

# Table des matières

<b>1 Ondes acoustiques planes</b>	<b>7</b>
1.1 Équations fondamentales de l'acoustique linéaire . . . . .	7
1.1.1 Grandeurs . . . . .	7
1.1.2 Équations . . . . .	8
1.2 Équation des ondes . . . . .	10
1.2.1 Vitesse de propagation des ondes . . . . .	11
1.2.2 Impédance, intensité acoustique et énergie acoustique . . . . .	13
1.3 Ondes planes . . . . .	15
1.3.1 Impédance acoustique spécifique d'une onde plane élémentaire	16
1.3.2 Densité d'énergie et intensité acoustique pour une onde plane élémentaire . . . . .	16
1.3.3 Onde plane harmonique, paquet d'ondes . . . . .	17
1.3.4 Onde réelle? Onde complexe? . . . . .	18
1.4 Mesures acoustiques . . . . .	18
1.4.1 Pression efficace . . . . .	18
1.4.2 Intensité acoustique . . . . .	19
1.5 Propagation à travers un dioptre acoustique . . . . .	19
1.5.1 Incidence normale . . . . .	20
1.5.2 Incidence oblique . . . . .	23
1.6 Exercices . . . . .	25
1.6.1 Propagation à travers un mur rigide . . . . .	25
1.6.2 Propagation à travers un bidioptre . . . . .	25
1.6.3 Propagation à travers un double-vitrage . . . . .	26
1.7 Corrigés des exercices . . . . .	28
1.7.1 Propagation à travers un mur rigide . . . . .	28
1.7.2 Propagation à travers un bidioptre . . . . .	28
1.7.3 Propagation à travers un double-vitrage . . . . .	29
<b>2 Acoustique musicale</b>	<b>31</b>
2.1 Résumé . . . . .	31
2.2 Le son musical . . . . .	32
2.3 Étude de la corde vibrante . . . . .	33
2.3.1 Modèle de corde idéale . . . . .	33

2.3.2	Solution générale . . . . .	33
2.3.3	Exemple de conditions initiales simplifiées : cas de la corde pincée	34
2.3.4	Calcul complet de la solution « corde pincée » . . . . .	35
2.3.5	Calcul de la force au chevalet . . . . .	35
2.3.6	Corde réelle : facteurs complicatifs . . . . .	38
2.3.7	Vibrations et rayonnement d'un instrument à cordes . . . . .	38
2.4	Vibrations de flexion des barres . . . . .	39
2.4.1	Barre de section constante . . . . .	39
2.4.2	Calcul des fréquences propres de la barre . . . . .	40
2.4.3	Analyse spectrale des sons émis par la barre . . . . .	41
2.5	Conclusion . . . . .	43
<b>3</b>	<b>Ondes acoustiques guidées</b>	<b>45</b>
3.1	Résumé . . . . .	45
3.2	Onde acoustique dans un conduit rectangulaire . . . . .	46
3.2.1	Relation de dispersion et fréquence de coupure . . . . .	48
3.2.2	Cas particulier du mode $(m,n = 0,0)$ . . . . .	49
3.3	Impédance ramenée . . . . .	50
3.4	Discontinuités et dérivations . . . . .	52
3.5	Circuits acoustiques à constantes localisées . . . . .	53
3.5.1	Principe . . . . .	53
3.5.2	Application au résonateur de Helmholtz . . . . .	55
3.6	Notions élémentaires sur les filtres acoustiques . . . . .	58
3.6.1	Représentation canonique d'une matrice de transfert . . . . .	58
3.6.2	Filtre idéal. Bande passante et bande affaiblie . . . . .	59
3.7	Exercices . . . . .	60
3.7.1	Problème 1 : La flûte à six schtroumpfs ! . . . . .	60
3.7.2	Problème 2 : Quadripôles, filtres et silencieux d'automobile . . . . .	62
3.7.3	Problème 3 : contrôle actif des sons . . . . .	68
3.7.4	Problème 4 : Étude d'un tuyau conique . . . . .	72
3.7.5	Problème 5 : Insertion d'un résonateur de Helmholtz dans un guide d'ondes . . . . .	74
3.8	Corrigés des exercices . . . . .	76
3.8.1	La flûte à six schtroumpfs . . . . .	76
3.8.2	Quadripôles, filtres et silencieux d'automobile . . . . .	80
3.8.3	Contrôle actif des sons . . . . .	90
3.8.4	Étude d'un tuyau conique . . . . .	96
3.8.5	Insertion d'un résonateur de Helmholtz dans un guide d'ondes . . . . .	97
<b>4</b>	<b>Sources acoustiques élémentaires</b>	<b>101</b>
4.1	Résumé . . . . .	101
4.2	Sources acoustiques . . . . .	102
4.2.1	Hypothèses fondamentales du rayonnement . . . . .	102
4.2.2	Exemples de sources sonores . . . . .	103
4.2.3	Caractérisation du champ sonore . . . . .	104

4.2.4	Facteurs influençant le rayonnement : aspects qualitatifs . . . .	107
4.2.5	Méthodes de calcul du rayonnement sonore . . . . .	107
4.3	Ondes sphériques . . . . .	109
4.3.1	Expansion sphérique . . . . .	109
4.3.2	Pression et vitesse acoustique . . . . .	110
4.3.3	Ondes de fréquence constante . . . . .	111
4.4	Étude du champ acoustique créé par un monopôle . . . . .	111
4.4.1	Sphère pulsante . . . . .	112
4.5	Étude du champ acoustique créé par un dipôle . . . . .	114
4.6	Exercices . . . . .	116
4.6.1	Problème 1 : Étude d'une sphère pulsante . . . . .	116
4.6.2	Problème 2 : Sources élémentaires en régime transitoire . . . .	118
4.7	Corrigés des exercices . . . . .	120
4.7.1	Étude d'une sphère pulsante . . . . .	120
4.7.2	Sources élémentaires en régime transitoire . . . . .	123
<b>5</b>	<b>Rayonnement acoustique de sources planes</b>	<b>127</b>
5.1	Résumé . . . . .	127
5.2	Rayonnement des sources planes . . . . .	128
5.2.1	Champ sonore au voisinage d'un écran rigide infini . . . . .	129
5.2.2	Intégrale de Rayleigh . . . . .	130
5.2.3	Rayonnement d'un piston plan encastré dans un écran infini . .	131
5.2.4	Impédance de rayonnement d'un haut-parleur . . . . .	135
5.3	Exercices . . . . .	140
5.3.1	Problème 1 : Pression sonore rayonnée dans l'axe d'un haut- parleur . . . . .	140
5.4	Corrigés des exercices . . . . .	142
5.4.1	Pression sonore rayonnée dans l'axe d'un haut-parleur . . . . .	142
<b>6</b>	<b>Interaction élasto-acoustique</b>	<b>145</b>
6.1	Résumé . . . . .	145
6.2	Plaque mince isotrope infinie . . . . .	146
6.2.1	Vibrations de flexion transversales . . . . .	146
6.2.2	Impédance propre de la plaque infinie . . . . .	146
6.3	Plaque infinie couplée à deux milieux fluides semi-infinis . . . . .	147
6.3.1	Position du problème vibroacoustique . . . . .	147
6.3.2	Solution générale du problème couplé . . . . .	148
6.3.3	Puissance acoustique rayonnée par la plaque . . . . .	149
6.3.4	Plaque isotrope couplée à deux fluides identiques . . . . .	150
6.3.5	Approximation de fluide « léger » . . . . .	152
6.4	Conclusion . . . . .	154
6.4.1	Cas des plaques finies en fluide léger . . . . .	154
6.4.2	Plaques orthotropes et effet de coque . . . . .	155
6.4.3	Couplage plaque-cavité-évent . . . . .	155
6.5	Exercices . . . . .	156

6.5.1	Problème 1 : Transparence acoustique d'une paroi souple . . .	156
6.5.2	Problème 2 : Couplage d'une membrane infinie avec deux milieux fluides . . . . .	158
6.5.3	Problème 3 : Interaction plaque-cavité dans les instruments à cordes . . . . .	159
6.6	Corrigés des exercices . . . . .	162
6.6.1	Transparence acoustique d'une paroi souple . . . . .	162
6.6.2	Couplage d'une membrane infinie avec deux milieux fluides . .	164
6.6.3	Interaction plaque-cavité dans les instruments à cordes . . . . .	166
<b>7</b>	<b>Acoustique des salles</b>	<b>169</b>
7.1	Théorie modale de la réverbération . . . . .	169
7.2	Modes dans une salle rectangulaire . . . . .	169
7.2.1	Résolution de l'équation des ondes . . . . .	169
7.2.2	Modes dans la salle . . . . .	171
7.3	Densité modale et approximation hautes fréquences . . . . .	173
7.3.1	Densité modale . . . . .	173
7.3.2	Fréquence de Schroeder . . . . .	175
7.4	Conclusion de la théorie ondulatoire . . . . .	176
7.5	Théorie de la réverbération de Sabine . . . . .	177
7.5.1	Hypothèses et notations . . . . .	177
7.5.2	Lien entre pression efficace et densité d'énergie acoustique moyenne . . . . .	178
7.5.3	Équation d'évolution de la densité d'énergie . . . . .	178
7.6	Libre parcours moyen et formule d'Eyring . . . . .	184
7.6.1	Nombre moyen de réflexions par seconde . . . . .	184
7.6.2	Réverbération de Norris-Eyring . . . . .	185
7.6.3	Rayon critique . . . . .	187
7.7	Propagation à travers les murs et salles couplées . . . . .	189
7.7.1	Transmission à travers un mur . . . . .	189
7.7.2	Transmission à travers une ouverture . . . . .	191
7.7.3	Salles couplées . . . . .	191
7.8	Méthodes de simulation en acoustique des salles . . . . .	193
7.8.1	Méthode des images . . . . .	193
7.8.2	Méthode des rayons et des cônes . . . . .	195
7.8.3	Dépendance en fréquence . . . . .	197
7.9	Exercices . . . . .	198
7.9.1	Bouclage électroacoustique entre deux salles . . . . .	198
7.9.2	Prise et restitution du son en espace clos réverbérant . . . . .	200
7.10	Corrigés des exercices . . . . .	205
7.10.1	Prise et restitution du son en espace clos réverbérant . . . . .	205
<b>A</b>	<b>Rappel des équations fondamentales de l'acoustique</b>	<b>211</b>
<b>B</b>	<b>Quelques constantes et valeurs numériques</b>	<b>213</b>