

Table des matières

Avant-propos	1
Chapitre 1. Notions de physique des fluides pour l'acoustique . . .	5
1.1. Hypothèses de l'acoustique des fluides	7
1.2. Rappels de thermodynamique des fluides homogènes	11
1.2.1. Grandeurs d'état, équation d'état	12
1.2.2. Énergie interne, entropie	14
1.2.3. Relations de Maxwell	16
1.2.4. Coefficients thermodynamiques	17
1.2.4.1. Cas du gaz parfait	18
1.2.4.2. Cas général	20
1.3. Rappels de mécanique des milieux continus	22
1.3.1. Contraintes, taux de déformations	23
1.3.2. Description eulérienne, lagrangienne	27
1.3.2.1. Dérivée totale	29
1.4. Équation bilan, lois de conservation	30
1.4.1. Conservation de la matière	31
1.4.2. Conservation de la quantité de mouvement	31
1.4.3. Conservation de l'énergie	32
1.5. Fluide homogène, équations locales	33
1.5.1. Équation de continuité	33
1.5.2. Équation du mouvement	34
1.5.3. Équation de conservation de l'énergie	34
1.5.4. Équation de l'entropie	35
1.6. Principaux modèles de fluide	36
1.6.1. Fluide parfait	36

1.6.2. Fluide visqueux newtonien	37
1.6.3. Fluide thermovisqueux	38
Chapitre 2. Propagation dans un fluide homogène parfait	41
2.1. Modèle unidimensionnel	42
2.1.1. Équation de propagation	43
2.1.2. Vitesse du son dans un gaz parfait	46
2.1.3. Impédance acoustique caractéristique	48
2.2. Hypothèse du fluide parfait	49
2.2.1. Équation d'Euler	50
2.2.2. Flux d'énergie	50
2.3. Acoustique linéaire	52
2.3.1. Équation d'état, linéarisation	52
2.3.2. Équation des ondes	54
2.3.3. Solutions élémentaires	56
2.3.3.1. Ondes planes, représentation complexe	57
2.3.3.2. Ondes sphériques	59
2.3.3.3. Ondes cylindriques	61
2.3.4. Énergie, flux d'énergie, intensité acoustique	61
2.3.4.1. Flux d'énergie acoustique	63
2.3.4.2. Intensité acoustique	64
2.3.4.3. Échelle des niveaux sonores	65
Chapitre 3. Atténuation des ondes acoustiques	69
3.1. Viscosité	70
3.1.1. Modèle unidimensionnel	70
3.1.1.1. Temps de réponse	71
3.1.1.2. Atténuation et dispersion	72
3.1.1.3. Approximation unidirectionnelle	74
3.1.1.4. Dissipation de l'énergie acoustique	76
3.1.2. Fluide visqueux newtonien	78
3.1.2.1. Fluide isotrope, coefficients de viscosité	78
3.1.2.2. Équation du mouvement, onde tourbillonnaire	81
3.1.2.3. Équation de Navier-Stokes, mode acoustique	83
3.1.2.4. Équation de propagation	84
3.2. Propagation dans un fluide thermovisqueux	85
3.2.1. Mode entropique	85
3.2.2. Mode acoustique, équation de propagation	86
3.2.3. Validation des approximations	88
3.2.4. Ordre de grandeur de l'atténuation classique	91

3.3. Phénomènes de relaxation moléculaire	92
3.3.1. Influence des modes de rotation	92
3.3.2. Relaxation des modes de vibration	94
3.3.3. Cas des liquides	99
3.3.4. Viscosité, transfert d'impulsion, équilibre thermodynamique	100
Chapitre 4. Propriétés et solutions de l'équation des ondes	103
4.1. Équation des ondes en présence de sources	104
4.1.1. Conditions aux limites, unicité	106
4.1.2. Fonction de Green spatio-temporelle	108
4.1.3. Régime harmonique, équation de Helmholtz	109
4.2. Formulation intégrale de l'équation de Helmholtz	110
4.2.1. Problème intérieur	110
4.2.2. Problème extérieur, condition de Sommerfeld	113
4.3. Solutions fondamentales à variables séparées	115
4.3.1. Coordonnées cartésiennes	115
4.3.2. Spectre d'ondes planes	117
4.3.3. Harmoniques cylindriques	118
4.3.4. Harmoniques sphériques	121
4.4. Fonction de Green en présence d'atténuation	123
Chapitre 5. Propagation dans un fluide limité	129
5.1. Conditions aux limites	130
5.2. Réflexion et réfraction à une interface	131
5.2.1. Incidence normale, onde stationnaire	132
5.2.1.1. Coefficients de réflexion et de transmission	133
5.2.1.2. Impédance ramenée, adaptation d'impédance	135
5.2.2. Incidence oblique	137
5.2.2.1. Lois de Snell-Descartes	137
5.2.2.2. Onde évanescente	139
5.2.2.3. Coefficients de réflexion et de transmission	139
5.2.2.4. Transmission à travers une plaque mince	140
5.3. Guides d'ondes acoustiques	146
5.3.1. Guide plan élémentaire	146
5.3.2. Vitesse de groupe, vitesse d'énergie	149
5.3.3. Guide cylindrique de section constante	151
5.4. Propagation du son dans les tuyaux	153
5.4.1. Section lentement variable	153
5.4.2. Changement brusque de section	158
5.4.3. Tuyau de longueur finie	160

5.4.4. Résonateur de Helmholtz	161
5.4.5. Dissipation dans les couches limites acoustiques	163

Chapitre 6. Rayonnement acoustique des sources 171

6.1. Champ rayonné par des sources élémentaires	172
6.1.1. Sources ponctuelles	172
6.1.1.1. Sphère pulsante, monopôle	173
6.1.1.2. Association en dipôle	176
6.1.1.3. Quadripôle, analogie aéroacoustique de Lighthill	178
6.1.1.4. Association de trois sources, cardioïde	180
6.1.2. Réseaux de sources ponctuelles	181
6.1.2.1. Réseau uniforme	183
6.1.2.2. Réseaux pondérés	185
6.1.2.3. Réseaux à commande de phase	186
6.1.2.4. Antenne linéique	188
6.2. Sources étendues	190
6.2.1. Intégrale de Rayleigh	191
6.2.2. Rayonnement d'un disque plan	192
6.2.2.1. Pression acoustique sur l'axe	193
6.2.2.2. Champ lointain, diagramme de directivité	195
6.2.2.3. Puissance émise, impédance de rayonnement	198
6.2.3. Diffraction impulsionnelle	200
6.2.3.1. Réponse impulsionnelle de diffraction	200
6.2.3.2. Transducteur plan uniforme	201
6.3. Rayonnement acoustique d'une plaque mince	204
6.3.1. Plaque libre infinie	205
6.3.2. Couplage plaque-fluide	206
6.3.2.1. Couplage faible	208
6.3.2.2. Couplage fort	209
6.3.3. Plaque de dimensions finies	213

Chapitre 7. Rayons et faisceaux acoustiques 221

7.1. Acoustique géométrique	222
7.1.1. Approximation de l'eikonale	223
7.1.2. Trajectoire des rayons acoustiques, principe de Fermat	225
7.1.3. Équation de transport, tube de rayons	227
7.1.4. Réflexion et réfraction sur une surface courbe	229
7.1.5. Milieu stratifié	231
7.1.5.1. Exemple : propagation dans un océan	234
7.1.5.2. Propagation guidée	237

7.1.6. Limitations de l'acoustique géométrique, caustiques	238
7.2. Méthodes de résolution approchée de l'équation des ondes	240
7.2.1. Approximation parabolique standard (EPS)	240
7.2.1.1. Milieu homogène	241
7.2.1.2. Milieu inhomogène	243
7.2.2. Approximation parabolique grand angle	244
7.3. Faisceaux acoustiques	246
7.3.1. Relations de dispersion	248
7.3.2. Faisceaux gaussiens	250
7.3.3. Évolution du champ transverse	254
Chapitre 8. Interaction, diffusion	259
8.1. Fluide en mouvement	259
8.1.1. Écoulement stationnaire	260
8.1.2. Écoulement uniforme	261
8.1.3. Approximation géométrique, écoulement non uniforme	264
8.1.3.1. Équation des rayons	267
8.2. Émetteur et/ou récepteur en mouvement	270
8.3. Diffusion acoustique par une particule sphérique	274
8.3.1. Sphère rigide	277
8.3.2. Sphère élastique	279
8.3.3. Bulle de gaz dans un liquide	282
8.3.3.1. Résonance de Minnaert	282
8.3.3.2. Dynamique linéaire de la bulle en basse fréquence	284
8.3.3.3. Dissipation, diffusion	286
8.3.3.4. Dynamique non linéaire, équation de Rayleigh-Plesset	290
8.4. Propagation dans un fluide hétérogène désordonné	292
8.4.1. Champ cohérent, milieu effectif	294
8.4.2. Champ incohérent, équation du transfert radiatif, de la diffusion	298
Chapitre 9. Acoustique non linéaire	307
9.1. Onde plane dans un fluide parfait	309
9.1.1. Onde simple de Riemann	309
9.1.2. Équation de Burgers non dissipative	313
9.1.3. Formation de l'onde de choc	314
9.1.4. Génération d'harmoniques	317
9.1.5. Régime transitoire, onde N	321
9.2. Onde plane dans un fluide dissipatif	322
9.2.1. Nombre de Gol'dberg	323
9.2.2. Émission par une source plane monochromatique	324

9.2.3. Émission paramétrique	327
9.2.4. Profil du choc faible	329
9.3. Modèles multidimensionnels pour un fluide dissipatif	332
9.3.1. Enthalpie isentropique	332
9.3.2. Équation de propagation	334
9.3.3. Équation de Kuznetsov	334
9.3.4. Équation de Westervelt, antenne paramétrique	336
9.3.5. Effet de la diffraction, approximation paraxiale	338
Chapitre 10. Effets liés aux valeurs moyennes temporelles	345
10.1. Fluide parfait	346
10.1.1. Vitesse particulaire, flux de matière, de quantité de mouvement	347
10.1.2. Excès moyen de pression	349
10.2. Fluide dissipatif en régime linéaire	351
10.3. Fluide parfait en régime non linéaire	355
10.3.1. Auto-démodulation	355
10.3.2. Pression de radiation acoustique	357
10.3.2.1. Les deux pressions de radiation	358
10.3.2.2. Tenseur des contraintes de radiation de Brillouin	358
10.3.2.3. Pression de radiation de Langevin	362
10.3.2.4. Pression de radiation de Rayleigh	363
10.3.3. Forces de Bjerknes	365
Annexe 1. Paramètres caractéristiques	367
Annexe 2. Éléments de théorie cinétique des gaz	371
Annexe 3. Opérateurs vectoriels	375
Annexe 4. Fonctions de Green	379
Annexe 5. Théorème de réciprocité en acoustique	383
Liste des principaux symboles, unités et notations	387
Bibliographie	391
Index	401