

## Table des matières

Avant-propos .....	17
Introduction .....	21
<b>Chapitre. 1. Oscillations d'un fluide autour d'un état stagnant .....</b>	<b>25</b>
1.1. Introduction .....	25
1.1.1. Aperçu qualitatif sur le couplage fluide-structure .....	25
1.1.2. Formulation du couplage .....	29
1.1.2.1. Equilibre dynamique d'une structure déformable .....	29
1.1.2.2. Equilibre dynamique d'un fluide .....	30
1.1.2.3. Système couplé fluide-structure .....	30
1.2. Pression et élasticité d'un fluide .....	31
1.2.1. Pression et équilibre statique .....	31
1.2.2. Compressibilité et comportement élastique .....	32
1.2.2.1. Compressibilité et équation d'état d'un fluide .....	32
1.2.2.2. Célérité du son .....	34
1.2.2.3. Degrés de liberté et choix des variables .....	35
1.2.2.4. Comportement élastique d'un fluide .....	36
1.2.2.5. Elasticité comparée des fluides et des solides .....	36
1.2.2.6. Formulation tridimensionnelle de l'élasticité linéaire .....	40
1.2.2.7. Energie potentielle de déformation élastique .....	42
1.2.3. Comportements inélastiques d'un fluide .....	43
1.2.3.1. Fluide incompressible .....	43
1.2.3.2. Cavitation et dégazage d'un liquide .....	45
1.2.4. Conditions de niveau libre .....	46
1.2.4.1. Niveau libre pesant .....	46
1.2.4.2. Effet de tension superficielle .....	48
1.2.4.3. Loi de Laplace .....	49
1.2.4.4. Petites déformations d'un niveau libre plan .....	50

1.2.4.5. Condition sur un niveau libre pesant .....	51
1.2.5. Equilibre statique d'une bulle de cavitation .....	51
1.2.5.1. Description du problème .....	51
1.2.5.2. Rayons d'équilibre : loi $P_L(R)$ .....	53
1.2.5.3. Stabilité des équilibres statiques .....	55
1.3. Equations de la dynamique des fluides .....	58
1.3.1. Accélération eulérienne et dérivée particulaire .....	58
1.3.2. Principe de conservation de la matière .....	59
1.3.3. Equations du mouvement .....	60
1.3.3.1. Equilibre dynamique .....	60
1.3.3.2. Tenseur des contraintes de Stokes .....	60
1.3.3.3. Equations de Navier-Stokes .....	62
1.3.3.4. Conditions de paroi .....	64
1.4. Petites oscillations d'un fluide autour d'un état stagnant .....	65
1.4.1. Linéarisation des équations de Navier-Stokes .....	65
1.4.2. Grandeurs de référence et oscillations du fluide .....	67
1.4.3. Oscillations d'une bulle de cavitation .....	68
1.4.3.1. Energie cinétique du liquide supposé incompressible .....	68
1.4.3.2. Equation de Rayleigh-Plesset .....	69
1.4.3.3. Linéarisation de l'équation de Rayleigh-Plesset .....	70
1.4.3.4. Oscillations non linéaires de la bulle .....	71
<b>Chapitre 2. Couplage fluide-structure : effets inertiels .....</b>	<b>75</b>
2.1. Introduction .....	75
2.2. Cas particulier des systèmes discrets .....	77
2.2.1. Fluide contenu dans un tube .....	77
2.2.2. Systèmes piston-fluide à un seul degré de liberté .....	80
2.2.2.1. Description du système .....	80
2.2.2.2. Découplage statique et couplage dynamique .....	81
2.2.2.3. Tube de section variable : effet de confinement .....	83
2.2.2.4. Notion d'impédance inertielle .....	86
2.2.3. Système piston-fluide à deux degrés de liberté .....	89
2.2.3.1. Description du système .....	89
2.2.3.2. Approche lagrangienne .....	90
2.2.3.3. Approche newtonienne .....	91
2.3. Cas des structures déformables .....	93
2.3.1. Equilibre dynamique local .....	93
2.3.1.1. Equations de la structure en présence de fluide .....	93
2.3.1.2. Equations du fluide en présence d'une structure vibrante .....	94
2.3.2. Projection du système couplé sur les modes de la structure .....	94
2.4. Exemples analytiques .....	97
2.4.1. Systèmes bidimensionnels .....	97
2.4.1.1. Coque cylindrique remplie de liquide .....	97
2.4.1.2. Coque cylindrique immergée dans un liquide .....	102
2.4.1.3. Couplage de deux coques cylindriques coaxiales .....	103

2.4.1.4. Modification des formes modales par l'inertie du fluide	106
2.4.2. Approximation des lames minces	109
2.4.2.1. Coques coaxiales	109
2.4.2.2. Généralisation du modèle de lame mince	114
2.4.2.3. Plaque rigide vibrant près d'un mur rigide	116
2.4.2.4. Impact d'une vague contre une jetée	120
2.4.3. Systèmes tridimensionnels	127
2.4.3.1. Respiration d'une coque sphérique dans un liquide	127
2.4.3.2. Mode de translation verticale de la sphère	130
2.4.3.3. Mode pendulaire de la sphère	132
2.4.3.4. Cylindre peu élancé, rempli d'eau	133
<b>Chapitre 3. Effets de surface libre</b>	<b>139</b>
3.1. Introduction	139
3.1.1. Importance de la pesanteur : nombre de Froude	140
3.1.2. Effet de tension superficielle : nombre de Weber	140
3.2. Effets de gravité	142
3.2.1. Ondes de gravité	142
3.2.1.1. Mise en évidence des ondes de gravité dans un canal droit	142
3.2.1.2. Eau peu profonde : $\lambda \gg H$	144
3.2.1.3. Eau profonde : $\lambda \ll H$	145
3.2.1.4. Vitesse de groupe et propagation de l'énergie des ondes de surface	147
3.2.1.5. Profils spatiotemporels des ondes de surface propagatives	150
3.2.2. Modes propres de ballonnement	155
3.2.2.1. Systèmes discrets	155
3.2.2.2. Systèmes continus	159
3.2.3. Couplage entre modes de structures et modes de ballonnement	162
3.2.3.1. Domaine des petits nombres de Froude : $\mathcal{F} \ll \mathcal{F}_b$	166
3.2.3.2. Domaine des nombres de Froude résonants : $\mathcal{F} \cong \mathcal{F}_b$	166
3.2.3.3. Domaine des nombres de Froude élevés : $\mathcal{F} \gg \mathcal{F}_b$	168
3.3. Structures flottantes	169
3.3.1. Modes de corps rigide d'un corps flottant	169
3.3.2. Modes de pilonnement et de tangage	171
3.3.3. Mode de roulis	172
3.3.3.1. Position du centre de poussée en fonction de l'angle de roulis	172
3.3.3.2. Potentiel de roulis	175
3.3.3.3. Fréquence propre de roulis	177
3.3.3.4. Roulis forcé par une houle sinusoïdale	178
3.3.3.5. Principe d'un atténuateur de roulis antirésonant	180
3.4. Ondes de capillarité	183

<b>Chapitre 4. Acoustique en ondes planes dans les circuits tubulaires</b> .....	187
4.1. Introduction .....	187
4.1.1. L'acoustique et la perception d'un son .....	187
4.1.2. Contexte des problèmes d'interaction fluide-structure .....	188
4.2. Equations locales des ondes acoustiques .....	189
4.2.1. Formulations de l'équation d'onde .....	189
4.2.1.1. Formulation en potentiel des vitesses (ou de déplacement) .....	190
4.2.1.2. Formulation en variables de déplacement .....	191
4.2.1.3. Formulation en variable de contrainte (pression) .....	191
4.2.2. Nature propagative des solutions de l'équation d'onde .....	192
4.2.3. Importance relative de l'inertie et de la compressibilité .....	192
4.3. Résonances acoustiques des circuits tubulaires .....	193
4.3.1. Hypothèse des ondes planes .....	193
4.3.2. Notion d'impédance acoustique .....	195
4.3.3. Résonances d'un tube de section constante .....	196
4.3.4. Application à l'acoustique de base des instruments à vent .....	198
4.4. Ondes forcées et matrices de transfert acoustique .....	206
4.4.1. Tronçon de tube de section constante .....	206
4.4.2. Assemblage de deux tronçons de propriétés différentes .....	208
4.4.2.1. Matrice de transfert de l'assemblage .....	208
4.4.2.2. Résonances acoustiques d'un tube avec élargissement brusque ..	209
4.4.2.3. Tronçons remplis de fluides différents .....	212
4.4.2.4. Domaine basses fréquences et résonateur de Helmholtz .....	215
4.4.2.5. Cavité partiellement remplie de liquide .....	218
4.4.2.6. Résonances d'ordre supérieur d'un assemblage cavité-tube ....	219
4.4.2.7. Impédance inertielle équivalente à un petit tube .....	220
4.4.3. Sources acoustiques localisées .....	223
4.4.3.1. Source de débit .....	223
4.4.3.2. Source de pression .....	226
4.4.3.3. Propagation des ondes excitées par une source acoustique transitoire .....	228
4.4.4. Fonctions de transfert acoustique .....	228
4.4.4.1. Développements en séries modales .....	229
4.4.4.2. Calcul compact à l'aide des matrices de transfert .....	230
4.4.5. Grands volumes insérés dans un circuit tubulaire .....	231
4.4.5.1. Grand volume monté en série .....	231
4.4.5.2. Grand volume monté en parallèle (résonateur de Helmholtz) ...	233
4.4.6. Formulation adaptée au calcul automatique sur ordinateur .....	236
4.4.6.1. Matrice d'un tronçon munie de ses impédances .....	236
4.4.6.2. Assemblage de deux tronçons avec sources de débit et de pression .....	237
4.4.6.3. Jonction par un petit volume .....	238

<b>Chapitre 5. Acoustique en ondes non planes</b> .....	243
5.1. Ondes acoustiques dans les grands volumes .....	243
5.1.1. Résonances acoustiques .....	244
5.1.1.1. Enceinte parallélépipédique .....	244
5.1.1.2. Enceinte cylindrique .....	245
5.1.2. Validation du modèle des ondes planes dans les circuits tubulaires ..	253
5.1.2.2. Fréquence de coupure d'un guide d'ondes à section rectangulaire .....	253
5.1.2.2. Fréquence de coupure d'un guide d'ondes à section circulaire ..	257
5.2. Formulation en intégrales pondérées .....	258
5.2.1. Motivations .....	258
5.2.2. Fonctionnelles d'énergie associées à l'équation de l'acoustique .....	259
5.2.2.1. Formulation en variables de déplacement .....	259
5.2.2.2. Formulation en variable de contrainte .....	260
5.2.3. Equations intégrales de Kirchhoff .....	262
5.2.3.1. Formulations intégrales en ondes planes .....	265
5.2.3.2. Application : propagation d'ondes planes dans un tuyau .....	272
5.2.3.3. Formulation pour les ondes tridimensionnelles .....	277
<b>Chapitre 6. Couplage acoustomécanique</b> .....	283
6.1. Vitesse du son d'un fluide contenu dans un tube souple .....	283
6.2. Couplage acoustomécanique .....	286
6.2.1. Equations locales du système couplé .....	286
6.2.2. Système piston-fluide .....	287
6.3. Couplage acoustomécanique dans les circuits tubulaires .....	292
6.3.1. Simplifications inhérentes à la géométrie tubulaire .....	292
6.3.2. Effets inertiels transverses .....	293
6.3.3. Couplage dans un changement de section .....	296
6.3.4. Couplage dans un changement de direction (coude) .....	297
6.3.5. Couplage au niveau des fonds et des jonctions .....	299
6.3.6. Equations d'équilibre d'un tube avec du fluide .....	300
6.3.7. Quelques problèmes d'application .....	301
6.3.7.1. Lyre d'expansion thermique, cas du fluide incompressible .....	301
6.3.7.2. Lyre d'expansion thermique, cas du fluide compressible .....	305
6.3.7.3. Tube excité par une source de pression transitoire .....	307
6.3.7.4. Modélisation unidimensionnelle de la cavitation .....	312
6.3.8. Symétrisation des équations acoustomécaniques .....	320
6.3.9. Fonctionnelles d'énergie acoustomécaniques .....	322
<b>Chapitre 7. Amortissements apportés par le fluide</b> .....	327
7.1. Modélisation linéaire de la dissipation d'énergie .....	327
7.1.1. Diversité et importance des processus dissipatifs .....	327
7.1.2. Modèle des amortissements visqueux .....	328
7.1.3. Modes acoustiques complexes en ondes planes .....	330

7.1.4. Impédance itérative d'un tube .....	333
7.1.4.1. Valeurs propres de la matrice de transfert .....	333
7.1.4.2. Ondes planes dans un tube de longueur infinie .....	335
7.2. Amortissement radiatif .....	336
7.2.1. Rayonnement des ondes acoustiques .....	337
7.2.1.1. Sphère pulsante en milieu infini .....	337
7.2.1.2. Rayonnement d'une coque cylindrique .....	346
7.2.1.3. Rayonnement à l'orifice d'un tube .....	349
7.2.2. Rayonnement des ondes de gravité .....	352
7.3. Dissipation due à la viscosité du fluide .....	355
7.3.1. Importance relative de la viscosité .....	355
7.3.2. Ondes de cisaillement visqueux .....	357
7.3.3. Dissipation visqueuse des ondes acoustiques .....	360
7.3.3.1. Ondes planes non confinées .....	360
7.3.3.2. Importance du confinement du fluide .....	361
7.3.3.3. Ondes planes dans un tube .....	362
7.3.4. Systèmes couplés fluide-structure .....	364
7.3.4.1. Système piston-fluide .....	364
7.3.4.2. Plaques flexibles couplées à une lame de liquide .....	368
7.3.4.3. Plaque rigide couplée à une lame de liquide .....	375
7.3.4.4. Espace annulaire cylindrique .....	377
7.3.4.5. Amortissement de tubes de générateurs de vapeur .....	382
<b>Annexes</b> .....	385
A.1. Propriétés mécaniques de quelques gaz et liquides usuels .....	385
A.2. Fonctions de Bessel .....	391
<b>Bibliographie</b> .....	399
<b>Index</b> .....	403