

ANALYSE ET PRÉDICTION DE LA BAISSÉ DE RENDEMENT DES TURBINES FRANCIS PAR CAVITATION À BULLES

THÈSE N° 1799 (1998)

PRÉSENTÉE AU DÉPARTEMENT DE GÉNIE MÉCANIQUE

ÉCOLE POLYTECHNIQUE FÉDÉRALE DE LAUSANNE

POUR L'OBTENTION DU GRADE DE DOCTEUR ÈS SCIENCES TECHNIQUES

PAR

Christophe ARN

Ingénieur mécanicien diplômé EPF
originnaire de Genève

acceptée sur proposition du jury:

Prof. F. Avellan, directeur de thèse
Dr J.-Y. Billard, rapporteur
Prof. S. Cecchio, rapporteur
Dr Ph. Dupont, rapporteur
Prof. D. Favrat, rapporteur
Dr H. Keck, rapporteur

Lausanne, EPFL
1998

Résumé

L'implantation d'une turbine hydraulique est généralement définie en tenant compte de la baisse de rendement possible due au développement de cavitation à bulles. Cette baisse de rendement est mise en évidence en considérant son évolution en fonction du nombre de Thoma σ appelée plus communément courbe $\eta - \sigma$. L'observation de l'extension de cavités dans l'écoulement permet d'associer cette baisse de rendement à un certain type de développement de cavitation localisé à la sortie de la roue et se manifestant sous forme de bulles séparées. Dans le cas de cavitation de bord d'attaque, correspondant à des points de fonctionnement à fortes chutes, la présence de la phase vapeur sur l'aube limite la pression à la valeur de la tension de vapeur et provoque une modification de l'écoulement. Pour la cavitation à bulles séparées, apparaissant plus spécifiquement pour le point de fonctionnement nominal, ce seuillage de la pression par la présence de la phase gazeuse n'a, jusqu'à maintenant, jamais été mis en évidence dans le cas des turbines Francis.

Pour se prémunir des effets de la cavitation à bulles séparées sur le rendement au point de fonctionnement nominal, les normes *CEI* imposent un certain nombre de mesures relatives aux essais standards de cavitation des turbines hydrauliques. Ces mesures reposent sur un contrôle de la qualité de l'eau d'essai du point de vue de la germination, facteur prépondérant de déclenchement de ce type de cavitation. Le développement d'une méthode de prédiction de la baisse de rendement consécutive à l'apparition d'un tel type de cavitation apparaît donc comme une nécessité du point de vue de la possibilité d'agir sur la géométrie de la roue au stade de l'avant-projet.

L'objet principal de ce travail est la compréhension des phénomènes entrant en jeu dans l'altération du rendement d'une turbine Francis en présence d'un développement de cavitation à bulles séparées dans le but d'élaborer une méthode de prédiction. Ce travail présente deux aspects caractérisés, pour le premier, par un certain nombre d'expériences menées dans le but de déterminer l'influence des bulles de cavitation sur un aubage donné puis, pour le second, par l'élaboration d'une méthode de prédiction du champ de pression dans la roue dans ces conditions. L'ensemble de ces études débouche sur une analyse des méthodes d'essais standards de cavitation actuelles.

Mots-clés

– CAVITATION À BULLES

- TURBINE FRANCIS
 - RENDEMENT
- ESSAIS STANDARDS
- PRÉDICTION
- PLATE-FORME D'ESSAI
- TUNNEL DE CAVITATION
- MESURES DE PRESSION SUR UNE AUBE
- VISUALISATIONS RAPIDES
- CALCULS NUMÉRIQUES

Abstract

The setting level of an hydraulic machine, specially for low head machines, is decided with respect to the possible alteration of the efficiency due to the cavity development. This alteration can easily be noticed by plotting the evolution of the efficiency η as a function of the Thoma number σ leading to the so-called $\eta - \sigma$ cavitation curves. Observation of the cavity extent in the flow passage of the runner allows to associate the drop of efficiency with a particular type of cavity development.

However, depending on the type of cavities this drop cannot be very easily explained. Obviously, for a leading edge attached cavity corresponding to high head operating points, the presence of the vapour phase on the blade suction side limits the pressure at the vapour pressure value wich causes the flow alteration. In the case of travelling bubble cavitation, corresponding to the outlet cavitation at the nominal head, this limitation of the pressure field due to the presence of the vapour was never characterized.

In order to protect the efficiency at the best operating point against the travelling bubbles effects, the *IEC* norms suggests some measures relating to turbines standards cavitation tests. These measures are based on the systematic control of the test water quality in term of nucleation, which is the main factor of the inception of this type of cavitation. A prediction method of the efficiency drop due to the outlet travelling bubble cavitation is then a necessity from the point of view of the possibility to modify the runner geometry in the first state of the project.

The main object of this work is then the understanding of the physical phenomenon acting on the Francis turbine efficiency alteration with a development of travelling bubble cavitation in order to elaborate a prediction method. The first aspect of this thesis work is the characterisation of the bubbles influence with some experiments carried out in the hydraulic machines tests rigs and the high-speed cavitation tunnel. The second part consists in the development of a cavitating pressure field prediction method. The main work is finally intended to analyse the actual standards cavitation tests methods.

Keywords

- TRAVELLING BUBBLE CAVITATION
- FRANCIS TURBINE
- EFFICIENCY

- STANDARDS CAVITATION TESTS
- PREDICTION
- HYDRAULIC MACHINES TESTS RIG
CAVITATION TUNNEL
- PRESSURE MEASUREMENTS ON A BLADE
- HIGH-SPEED VISUALISATIONS
- NUMERICAL COMPUTATION

Table des matières

Notations	xvii
I Introduction	1
1 L'optimisation du rendement d'une turbine hydraulique	3
1.1 Le choix de l'implantation d'une machine	3
1.2 Le contexte de la production hydroélectrique	5
1.3 La réhabilitation	7
2 Le rendement d'une turbine hydraulique	9
2.1 Le régime de fonctionnement d'une turbine hydraulique	9
2.2 L'altération du rendement dû à l'apparition de cavitation à bulles	10
2.3 Le transfert d'énergie et les pertes	12
3 Problématique et description du travail	17
3.1 La problématique	17
3.2 Etude bibliographique	18
3.3 Objectifs et démarche	21
3.4 Plan de recherche	21
3.4.1 Partie II	21
3.4.2 Partie III	22
3.4.3 Partie IV	23
3.4.4 Partie V	23
II La cavitation à bulles séparées	25
Introduction	27
1 La cavitation à bulles	29
1.1 La cavitation	29

1.1.1	Le phénomène physique	29
1.1.2	La pression de vapeur saturante	30
1.1.3	La notion de tension dans les liquides et le germe de cavitation	31
1.2	La cavitation à bulles	34
1.2.1	L'apparition du régime de cavitation à bulles	34
1.2.2	L'équation de Rayleigh-Plesset	35
1.2.3	La population de germes ou la susceptibilité d'un liquide	37
1.2.4	Les conditions de cavitation par bulles	39
1.2.5	La saturation	40
2	L'implantation d'une turbine hydraulique	43
2.1	Le champ de pression statique dans une roue	43
2.2	Le coefficient local de cavitation	44
2.3	L'énergie nette à l'aspiration	45
2.4	Coefficient de cavitation d'une machine	46
2.5	Relation entre σ et χ_E	46
2.6	Développement de cavitation à bulles dans la roue	50
2.6.1	Equation de Rayleigh-Plesset adimensionnelle	50
2.6.2	Etude paramétrique	51
3	Les essais de cavitation	55
3.1	Les essais standards sur plate-forme	55
3.1.1	Les courbes de cavitation	55
3.1.2	Similitudes et effets d'échelle	55
3.2	Les normes <i>CEI</i>	57
3.2.1	Dispositions générales concernant les essais standards de cavitation	57
3.2.2	Influence de la teneur en germes	57
3.2.3	Valeurs remarquables du nombre de Thoma	58
4	Résumé	61
4.1	Apparition de la cavitation à bulles	61
4.2	Hypothèses de travail	61
III	Etude expérimentale	63
	Introduction	65

1	Les outils de recherche	67
1.1	Les plates-formes d'essai de turbomachines hydrauliques	67
1.1.1	Généralités	67
1.1.2	Les plates-formes PF1 et PF2	68
1.1.3	La plate-forme de recherche PF3	70
1.2	Le tunnel de cavitation	72
1.2.1	Caractéristiques principales	72
1.2.2	Instrumentation	74
1.3	Le système de contrôle de la nucléation	77
1.3.1	Le système d'injection de germes de cavitation	77
1.3.2	Le compteur de germes de cavitation	79
2	La baisse des performances	85
2.1	La chute de rendement des turbines Francis	85
2.1.1	Injection de germes de cavitation sur plate-forme d'essai	85
2.1.2	L'importance du point de fonctionnement, l'effet de la torche	87
2.1.3	Le cas d'un essai comparatif	89
2.1.4	Le cas d'un essai de réhabilitation	91
2.2	L'altération des performances d'un profil bidimensionnel	92
2.2.1	La mesure de la baisse de portance sur le tunnel de ca- vitation	92
3	L'effet de la cavitation à bulles sur le champ de pression	101
3.1	L'instrumentation	101
3.1.1	Objectifs des expériences	101
3.1.2	Le profil bidimensionnel instrumenté	102
3.1.3	La roue instrumentée	104
3.1.4	Les moyens d'acquisition	107
3.1.5	L'étalonnage des capteurs de pression	110
3.1.6	Les moyens de visualisation	118
3.2	Les mesures en régime permanent	126
3.2.1	Le cas du profil bidimensionnel	126
3.2.2	La turbine Francis	132
3.3	Les mesures en régime instationnaire	141
3.4	L'évolution d'une bulle non sphérique	149
4	La déformation des bulles de cavitation	159
4.1	Dimensions caractéristiques des bulles	159

4.2	Hémisphérisation des bulles	162
4.3	Surface de contact	167
5	Synthèse	171
5.1	Les causes de la chute du rendement	171
5.2	L'altération du champ de pression	172
5.3	Les perspectives en matière de prédiction	172
IV	Prédiction de la chute du rendement	173
	Introduction	175
1	La modélisation	177
1.1	Les calculs en régime subcavitant	177
1.1.1	Les codes utilisés	177
1.1.2	Les calculs d'écoulements autour du profil bidimensionnel	178
1.1.3	Les calculs dans la roue Francis	180
1.2	L'équation de Rayleigh-Plesset	183
1.3	Les modèles potentiels monodimensionnels	184
1.4	La fonction indicatrice	186
1.5	Le flux de germes actif	189
1.6	La répartition spatiale des germes	192
1.7	Le taux de vide	197
2	La prédiction de la modification du champ de pression	201
2.1	La baisse de portance du profil bidimensionnel	201
2.1.1	Distributions de germes mesurées sur le tunnel de cavitation	201
2.1.2	Les calculs par l'approche potentielle	202
2.1.3	Les calculs par l'approche du flux de germes actifs	207
2.1.4	Les calculs par l'approche surfacique	209
2.1.5	Les calculs par l'approche du taux de vide	213
2.1.6	Effets quantitatifs de la distribution de germes	214
2.1.7	Effets de blocage	217
2.1.8	Le couplage	217
2.1.9	Analyse des différentes méthodes	219
2.2	La turbine Francis	222
2.2.1	La procédure de calcul	222
2.2.2	Distributions de germes	227

2.2.3	Les résultats de calcul	229
3	Synthèse	239
3.1	Les méthodes de correction du champ de pression	239
3.2	Les hypothèses	240
3.3	Conclusion	241
V	Synthèse et conclusion	243
1	Synthèse générale	245
1.1	La phénoménologie physique	245
1.2	Les hypothèses	248
1.2.1	Limitation du cadre du travail	248
1.2.2	Les recherches expérimentales	249
1.2.3	La modélisation	250
1.3	Critique du travail	252
2	Conclusion	255
2.1	La prédiction	255
2.2	Recommandations de la CEI pour les essais standards de cavi- tation	256
2.3	Les perspectives	257
	Bibliographie	263
	Index	265
	Table des figures	275
	Liste des tableaux	277
	Curriculum vitae	279