

Grain 4.2 : Charges acoustiques élémentaires des haut-parleurs

Table des matières



I - Introduction	4
A. Objectif.....	4
1. Pré-requis.....	4
B. Exercice : QCM(1).....	4
C. Exercice : QCM(2).....	4
D. Exercice : QCM(3).....	5
E. Exercice : QCM(4).....	5
II - Définitions	6
III - Rayonnement acoustique	7
A. Rayonnement acoustique.....	7
1. Principes Généraux.....	7
2. Exemples.....	7
B. Impédance de rayonnement.....	8
1. Masse de rayonnement.....	8
2. Résistance de rayonnement.....	8
3. Exemples typiques.....	9
4. Expression approchée de l'impédance de rayonnement.....	9
5. Exemples de résistance et masse de rayonnement.....	10
6. Impédance mutuelle de rayonnement.....	10
C. Pression rayonnée et directivité.....	11
1. Pression rayonnée par une source unique.....	11
2. Pression rayonnée par deux sources.....	11
3. Directivité d'un système à deux sources.....	12
4. Directivité d'un dipôle.....	12
5. Champ rayonné par le dipôle.....	13
6. Directivité d'une source près d'un mur.....	14
IV - Enceinte close	15
A. Principe.....	15
B. Réaction de l'enceinte aux basses fréquences.....	15
C. Couplage haut-parleur, enceinte.....	16
1. Association avec le haut-parleur.....	16
2. Schéma équivalent acoustique.....	16
3. Paramètres équivalents acoustiques.....	16
4. Pression rayonnée.....	17
5. Schéma équivalent électrique.....	17
6. Paramètres équivalents électriques.....	18

7. Influence de l'enceinte sur la fréquence de résonance et le facteur de qualité.....	18
8. Réponse en fréquence.....	19
9. Impédance électrique.....	20

V - Enceinte à événement **21**

A. Principe.....	21
B. Réaction de l'enceinte aux basses fréquences.....	21
1. Effet de l'enceinte (1).....	21
2. Effet de l'enceinte (2).....	22
3. Impédance acoustique de l'enceinte.....	22
C. Association haut-parleur + enceinte.....	23
1. Combinaison des deux rayonnements.....	23
2. Pression rayonnée par l'enceinte.....	23
3. Alignement.....	24
4. Alignement (suite).....	24
5. Calcul des paramètres d'une enceinte.....	24
6. Exemple de calcul d'une enceinte : impédance électrique.....	25
7. Exemple de calcul d'une enceinte : réponse en pression.....	25
8. Analyse de la simulation.....	26
9. Débattement de la membrane du haut-parleur.....	26
10. Débattement de la membrane du haut-parleur : exemple.....	26
11. Filtrage actif d'une enceinte à événement.....	27

VI - Conclusion **29**

A. Synthèse.....	29
1. Rayonnement d'un haut-parleur.....	29
2. Haut-parleur en enceinte close.....	29
3. Haut-parleur en enceinte à événement.....	30
B. Testez vos connaissances.....	30
1. Exercice : QCM(1).....	30
2. Exercice : QCM(2).....	31
3. Exercice : QCM(3).....	31
4. Exercice : QCM(4).....	32
5. Exercice : QCM(5).....	32
6. Exercice : QCM(6).....	33

VII - Annexe **34**

A. Conventions de signe pour le rayonnement acoustique.....	34
1. Bibliographie.....	34
2. Rayonnement de sources.....	35
3. Paramètres d'un haut-parleur.....	35
4. Paramètres du haut-parleur.....	35

Solution des exercices **37**

Introduction



A. Objectif

L'objectif de ce grain est de présenter les charges acoustiques usuelles existant dans le cas des enceintes acoustiques fonctionnant aux basses fréquences.

1. Pré-requis

- Systèmes électriques, mécaniques et acoustiques (module 2)
- Couplages électromécanique et mécanoacoustique (module 3)

B. Exercice : QCM(1)

[Solution n°1 p 37]

Aux basses fréquences, le haut-parleur est un :

- Système résonant du 1^{er} ordre
- Système à 2 degrés de libertés
- Système résonant du 2nd ordre
- Système à 1 degré de liberté

C. Exercice : QCM(2)

[Solution n°2 p 37]

Aux basses fréquences, un petit volume clos (étanche) est :

- Une masse acoustique
- Une compliance acoustique
- Un système résonant du 2nd ordre
- Une résistance acoustique

D. Exercice : QCM(3)

[Solution n°3 p 37]

Aux BF, une bouteille est :

- Une masse acoustique
- Une compliance acoustique
- Un système résonant du 2nd ordre
- Une résistance acoustique

E. Exercice : QCM(4)

[Solution n°4 p 37]

L'interface entre un piston vibrant et l'espace ambiant :

- Conserve la masse (ne modifie pas la masse du piston)
- Augmente la masse du piston
- Réduit la masse du piston
- Augmente la surface apparente du piston

Définitions



Qu'est ce qu'une charge acoustique ?

La vibration d'une membrane est influencée par la présence du fluide au contact de ses faces. Pour un mouvement lent, le fluide est entraîné par la membrane et se déplace avec elle, sauf si des parois proches s'opposent à ce mouvement. Si la vibration est très rapide, l'inertie du fluide l'empêche de suivre parfaitement le mouvement de la membrane, et il subit aussi une compression.

Le terme de "charge acoustique" fait allusion à la réaction exercée par le fluide sur la membrane, dont le comportement est ainsi modifié.

Les charges acoustiques étudiées dans la suite de ce cours sont :

- le rayonnement acoustique (effet de l'air placé devant un piston vibrant monté sur un écran),
- l'enceinte close (volume étanche où le fluide est comprimé),
- l'enceinte à évent (résonateur de Helmholtz).

Rayonnement acoustique



A. Rayonnement acoustique

1. Principes Généraux

La charge acoustique la plus "utile" d'un haut-parleur est son rayonnement, c'est à dire le couplage entre sa membrane et l'air ambiant, symbolisé par l'impédance Z_{ar} présentée par le fluide à la membrane. Ce couplage conduit à deux phénomènes :

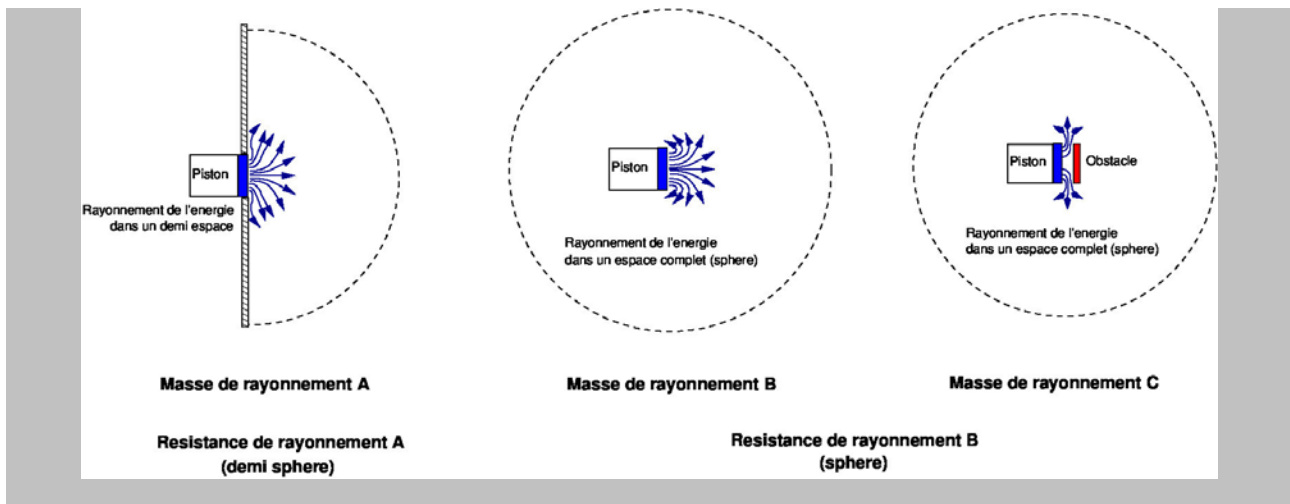
- A grande distance (on parle de "champ lointain"), la pression résulte de la propagation acoustique entre le haut-parleur et le point d'écoute. Cette propagation n'a lieu que si un travail est fourni par la membrane au fluide, donc si celui-ci est comprimé à l'instant ou la membrane se déplace : la réaction du fluide doit alors être en phase avec la vibration de la membrane, ce qui correspond à la partie réelle de Z_{ar} .
- A très courte distance (on parle de "champ proche"), le mouvement du fluide suit celui de la membrane. La force d'inertie domine alors largement, et la réaction sur le fluide correspond essentiellement à la masse du fluide ainsi entraîné, appelée "masse de rayonnement". Ceci correspond à la partie imaginaire de Z_{ar} .

2. Exemples

Exemple

La figure ci-dessous illustre trois cas :

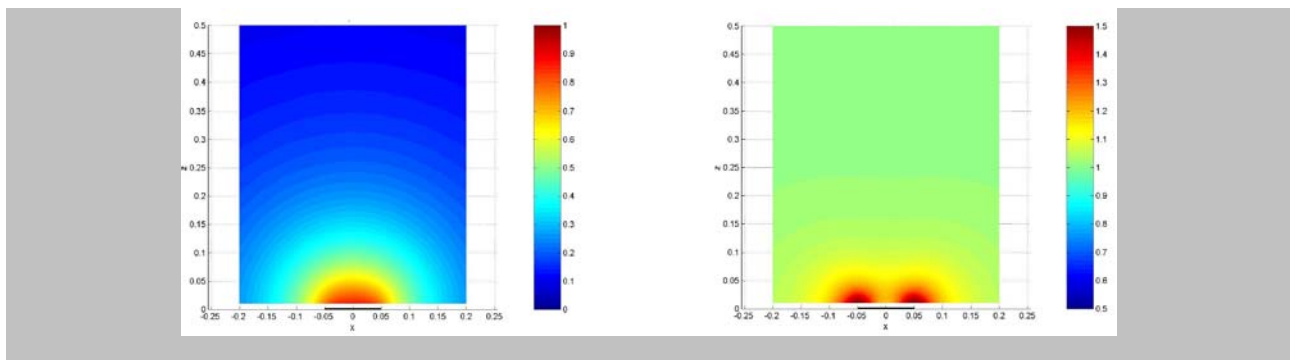
- Cas A : la masse de rayonnement est déterminée par l'existence d'un écran dans la "continuité" du piston oscillant. La résistance de rayonnement est due à la dispersion de l'énergie dans une demi-sphère.
- Cas B : la masse de rayonnement est déterminée par l'absence d'écran dans la "continuité" du piston oscillant. La résistance de rayonnement est due à la dispersion de l'énergie dans une sphère.
- Cas C : la masse de rayonnement est déterminée par la présence d'un obstacle devant le piston, en l'absence d'écran dans la continuité du piston oscillant. La résistance de rayonnement est la même que celle du cas B (dispersion dans une sphère).



B. Impédance de rayonnement

1. Masse de rayonnement

La transition entre le champ de vitesse du piston (vitesse normale au piston) et le champ acoustique dans l'espace libre est illustrée ci-dessous :



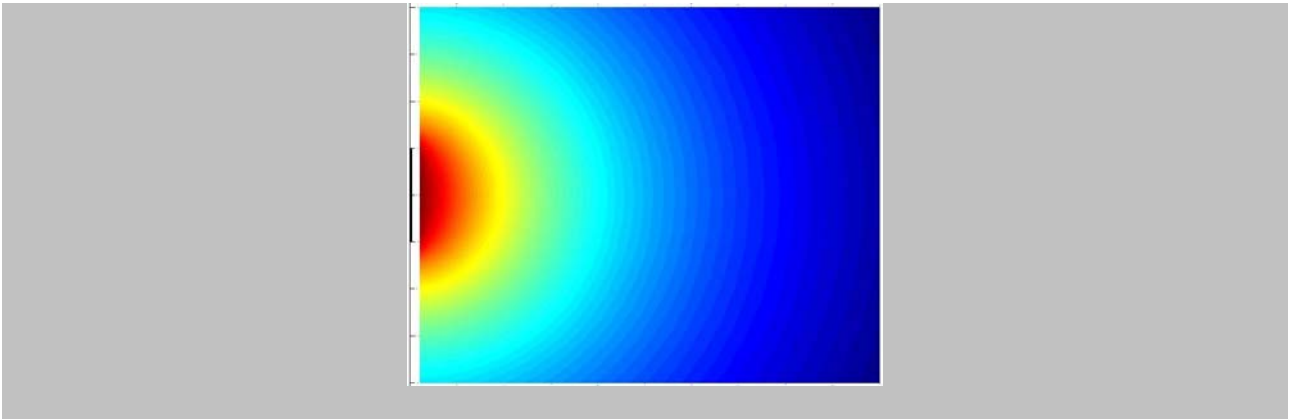
La figure de gauche représente le sinus du déphasage ϕ entre la pression et la vitesse. La pression est en quadrature ($\sin\phi = 1$) au voisinage immédiat de la membrane (masse de rayonnement), puis tend à être en phase ($\sin\phi = 0$) à plus grande distance (propagation).

La figure de droite représente le rapport entre la vitesse acoustique locale et celle qui correspond à une situation de propagation "pure". Une composante supplémentaire (tangentielle) domine sur les bords, car les particules de fluide sont "chassées" vers l'extérieur plutôt que d'y être comprimées (masse de rayonnement) ;

2. Résistance de rayonnement

Résistance de rayonnement

La figure ci-dessous illustre la répartition de l'intensité acoustique active au voisinage d'un piston vibrant. Elle est très élevée (en rouge) sur sa surface, avec une décroissance en allant du centre vers les bords (du fait de la vitesse tangentielle sur le bord). A plus grande distance, l'intensité décroît selon un profil qui devient rapidement sphérique, et diminue avec la distance - tendant vers zéro (en bleu).



La puissance rayonnée est conservée au cours de la propagation. A grande distance (champ "lointain"), la dépendance spatiale du champ tend vers une sphère de rayon r ;

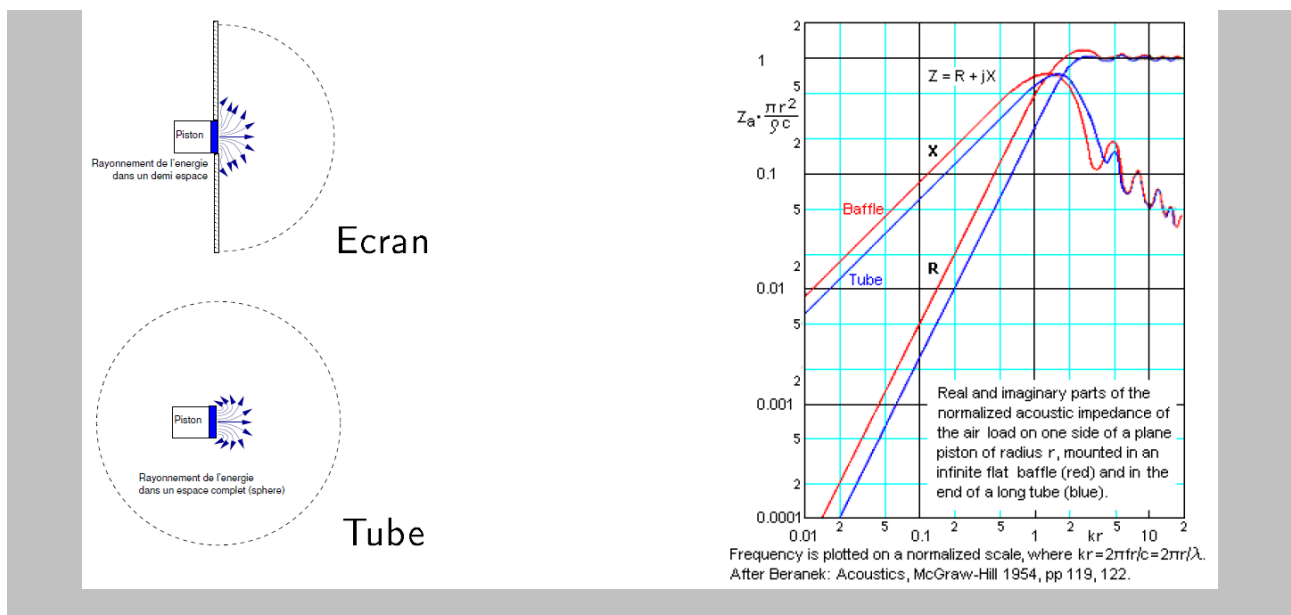
l'intensité acoustique est alors proportionnelle à $\frac{1}{r^2}$ (r étant la distance source-récepteur)

et la pression acoustique est proportionnelle à $\frac{1}{r}$;

3. Exemples typiques

Exemples typiques

L'impédance de rayonnement d'un piston à section circulaire monté sur écran, et celle à l'extrémité d'un tube, sont présentées ci-dessous :



Dans les deux cas, la partie imaginaire (masse de rayonnement) domine aux basses fréquences, alors qu'aux hautes fréquences c'est la partie réelle qui domine, tendant vers l'impédance caractéristique (la composante normale de la vitesse est dominante).

4. Expression approchée de l'impédance de rayonnement

Aux "basses fréquences" (lorsque la longueur d'onde est grande devant le rayon du piston - $ka \ll 1$), l'impédance de rayonnement peut s'écrire de façon générale :

$$Z_{ar} = Z_c[\alpha(ka)^2 + j\beta(ka)] = R_{ar} + j\omega M_{ar},$$

où $Z_c = \frac{\rho c}{S}$ est l'impédance caractéristique en analogie pression débit. ρ est la masse volumique de l'air (1,2 kg/m³ à 20 deg C), c est la célérité du son dans l'air au repos ($c \approx 344$ m/s à 20 deg C) et $S = \pi a^2$ est la section du piston. k est le nombre d'onde $k = \frac{\omega}{c}$.

La résistance et la masse de rayonnement s'écrivent donc :

$$R_{ar} = Z_c \alpha (ka)^2$$

$$M_{ar} = Z_c \frac{\beta a}{c} = \beta \frac{\rho a}{S},$$

où α dépend des conditions de rayonnement (sphère, demi-sphère, ...) et β des conditions de montage du piston.

5. Exemples de résistance et masse de rayonnement

Aux basses fréquences, deux expressions approchées des résistances et masses de rayonnement sont souvent utilisées :

	Résistance rayonnement	de	Masse rayonnement	de	Correction de longueur
Sur écran	$R_a = Z_c \frac{(ka)^2}{2}$		$M_a = \frac{8}{3\pi} \frac{\rho a}{S}$		$\Delta l = \frac{8}{3\pi} a \approx 0.86a$
A l'extrémité d'un tube	$R_a = Z_c \frac{(ka)^2}{4}$		$M_a = 0.6133 \frac{\rho a}{S}$		$\Delta l = 0.6133a$

La masse de rayonnement est parfois assimilée à celle d'un cylindre de fluide de même section que le piston/guide, et alors exprimée comme la longueur de ce cylindre ("correction de longueur").

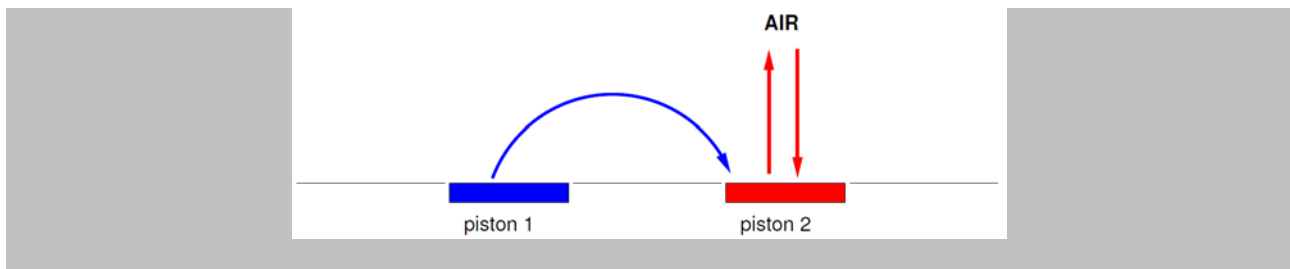
Remarque

Aux basses fréquences, $ka \ll 1$ donc $(ka)^2 \ll ka$. La valeur de la résistance de rayonnement R_{ar} reste donc petite par rapport à la réactance de rayonnement $X_{ar} = \omega M_{ar}$. L'effet de charge sur une source acoustique peut ainsi être approximé par $Z_{ar} = j\omega M_{ar}$.

6. Impédance mutuelle de rayonnement

Complément

Dans le cas où plusieurs surfaces vibrantes existent, chaque surface "voit" simultanément la réaction du milieu (air) à sa vibration propre et la pression générée par son (ses) voisins (influence mutuelle).



Dans ce cas, l'impédance de rayonnement n'est plus un scalaire mais une matrice :

$$\begin{pmatrix} p_1 \\ p_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{21} & Z_{22} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} W_1 \\ W_2 \end{pmatrix}$$

Les termes non-diagonaux (impédances "mutuelles") sont essentiels dans le cas de plusieurs sources disposées à proximité l'une de l'autre, comme par exemple les réseaux de haut-parleurs ("line array") ou l'enceinte à événement (proximité du haut-parleur et de l'événement).

C. Pression rayonnée et directivité

1. Pression rayonnée par une source unique

La puissance acoustique transmise par la source au milieu s'écrit :

$$\Pi_a = R_{ar} w_{rms}^2$$

où R_{ar} est la partie réelle de l'impédance de rayonnement et w_{rms} le débit acoustique fourni par la source. Cette puissance se propage de proche en proche, "jusqu'à l'infini".

Pour une source monopolaire, le champ de pression s'écrit :

$$p(r) = j\omega\rho w \frac{e^{-jkr}}{\Omega r}$$

où w est le débit de source et Ω est l'angle solide dans lequel rayonne la source ($\Omega = 4\pi$: espace infini, $\Omega = 2\pi$: demi-espace, etc).

Remarque

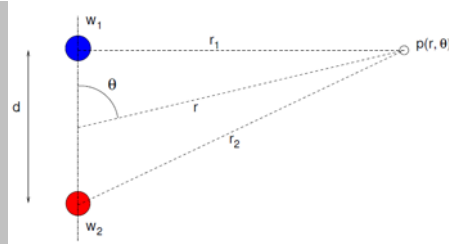
L'équation 1 montre que :

- l'amplitude de la pression décroît en $\frac{1}{r}$, ce qui traduit l'existence d'ondes sphériques,
- elle est proportionnelle à l'accélération a_s et à la surface S de la source ($j\omega\rho w = \rho a_s S$),
- le temps de parcours de l'onde est $\tau = \frac{r}{c}$ (phase $\phi = -kr = -\omega\tau$)

2. Pression rayonnée par deux sources

Dans le cas où 2 monopoles rayonnent en milieu infini, avec deux débits w_1 et w_2 , la pression est la somme des deux contributions et s'écrit :

$$p_t(r, \theta) = p_1(r) + p_2(r) = j\omega\rho \left(w_1 \frac{e^{-jkr_1}}{4\pi r_1} + w_2 \frac{e^{-jkr_2}}{4\pi r_2} \right)$$



A grande distance ($\{r_1, r_2\} \gg d$), il vient $r_1 \approx r_2 \approx r = R$ soit

$$p_t(r, \theta) = \frac{j\omega\rho}{4\pi R}(w_1 e^{-jkr_1} + w_2 e^{-jkr_2}) = jk\rho c \frac{e^{-jkR}}{4\pi R} D(\theta, \Phi)$$

où $D(\theta, \Phi)$ caractérise la directivité du système à deux sources.

3. Directivité d'un système à deux sources

Le terme de directivité s'exprime en écrivant $r_1 = r - \Delta r$ et $r_2 = r + \Delta r$ et en assimilant la paire de sources à une source unique centrée en leur milieu (approximation "champ lointain"). Il s'écrit :

$$D(\theta, \Phi) = w_1 e^{jk\Delta r} + w_2 e^{-jk\Delta r}$$

$$D(\theta, \Phi) \approx (w_1 + w_2) + (w_1 - w_2)jk\Delta r \quad (\text{si } k\Delta r \ll 1)$$

Remarque

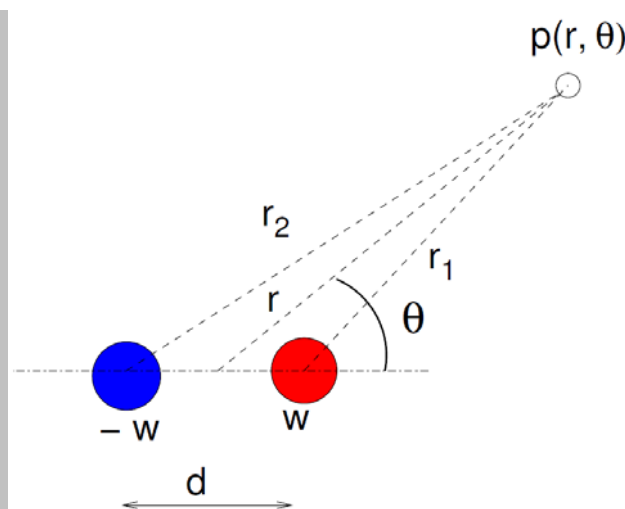
Cette équation montre que la directivité dépend

- du rapport entre l'espacement des sources d et la longueur d'onde ($k\Delta r = k\frac{d}{2}\cos\theta$).
- de l'amplitude et de la phase relative des deux sources, w_1 et w_2 étant des nombres complexes qui traduisent des différences d'amplitude et de phase.

La dépendance du terme $D(\theta, \Phi)$ aux termes w_1 et w_2 va permettre de choisir une directivité (et une réponse en fréquence) pour des applications particulières.

4. Directivité d'un dipôle

Considérons le système de deux sources monopolaires espacées d'une distance d et générant des débits $w_1 = w$ et $w_2 = -w$. La taille des sources ainsi que l'espacement entre sources sont supposés petits devant la longueur d'onde.



Champ lointain

On montre que la réponse en pression dans le plan du dipôle s'écrit en champ lointain :

$$\frac{p_d(r, \theta)}{p_m(r)} \approx 2jk\Delta r = jkdcos\theta = j\omega \frac{dcos\theta}{c}$$

où $p_m(r)$ est la pression générée par un monopole de débit w :

$$p_m(r) = j\omega\rho w \frac{e^{-jkr}}{4\pi r}$$

Champ proche

Par contre en champ proche, on a :

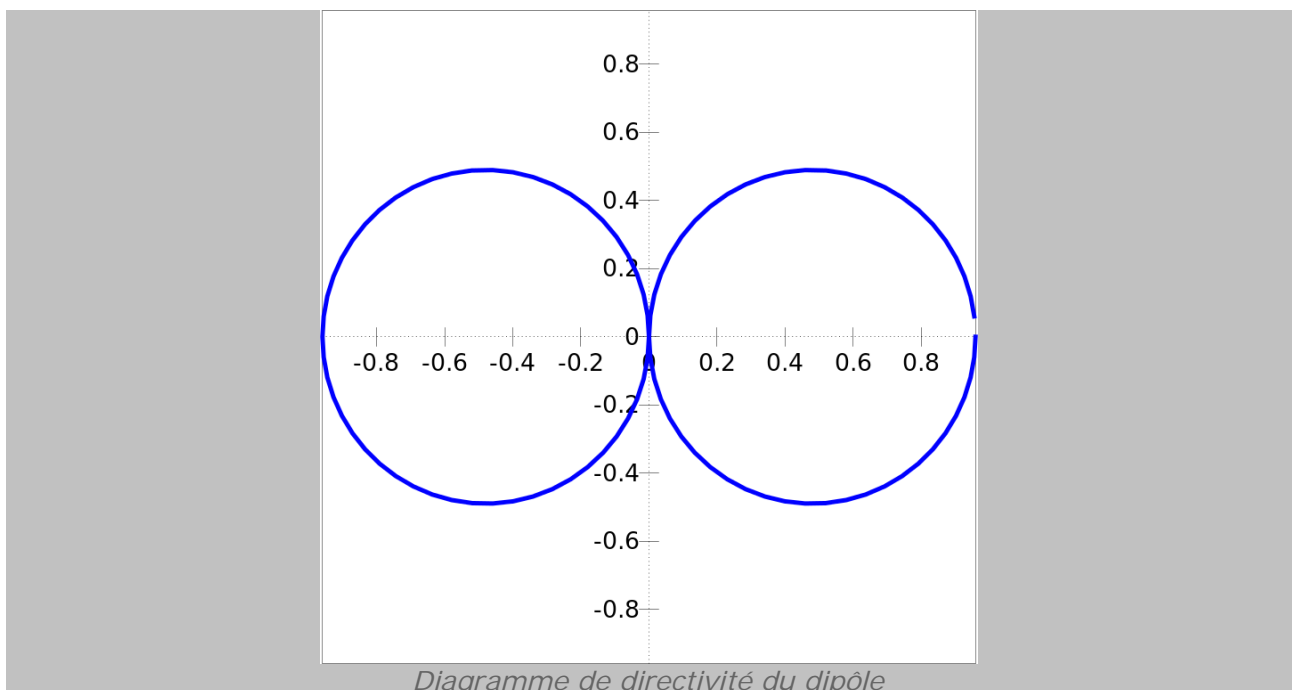
$$\frac{p_d(r, \theta)}{p_m(r)} \approx \frac{jkdcos\theta}{jkr} = \frac{dcos\theta}{r}$$

L'expression est proportionnelle à ω en champ lointain, mais pas en champ proche : c'est ce qui est appelé "effet de proximité" (présence plus importante de fréquences basses pour une source proche du microphone), très utilisé en prise de son.

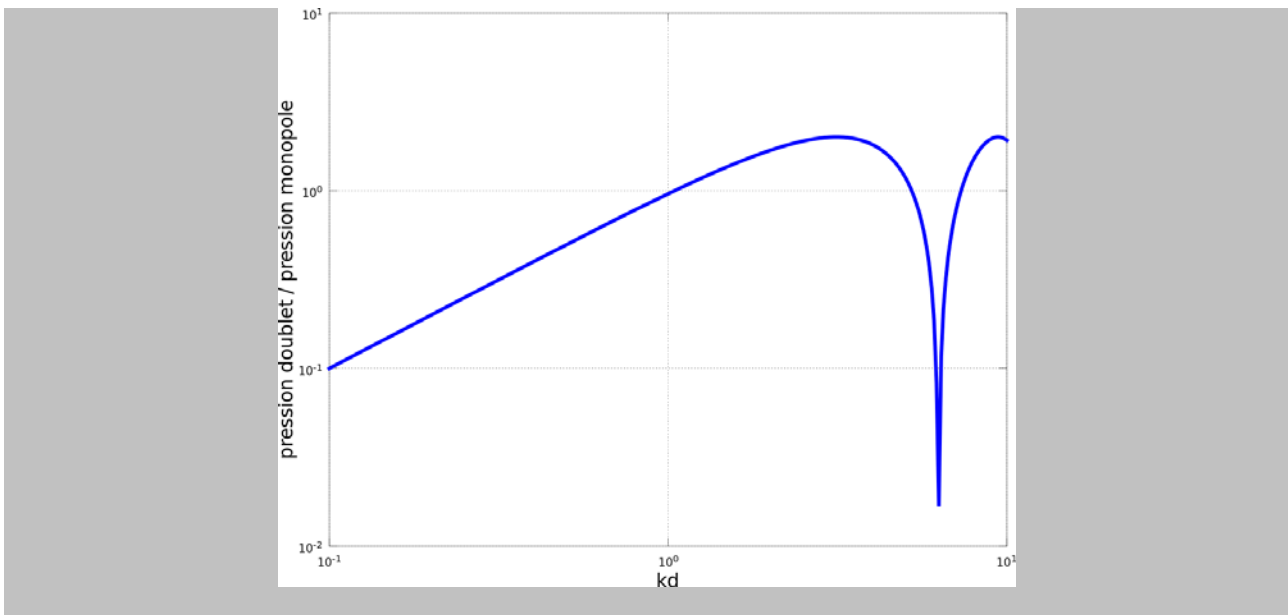
5. Champ rayonné par le dipôle

Le diagramme de directivité du dipôle est présenté à la figure ci-dessous. Le dipôle est bidirectionnel :

$$(D(\theta) = \cos\theta)$$



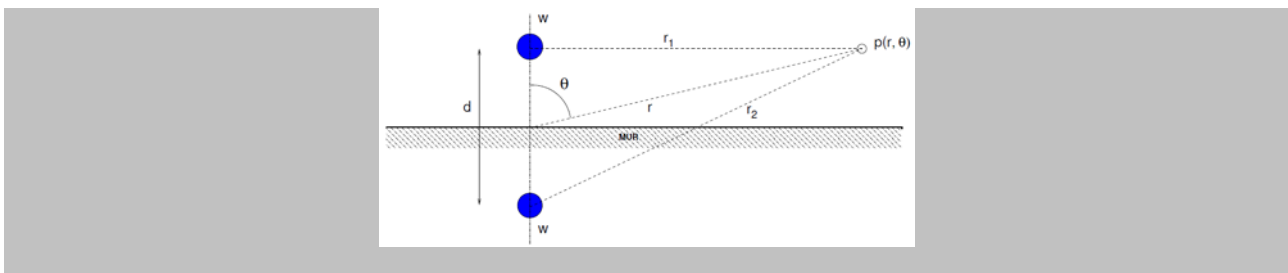
- En champ lointain : le dipôle génère un spectre de type "passe haut" du premier ordre par rapport au monopôle (cf. figure ci-dessous).
- En champ proche : le dipôle génère un spectre identique à celui du monopôle



Réponse en pression du doublet par rapport à la réponse du monopole pour $kd = 1$.

6. Directivité d'une source près d'un mur

Considérons une source monopolaire (enceinte de petite dimensions par rapport à la longueur d'onde) placée près d'une surface de dimensions infinies, parfaitement réfléchissante.

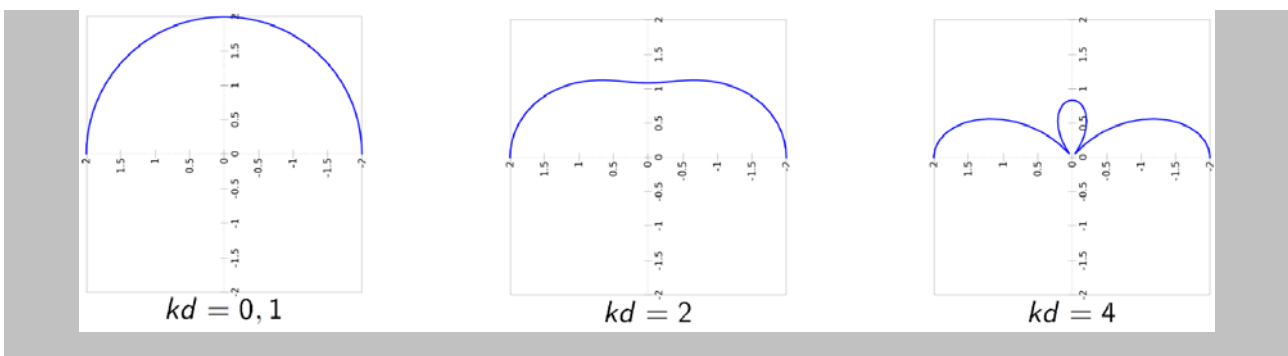


L'effet du mur peut être vu comme l'existence d'une source image produisant un débit identique à la source réelle.

La réponse en pression d'un tel système s'écrit en champ lointain et aux basses fréquences ($kd \ll 1$) :

$$\frac{p(r)}{p_m(r)} = 2 \cos\left(\frac{kd}{2} \cos\theta\right) \approx 2 - \frac{(kd)^2}{2} \cos^2\theta \quad (\text{avec } p_m(r) = j\omega\rho w \frac{e^{-jkr}}{4\pi r}).$$

Les diagrammes de directivité du système sont présentés ci-dessous pour trois valeurs de kd .

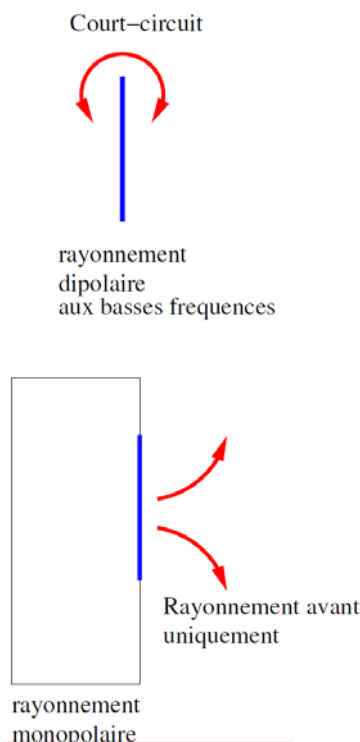


Le principal effet du mur est de doubler la pression (ce qui correspond à la réduction de l'angle solide de rayonnement), mais l'écart fini des sources induit aussi une légère directivité, qui ne devient importante que pour $kd \geq 1$.

Enceinte close

IV

A. Principe



Une surface vibrante (comme par exemple la membrane d'un haut-parleur) rayonne par ses deux faces, avec un débit opposé à l'avant et à l'arrière. La surface vibrante peut être vue aux basses fréquences comme un dipôle équivalent et le rayonnement résultant est très peu efficace (court-circuit acoustique).

Une manière simple d'améliorer le rayonnement est d'isoler l'une des faces, en la refermant par une enceinte rigide. Le seul rayonnement est alors celui de l'autre face de la surface vibrante.

B. Réaction de l'enceinte aux basses fréquences

Fondamental : Hypothèse

Nous faisons ici l'hypothèse que la plus grande dimension L de l'enceinte est petite devant la longueur d'onde. Ceci peut s'écrire $kL \ll 1$ (où k est le nombre d'onde) ou (où V est le volume de l'enceinte).

En pratique : Pour les enceintes "colonne" pour lesquelles la plus grande dimension peut être plus grande que la longueur d'onde, il est souvent nécessaire de considérer un élément de guide d'onde suivant cette longueur. Le raisonnement reste valable pour les plus basses fréquences.

Le mouvement de la surface vibrante modifie le volume dans l'enceinte, qui réagit par une variation de pression. Aux basses fréquences, l'air dans l'enceinte est assimilable à un ressort (souplesse de l'air compris dans le volume, cf grain 2.3.2.).

Au voisinage de la membrane, la répartition de vitesse conduit à une masse de discontinuité, qui dépend de la géométrie du problème (cf grain 2.3.2.).

C. Couplage haut-parleur, enceinte

1. Association avec le haut-parleur

Le couplage entre le haut-parleur et l'enceinte se traduit par l'existence :

- d'une impédance de charge arrière comprenant :
 - une impédance de discontinuité (masse) traduisant la rupture géométrique entre la membrane du haut-parleur et le volume de l'enceinte $Z_{ad} = j\omega M_{ad}$,
 - une impédance liée à la compressibilité du fluide dans l'enceinte, traduite par une

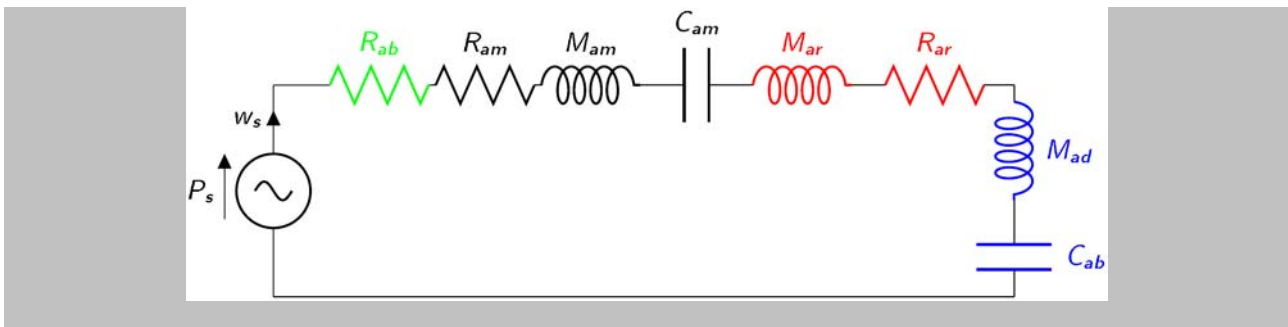
$$\text{compliance : } Z_{ab} = \frac{1}{j\omega C_{ab}}$$

- une impédance de rayonnement pour la face avant $Z_{ar} = R_{ar} + j\omega M_{ar}$.

2. Schéma équivalent acoustique

Le schéma équivalent de l'enceinte close dans le domaine acoustique est présenté ci dessous avec les conventions de couleur suivantes :

- Vert : système électrique,
- Noir : système mécanique,
- Rouge : impédance de rayonnement (face avant),
- Bleu : enceinte close (face arrière).



Remarque

Pour une enceinte "assez grande", les masses de discontinuité à l'avant et à l'arrière de la membrane sont très proches $M_{ad} \approx M_{ar}$.

3. Paramètres équivalents acoustiques

Les paramètres équivalents donnés dans la figure précédente **dans le domaine acoustique** peuvent s'exprimer en fonction des paramètres physiques donnés comme suit :

Élément	Paramètres électriques	Paramètres mécaniques	Paramètres acoustiques
---------	------------------------	-----------------------	------------------------

Résistance	$R_{ab} = \left(\frac{Bl}{S_d}\right)^2 \frac{1}{R_{eb}}$	$R_{am} = \frac{R_{mm}}{S_d^2}$	$R_{ar} = Z_c \frac{1}{4} (kr_d)^2$
Inductance		$M_{am} = \frac{M_{mm}}{S_d^2}$	$M_{ar} = \rho \frac{\alpha r_d}{S_d},$ $M_{ad} = \rho \frac{\beta r_d}{S_d}$
Capacitance		$C_{am} = C_{mm} S_d^2$	$C_{ab} = \frac{V_b}{\rho c^2}$

où ρ et c sont respectivement la masse volumique et la célérité du son de l'air au repos, $k = \frac{\omega}{c}$ est le nombre d'onde, α et β sont les coefficients caractérisant l'effet de discontinuité entre la membrane et l'air. Dans le cas d'une membrane sur écran infini, $\alpha = \frac{8}{3\pi} \approx 0.85$ et pour une membrane débouchant en espace infini $\alpha \approx 0.6133$. Par ailleurs, la pression de source s'écrit $P_s = \frac{BlU_s}{S_d R_{eb}}$.

4. Pression rayonnée

La pression acoustique rayonnée par l'enceinte (supposée placée en espace infini et petite devant la longueur d'onde) s'écrit :

$$p(r) = j\omega\rho w_s \frac{e^{-jkr}}{4\pi r}.$$

La réponse de l'enceinte, définie comme le rapport entre la pression rayonnée et la tension d'alimentation est donnée par $\frac{p(r)}{U_s}$

et dépend de la réponse en débit $\frac{w_s}{U_s}$ (rapport du débit généré par le haut-parleur et la tension d'alimentation).

La réponse de l'enceinte dépend donc de la réponse en accélération de la membrane :

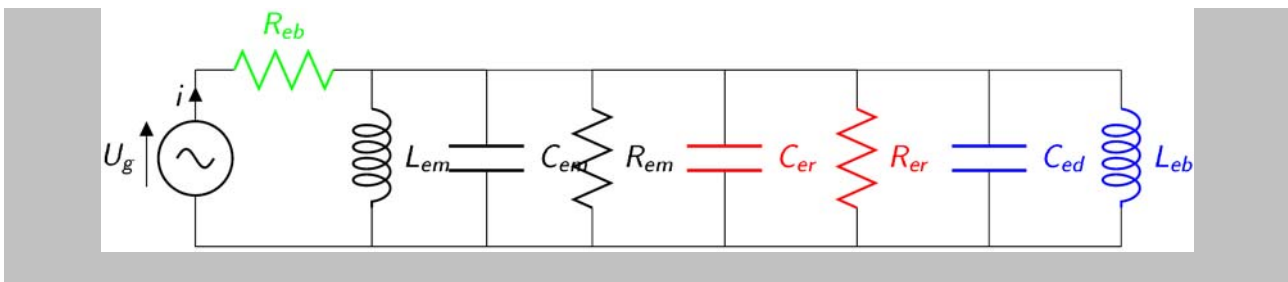
$$\frac{p(r)}{U_s} = \rho S_d \frac{a_s}{U_s} \frac{e^{-jkr}}{4\pi r}$$

où a_s est l'accélération au centre de la membrane.

5. Schéma équivalent électrique

Le schéma équivalent de l'enceinte close **dans le domaine électrique** est présenté ci dessous avec les conventions de couleur suivantes (l'inductance électrique L_{eb} est ici négligée) :

- Vert : système électrique,
- Noir : système mécanique,
- Rouge : impédance de rayonnement (face avant),
- Bleu : enceinte close (face arrière).



6. Paramètres équivalents électriques

Les paramètres équivalents donnés dans la figure précédente **dans le domaine électrique** peuvent s'exprimer en fonction des paramètres physiques donnés comme suit :

Élément	Paramètres électriques	Paramètres mécaniques	Paramètres acoustiques
Résistance	R_{eb}	$R_{em} = \frac{(Bl)^2}{R_{mm}}$	$R_{er} = \left(\frac{Bl}{S_d}\right)^2 \frac{1}{R_{ar}}$
Inductance		$L_{em} = (Bl)^2 C_{mm}$	$L_{eb} = \left(\frac{Bl}{S_d}\right)^2 C_{ab}$
Capacitance		$C_{em} = \frac{M_{mm}}{(Bl)^2}$	$C_{er} = \left(\frac{S_d}{Bl}\right)^2 M_{ar}$, $C_{ed} = \left(\frac{S_d}{Bl}\right)^2 M_{ad}$

7. Influence de l'enceinte sur la fréquence de résonance et le facteur de qualité

La réponse en accélération de l'enceinte peut être calculée en analysant le schéma équivalent présenté.

$$\frac{P_s}{w_s} = R_{eq} + j\omega M_{eq} + \frac{1}{j\omega C_{eq}}$$

La réponse en débit s'écrit où $R_{eq} = R_{ab} + R_{am} + R_{ar}$ (pertes électriques + mécaniques + acoustique par rayonnement), $M_{eq} = M_{am} + M_{ar} + M_{ad}$ (masses mécanique + acoustique de rayonnement et de discontinuité),

$$C_{eq} = \frac{C_{ab}C_{am}}{C_{ab} + C_{am}}$$

Si l'on compare cette réponse à celle d'un haut-parleur monté sur écran, le terme qui diffère est la compliance C_{eq} (en supposant que les masses et résistances de rayonnement sont identiques dans les deux cas). Ainsi, l'ajout de l'enceinte raidit le haut-parleur et modifie sa fréquence de résonance ainsi que son facteur de qualité.

Le tableau ci-dessous donne les valeurs des fréquences de résonance et des coefficients de qualité pour le haut-parleur sur écran et monté en enceinte close.

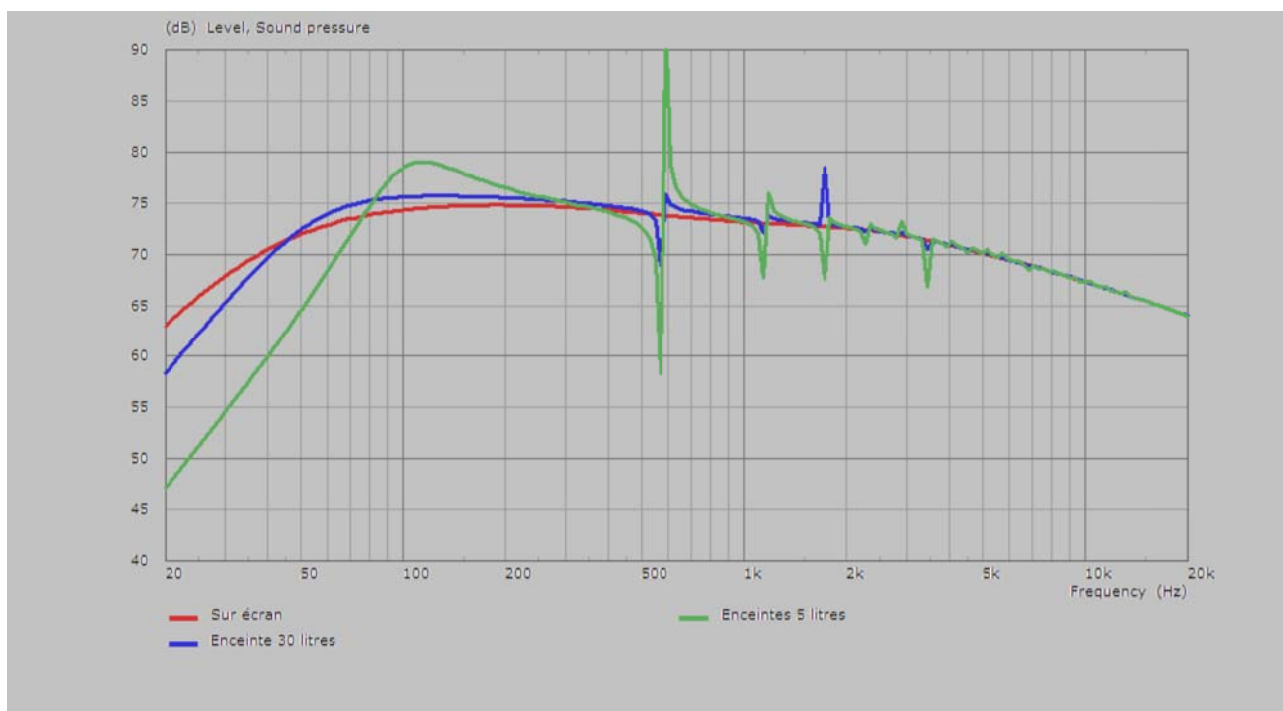
Système	Fréquence de résonance	Facteur de qualité
Haut-parleur sur écran	$f_s = \frac{1}{2\pi \sqrt{M_{eq} C_{am}}}$	$Q_{ts} = \frac{1}{\omega_s C_{as} R_{eq}}$
Haut-parleur en enceinte	$f_b = f_s \sqrt{1 + \alpha}$	$Q_{tb} = Q_{ts} \sqrt{1 + \alpha}$

close

$$\text{où } \alpha = \frac{C_{am}}{C_{ab}} = \frac{V_{as}}{V_{ab}}$$

8. Réponse en fréquence

La réponse en fréquence de l'accélération de la membrane ($\frac{a_s}{U_s}$) est présentée à la figure ci-dessous à l'aide du logiciel Akabak [2] et en utilisant le haut-parleur dont les caractéristiques sont données à l'annexe 4.



La réponse en fréquence est calculée pour trois configurations différentes :

- haut-parleur sur écran infini,
- haut-parleur monté en enceinte de volume 30 litres,
- haut-parleur monté en enceinte de volume 5 litres.

Dans le cas du haut-parleur monté sur écran infini, la réponse est de type passe-haut et elle est très amortie, ce qui s'explique par la faible valeur du coefficient de qualité total Q_{ts} (0,52).

Dans le cas du haut-parleur monté sur l'enceinte de 30 litres, la fréquence de résonance de l'ensemble est plus élevée que celle du haut-parleur sur écran. Le coefficient de qualité total est lui aussi plus élevé.

Enfin, dans le cas du haut-parleur monté sur l'enceinte de 5 litres, la fréquence de résonance et le facteur de qualité total sont clairement plus élevés que dans le cas du haut-parleur monté sur écran.

Pour les deux enceintes, le modèle prend en compte les modes propres de l'enceinte suivant l'axe de plus grande dimension, ce qui se traduit par des résonances visibles sur la réponse en pression (1^{ère} fréquence de résonance à 550 Hz environ). L'amplitude de ces résonances est a priori sur-estimée par le logiciel qui ne prend pas en compte toutes les pertes à l'intérieur de l'enceinte.

9. Impédance électrique

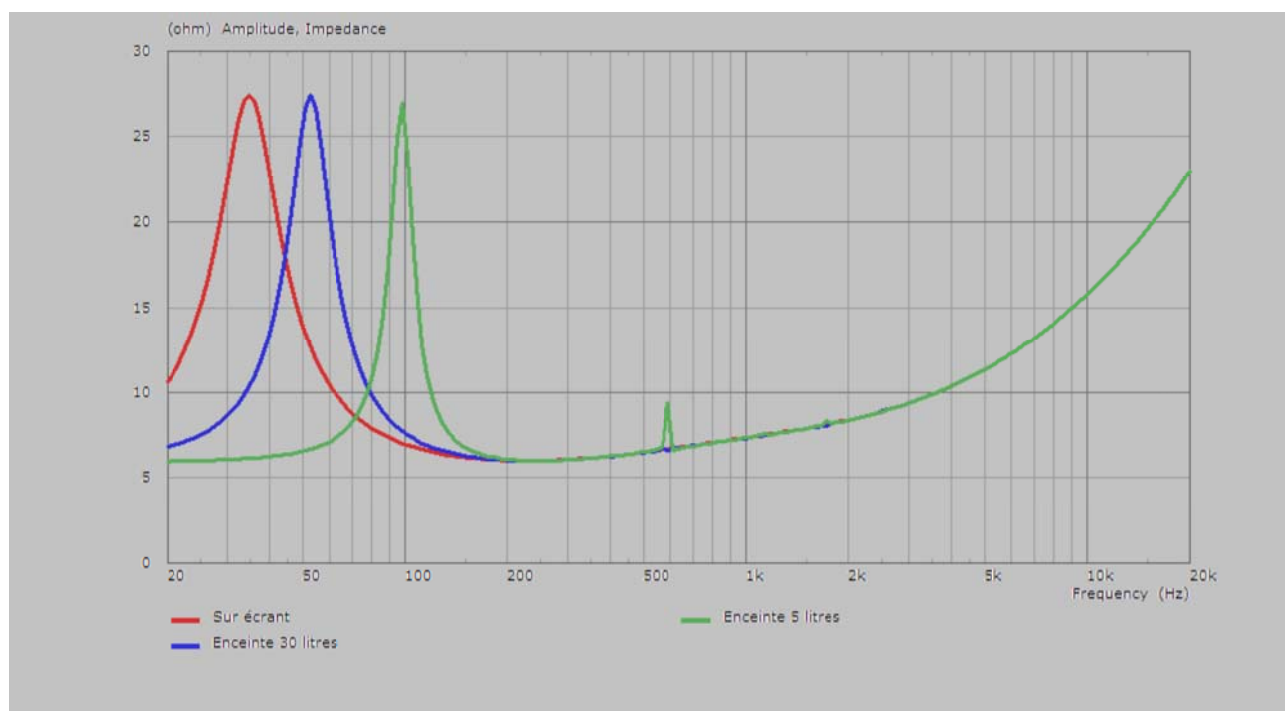
L'impédance électrique est présentée à la figure ci-dessous à l'aide du logiciel Akabak [2] et en utilisant le haut-parleur dont les caractéristiques sont données à l'*annexe 4*.

La figure montre les impédances électriques calculées pour les trois cas :

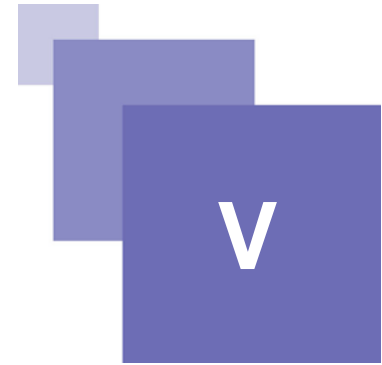
- haut-parleur sur écran infini,
- haut-parleur monté en enceinte de volume 30 litres,
- haut-parleur monté en enceinte de volume 5 litres.

L'effet de l'enceinte est clairement visible et fait apparaître une augmentation de la fréquence de résonance, due à l'effet de l'air compris dans le volume qui augmente la raideur mécanique de l'ensemble du système.

Pour l'enceinte de volume 5 litres on voit apparaître l'effet des modes propres de la cavité acoustique sur la courbe d'impédance (accident à 550 Hz environ).



Enceinte à événement

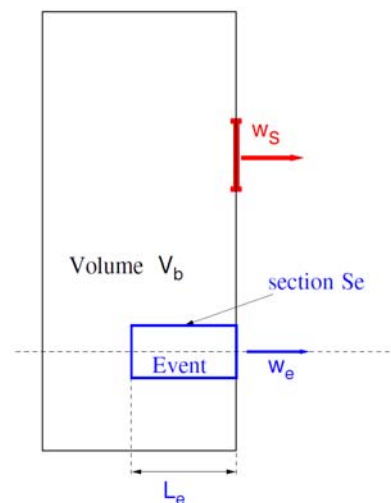


A. Principe

L'enceinte à événement est un système qui utilise une charge réalisée à l'aide d'un volume et d'un événement, l'ensemble de la charge arrière jouant le rôle de résonateur de Helmholtz.

Les caractéristiques du résonateur sont :

- Volume V_b ,
- Longueur d'événement L_e ,
- Section d'événement S_e .



Par convention, les débits sont supposés positifs lorsque le fluide sort de l'enceinte.

B. Réaction de l'enceinte aux basses fréquences

1. Effet de l'enceinte (1)

La face arrière du haut-parleur rayonne ainsi dans un système résonant qui présente :

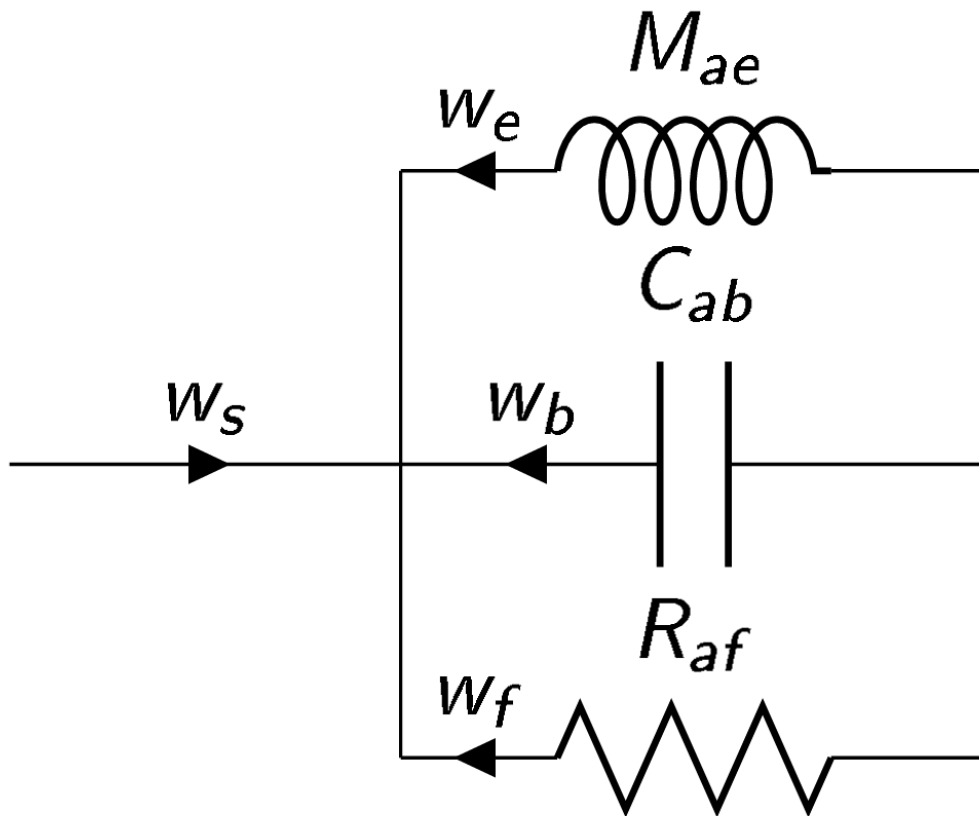
- une compliance C_{ab} due à la compressibilité de l'air dans le volume,

$$M_{ae} = \frac{\rho(L_e + \Delta l)}{S_e}$$

- une masse acoustique due à l'inertie de l'air dans l'événement. Le terme Δl représente la correction de longueur due aux effets de discontinuité en entrée et sortie d'événement. La résistance de rayonnement est négligée ici.
- une résistance R_{af} qui représente les fuites dans l'enceinte (souvent négligée). Cette résistance détermine le coefficient de qualité de l'enceinte Q_b (souvent compris entre 5 et 10 pour une enceinte soignée).

2. Effet de l'enceinte (2)

La charge arrière vue par le haut-parleur peut se représenter à l'aide du schéma équivalent ci-dessous. Le débit nécessaire pour comprimer ou déprimer l'air dans le volume est l'opposé de la somme des débits $w_b = -(w_s + w_e + w_f)$. Sachant que les débits w_s ; w_e ; w_f sont orientés positivement vers l'extérieur de l'enceinte, ceci traduit le fait que l'air qui sort de l'enceinte crée un débit négatif, soit une décompression de l'air.



3. Impédance acoustique de l'enceinte

L'admittance arrière vue par le haut-parleur (en négligeant R_{af}) peut ainsi s'écrire

$$Y_{ab} = j\omega C_{ab} + \frac{1}{j\omega M_{ae}}, \text{ ce qui conduit à une impédance arrière :}$$

$$Z_{ab} = \frac{j\omega M_{ae}}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_r}\right)^2},$$

$$\text{où } \omega_r = \frac{1}{M_{ae} C_{ab}}.$$

Le rapport des débits s'écrit :

$$\frac{w_e}{w_s} = \frac{-1}{1 - \left(\frac{\omega}{\omega_r}\right)^2}.$$

L'analyse de l'impédance et du rapport des débits est donnée au tableau ci-dessous.

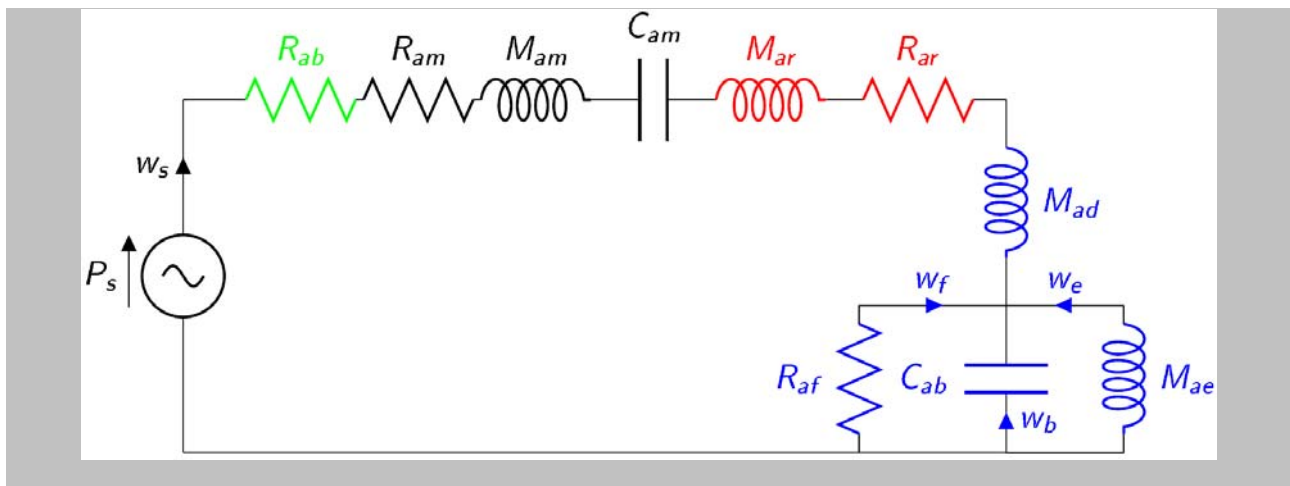
Fréquence	$\omega < \omega_r$	$\omega \approx \omega_r$	$\omega > \omega_r$
-----------	---------------------	---------------------------	---------------------

Rapport des débits	$w_e = -w_s$	w_s maximum	$w_s \rightarrow 0$
Impédance vue par le haut-parleur	$Z_{ab} \approx j\omega M_{ae}$	Z_{ab} maximale et résistive	et $Z_{ab} \approx \frac{1}{j\omega C_{ab}}$
Effet du résonateur	Masse ajoutée	Amplification du débit	du Enceinte close

C. Association haut-parleur + enceinte

1. Combinaison des deux rayonnements

La combinaison du haut-parleur et du résonateur de Helmholtz conduit à réaliser un système à deux degrés de liberté, dont le schéma équivalent est représenté ci-dessous dans le domaine acoustique. Les conventions de couleur sont identiques à celles présentées au *schéma équivalent acoustique*.

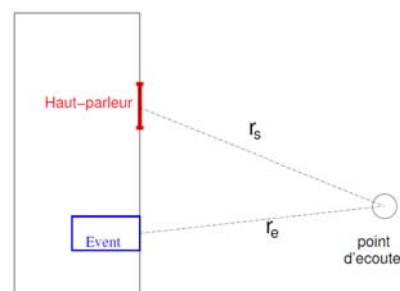


2. Pression rayonnée par l'enceinte

La pression rayonnée par l'enceinte est due à la contribution du haut-parleur (débit w_s) et à celle de l'évent

(débit w_e). En supposant que les sources sont petites devant la longueur d'onde et que le débit w_r (dû aux fuites) est négligeable, la réponse en pression s'écrit :

$$\frac{p(r)}{P_s} = jk\rho c \left(\frac{w_s}{P_s} \frac{e^{-jkr_s}}{4\pi r_s} + \frac{w_e}{P_s} \frac{e^{-jkr_e}}{4\pi r_e} \right)$$



En supposant une écoute dans l'axe ou en champ lointain, il vient $r_e \approx r_s = r$ et la pression rayonnée est directement proportionnelle à $w_s + w_e$.

Elle s'écrit ainsi comme une fonction du débit w_b nécessaire pour comprimer l'air compris dans le volume

$$V_b = \frac{p(r)}{P_s} = j\omega\rho \frac{w_b}{P_s} \frac{e^{-jkr}}{4\pi r}$$

3. Alignement

Le couplage entre deux systèmes résonants à un degré de liberté (haut-parleur + résonateur de Helmholtz) crée un système à deux degrés de liberté présentant deux résonances. De fait, la réponse en pression, proportionnelle à la réponse débit $\frac{w_b}{P_s}$, est une réponse d'ordre 4 qui s'écrit de façon générale :

$$p(r) = \frac{U_g \rho B I S_d e^{-jkr}}{R_e M_{ms} 4\pi r} G(s)$$

$$\text{où } G(s) = \frac{s^4}{s^4 + P_3 s^3 + P_2 s^2 + P_1 s + P_0}, \text{ en notant } s = j\omega.$$

La réponse en pression est donc un filtre passe-haut d'ordre 4 présentant une pente de 24 dB/oct.

Il est donc nécessaire de choisir les dimensions du résonateur de Helmholtz de telle façon que le débit généré par l'événement ne soit ni trop grand ni trop petit pour obtenir une réponse convenable aux basses fréquences, c'est à dire ne montrant pas de résonance trop marquée, ce qui générerait des effets de traînage au voisinage de la fréquence de résonance du caisson.

4. Alignement (suite)

Pour cela, on utilise des réponses de filtre d'ordre 4 connus et on cherche à identifier les termes de la réponse théorique de l'enceinte aux termes de la réponse du filtre. Ainsi, on peut déterminer des "réponses-types" d'enceinte à événement qui permettent de déterminer rapidement la géométrie de l'enceinte en fonction des paramètres du haut-parleur.

On considère usuellement que le coefficient de qualité de l'enceinte est $Q_b = 7$. Dans ce cas, quelques alignements classiques sont donnés ci-dessous (des valeurs supplémentaires sont disponibles dans Beranek [1]).

Remarque

Quelques valeurs utilisées pour le dimensionnement des enceintes à événement. f_s est la fréquence de résonance du haut-parleur, f_{3dB} est la fréquence de coupure à 3 dB de l'enceinte, V_b est le volume de l'enceinte, V_{as} est le paramètre du haut-parleur associé à sa souplesse mécanique, Q_{ts} est le coefficient de qualité total du haut-parleur, f_b est la fréquence de résonance du résonateur de Helmholtz.

Alignement	f_{3dB}/f_s	$V_b = V_{as}$	Q_{ts}	f_b/f_s
Sub-Butterworth	1.7748	0.4028	0.3010	1
Butterworth	1	0.9422	0.405	1
Chebyshev (0.01 dB ripple)	0.8143	1.5511	0.4572	0.8838
Chebyshev (0.25 dB ripple)	0.6374	2.9747	0.5553	0.7259

5. Calcul des paramètres d'une enceinte

Les dimensions d'une enceinte à événement peuvent être déterminées à l'aide d'abaques ou par calcul numérique.

Calcul par abaques

- Utiliser la figure 1 qui est une extension du tableau 1 [3].
- Partir du Q_{TS} du haut-parleur sur l'axe de gauche. Rejoindre la courbe Q_{TS} par une ligne horizontale.

- En déduire la valeur de α et calculer le

$$\text{volume de l'enceinte } V_b = \frac{V_{as}}{\alpha} .$$

$$h = \frac{f_b}{f_s} .$$

- En déduire la valeur de h .

Calculer la fréquence de résonance de l'enceinte $f_b = h * f_s$

- En déduire la valeur de q . Calculer la fréquence de coupure à -3 dB

$$f_{3dB} = q f_s .$$

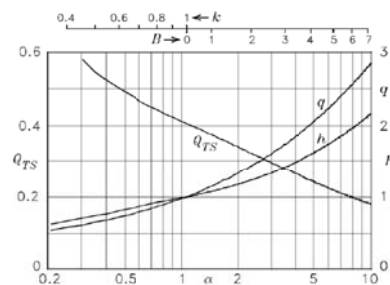


Image 1 Abaque permettant la détermination des dimensions d'une enceinte à événement

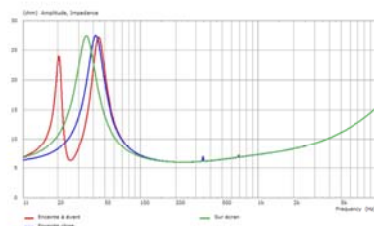
Calcul numérique

Dans ce cas, il est possible divers logiciels de simulation d'enceintes, comme par exemple ceux cités sur cette page :

<http://www.speakerbuilding.com/software/>

6. Exemple de calcul d'une enceinte : impédance électrique

Un exemple de calcul est donné pour le haut-parleur Visaton 170S. Le volume d'enceinte considéré est ici 95 l et les dimensions de l'événement sont : longueur = 11 cm, diamètre = 6 cm), ce qui conduit à une fréquence de résonance du résonateur de Helmholtz de 27,5 Hz environ. L'impédance électrique est présentée sur la figure ci-contre.

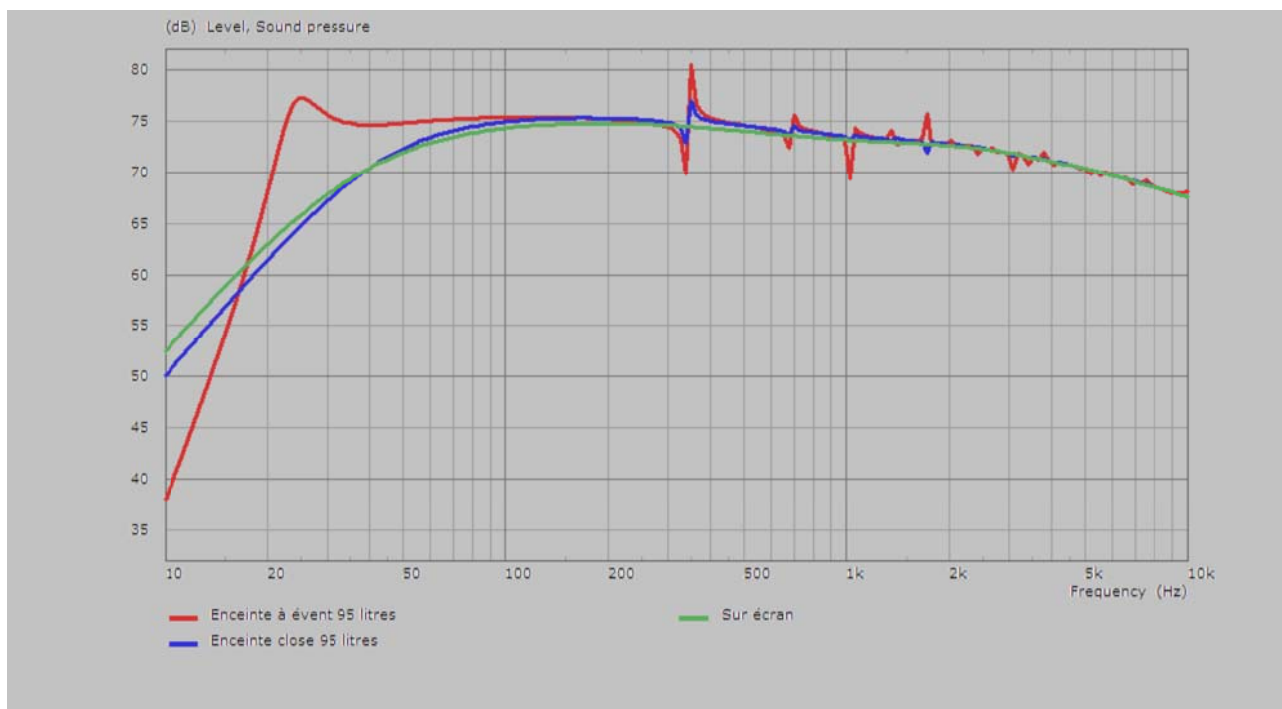


L'impédance de l'enceinte à événement montre deux pics qui traduisent l'existence de deux résonances, contrairement à ce qui se passe sur écran ou enceinte close.

7. Exemple de calcul d'une enceinte : réponse en pression

La réponse en pression à 1 mètre est présentée sur la figure ci-dessous pour le même haut-parleur (Visaton 170S, cf annexe 4) monté dans trois configurations différentes. L'enceinte possède les mêmes caractéristiques que précédemment et sa plus grande longueur interne est 50 cm.

1 - <http://www.speakerbuilding.com/software/>



8. Analyse de la simulation

La réponse calculée montre clairement l'effet de l'enceinte à événement sur la réponse du système. Dans le cas de l'enceinte close, la fréquence de coupure à -3 dB est de l'ordre de 45 Hz et la pente de l'ordre de 12 dB/octave. Pour l'enceinte à événement, la fréquence de coupure à -3 dB est de l'ordre de 25 Hz et la pente est de l'ordre de 24 dB / octave.

Par ailleurs, les accidents apparaissant au dessus de 300 Hz sont dus aux effets de résonance dans le volume. L'amplitude de ces résonances est probablement surestimée dans la simulation.

9. Débattement de la membrane du haut-parleur

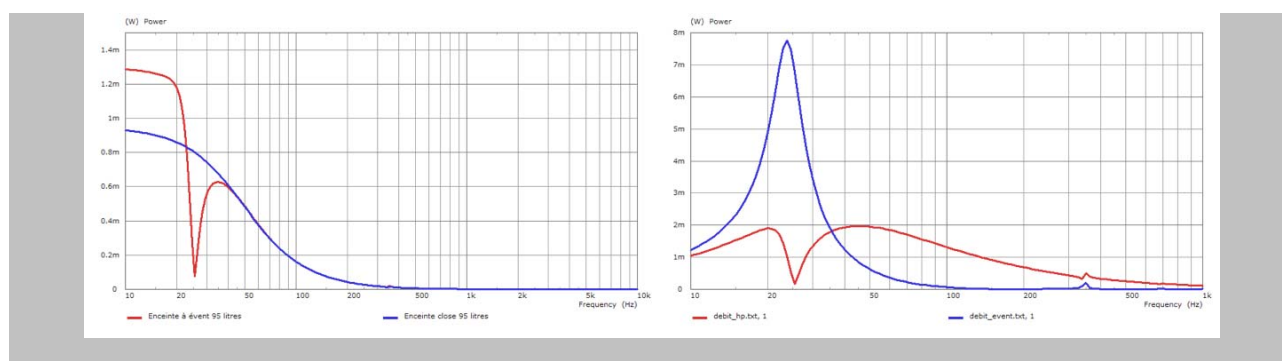
Complément

- Enceinte close : dans le cas d'une enceinte close, le débattement de la membrane du haut-parleur est constant jusqu'à la fréquence de résonance puis décroît avec une pente de 12 dB / oct.
- Enceinte à événement : l'enceinte à événement présente aux très basses fréquences une impédance de type « *inertielle* ». Au dessous de la fréquence de résonance du résonateur de Helmholtz, le haut-parleur doit pousser la masse d'air située sur sa face arrière. Il crée alors deux débits en opposition de phase (celui de la membrane du haut-parleur et celui de l'évent). A ces fréquences, le haut-parleur « *fait du vent* » et possède un grand débattement. Le débattement devient minimum à la fréquence de résonance du résonateur de Helmholtz, pour laquelle l'énergie mécanique est transmise de façon optimale à l'enceinte.

10. Débattement de la membrane du haut-parleur : exemple

Un exemple de calcul de débattement est montré à la Figure ci dessous à gauche pour le haut-parleur Visaton 170S monté dans les enceintes présentées *précédemment*.

Pour l'enceinte à événement, les débits générés par le haut-parleur et l'évent sont présentés à la figure ci-dessous à droite. Cette figure montre clairement le rôle assuré par l'évent pour compenser le faible déplacement du haut-parleur à la fréquence de résonance.



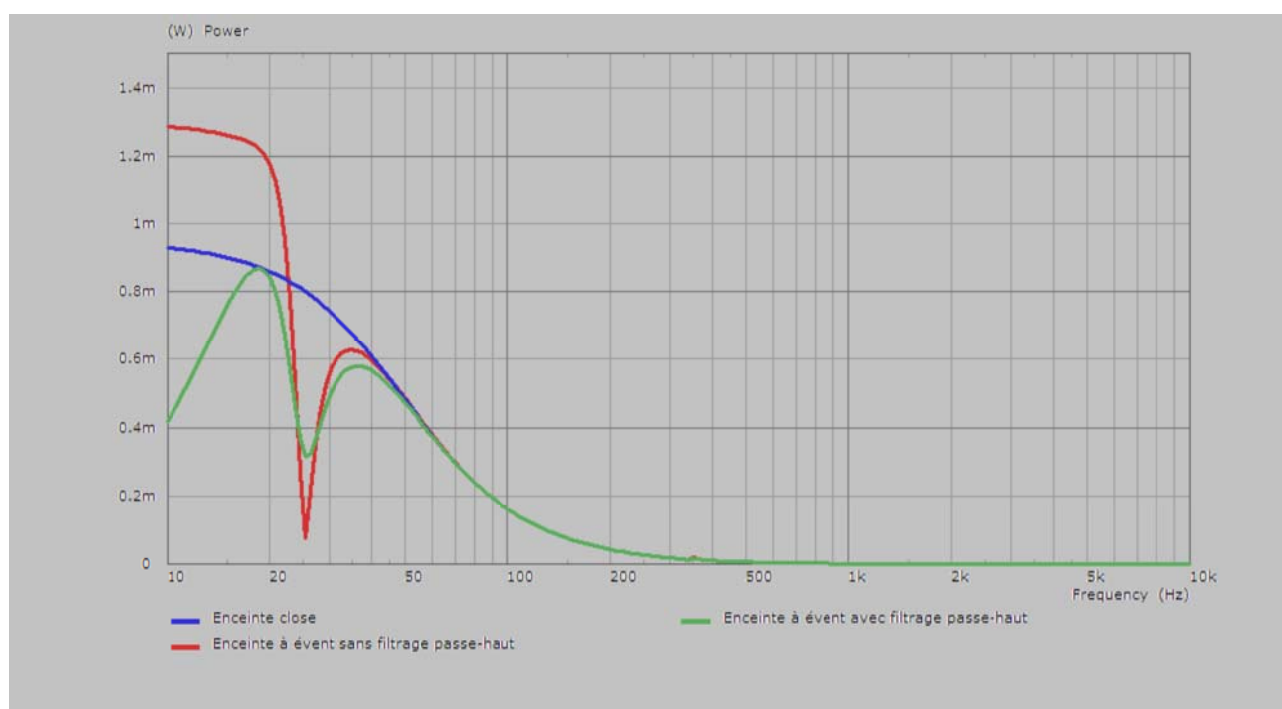
11. Filtrage actif d'une enceinte à événement

Complément

De façon à limiter le débattement de la membrane du haut-parleur, il est courant d'utiliser un filtre passe-haut en amont du haut-parleur. La fréquence de coupure d'un tel filtre étant basse (20 à 30 Hz), il est préférable d'utiliser un filtre actif. Un exemple de débattement est montré à la figure ci-dessous pour le haut-parleur d'étude monté en enceinte close, en enceinte à événement sans filtrage et en enceinte à événement munie d'un filtre de Sallen & Key de fréquence de coupure 17 Hz. La figure montre que l'ajout du filtre (courbe verte) permet de réduire le débattement entre 10 et 20 Hz.

La figure ci-dessous montre que le débattement du haut-parleur pour l'enceinte à événement sans filtre est très élevé au-dessous de la fréquence de résonance du résonateur de Helmholtz. Si l'enceinte est utilisée avec des signaux de très basse fréquence, le haut-parleur peut d'une part générer des distorsions, d'autre part subir des dommages mécaniques qui n'existent pas dans le cas de l'enceinte close (le déplacement étant plus faible).

L'application d'un filtre passe-haut permet de limiter la valeur du déplacement aux basses fréquences et ainsi limiter les effets de distorsion et protéger le haut-parleur.





Conclusion

VI

A. Synthèse

1. Rayonnement d'un haut-parleur

Un haut-parleur qui rayonne dans un espace donné (défini par son angle solide), voit une impédance acoustique, appelée impédance de rayonnement qui comprend aux basses fréquences ($ka < 1$, où k est le nombre d'onde et a le rayon du haut-parleur) :

- **Une résistance de rayonnement.** La résistance de rayonnement dépend des conditions de rayonnement en champ lointain (angle solide dans lequel la puissance acoustique est délivrée). Pour un angle solide de 4π steradians (rayonnement dans une sphère), la résistance de rayonnement est proportionnelle à $\frac{(ka)^2}{4}$. Pour un angle solide de 2π (demi espace), la résistance de rayonnement est double et est proportionnelle à $\frac{(ka)^2}{2}$.
- **Une masse de rayonnement.** La masse de rayonnement dépend de la géométrie de la discontinuité entre le haut-parleur et le milieu ambiant.

2. Haut-parleur en enceinte close

Un haut-parleur monté en enceinte close voit :

- sur sa face avant : l'impédance de rayonnement.
- sur sa face arrière : l'impédance de discontinuité (masse acoustique) en série avec l'impédance acoustique de la cavité.
 - Aux basses fréquences la cavité étanche est vue comme une souplesse acoustique.
 - Aux plus hautes fréquences, les modes propres de la cavité font apparaître des résonances internes modifiant l'impédance vue par le haut-parleur. En général les modèles électroacoustiques prennent en compte les résonances existant suivant la plus grande dimension de l'enceinte à l'aide des modèles de guides d'ondes (cf. grain 2.3).

La réponse du système complet (haut-parleur + enceinte close) est la suivante :

- L'impédance électrique présente une seule résonance dont la fréquence et le facteur de qualité sont plus élevés que la fréquence et le facteur de qualité de l'impédance électrique du haut-parleur monté sur écran.
- La réponse en pression est un filtre passe haut d'ordre 2 (pente de 12 dB/octave) dont la fréquence de résonance et le facteur de qualité sont plus élevés que ceux du haut-parleur monté sur écran. Aux hautes fréquences, la réponse en pression peut

comporter des accidents dus aux résonances internes de l'enceinte (qu'il est possible d'amortir à l'aide de matériau absorbant).

3. Haut-parleur en enceinte à événement

Une enceinte à événement est une cavité couplée à un tube, l'ensemble jouant le rôle de résonateur de Helmholtz pour renforcer l'émission des basses fréquences.

Un haut-parleur monté en enceinte à événement voit :

- sur sa face avant : l'impédance de rayonnement.
- sur sa face arrière : l'impédance de discontinuité (masse acoustique) en série avec l'impédance acoustique du résonateur de Helmholtz.
 - Aux basses fréquences l'enceinte à événement est vue comme un résonateur de Helmholtz présentant une résonance acoustique.
 - Aux plus hautes fréquences, les modes propres de la cavité font apparaître des résonances internes modifiant l'impédance vue par le haut-parleur. Par ailleurs, l'événement peut aussi présenter des résonances acoustiques suivant sa longueur

(fréquences de résonance $f_r = \frac{c}{2L_e}$, où c est la célérité du son et L_e la longueur effective de l'événement prenant en compte les corrections de longueur dues au rayonnement et à la discontinuité).

Aux basses fréquences, le système complet (haut-parleur + enceinte à événement) est un système à deux degrés de liberté, présentant ainsi deux fréquences de résonances.

Attention

Les fréquences de résonance du système complet sont différentes de la fréquence de résonance du haut-parleur seul et de la fréquence de résonance du résonateur de Helmholtz.

- L'impédance électrique présente deux résonances. La fréquence pour laquelle la valeur de l'impédance électrique est minimale (entre les deux résonances) est très proche fréquence de résonance du résonateur de Helmholtz.
- La réponse en pression est un filtre passe haut d'ordre 4 (pente de 24 dB/octave) qui est ajustée en comparant la réponse théorique à des gabarits de filtres électriques d'ordre 4 (alignements). Aux hautes fréquences, la réponse en pression peut comporter des accidents dus aux résonances internes de l'enceinte (qu'il est possible d'amortir à l'aide de matériau absorbant) et aux résonances de l'événement.

B. Testez vos connaissances

1. Exercice : QCM(1)

[Solution n°5 p 38]

Un haut-parleur monté sur écran infini est assimilé à un piston rigide oscillant. La partie réelle de son impédance de rayonnement s'écrit :

$R_{ar} = 2Z_c(ka)$

$R_{ar} = 2Z_c(ka)^2$

$R_{ar} = Z_c(ka)$

$R_{ar} = Z_c(ka)^2$

$R_{ar} = Z_c \frac{(ka)}{2}$

$R_{ar} = Z_c \frac{(ka)^2}{2}$

$R_{ar} = Z_c \frac{(ka)}{4}$

$R_{ar} = Z_c \frac{(ka^2)}{4}$

2. Exercice : QCM(2)

[Solution n°6 p 38]

Un haut-parleur monté à l'extrémité d'un tube est assimilé à un piston rigide oscillant. La section du tube est identique à celle du piston. La partie réelle de son impédance de rayonnement s'écrit :

$R_{ar} = 2Z_c(ka)$

$R_{ar} = 2Z_c(ka)^2$

$R_{ar} = Z_c(ka)$

$R_{ar} = Z_c(ka)^2$

$R_{ar} = Z_c \frac{(ka)}{2}$

$R_{ar} = Z_c \frac{(ka)^2}{2}$

$R_{ar} = Z_c \frac{(ka)}{4}$

$R_{ar} = Z_c \frac{(ka^2)}{4}$

3. Exercice : QCM(3)

[Solution n°7 p 39]

Un haut-parleur possède une fréquence de résonance $f_s = 50\text{Hz}$, un $V_{as} = 20\text{l}$ et un facteur de qualité $Q_{ts} = 0.5$. Ce haut-parleur est monté dans une enceinte close de volume $V_b = 30\text{l}$. La fréquence de résonance et le facteur de qualité du système complet sont :

- $f_s = 64; 5 \text{ Hz}, Q_b = 0:65$
- $f_s = 92:4 \text{ Hz}, Q_b = 0:65$
- $f_s = 39:8 \text{ Hz}, Q_b = 0:65$
- $f_s = 64; 5 \text{ Hz}, Q_b = 1:1$
- $f_s = 92:4 \text{ Hz}, Q_b = 1:1$
- $f_s = 39:8 \text{ Hz}, Q_b = 1:1$
- $f_s = 64; 5 \text{ Hz}, Q_b = 0:3$
- $f_s = 92:4 \text{ Hz}, Q_b = 0:3$
- $f_s = 39:8 \text{ Hz}, Q_b = 0:3$

4. Exercice : QCM(4)

[Solution n°8 p 39]

La réponse en pression (rayonnée) d'un haut-parleur monté en enceinte close est :

- un filtre passe bas de pente 6 dB/ octave
- un filtre passe bas de pente 12 dB/ octave
- un filtre passe bas de pente 24 dB/ octave
- un filtre passe bande de pente 6 dB/ octave
- un filtre passe bande de pente 12 dB/ octave
- un filtre passe bande de pente 24 dB/ octave
- un filtre passe haut de pente 6 dB/ octave
- un filtre passe haut de pente 12 dB/ octave
- un filtre passe haut de pente 24 dB/ octave

5. Exercice : QCM(5)

[Solution n°9 p 39]

La réponse en pression (rayonnée) d'un haut-parleur monté en enceinte à évent est :

- un filtre passe bas de pente 6 dB/ octave
- un filtre passe bas de pente 12 dB/ octave
- un filtre passe bas de pente 24 dB/ octave
- un filtre passe bande de pente 6 dB/ octave
- un filtre passe bande de pente 12 dB/ octave
- un filtre passe bande de pente 24 dB/ octave
- un filtre passe haut de pente 6 dB/ octave
- un filtre passe haut de pente 12 dB/ octave
- un filtre passe haut de pente 24 dB/ octave

6. Exercice : QCM(6)

[Solution n°10 p 40]

Aux basses fréquences (inférieures à la première fréquence de résonance de la cavité ou de l'évent), un haut-parleur monté en enceinte à évent est un système

- à un degrés de liberté
- à deux degrés de liberté
- à trois degrés de liberté
- à quatre degrés de liberté

Annexe

VII

A. Conventions de signe pour le rayonnement acoustique

1. Bibliographie

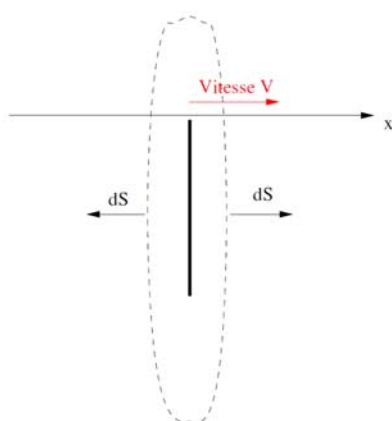
- 1 L L Beranek.
- 2 Acoustics.
- 3 American Institute of Physics, 1990.

- 1 J Panzer, Akabak,

- 1 R.H. Small, Loudspeakers in vented boxes, JAES

- 1 L L Beranek and T Mellow, Acoustics : sound fields and transducers,
- 2 Academic Press, 2012.

2. Rayonnement de sources



Considérons une source sonore plane rayonnant dans l'espace infini. Le débit acoustique produit par cette source à travers la surface S est défini par :

$$w = \int \int_S \vec{v}(r) d\vec{S}$$

où $d\vec{S}$ est égal à $\vec{n} dS$. \vec{n} est le vecteur normal orienté vers l'extérieur du volume.

Ainsi pour une vitesse positive, le débit est positif sur la face avant de la source et négatif sur la face arrière. Les débits avant et arrière sont donc en opposition de phase.

3. Paramètres d'un haut-parleur

Les paramètres d'un haut-parleur sont notés dans cette partie

- Paramètres électriques de la bobine
 - Résistance R_{eb} [Ω]
 - Inductance L_{eb} [H]
 - Impédance électrique de la bobine : $Z_{eb} = R_{eb} + j\omega L_{eb}$.
- Paramètres mécaniques de l'équipage mobile
 - Souplesse C_{mm} [m/N]
 - Masse M_{mm} [kg]
 - Résistance R_{mm} [kg=s]
 - Impédance mécanique :
$$Z_{mm} = R_{mm} + j\omega M_{mm} + \frac{1}{j\omega C_{mm}}$$
- Paramètres de couplage
 - Facteur de force BI [T.m] [N/A]
 - Surface équivalente de la membrane S_d [m²]
 - Rayon équivalent de la membrane r_d [m]

4. Paramètres du haut-parleur

Le haut-parleur utilisé pour illustrer les réponses d'enceintes est le Visaton 170S dont les paramètres sont :

Rated power 50 W, Maximum power 80 W

Nominal impedance Z 8 Ohm

Frequency response fu-8000 Hz (fu : Lower cut-off frequency depending on cabinet)

Mean sound pressure level 86 dB (1 W/1 m), Opening angle (-6 dB) 72°/4000 Hz

Excursion limit ± 10 mm

Resonance frequency fs 36 Hz

Magnetic induction 1,0 T, Magnetic flux 314 μ Wb

Height of front pole-plate 4 mm, Voice coil diameter 25 mm

Height of winding 12,5 mm, Cutout diameter 148 mm

Net weight 1,1 kg

D.C. resistance Rdc 5,9 Ohm

Mechanical Q factor Qms 2,43, Electrical Q factor Qes 0,66, Total Q factor Qts 0,52

Equivalent volume Vas 38 l

Effective piston area Sd 129 cm²

Dynamically moved mass Mms 13 g

Force factor BI 5,4 Tm

Inductance of the voice coil L 1,2 mH

Solution des exercices



> Solution n° 1 (exercice p. 4)

- Système résonant du 1^{er} ordre
- Système à 2 degrés de libertés
- Système résonant du 2nd ordre
- Système à 1 degré de liberté

> Solution n° 2 (exercice p. 4)

- Une masse acoustique
- Une compliance acoustique
- Un système résonant du 2nd ordre
- Une résistance acoustique

> Solution n° 3 (exercice p. 5)

- Une masse acoustique
- Une compliance acoustique
- Un système résonant du 2nd ordre
- Une résistance acoustique

> Solution n° 4 (exercice p. 5)

- Conserve la masse (ne modifie pas la masse du piston)
- Augmente la masse du piston
- Réduit la masse du piston
- Augmente la surface apparente du piston

> Solution n° 5 (exercice p. 32)

$R_{ar} = 2Z_c(ka)$

$R_{ar} = 2Z_c(ka)^2$

$R_{ar} = Z_c(ka)$

$R_{ar} = Z_c(ka)^2$

$R_{ar} = Z_c \frac{(ka)}{2}$

$R_{ar} = Z_c \frac{(ka)^2}{2}$

$R_{ar} = Z_c \frac{(ka)}{4}$

$R_{ar} = Z_c \frac{(ka^2)}{4}$

Z_c est l'impédance caractéristique et s'écrit $Z_c = \rho c S$ où c est la célérité du son, ρ la masse volumique de l'air et S la section du piston).

> Solution n° 6 (exercice p. 32)

$R_{ar} = 2Z_c(ka)$

$R_{ar} = 2Z_c(ka)^2$

$R_{ar} = Z_c(ka)$

$R_{ar} = Z_c(ka)^2$

$R_{ar} = Z_c \frac{(ka)}{2}$

$R_{ar} = Z_c \frac{(ka)^2}{2}$

$R_{ar} = Z_c \frac{(ka)}{4}$

$R_{ar} = Z_c \frac{(ka^2)}{4}$

Z_c est l'impédance caractéristique et s'écrit $Z_c = \rho c S$ où c est la célérité du son, ρ la masse volumique de l'air et S la section du piston).

> Solution n° 7 (exercice p. 32)

- | | |
|-------------------------------------|--------------------------------------|
| <input checked="" type="checkbox"/> | $f_s = 64; 5 \text{ Hz}, Q_b = 0:65$ |
| <input type="checkbox"/> | $f_s = 92:4 \text{ Hz}, Q_b = 0:65$ |
| <input type="checkbox"/> | $f_s = 39:8 \text{ Hz}, Q_b = 0:65$ |
| <input type="checkbox"/> | $f_s = 64; 5 \text{ Hz}, Q_b = 1:1$ |
| <input type="checkbox"/> | $f_s = 92:4 \text{ Hz}, Q_b = 1:1$ |
| <input type="checkbox"/> | $f_s = 39:8 \text{ Hz}, Q_b = 1:1$ |
| <input type="checkbox"/> | $f_s = 64; 5 \text{ Hz}, Q_b = 0:3$ |
| <input type="checkbox"/> | $f_s = 92:4 \text{ Hz}, Q_b = 0:3$ |
| <input type="checkbox"/> | $f_s = 39:8 \text{ Hz}, Q_b = 0:3$ |

> Solution n° 8 (exercice p. 33)

- | | |
|-------------------------------------|----------------------------------------------|
| <input type="checkbox"/> | un filtre passe bas de pente 6 dB/ octave |
| <input type="checkbox"/> | un filtre passe bas de pente 12 dB/ octave |
| <input type="checkbox"/> | un filtre passe bas de pente 24 dB/ octave |
| <input type="checkbox"/> | un filtre passe bande de pente 6 dB/ octave |
| <input type="checkbox"/> | un filtre passe bande de pente 12 dB/ octave |
| <input type="checkbox"/> | un filtre passe bande de pente 24 dB/ octave |
| <input type="checkbox"/> | un filtre passe haut de pente 6 dB/ octave |
| <input checked="" type="checkbox"/> | un filtre passe haut de pente 12 dB/ octave |
| <input type="checkbox"/> | un filtre passe haut de pente 24 dB/ octave |

> Solution n° 9 (exercice p. 34)

- | | |
|-------------------------------------|----------------------------------------------|
| <input type="checkbox"/> | un filtre passe bas de pente 6 dB/ octave |
| <input type="checkbox"/> | un filtre passe bas de pente 12 dB/ octave |
| <input type="checkbox"/> | un filtre passe bas de pente 24 dB/ octave |
| <input type="checkbox"/> | un filtre passe bande de pente 6 dB/ octave |
| <input type="checkbox"/> | un filtre passe bande de pente 12 dB/ octave |
| <input checked="" type="checkbox"/> | un filtre passe bande de pente 24 dB/ octave |
| <input type="checkbox"/> | un filtre passe haut de pente 6 dB/ octave |
| <input type="checkbox"/> | un filtre passe haut de pente 12 dB/ octave |
| <input type="checkbox"/> | un filtre passe haut de pente 24 dB/ octave |

> Solution n° 10 (*exercice p. 34*)

- | | |
|-------------------------------------|----------------------------|
| <input type="checkbox"/> | à un degrés de liberté |
| <input checked="" type="checkbox"/> | à deux degrés de liberté |
| <input type="checkbox"/> | à trois degrés de liberté |
| <input type="checkbox"/> | à quatre degrés de liberté |