

Table des matières

Avant-propos	17
Introduction	21
Chapitre 1. Ecoulements et couplage fluide-élastique dans les circuits tubulaires	25
1.1. Introduction	25
1.2. Notions de base sur la composante permanente des écoulements	26
1.2.1. Equations de Navier-Stokes	26
1.2.2. Facteurs d'échelle d'un écoulement	28
1.2.2.1. Inertie et pression : nombre d'Euler	28
1.2.2.2. Inertie et compressibilité : nombre de Mach	29
1.2.2.3. Inertie et viscosité : nombre de Reynolds	29
1.2.3. Ecoulement permanent dans un tube droit	30
1.2.3.1. L'expérience de Reynolds	30
1.2.3.2. Ecoulement laminaire de Hagen-Poiseuille	32
1.2.3.3. Ecoulement moyen en régime turbulent établi : approche théorique	34
1.2.3.4. Ecoulement moyen en régime turbulent établi : approche empirique	35
1.2.3.5. Autres observations relatives aux écoulements tubulaires turbulents	39
1.3. Principe de fonctionnement des turbines et des pompes centrifuges	40
1.3.1. Une machine hydraulique simple : le tourniquet d'arrosage	40
1.3.2. Fonctionnement en pompe centrifuge ou en turbine	41
1.3.3. Aspects hydrauliques du fonctionnement en pompe	43
1.3.3.1. Fluide parfait	43
1.3.3.2. Pertes de charge et vitesse débitante	44
1.3.3.3. Tourniquet en écoulement inversé	45

1.4. Instabilités fluide-élastiques du tuyau d'arrosage	47
1.4.1. Remarques préliminaires	47
1.4.2. Modélisation du couplage fluide-élastique : approche newtonienne	48
1.4.2.1. Vibrations de la structure	48
1.4.2.2. Champ de vitesse de l'écoulement perturbé	49
1.4.2.3. Efforts de pression sur les parois	50
1.4.2.4. Equations vibratoires et instabilités fluide-élastiques	52
1.4.2.5. Bilan énergétique des forces fluide-élastiques	53
1.4.3. Formulation du principe de Hamilton	55
1.4.3.1. Taux de variation de l'énergie cinétique du fluide	55
1.4.3.2. Forces d'inertie du fluide interne au tube	57
1.4.3.3. Forces d'inertie associées aux termes d'entrée et de sortie de tube	58
1.4.4. Modes vibratoires de systèmes tubulaires discrets	59
1.4.4.1. Tube rigide fixé sur un ressort en rotation	59
1.4.4.2. Tube rigide sur ressorts en translation	62
1.4.4.3. Système de deux tubes rigides liés par une rotule élastique	65
1.4.5. Tube flexible	69
1.4.5.1. Tube rotulé à ses extrémités	69
1.4.5.2. Tube encastré-libre	71
1.4.6. Systèmes en précontrainte axiale	74
1.4.6.1. Effets visqueux de pressurisation et de prétensionnement du tube	74
1.4.6.2. Effet de pesanteur	76
Chapitre 2. Arbres de machines tournantes	81
2.1. Introduction : problèmes vibratoires des machines tournantes	81
2.2. Systèmes tournants sans fluide	82
2.2.1. Remarques préliminaires	82
2.2.2. Système masse-ressort tournant	83
2.2.2.1. Système non amorti dans les variables du repère tournant	84
2.2.2.2. Déstabilisation par amortissement corotatif	89
2.2.3. Volant d'inertie monté sur ressorts (gyroscope sur ressorts)	92
2.2.3.1. Description et équations vibratoires du système	92
2.2.3.2. Modes propres du système non amorti	95
2.2.3.3. Modes propres du système avec amortissements fixes	98
2.2.3.4. Modes propres du système avec amortissements corotatifs	99
2.2.3.5. Excitation vibratoire de balourd	101
2.2.4. Arbre flexible tournant dans le vide	105
2.2.4.1. Equations vibratoires en flexion	105
2.2.4.2. Modes vibratoires de flexion avec couplage gyroscopique	108

2.2.4.3. Balourd généralisé d'un arbre tournant	111
2.3. Arbre tournant dans un espace annulaire de fluide	112
2.3.1. Ecoulement corotatif permanent	112
2.3.1.1. Calcul de l'écoulement laminaire purement tangentiel	112
2.3.1.2. Données expérimentales	115
2.3.2. Vitesse et pression fluctuantes induites par la vibration de l'arbre	118
2.3.2.1. Géométrie déformée par la vibration du rotor	118
2.3.2.2. Conservation de la matière et vitesse tangentielle fluctuante	121
2.3.2.3. Quantité de mouvement et pression fluctuante	122
2.3.3. Couplage fluide-élastique	125
2.3.3.1. Forces d'origine inertielle	125
2.3.3.2. Forces d'origine visqueuse	126
2.3.4. Modes propres et stabilité	127
2.3.4.1. Amortissement structurel et frottement visqueux négligés	128
2.3.4.2. Modèle avec amortissements structurels (fixes)	132
2.3.4.3. Modèle avec friction visqueuse (amortissement rotatif)	135
2.3.4.4. Validations expérimentales	138
2.4. Lubrification hydrodynamique	138
2.4.1. Remarque introductive	138
2.4.2. Patin oscillant et équation de Reynolds unidimensionnelle	139
2.4.3. Forces de portance et de traînée permanentes	142
2.4.4. Couplage fluide-élastique	146
Chapitre 3. Instabilités aéroélastiques d'une aile portante	151
3.1. Aile portante	151
3.1.1. Géométrie	151
3.1.2. Ecoulement moyen et efforts induits : données expérimentales	152
3.1.2.1. Visualisation de l'écoulement autour d'une aile	152
3.1.2.2. Mesure des forces permanentes (stationnaires)	154
3.2. Couplage fluide-élastique et instabilités d'une aile	157
3.2.1. Remarque introductive	157
3.2.2. Modélisation du comportement vibratoire de l'aile	157
3.2.2.1. Principe de la modélisation du système structurel	157
3.2.2.2. Equations vibratoires en absence d'écoulement	158
3.2.2.3. Couplage par les efforts aéroélastiques	159
3.2.3. Evolution des modes avec la vitesse et stabilité	161
3.2.3.1. Flambage de l'aile	161
3.2.3.2. Instabilité de flottement (instabilité par confusion de fréquences)	162
3.3. Modélisation de l'écoulement moyen autour d'un profil d'aile	165

3.3.1. Remarque introductive	165
3.3.2. Principe de base de la modélisation	166
3.3.3. Contraintes de viscosité et vorticité	166
3.3.4. Ecoulements potentiels incompressibles plans	168
3.3.5. Force exercée sur un profil par la pression pariétale	170
3.3.6. Profil d'aile de Joukovski	172
3.3.7. Ecoulement uniforme dévié par un profil circulaire	173
3.3.7.1. Ecoulement sans circulation : paradoxe de d'Alembert	173
3.3.7.2. Force exercée par la rotation axiale du profil : effet Magnus	176
3.3.8. Vorticité induite par la viscosité autour d'un profil : condition de Kutta	179
Chapitre 4. Description des processus aléatoires gaussiens	185
4.1. Introduction	185
4.2. Description probabiliste des processus aléatoires	187
4.2.1. Notion de fonctions et de variables aléatoires	187
4.2.2. Loix de probabilité	189
4.2.2.1. Probabilité d'événements aléatoires discrets	189
4.2.2.2. Convergence en probabilité	190
4.2.2.3. Lien probabiliste entre deux variables aléatoires	191
4.2.3. Densités de probabilité des variables aléatoires continues	193
4.2.3.1. Fonctions de répartition et densités de probabilité simples	193
4.2.3.2. Moyennes en probabilité (espérances mathématiques)	196
4.2.3.3. Variables aléatoires gaussiennes	198
4.2.4. Densités de probabilité jointes du deuxième ordre	200
4.2.4.1. Fonctions de répartition et de densité de probabilité	200
4.2.4.2. Espérances mathématiques jointes d'ordre 2	200
4.2.4.3. Densité de probabilité jointe d'ordre 2, gaussienne	203
4.2.4.4. Changements de variables aléatoires	204
4.2.5. Fonctions aléatoires et fonctions de corrélation	210
4.2.5.1. Fonction d'autocorrélation d'une fonction aléatoire	210
4.2.5.2. Fonction d'intercorrélation entre deux fonctions aléatoires	211
4.3. Moyennes statistiques et temporelles	212
4.3.1. Moyennes statistiques ou moyennes d'ensemble	212
4.3.2. Moyennes temporelles des processus stationnaires	215
4.3.2.1. Définition de la moyenne temporelle d'un processus continu stationnaire	215
4.3.2.2. Processus stationnaires ergodiques	215
4.4. Analyse spectrale des processus stationnaires	217
4.4.1. Définition formelle des spectres de corrélation	217
4.4.2. Estimation statistique des spectres de corrélation	218
4.4.2.1. Calcul approché des spectres de corrélation	218
4.4.2.2. Erreur de troncature temporelle	220

4.4.2.3. Précision statistique	222
4.5. Spectres de réponse d'un système linéaire	224
4.5.1. Réponse d'un oscillateur harmonique à une excitation aléatoire en temps	224
4.5.2. Réponse d'un oscillateur modal à une excitation aléatoire en temps et à répartition spatiale déterministe	228
4.5.3. Réponse d'une structure déformable	230
4.5.4. Réponse à une excitation aléatoire en temps et en espace	232
4.5.4.1. Réponse d'un oscillateur modal	232
4.5.4.2. Réponse d'une structure déformable	234
4.5.5. Mesure des fonctions de transfert à l'aide d'une excitation aléatoire	235
4.5.5.1. Fonctions de transfert liant un signal de réponse à un signal d'excitation	235
4.5.5.2. Spectres d'intercorrélation entre deux signaux de réponse	237
Chapitre 5. Vibrations des tuyauteries induites par les fluctuations de l'écoulement interne	241
5.1. Introduction	241
5.2. Turbulence établie dans un tube droit de section cylindrique	243
5.2.1. Mesures des pressions fluctuantes	243
5.2.2. Spectres d'autocorrélation de la pression fluctuante	244
5.2.3. Spectres d'intercorrélation	245
5.2.4. Modèle de la cascade de Kolmogorov	248
5.2.4.1. Taille des remous et nombre de Reynolds local	248
5.2.4.2. Forme du spectre dans la cascade inertielle	250
5.2.4.3. Forme du spectre dans la zone productrice d'énergie turbulente	251
5.2.4.4. Forme du spectre dans la zone dissipative	251
5.3. Turbulence induite par les singularités d'écoulement	252
5.3.1. Singularités d'écoulement dans un circuit tubulaire	252
5.3.1.1. Ecoulement moyen (permanent) au travers d'un diaphragme	252
5.3.1.2. Propriétés spectrales des fluctuations de pression	255
5.4. Ondes acoustiques induites par la turbulence	259
5.4.1. Mise en évidence expérimentale	259
5.4.1.1. Nature des fluctuations de pression en champ lointain	259
5.4.1.2. Nature et localisation des sources acoustiques en ondes planes	260
5.4.1.3. Propriétés spectrales des sources acoustiques induites par la turbulence	264
5.4.2. Éléments de modélisation théorique	266
5.4.2.1. Linéarisation approchée des équations de Navier-Stokes	266

5.4.2.2. Ondes acoustiques planes dans un écoulement : effet Doppler	271
5.4.2.3. Source acoustique liée à la turbulence en milieu infini	273
5.4.2.4. Ondes en milieu confiné par des parois réfléchissantes	279
5.5. Réponse vibratoire des tuyauteries	280
5.5.1. Remarques introductives	280
5.5.2. Réponse d'un tuyau cylindrique à la turbulence établie	281
5.5.2.1. Spectre de réponse et spectre d'intercorrélation	281
5.5.2.2. Intégrale de corrélation angulaire	283
5.5.2.3. Intégrale de corrélation axiale	284
5.5.2.4. Ecart type du déplacement vibratoire	285
5.5.3. Vibrations induites par les singularités d'écoulement	287
5.5.3.1. Importance relative des fluctuations locales et acoustiques	287
5.5.3.2. Réponse du circuit aux fluctuations acoustiques en ondes planes	292
5.5.3.3. Risques vibratoires sur des circuits industriels	293
Chapitre 6. Vibrations induites par des écoulements décollés	295
6.1. Décollement des écoulements autour d'un obstacle non profilé	295
6.1.1. Mise en évidence expérimentale	295
6.1.2. Mécanisme initiateur du décollement	297
6.1.3. Efforts permanents induits sur un obstacle non profilé	298
6.1.3.1. Traînée permanente induite sur un profil circulaire	298
6.1.3.2. Traînée et portance permanentes sur des profils asymétriques	302
6.2. Instabilités de galop	303
6.2.1. Mécanisme de base du galop	303
6.2.1.1. Système à un degré de liberté en translation	303
6.2.1.2. Système à un degré de liberté en rotation	308
6.2.1.3. Systèmes à deux degrés de liberté	311
6.2.1.4. Galop de sillage	313
6.2.2. Réponse vibratoire au galop	314
6.3. Détachement alterné de tourbillons et mécanisme d'accrochage	316
6.3.1. Tourbillons créés par un obstacle cylindrique immobile	316
6.3.2. Portance et traînée fluctuantes (instationnaires)	319
6.3.2.1. Scénario qualitatif du mécanisme	319
6.3.2.2. Analyse spectrale des efforts fluctuants exercés sur l'obstacle	320
6.3.2.3. Réponse vibratoire dans la direction de portance	324
6.3.3. Mécanisme d'accrochage	326
6.3.3.1. Ecoulement en présence d'un cylindre en vibration harmonique forcée	327
6.3.3.2. Modélisation des vibrations du tube en régime accroché	329

6.3.4. Autres profils	332
6.3.5. Rayonnement acoustique induit par le détachement tourbillonnaire	335
6.3.5.1. Equation de Kirchhoff	335
6.3.5.2. Tube fixe plongé dans un écoulement transverse	336
6.3.5.3. Tube en vibration harmonique forcée	339
6.3.5.4. Accrochage acoustique	342
Chapitre 7. Faisceaux de tubes et structures soumises à des écoulements de fuite	345
7.1. Introduction	345
7.2. Faisceaux de tubes	346
7.2.1. Géométrie	346
7.2.2. Structure des écoulements transverses	350
7.2.3. Risques vibratoires	354
7.2.4. Excitation aléatoire à spectres « large bande »	356
7.2.4.1. Cas des écoulements monophasiques	356
7.2.4.2. Cas des écoulements diphasiques	360
7.2.5. Mécanisme d'instabilité fluide-élastique	361
7.2.5.1. Distinction entre accrochage et instabilité fluide-élastique	361
7.2.5.2. Modèle de couplage quasi statique de Connors-Blevins	362
7.2.5.3. Modèle à retard de Price-Paidoussis	368
7.2.5.4. Modèle à retard de Lever-Weaver	374
7.2.6. Accrochage acoustique dans les échangeurs de chaleur tubulaires	377
7.3. Couplage fluide-élastique avec un écoulement très confiné (fuites)	378
7.3.1. Motivation	378
7.3.2. Ecoulement dans un canal plan avec paroi vibrante	379
7.3.2.1. Description du système	379
7.3.2.2. Ecoulement moyen en absence de vibrations	380
7.3.2.3. Ecoulement perturbé par une petite vibration latérale et instabilités	380
Annexes	385
A.1. Formules intégrales	385
A.1.1. Volume de contrôle	387
A.2. Système de deux tubes en écoulement interne	389
A.3. Rayonnement acoustique multipolaire	395
Bibliographie	404
Index	414