

Etude théorique et expérimentale de la baisse de rendement des turbines Francis par cavitation à bulles

par Ch. Arn, Ph. Dupont, F. Avellan
IMHEF-EPFL, Lausanne

I ■ INTRODUCTION

Dans le cas des turbines Francis, la cavitation à bulles séparées apparaît dans des domaines de fonctionnement proches du point de meilleur rendement. La répartition de pression sur l'aubage de la roue avec des écoulements correspondant à de tels points de fonctionnement possède un minimum près de la sortie des aubes puisque les angles d'incidence de l'écoulement au bord d'attaque sont en général petits. On observe donc dans certains cas une apparition de cavitation à bulles localisée près de la sortie de l'aubage à laquelle on associe une baisse de rendement de la machine. Ce type de cavitation est évidemment très sensible à la concentration de germes de cavitation contenus dans l'eau mais également à l'altitude d'implantation de la roue qui définit le niveau de pression général de l'installation. Pour cette raison, on choisit cette altitude en fonction du développement de ce type de cavitation au point de meilleur rendement. Les phénomènes physiques provoquant la baisse de rendement de la machine avec l'apparition de cavitation à bulles ne sont pas encore clairement déterminés. Des expériences menées avec un profil NACA 009 installé sur une balance hydrodynamique [9] ont montré que les efforts d'origine hydraulique dépendent fortement du taux de germes ainsi que du coefficient de cavitation σ . On peut donc en déduire que ce sont ces deux paramètres qui vont occasionner une modification de la distribution de pression sur l'aube en pré-

NOMENCLATURE

C	Vitesse	[m/s]
R	Rayon	[m]
$E=gH$	Energie hydraulique massique	[J/kg]
Q	Débit-volume	[m ³ /s]
NPSE	Energie nette à l'aspiration	[J/kg]
p	Pression	[N/m ²]
p_v	Pression de vapeur	[N/m ²]
$\chi_s=(p_{cr}-p_s)/\rho E$	Coefficient local de cavitation pour une turbine	[-]
$c_p=(p-p_{cr})/\rho E$	Coefficient de pression	[-]
$\varphi=Q/\pi\omega R^3$	Coefficient de débit	[-]
$\psi=2E/\omega^2 R^2$	Coefficient d'énergie	[-]
$v=\varphi^{1/2}/\psi^{3/4}$	Vitesse spécifique	[-]
ρ	Masse volumique	[kg/m ³]
$\sigma=NPSE/E$	Nombre de Thoma (Turbine)	[-]
$\sigma=(p_{cr}-p_s)/(1/2\rho C^2)$	Coefficient de cavitation	[-]
k	Numéro d'une ligne de maillage	[-]
*	Valeur normalisée par rapport à la valeur hors cavitation	

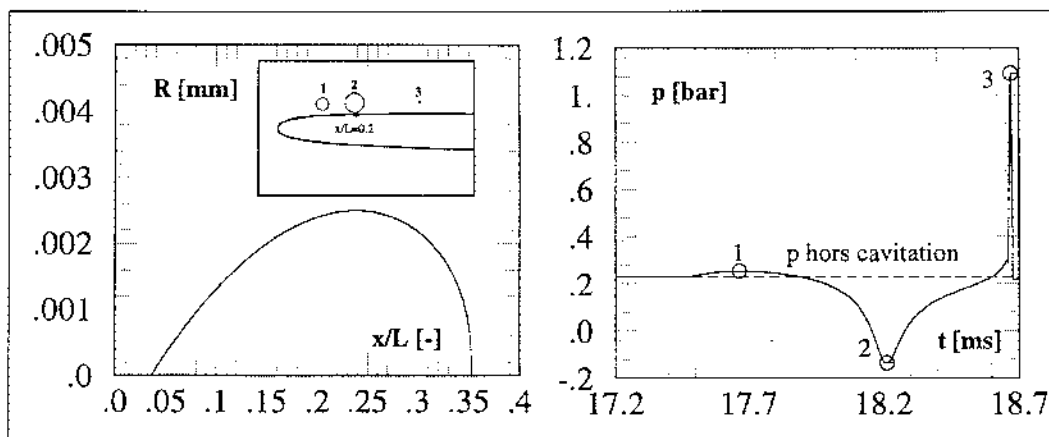


Figure 1 : Evolution du rayon d'une bulle sphérique le long d'une ligne de courant à l'extrados d'un profil NACA 009. Pression générée au cours du temps en un point à $x/L=0,2$.

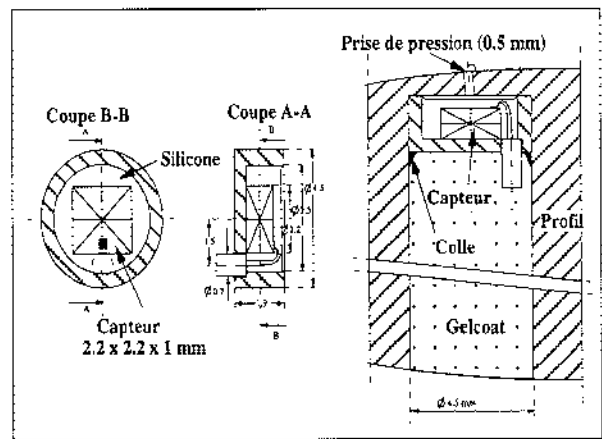
sence de cavitation à bulles puisque la portance résulte de cette distribution. Une approche pour étudier l'influence de la cavitation à bulles est de considérer que la modification du champ de pression est principalement due à la dynamique de la bulle en évolution le long de l'aubage [7],[8],[10]. On peut observer un exemple de calcul de la pression générée en un point du profil lors du passage d'une bulle sphérique à la figure 1.

Ces calculs de champ de pression basés sur la détermination d'un potentiel d'une sphère en expansion correspondent assez bien à la réalité, dans la mesure cependant où les cavités sont peu déformées et restent sphériques. L'amplitude des variations de pression est toutefois plus forte que celles que l'on peut mesurer [3], mais ce type de modèle nous permet une bonne approche du phénomène physique. D'une manière générale, on remarque une légère surpression due au grossissement, puis une dépression plus marquée avant le pic dû au collapsé. En présence d'un développement de cavitation à bulles sphériques, on peut donc assister à une légère baisse de la pression en moyenne. Pour des valeurs de σ inférieures, la dimension des bulles devient plus grande que l'épaisseur de fluide contenant les germes actifs, c'est-à-dire l'épaisseur où la dépression est suffisante pour activer les germes de cavitation. Les bulles ont donc tendance à s'aplatir jusqu'à former des hémisphères [1]. Cette tendance est évidemment assez fortement liée au nombre de Weber. Dans ce cas, la pression en paroi sous la bulle est naturellement égale à la pression de vapeur. Si le taux de germes ou la taille des bulles sont suffisants pour atteindre une saturation, la pression devient constante et égale à p_v . On peut donc caractériser trois zones différentes d'influence de la cavitation à bulles. La première est la zone où les bulles restent sphériques et la dynamique de la bulle génère les fluctuations de pression agissant sur la paroi. La seconde zone est la région où les bulles deviennent hémisphériques et la dépression sous les bulles est limitée à la valeur de la pression de vapeur. La dernière zone est une extension du dernier cas avec un contact des bulles entre elles. Il s'agit de la saturation pour laquelle la pression devient constante et égale à p_v . L'objectif de cet article est de présenter les résultats d'une expérience menée sur un profil bidimensionnel puis sur un modèle de turbine Francis pour vérifier ces différents points. L'expérience consiste en la mesure du champ de pression sur l'aubage pour différents régimes avec cavitation au moyen de capteurs de pression stationnaires embarqués.

II ■ DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

2.1. Mesures sur le profil NACA 009

Les essais sont menés sur le tunnel de cavitation à grande vitesse de l'IMHEF [5]. Le profil expérimental est un profil bidimensionnel NACA 009 de 100 mm de corde et 150 mm d'envergure tronqué à 90 % de sa longueur. 18 capteurs de pression absolue sont distribués sur l'extrados du profil. Le montage des capteurs sur le profil est illustré en figure 2. La gamme de mesure est de 0 à 100 bars. Chaque capteur possède sa propre alimentation et les sorties du signal de pression sont amplifiées et filtrées séparément. L'acquisition des signaux est effectuée au moyen de deux enregistreurs numériques d'une résolution de 12 bits. Le premier (Lecroy 8212a) permet l'acquisition simultanée de 32 signaux à une fréquence d'échantillonnage maximum de 5 kHz. Le second permet l'enregistrement simultané de 12 signaux à une fréquence maximum de 1 MHz (3 modules Lecroy 6810). L'étalonnage statique de ces capteurs est mené avec l'aube montée dans la section d'essai du tunnel de cavi-



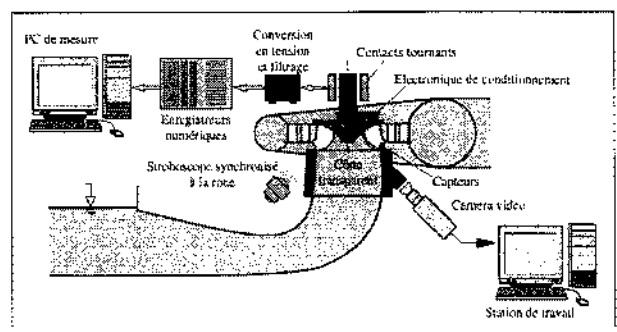
2. Montage des capteurs de pression.

tion en variant la pression statique de 0,3 à 10 bar. Une technique spéciale d'étalonnage dynamique a en outre été développée pour ce genre de capteurs embarqués. On génère une impulsion de pression dans la veine d'essai grâce au collapsé d'une bulle de vapeur générée au moyen d'une électrode. Les signaux des capteurs à étalonner sont comparés au signal de pression d'un capteur de référence Kistler 601 monté également dans la section d'essai. En calculant les fonctions de transfert et de cohérence entre les signaux des différents capteurs, on peut assurer la bande passante disponible de chacun des capteurs embarqués. Celle-ci va jusqu'à 15 ou 20 kHz pour l'ensemble des capteurs de ce type.

Durant toute la durée des expériences, un contrôle du taux de germes est effectué. La cavitation à bulles séparées est en effet impossible sans la présence de ces derniers. On procède donc à une injection de germes dans le tunnel de cavitation ainsi qu'à un contrôle de la concentration contenue dans l'eau d'essai. Les germes sont générés par une détente d'eau saturée en air dans une série de modules d'injection [2]. En variant le nombre de ces modules, on arrive à obtenir la concentration de germes de cavitation requise. La distribution obtenue est mesurée par un compteur de germes de cavitation [4] qui utilise l'effet Venturi pour la détection du grossissement explosif des germes.

2.2. Mesures sur le modèle de roue Francis

Les mesures sont effectuées sur un modèle de turbine Francis de vitesse spécifique $v=0,33$, ($nq=52$). Le modèle est installé sur la plate-forme de recherche de l'IMHEF qui permet des chutes d'essai allant jusqu'à 60 m à des débits-volumes maximums de



3. Chaîne d'acquisition.

1,5 m³/s. Les paramètres de mesure principaux comme le couple, le débit-volume, la chute, la vitesse de rotation, la température, etc. sont acquis en permanence pour déterminer des valeurs de la puissance et du rendement avec une précision de mesure globale inférieure à 0,5 %. Deux aubes de la roue sont équipées avec chacune cinq capteurs de type identique à ceux montés sur le profil bidimensionnel.

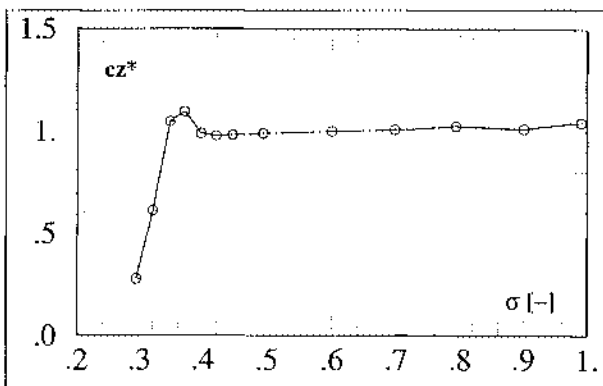
Ils sont positionnés près de la sortie et de la ceinture sur une section cylindrique de l'aube. Le système d'acquisition est le même que celui de l'expérience sur le profil bidimensionnel, l'électronique de conditionnement mise à part. Cette dernière est montée dans le plafond de la roue. Elle comporte deux amplificateurs à gain variable ainsi que deux multiplexeurs permettant la connexion à tous les capteurs embarqués. Les signaux de sortie sont convertis en fréquence pour minimiser les effets des perturbations électromagnétiques. La connexion du système de conversion en tension et d'acquisition avec les parties tournantes s'effectue au moyen d'un collecteur à contacts tournants. Les moyens d'enregistrements sont également les mêmes que pour l'expérience avec le profil bidimensionnel. La figure 3 présente un schéma de la chaîne d'acquisition.

III ■ RÉSULTATS ET ANALYSES

3.1. Profil NACA 009

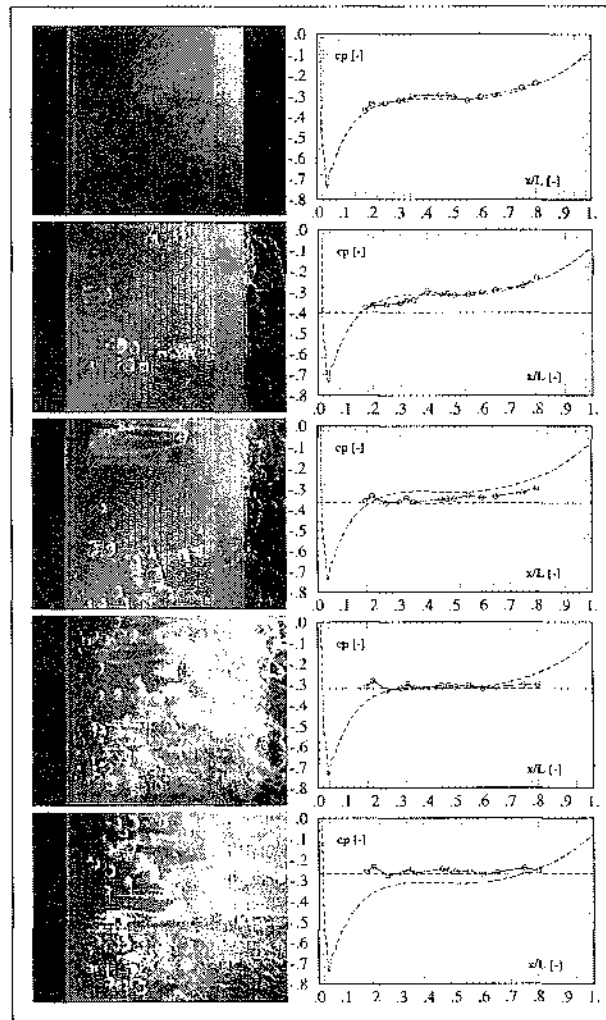
Une expérience précédente menée avec le même profil monté sur une balance hydrodynamique nous a permis de mesurer l'évolution du coefficient de portance c_p en fonction du coefficient de cavitation σ . On observe sur les résultats obtenus pour une vitesse de 20 m/s avec injection de germes de cavitation que la portance augmente dès l'apparition de cavitation. Après un maximum atteint pour une valeur de $\sigma=0,35$, les valeurs chutent brusquement. Ces résultats sont reportés à la figure 4.

L'expérience décrite ici a donc été menée pour mesurer la distribution de pression moyenne agissant sur l'aube dans les mêmes conditions que les mesures de portance. Dans le cas d'une vitesse d'écoulement de 20 m/s avec injection de germes de cavitation, les résultats obtenus sont présentés à la figure 5 et comparés avec la distribution de pression hors cavitation obtenue par un calcul d'écoulement Navier-Stokes. Les images correspondant à chaque σ sont également présentées sur la figure. Pour la plus haute valeur de σ , correspondant donc à un régime sans cavitation, on remarque une très bonne correspondance entre les calculs et les mesures. Lors de l'apparition de cavita-



4. Coefficient de portance normalisé c_p^* en fonction du coefficient de cavitation σ .

tion, une dépression apparaît dans la zone où le diamètre des bulles est maximum ($\sigma=0,4$ et $x/l=0,3$). Dans ce cas, les bulles observées conservent une forme relativement sphérique. Pour $\sigma=0,375$, ces bulles commencent à former des hémisphères et la dépression s'étend sur l'extrados du profil sans toutefois atteindre la valeur limite de la pression de vapeur. Pour des valeurs encore inférieures de σ , les pressions mesurées sont égales à la pression de vapeur. On peut en effet remarquer sur les images correspondantes que la saturation est atteinte. La principale constatation que l'on puisse faire est que la baisse de portance par rapport à la valeur hors cavitation va apparaître lorsque la pression de vapeur va limiter la dépression. Cela va être illustré par le passage de la valeur de σ au niveau du plateau de pression de la distribution sans cavitation. La valeur de ce plateau correspond à $c_p=-0,32$ et on remarque sur la figure 4 que c'est pour une valeur relativement identique que l'on observe la valeur maximum de la portance. On peut encore ajouter que le comportement du profil en présence de cavitation à bulles va dépendre essentiellement du lieu où la pression est minimum sur l'aube. Dans le cas où le $c_{p,min}$ est situé près du bord de fuite, ce qui correspond à de très faibles angles d'incidence, seule une baisse de portance va apparaître lorsque le développement de



5. Distributions de pression mesurées et calculées hors cavitation à l'extrados du profil NACA 009 pour les valeurs de σ suivantes : 1.0, 0.4, 0.375, 0.325, 0.275. (De haut en bas). La ligne interrompue représente la valeur de $-c_p$.

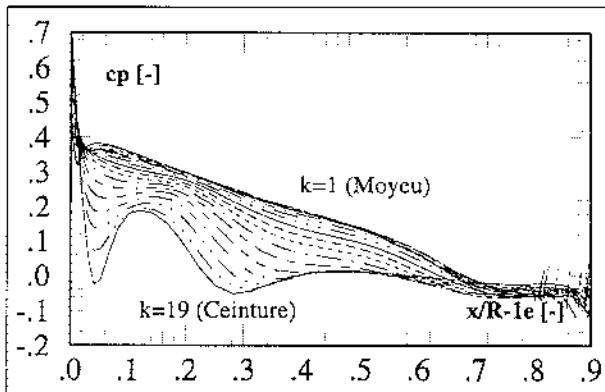
cavitation à bulles va entraîner une limitation de la pression à la valeur de la pression de vapeur. Dans le cas contraire où le $c_{p,min}$ est situé près du bord d'attaque, le développement de cavitation à bulles dans une zone de pression plus élevée que la pression de vapeur va pouvoir augmenter la portance en permettant une dépression accrue. La baisse de portance ne va apparaître que lorsque le σ sera assez bas pour que la présence de vapeur limite la dépression sur l'extrados.

3.2. La roue Francis

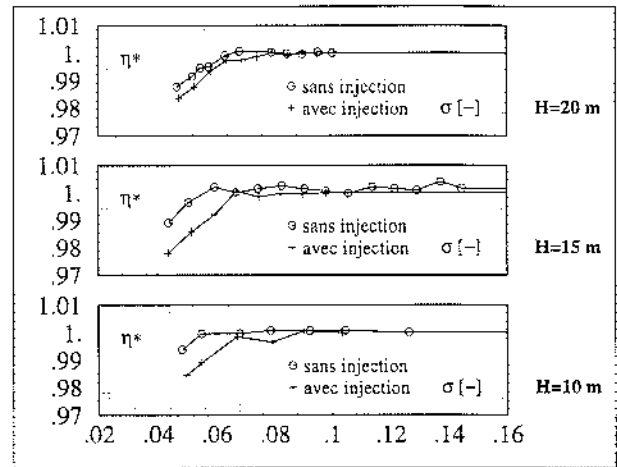
Généralement, la distribution de pression à l'extrados de l'aubage d'une turbine Francis au point de meilleur rendement correspond au premier cas que nous avons décrits dans le paragraphe précédent. L'angle d'incidence de l'écoulement est faible et la pression minimum est située près de la sortie de l'aubage. Les essais menés sur le modèle ont couvert ce même point de fonctionnement pour trois chutes d'essai différentes, 10 m, 15 m et 20 m. La répartition correspondante du coefficient de pression calculée à l'extrados des aubes dans le cas d'une chute de 15 m est présentée à la figure 6.

On peut y observer que le minimum de pression est situé à la sortie de l'aubage pour chaque ligne de maillage de calcul sauf dans la zone proche de la ceinture ($k=19$). D'après les analyses des mesures sur le profil bidimensionnel, le rendement doit donc seulement décroître avec le coefficient de cavitation dès l'apparition de cavitation à bulles. Remarquons en outre que la torche, pourtant assez sensible au taux de germes, ne va avoir aucun effet puisqu'elle n'existe quasiment pas à ce point de fonctionnement. Rappelons que le coefficient de cavitation utilisé habituellement dans le cas des turbines est le nombre de Thoma $\sigma = NPSE/E$. Les courbes de cavitation obtenues lors des essais sont illustrées en figure 7.

Les valeurs de rendement indiquées sont des valeurs relatives par rapport au rendement hors cavitation. On peut déterminer la valeur de σ_c qui correspond à la plus haute valeur du nombre de Thoma où le rendement est encore affecté. Cette valeur est la même dans le cas des trois différentes chutes d'essai et vaut 0,068. On peut donc en déduire les valeurs du coefficient local de cavitation χ_{lc} . La valeur obtenue pour la chute de 15 m est de 0,022. Ce résultat est très intéressant si l'on tente une comparaison avec les coefficients de pression calculés. On remarque en effet que la chute de rendement apparaît lorsque l'ensemble de la sortie de l'aubage a une valeur de c_p inférieure à $-\chi_{lc} = -0,022$. Cela correspond déjà à un important développement de cavi-

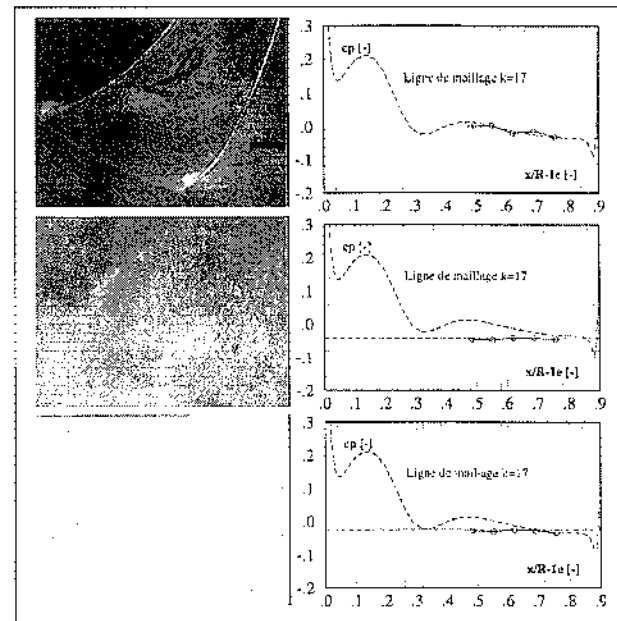


6. Résultats d'un calcul Navier-Stokes au point de meilleur rendement. La pression de référence est la pression de sortie du domaine de calcul.



7. Courbes σ - η' mesurées lors des essais sur modèle de turbine Francis.

tion de sortie. On peut noter également que les premières bulles apparaissent pour un σ valant 0,085. On peut déterminer la valeur du nombre de Thoma nécessaire pour que la pression de vapeur soit atteinte au point de pression minimum de l'aubage en se basant sur les résultats du calcul d'écoulement. On trouve une valeur de σ valant 0,11. On peut donc constater qu'il existe un certain retard de la baisse de rendement par rapport au moment où la pression de vapeur est atteinte sur l'aubage. Le développement de cavitation à bulles doit donc être déjà bien établi avant que le rendement ne vienne à chuter. Comme dans le cas du profil bidimensionnel, on peut tracer les résultats des mesures de pression avec la distribution calculée sur la ligne de maillage correspondant à la position des capteurs. La figure 8 illustre ces résultats qui nous montrent, tout comme dans le cas du profil bidimensionnel, une bonne concordance entre les cal-



8. Distribution de pression mesurée et calculée sur le filet $k=17$ de l'aube du modèle de la roue Francis pour les valeurs de σ suivantes: 0,43, 0,07, 0,06. $H=15m$. La ligne horizontale interrompue représente la valeur de $-\chi_{lc}$.

culs et les mesures dans le cas hors cavitation. Pour les mesures à des valeurs de σ inférieures, la distribution de pression va être modifiée par le développement de cavitation à bulles de manière identique à ce que l'on a pu mesurer sur le profil bidimensionnel. On remarque une dépression jusqu'à la pression de vapeur due à un développement de cavitation à bulles provoqué par le pic de dépression localisé à l'amont des capteurs. Ce pic n'existant que près de la ceinture, le couple global va tout de même baisser sans générer une augmentation du rendement hydraulique.

IV ■ CONCLUSION

Sur la base de ces deux expériences, nous avons pu mieux décrire les effets de la cavitation à bulles séparées sur les performances d'une turbine Francis. La baisse de rendement apparaît principalement lorsque la saturation de cavitation est atteinte. Cette saturation provoque une modification de la distribution de pression en limitant le champ de pression à la valeur de la pression de vapeur tout comme dans le cas de la cavitation à poche. Les performances de la machine ne sont pas fortement influencées par la partie de la machine où les bulles restent sphériques et le champ de pression modifié par la dynamique propre des bulles de vapeur. L'émission acoustique provoquée par l'explosion et le collapse des bulles est à l'origine d'un certain nombre d'autres problèmes qui justifient l'étude du champ de pression acoustique autour des bulles de cavitation. Cependant, dans l'optique d'obtenir une modélisation de la distribution de pression modifiée par la présence de cavitation à bulles, il est nécessaire de déterminer les parties de l'aubage où les bulles vont rester sphériques, devenir hémisphériques et où la saturation de cavitation à bulles va être atteinte. La localisation de ces différentes régions dépend évidemment du taux de germes de cavitation et du point de fonctionnement de la machine. C'est la raison pour laquelle l'étude de l'évolution des bulles près d'une paroi solide dans un champ de pression variable est importante dans le but de caractériser l'altération des performances d'une turbomachine hydraulique. La voie à suivre pour cette caractérisation dans le cas de la baisse de rendement due au développement de cavitation à bulles est certainement l'étude d'un modèle efficace de l'évolution d'une bulle dans une roue incluant sa déformation ainsi que le cas de la saturation. Les effets des différents types de bulles étant assez bien décrits, c'est maintenant la connaissance de la répartition de ces différents

types de développement de cavitation dans la roue qui va rendre possible la prédiction de la baisse de rendement des turbines Francis due au développement de cavitation à bulles séparées.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent particulièrement à remercier les membres du groupe de recherche en cavitation de l'IMHEF ainsi que son personnel technique. Ces recherches ont été possible grâce au soutien financier du NEFF "Nationaler Energie Forschung Fonds" et du PSEL "Fonds Suisses pour Projets et Etudes de l'Economie Electrique".

RÉFÉRENCES

- [1] Y. KOHN DE CHIZELLE et al., "Observations and scaling of travelling bubble cavitation" *J. Fluid. Mech.*, 293:99-126, 1995.
- [2] C. BRAND et al., "The IMHEF system for cavitation nuclei injection." Sao Paolo, 1992. AIRIH.
- [3] CH. ARN et al., "Experimental and theoretical study of the 2d blade lift alteration by traveling bubble cavitation." ASME, August 1995.
- [4] F. AVELLAN et al., "Theoretical and experimental study of the inlet and outlet cavitation in a model of francis turbine". pages 38-55, Stirling, AIRIH, August 1984.
- [5] F. AVELLAN et al., "A new high speed cavitation tunnel for cavitation studies in hydraulic machinery." volume 57, pages 49-60. ASME, 1987.
- [6] F. PEREIRA et al., "Dynamic calibration of transient sensors by spark generated cavity." Symposium of Bubble Dynamic and Interface Phenomena, September 1993.
- [7] J.P. FRANC et al. "La Cavitation, Mécanismes physiques et aspects industriels". Presses Universitaires de Grenoble, 1995.
- [8] S. KUMAR et al., "A study of pressure pulses generated by traveling bubble cavitation." *J. Fluid. Mech.*, 225:541-564, 1993.
- [9] B. GINDROZ. "Lois de Similitude dans les Essais de Cavitation des Turbines Francis." PhD thesis, EPFL, 1991.
- [10] J.T. DALEY R.T. KNAPP and F.G. HAMMILL. "Cavitation." Mac Graw Hill, New York, 1970.