm l'un de l'autre, partir d'un faible nombre de sinusoides dans le train d'onde et le faire croître ; observer le signal du récepteur et constater que l'amplitude maximale croît d'abord sans que la durée du train reçu n'augmente notablement, puis que la durée augmente lorsque l'amplitude a atteint son maximum (qui correspond au régime permanent). Choisir un nombre de sinusoides tel que l'amplitude détectée est grande mais n'a pas encore atteint son maximum ; ceci peut correspondre à environ dix sinusoides.

Par ailleurs, pour prendre en compte le temps de montée de l'ensemble émetteur + récepteur, les accoler et mesurer le retard t_r entre le début du signal électrique de commande et le maximum du signal détecté.⁴ Il suffira par la suite de retrancher t_r à toutes les mesures de temps de vol.

Interposer un tuyau de diamètre 24 mm. On observe, outre le mode fondamental précédent, plusieurs autres modes de propagation ayant des durées de propagation supérieures. Réduire la taille du tuyau (diamètre 18 mm par exemple) et constater que le nombre de modes diminue.

Avec le tuyau de diamètre $d = 18$ mm, il y a 8 modes possibles mais on observe essentiellement deux modes : le mode fondamental 01 ($\mu_{01} = 0$) et le mode 02 ($\mu_{02} = 3,83$). Montrer l'effet sur l'intensité relative des deux modes de l'inclinaison de l'émetteur par rapport à l'axe du tuyau, puis du déplacement du récepteur sur la section de sortie du tuyau. Interpréter. Comparer la vitesse de groupe mesurée à celle calculée pour le mode 02.

2 Le haut-parleur

2.1 Bibliographie

- Scache, Dupret & Baude, "*Modélisation électrique de phénomènes acoustiques*", 1997, bup n 792, vol. 91, p. 391
- Donnini & Quaranta, "*Modélisation électrique et acoustique du haut-parleur : impédance électrique et bande passante acoustique*", 1995, bup n 777, vol. 89, p. 1627
- Vandenbrouck, Dunlop & Le Rille, "*Détection interférométrique de mouvements*", 2013, bup n 951, vol. 107, p. 185
- Juncker & Paulus, "*Mesures de caractéristiques d'un haut-parleur*", 1995, bup n 777, vol. 89, p. 1639
- Moreau, "*Le haut-parleur du physicien et celui du futur élève de seconde*", 1992, bup n 744, vol. 86, p. 655

2.2 Introduction

Un haut-parleur est un transducteur électroacoustique destiné à produire un son à partir d'un signal électrique. Il est composé d'un aimant permanent générant un champ magnétique radial constant B et d'un équipement mobile constitué d'une bobine (de longueur ℓ , d'inductance L et de résistance R) fixée à la membrane. L'équipement mobile est relié à la partie fixe du haut-parleur par une suspension assimilable à un ressort de raideur k et par un spider qui est une pièce en forme d'anneau permettant de maintenir la bobine dans l'axe de l'aimant (voir Figure ci-dessous). Lorsque l'on applique une tension U à la bobine, un courant i la traverse. Comme la bobine est plongée dans le champ magnétique B de l'aimant, il se crée une force de Laplace d'intensité $B\ell i$ mettant l'équipement mobile en mouvement.

Lorsque la membrane est mise en mouvement, il se crée deux ondes sonores : l'une émise par la face avant de la membrane et l'autre issue de la face arrière. La superposition de ces deux ondes créerait des interférences

3. On peut penser qu'un train d'ondes très court a un spectre large qui va étaler le signal par dispersion dans un mode, mais en pratique l'ensemble émetteur + récepteur impose sa bande passante très étroite, et de plus le tuyau est trop court pour étaler notablement le signal.

4. On peut être tenté de repérer le début du signal détecté, mais le repérage de ce début est assez imprécis dans le bruit, et surtout, quand deux modes se suivent, le début du deuxième est masqué par le premier.

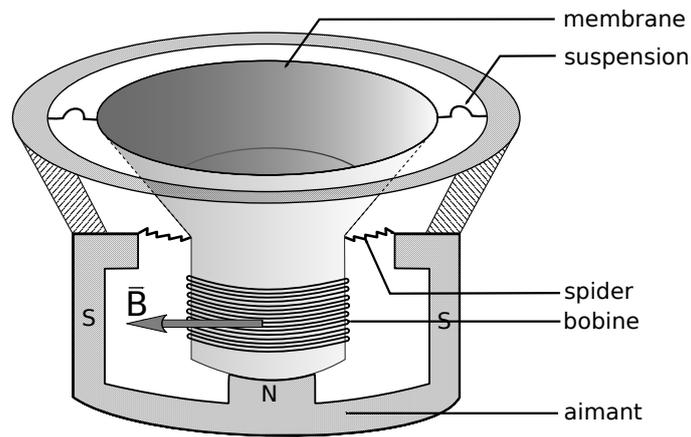


FIGURE 2 – Description du haut-parleur.

destructives correspondant à un «court-circuit acoustique». Il est donc nécessaire d'isoler ces deux ondes, ce qui peut être réalisé de deux façons : par étanchéité ou par déconcertation. Dans le premier cas, l'enceinte est close ce qui empêche l'air située à l'intérieur d'entrer en contact avec l'air extérieur. La seconde méthode, aussi appelée *baffling* consiste à rediriger les ondes sonores de l'arrière de la membrane par un tube de façon à les éloigner suffisamment pour qu'elles n'interfèrent pas avec les ondes sonores émises vers l'avant.

Les haut-parleurs sont conçus pour fonctionner sur une plage de basses fréquences où le gain reste approximativement constant. La limite inférieure de cette plage est imposée par la pulsation propre ω_0 de l'équipage mobile. La limite supérieure correspond à une fréquence au-delà de laquelle la membrane n'est plus rigide mais se met à vibrer selon ses différents modes propres. La gamme de fréquences en deçà de la limite supérieure correspond à la zone de fonctionnement dite «en piston» où la bobine et la membrane se déplacent en bloc. Plus le diamètre du haut-parleur est important, plus la fréquence maximale est faible : pour un haut-parleur de 30cm de diamètre la fréquence maximale est de l'ordre de 700Hz, alors que pour un haut-parleur de 21cm, la gamme de fréquences monte à 2kHz. Pour rappel, l'oreille humaine est supposée percevoir des sons sur la gamme de fréquence allant de 20 Hz à 20 kHz.

Dans ce montage, nous étudierons essentiellement le haut-parleur dans sa zone de fonctionnement en piston. Le déplacement de l'équipage mobile s'effectue selon l'axe $x' - x$ du système. Il est important de noter que pour un déplacement $x(t)$ donné de la bobine, une partie de la suspension et du spider se déplace également avec, toutefois, une amplitude plus faible dépendant du point M considéré. En chaque point M , l'amplitude vaut $a(M)x(t)$ avec $0 \leq a(M) \leq 1$. Par conséquent, lorsque nous étudierons le comportement mécanique du haut-parleur à partir du principe fondamental de la dynamique, la masse m du terme d'inertie $m\ddot{x}$ représentera une *masse effective* comprise entre celle du système bobine + membrane et celle du système bobine + membrane + suspension + spider.

On prendra soin dans toutes les manipulations de cette partie de bien faire le lien entre le modèle théorique du haut-parleur et les grandeurs mesurées.

2.3 Modèle du haut-parleur

Concernant la partie mécanique, l'équipage mobile (représenté schématiquement Figure suivante) de masse effective m se déplaçant en translation selon l'axe $x' - x$ est assujéti à la force de rappel de la suspension $-kx$ et à la force de Laplace d'intensité $-Bli$ s'exerçant sur la bobine. Nous admettrons que l'action de l'air sur la membrane induit une «force de frottement visqueux» d'intensité égale à $-f\dot{x}$. L'équation du mouvement s'écrit alors

$$m\ddot{x} + f\dot{x} + kx = -Bli. \quad (5)$$

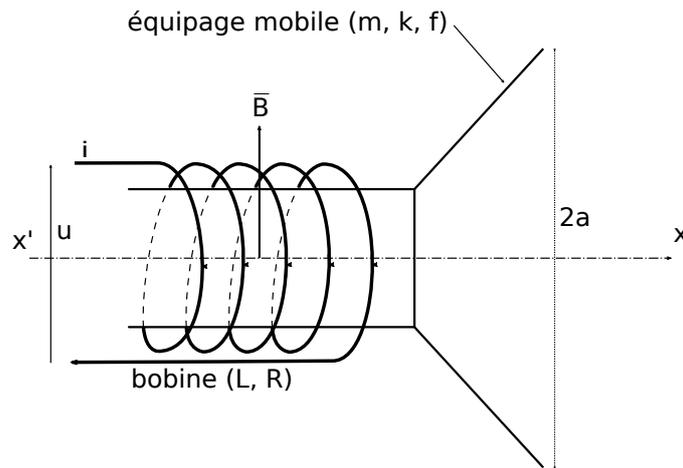


FIGURE 3 – Schéma du haut-parleur.

La fréquence propre ν_0 de l'équipage mobile est donnée par la relation

$$\nu_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}. \quad (6)$$

La fréquence de coupure ν_c définissant la borne supérieure de la bande passante du haut-parleur vaut quant-à elle

$$\nu_c = \frac{c}{2\pi a} \quad (7)$$

où c est la célérité du son dans l'air et a le rayon de la membrane.

Le circuit électrique, est modélisé par une résistance R et une inductance L . À la tension d'entrée u s'ajoute une force électromotrice due au mouvement de la bobine dans le champ magnétique $e = -B\ell v$ où $v = \dot{x}$ représente la vitesse de la bobine. L'équation électrique s'écrit

$$u = Ri + L \frac{di}{dt} - B\ell v. \quad (8)$$

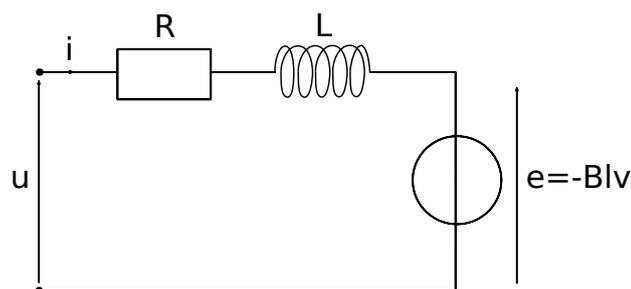


FIGURE 4 – Schéma électrique avec force électromotrice.

Le produit $B\ell$ est une quantité importante du haut-parleur car il s'agit de la constante de couplage entre les parties mécanique et électrique. En régime sinusoïdal à la pulsation ω , les deux équations différentielles deviennent

$$\begin{aligned} \left(mj\omega + f + \frac{k}{j\omega} \right) V + B\ell I &= 0, \\ -B\ell V + (R + Lj\omega) I &= U. \end{aligned} \quad (9)$$

2.4 Impédance du haut-parleur

En éliminant la vitesse V du système d'équations ci-dessus on obtient la relation entre U et I , à savoir $U = ZI$ avec Z l'impédance d'entrée du haut-parleur donnée par

$$Z = \frac{U}{I} = R + Lj\omega + \frac{1}{\frac{f}{(Bl)^2} + \frac{m}{(Bl)^2}j\omega + \frac{k}{(Bl)^2} \frac{1}{j\omega}}. \quad (10)$$

Les deux premiers termes correspondent à l'impédance purement électrique de la bobine. La grande fraction représente l'impédance due au mouvement de la membrane. Celle-ci est appelée «impédance motionnelle» et est notée Z_m :

$$Z_m = \frac{1}{\frac{f}{(Bl)^2} + \frac{m}{(Bl)^2}j\omega + \frac{k}{(Bl)^2} \frac{1}{j\omega}}. \quad (11)$$

En examinant la forme de cette impédance, on constate qu'il s'agit d'une association en parallèle des éléments suivants

- une résistance $R_m = \frac{(Bl)^2}{f}$,
- une inductance $L_m = \frac{(Bl)^2}{m}$,
- une capacité $C_m = \frac{m}{(Bl)^2}$.

Cette identification conduit au schéma électrique équivalent de la figure suivante correspondant à un circuit bouchon (RLC en parallèle) en série avec l'impédance $(R + jL\omega)$ de la bobine. À faible fréquence, l'inductance $jL\omega$ est très faible et pourra être négligée.

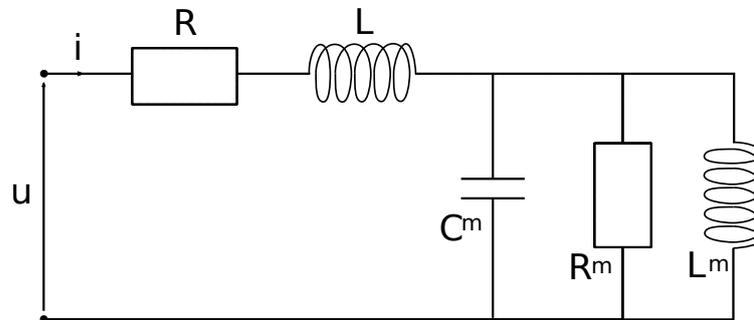


FIGURE 5 – Schéma électrique équivalent.

L'impédance motionnelle peut également se mettre sous la forme suivante

$$Z_m = \frac{R_m}{1 + jQ \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right)}, \quad (12)$$

avec

$$R_m = \frac{(Bl)^2}{f}, \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}, \quad Q = \frac{\sqrt{km}}{f}. \quad (13)$$

À basse fréquence $|Z_m|$ croît comme ω et à haute fréquence $|Z_m|$ décroît comme $1/\omega$. Le maximum est atteint pour $\omega = \omega_0$. À la résonance, Z_m est réel et vaut R_m .

2.5 [1P] Mesures des caractéristiques du haut-parleur

Mesure de la fréquence propre de l'équipage mécanique En se plaçant en circuit ouvert, l'évolution de la partie mécanique est régie par l'équation différentielle

$$\ddot{x} + 2\alpha\dot{x} + \omega_0^2 x = 0, \quad \alpha = \frac{f}{2m}, \quad \omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}. \quad (14)$$

En prenant la dérivée de cette équation par rapport au temps, on constate que la vitesse $v = \dot{x}$ suit la même équation. La solution est de la forme

$$v(t) = Ve^{-\alpha t} \cos(\omega t + \varphi), \quad \omega = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2}. \quad (15)$$

Or, à vide, la tension aux bornes du haut-parleur n'est rien autre que la f.é.m. $e = -B\dot{v}$ qui est directement proportionnelle à la vitesse. Il suffit alors de lâcher une bille en bois sur la membrane (et la récupérer avant son deuxième rebond). Cela impulse une vitesse non nulle à la membrane qui se met en mouvement. Dans ce cas, l'analyse du signal (sinusoïde amortie) à l'oscilloscope fournit les paramètres α et ω_0 .

Mesure de la masse de l'équipage Pour mesurer la masse effective de l'équipage, on alimente de haut-parleur avec une tension sinusoïdale u . Pour cela, on insérera un amplificateur de puissance (Hewlett Packard) entre le GBF et le haut parleur pour cette manipulation et toutes celles qui suivent. À la résonance $\nu_0 = \omega_0 / 2\pi$, l'impédance $Z = R + R_m$ est réelle et maximale (on néglige l'inductance comme précisé plus haut). Pour éviter les problèmes de masses, on placera une résistance $R_1 \gg |Z|$ en série avec le haut-parleur. L'impédance du haut-parleur $|Z|$ ne dépassant jamais 50Ω , on pourra prendre $R_1 = 1k\Omega$. Dans ce cas, sur la voie Y_I on mesure $u_R = (R_1 + Z)i \approx R_1 i$ et sur la voie Y_{II} la tension d'entrée u_Z du haut-parleur. Dans ce cas, $Z \approx R_1 u_Z / u_R$.

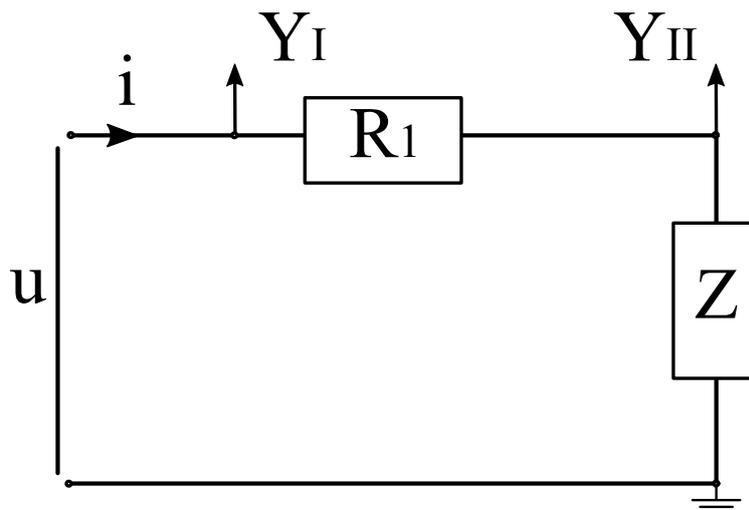


FIGURE 6 – Montage permettant de mesurer l'impédance du haut-parleur en utilisant une résistance R_1 .

On détermine la fréquence propre et on vérifie qu'elle correspond bien à la pulsation propre ω_0 mesurée juste avant. On fixe maintenant une masselotte de quelques dizaines de grammes sur la membrane du haut-parleur et on réitère la mesure de la pulsation propre que l'on note ω_1 (on choisira la masse de telle façon à modifier de 10 à 50 pourcents la fréquence propre du haut-parleur). À partir des expressions des deux pulsations propres, on en déduit la masse effective m de l'équipage :

$$\omega_0^2 = \frac{k}{m}, \quad \omega_1^2 = \frac{k}{m + \delta m} \quad \Rightarrow \quad m = \frac{\delta m}{\left(\frac{\omega_0}{\omega_1}\right)^2 - 1}. \quad (16)$$

Détermination du coefficient de frottement Le coefficient de frottement visqueux f se déduit du coefficient d'amortissement α selon la relation

$$f = 2\alpha m. \quad (17)$$

Détermination de la constante de raideur La constante de raideur k de la suspension se déduit de la pulsation propre ω_0 comme suit

$$k = m\omega_0^2. \quad (18)$$

Mesure du coefficient $B\ell$ Le protocole envisagé pour mesurer le coefficient de couple $B\ell$ consiste à placer une masse $\mu = 100$ g sur la membrane. L'équipage va alors s'abaisser jusqu'à ce que la force exercée par la suspension compense exactement le poids de la masse ajoutée. On mesure ensuite l'intensité I permettant de ramener l'équipage à sa position initiale. Ce courant est délivré par une alimentation continue et mesurée par un multimètre. Dans la configuration d'équilibre, la force de Laplace $B\ell I$ compense exactement le poids μg de la masse additionnelle et donc

$$B\ell = \frac{\mu g}{I}. \quad (19)$$

Pour établir précisément le retour à la position au repos de la membrane, on utilise un miroir rectangulaire d'environ $1,5\text{cm} \times 10\text{cm}$ reposant en partie sur un support fixe et sur la membrane en position inclinée. On éclaire ce miroir avec la lumière parallèle d'une diode laser collimatée et l'on repère la position du faisceau sur un écran éloigné à l'aide d'un second miroir plan fixe (voir figure). Lorsque la masse μ est ajoutée, on observe un déplacement du faisceau de plusieurs centimètres.

On en déduit les éléments de l'impédance motionnelle R_m, L_m, C_m .

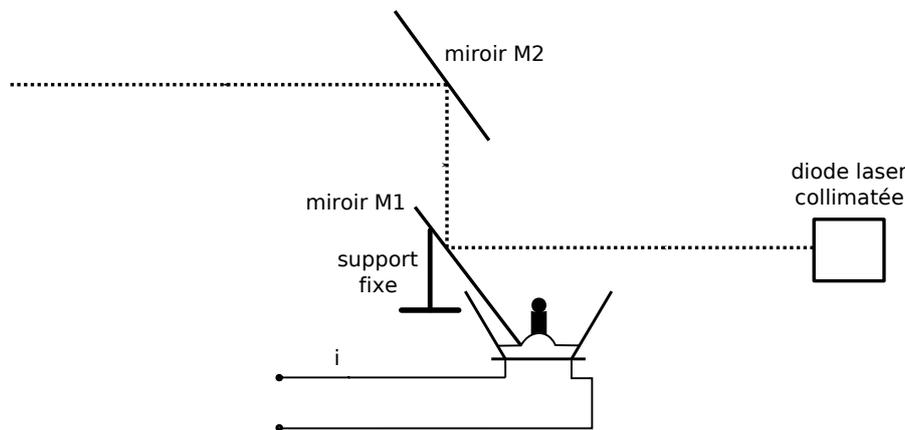


FIGURE 7 – Montage permettant de mesurer le coefficient de couplage $B\ell$.

2.6 [1P] Étude de l'impédance électrique

En reprenant le montage utilisé pour mesurer la masse de l'équipage, mesurer l'impédance complexe Z du haut-parleur pour des fréquences allant de 0 à 25kHz et tracer son évolution dans le plan complexe (diagramme d'Argand).

Interprétation L'admittance motionnelle

$$Y_m = \frac{1}{Z_m} = \frac{1}{R_m} + j \frac{Q}{R_m} \left(\frac{\omega_0}{\omega} - \frac{\omega}{\omega_0} \right) \quad (20)$$

décrit une droite dans le plan complexe parallèle à l'axe imaginaire. Or, l'image d'une telle droite par la transformation $z \mapsto 1/z$ est un cercle passant par l'origine centré sur l'axe réel. Par conséquent, Z_m décrit un cercle de rayon $R_m/2$ centré sur $z_0 = R_m/2$. Tant que l'inductance de la bobine $jL\omega$ reste négligeable, c'est-à-dire à basse fréquence, l'impédance totale du haut-parleur $Z = R + Z_m$ parcourt un cercle identique à celui décrit par Z_m mais translaté de R le long de l'axe des réels. Ce cercle est appelé «cercle de Kennely».

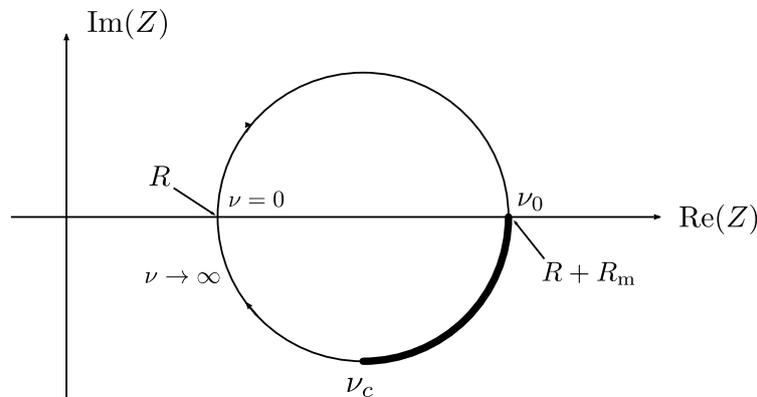


FIGURE 8 – Représentation de l'impédance du haut-parleur dans le plan complexe : modèle idéal donné par le cercle de Kenely. L'arc tracé en gras sur le cercle correspond à la bande passante du haut-parleur comprise entre les fréquences ν_0 et ν_c .

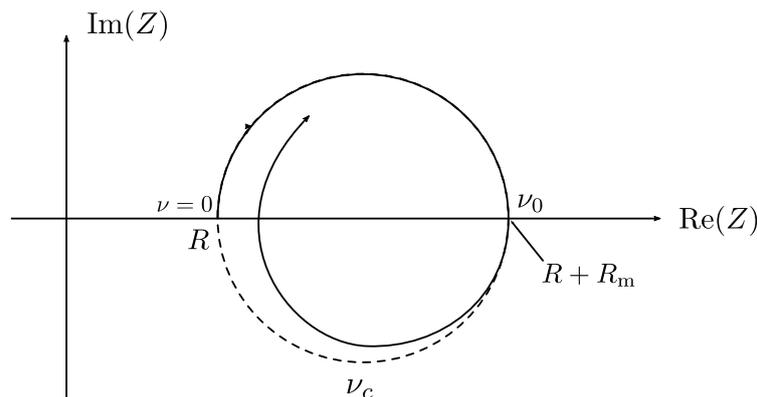


FIGURE 9 – Représentation de l'impédance du haut-parleur dans le plan complexe : Évolution expérimentale.

Dans la pratique, les points représentatifs de l'impédance ne se trouvent pas exactement sur ce cercle. À haute fréquence, non seulement le terme $jL\omega$ intervient (accroissement de la composante imaginaire), mais on observe également une augmentation de la partie réelle de l'impédance, ce qui traduit une variation de la résistance électrique apparente. Cette variation est due, 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.

Évolution du module de l'impédance Tracer $|Z|$ en fonction de la fréquence ν . La courbe théorique ainsi que la courbe expérimentale tenant compte des écarts au modèle de Kennely discutés plus haut sont représentées dans la figure suivante. La bande passante du haut-parleur correspond à la zone où l'impédance est approximativement constante. La valeur minimale Z_0 dans cette gamme de fréquence est celle qui est indiquée par le constructeur (typiquement 4Ω , 8Ω , etc).

À partir de ces graphes, il est intéressant de vérifier que les valeurs de ν_0 , de R_m et de $Q = R_m\sqrt{C_m/L_m}$ sont bien en accord avec celles obtenues plus haut.

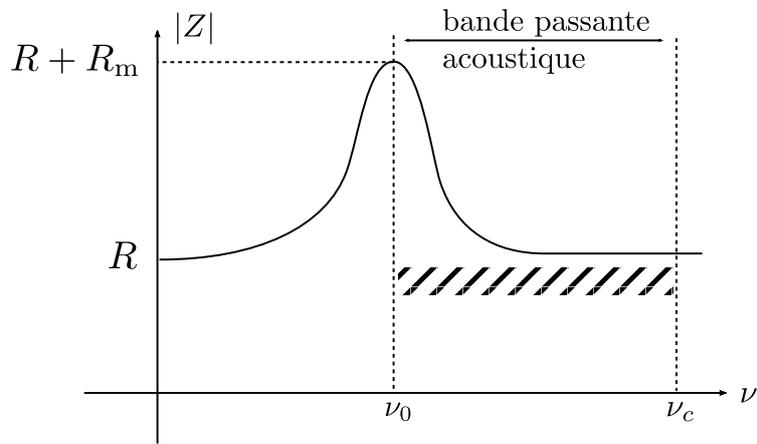


FIGURE 10 – Module de l'impédance en fonction de la fréquence : Évolution correspondant au cercle de Kennely

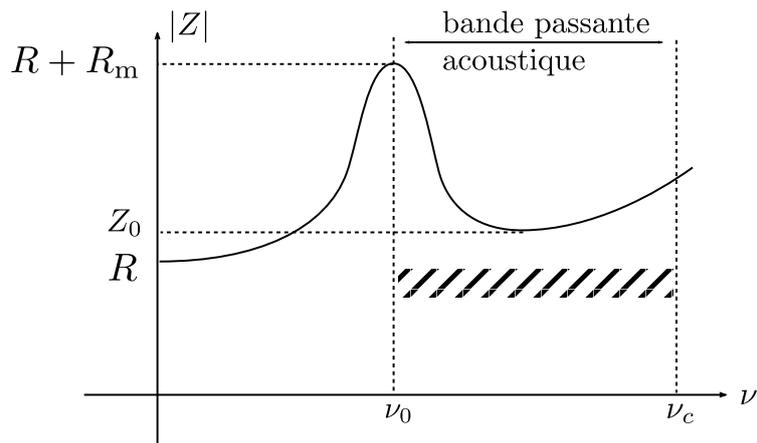


FIGURE 11 – Module de l'impédance en fonction de la fréquence : Courbe expérimentale

2.7 [2P] Puissance acoustique rayonnée

Pour que les mesures de cette partie ne soient pas contaminées par des réflexions parasites, il est préférable d'orienter le haut-parleur vers le plafond. Placer un sonomètre au-dessus du haut-parleur et mesurer la puissance acoustique sur une plage de fréquences allant de quelques Hz à 25 kHz puis tracer le diagramme de Bode. Bien faire attention à utiliser le calibre "C" sur le sonomètre pour avoir une réponse uniforme du capteur sur toute la gamme de fréquences considérée (alors que le mode "A" apporte une forte correction pour tenir compte de la sensibilité de l'oreille). On maintiendra une tension d'entrée U d'amplitude constante, environ 4V pic-à-pic. On notera que cette expérience est désagréable pour certaines fréquences car le niveau sonore est assez élevé. Pour rappel, le niveau de puissance acoustique I_{sono} en décibel (dB) affichée par le sonomètre se déduit de la puissance acoustique reçue par le sonomètre P_{sono} en Watt (W) par

$$I_{\text{sono}} = 10 \log \left(\frac{P_{\text{sono}}}{P_0} \right), \quad (21)$$

où P_0 est une puissance de référence.

Par analogie avec la puissance électrique dissipée dans une résistance Ri^2 , la puissance acoustique P_{ac} émise par la membrane est égale au produit de la résistance acoustique R_{ac} par le carré de la vitesse de la membrane V^2 (Donnini & Quaranta). Toujours, d'après Donnini & Quaranta, la résistance acoustique vaut

$$R_{\text{ac}} = \rho c S r_r \quad (22)$$

avec ρ la densité de l'air, c la célérité des ondes sonores, S la surface de la membrane et r_r la résistance réduite de rayonnement (sans dimension) donnée par

$$r_r = 1 - \frac{J_1(2ka)}{ka}, \quad (23)$$

où J_1 est la fonction de Bessel d'ordre 1 et $k = 2\pi/\lambda = \omega/c$ le nombre d'onde. Le graphe donnant les variations de ce coefficient en fonction du produit ka , et donc de la fréquence, est reproduit figure ci-après.

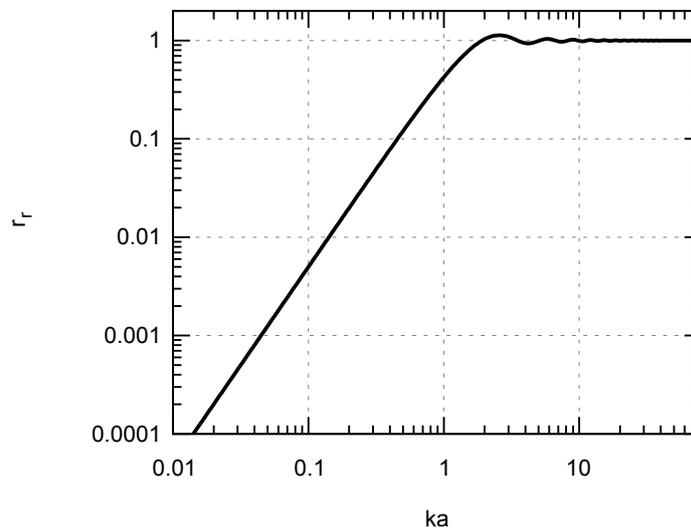


FIGURE 12 – Résistance réduite de rayonnement.

D'après ce graphe, la résistance acoustique croît de +20 dB/décade jusqu'à $ka \approx 1$ soit $\nu \approx \nu_c = c/(2\pi a)$, la fréquence de coupure définie plus tôt.

Quant-à la vitesse, celle-ci est déduite du modèle décrit précédemment, à savoir,

$$V = \frac{-1}{1 + \frac{R}{R_m} + \frac{R}{L_m j\omega} + RC_m j\omega} \frac{U}{B\ell}. \quad (24)$$

On en déduit qu'à basse fréquence $V^2 \propto \omega^2$ croît de +20 dB/décade jusqu'à la pulsation propre de l'équipage $\omega_0 = \sqrt{k/m} = 1/\sqrt{L_m C_m}$ puis décroît comme $1/\omega^2$, c'est-à-dire de -20 dB/décade, à haute fréquence au-delà de ω_0 . Par conséquent l'évolution attendue de la puissance acoustique $P_{ac} = R_{ac} V^2$ est un accroissement de +40 dB/décade de 0 à ν_0 , un plateau constante entre ν_0 et ν_c , puis une diminution de -20 dB/décade au-delà de ν_c . La bande passante du haut-parleur, comprise entre ν_0 et ν_c , correspond donc à la zone de gain constant.

2.8 [2P] Directivité du haut-parleur

Dans son régime de fonctionnement, c'est-à-dire à l'intérieur de la bande passante, la condition $ka < 1$ équivalente à $\frac{\lambda}{a} > 2\pi$ est satisfaite. Or λ/a est l'ordre de grandeur de l'étendue angulaire de diffraction des ondes. Par conséquent le haut-parleur diffracte très largement et se comporte comme une source ponctuelle qui émet un rayonnement omnidirectionnel indépendamment de la fréquence. Le vérifier pour deux fréquences (par ex. 500 Hz et 7000 Hz) en prenant des points tous les 10° à 1 m de la source en suivant le protocole présenté figure suivante.

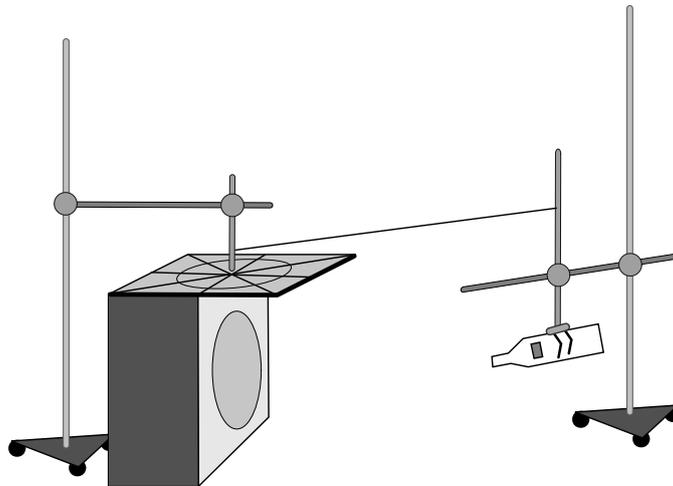


FIGURE 13 – Schéma montage permettant d'étudier la directivité du haut-parleur. Un rapporteur est fixé sur le haut-parleur (par exemple avec une pince en bois). Le sonomètre, fixé à une pince 3 doigts, est positionné en tendant une ficelle entre le rapporteur et la tige de la pince 3 doigts.

2.9 [2P] Rendement d'un haut-parleur

Utiliser un décibel-mètre pour mesurer l'intensité d'un son sinusoïdal. On trouvera la pression de référence dans la notice de l'instrument. En déduire la pression acoustique, la puissance par unité de surface, l'amplitude vibratoire (cf. **Mathieu**, tome 2).

Pour simplifier l'expérience, il est préférable de se placer dans le cas où l'émission est isotrope (ce qui permet de ne mesurer l'intensité acoustique qu'en un point), donc en plaçant le HP dans son enceinte et en travaillant à basse fréquence ($a \ll \lambda$). Cependant, on cherche la puissance acoustique *émise*, donc il faut se placer en champ lointain, lorsque domine la composante rayonnante de l'onde ($L \gg \lambda$). La distance d'observation L ne pouvant excéder quelques mètres, il y a un compromis à trouver sur λ . Mesurer la puissance fournie par le générateur avec un wattmètre. Mesurer la puissance acoustique à l'aide du sonomètre électronique. Utiliser le mode de mesure "dB C" qui correspond à une réponse à peu près indépendante de la fréquence (alors que le mode "dB A" apporte une forte correction pour tenir compte de la sensibilité de l'oreille). Vérifier que l'émission est à peu près isotrope en faisant tourner le haut-parleur. Mesurer la puissance reçue par le sonomètre en l'absence du haut-parleur et vérifier qu'elle est négligeable (attention à raisonner en échelle linéaire). En déduire la puissance acoustique totale rayonnée, puis le rendement du haut-parleur.

Remarque : Les décibels sont calculés en utilisant une pression de référence de $2 \cdot 10^{-5}$ Pa (valeur efficace), ce qui correspond à une intensité acoustique de référence égale à 10^{-12} W.m⁻². On peut retrouver la correspondance entre ces deux valeurs en utilisant l'impédance acoustique de l'air.

3 Annexe : Les différents types de microphones

(cf. Kinsler Chap. 14 et Rocard p. 323, , G. Asch)

3.1 Différentes techniques

Il s'agit toujours de transformer en signal électrique le mouvement d'une membrane.

- Type électrodynamique : même principe que celui du haut-parleur usuel, la membrane est liée à une bobine qui se déplace dans un champ magnétique constant.
- Type piézoélectrique : membrane liée à une céramique (le quartz est peu utilisé). Pour accroître la sensibilité, on provoque souvent une résonance mécanique. Surtout employé pour les ultrasons.
- Type condensateur : le déplacement à charge électrique constante d'une des armatures du condensateur provoque une variation de tension. Peu sensible, nécessite une tension d'alimentation assez élevée et un amplificateur à grande impédance d'entrée. Il est souvent remplacé par le micro à électret, dont le principe est le même : l'électret est un matériau diélectrique à polarisation permanente (matériau ferroélectrique). Placé à l'intérieur du condensateur, il permet d'éliminer la tension d'alimentation élevée. Cependant, il est toujours construit avec un amplificateur à transistor à effet de champ, qui sert d'adaptateur d'impédance et qui réclame une alimentation de quelques volts.
- Cette liste n'est pas exhaustive (micro à ruban, à charbon, *etc.*).

3.2 Relation entre nature de la sensibilité et directivité

Micro sensible à la pression La membrane sensible n'est attaquée que sur une face, l'autre est isolée du son (cf. le paragraphe sur le rôle de l'enceinte acoustique d'un haut-parleur). La pression étant une grandeur scalaire, la réponse ne dépend pas de la direction, le micro est *omni-directionnel*. Placé dans une onde stationnaire, il indique un maximum sur les ventres de pression.

Micro sensible à la vitesse L'astuce consiste à réaliser un micro sensible à la composante normale du *gradient de pression*, en faisant en sorte que les deux faces de la membrane mobile soient exposées à l'onde acoustique. Si l'épaisseur de la membrane est faible devant la longueur d'onde, la force exercée par l'onde sera proportionnelle au gradient de pression, donc à la vitesse acoustique. La vitesse étant une grandeur vectorielle, la sensibilité est proportionnelle à la projection de la vitesse sur la perpendiculaire à la membrane. La courbe $I(\theta)$ est constituée de deux sphères tangentes à la membrane, il y a deux directions de sensibilité nulle. Ce micro est appelé *bidirectionnel*.

Micro sensible à la pression et à la vitesse C'est une combinaison des 2 micros précédents (une partie de la 2^{ème} face est masquée), rendant le micro *unidirectionnel*; on dit aussi que sa courbe de réponse est une *cardioïde* (cf. figure 9 ci-dessous).

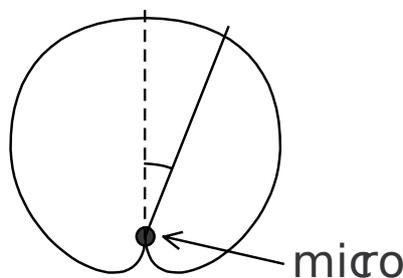


FIGURE 14 – Courbe de réponse d'un micro cardioïde.

Ce micro est **très utilisé en pratique**. Orienté dans l'axe d'une onde stationnaire, il ne détecte qu'une des 2 ondes progressives.

Note : Comprendre qu'il n'y a pas de relation entre "type technique" et directivité ; par exemple, un micro à électret peut être omni-, bi- ou uni-directionnel.