

# LOIS DE SIMILITUDE DANS LES ESSAIS DE CAVITATION DES TURBINES FRANCIS

THESE No 914 ( 1991 )

PRESENTEE AU DEPARTEMENT DE MECANIQUE

ECOLE POLYTECHNIQUE FEDERALE DE LAUSANNE

POUR L'OBTENTION DU GRADE DE DOCTEUR ES SCIENCES TECHNIQUES

PAR

**BERNARD GINDROZ**

Ingénieur mécanicien diplômé EPFL  
originaire de Montpreveyres (VD)

acceptée sur proposition du jury :

Prof. P. Henry , rapporteur  
Dr F. Avellan , corapporteur  
Mr P. Bachmann, corapporteur  
Mr A. Verry, corapporteur  
Mr M. Visconti , corapporteur

Lausanne, EPFL  
1991

## RESUME

La réalisation d'une turbine pour une centrale hydro-électrique s'accompagne nécessairement de garanties données par le fournisseur de la machine. Les performances de la turbine ne peuvent être vérifiées par calcul, car les codes disponibles ne sont pas encore suffisamment précis. Par conséquent, il faut effectuer des essais de réception pour la vérification des garanties. Comme les mesures des performances sur la machine industrielle ne sont souvent pas réalisables, on obtient les grandeurs caractéristiques par des essais sur modèles réduits.

L'homologie des écoulements implique avant tout une similitude géométrique parfaite entre le modèle et le prototype. Néanmoins, de nombreux effets d'échelles subsistent, qui ne permettent pas une transposition directe des résultats de mesures au prototype. En particulier, lors des essais de cavitation des turbines Francis, la chute d'essai et de la qualité de l'eau, caractérisée par son contenu en germes, jouent un rôle prédominant dans les caractéristiques en cavitation de la machine. Ainsi, on ne peut comparer les mêmes essais menés dans différents laboratoires et pour diverses chutes, malgré l'observation scrupuleuse des normes du Comité Electrotechnique International (CEI).

Le présent travail consiste en l'établissement de lois de similitude pour les essais de cavitation des turbines Francis. Cette étude porte essentiellement sur le comportement global d'une machine. En effet, on examine l'influence des paramètres d'essai et de la qualité de l'eau sur les performances globales de la turbine, à savoir sur sa puissance et son rendement. On ne s'attache nullement à des considérations d'influence des développements de cavitation sur les grandeurs caractéristiques de l'écoulement interne de la roue. La turbine est ainsi prise dans son entièreté, comme élément de conversion de la puissance hydraulique à la puissance mécanique.

Tout d'abord, une étude des paramètres d'influence des développements de cavitation permet de dégager certains critères prépondérants. Cette étude paramétrique est menée en résolvant un modèle numérique d'évolution de bulles de cavitation. Dans un premier temps, ce modèle est validé par comparaison des résultats de calcul avec des développements de cavitation observés dans une turbine Francis et sur un profil bidimensionnel.

Des lois de comportement sont alors établies, qui permettent de comprendre les effets d'échelles observés lors des essais sur modèles réduits. Le résultat majeur de cette étude paramétrique est la mise en évidence d'un effet de saturation de l'influence de la chute et de la teneur en germes de l'eau. Afin de vérifier ces résultats importants, une instrumentation spécifique est développée, notamment un compteur de germes et une installation d'injection de germes à débit variable. Cet équipement, entièrement étalonné, est d'un fonctionnement fiable et aisé.

La modification de la teneur en germes de l'eau d'essai, ainsi qu'une mesure de la répartition de noyaux de cavitation, permettent de vérifier expérimentalement ce phénomène de saturation, par des campagnes d'essais sur de nombreux modèles de turbines Francis de diverses vitesses spécifiques, ainsi que sur un profil bidimensionnel, installé dans la veine d'essai du tunnel de cavitation à haute vitesse de l'IMHEF.

La répartition de pression dans la roue est à la base des développements de cavitation. Ainsi, une homologie des écoulements cavitants entre modèle et machine industrielle ne peut être obtenue que pour des répartitions de pression homologues. Seul le respect de la similitude de Froude vérifie cette condition.

L'écoulement simplifié autour du profil bidimensionnel permet d'une part une interprétation physique de l'interaction des développements de cavitation sur les performances. D'autre part, la visualisation de ces développements de cavitation suggère une nouvelle relation de saturation basée non pas sur une homologie des volumes cavitants mais sur des longueurs homologues. Si la loi de similitude du nombre de germes, inversement proportionnelle au cube de l'échelle géométrique, est un extrême, la loi de similitude correspondant à cette nouvelle relation de saturation est à l'autre extrême opposé. Néanmoins, cette dernière présente l'avantage d'être beaucoup plus restrictive, quant à la correspondance de la caractéristique en saturation du modèle au prototype. Ainsi, lorsque cette nouvelle loi est vérifiée, la courbe de saturation du modèle réduit correspond sans équivoque à la caractéristique du comportement cavitant de la machine industrielle. Une campagne de mesures de répartitions de germes dans diverses centrales hydroélectriques confirme ce résultat.

Ce travail de thèse suggère une nouvelle procédure d'essais de cavitation des modèles de turbines Francis. Cette proposition postule la détermination de la caractéristique du modèle réduit en saturation et sous une chute d'essai aussi proche que possible de celle dictée par le respect de la similitude de Froude. L'obtention de cette courbe particulière de performances de la turbine nécessite l'utilisation des installations de comptage et d'injections de germes, développées pour les besoins de cette étude.

## TABLE DES MATIERES

<b>1. INTRODUCTION.....</b>	<b>1</b>
1.1 Des essais fiables sur modèles.....	1
1.2 Les développements de cavitation à bulles.....	5
1.3 Une instrumentation spécifique.....	9
1.4 Une caractéristique unique de saturation.....	10
1.5 Une nouvelle procédure d'essai.....	12
1.6 Bibliographie du chapitre 1.....	14
Table des matières.....	19
<b>2. LES ESSAIS SUR MODELES.....</b>	<b>21</b>
2.1 Condition d'apparition de la cavitation.....	21
2.2 Implantation d'une installation hydro-électrique.....	24
2.3 Similitudes et effets d'échelle.....	30
2.4 Caractéristiques des essais de cavitation.....	37
2.5 Bibliographie du chapitre 2.....	40
Table des matières.....	41
<b>3. ETUDE PARAMETRIQUE DES DEVELOPPEMENTS.....</b>	<b>43</b>
<b>DE CAVITATION A BULLES</b>	
3.1 Modélisation de l'évolution d'une micro-bulle dans un champ de pression.....	43
3.1.1 Modèle de RAYLEIGH-PLESSET.....	43
3.1.2 Adimensionnalisation du modèle.....	47
3.1.3 Validation du modèle de Rayleigh-Plesset.....	50
3.1.3.1 Validation du modèle sur le profil 2-D.....	51
3.1.3.1 Validation du modèle sur une roue Francis.....	53
3.1.4 Critère d'instabilité caractérisant l'explosion des bulles.....	56
3.2 Etude paramétrique.....	65
3.2.1 Paramètres et variables.....	65

3.2.2	Caractéristiques des rayons instables limites : $Ro_i$ .....	68
3.2.3	Caractéristiques de la taille maximale des bulles : $R_{max}$ .....	71
3.2.4	Lois de comportement des bulles.....	73
3.3	Résultats.....	74
3.3.1	Etude des lois de comportement.....	74
3.3.2	Fonction ne dépendant que de la nature de l'écoulement .....	76
3.3.3	Caractérisation du comportement cavitant .....	79
3.4	Saturation .....	80
3.4.1	Rappel des résultats de l'étude paramétrique.....	80
3.4.2	Equation de la saturation .....	82
3.5	Bibliographie du chapitre 3 .....	86
	Table des matières .....	87

#### 4. INSTRUMENTATION SPECIFIQUE ..... 89

4.1	Moyens d'essais.....	89
4.1.1	Plateformes d'essais .....	89
4.1.2	Tunnel de cavitation.....	90
4.1.2.1	Caractéristiques.....	90
4.1.2.2	Balance hydrodynamique .....	93
4.1.2.3	Visualisation des écoulements .....	96
4.2	Compteurs de germes.....	97
4.2.1	Ancien compteur de germes.....	97
4.2.2	Nouveau compteur de germes .....	105
4.2.2.1	Cahier des charges .....	105
4.2.2.2	Fonctionnement du nouveau compteur de germes .....	109
4.2.2.3	Etalonnage du nouveau compteur de germes .....	118
4.2.2.4	Mise en oeuvre du nouveau compteur de germes .....	122
4.3	Injecteurs de germes .....	124
4.3.1	Principe des injecteurs de germes .....	124
4.3.2	Fonctionnement des injecteurs de germes.....	124
4.3.3	Conditions de fonctionnement des injecteurs de germes .....	129
4.4	Appareils de mesure de la teneur en air dissous .....	132
4.4.1	Fonctionnement des appareils .....	132
4.4.2	Etalonnage des appareils .....	132
4.5	Bibliographie du chapitre 4 .....	136
	Table des matières .....	137

## 5. ETUDES EXPERIMENTALES.....139

5.1	Validation du phénomène de saturation sur stands d'essais.....	139
5.1.1	Campagne d'essais systématiques de cavitation sur modèles réduits .....	139
5.1.1.1	Caractéristiques des modèles réduits.....	140
5.1.1.2	Conditions et procédure des essais.....	140
5.1.1.3	Résultats.....	143
5.1.2	Influence de la répartition de germes de l'eau.....	149
	pour un domaine complet de fonctionnement d'une turbine Francis	
5.1.2.1	Conditions et procédures d'essais.....	149
5.1.2.2	Résultats.....	150
5.1.3	Chute limite de saturation .....	152
5.1.4	Influence de la similitude de Froude .....	154
5.2	Validation du phénomène de saturation sur le tunnel de cavitation.....	162
5.2.1	Campagne d'essais de cavitation sur le tunnel de cavitation.....	162
5.2.1.1	Caractéristiques du profil d'essai.....	162
5.2.1.2	Conditions et procédure des essais.....	164
5.2.1.3	Résultats.....	165
5.2.2	Analyse répartition de pression - cavitation - performances.....	169
5.3	Analyse de la saturation de l'influence des germes.....	171
5.4	Influence des répartitions de germes sur les valeurs caractéristiques .....	179
	des essais de cavitation.	
5.4.1	Campagne d'essais sur un modèle $v = 0.35$ .....	180
5.4.2	Essais en eau saturée en air dissous (circuit ouvert) .....	181
5.4.3	Les débuts de cavitation .....	193
5.4.3.1	Influence de la distribution de pression sur le début de cavitation.....	194
5.4.3.2	Prévision à partir des répartitions de germes mesurées.....	204
5.4.3.3	Influence de la similitude de Froude .....	208
5.4.4	Vérification de la nouvelle loi de similitude du nombre de germes.....	209
5.5	Mesures de germes en centrales .....	212
5.6	Bibliographie du chapitre 5 .....	214
	Table des matières .....	215

## 6. SYNTHESE.....217

6.1	Lois de comportement des germes cavitants .....	217
6.2	Caractéristique en saturation de l'influence des germes .....	218
6.3	Loi de similitude du nombre de germes .....	219

6.4	Début de cavitation.....	219
6.5	Protocole d'essais.....	220
6.6	Conclusions.....	221
	Table des matières .....	223
<b>LISTE DES SYMBOLES .....</b>		<b>225</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>		<b>233</b>
<b>LISTE DES FIGURES.....</b>		<b>241</b>
<b>REMERCIEMENTS.....</b>		<b>253</b>
<b>CURRICULUM VITAE.....</b>		<b>255</b>
<b>ANNEXES.....</b>		<b>A1</b>
A.1	Equation de RAYLEIGH-PLESSET .....	A1
A.1.1	Etablissement de l'équation .....	A1
A.1.2	Adimensionnalisation de l'équation de RAYLEIGH - PLESSET.....	A9
A.2	Listing du programme du modèle Rayleigh-Plesset.....	A12
A.2.1	Listing du programme principal et des routines appelées.....	A12
A.2.2	Exemple de listing d'un fichier de donnée. .... (des caractéristiques de l'écoulement autour d'un profil)	A26
A.2.3	Exemple de listing d'un fichier de données. .... (Conditions globales d'écoulement)	A38
	Table des matières .....	A39