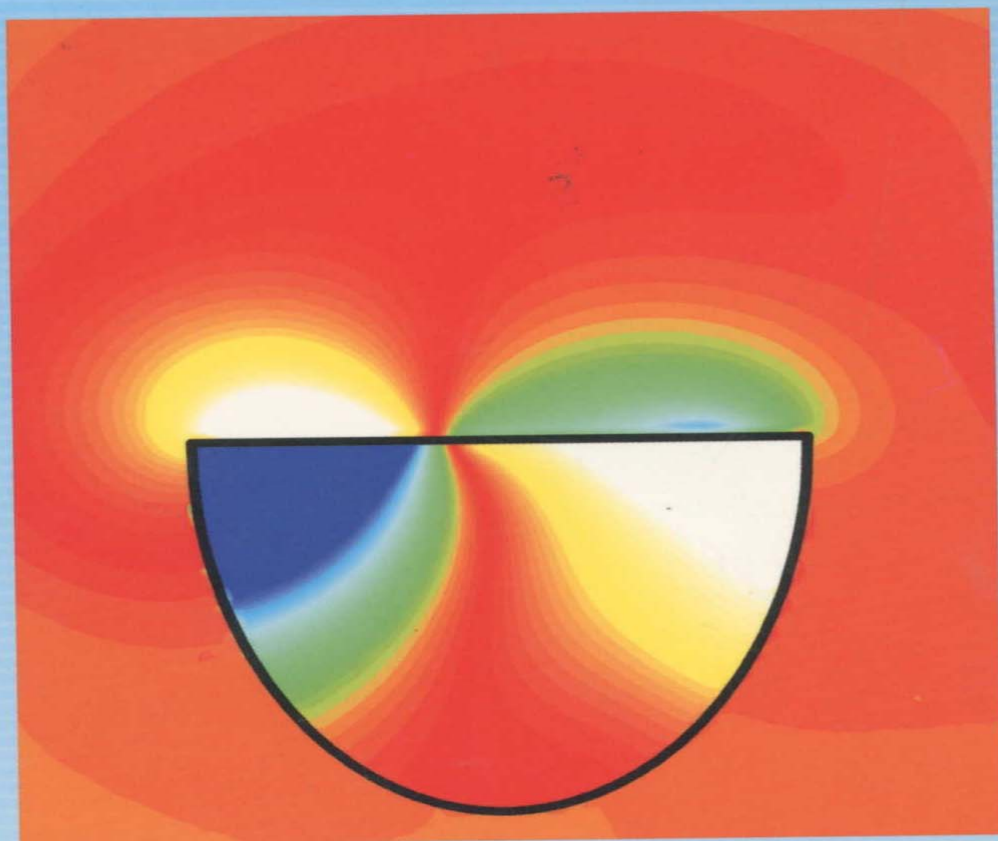


Antoine Chaigne

Ondes acoustiques



LES ÉDITIONS DE L'ÉCOLE POLYTECHNIQUE

Table des matières

1 Ondes acoustiques planes	7
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 dioptré 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 bidioptré	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 bidioptré	28
1.7.3 Propagation à travers un double-vitrage	29
2 Acoustique musicale	31
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
3	Ondes acoustiques guidées	45
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
4	Sources acoustiques élémentaires	101
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
5	Rayonnement acoustique de sources planes	127
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
6	Interaction élasto-acoustique	145
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	165
7	Acoustique des salles	169
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
A	Rappel des équations fondamentales de l'acoustique	211
B	Quelques constantes et valeurs numériques	213