

Jean-Louis Migeot - Jean-Pierre Coyette  
Grégoire Lielens

# Phénomènes fondamentaux de l'acoustique linéaire



**L***avoisier*  
*hermes*



# Table des matières

<b>1</b>	<b>Introduction</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Définition et cadre de l'acoustique</b>	<b>3</b>
2.1	Définitions . . . . .	3
2.2	Branches de l'acoustique . . . . .	5
2.3	Étendue spectrale des sons . . . . .	11
2.4	Actualité de l'acoustique . . . . .	12
<b>I Équations et concepts fondamentaux de l'acoustique linéaire</b>		<b>17</b>
<b>3</b>	<b>Équations de la mécanique des milieux continus</b>	<b>19</b>
3.1	Équation de continuité . . . . .	20
3.2	Rappels sur la notation indicelle . . . . .	22
3.3	Équation de la quantité de mouvement . . . . .	25
3.4	Équation d'état . . . . .	30
3.5	Équation de conservation de l'énergie . . . . .	30
<b>4</b>	<b>Équation d'onde</b>	<b>31</b>
4.1	Équation d'onde . . . . .	32
4.2	Linéarité et non-linéarité en acoustique . . . . .	37
4.3	Solution générale à une dimension . . . . .	38
4.4	Mécanique de la propagation . . . . .	40
4.5	Propagations dispersive et non dispersive . . . . .	43
4.5.1	Équation d'onde générale . . . . .	43

4.5.2	Propagation non dispersive . . . . .	45
4.5.3	Propagation dispersive . . . . .	45
4.5.4	Paquet d'onde et vitesse de groupe . . . . .	46
4.6	Vitesse du son . . . . .	47
4.6.1	Gaz parfaits . . . . .	47
4.6.2	Liquides . . . . .	49
4.6.3	Solides . . . . .	49
4.7	Synthèse du chapitre . . . . .	51
<b>5</b>	<b>Analyse de Fourier</b>	<b>53</b>
5.1	Combinaison de signaux simples . . . . .	55
5.1.1	Signaux de même fréquence . . . . .	55
5.1.2	Signaux de fréquences différentes . . . . .	60
5.2	Séries de Fourier . . . . .	65
5.2.1	Calcul des coefficients . . . . .	66
5.2.2	Onde carrée et phénomène de Gibbs . . . . .	67
5.2.3	Spectres . . . . .	68
5.2.4	Note sur les amplitudes complexes . . . . .	74
5.3	Transformée de Fourier . . . . .	74
5.3.1	Caractère hermitien du spectre . . . . .	75
5.3.2	Spectre à droite . . . . .	75
5.3.3	Glissement temporel . . . . .	77
5.3.4	Distortion de l'échelle temporelle . . . . .	78
5.3.5	Dérivées . . . . .	79
5.4	Produit de convolution . . . . .	81
5.4.1	Fenêtrage d'un signal . . . . .	82
5.4.2	Largeurs du signal et du spectre . . . . .	82
5.4.3	Filtrage d'un signal . . . . .	84
5.5	Synthèse du chapitre . . . . .	84
<b>6</b>	<b>Équations de l'acoustique en régime harmonique</b>	<b>85</b>
6.1	Équation de Helmholtz . . . . .	86
6.2	Relation pression-vitesse . . . . .	86
6.3	Impédance acoustique . . . . .	87
6.4	Intensité sonore . . . . .	88
6.4.1	Signal monochromatique . . . . .	88
6.4.2	Signal périodique général . . . . .	89
6.4.3	Signal quelconque . . . . .	91
6.5	Ondes planes . . . . .	93
6.5.1	Solution générale à une dimension . . . . .	93
6.5.2	Impédance caractéristique . . . . .	94

6.5.3	Intensité . . . . .	94
6.5.4	Atténuation . . . . .	94
6.5.5	Onde plane d'incidence quelconque . . . . .	95
6.6	Ondes sphériques . . . . .	97
6.6.1	Monopôles . . . . .	97
6.6.2	Débit volumique d'une source . . . . .	99
<b>7</b>	<b>Niveaux sonores</b>	<b>101</b>
7.1	Échelle des décibels . . . . .	102
7.1.1	Définition . . . . .	102
7.1.2	Lois de Weber et de Fechner . . . . .	106
7.2	Addition de niveaux . . . . .	108
7.2.1	Principe général . . . . .	108
7.2.2	Phénomène de masquage . . . . .	108
7.3	Octaves et tiers d'octave . . . . .	111
7.3.1	Niveau par bande . . . . .	111
7.3.2	Bruits blanc, rose et brun . . . . .	114
7.4	Niveaux corrigés et agrégés . . . . .	116
7.4.1	Courbes de Fletcher et Munson . . . . .	116
7.4.2	Filtres . . . . .	118
7.4.3	Niveaux équivalents et niveaux statistiques . . . . .	121
7.4.4	$L_{den}$ . . . . .	121
7.4.5	EPNdB . . . . .	122
7.4.6	<i>Noise Rating (NR)</i> . . . . .	123
<b>II</b>	<b>Mécanismes fondamentaux de l'acoustique</b>	<b>125</b>
<b>8</b>	<b>Réflexion et absorption</b>	<b>127</b>
8.1	Réflexion sous incidence normale . . . . .	128
8.1.1	Surface à vitesse nulle . . . . .	128
8.1.2	Surface à pression nulle . . . . .	132
8.1.3	Surface absorbante . . . . .	132
8.2	Réflexion sous incidence oblique . . . . .	136
8.2.1	Surface rigide - Loi de Descartes . . . . .	136
8.2.2	Surface absorbante . . . . .	137
8.3	Réflexion d'une source monopolaire . . . . .	139
8.3.1	Source image . . . . .	139
8.3.2	Rélectogramme . . . . .	142
8.3.3	Méthode des tirs de rayons . . . . .	147
8.4	Notes sur la notion d'impédance . . . . .	154

8.4.1	Signe de l'impédance . . . . .	154
8.4.2	Dépendance fréquentielle de l'impédance . . . . .	155
8.4.3	Paroi vibrante et absorbante . . . . .	156
8.4.4	Réaction locale et non locale . . . . .	157
8.4.5	Mesure d'impédance au tube de Kundt . . . . .	159
8.5	Temps de réverbération . . . . .	162
8.5.1	Établissement du son . . . . .	162
8.5.2	Extinction du son . . . . .	165
8.5.3	Loi de Sabine . . . . .	166
8.5.4	Chambres anéchoïques et réverbérantes . . . . .	168
8.5.5	Formule d'Eyring et de Millington . . . . .	170
8.5.6	Mesure du coefficient d'absorption . . . . .	172
<b>9</b>	<b>Résonances</b>	<b>173</b>
9.1	Résonances d'un tube fermé . . . . .	174
9.1.1	Source de vitesse . . . . .	174
9.1.2	Source de pression . . . . .	175
9.1.3	Comparaison des deux cas . . . . .	175
9.2	Analyse modale . . . . .	177
9.2.1	Modes et fréquences propres . . . . .	177
9.2.2	Superposition modale . . . . .	180
9.3	Cavité parallélépipédique . . . . .	183
9.4	Résonances d'une cavité quelconque . . . . .	184
<b>10</b>	<b>Propagation guidée</b>	<b>187</b>
10.1	Fréquence de coupure . . . . .	188
10.2	Matrices de transfert . . . . .	190
10.2.1	Conduit de section constante . . . . .	190
10.2.2	Assemblage de trois tubes . . . . .	191
10.2.3	Connexion en T . . . . .	193
10.2.4	Résonateur quart d'onde . . . . .	195
10.2.5	Résonateur de Helmholtz . . . . .	196
10.2.6	Autres formes des matrices de transfert . . . . .	198
10.2.7	Mesure d'une matrice de transfert . . . . .	199
10.3	<i>Transmission Loss</i> (TL) . . . . .	201
10.3.1	TL d'une chambre d'expansion . . . . .	202
10.3.2	TL d'un tube muni d'un résonateur . . . . .	204
10.4	<i>Insertion Loss</i> (IL) . . . . .	205
10.4.1	Impédance de source . . . . .	205
10.4.2	Adaptation d'impédance . . . . .	205
10.4.3	Source généralisée débitant dans un silencieux . . . . .	206

10.4.4 <i>Insertion Loss</i> (IL) . . . . .	206
10.4.5 Comparaison de l' <i>IL</i> et du <i>TL</i> . . . . .	207
10.5 Fréquences de coupure de conduits circulaires . . . . .	208
10.5.1 Équation de Bessel . . . . .	208
10.5.2 Fonctions de Bessel . . . . .	208
10.5.3 Fréquence de coupure . . . . .	209
10.6 Rôle des modes évanescents . . . . .	212
10.7 Silencieux réactifs et dissipatifs . . . . .	219
<b>11 Rayonnement</b>	<b>221</b>
11.1 Dipôles et quadrupôles . . . . .	222
11.1.1 Dipôles . . . . .	222
11.1.2 Quadrupôle aligné . . . . .	224
11.1.3 Quadrupôle croisé . . . . .	227
11.2 Analyse multipolaire . . . . .	229
11.3 Équation intégrale de Helmholtz . . . . .	238
11.3.1 Domaine borné . . . . .	238
11.3.2 Domaine non borné . . . . .	242
11.3.3 Forme indirecte de l'équation intégrale . . . . .	243
11.3.4 Rayonnement d'une plaque plane . . . . .	245
11.4 Puissance rayonnée . . . . .	249
11.5 Impédance de rayonnement . . . . .	249
<b>12 Diffraction</b>	<b>253</b>
<b>13 Réfraction</b>	<b>255</b>
<b>14 Propagation avec dissipation</b>	<b>261</b>
14.1 Propagation en milieu dissipatif . . . . .	262
14.2 Fluide équivalent à un poreux . . . . .	264
14.2.1 Modèle de Delany et Bazley . . . . .	264
14.2.2 Modèle de Miki . . . . .	264
14.3 Théorie de Biot . . . . .	265
14.3.1 Porosité ( $\Omega$ ) . . . . .	267
14.3.2 Résistivité ( $R$ ) . . . . .	268
14.3.3 Tortuosité ( $\alpha_\infty$ ) . . . . .	271
14.3.4 Équations d'équilibre . . . . .	274
14.3.5 Relations constitutives . . . . .	275
14.3.6 Modèle $u-p$ pour les poro-élastiques . . . . .	277
14.3.7 Ondes en milieu poro-élastique . . . . .	278
14.3.8 Micro-modèles . . . . .	284

14.4	Mise en œuvre des matériaux poro-élastiques . . . . .	285
14.4.1	Effet limité des pores ouverts . . . . .	285
14.4.2	Sandwichs poro-élastiques . . . . .	286
<b>15</b>	<b>Propagation convectée</b>	<b>289</b>
15.1	Propagation du son en écoulement constant . . . . .	290
15.1.1	Équation d'onde convectée . . . . .	290
15.1.2	Résonance acoustique d'un pneu . . . . .	292
15.1.3	Transformation de Prandtl-Glauert . . . . .	293
15.1.4	Source monopolaire en écoulement constant . . . . .	295
15.1.5	Effet Doppler . . . . .	297
15.2	Propagation du son en écoulement potentiel . . . . .	300
15.2.1	Introduction du potentiel de vitesse . . . . .	300
15.2.2	Équation de continuité . . . . .	300
15.2.3	Équation d'Euler . . . . .	301
15.2.4	Équation potentielle non linéaire . . . . .	303
15.2.5	Décomposition acoustique . . . . .	303
15.3	Propagation du son en écoulement quelconque . . . . .	304
15.3.1	Équation de continuité . . . . .	304
15.3.2	Équation de la quantité de mouvement . . . . .	305
15.3.3	Entropie et gaz parfait . . . . .	305
15.3.4	Équation de l'énergie . . . . .	307
15.3.5	Équations d'Euler linéarisées . . . . .	308
15.4	Application à un moteur d'avion . . . . .	309
<b>16</b>	<b>Propagation atmosphérique</b>	<b>313</b>
16.1	Introduction . . . . .	314
16.2	Mécanismes mis en jeu . . . . .	315
16.2.1	Atténuation géométrique . . . . .	315
16.2.2	Absorption atmosphérique . . . . .	316
16.2.3	Réfraction atmosphérique . . . . .	317
16.2.4	Turbulence . . . . .	317
16.3	Formulation axisymétrique de l'équation de Helmholtz .	319
16.4	Dérivation de l'équation parabolique . . . . .	320
16.4.1	Approximation du champ lointain . . . . .	320
16.4.2	Ondes sortantes . . . . .	320
16.4.3	Approximation <i>angle étroit</i> . . . . .	321
16.5	Différences finies . . . . .	322
16.5.1	Forme discrète . . . . .	322
16.5.2	Conditions frontières discrètes . . . . .	324
16.5.3	Système d'équations algébriques . . . . .	326

16.6	Évaluation de $\Psi$ en $r = 0$ . . . . .	327
16.7	Performances numériques . . . . .	330
16.7.1	Formulation du problème . . . . .	330
16.7.2	Examen des résultats numériques . . . . .	331
16.8	Conclusion . . . . .	333
<b>17</b>	<b>Interaction fluide-structure</b>	<b>339</b>
17.1	Masse-ressort et colonne de fluide . . . . .	339
17.1.1	Cas général . . . . .	339
17.1.2	Colonne de longueur infinie . . . . .	341
17.1.3	Colonne de longueur finie . . . . .	342
17.2	Interaction fluide-structure . . . . .	348
17.2.1	Origine du couplage . . . . .	348
17.2.2	Couplage faible et couplage fort . . . . .	350
17.2.3	Approches modales . . . . .	351
17.2.4	Impédance de rayonnement . . . . .	351
17.2.5	Analyse d'un système à couplages multiples . . . . .	352
17.3	Cadre général d'analyse vibro-acoustiques . . . . .	355
<b>18</b>	<b>Transmission et isolation</b>	<b>357</b>
18.1	Paroi rigide sur supports élastiques . . . . .	359
18.2	Paroi flexible infinie . . . . .	363
18.2.1	Calcul de l'atténuation . . . . .	363
18.2.2	Phénomène de coïncidence . . . . .	365
18.2.3	Atténuation sous champ diffus . . . . .	369
18.3	Parois doubles . . . . .	370
18.3.1	Résonance masse-air-masse . . . . .	370
18.3.2	TL d'une paroi double . . . . .	371
18.4	TL de plaques finies . . . . .	374
18.5	Mesure du TL en chambres associées . . . . .	376
18.5.1	Principe de la mesure . . . . .	376
18.5.2	TL en tiers d'octave de panneaux réels . . . . .	379
<b>III</b>	<b>Annexes</b>	<b>381</b>
<b>19</b>	<b>Rappel de quelques formules trigonométriques</b>	<b>383</b>
<b>20</b>	<b>Rappel sur les nombres complexes</b>	<b>385</b>
20.1	Définition . . . . .	386
20.2	Opérations . . . . .	386

20.3	Complexe conjugué . . . . .	387
20.4	Représentation graphique . . . . .	388
20.5	Produits scalaire et vectoriel . . . . .	388
<b>Table des figures</b>		<b>389</b>
<b>Index</b>		<b>397</b>
<b>Liste des principaux symboles</b>		<b>403</b>



Utilisées dans de multiples domaines très différents les uns des autres, l'étude et la connaissance des sons, des ondes et des vibrations sonores font appel à de nombreuses notions telles que, entre autres, la mécanique des fluides, la mécanique vibratoire, la thermodynamique et l'analyse de Fourier. Cet ouvrage fondamental propose, en deux parties, une introduction complète à l'acoustique.

La première partie présente les équations et les concepts fondamentaux de l'acoustique linéaire. Les équations de l'acoustique (équation d'onde) sont d'abord développées à partir des équations générales de la mécanique des milieux continus. L'analyse de Fourier est ensuite introduite ; elle permet de traduire l'équation d'onde dans le domaine des fréquences (équation de Helmholtz) et d'introduire les concepts d'intensité, de puissance, d'impédance et de niveau sonore. La deuxième partie s'attache à décrire systématiquement les phénomènes fondamentaux de l'acoustique linéaire : réflexion et absorption, résonances, propagation guidée, rayonnement, diffraction, réfraction, propagation en milieu dissipatif, propagation convectée, propagation atmosphérique, interaction fluide-structure, transmission et isolation.

Pour chaque phénomène sont présentés d'abord les concepts physiques de base, puis des modèles élémentaires permettant de les quantifier. Les chapitres sont abondamment illustrés et un index facilite l'accès au contenu très riche de l'ouvrage.

Ce livre s'adresse aux ingénieurs et étudiants en sciences appliquées désireux d'acquérir une compréhension complète des phénomènes fondamentaux de l'acoustique linéaire et des modèles élémentaires représentant ces phénomènes.

**Jean-Louis Migeot** est cofondateur de Free Field Technologies SA, Professeur à l'Université Libre de Bruxelles et membre de l'Académie Royale de Belgique.

**Jean-Pierre Coyette** est cofondateur de Free Field Technologies SA, Professeur à l'Université catholique de Louvain et vice-président de l'Autorité de contrôle des nuisances sonores aéroportuaires en Wallonie (ACNAW).

**Grégory Lielens** est directeur scientifique de Free Field Technologies SA et Docteur en sciences appliquées de l'Université catholique de Louvain, Belgique.



978-2-7462-4697-3