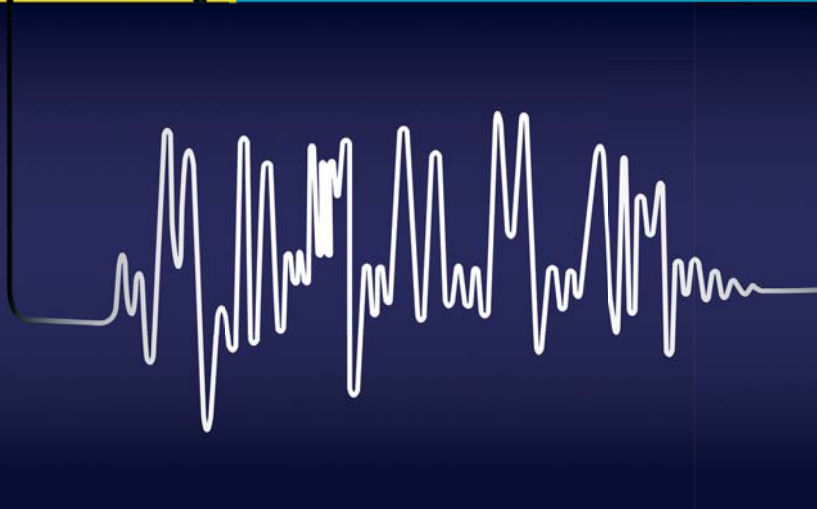


Dominique Fellet

PRÉCIS D'ÉLECTRO-ACOUSTIQUE

Prise de son et reproduction



Précis d'électro-acoustique

Prise de son et reproduction

Dominique Fellot

Précis d'électro-acoustique

Prise de son et reproduction



17, avenue du Hoggar
Parc d'activités de Courtabœuf, BP 112
91944 Les Ulis Cedex A, France

Conception graphique de la couverture : Juliette Baily
Photographies de couverture : tête microphonique
Trinnov © Sébastien Montoya ; enceinte Elipson 4240. © Elipson

Figures 3.1, 3.2, 3.3, 3.4, 3.5, 6.2, 6.3, 6.4, 6.6, 6.7, 6.8, 6.9, 6.10 extraites de l'ouvrage *Théorie et pratique de la prise de son stéréophonique* de Christian Hugonnet et Pierre Walder ; avec l'aimable autorisation des éditions Eyrolles.
© Groupe Eyrolles 1998

Composition : e-press
Imprimé en France

© 2007, **EDP Sciences**, 17, avenue du Hoggar, BP 112, Parc d'activités de Courtabœuf, 91944 Les Ulis Cedex A

Tous droits de traduction, d'adaptation et de reproduction par tous procédés réservés pour tous pays. Toute reproduction ou représentation intégrale ou partielle, par quelque procédé que ce soit, des pages publiées dans le présent ouvrage, faite sans l'autorisation de l'éditeur est illicite et constitue une contrefaçon. Seules sont autorisées, d'une part, les reproductions strictement réservées à l'usage privé du copiste et non destinées à une utilisation collective, et d'autre part, les courtes citations justifiées par le caractère scientifique ou d'information de l'œuvre dans laquelle elles sont incorporées (art. L. 122-4, L. 122-5 et L. 335-2 du Code de la propriété intellectuelle). Des photocopies payantes peuvent être réalisées avec l'accord de l'éditeur. S'adresser au : Centre français d'exploitation du droit de copie, 3, rue Hautefeuille, 75006 Paris. Tél. : 01 43 26 95 35.

ISBN EDP Sciences 978-2-86883-960-2

Table des matières

Remerciements	vii
Préface	ix
Avant-propos	xi
1 Notions d'acoustique	1
1.1 Propagation des ondes sonores	1
1.1.1 Rappels de thermodynamique	1
1.1.2 Propagation d'ondes planes dans un tuyau de section constante S	2
1.1.3 Propagation d'ondes dans l'espace	7
1.1.4 Vitesse du son. Influence de P et de T	12
1.1.5 Considérations énergétiques. Intensité acoustique ou niveau sonore	12
1.1.6 Impédances acoustiques complexes	13
1.1.7 Application aux ondes planes et sphériques	15
1.1.8 Sources théoriques	16
1.1.9 Propagation d'ondes planes dans les pavillons	23
1.2 Analyse par schémas équivalents	29
1.2.1 Analogies mécano-électro-acoustiques	29
1.2.2 Énergies mises en œuvre	31
2 Haut-parleurs	33
2.1 Haut-parleur électrodynamique à cône	33
2.1.1 Fonction de transfert en courant $\frac{x}{I}$	34
2.1.2 Fonction de transfert en tension $\frac{x}{U}$	35
2.1.3 Impédance du haut-parleur	37
2.1.4 Rendement du haut-parleur	38
2.1.5 Formule du rendement selon Thiele et Small	40
2.1.6 Schéma équivalent acoustique	40
2.2 Enceinte close	41
2.3 Enceinte à évent	43

2.3.1	Analyse du schéma équivalent	45
2.3.2	Rendement du bass-reflex à événement	48
2.3.3	Impédance d'entrée du système	48
2.4	Haut-parleurs à pavillon	50
2.4.1	Schéma équivalent acoustique	51
2.4.2	Schéma simplifié	52
2.4.3	Courbe de réponse théorique et rendement	53
2.4.4	Autres limitations	54
2.5	Haut-parleur à coïncidence ou coaxial	54
2.6	Filtres répartiteurs	57
2.6.1	Élaboration des schémas électriques	57
2.6.2	Filtres de Butterworth	59
2.6.3	Ensemble à trois haut-parleurs	64
2.6.4	Exemples numériques	65
2.7	Exemple de caractéristiques	66
3	Caractéristiques du son	69
3.1	Étendue spectrale des sons	69
3.2	Niveau sonore	69
3.3	Effet de masque	69
3.4	Réverbération, champ direct et champ réverbéré	70
3.5	Aspect perceptif	72
3.6	Rapport champ direct/champ réverbéré $\frac{S_d}{S_r}$	72
3.7	Flutter écho	73
3.8	Réverbération	73
3.9	Temps de réverbération optimal	73
3.10	Distance critique	74
4	Microphones	75
4.1	Le microphone dans le champ sonore	75
4.2	Mode d'action	75
4.3	Mouvement du diaphragme	76
4.4	Conversion en vitesse et en élongation	76
4.5	Force développée sur une face de diaphragme	76
4.6	Mode d'action en pression	76
4.6.1	Conversion en vitesse	77
4.6.2	Conversion en élongation	79
4.7	Mode d'action en gradient de pression	79
4.7.1	Comportement en ondes planes progressives	80
4.7.2	Comportement en ondes sphériques	80
4.7.3	Comportement aux fréquences élevées	81
4.7.4	Conditions de réalisation d'un microphone à gradient de pression	81
4.8	Mode d'action mixte	81
4.9	Microphone combiné	83

5 Exemples de microphones	85
5.1 Microphone dynamique omnidirectionnel	85
5.2 Microphone dynamique cardioïde	86
5.3 Microphone dynamique à deux voies	87
5.4 Microphone dynamique à ruban	87
5.5 Microphones électrostatiques	89
5.5.1 Principe	89
5.5.2 Préamplificateurs	90
5.5.3 Alimentation fantôme	91
5.5.4 Bruits dans les microphones électrostatiques	93
5.6 Microphones à électret	97
5.7 Caractéristiques de directivité	97
6 Prise de son stéréophonique	99
6.1 Introduction	99
6.2 Localisation d'une source	100
6.2.1 Localisation par différence d'intensité	100
6.2.2 Localisation par déphasage ou différence de temps	100
6.2.3 Localisation par les deux effets conjugués	101
6.3 Prise de son stéréophonique d'intensité	102
6.3.1 Système stéréosonic	104
6.3.2 Système M-S (Middle-Side)	105
6.4 Prise de son stéréophonique de temps	106
6.4.1 Système AB avec deux capsules omnidirectionnelles	107
6.5 Prise de son stéréophonique de temps et d'intensité	107
6.5.1 Système en couple, utilisant deux microphones faiblement espacés	107
6.5.2 Système AB avec grand espacement (de quelques décimètres à plusieurs mètres)	109
6.5.3 Système avec obstacle entre les deux microphones	110
6.5.4 Tête artificielle (avec les micros dans les oreilles)	110
6.6 Prise de son en multicanal dite 5.1 (5 canaux discrets + 1 d'extrême-grave)	111
7 Quelques enceintes acoustiques célèbres	115
Bibliographie	123
Exercices et corrigés	125

Remerciements

Cet ouvrage est dédié à la mémoire de Pierre Cochereau, organiste de Notre-Dame de Paris de 1955 à 1984, qui joignait à son immense talent d'improvisateur un très grand intérêt pour l'électro-acoustique (il avait un diplôme de metteur en ondes ORTF dont il n'était pas peu fier). Il fit rayonner dans le monde entier son prestigieux instrument qu'il qualifiait souvent de « plus belle orgue du monde ».

Cet ouvrage n'aurait jamais vu le jour sans l'aide précieuse du professeur Voichita Bucur, grande spécialiste de l'acoustique des bois et des instruments de musique, qui a assuré la finalisation du manuscrit, après avoir encouragé l'auteur à le retravailler en vue d'une édition. Qu'elle en soit ici chaleureusement remerciée.

Mes remerciements vont aussi au professeur Mario Rossi (EPFL), spécialiste renommé de l'électro-acoustique, à qui cet ouvrage doit beaucoup, à Bogdan Grabowski, ancien chef du département Électronique à l'ENSTA, ainsi qu'à Jean-Paul Vabre, du CNAM et de l'INT, Charles Hubert, mathématicien de Thales et professeur à l'EUROSAE, enfin à Christian Hugonnet, dont les compétences en prise de son ont franchi les frontières.

Préface

L'électro-acoustique est une science de compromis entre une approche purement théorique et l'exposé de résultats expérimentaux, ce dans la mesure où, à l'analyse des phénomènes physiques, se mêle la psycho-acoustique. Il faut, en effet, tenir compte d'une dimension subjective, voire affective, qui tient au fait que toute reproduction sonore est facteur d'émotion. Cela commence à la prise de son, se poursuit dans la chaîne d'amplification électronique, pour aboutir à une écoute majoritairement affectée par les caractéristiques des haut-parleurs et des enceintes acoustiques associées. Cette évidence n'a pas échappé à l'auteur du présent ouvrage qui rassemble des données techniques essentielles des maillons extrêmes que sont les microphones et les haut-parleurs avec leurs dispositifs d'adaptation à l'environnement acoustique. La pertinence des choix dans les sujets exposés n'a pu que bénéficier d'une longue expérience de la prise de son en environnements diversifiés, ainsi que d'une maîtrise tout aussi grande des installations à haute fidélité.

Il s'agit ici d'un précis qui rassemble des techniques ramenées à l'essentiel, dans un souci de clarté pédagogique, fruit d'un passé d'enseignant en école d'ingénieur et en milieu industriel. Il en résulte toujours une progression savamment dosée dans les explications et, plus particulièrement, des conclusions au plan pratique dont la compréhension se trouve facilitée par des illustrations judicieusement choisies.

Même si l'exposé mathématique peut rebuter le lecteur, le recueil d'exercices du dernier chapitre est là pour faciliter la mise en application des concepts exposés préalablement. Quoique destiné en priorité aux étudiants en spécialité acoustique, cet ouvrage, rassemblant des bases essentielles pour la compréhension des phénomènes mis en jeu dans les dispositifs de reproduction sonore, devrait intéresser tout amateur exigeant soucieux de combattre l'ésotérisme de bien des publications relevant du domaine audiovisuel.

Pierre Loyez

Ingénieur en chef honoraire des télécommunications,
ancien membre du comité de rédaction de la *Revue du son*
et de la revue *l'Audiophile*

Avant-propos

Ce précis, dérivé d'un cours donné en 2002 à l'Institut Supérieur d'Électronique de Paris (ISEP), est destiné à l'Enseignement supérieur (facultés et écoles d'ingénieurs). Il tente de pallier la rareté des ouvrages consacrés à l'acoustique et à son application la plus courante, l'électro-acoustique, qui a pratiquement disparu des programmes d'études, alors qu'elle est omniprésente dans les médias.

Cet ouvrage, volontairement court, expose en termes clairs et concis l'essentiel de ce qu'il faut savoir pour démarrer dans ces techniques avec des bases solides. Les connaissances nécessaires préalables en mathématiques et en physique sont celles qui sont enseignées dans les écoles d'ingénieurs et les facultés des sciences. Sont traités successivement :

- les bases essentielles de l'acoustique (propagation, niveaux d'énergie) ;
- les haut-parleurs (rayonnements, fonctions de transfert, enceintes acoustiques, pavillons) ;
- les caractéristiques du son ;
- les principes des microphones (moyens d'obtention d'une tension électrique) ;
- les différents types de microphones (dynamiques, statiques) et leurs directivités.

Suit en dernier lieu un chapitre traitant rapidement des techniques de prise de son actuelles. Enfin, pour égayer un peu cet ouvrage souvent aride, quelques enceintes acoustiques ayant fait date sont décrites, lorsque leurs principes **n'ont pas vieilli**. Quelques exercices, pour les courageux, sont donnés avec leurs corrigés.

L'auteur

Chapitre 1

Notions d'acoustique

N.B. : Le système d'unités utilisé dans cet ouvrage est évidemment le système international MKS.

1.1 Propagation des ondes sonores

1.1.1 Rappels de thermodynamique

Lorsqu'un milieu (gaz, liquide ou solide) est soumis à un endroit donné à des variations de pression, celles-ci se propagent dans le milieu avec une vitesse c , dépendant principalement de deux facteurs : la densité du milieu et son élasticité. En acoustique aérienne, objet de ce livre, les variations détectables à l'oreille sont extrêmement faibles. En effet, le seuil de sensibilité de l'oreille humaine (maximale vers 1 à 3 kHz) est d'environ $20 \mu\text{Pa}$ (ou 0,2 nanobar) et se situe (heureusement pour nous) légèrement au-dessus du bruit thermique de l'air (aux températures habituelles). Et le seuil de douleur, à environ 120 dB au-dessus, c'est-à-dire 20 Pa (0,2 mBar), reste largement inférieur à la pression atmosphérique (10^5 Pa). La pression sonore p peut donc être considérée comme un infiniment petit de la pression atmosphérique P , ce qui légitime l'écriture : $p = dP$.

1.1.1.1 Lois thermodynamiques applicables à l'air

L'air est considéré comme un gaz parfait répondant à l'expression :

$$PV = nRT \quad (1.1)$$

où P et V sont la pression (pascals) et le volume (m^3) d'une quantité d'air déterminée par son nombre n de moles ; \mathbf{R} est la constante des gaz parfaits ($\mathbf{R} = 8,314$ joules/mole/degré K) et \mathbf{T} la température absolue. Lorsque \mathbf{T} est constante, cette loi s'intitule loi de **Mariotte** (1620-1684) ou de **Boyle** (1627-1691) chez les Anglo-Saxons.

Autrement, on l'appelle loi de **Gay-Lussac** si T est variable. Enfin, lorsqu'il n'y a pas d'échange de chaleur avec le milieu extérieur, les transformations de P et V des n moles sont dites **adiabatiques** et répondent alors à la loi de **Laplace** (1749-1827) :

$$PV^\gamma = \text{Constante} \quad (1.2)$$

où $\gamma = C/c =$ chaleur spécifique à pression constante/chaleur spécifique à volume constant. **Dans l'air** $\gamma = 1,4$. La combinaison des deux expressions (1.1 et 1.2), dans le cas d'une transformation adiabatique, permet d'écrire, les indices i et f signifiant initial et final :

$$\frac{P_f}{P_i} = \left(\frac{V_i}{V_f}\right)^\gamma \quad \frac{T_f}{T_i} = \left(\frac{P_f}{P_i}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = \left(\frac{V_i}{V_f}\right)^{\gamma-1}$$

1.1.1.2 Conséquences de ces lois

Les premiers calculs de la vitesse du son, où l'on pensait que T était constante dans les variations de pression dues à la propagation d'un ébranlement, donnèrent une valeur de $c = 270$ m/s, assez éloignée, au grand dam des théoriciens, de la réalité (autour de 340 m/s).

Ceci amena Laplace à considérer que les variations de P et de V , dans la propagation du son, ne répondaient pas à la loi de Mariotte, **mais étaient adiabatiques**, c'est-à-dire sans échanges de chaleur au sein du fluide, **car ils n'ont pas le temps de s'établir**.

La vitesse du son alors obtenue par le calcul (§ 1.1.4), parfaitement vérifiée expérimentalement, montre la perspicacité de Laplace. Actuellement, on déduit la valeur précise de γ de celle de c .

1.1.2 Propagation d'ondes planes dans un tuyau de section constante S

1.1.2.1 Comportement d'une tranche d'air d'épaisseur dx

Considérons une tranche d'air d'épaisseur dx , de surface S , de masse m , de volume $V = Sdx$ (Fig. 1.1), les vitesses de déplacement étant v (en x), et $v + dv$ (en $x + dx$). Elle est soumise aux pressions sonores $p(x)$ et $p(x + dx)$, qui ne sont pas égales.

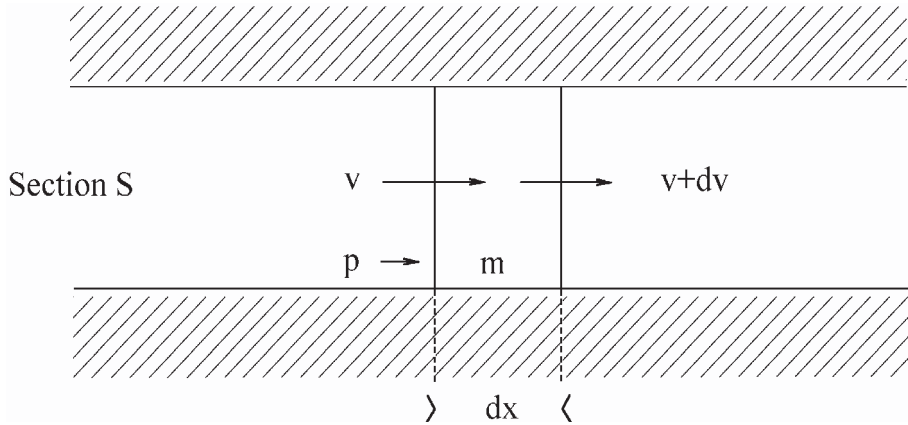
À l'arrivée d'une onde sonore (surpression p), la force qui s'exerce sur cette masse est :

$$F = [p(x) - p(x + dx)]S \quad (1.3)$$

d'où :

$$F = -\frac{\partial p}{\partial x} dx S = -\frac{\partial p}{\partial x} V$$

La vitesse v n'étant pas la même en x et $x + dx$, le volume V occupé par la masse m , au temps $t + dt$, n'est plus le même qu'en t , et a varié de dV ,

FIG. 1.1 – Tranche d'air d'épaisseur dx soumise à une pression sonore.

les faces se sont déplacées de :

$$\begin{aligned}
 & v_x dt \quad \text{et} \quad \left(v_x + \frac{\partial v}{\partial x} dx \right) dt \\
 dV &= S \left(v_x + \frac{\partial v}{\partial x} dx - v_x \right) dt = S \frac{\partial v}{\partial x} dx dt \\
 dV &= V \frac{\partial v}{\partial x} dt \tag{1.4}
 \end{aligned}$$

Puisque $Sdx = V$. Or la **masse** $m = \rho V$ **est constante**, il se produit donc une variation $\delta\rho$ de la densité ρ si V varie de dV :

$$\delta\rho V + \rho dV = 0$$

Finalement :

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial \delta\rho}{\partial t} + \frac{\partial v}{\partial x} = 0 \tag{1.5}$$

D'autre part, en appliquant la loi de Newton, avec :

$$\Gamma = \frac{dv}{dt} \quad (\text{accélération})$$

$$\mathbf{F} = m\Gamma,$$

et avec (1.3)

$$\rho V \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} V = 0 \quad \rightarrow \quad \rho \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{\partial p}{\partial x} = 0 \tag{1.6}$$

Le système d'équations (1.5) et (1.6) contient 3 inconnues v , p et $\delta\rho$. En tenant compte du fait que les variations de volume (donc de densité) et de pression suivent la loi de Laplace (transformation **adiabatique**)

$PV^\gamma = \text{Constante}$:

$$P\gamma.V^{\gamma-1}dV + V^\gamma.dP = 0 \quad \text{ici} \quad dP = p \quad (\S 1.1.1)$$

Ou encore

$$\frac{p}{P} + \gamma\frac{dV}{V} = 0$$

où $P =$ pression atmosphérique, et puisque $m = \rho V$, on a finalement :

$$\frac{p}{P} + \gamma\frac{\delta\rho}{\rho} = 0 \quad (1.7)$$

En portant la valeur $\delta\rho = \frac{\rho}{\gamma}\frac{p}{P}$ dans (1.5), on obtient :

$$\frac{\partial p}{\partial t} - \gamma P\frac{\partial v}{\partial x} = 0 \quad (1.8)$$

On a maintenant un système de 2 équations à 2 inconnues, p et v .

Dérivons (1.6) en $\frac{\partial v}{\partial t}$ et (1.8) en $\frac{\partial v}{\partial x}$, pour éliminer p :

$$\rho\frac{\partial^2 v}{\partial t^2} + \frac{\partial p}{\partial x}\frac{\partial v}{\partial t} = 0 \quad (1.9)$$

$$\frac{\partial p}{\partial t}\frac{\partial v}{\partial x} - \gamma P\frac{\partial v}{\partial x^2} = 0 \quad (1.10)$$

En soustrayant (1.10) de (1.9), nous avons :

$$\frac{\partial^2 v}{\partial t^2} + \frac{\gamma P}{\rho}\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} = 0 \quad (1.11)$$

De même, en dérivant (1.6) en $\frac{\partial p}{\partial x}$ et (1.8) en $\frac{\partial p}{\partial t}$, nous avons :

$$\rho\frac{\partial v}{\partial t}\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial^2 p}{\partial x^2} = 0 \quad (1.12)$$

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - \gamma p\frac{\partial v}{\partial x}\frac{\partial p}{\partial t} = 0 \quad (1.13)$$

On obtient :

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} + \frac{\gamma P}{p}\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} \quad (1.14)$$

Le terme $\gamma P/\rho$ a les dimensions du carré d'une vitesse c

$$c^2 = \gamma P/\rho \quad (1.15)$$

où $c =$ vitesse du son (m/s).

À ces équations peuvent répondre des solutions générales de la forme, par exemple pour v :

$$v = F(t - x/c) + f(t + x/c) \quad (1.16)$$