

L'enceinte acoustique apériodique pour haut-parleur par E. de Boer avec compléments de calculs par J. Rousseau

J'

Introduction

L'auteur analyse les exigences d'une enceinte de haut-parleur sans résonance, puis propose une conception pratique d'une enceinte acoustique répondant au mieux à ces exigences.

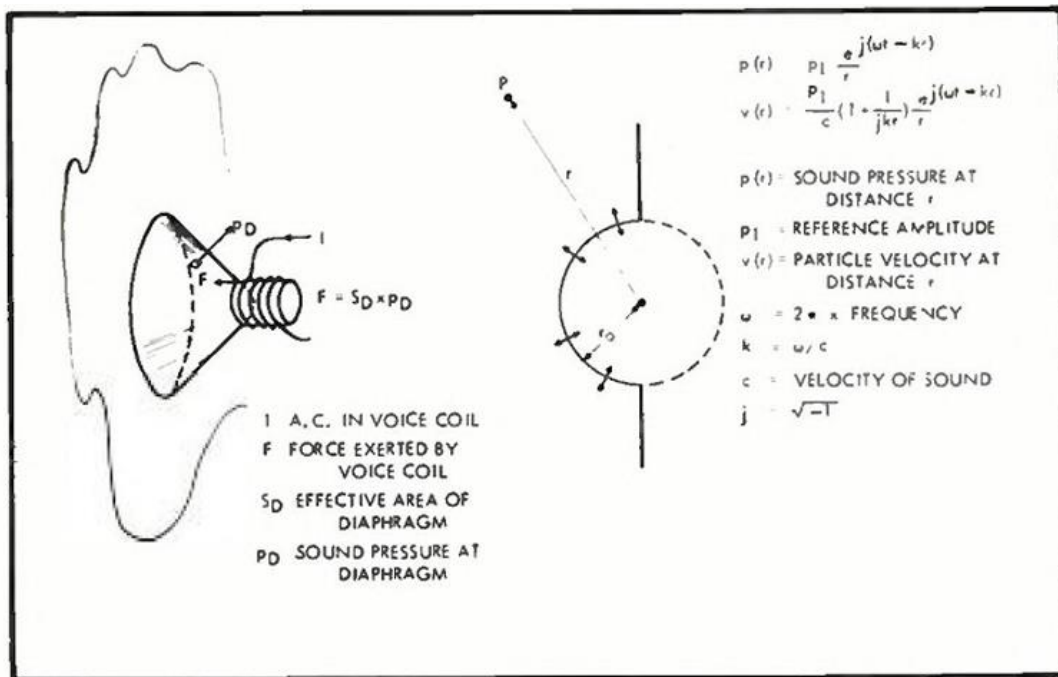


Fig. 1. Hypothetical loudspeaker in an infinite wall.

La reproduction fidèle des basses fréquences est un défi bien connu en haute-fidélité. Cette difficulté est principalement due à la faible efficacité de rayonnement des haut-parleurs à cône à ces fréquences. Plus précisément, lorsque les dimensions de la membrane sont petites par rapport à la longueur d'onde du son émis, il existe un mauvais couplage avec la charge acoustique de l'air. Cela pose non seulement des problèmes pour obtenir une réponse en fréquence plate, mais limite également sévèrement la puissance acoustique maximale. La seule façon de satisfaire ces deux objectifs de conception est d'augmenter la surface de rayonnement. Comme cela n'est pas réalisable au-delà d'une certaine limite, l'enceinte est conçue pour améliorer le couplage entre la membrane et la charge acoustique. On peut affirmer de manière générale qu'une amélioration sur une large plage de fréquences ne peut être obtenue que par un système occupant un grand volume. Dans une enceinte de petite taille, où la résonance est utilisée pour renforcer les graves, l'amélioration n'est présente que sur une plage de fréquences très étroite.

On peut en conclure que, pour un volume maximal donné, il faut soit se concentrer sur l'obtention d'une réponse en fréquence plate avec une capacité de puissance limitée, soit privilégier un meilleur couplage de puissance, au détriment d'une courbe de réponse en fréquence irrégulière. De nombreuses solutions se situent en réalité entre ces deux extrêmes. Seule la première peut être qualifiée de satisfaisante. L'auteur estime qu'il pourrait y avoir un intérêt pour une enceinte conçue pour obtenir une réponse en fréquence lisse, en mettant de côté les exigences de puissance.

Il a été démontré récemment [1] que, dans certaines conditions, une petite enceinte est théoriquement capable d'offrir une réponse en fréquence plate jusqu'à environ **20 Hz**. Équipée d'un haut-parleur de grand diamètre, un tel système peut produire une puissance suffisante pour des conditions d'écoute normales. Un raisonnement similaire a conduit au **système de suspension acoustique** [2]. Ces systèmes ont en commun d'exiger un choix plutôt critique des paramètres du haut-parleur ainsi que de l'enceinte.

L'auteur a développé une enceinte de petite taille pouvant être utilisée avec un haut-parleur de type standard et peu critique. L'objectif de conception a été d'approcher le comportement du haut-parleur en **baffle infini**, avec pour exigence que la résonance fondamentale soit **amortie de manière critique**. Cela a été réalisé en ajoutant deux paramètres ajustables à un système ressemblant à une enceinte **bass-reflex**.

Analogie électrique d'un haut-parleur

Commençons par discuter du fonctionnement d'un haut-parleur sur un baffle infini. Pour simplifier, supposons d'abord que la membrane n'a pas de masse et est librement suspendue. Lorsqu'un courant constant **I** traverse la bobine mobile, une force **F** est exercée sur la membrane. Cette force ne peut être équilibrée que par des forces acoustiques, de sorte que la pression acoustique **pd** sur la membrane reste constante avec la fréquence.

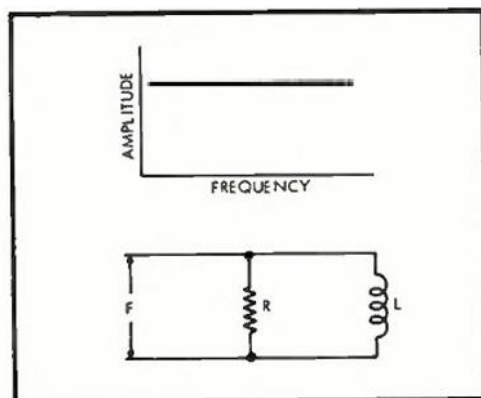


Fig. 2. Electrical analogue of the system of Fig. 1.

Pour les basses fréquences, le système de rayonnement peut être converti en une sphère pulsante rayonnant dans le demi-espace gauche sans introduire une erreur trop importante, comme montré dans la **Figure 1**.

Contexte et Notations

- **Demi-sphère pulsante** : Modèle utilisé pour représenter un haut-parleur monté sur un baffle infini. La pression et la vitesse sont calculées dans un demi-espace.
- $p(r)$: Pression acoustique à une distance r de la source.
- $v(r)$: Vitesse des particules à une distance r de la source.
- p_1 : Amplitude de référence de la pression acoustique.
- ω : Fréquence angulaire, $\omega = 2\pi f$ (où f est la fréquence).
- k : Nombre d'onde, $k = \frac{\omega}{c}$ (où c est la vitesse du son dans l'air).
- c : Vitesse du son dans l'air (environ 343 m/s à 20°C).
- j : Unité imaginaire, $j = \sqrt{-1}$.

Formule de la Pression Acoustique $p(r)$

La pression acoustique à une distance r d'une demi-sphère pulsante est donnée par :

$$p(r) = p_1 \frac{j e^{j(\omega t - kr)}}{r}$$

- p_1 : Amplitude de référence de la pression acoustique.
- $e^{j(\omega t - kr)}$: Représente la propagation de l'onde sonore dans le temps t et l'espace r .
- $\frac{1}{r}$: La pression acoustique diminue avec la distance r (atténuation en $1/r$).

Formule de la Vitesse des Particules $v(r)$

La vitesse des particules à une distance r est donnée par :

$$v(r) = \frac{p_1}{\rho_0 c} \left(1 + \frac{1}{jkr} \right) e^{j(\omega t - kr)}$$

Formule de la Vitesse des Particules $v(r)$

La vitesse des particules à une distance r est donnée par :

$$v(r) = \frac{p_1}{\rho_0 c} \left(1 + \frac{1}{jkr} \right) e^{j(\omega t - kr)}$$

- ρ_0 : Densité de l'air (environ 1.225 kg/m³ à 20°C).
- $\frac{p_1}{\rho_0 c}$: Représente l'amplitude de la vitesse des particules.
- $\left(1 + \frac{1}{jkr} \right)$: Terme qui prend en compte l'effet de la distance r et du nombre d'onde k .

Explication des Termes

1. $e^{j(\omega t - kr)}$:

- Ce terme représente une onde sonore qui se propage avec le temps t et la distance r .
- ωt : Représente la dépendance temporelle de l'onde.
- kr : Représente la dépendance spatiale de l'onde.

2. $\frac{1}{r}$:

- La pression acoustique diminue avec la distance r en raison de la propagation sphérique de l'onde.

3. $\left(1 + \frac{1}{jkr} \right)$:

- Ce terme montre que la vitesse des particules dépend de la distance r et du nombre d'onde k .
- Aux basses fréquences ou à courte distance, le terme $\frac{1}{jkr}$ domine, ce qui signifie que la vitesse des particules est principalement influencée par la proximité de la source.

À partir des formules données pour le champ sonore, on peut voir que l'amplitude de la pression acoustique est inversement proportionnelle à la distance. Par conséquent, notre haut-parleur hypothétique (alimenté par un courant constant I) a la propriété suivante, que la réponse en pression à un point donné dans l'espace de rayonnement est indépendante de la fréquence.

Cette théorie simplifiée montre pourquoi un haut-parleur réel peut avoir une réponse en pression raisonnablement plate, même lorsque les dimensions sont plus petites que la longueur d'onde.

Pour discuter de la capacité de puissance, nous nous intéressons à l'amplitude A des excursions de la membrane. La vitesse de la membrane $v_D = j\omega A$ est liée à la force F par le concept d'**impédance mécanique ZM** définie comme

$$z_M = \frac{F}{v_D}.$$

- F : force exercée par la bobine mobile (en newtons).
- v_D : vitesse de la membrane (en m/s).
- $v_D = j\omega A$, où A est l'amplitude des excursions de la membrane et $\omega = 2\pi f$ (pulsation).

À partir des formules données dans la **Figure 1**, il s'ensuit que :

$$z_M = S_D \rho c \frac{kr_0}{kr_0 - j},$$

où :

- S_D : surface effective de la membrane (en m²).
- ρ : densité de l'air (environ 1,2 kg/m³).
- c : vitesse du son dans l'air (environ 343 m/s).
- $k = \frac{\omega}{c}$: nombre d'onde.
- r_0 : rayon équivalent de la membrane.

Pour les basses fréquences, **ZM** est presque proportionnel à la fréquence ; par conséquent, l'amplitude **A** est presque inversement proportionnelle au carré de la fréquence afin de maintenir une pression acoustique constante. C'est la raison pour laquelle la puissance sonore est sévèrement limitée aux basses fréquences.

Limitation de la puissance aux basses fréquences

Problème physique : Aux basses fréquences, la membrane doit se déplacer avec une **grande amplitude** pour produire une pression acoustique donnée. Cela est dû à :

- La faible efficacité de rayonnement (la membrane est petite par rapport à la longueur d'onde).
- La nécessité de déplacer un grand volume d'air, ce qui demande une excursion importante.

- **Exemple** : À 20 Hz, la membrane doit se déplacer beaucoup plus qu'à 1 kHz pour produire la même pression acoustique.

Afin de visualiser plus clairement les conditions de fonctionnement des haut-parleurs réels, nous utiliserons une **analogie électrique** du système mécanique. Toute force mécanique sera représentée par une **tension électrique**, et une vitesse par un **courant**. Une impédance mécanique est alors transformée en une impédance électrique, qui peut lui être numériquement égale."

Comme on peut le vérifier facilement, l'impédance [mécanique] peut être représentée par l'impédance électrique d'une **résistance** et d'une **inductance** connectées en parallèle, comme dans la **Figure 2**.

Nous faisons référence à cette impédance comme étant l'**impédance de rayonnement d'un orifice circulaire**. Dans le cas de notre haut-parleur hypothétique, cette impédance est directement connectée à une source de tension représentant la force constante F . La tension aux bornes de la configuration de la **Figure 2** représente également la **pression acoustique sur la membrane**.

Lien avec la Figure 2

Circuit électrique : Dans la **Figure 2**, le circuit est le suivant :

- F : Force appliquée à la membrane (représentée par une source de tension).
- R : Résistance de rayonnement.
- L : Inductance représentant la masse d'air.

Comportement fréquentiel :

- **Basses fréquences** : L'inductance L domine (car $jL\omega$ devient très petit), et l'impédance tend vers zéro. Cela reflète le fait que la membrane peut se déplacer facilement, mais avec une faible dissipation d'énergie (peu de rayonnement acoustique).
- **Hautes fréquences** : La résistance R domine, et l'impédance tend vers R . Cela correspond à un bon couplage acoustique et un rayonnement efficace.

Pour le radiateur à symétrie sphérique de la **Figure 1**, elle représente aussi la **pression acoustique en un point donné de l'espace de rayonnement**. Ainsi, à partir de notre analogue électrique, il est facilement vérifié que la **réponse en pression du haut-parleur sera plate**.

La **puissance rayonnée** est représentée par la dissipation dans R . L'**inductance** L représente une certaine masse d'air vibrant au voisinage de la membrane sans dissipation (masse de rayonnement).

Nous avons maintenant acquis les compétences nécessaires pour étudier le comportement des **haut-parleurs réels** à partir de l'analogie électrique. La masse, la raideur et autres propriétés de la membrane sont ajoutées à l'analogie, et la réponse en pression sera toujours donnée par la tension aux bornes de l'impédance de rayonnement de la **Figure 1**. L'ajout de ces éléments supplémentaires, bien qu'inévitables, fait dévier la réponse en fréquence de la réponse idéale."

Tout d'abord, nous supposons que la membrane a une **masse non négligeable**, mais toujours une **compliance infinie** (souplesse infinie, c'est-à-dire sans raideur). Puisque la force F doit être divisée entre la masse [de la membrane] et la charge acoustique, la **réactance de masse** apparaît en série dans le circuit électrique. Voir la configuration (A) dans la **Figure 3**.

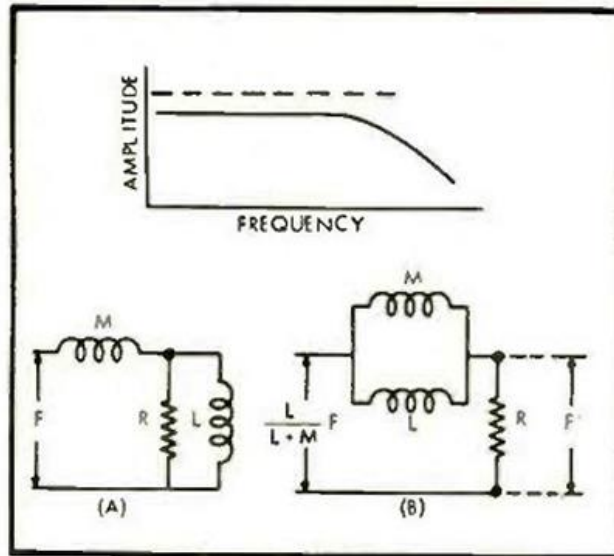


Fig. 3. Loudspeaker with mass (M) reaction included.

Grâce à la configuration équivalente de (B), la réponse en pression est facilement calculée. Ici, F représente la force mécanique et F' la partie de cette force qui est effective pour le rayonnement. On peut voir que l'introduction de la masse réduit l'efficacité et provoque une atténuation des hautes fréquences.

Maintenant, nous ajoutons la caractéristique d'une **compliance finie** (souplesse finie). Cela apparaît dans la **Figure 4** comme un **condensateur** (proportionnel à la compliance), encore une fois en série avec l'impédance de rayonnement. La configuration résultante donne lieu à une **résonance série**, qui se situe en réalité dans une région de fréquence où l'amortissement par R est très faible. Cela signifie que cette résonance fondamentale ne sera pas matériellement amortie par le rayonnement acoustique.

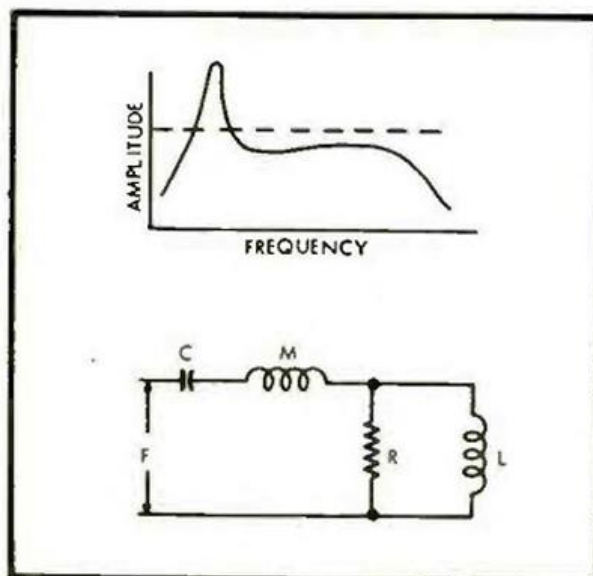


Fig. 4. Loudspeaker with effect of finite compliance (C) included

L'amortissement provient principalement de la **friction mécanique** et du **couplage électromagnétique** avec l'amplificateur. La friction peut simplement être représentée comme une

résistance en série. L'amortissement électromagnétique peut également être étudié à partir de l'analogie électrique, bien que la démonstration soit un peu plus complexe. Supposons un instant que la **résistance de la bobine mobile soit nulle** et que l'amplificateur soit une **source de tension pure**. Le mouvement de la membrane sera alors tel que la **tension d'induction** développée dans la bobine mobile équilibre exactement la tension appliquée. La vitesse de la membrane est alors entièrement contrôlée par l'amplificateur

Le système d'excitation est représenté dans l'analogie électrique de la **Figure 5** par une **source de courant pur**.

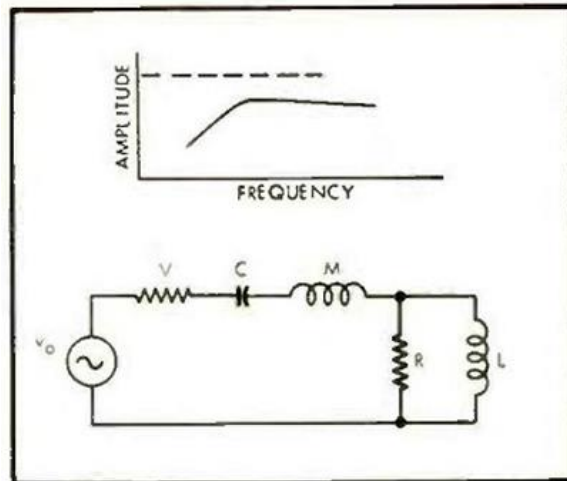


Fig. 5. Velocity-controlled loudspeaker.

Il est alors évident que la réponse aux basses fréquences chute de 6 dB par octave. Cette propriété est bien connue des haut-parleurs à haut rendement pilotés par un amplificateur à faible impédance interne. La situation réelle se situe généralement entre celles illustrées dans les **Figures 4 et 5**. Étant donné que les amplificateurs sont fréquemment conçus pour fournir une tension de sortie presque constante, le système d'excitation est de préférence représenté comme dans la **Figure 6**, consistant en une source de courant v_0 shuntée par une résistance Q . La vitesse v_0 est la vitesse atteinte par la membrane lorsque la résistance ohmique totale serait nulle. La consommation de courant par Q est une mesure de la chute de tension réelle sur la résistance interne de l'amplificateur et la résistance de la bobine mobile, r .

Par conséquent, la valeur numérique de Q est inversement proportionnelle à cette résistance totale. De la **Figure 6**, il est évident que l'amortissement est le plus grand lorsque Q est grand, c'est-à-dire lorsque la résistance totale dans le circuit de la bobine mobile est faible.

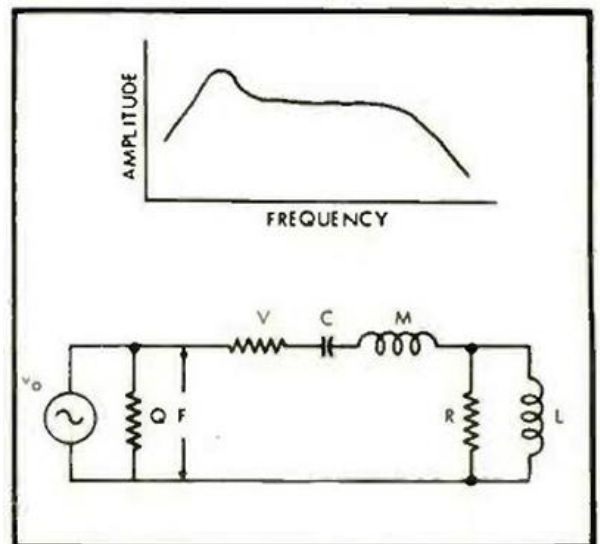


Fig. 6. Loudspeaker with electromagnetic damping.

Haut-parleur en enceinte

L'analogie électrique sert d'outil important pour comprendre le fonctionnement de systèmes plus complexes. Lorsqu'un haut-parleur est placé dans une enceinte, la membrane doit exercer des forces supplémentaires. Par conséquent, les éléments dus à l'enceinte apparaissent en série avec l'impédance de la membrane de la **Figure 4**.

Forces supplémentaires dans une enceinte

Placement du haut-parleur dans une enceinte :

Lorsque le haut-parleur est monté dans une enceinte, la membrane doit exercer des forces supplémentaires pour :

- **Comprimer l'air à l'intérieur de l'enceinte** (surtout dans les enceintes fermées).
- **Déplacer l'air à travers les événements ou les labyrinthes** (dans les enceintes bass-reflex ou aperiodiques).
- Ces forces supplémentaires modifient l'impédance mécanique vue par la membrane.

Représentation dans l'analogie électrique :

Ces forces supplémentaires sont représentées par des **éléments en série** avec l'impédance de la membrane (voir **Figure 4**).

- Par exemple, la raideur de l'air enfermé dans une enceinte fermée est représentée par un **condensateur en série**.
- La masse d'air dans un événement est représentée par une **inductance en série**.

En raison de la compressibilité finie de l'air, une enceinte complètement fermée se comporte comme une raideur, au moins pour les basses fréquences. Le condensateur analogue **E** apparaît en série avec la raideur de la membrane **C**, augmentant ainsi la fréquence de résonance (voir **Figure 7**).

Lorsque l'enceinte est pourvue d'un événement, la situation devient beaucoup plus complexe. Sous l'hypothèse que l'événement rayonne sans interaction avec la membrane, son impédance est à nouveau représentée par une inductance L' et une résistance R' en parallèle. Pour trouver les places appropriées de cette impédance et de la raideur de l'enceinte, nous notons que le flux d'air issu du côté arrière de la membrane peut choisir entre deux chemins :

- une partie du flux sort de l'enceinte via l'événement,
- le reste contribue à la pression acoustique à l'intérieur de l'enceinte.

Cette configuration à deux voies peut être représentée par une connexion parallèle du condensateur **E** et de l'impédance de rayonnement de l'événement, comme illustré dans la **Figure 8**. La configuration parallèle peut être justifiée en notant que la pression à l'intérieur de l'enceinte doit être la même en tous points. Ainsi, l'événement est piloté par la même pression acoustique que la raideur de l'enceinte. Dans l'analogie électrique, les deux impédances doivent alors être connectées à la même tension, donc en parallèle.

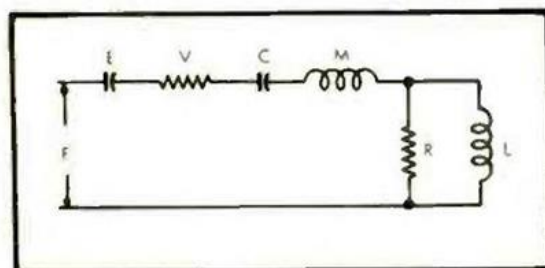


Fig. 7. Loudspeaker in completely closed box (E represents stiffness of enclosed volume of air).

Le circuit de la **Figure 8** donne l'analogie électrique généralement accepté d'un système bass-reflex. Cependant, ce circuit est négligé pour deux aspects. Tout d'abord, l'interaction entre la membrane et l'évent est négligée. Une introduction appropriée de cet effet rend le circuit beaucoup plus compliqué.

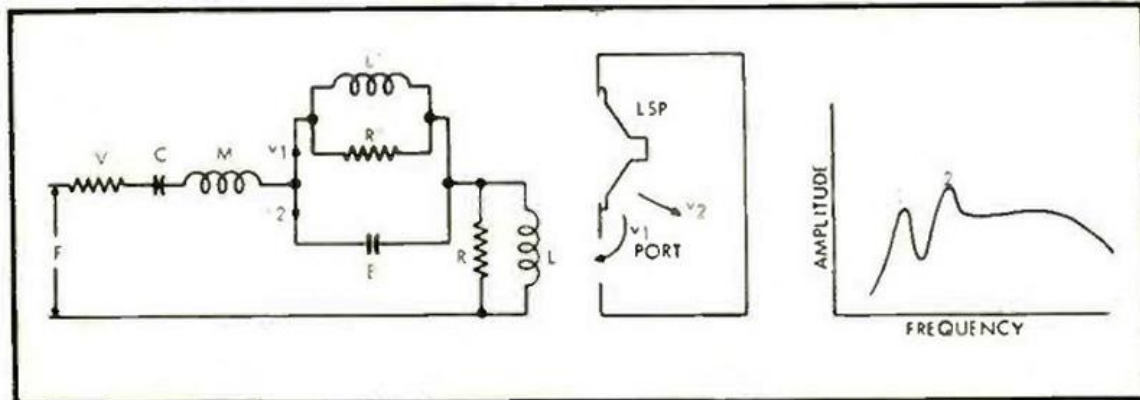


Fig. 8. Loudspeaker in box provided with additional orifice.

En second lieu, le rayonnement de la face arrière de la membrane est de 180 degrés et est en opposition de phase avec celui de la face avant. Dans notre discussion qualitative, nous supposons que ces deux effets n'ont pas un grand impact sur les diverses pressions et vitesses apparaissant dans le circuit. Pour la réponse acoustique, cependant, nous pouvons constater que la pression sonore à grande distance est approximativement représentée par la différence des tensions au travers **L** et **L'**.

La performance du système bass-reflex sera analysée brièvement. À la fréquence de résonance à l'air libre du haut-parleur, presque toute la force **F** apparaît aux bornes de la section parallèle. Lorsque cette section résonne à la même fréquence, un rayonnement complet est conservé tandis qu'en même temps une grande impédance mécanique est présentée à la membrane. Cette situation avantageuse n'est cependant présente que sur une petite plage de fréquences.

À des fréquences plus basses, la section parallèle devient inductive et la section série capacitive, de sorte qu'une résonance série se développe. À des fréquences plus élevées que la résonance parallèle, la section parallèle devient capacitive et la section série inductive, de sorte qu'une deuxième résonance série du circuit complet apparaît. À ces deux résonances, la vitesse de la membrane devient maximale. Les maxima résultants de la tension d'induction développée dans la bobine mobile provoquent le double pic bien connu de l'impédance de la bobine mobile, spécifique au système bass-reflex. Les polarités opposées des ondes avant et arrière réduisent l'amplitude de la résonance inférieure. Une réponse théorique typique est représentée en Fig.8

Détail de tous les paramètres du schéma de la fig.8 :

V

- **Description :** Représente la **vitesse de la source** (ou force motrice) appliquée au système.
- **Analogie électrique :** Source de courant.
- **Rôle :** Représente le mouvement initial imposé par la bobine mobile du haut-parleur sous l'effet du signal électrique de l'amplificateur.

C :

- **Description :** Représente la **compliance (souplesse)** de la membrane du haut-parleur.
- **Analogie électrique :** Condensateur.
- **Rôle :** Stocke et libère de l'énergie mécanique, influençant la fréquence de résonance du système.

M :

- **Description :** Représente la **masse** de la membrane du haut-parleur.
 - **Analogie électrique :** Inductance.
 - **Rôle :** S'oppose aux changements de vitesse de la membrane, influençant l'inertie du système.
-

R :

- **Description :** Représente les **pertes mécaniques** (frottements, résistance de la suspension).
 - **Analogie électrique :** Résistance.
 - **Rôle :** Dissipe l'énergie mécanique sous forme de chaleur, amortissant les mouvements de la membrane.
-

L :

- **Description :** Représente la **masse d'air** en mouvement devant la membrane (masse acoustique).
 - **Analogie électrique :** Inductance.
 - **Rôle :** Influence le comportement du haut-parleur aux hautes fréquences.
-

E :

- **Description :** Représente la **raideur de l'air enfermé** dans l'enceinte.
 - **Analogie électrique :** Condensateur.
 - **Rôle :** Augmente la fréquence de résonance du système en ajoutant une raideur supplémentaire.
-

R' et L' (en parallèle) :

- **Description :**
 - R' : Représente les pertes acoustiques dans l'évent (résistance de rayonnement).
 - L' : Représente la **masse d'air** dans l'évent.
 - **Analogie électrique :**
 - R' : Résistance.
 - L' : Inductance.
 - **Rôle :** L'évent permet de "décharger" une partie de la pression acoustique à l'intérieur de l'enceinte, améliorant la réponse aux basses fréquences.
-

v2 :

- **Description :** Représente la **vitesse de la membrane** du haut-parleur.
 - **Analogie électrique :** Courant traversant les éléments en série.
-

v1 :

- **Description :** Représente la **vitesse de l'air** dans l'évent.
 - **Analogie électrique :** Courant traversant les éléments R'R'R' et L'L'L'.
-

LSP :

- **Description :** Représente le **haut-parleur** (LoudSpeaker).
- **Analogie :** Transducteur électromécanique.

Enceintes amorties

Le système bass-reflex offre une configuration facilement réalisable d'impédances mécaniques dues à l'enceinte. Sur une plage de fréquences restreinte, un meilleur couplage entre la membrane et la charge acoustique est obtenu grâce au rayonnement de l'évent. Cela se fait cependant au détriment de la réponse à d'autres fréquences.

Dans notre conception, nous allons nous en tenir à ce type de configuration, bien que les exigences soient complètement différentes. L'impédance de l'enceinte sera utilisée uniquement pour contrôler le mouvement de la membrane. L'évent ne sera pas utilisé comme radiateur alternatif de son. Cela est

obtenu en rendant la surface de l'évent e exceptionnellement faible. Nous allons essayer de modifier le système

Ainsi, une réponse en fréquence lisse est obtenue à partir du rayonnement de la membrane. Les résonances inévitables ne peuvent être attaquées que par l'application d'un amortissement.

Il a été montré que, dans certaines conditions, une valeur très faible de la résistance R' peut servir à cet effet de manière efficace. Une telle valeur peut être réalisée en introduisant un évent pourvu d'un tissu résistif épais. L'enceinte résultante est capable d'une réponse plate vers environ 20 Hz.

En raison du fait qu'une résistance est utilisée pour amortir deux résonances et une anti-résonance, le système est assez critique, cependant. En outre, le rayonnement résiduel de l'orifice amorti tend à altérer la basse fréquence. Pour ces raisons, l'auteur a essayé de trouver une solution qui ne souffre pas de ces inconvénients.

Concentrons-nous sur l'une des résonances série d'une enceinte bass-reflex typique (pourvue d'un évent trop petit). À la fréquence de la résonance supérieure, l'impédance de type masse de la membrane résonne avec l'impédance de type raideur de l'enceinte. Cette dernière est donnée presque exclusivement par la raideur du volume d'air enfermé. Cette résonance série est indiquée schématiquement par la ligne épaisse en (A) de la **Figure 9**. Cette résonance peut être amortie par une résistance insérée n'importe où dans le chemin indiqué.

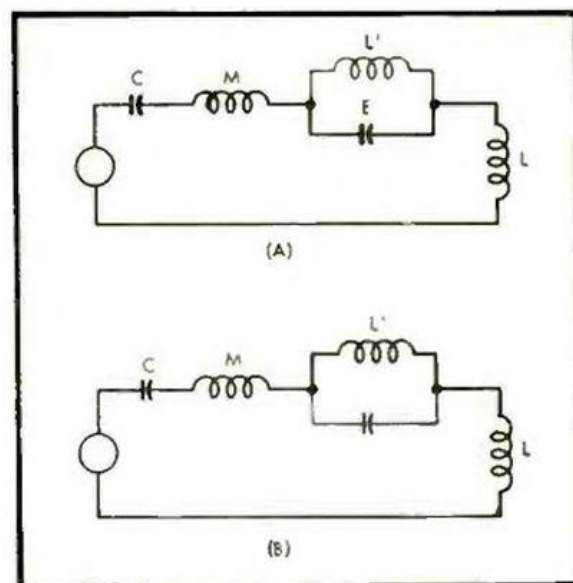


Fig. 9. Origin of main resonances.

L'autre résonance série est due à la raideur de l'impédance de la membrane à basses fréquences étant équilibrée par le caractère de type masse de l'enceinte. Le chemin du courant de cette résonance est indiqué en (B) de la **Figure 9**. Les deux résonances peuvent être amorties presque indépendamment en insérant deux résistances, une en série avec E , l'autre en série avec L' (voir **Figure 10**).

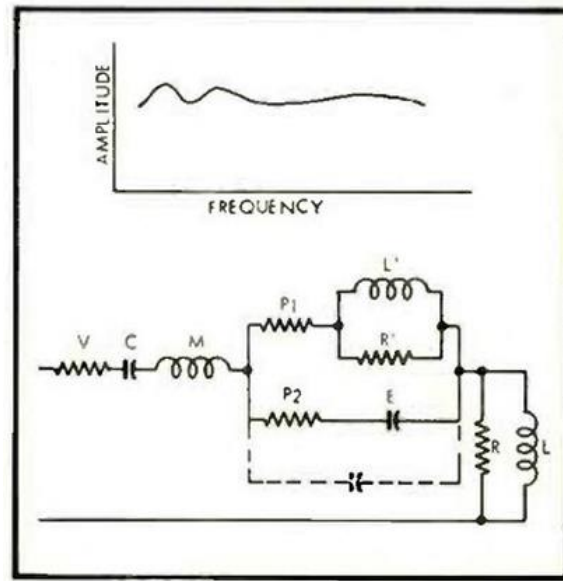


Fig. 10. Loudspeaker in "aperiodic" enclosure.

À des fréquences intermédiaires, la résonance de la section parallèle se produit. Cette résonance tend à provoquer un creux dans la réponse en fréquence. Elle est, cependant, amortie par les deux résistances P1 et P2, qui réduisent l'amplitude de ce creux. Avec un choix approprié des paramètres, un ajustement correct de P1 et P2 réduit automatiquement cette antirésonance au degré souhaité.

Détail de tous les paramètres du schéma de la fig.10 :

a) V :

- **Description :** Représente la vitesse de la source (bobine mobile).
- **Analogie électrique :** Source de courant.
- **Rôle :** Représente le mouvement initial imposé par la bobine mobile du haut-parleur sous l'effet du signal électrique de l'amplificateur.

b) C :

- **Description :** Représente la **compliance (souplesse)** de la membrane du haut-parleur.
- **Analogie électrique :** Condensateur.
- **Rôle :** Stocke et libère de l'énergie mécanique, influençant la fréquence de résonance du système.

c) M :

- **Description :** Représente la **masse** de la membrane du haut-parleur.
- **Analogie électrique :** Inductance.
- **Rôle :** S'oppose aux changements de vitesse de la membrane, influençant l'inertie du système.

d) P1 :

- **Description :** Représente les **pertes mécaniques** (frottements, résistance de la suspension).
- **Analogie électrique :** Résistance.
- **Rôle :** Dissipe l'énergie mécanique sous forme de chaleur, amortissant les mouvements de la membrane.

e) L' :

- **Description :** Représente la **masse d'air** dans l'évent ou le pavillon.
- **Analogie électrique :** Inductance.
- **Rôle :** Influence le comportement du haut-parleur aux basses fréquences.

f) R' :

- **Description** : Représente les **pertes acoustiques** dans l'évent ou le pavillon.
- **Analogie électrique** : Résistance.
- **Rôle** : Dissipe l'énergie acoustique, amortissant les résonances.

g) P_2 :

- **Description** : Représente les **pertes supplémentaires** dues à l'enceinte et au tissu résistif.
- **Analogie électrique** : Résistance.
- **Rôle** : Amortit les résonances de l'enceinte.

h) E :

- **Description** : Représente la **raideur de l'air enfermé** dans l'enceinte.
- **Analogie électrique** : Condensateur.
- **Rôle** : Augmente la fréquence de résonance du système en ajoutant une raideur supplémentaire.

i) R :

- **Description** : Représente la **résistance de rayonnement** de la membrane.
- **Analogie électrique** : Résistance.
- **Rôle** : Représente la charge acoustique vue par la membrane.

j) L :

- **Description** : Représente la **masse d'air** en mouvement devant la membrane.
- **Analogie électrique** : Inductance.
- **Rôle** : Influence le comportement du haut-parleur aux hautes fréquences.

Condensateur en pointillé :

Représente généralement la **compliance acoustique supplémentaire** introduite par la **petite cavité arrière** créée entre le haut-parleur et le tissu résistif. Il modélise la **raideur de l'air** et est en **parallèle avec E** (raideur de l'air dans le volume principal de l'enceinte).

Résistances d'amortissement P_1 et P_2 :

- **P_1** : Résistance en série avec L' , amortit la résonance due à la masse de l'évent.
 - **P_2** : Résistance en série avec E , amortit la résonance due à la raideur de l'enceinte.
- Ces résistances sont cruciales pour obtenir une réponse en fréquence plate et éviter les pics de résonance.

Remarque :

Résonance série supérieure :

- À la fréquence de la résonance supérieure, l'impédance de type masse de la membrane résonne avec l'impédance de type raideur de l'enceinte.
- Cette raideur est principalement due à la compressibilité de l'air enfermé dans l'enceinte.
- **Effet** : Cette résonance peut entraîner un pic dans la réponse en fréquence, ce qui peut causer des distorsions.

Résonance série inférieure

- À basses fréquences, la raideur de l'impédance de la membrane est équilibrée par le caractère de type masse de l'enceinte.
- Cela conduit à une résonance série à une fréquence inférieure.

Ces paramètres ont été déterminés expérimentalement par l'analogie électrique. Il est apparu que le choix des paramètres L' et E n'est pas critique, de sorte qu'une valeur plutôt faible de E peut être choisie. Cela résulte en un volume d'enceinte très faible, ce qui est, bien sûr, une caractéristique très attractive de ce système.

Il reste la question de savoir si le système obtenu peut être réalisé acoustiquement. L'analogie électrique montre que les résistances P_1 et P_2 doivent être insérées en série avec L' et E . En ce qui concerne P_1 le flux d'air acoustique doit passer à travers P_1 avant de développer une pression acoustique à travers l'impédance de l'évent.

En ce qui concerne la résistance P_1 , le flux d'air acoustique doit passer à travers P_1 avant de développer une pression acoustique à travers l'impédance de l'évent. En se référant aux fig. . 8 et 10 on constate qu'une résistance acoustique a été placée dans l'évent.

Le placement de l'élément correspondant à P_2 est un peu moins évident. Le flux d'air r_1 vers l'évent (fig.8) ne doit pas être entravé, tandis que le flux r_2 doit passer à travers une résistance. Cette situation peut être réalisée en étirant un tissu résistif sur l'arrière du haut-parleur, de sorte que le haut-parleur et l'évent soient isolés du volume principal. L'enceinte obtenue est représentée schématiquement dans la **Figure 11**.

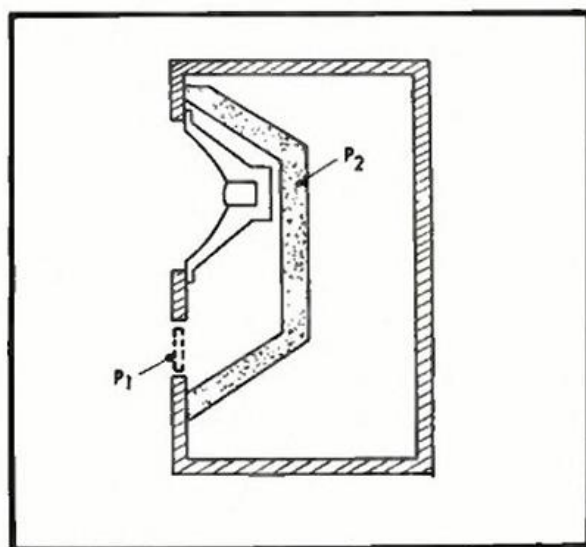


Fig. 11. The aperiodic enclosure.

Il a été vérifié expérimentalement que cette enceinte fonctionne comme prévu et que la petite cavité derrière le haut-parleur (voir le condensateur en pointillé en Fig.10) n'introduit pas de résonance supplémentaire notable.

Construction de l'enceinte

L'apparence extérieure de l'enceinte est très similaire à celle d'un système bass-reflex. Les dimensions sont choisies assez différemment, cependant. **Le volume est inférieur à la moitié de la valeur normale, et la surface de l'évent est beaucoup plus petite que celle de la membrane.** Grâce à un tissu résistif, le volume intérieur a été divisé en deux parties (voir **Figure 11**).

La plus petite cavité contient le haut-parleur et s'ouvre dans l'évent, la plus grande consiste en la partie restante du volume. Cette séparation réduit la résonance supérieure, éliminant ainsi la cause la plus déplorable de boom. L'évent, ayant ici la forme d'une fente étroite, est recouvert d'une fine couche de matériau similaire, afin d'amortir la résonance inférieure. L'amortissement des résonances

peut être ajusté en changeant les épaisseurs des couches. Cet ajustement étant l'une des étapes majeures de la construction, la construction doit être telle que l'intérieur de l'enceinte soit facilement accessible. Lorsque correctement ajusté, le système est capable d'une réponse en fréquence lisse s'étendant à une demi-octave en dessous de la résonance à l'air libre du haut-parleur. Les fréquences les plus basses sont quelque peu atténuées en raison de l'action d'annulation du son résiduel rayonné par la fente.

Ce défaut est facilement surmonté en appliquant un boost des graves dans l'amplificateur. Les données de construction complètes d'un modèle autonome de l'enceinte sont données dans la **Figure 12**. Ce modèle est conçu pour un haut-parleur de graves de 12 pouces.

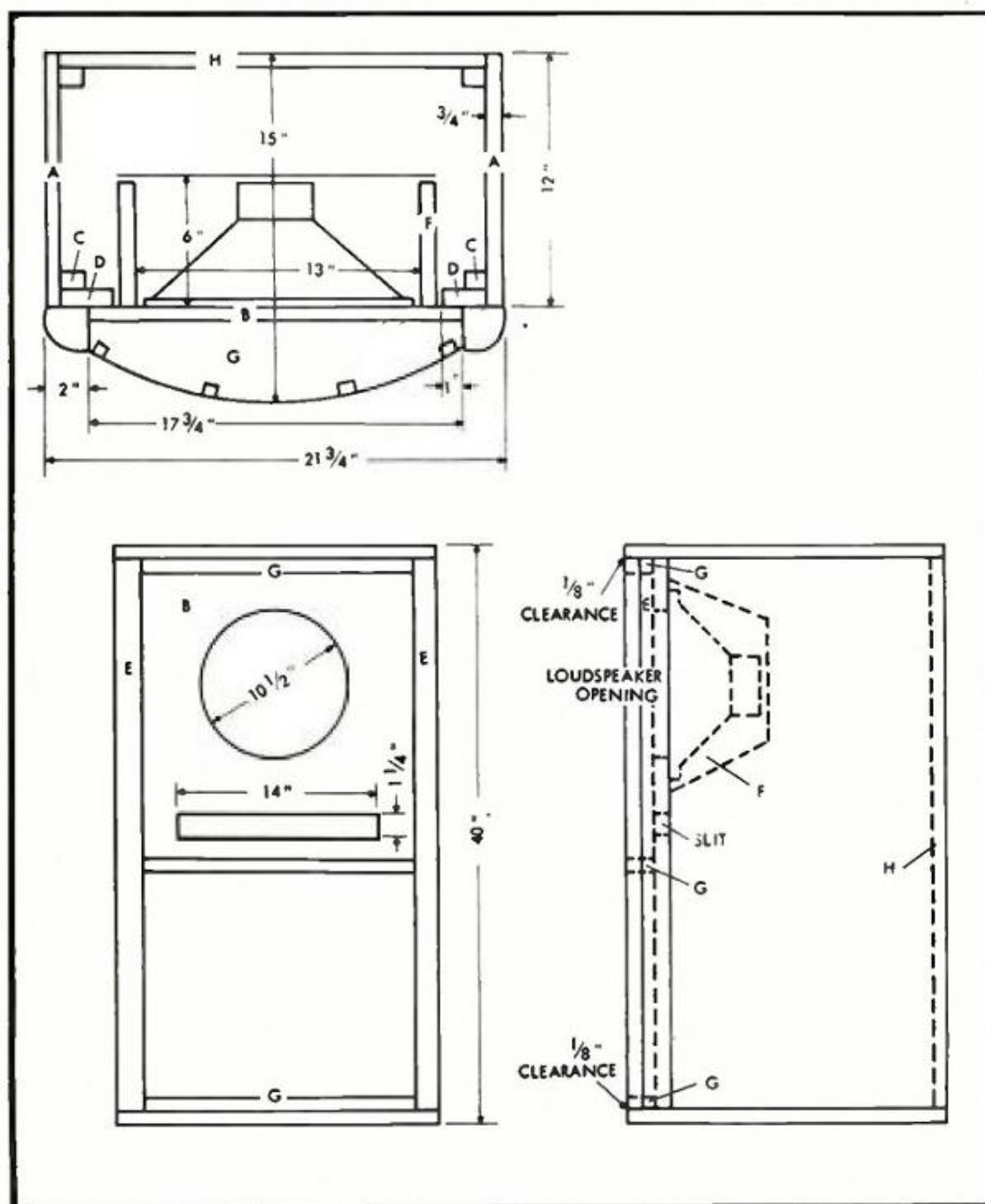


Fig. 12. Constructional data for aperiodic enclosure.

Avec quelques modifications, l'enceinte peut être facilement convertie en un modèle d'angle. La construction est prévue pour l'utilisation d'un haut-parleur de graves de 12 pouces. Avant de commander le bois, assurez-vous que les dimensions critiques indiquées par les flèches épaisses dans la figure sont suffisantes pour accommoder le haut-parleur. Nous supposons que tous les panneaux sont prédécoupés aux dimensions correctes et que les montants verticaux EEE sont usinés à un quart de cylindre dans un atelier de menuiserie. Ces montants verticaux sont utilisés pour permettre au panneau avant d'être déplacé de quelques pouces vers l'arrière.

Comme montré dans la **Figure 13**, l'espace ainsi créé entre les montants accommodera un cadre en bois C qui supporte la grille décorative utilisée pour cacher le haut-parleur. De cette manière, une excellente apparence extérieure peut être obtenue même par un travailleur non qualifié. L'espace limité ne permet pas de décrire la construction en tous détails. Nous nous limiterons à quelques remarques générales. Voir la **Figure 14**."

Avant d'assembler les parties, les panneaux latéraux A sont pourvus de bandes de 1" x 1" le long des bords, et de bandes C et D le long des bords avant. Ces dernières bandes sont utilisées pour supporter les montants verticaux E et le panneau avant B. Des bandes placées sur les panneaux à des intervalles irréguliers et dans des directions aléatoires servent de renforts.

Il va sans dire que toutes les joints sont collés et vissés de telle manière que les têtes de vis ne soient pas visibles de l'extérieur. Après l'ajout des montants verticaux E, l'enceinte est assemblée en montant les panneaux avant et arrière provisoirement, c'est-à-dire au moyen de vis d'une taille trop petite. Le panneau supérieur est ensuite fixé, suivi des panneaux latéraux. Les joints sont collés et vissés, et les vis sont cachées par des bouchons en bois. Le panneau avant est ensuite déplacé vers l'avant jusqu'à ce qu'il repose contre les montants verticaux E. Il est alors fixé en place par des vis traversant les montants verticaux. Le cadre C portant la grille décorative est ensuite inséré dans l'espace entre les montants verticaux. Enfin, le panneau arrière est fixé en place par des vis traversant les montants verticaux. Les joints sont collés et vissés, et les vis sont cachées par des bouchons en bois.

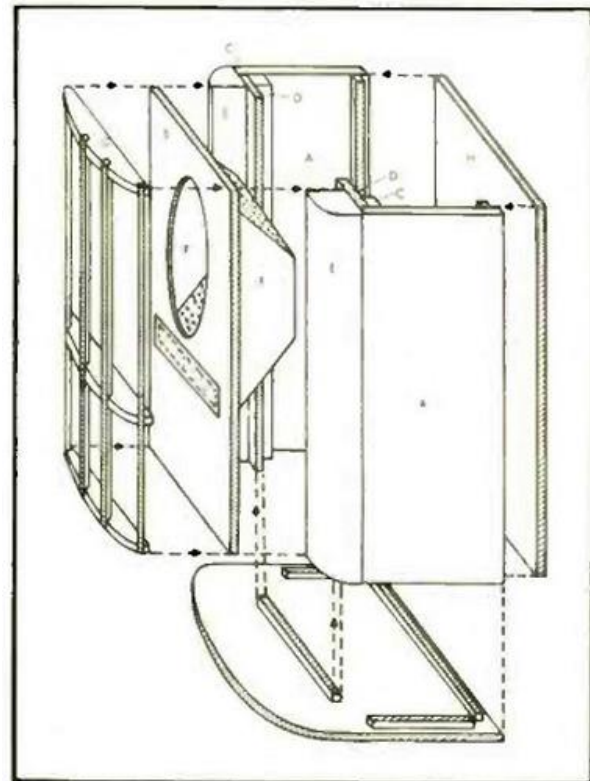
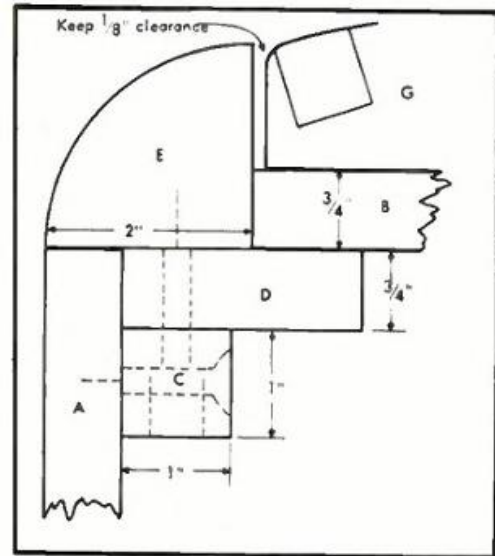


Fig. 14. Exploded view of aperiodic enclosure.

Méthodologie de calcul et de construction d'une enceinte apériodique

Choix des paramètres T& S du haut-parleur pris pour exemple :

Paramètre	Symbole	Valeur	Unité
Diamètre	-	6 pouces	-
Fréquence de résonance	F_s	73.33 Hz	Hz
Facteur de force	Bl	8.0277	T·m
Masse mobile	M_{ms}	8.81 g	g
Compliance	C_{ms}	0.536	mm/N
Facteur de qualité total	Q_{ts}	0.18	-
Surface membrane	S_d 	143 cm ²	cm ²

Ces paramètres sont essentiels pour modéliser le comportement dynamique du haut-parleur dans l'enceinte et dimensionner correctement les éléments acoustiques.

Calcul de la raideur de l'air enfermé et fréquence de résonance dans l'enceinte

La raideur E de l'air enfermé dans l'enceinte est calculée par :

$$E = \frac{\rho_0 c^2 S_d^2}{V_b}$$

Avec :

- $\rho_0 = 1.2 \text{ kg/m}^3$ (densité de l'air)
- $c = 343 \text{ m/s}$ (vitesse du son)
- $S_d = 0.0143 \text{ m}^2$ (surface membrane)
- $V_b = 0.02 \text{ m}^3$ (volume enceinte)

On obtient :

$$E = \frac{1.2 \times 343^2 \times (0.0143)^2}{0.02} \approx 1.25 \times 10^5 \text{ N/m}$$

Cette raideur est une mesure de la résistance que l'air oppose à la compression dans l'enceinte. Elle est cruciale car elle modifie la fréquence de résonance du haut-parleur dans l'enceinte.

La fréquence de résonance dans l'enceinte F_b est donnée par :

$$F_b = F_s \sqrt{1 + \frac{C_{ms}}{C_{ab}}}$$

Avec :

- $C_{ab} = \frac{V_b}{\rho_0 c^2} = \frac{0.02}{1.2 \times 343^2} \approx 1.38 \times 10^{-5} \text{ m/N}$ (compliance de l'air dans l'enceinte)
- $C_{ms} = 0.536 \times 10^{-3} \text{ m/N}$ (compliance mécanique du haut-parleur)

Ainsi :

$$F_b = 73.33 \sqrt{1 + \frac{0.536 \times 10^{-3}}{1.38 \times 10^{-5}}} \approx 115 \text{ Hz}$$

Cette fréquence est nettement plus élevée que la fréquence de résonance à l'air libre $F_s=73.33$ Hz, ce qui illustre l'effet de la raideur de l'air enfermé sur le système.

Calcul des résistances d'amortissement P1 et P2

Pour obtenir une réponse en fréquence plate jusqu'à 45 Hz, il est nécessaire d'amortir les résonances mécaniques et acoustiques. Les résistances P1 et P2 sont calculées pour assurer un amortissement critique.

Résistance P1 (dans l'évent)

$$P_1 = \sqrt{\frac{M_{ms}}{C_{ms} + C_{ab}}}$$

Avec :

- $M_{ms} = 8.81 \times 10^{-3} \text{ kg}$
- $C_{ms} = 0.536 \times 10^{-3} \text{ m/N}$
- $C_{ab} = 1.38 \times 10^{-5} \text{ m/N}$

On trouve :

$$P_1 = \sqrt{\frac{8.81 \times 10^{-3}}{0.536 \times 10^{-3} + 1.38 \times 10^{-5}}} \approx 3.9 \text{ N}\cdot\text{s/m}$$

Résistance P_2 (derrière le haut-parleur)

P_2 est généralement choisie entre 1 et 2 fois P_1 pour amortir la résonance inférieure :

$$P_2 = 1.5 \times P_1 \approx 5.85 \text{ N}\cdot\text{s/m}$$

Ces résistances sont essentielles pour limiter les pics de résonance et obtenir une réponse en fréquence lisse.

Dimensionnement de l'évent

L'évent est dimensionné pour accorder l'enceinte à une fréquence proche de F_s , afin d'étendre la réponse en fréquence dans le grave. La longueur L_v de l'évent est calculée par :

$$L_v = \frac{23560 \times S_v}{F_s^2 \times V_b} - 0.84\sqrt{S_v}$$

Avec :

- $S_v = 10 \text{ cm}^2 = 0.001 \text{ m}^2$ (surface de l'évent)
- $F_s = 73.33 \text{ Hz}$
- $V_b = 20 \text{ L} = 0.02 \text{ m}^3$

On obtient :

$$L_v = \frac{23560 \times 0.001}{73.33^2 \times 0.02} - 0.84\sqrt{0.001} \approx 2.5 \text{ cm}$$

Cette longueur d'évent est cruciale pour accorder correctement l'enceinte et étendre la réponse en fréquence.

Calcul de l'épaisseur du tissu résistif (laine de roche)

La résistance P2

L'épaisseur du tissu résistif derrière le haut-parleur détermine la résistance acoustique P2P qui amortit la résonance arrière de la membrane.

Calcul :

- La résistance acoustique P_2 est donnée par :

$$P_2 = \frac{\sigma \times e}{S}$$

où :

- σ est la résistivité spécifique du matériau (pour la laine de roche, $\sigma \approx 5000 \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}^4$).
- e est l'épaisseur du tissu.
- S est la surface effective du tissu (généralement la surface du haut-parleur $S_d = 0.0143 \text{ m}^2$).
- Nous avons calculé $P_2 \approx 5.85 \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}$.

Application :

$$5.85 = \frac{5000 \times e}{0.0143} \Rightarrow e = \frac{5.85 \times 0.0143}{5000} \approx 0.00166 \text{ m} = 1.66 \text{ mm}$$

Conclusion : L'épaisseur du tissu résistif derrière le haut-parleur doit être d'environ **17 mm** pour obtenir la résistance P2 souhaitée.

La résistance P1

Dans l'évent elle est obtenue par un tissu résistif, ici de la laine de roche avec une résistivité spécifique $\sigma = 5000 \text{ N}\cdot\text{s}/\text{m}^4$.

La résistance est donnée par :

$$P = \frac{\sigma \times e}{S}$$

Avec :

- $S = S_v = 0.001 \text{ m}^2$ (surface de l'évent)
- e = épaisseur du tissu

Pour $P_1 = 3.9 \text{ N}\cdot\text{s/m}$:

$$3.9 = \frac{5000 \times e}{0.001} \implies e = \frac{3.9 \times 0.001}{5000} \approx 0.00078 \text{ m} = 0.78 \text{ mm}$$

Remarque : Dans la pratique, une épaisseur de **15 mm** est souvent utilisée pour obtenir une résistance acoustique suffisante, car un tissu trop fin pourrait ne pas fournir un amortissement uniforme.

Expérience empirique :

Les concepteurs d'enceintes utilisent souvent des épaisseurs de tissu résistif de l'ordre de **10 à 20 mm** pour obtenir un amortissement efficace, même si le calcul théorique suggère une valeur plus faible. Cela est dû à l'expérience accumulée dans la conception d'enceintes acoustiques

Récapitulatif

Question	Réponse
Épaisseur du tissu résistif derrière le HP	Environ 17 mm pour obtenir $P_2 \approx 5.85 \text{ N}\cdot\text{s/m}$.
Épaisseur du tissu résistif dans l'évent	Environ 15 mm pour obtenir $P_1 \approx 3.9 \text{ N}\cdot\text{s/m}$.
Réponse plate jusqu'à 45 Hz	Oui, grâce à l'amortissement apporté par P_1 et P_2 .

Plans de construction de l'enceinte

Dimensions générales

Pour un volume de 20 L, les dimensions internes recommandées sont :

- Largeur : 27.8 cm

- Profondeur : 32.5 cm
- Hauteur : 39.1 cm

Ces dimensions respectent les proportions idéales pour limiter les résonances et assurer une réponse plate.

Division du volume intérieur

- Petite cavité (derrière le haut-parleur) : 2- 4 L
- Grande cavité : 16 -18 L
- Évent : fente de 10 cm² (par exemple 3.3 cm × 3 cm) et 2.5 cm de longueur

Placement des éléments

- Haut-parleur centré sur le panneau avant
- Tissu résistif : 15 mm dans l'évent pour P1, 50 mm derrière le haut-parleur pour P2.

Matériaux et assemblage

- Panneaux en MDF de 18 mm pour la face avant, 15 mm pour les autres faces
- Collage et vissage des joints pour une étanchéité parfaite
- Utilisation de colle à bois et vis cruciformes 3,5 x 40 mm

Réponse en fréquence attendue

Avec ces paramètres, l'enceinte devrait présenter :

- Une réponse plate jusqu'à 45 Hz
- Une atténuation progressive en dessous de 45 Hz
- Peu de résonances indésirables grâce à l'amortissement par les tissus résistifs

Tableau récapitulatif des paramètres clés

Paramètre	Formule	Valeur calculée
Volume total (V_b)	$0.8 \times V_{as}$ à $1.2 \times V_{as}$	20 L
Volume cavité arrière (V_c)	$0.1 \times V_b$ à $0.2 \times V_b$	2 L
Volume principal (V_p)	$V_b - V_c$	18 L
Résistance P_1	$P_1 = \frac{\sigma \times e}{S_v}$	3.9 N·s/m
Épaisseur tissu évent	$e = \frac{P_1 \times S_v}{\sigma}$	15 mm
Résistance P_2	$P_2 = \sqrt{\frac{M_{ms}}{C_{ms}}}$	4 N·s/m
Épaisseur tissu HP	$e = \frac{P_2 \times S_d}{\sigma}$	30 mm
Longueur évent (L_v)	$L_v = \frac{23560 \times S_v}{F_s^2 \times V_c} - 0.84 \sqrt{S_v}$	2.5 cm

Addendum :

Matériaux absorbant pouvant être utilisés dans le cadre de l'amortissement arrière HP et évent d'une enceinte apériodique.

Matériau	Résistivité typique (N·s/m ⁴)	Épaisseur recommandée (évent)	Épaisseur recommandée (cavité arrière)
Laine de roche	2000–5000	10–20 mm	30–50 mm
Mousse acoustique	500–2000	15–25 mm	40–60 mm
Feutre acoustique	100–500	20–30 mm	50–70 mm
Tissu résistif (Dacron)	50–200	25–40 mm	60–80 mm