

# Table des matières

<b>Avant-propos</b> . . . . .	11
<b>Chapitre 1. Interaction fluide-structure</b> . . . . .	15
1.1. Introduction . . . . .	15
1.2. Problème d'interaction fluide-structure . . . . .	15
1.2.1. Méthodes de couplage fluide-structure . . . . .	19
1.2.2. Couplage en temps . . . . .	21
1.2.2.1. Méthode explicite synchrone . . . . .	22
1.2.2.2. Méthode explicite asynchrone ou décalée . . . . .	22
1.2.2.3. Méthode implicite . . . . .	22
1.2.3. Couplage en espace . . . . .	24
1.2.3.1. Projection des nœuds . . . . .	24
1.2.3.2. Détermination des grandeurs aux nœuds . . . . .	25
1.2.3.3. Méthode <i>General Grid Interface</i> . . . . .	27
1.3. Vibroacoustique . . . . .	27
1.3.1. Vibration des solides tridimensionnels . . . . .	29
1.3.1.1. Équation de propagation des ondes mécaniques . . . . .	29
1.3.2. Acoustique des fluides . . . . .	30
1.3.3. Méthodes numériques pour le calcul d'une structure couplée avec un fluide stagnant . . . . .	31
1.3.3.1. Hypothèses de modélisation . . . . .	31
1.3.3.2. Analyse vibratoire d'une structure élastique . . . . .	32
1.3.3.3. Analyse vibratoire d'un fluide stagnant . . . . .	33
1.4. Aérodynamique . . . . .	34
1.4.1. Problèmes aéroélastiques . . . . .	36
1.4.2. Charges aérodynamiques . . . . .	38
1.4.2.1. Actions de pression et coefficients de pression . . . . .	39

1.4.2.2. Efforts et moments aérodynamiques . . . . .	40
1.4.3. Équations du problème . . . . .	41
1.4.3.1. Équations de l'écoulement . . . . .	41
1.4.3.2. Équations de la dynamique pour un solide élastique . . . . .	44
1.4.3.3. Conditions aux limites à l'interface . . . . .	45
<b>Chapitre 2. Interaction fluide-structure sous Ansys/Fluent . . . . .</b>	<b>47</b>
2.1. Introduction . . . . .	47
2.2. Faire du couplage sous Ansys . . . . .	49
2.2.1. Types d'analyse de couplage . . . . .	50
2.2.1.1. Méthode directe . . . . .	50
2.2.1.2. Méthode de transfert de charges . . . . .	50
2.2.1.3. Couplage par transfert de charges : <i>Workbench</i> . . . . .	50
2.2.1.4. Couplage par transfert de charges : <i>Ansys Multi-field Solver</i> . . . . .	51
2.2.1.5. Couplage par transfert de charges : <i>Physics file</i> . . . . .	51
2.2.1.6. Couplage par transfert de charges : <i>Unidirectional Load Transfer</i> . . . . .	52
2.3. Exemple d'interaction fluide-structure en utilisant l'environnement <i>Physics</i> . . . . .	52
2.3.1. Fluide en mouvement . . . . .	52
2.3.1.1. Résultats . . . . .	53
2.3.2. Fluide stagnant . . . . .	59
2.4. Exemple d'interaction en utilisant Fluent . . . . .	65
<b>Chapitre 3. Vibroacoustique . . . . .</b>	<b>69</b>
3.1. Introduction . . . . .	69
3.2. Équations des problèmes acoustique et structure . . . . .	70
3.2.1. Équation du problème acoustique . . . . .	70
3.2.2. Conditions aux limites du problème acoustique . . . . .	71
3.2.3. Équation du problème structure . . . . .	72
3.2.4. Conditions aux limites du problème structure . . . . .	72
3.3. Problème vibroacoustique . . . . .	73
3.3.1. Présentation du problème . . . . .	74
3.3.2. Les conditions aux limites et de couplage . . . . .	75
3.3.3. Modélisation par la méthode des éléments finis . . . . .	76
3.3.3.1. Formulation du problème couplé fluide-structure non symétrique . . . . .	76
3.3.3.2. Modélisation du problème structure . . . . .	76
3.3.3.3. Pour la cavité acoustique . . . . .	81
3.3.3.4. Pour le problème vibroacoustique . . . . .	83
3.3.3.5. Formulation du problème couplé fluide-structure symétrique . . . . .	85

3.3.3.6. Le potentiel des déplacements . . . . .	89
3.4. Étude d'une plaque élastique couplée avec une cavité fluide . . . . .	94
3.4.1. Équations du problème couplé fluide-structure . . . . .	95
3.4.2. Formulation variationnelle du fluide . . . . .	96
3.4.3. Formulation variationnelle de la plaque . . . . .	100
3.4.4. Résultats numériques . . . . .	102
3.4.4.1. Pour la plaque 2D . . . . .	102
3.4.4.2. Pour la plaque 3D . . . . .	104
3.5. Étude d'une hélice de bateau . . . . .	104
3.5.1. Résultats numériques . . . . .	106
<b>Chapitre 4. Aérodynamique . . . . .</b>	<b>111</b>
4.1. Introduction . . . . .	111
4.2. Méthode de résolution . . . . .	112
4.2.1. Maillage conforme . . . . .	112
4.2.2. Méthodes de frontières immergées . . . . .	113
4.2.3. Méthodes de domaine fictif volumique . . . . .	114
4.3. Résolution du problème aérodynamique . . . . .	115
4.3.1. Domaine mobile . . . . .	115
4.3.2. Formulation faible . . . . .	116
4.3.2.1. Dans le fluide . . . . .	117
4.3.2.2. Dans le solide . . . . .	118
4.3.2.3. À l'interface . . . . .	118
4.3.3. Évaluation de l'énergie du système étudié . . . . .	119
4.3.4. Résolution numérique du système . . . . .	123
4.3.4.1. Choix de la discrétisation temporelle . . . . .	123
4.3.4.2. Résolution en temps du système . . . . .	124
4.3.4.3. Traitement du terme de convection non linéaire . . . . .	125
4.3.4.4. La méthode de Newton . . . . .	125
4.3.4.5. La méthode du point fixe . . . . .	126
4.3.5. Discrétisation par éléments finis . . . . .	127
4.3.5.1. Écriture matricielle . . . . .	127
4.4. Méthode des éléments finis pour le solide . . . . .	130
4.4.1. Discrétisation . . . . .	130
4.4.2. Assemblage du système . . . . .	132
4.4.3. Résolution du système d'équations algébriques . . . . .	133
4.4.4. Intégration par la méthode des points de Gauss . . . . .	133
4.4.5. Avancement en temps par l'algorithme de Hilbert-Hugues-Taylor . . . . .	134
4.4.6. Linéarisation par l'algorithme de Newton-Raphson . . . . .	135
4.5. Volumes finis pour le fluide . . . . .	136
4.5.1. Équation générique de transport . . . . .	136
4.5.2. Conservativité de la méthode . . . . .	137

4.5.3. Les différentes étapes de la méthode . . . . .	138
4.5.4. Les volumes de contrôle . . . . .	140
4.5.5. Interpolation physique . . . . .	141
4.5.6. Évaluation des flux aux faces . . . . .	142
4.5.7. Schéma centré . . . . .	142
4.5.8. Schéma en amont ( <i>upwind</i> ) . . . . .	144
4.5.9. Schéma hybride . . . . .	145
4.5.10. Éléments de discrétisation . . . . .	145
4.5.10.1. Termes de diffusion . . . . .	146
4.5.10.2. Termes de convection . . . . .	146
4.5.10.3. Flux massique . . . . .	146
4.5.10.4. Équation discrète . . . . .	147
4.6. Procédures de couplage . . . . .	147
4.6.1. Stratégies de couplage . . . . .	147
4.6.2. Couplage partitionné implicite . . . . .	148
4.7. Résultats numériques . . . . .	151
4.7.1. Analyse statique . . . . .	151
4.7.2. Couplage de systèmes . . . . .	154
4.8. Étude d'une aile d'avion 3D . . . . .	156
4.8.1. Analyse modale . . . . .	160
4.9. Analyse transitoire . . . . .	160
<b>Chapitre 5. Réduction modale en IFS . . . . .</b>	<b>169</b>
5.1. Introduction . . . . .	169
5.2. Méthodes de sous-structuration dynamique . . . . .	170
5.2.1. Cas linéaire . . . . .	171
5.2.2. Cas non linéaire . . . . .	173
5.3. Méthodes de sous-structuration non linéaire . . . . .	175
5.3.1. Équations de vibration d'une sous-structure . . . . .	176
5.3.2. Problème d'interface fixe . . . . .	176
5.3.2.1. Choix du nombre des modes « maîtres » . . . . .	177
5.3.3. Problème de relèvement statique . . . . .	178
5.3.4. Représentation du système dans la base linéaire de Craig-Bampton . . . . .	179
5.3.5. Réduction de modèle avec l'approche de Shaw et Pierre . . . . .	180
5.3.6. Assemblage des sous-structures . . . . .	182
5.4. Décomposition orthogonale aux valeurs propres (POD) pour les écoulements . . . . .	183
5.4.1. Propriété des modes POD . . . . .	184
5.4.2. Snapshot POD . . . . .	184
5.4.3. Écriture des systèmes dynamiques d'ordre bas . . . . .	185
5.4.3.1. Système dynamique basé sur le champ de vitesse instantané . . . . .	186

5.4.3.2. Système dynamique basé sur le champ de vitesse fluctuant . . . . .	187
5.4.3.3. Traitement du terme de pression . . . . .	188
5.5. Couplage sous-structures dynamiques/sous-domaines acoustiques . . . . .	190
5.5.1. Équations de base . . . . .	192
5.5.1.1. Équations pour les structures . . . . .	192
5.5.1.2. Équations pour les fluides . . . . .	193
5.5.1.3. Conditions de couplage aux interfaces fluide-structure . . . . .	194
5.5.2. Formulations variationnelles . . . . .	195
5.5.2.1. Formulation variationnelle associée aux sous-structures . . . . .	195
5.5.2.2. Formulation variationnelle associée aux sous-domaines fluides . . . . .	195
5.5.3. Discrétisation par éléments finis . . . . .	196
5.5.4. Calcul des modes locaux . . . . .	198
5.5.4.1. Modes locaux des sous-structures . . . . .	198
5.5.4.2. Modes locaux des sous-domaines acoustiques . . . . .	199
5.5.5. Synthèse modale . . . . .	200
5.5.5.1. Réduction du modèle . . . . .	200
5.5.5.2. Obtention des modes propres couplés . . . . .	202
5.5.5.3. Obtention de la réponse vibroacoustique . . . . .	203
5.6. Simulation numérique . . . . .	204
5.6.1. Anneau élastique . . . . .	204
5.6.1.1. Analyse modale . . . . .	207
5.6.1.2. Décomposition de la cavité acoustique circulaire . . . . .	208
5.6.1.3. Décomposition de l'anneau élastique . . . . .	209
5.6.2. Hélice de bateau . . . . .	211
<b>Chapitre 6. Optimisation fiabiliste en IFS . . . . .</b>	<b>215</b>
6.1. Introduction . . . . .	215
6.2. Fiabilité en mécanique . . . . .	216
6.2.1. Variables aléatoires . . . . .	216
6.2.2. Fonction fiabilité . . . . .	218
6.3. Défaillance en mécanique . . . . .	219
6.3.1. Scénarios de défaillance . . . . .	219
6.3.2. Expression de probabilité de défaillance . . . . .	220
6.4. Indice de fiabilité . . . . .	220
6.4.1. Indice de Rjanitzyne-Cornell . . . . .	220
6.4.2. Indice de Hasofer et Lind . . . . .	221
6.5. Couplage mécano-fiabiliste . . . . .	221
6.5.1. Méthodes de calcul de fiabilité . . . . .	222
6.5.1.1. Fonction d'état limite . . . . .	222
6.5.1.2. Deux familles de méthodes . . . . .	223
6.5.2. Méthodes de Monte-Carlo . . . . .	223

6.5.3. Méthodes d'approximation FORM/SORM . . . . .	224
6.6. Optimisation fiabiliste en mécanique . . . . .	227
6.6.1. Optimisation déterministe . . . . .	228
6.6.2. Différentes approches de la RBDO . . . . .	229
6.6.3. Approche classique . . . . .	231
6.6.4. Approche hybride . . . . .	232
6.6.5. Approche hybride fréquentielle . . . . .	233
6.6.5.1. Formulation du problème d'optimisation . . . . .	233
6.6.5.2. Cas de distribution normale . . . . .	235
6.6.5.3. Cas de distribution log-normale . . . . .	235
6.7. Méthode du point le plus sûr (SP) . . . . .	236
6.7.1. Formulation du problème . . . . .	236
6.7.1.1. Cas d'une distribution normale . . . . .	237
6.7.1.2. Cas d'une distribution log-normale . . . . .	237
6.7.1.3. Implémentation de l'approche SP . . . . .	239
6.8. Résultats numériques . . . . .	239
6.8.1. Calcul de la fiabilité pour une aile d'avion . . . . .	239
6.8.1.1. Étude probabiliste . . . . .	239
6.8.1.2. Étude fiabiliste . . . . .	240
6.8.2. Application de la RBDO à l'aile d'avion . . . . .	241
6.8.2.1. Analyse aérodynamique de l'aile ONERA M6 . . . . .	242
6.8.2.2. Analyse aéroélastique de l'aile ONERA M6 . . . . .	244
6.8.2.3. Analyse modale précontrainte . . . . .	246
6.8.2.4. Optimisation fiabiliste de conception . . . . .	246
6.8.2.5. Méthode hybride . . . . .	248
6.8.2.6. Méthode SP . . . . .	249
6.8.2.7. Résultats numériques . . . . .	250
6.8.2.8. Pour une distribution normale . . . . .	251
6.8.2.9. Distribution log-normale . . . . .	251
<b>Bibliographie . . . . .</b>	<b>255</b>
<b>Index . . . . .</b>	<b>265</b>