

TABLE DES MATIERES

Chapitre 1 : Caractères généraux du phénomène de cavitation.....	23
1.1. Le phénomène physique.....	23
1.1.1. Définition	23
1.1.2. La pression de vapeur saturante.....	24
1.1.3. Formes diverses des cavités de vapeur.....	27
1.2. La cavitation et les systèmes hydrauliques	30
1.2.1. Les régimes de cavitation.....	30
1.2.2. Situations typiques d'apparition et de développement de la cavitation.....	31
1.2.3. Effets de la cavitation sur les systèmes industriels.....	31
1.2.4. Applications de la cavitation.....	32
1.3. Caractères propres aux écoulements cavitants	33
1.3.1. Prise en compte de la pression absolue.....	33
1.3.2. Les interfaces liquide-vapeur.....	35
1.3.3. Ordres de grandeurs caractéristiques.....	36
1.4. Les paramètres adimensionnels en cavitation.....	37
1.4.1. Le paramètre de cavitation σ_v	37
1.4.2. Le paramètre de cavitation limite σ_{vi}	38
1.4.3. La dépression relative de la cavité σ_c	39
1.5. Aspects historiques.....	39
Références.....	41
Chapitre 2 : Propriétés physiques de l'eau et germes.....	43
2.1. Introduction.....	43
2.1.1. Tension dans les liquides.....	43
2.1.2. Germe de cavitation.....	44
2.2. Équilibre et stabilité mécanique du germe sphérique	45
2.2.1. Condition d'équilibre (Blake 1949).....	45
2.2.2. Stabilité et pression critique du germe sphérique.....	47
2.2.3. Évolution d'un germe dans une zone dépressionnaire.....	48
2.2.4. Comportement du gaz dans le germe.....	50
2.3. Populations de germes.....	52
2.4. Diffusion du gaz et stabilité des germes	56
2.4.1. Gaz dissous et germe dans un liquide au repos.....	56
2.4.2. Stabilité des germes par rapport à la diffusion du gaz.....	58

2.4.3.	Remarques sur l'effet de la convection du liquide et la diffusion rectifiée.....	59
	Références.....	60
	Chapitre 3 : Dynamique de la bulle	63
3.1.	Introduction.....	63
3.2.	L'équation de Rayleigh-Plesset.....	64
3.2.1.	L'équation de Rayleigh-Plesset.....	64
3.2.2.	Critère statique.....	65
3.2.3.	Implosion.....	66
3.2.4.	Pression dans le liquide pendant l'implosion.....	67
3.2.5.	Signal de pression dû aux oscillations d'une bulle et spectre correspondant.....	69
3.2.6.	Temps caractéristiques.....	70
3.2.6.1.	Les divers temps caractéristiques.....	70
3.2.6.2.	Application au traitement de l'équation de Rayleigh-Plesset.....	73
3.2.7.	Oscillations linéaires d'une bulle.....	74
3.2.8.	Critère dynamique (Dugué <i>et al.</i> 1992).....	75
3.2.8.1.	Expression du critère statique.....	76
3.2.8.2.	Expression analytique du critère dynamique.....	77
3.2.8.3.	Résultats.....	79
3.3.	Intégration numérique de l'équation de Rayleigh-Plesset.....	82
3.3.1.	Évolutions quasi-statiques.....	83
3.3.2.	Saut instantané de pression.....	84
3.3.3.	Lois de pressions instationnaires.....	87
3.3.3.1.	Saut de pression nul - Cas des ultrasons.....	87
3.3.3.2.	Superposition d'un saut de pression et d'une fluctuation de petite amplitude – Turbulence.....	88
3.3.4.	L'effet de la viscosité.....	93
3.3.4.1.	Effet d'amortissement des oscillations non linéaires.....	93
3.3.4.2.	Influence de la viscosité sur les pressions critiques dynamiques.....	94
3.3.4.3.	Influence de la viscosité sur l'implosion et l'explosion d'une bulle.....	94
3.4.	L'effet de la compressibilité.....	96
3.4.1.	Les équations de base - Amorce de traitement.....	96
3.4.2.	Quelques exemples de solutions.....	98
3.4.2.1.	Approximation acoustique.....	98
3.4.2.2.	Approximation quasi-acoustique (Trilling 1951).....	98
3.4.2.3.	L'approche de Gilmore (1952).....	99
3.4.2.4.	Solution numérique de Hickling & Plesset (1963).....	99
3.5.	Bruit d'une bulle.....	102
3.5.1.	Équations de base.....	102
3.5.2.	Cas des petites oscillations d'une bulle.....	104
3.5.3.	Cas de l'implosion d'une bulle de vapeur.....	105

3.6.	Aspects thermiques.....	105
3.6.1.	L'idée de retard thermique.....	106
3.6.2.	Analyse par similitude.....	108
3.6.3.	L'analyse simplifiée de Brennen.....	109
3.7.	Bulles non-sphériques.....	111
3.7.1.	Bulle au voisinage d'une paroi.....	111
3.7.2.	Bulle entre deux parois solides.....	114
3.7.3.	Bulle au voisinage d'une surface libre.....	115
3.7.4.	Autres configurations.....	116
	Références.....	117
	Chapitre 4 : Cavitation par poche.....	121
4.1.	Introduction.....	121
4.2.	De l'importance de l'état de la couche limite en cavitation par poche attachée : le cas du cylindre circulaire.....	123
4.3.	Les divers états possibles de couche limite sur un profil.....	127
4.4.	Les divers types de cavitation naissante en fonction de l'état de la couche limite.....	133
4.5.	La cavitation développée par poche.....	134
4.6.	Zone de fermeture des poches de cavitation.....	143
4.6.1.	Caractère instationnaire des arrières de poches.....	143
4.6.2.	Pressions moyennes dans la zone de fermeture.....	145
4.6.3.	Pulsations périodiques de poches.....	147
4.7.	Prédiction de la cavitation par poche.....	149
4.7.1.	Condition de cavitation par poche.....	149
4.7.2.	Prédiction de la cavitation par poche et de la position du détachement.....	150
4.7.3.	Remarque sur la distance entre décollement.....	154
4.8.	Poches ventilées.....	155
4.8.1.	Généralités.....	155
4.8.2.	Paramètres adimensionnels.....	156
4.8.3.	Résultats expérimentaux.....	157
4.8.3.1.	Longueurs de poches.....	158
4.8.3.2.	Coefficient de débit d'air.....	159
4.9.	Effets thermodynamiques.....	163
4.9.1.	Généralités.....	163
4.9.2.	Analyse physique pour une cavité en régime stationnaire.....	164
4.9.3.	Estimation du coefficient de débit.....	166
4.9.4.	Estimation du nombre de Nusselt.....	167
4.9.5.	Exemples d'application.....	169
	Références.....	171

Chapitre 5 : Cavitation par bulles	173
5.1. Introduction.....	173
5.2. Qualité d'une eau.....	173
5.2.1. Germes de cavitation et pression critique	173
5.2.2. Histogramme des pressions critiques.....	174
5.3. Condition de cavitation par bulles.....	175
5.4. Similitude en cavitation par bulles.....	176
5.5. Saturation.....	179
5.5.1. Analyse qualitative.....	179
5.5.2. Estimation des concentrations à saturation.....	181
5.5.2.1. Épaisseur de la couche de fluide contenant les germes actifs	181
5.5.2.2. Rayon maximal des bulles.....	182
5.5.2.3. Concentration à saturation.....	184
5.6. Transition d'une cavitation par poche à une cavitation par bulles.....	184
Références.....	190
Chapitre 6 : Cavitation de tourbillon	191
6.1. Introduction.....	191
6.2. Généralités sur le tourbillon marginal	194
6.2.1. Théorie de la ligne portante.....	194
6.2.2. Facteurs affectant la cavitation de tourbillon marginal.....	195
6.3. L'enroulement du tourbillon marginal et ses conséquences.....	198
6.3.1. Profils de vitesse tangentielle	198
6.3.2. Intensité du tourbillon et dimension du cœur.....	202
6.3.3. Profils de vitesse axiale.....	205
6.3.4. Pression minimale au sein du tourbillon marginal.....	208
6.4. Cavitation dans le tourbillon marginal	209
6.4.1. Les résultats de McCormick	209
6.4.2. Effet de la section droite.....	212
6.4.3. Effet de la qualité de l'eau.....	213
6.4.4. Effet de la forme en plan	218
6.4.5. Corrélations.....	221
6.4.6. Inhibition de la cavitation.....	224
6.5. Tourbillons marginaux en interaction.....	227
Références.....	230

Chapitre 7 : Cavitation de sillage et de jet	233
7.1. Introduction.....	233
7.2. Cavitation de sillage.....	234
7.2.1. Les tourbillons primaires	236
7.2.1.1. Étude de la fréquence	236
7.2.1.2. Influence de la cavitation sur les caractéristiques des tourbillons alternés.....	241
7.2.1.3. Évolution des tourbillons primaires dans le sillage.....	244
7.2.2. Les tourbillons de couche cisailée.....	245
7.2.3. Les structures tridimensionnelles.....	246
7.2.4. Analyse physique et prédiction de la cavitation naissante	249
7.3. Cavitation de jet.....	253
7.3.1. Introduction.....	253
7.3.2. Quelques résultats expérimentaux.....	255
7.3.2.1. Influence de la qualité de l'eau	255
7.3.2.2. Influence de la vitesse du jet.....	258
7.3.2.2. Influence du diamètre de la buse.....	259
7.3.2.3. Autres paramètres	259
7.3.3. Éléments d'analyse théorique	259
Références.....	262
 Chapitre 8 : Érosion de cavitation	 265
8.1. Mécanismes hydrodynamiques d'érosion.....	265
8.1.1. Onde de choc.....	266
8.1.2. Microjet.....	269
8.1.3. Autres mécanismes.....	271
8.2. Agressivité hydrodynamique d'un écoulement cavitant.....	273
8.2.1. Caractérisation de l'agressivité d'un écoulement cavitant.....	273
8.2.2. Technique de mesure des pics de pression.....	274
8.2.3. Quelques exemples d'agressivité hydrodynamique mesurée.....	275
8.2.4. Agressivité hydrodynamique et types de cavitation.....	278
8.2.5. Éléments de similitude	280
8.3. Mode de sollicitation imposé par la cavitation.....	285
8.3.1. Ordre de grandeur de la vitesse de déformation.....	285
8.3.2. Comparaison avec d'autres essais mécaniques	285
8.4. Indentations d'érosion de cavitation.....	287
8.4.1. Caractérisation sommaire du matériau par un seuil de marquage et densité d'indentations.....	287
8.4.2. Taille des indentations.....	288
8.4.3. Distribution spatiale d'indentations.....	291
8.4.4. Influence de la vitesse d'écoulement.....	292
8.4.5. Profondeur des indentations de cavitation	294
8.4.6. Couplage fluide-matériau.....	296

8.5.	Stades avancés d'érosion.....	298
8.5.1.	Aspect de la courbe d'érosion idéale.....	298
8.5.2.	Exemples de courbes d'érosion expérimentales.....	301
8.5.3.	Classification des matériaux d'après les résultats d'érosion.....	302
8.5.4.	Interdépendance entre stades préliminaire et avancé d'érosion.....	303
8.6.	Relation entre l'érosion et les propriétés mécaniques classiques.....	307
8.6.1.	La dureté.....	308
8.6.2.	Energie de déformation.....	310
8.6.3.	Résilience ultime.....	311
8.6.4.	Autres propriétés mécaniques.....	312
8.7.	Mécanismes d'érosion et microstructure de déformation.....	313
8.7.1.	Techniques d'observation des échantillons érodés.....	313
8.7.2.	Dégâts d'impact unique dans un matériau ductile.....	315
8.7.3.	Dégâts d'impact unique dans un matériau fragile.....	316
8.7.4.	Sites d'érosion et mécanismes de perte de masse.....	317
8.7.5.	Microstructure de déformation.....	319
8.8.	Prédiction du taux d'érosion.....	323
8.8.1.	Méthodes empiriques de prédiction de l'érosion.....	324
8.8.1.1.	Corrélation avec les propriétés mécaniques.....	324
8.8.1.2.	Méthode électrochimique.....	325
8.8.1.3.	Techniques d'émission acoustique.....	326
8.8.2.	Méthodes analytiques de calcul du taux d'érosion.....	327
8.8.2.1.	Approches énergétiques.....	327
8.8.2.2.	Approche phénoménologique.....	328
	Références.....	336
	Chapitre 9 : Cavitation des turbomachines hydrauliques.....	341
9.1.	Introduction.....	341
9.1.1.	Effets de la cavitation.....	341
9.1.1.1.	Les fontaines de Florence.....	341
9.1.1.2.	Altération des performances.....	342
9.1.1.3.	L'érosion de cavitation.....	343
9.1.2.	L'implantation des machines hydrauliques.....	343
9.1.2.1.	Importance économique.....	343
9.1.2.2.	La fusée Ariane 4.....	343
9.1.3.	Le progrès des grandes machines hydrauliques.....	346
9.1.4.	Présentation du chapitre.....	346
9.2.	Implantation d'une turbomachine.....	347
9.2.1.	Champ de pression statique dans une roue.....	347
9.2.1.1.	Limite de vaporisation.....	347
9.2.1.2.	Facteurs de cavitation locaux d'une machine hydraulique.....	348
9.2.1.3.	Coefficients de cavitation locaux.....	350

9.2.2.	Énergie massique nette à l'aspiration : NPSE	351
9.2.2.1.	Définition	351
9.2.2.2.	Hauteur d'implantation.....	352
9.2.2.3.	Hauteur nette d'aspiration : NPSH.....	353
9.2.3.	Coefficients de cavitation d'une machine	353
9.2.3.1.	Nombre de Thoma.....	353
9.2.3.2.	Coefficient d'énergie spécifique nette d'aspiration.....	354
9.2.4.	Implantation et distribution de pression.....	354
9.2.4.1.	Relation entre nombre de Thoma et facteurs de cavitation locaux.....	354
9.2.4.2.	Relation entre implantation et coefficients locaux de cavitation	358
9.2.5.	Limites d'implantation d'une turbine.....	358
9.2.5.1.	Pression à la sortie de la roue	358
9.2.5.2.	Influence du coefficient de débit	360
9.2.5.3.	Influence de la vitesse spécifique	362
9.2.5.4.	Distribution de pression dans la roue	363
9.2.6.	Conditions d'implantation d'une pompe	366
9.2.6.1.	Pression à l'entrée de la roue	366
9.2.6.2.	Pression dans la roue	367
9.2.6.3.	Rôle de l'incidence de l'écoulement.....	368
9.2.6.4.	Limite de cavitation de la pompe	370
9.2.6.5.	Vitesse spécifique d'aspiration d'une pompe.....	372
9.2.6.6.	Coefficient de débit optimal d'une famille de roues	374
9.3.	Essais de cavitation des turbomachines.....	376
9.3.1.	Procédure générale d'essais sur modèles réduits	376
9.3.2.	Respect des similitudes géométrique et dynamique.....	378
9.3.3.	Distorsions de la similitude des pressions	379
9.3.3.1.	Distorsions de la similitude de Froude-Reech	379
9.3.3.2.	Choix de la cote de référence de la machine	379
9.3.3.3.	Mesure du NPSE	381
9.3.4.	Courbes de cavitation	382
9.3.4.1.	Essais standards	382
9.3.4.2.	Valeurs remarquables d'implantation.....	384
9.3.5.	Contrôle de la nucléation de l'eau.....	384
9.3.5.1.	Effets d'échelle liés à l'état de nucléation de l'eau.....	384
9.3.5.2.	Saturation	388
9.3.5.3.	Procédure d'injection et de comptage des germes de cavitation.....	390
9.3.6.	Évaluation expérimentale du risque d'érosion.....	391
9.3.6.1.	Pratiques empiriques dans l'évaluation du risque d'érosion	391
9.3.6.2.	Mesures de l'extension des cavités.....	392
9.3.6.3.	Essais de peinture.....	393
9.3.6.4.	Caractéristiques vibratoires et hydro-acoustiques	393
9.4.	Types de cavitation.....	399
9.4.1.	Influence de l'implantation et du point de fonctionnement.....	399
9.4.2.	Turbines Francis.....	399
9.4.4.	Pompes centrifuges	405

9.5.	Altération des performances.....	408
9.5.1.	Turbines	408
9.5.1.1.	Turbine Francis.....	408
9.5.1.2.	Phénomènes instationnaires des turbines à aubage fixe	411
9.5.1.3.	Turbines axiales, Kaplan, hélices et bulbes.....	414
9.5.2.	Pompes et pompes-turbines	418
9.6.	Érosion.....	421
9.6.1.	Érosion de cavitation des machines hydrauliques	421
9.6.2.	Turbines	423
9.6.2.1.	Turbines Francis	423
9.6.2.2.	Turbines Kaplan, hélices et bulbes.....	427
9.6.3.	Pompes.....	429
9.7.	Implantation et choix du domaine de fonctionnement.....	431
9.7.1.	Garanties	431
9.7.2.	Turbines	432
9.7.2.1.	Turbines Francis	432
9.7.2.2.	Turbines axiales, Kaplan, hélices et bulbes.....	434
9.7.3.	Pompes.....	434
	Références.....	438
 Chapitre 10 : Cavitation sur propulseurs marins		445
10.1.	Les propulseurs marins	445
10.1.1.	Contraintes de conception.....	445
10.1.2.	Les différents propulseurs	446
10.1.3.	Le cas de l'hélice : les paramètres de définition	446
10.2.	La cavitation sur les propulseurs.....	447
10.2.1.	Formes et localisation.....	447
10.2.2.	Caractère instationnaire lié au sillage.....	451
10.2.3.	Paramètres de similitude dans les essais en cavitation d'hélices	453
10.2.3.1.	La similitude géométrique	453
10.2.3.2.	Le paramètre d'avance.....	454
10.2.3.3.	La similitude de sillage	454
10.2.3.4.	Les paramètres de cavitation	455
10.2.3.5.	Remarques sur le respect des similitudes	456
10.2.3.6.	Similitude de germes et d'air dissous.....	457
10.3.	Essais de cavitation.....	458
10.3.1.	Configurations d'essais des propulseurs	458
10.3.1.1.	Moyens d'essais pour la cavitation de propulseur.....	458
10.3.1.2.	Essais en petit tunnel de cavitation.....	459
10.3.1.3.	Essais en grand tunnel de cavitation tel le G.T.H.	460
10.3.2.	Conditions d'essais et de mesure de cavitation de propulseur Présentation de quelques résultats	461
10.3.2.1.	Conditions de teneur en air dissous et en germes.....	461
10.3.2.2.	Conditions d'écoulement à l'amont du propulseur.....	464

10.3.2.3.	Mesures des efforts sur la ligne d'arbre	464
10.3.2.4.	Mesures des courbes de la disparition et/ou de l'apparition de cavitation.....	464
10.3.2.5.	Mesure de la cavitation développée	467
10.3.2.6.	Mesure du bruit rayonné.....	467
10.3.2.7.	Mesure des fluctuations de pression sur la coque.....	468
10.3.3.	Extrapolation des résultats.....	469
10.3.3.1.	Courbe de disparition de cavitation.....	469
10.3.3.2.	Cavitation développée.....	470
10.3.3.3.	Efforts sur la ligne d'arbre.....	470
10.3.3.4.	Pressions fluctuantes sur coque.....	471
10.3.3.5.	Bruit rayonné	471
	Références.....	472
 Chapitre 11 : Tunnels de cavitation		473
11.1.	Caractères généraux des tunnels de cavitation	473
11.1.1.	Généralités.....	473
11.1.2.	Techniques d'observation.....	474
11.1.3.	Contrôle de la teneur en air dissous.....	475
11.1.4.	Contrôle de la teneur en germes.....	475
11.1.4.1.	Ensemencement en germes de cavitation par détente.....	475
11.1.4.2.	Autres techniques d'ensemencement.....	478
11.1.4.3.	Compteur de germes de cavitation.....	478
11.1.5.	Equipements divers.....	481
11.2.	Quelques tunnels hydrodynamiques français et étrangers.....	482
11.2.1.	Le Grand Tunnel Hydrodynamique du Bassin d'Essais des Carènes (Val de Reuil)	482
11.2.2.	Le tunnel à grande vitesse de l'Institut de Machines Hydrauliques et de Mécanique des Fluides (IMHEF - EPFL, Lausanne)	484
11.2.3.	Les tunnels hydrodynamiques TH8 et TH2 du Centre d'Etudes et de Recherches de Grenoble (ACB - CERG).....	486
11.2.4.	Les tunnels hydrodynamiques THV et TH300 du Centre d'Etudes et de Recherches de Grenoble (ACB - CERG).....	488
11.2.5.	Le "Large Cavitation Channel" (LCC) du David Taylor Center (Washington).....	490
11.2.6.	Le HYKAT - Hamburgische Schiffbau Versuchsanstalt (HSVA, Hambourg).....	492
11.2.7.	Le tunnel hydrodynamique du Laboratoire des Ecoulements Géophysiques et Industriels (LEGI - Institut de Mécanique de Grenoble).....	494
11.2.8.	Le tunnel du Laboratoire d'Hydrodynamique de l'Ecole Navale (Brest)	496

11.3. Moyens d'essais spéciaux.....	498
11.3.1. La plate-forme d'essais de cavitation pour liquides à effets thermodynamiques "PECLET (CRÉMHYG - Grenoble).....	498
11.3.2. La boucle à mercure du Laboratoire des écoulements Géophysiques et Industriels (LEGI - Institut de Mécanique de Grenoble).....	500
11.3.3. La veine tourbillon et le Caversim (ACB - CERG - Grenoble).....	501
Références.....	502
Chapitre 12 : Modélisation de la cavitation	505
12.1. Introduction.....	505
12.2. Techniques semi-empiriques	507
12.3. Modèles stationnaires.....	508
12.3.1. Modélisation physique	508
12.3.2. Technique numérique bidimensionnelle.....	510
12.3.3. Validation du modèle	513
12.3.4. Modélisation tridimensionnelle stationnaire	516
12.3.4.1. Modèle 3D - code S1/S2	516
12.3.4.2. Modèle 3D - code Euler.....	518
12.3.5. Prévision du NPSE lié à la chute des caractéristiques d'une pompe.....	521
12.4. Modèles instationnaires.....	524
12.5. Prédiction des effets thermodynamiques.....	527
12.6. Conclusion.....	530
Références.....	530
Annexe 1 : Tendances et comportements des écoulements à poches	535
A1.1. Plaque plane avec cavité infinie en milieu infini.....	535
A1.2. Corps symétrique avec cavité infinie.....	536
A1.3. Arc circulaire avec cavité finie en milieu infini.....	537
A1.4. Corps axisymétrique.....	538
A1.5. Cas de l'écoulement en canal à parois solides.....	539
A1.6. Cas de l'écoulement en canal à surface libre	540
Références.....	542
Annexe 2 : Rappels sur les turbomachines hydrauliques	543
A2.1. Définitions et notations.....	543
A2.1.1. Énergie hydraulique massique d'une section.....	543
A2.1.2. Énergie hydraulique massique d'une machine.....	544

TABLE DES MATIERES	581
A2.2. Transfert d'énergie dans une machine.....	546
A2.2.1. Puissance transformée	546
A2.2.2. Équation d'Euler	547
A2.2.3. Caractéristique d'Euler d'une roue de turbine	548
A2.2.4. Caractéristique d'Euler d'une roue de pompe	550
A2.2.5. Pertes énergétiques dans une turbomachine.....	552
A2.2.6. Rendements mécaniques d'une turbomachine	553
A2.3. Conditions de similitude.....	554
A2.3.1. Similitude géométrique, cinématique et dynamique.....	554
A2.3.2. Coefficient de débit et d'énergie	555
A2.3.3. Point de fonctionnement.....	556
A2.3.4. Coefficients et facteurs recommandés par la CEI.....	556
A2.3.5. Vitesse spécifique.....	558
Annexe 3 : Propriétés physiques de l'eau	561
A3.1. Masse volumique, pression de vapeur	561
A3.2. Tension superficielle et chaleur massique de l'eau liquide à la pression atmosphérique	562
A3.3. Caractéristiques de l'eau liquide et de sa vapeur dans les conditions de saturation.....	563
Volumes spécifiques et chaleur latente de vaporisation	563
Viscosités dynamiques et conductivités thermiques	564
Index	565
Table des matières	571