



## SYMPOSIUM 1986 MONTRÉAL

### INFLUENCE DE LA CHUTE D'ESSAI ET DE LA NUCLEATION SUR LES PERFORMANCES EN CAVITATION DES MODELES DE TURBINES FRANCIS

F. AVELLAN	Ingénieur	Institut de Machines Hydrauliques et de
B. GINDROZ	Ingénieur	Mécanique des Fluides - Ecole Polytechnique
P. HENRY	Professeur	Fédérale de Lausanne
P. BACHMANN	Ingénieur	Sulzer-Escher Wyss
G. VULLIOUD	Ingénieur	Ateliers de Constructions Mécaniques de Vevey
M. WEGNER	Ingénieur	Neyrpic

#### RESUME

Une étude expérimentale de l'influence de la chute d'essai et d'une manière plus générale de la nucléation de l'eau sur l'altération des performances d'une turbine Francis avec le chiffre de cavitation a été menée dans quatre laboratoires différents. Cette étude, qui s'appuie sur des essais en cavitation au régime optimal de cinq modèles réduits de turbines de chiffre de vitesse s'étendant de  $v = 0.30$  à  $v = 0.59$ , permet de dégager deux éléments principaux pour les points de fonctionnement considérés.

- l'existence d'un seuil pour la chute d'essai ou la concentration de noyaux de cavitation au-delà duquel les performances en cavitation du modèle (courbes  $\eta - \sigma$ ) ne sont plus affectées par ces paramètres (phénomène de saturation)
- une évolution décroissante du niveau de ce seuil de saturation avec le chiffre de vitesse spécifique  $v$ .

#### SYNOPSIS

An experimental study was done in four different laboratories to determine the effect of the test head and, in a more general way, the water nuclei content on the performance of a cavitating Francis turbine. This study, which is based on cavitation tests at optimum operating point on five reduced model turbines with velocities ranging from  $v = 0.30$  to  $v = 0.59$ , revealed two main features:

- the existence of a threshold for the test head, or for the concentration of cavitation nuclei, beyond which the performance of the model ( $\eta - \sigma$  curves) is no longer affected by these parameters (saturation phenomenon)
- the saturation threshold decreased in the specific velocity range tested.

## 1. INTRODUCTION

Les essais sur modèles des turbines hydrauliques nécessitent une connaissance précise du rôle de la chute et de la nucléation de l'eau sur les performances en cavitation. Ainsi, les études présentées dans les références (1) et (2) avaient déjà relevé la grande influence de l'état de nucléation en particulier sur la détermination du sigma standard.

Dès 1961, dans leur étude des effets d'échelle en cavitation, Holl et Wiscligenus (3) proposent une règle de similitude sur le nombre de germes en évolution qui, appliquée aux machines hydrauliques, conduit à imposer entre l'eau du modèle et celle du prototype un rapport des concentrations de noyaux de cavitation égal au cube du rapport d'échelle géométrique (4). En admettant que soit connu l'état de nucléation de l'eau du prototype, le respect d'une telle condition, qui impose une injection sur modèle d'un très grand nombre de germes, ne garantit pas un comportement homologue en cavitation du modèle.

En effet, l'influence de la chute d'essai et des dimensions initiales des noyaux de cavitation sur la dynamique des bulles de cavitation, qui a été clairement définie dans la référence (5) empêche toute similitude géométrique exacte de l'évolution des dimensions des germes sur l'aubage.

Aussi est-il actuellement encore impossible de fixer des conditions d'essais précises des modèles. En particulier, le choix de la chute d'essai et de la qualité de l'eau (nombre de noyaux de cavitation) est encore totalement empirique.

L'importance scientifique et technique présentée par l'élaboration de critères fiables dans la détermination des deux paramètres précédents nous a conduits à regrouper au sein d'une même étude des points de vues et des moyens expérimentaux issus à la fois de trois constructeurs différents et d'une institution universitaire.

C'est ainsi que des expérimentations ont été conduites soit dans le laboratoire de l'Institut de Machines Hydrauliques et de Mécanique des Fluides (IMHEF) de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), soit dans les laboratoires des constructeurs suivants: Ateliers de Constructions Mécaniques de Vevey (ACMV), Neyrpic (NP) à Grenoble, Sulzer-Escher Wyss (SEW) à Zurich. Ainsi, à la diversité des plates-formes d'essais s'ajoute encore la conception hydraulique différente des modèles eux-mêmes, tout en restant dans le cas des turbines Francis.

## NOTATIONS ET DEFINITION

$D_{1e}$	diamètre de sortie de la roue modèle	[m]
$R = \frac{D_{1e}}{2}$	rayon de sortie de la roue modèle	[m]
H	chute d'essai	[m]
$\dot{V}$	débit	[m <sup>3</sup> /s]
N	vitesse angulaire de rotation	[rad/s]

$g = 9.81$	accélération de la gravité	$[m/s^2]$
$R_o$	rayon de noyaux de cavitation	$[\mu]$
$\psi = \frac{2gH}{R^2 N^2}$	chiffre d'énergie	$[-]$
$\phi = \frac{\dot{V}}{\pi R^3 N \phi^{1/2}}$	chiffre de débit	$[-]$
$v = \frac{V}{\psi^{3/4}}$	chiffre de vitesse ou vitesse spécifique	$[-]$
$\eta$	rendement	$[-]$
$\sigma$	chiffre de cavitation ou nombre de Thoma	$[-]$

## 2. ETUDES EXPERIMENTALES

### 2.1. Caractéristiques des modèles

Les essais ont été réalisés sur quatre modèles de turbines Francis et un modèle de pompe-turbine. Tous ces modèles sont caractérisés par leur vitesse spécifique ou chiffre de vitesse définie au point de meilleur rendement ( $\wedge$ ) et notée  $v_{\wedge}$ . Les valeurs correspondantes sont présentées dans le diagramme  $\phi - \psi$  de la figure 1, alors que leur dimension caractéristique et le nom du laboratoire dans lequel chacun des essais fut réalisé sont précisés dans le tableau de la figure 3.

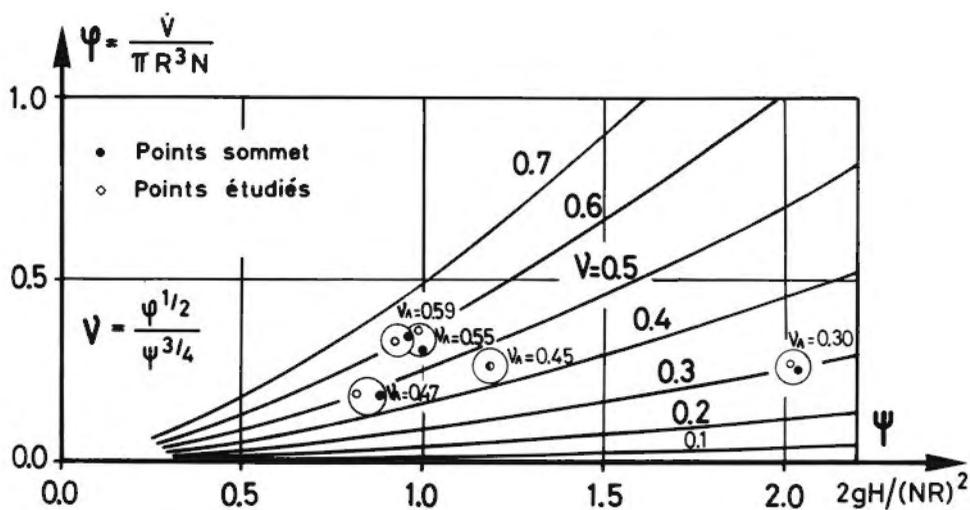


Figure 1 Points de fonctionnement des machines étudiées

## 2.2. Conditions et procédure des essais

Les points de fonctionnement analysés dans le cadre de cette étude sont reportés sur la figure 1; ils ont été délibérément choisis au voisinage immédiat du point  $\lambda$ , ce choix devant permettre, dans une étape future, de coupler les résultats expérimentaux avec ceux issus de l'application d'un code de calcul d'écoulement. Seul le modèle  $v_\lambda = 0.55$  a fait l'objet d'un essai complémentaire à  $\phi/\phi_\lambda = 1.15$  tout en conservant  $\psi/\psi_\lambda = 1.0$ .

La recherche des influences conjuguées de la chute d'essai et de la nucléation de l'eau sur l'évolution des caractéristiques de rendement et de débit en fonction du coefficient de cavitation  $\sigma$  a conduit, dans un premier temps, à réaliser sur tous les modèles des essais à 2, voire 3 chutes et ceci sans et avec injection de germes de cavitation. Pendant chacune des séries de mesures correspondantes, la chute a été maintenue parfaitement constante. Pour les modèles  $v_\lambda = 0.450$  et  $v_\lambda = 0.47$  et pour l'une des chutes, ces essais ont été complétés en faisant varier graduellement la population des germes.

Les valeurs des chutes d'essais extrêmes ont été dictées par les caractéristiques propres aux différents modèles et plates-formes d'essais, limite de déformation du modèle et puissance installée pour la valeur maximum, accès aux faibles valeurs de  $\sigma$  pour la valeur minimum.

Le mode de génération des germes, de même que le système d'injection et le dispositif de comptage sont décrits dans la référence (6). Relevons cependant que pour être comptés, les germes doivent être d'un rayon supérieur à  $0.8 \mu\text{m}$  environ, le dispositif permettant alors de décrire avec précision la répartition des noyaux (nombre de germes, par unité de volume, de rayon supérieur au rayon  $R_0$  considéré).

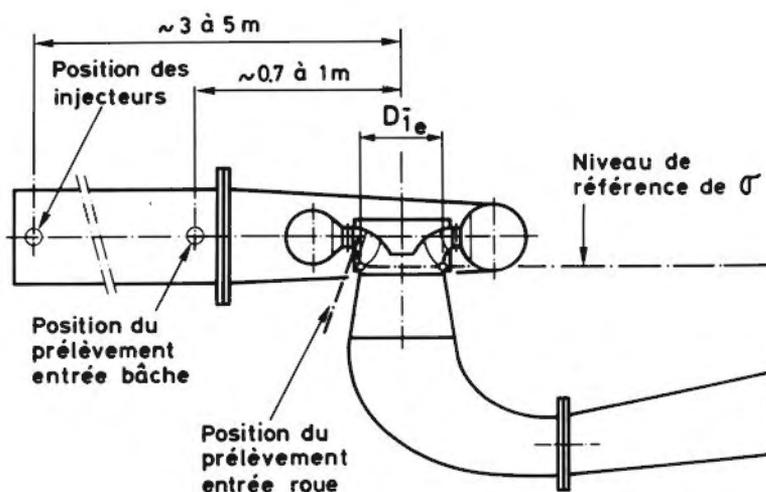


Figure 2 Implantation des injecteurs et du prélèvement des noyaux de cavitation dans le modèle

La figure 2 définit les positions d'injection et de comptage ainsi que la cote de référence choisie pour la détermination de  $\sigma$ .

Tous les essais ont été effectués en circuit fermé; la population de germes qui caractérise la condition "sans injection" n'est pas absolument uniforme puisqu'elle est relative à un dégazage plus ou moins poussé de l'eau, qui correspond néanmoins aux valeurs d'usage permettant en particulier de bonnes visualisations. Pour la condition "avec injection", la procédure momentanée d'injection a permis de retrouver des répartitions très semblables d'un essai à l'autre.

Après estimations statistiques, les résultats des comptages sont reportés graphiquement sous la forme d'une zone hachurée définissant un intervalle de confiance de 95%.

Les mesures hydrauliques proprement dites ont été réalisées conformément aux prescriptions du code CEI; chacune des plates-formes était équipée d'un système d'acquisition automatique des données, le temps d'intégration permettant d'assurer une répétabilité meilleure que 0.1%.

Toutes ces conditions d'essais et les caractéristiques des modèles sont résumées dans le tableau de la figure 3.

$v_{\lambda}$ [-]	$D_{1e}$ [m]	Lieu de l'essai	Date de l'essai	Chute d'essai [m]	Sans inject.	Avec inject.
					Nbre/cm <sup>3</sup> avec $R_0 > 0.8 \mu$	
F - 0.300	0.300	IMHEF	06.09.85	40	1.2	2.65
			11.09.85	30	0.78	2.27
			09.09.85	20	0.13	2.53
F - 0450	0.408	IMHEF	23.10.85	20	0.2	2.15
			24.10.85	8		
			24.10.85	6		
			04.03.86	6		
F - 0.550 ( $\phi/\phi_{\lambda}=1.15$ )	0.300	SEW	13.02.86	35	0.2	2.92
			13.02.86	20		
			13.02.86	20		
F - 0.593	0.408	NP	23.01.86	12 6	0.23	2.11
PT - 0.470	0.320	ACMV	15.01.86	25	0.4	0.78
			16.01.86	12	0.5	2.62
			07.03.86	12		

Figure 3 Tableau récapitulatif des essais effectués

### 3. RESULTATS

Les résultats présentés sont ceux relatifs à l'évolution, en fonction du chiffre de cavitation, du rendement  $\eta$  et du chiffre de débit  $\phi$  rapportés à leurs valeurs respectives  $\eta_0$ ,  $\phi_0$  hors cavitation, le chiffre d'énergie  $\psi$  étant maintenu constant.

En conjonction avec l'évolution de ces paramètres traduisant la performance du modèle, nous présentons les répartitions de noyaux de cavitation représentatives de l'état de nucléation de l'eau, nombre de germes d'un rayon supérieur ou égal à  $R_0$ .

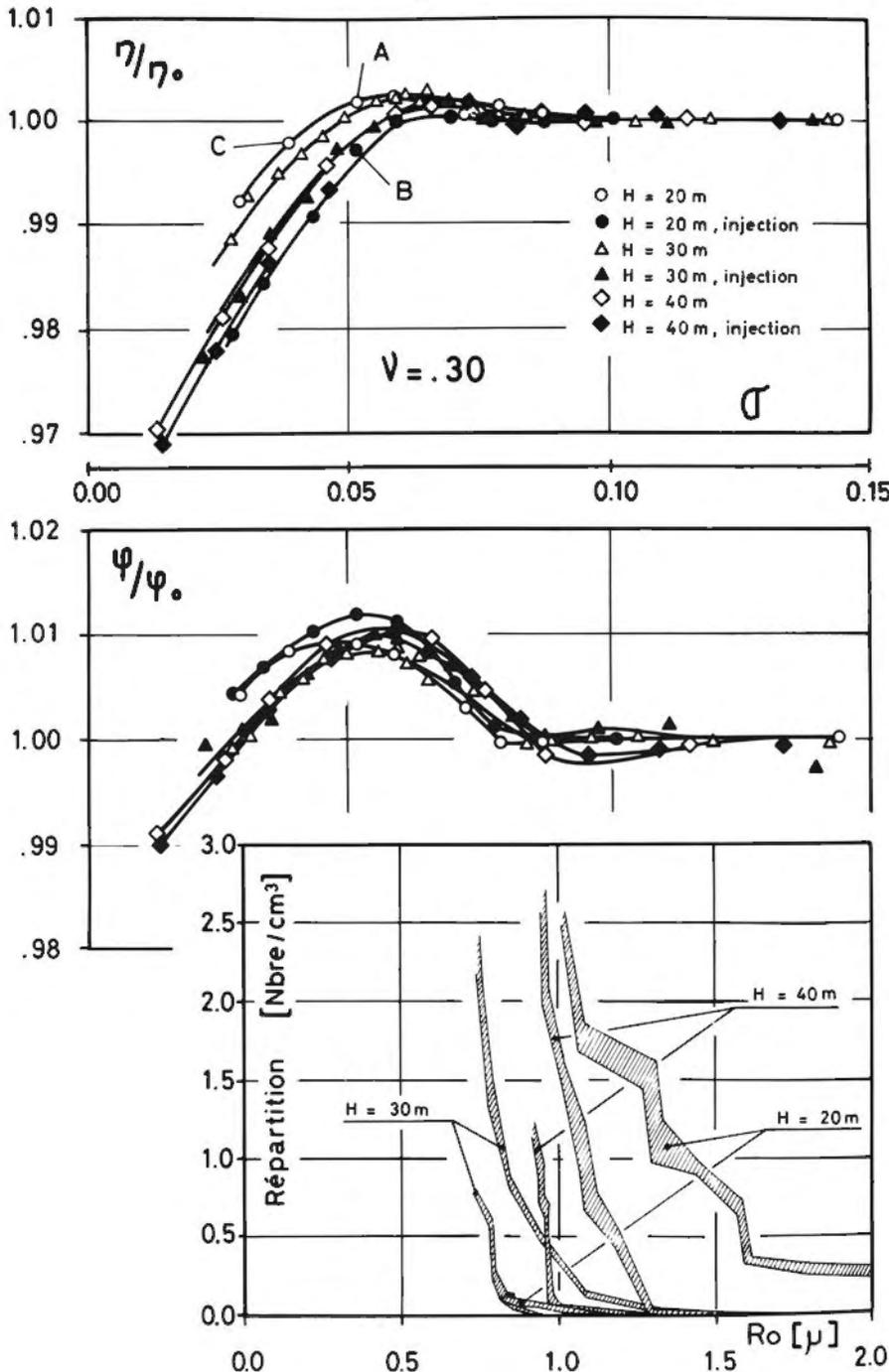


Figure 4

Essai modèle Francis

$\nu = 0.30$

$\phi_0/\phi_{\lambda} = 1.04$

$\psi/\psi_{\lambda} = .99$   
constant

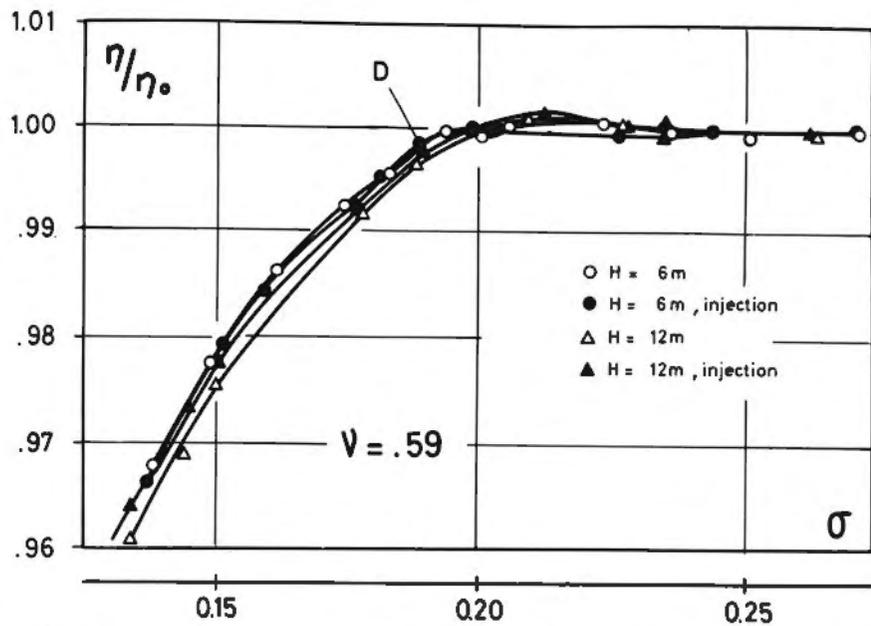
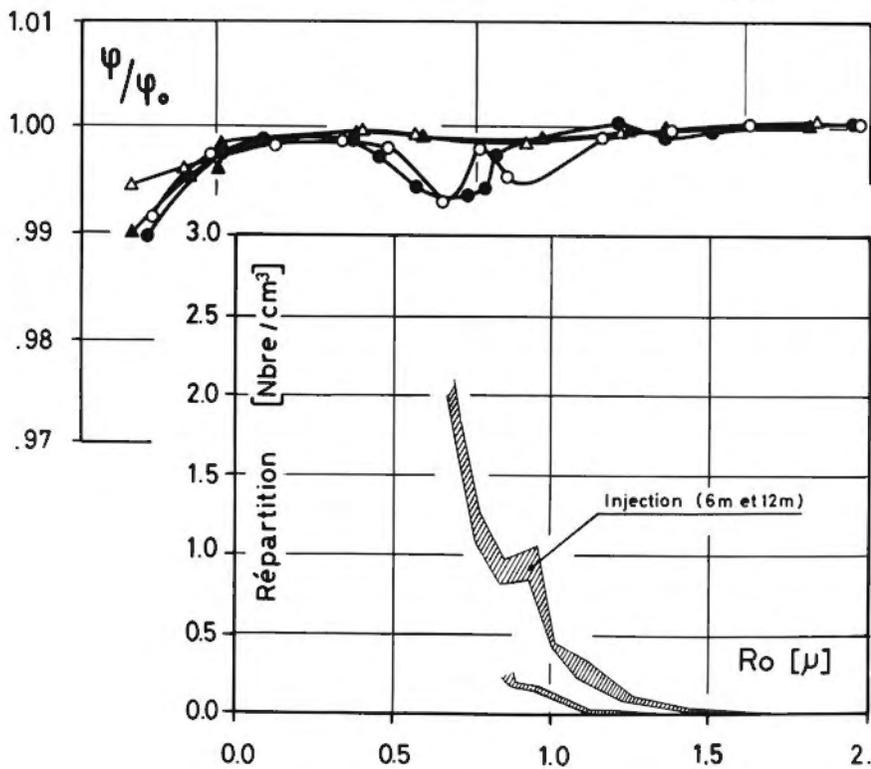


Figure 5  
Essai modèle  
Francis

$v = 0.59$

$\phi_o/\phi_n = .99$

$\psi/\psi_n = .96$   
constant



Sur les figures 4 et 5 nous avons reporté les résultats complets des essais effectués sur les deux machines  $v = 0.3$  et  $v = 0.59$  qui correspondent aux deux vitesses spécifiques extrêmes que nous avons essayées.

Ces essais, qui ont été conduits pour trois chutes différentes, 20 m, 30 m et 40 m dans le cas  $v = 0.3$  et deux chutes, 6 m et 12 m dans le cas  $v = 0.59$ , sont représentatifs du comportement constaté des autres modèles et pour lesquels nous pouvons distinguer deux cas.



Le second cas, qui est celui des machines rapides  $v = 0.55, 0.59$ , est celui pour lequel nous n'avons constaté aucune influence significative de la chute ou de la nucléation, que ce soit sur les performances, figure 5, ou sur l'étendue des figures de cavitation.

Afin de mettre en évidence la très forte influence de l'état de nucléation sur l'évolution des courbes  $\eta - \sigma$  nous avons effectué des essais où seule la concentration en noyaux de cavitation était variée, la chute étant maintenue constante durant ces essais, tout en étant choisie assez basse pour qu'une influence subsiste.

Sur les figures 7 et 8 sont respectivement portés les résultats obtenus dans le cas de la pompe turbine  $v = 0.47$  (fonctionnement turbine) pour une chute de 12 m et dans le cas du modèle Francis  $v = 0.45$  sous une chute d'essai de 6 m.

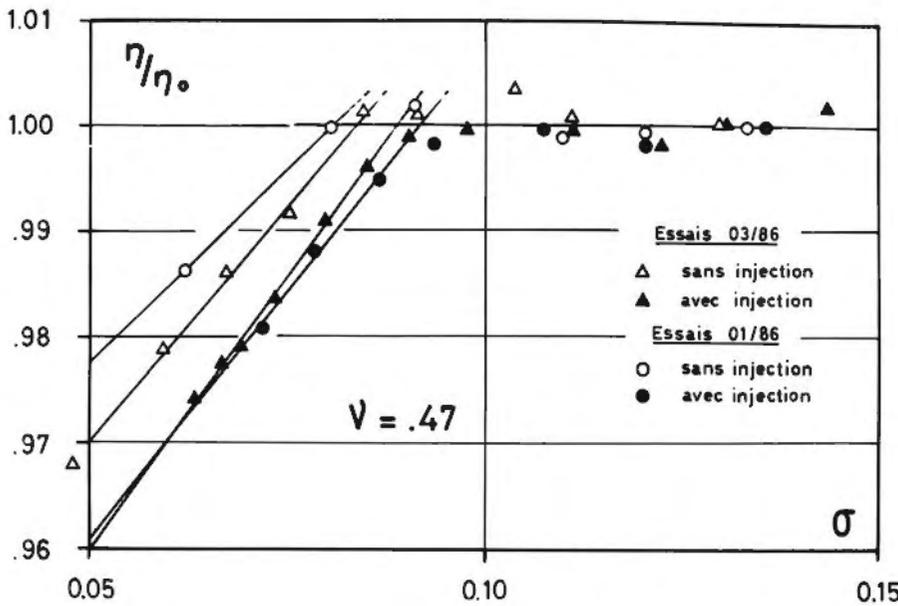
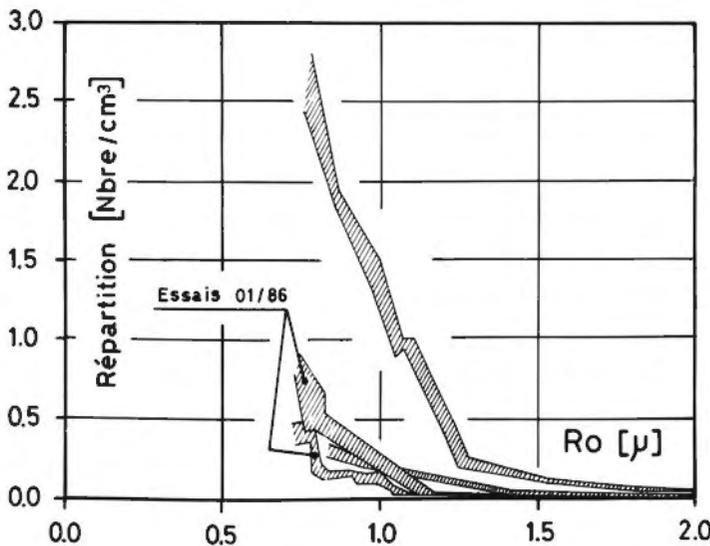


Figure 7  
Essai modèle pompe-turbine  $v = .47$ ; chute d'essai: 12 m  
 $\phi_o / \phi_\lambda = 1.03$   
 $\psi / \psi_\lambda = .92$   
constant



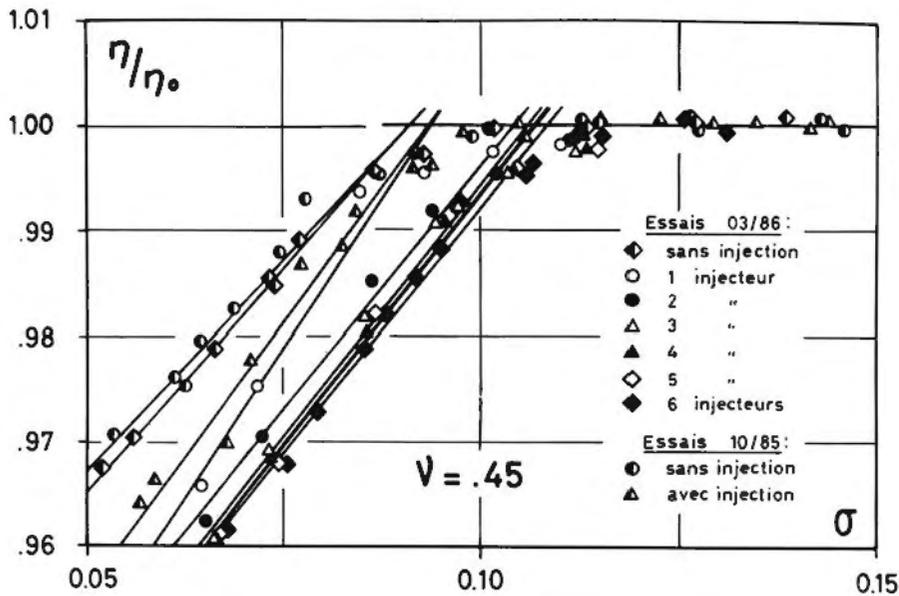


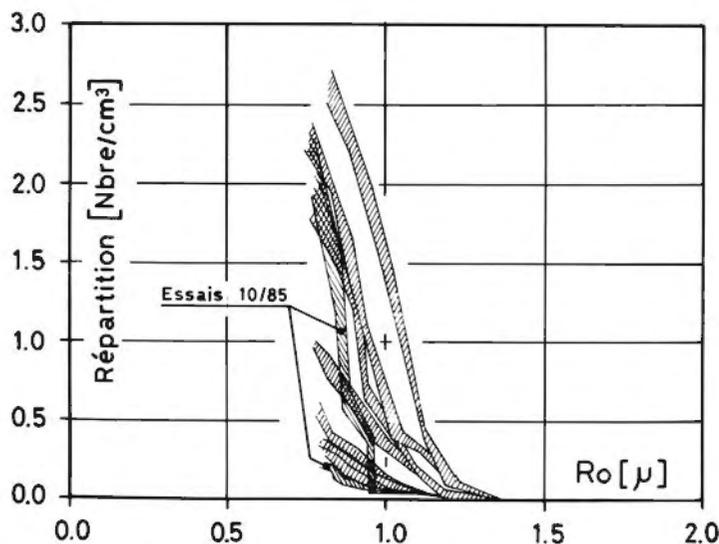
Figure 8

Essai modèle Francis  
 $v = 0.45$ ; chute d'essai: 6 m

$$\phi_o / \phi_\lambda = 1.00$$

$$\psi / \psi_\lambda = .92$$

constant



Sur ces figures, nous avons indiqué pour chaque état de nucléation les droites de régression linéaire obtenues systématiquement à partir de tous les points correspondant à une baisse de rendement d'au moins 0.5%. L'interprétation des diagrammes des différentes répartitions de germes obtenues doit être faite en tenant compte que les répartitions déterminées à une même date présentent une croissance monotone avec le nombre d'injecteurs mis en fonction. Ainsi, sur la figure 8, la répartition associée à l'essai du 03.86 avec 6 injecteurs, est celle qui correspond au plus grand nombre de germes.

Dans les deux cas de machine, nous constatons une très grande sensibilité des courbes  $\eta - \sigma$  avec le nombre de germes dans le cas sans injection, par contre il suffit d'une très légère augmentation de ce nombre pour que l'influence de l'état de nucléation ne se fasse plus sentir. Ainsi, sur la figure 7, nous pouvons observer qu'un faible accroissement du nombre

de germes (voir répartition avec injection du 01.86) par rapport à l'état dégazé (voir répartitions sans injection du 01.86 et du 03.86) a suffi pour annuler complètement l'influence de l'état de nucléation, une injection avec un grand nombre de germes (voir répartition avec injection du 03.86) ne modifiant plus la courbe  $\eta - \sigma$ .

#### 4. ANALYSE DES RESULTATS EXPERIMENTAUX

A l'examen de l'ensemble des essais effectués, deux faits convergents se dégagent immédiatement: d'une part, aucune influence de la nucléation et/ou de la chute d'essai n'a été constatée sur les deux machines "rapides" pour les chutes choisies ( $v = 0.55$  et  $0.59$ ), d'autre part un seuil semble exister aussi bien pour la chute d'essai que pour l'état de nucléation au-delà duquel le rendement en fonction du chiffre de cavitation n'est plus affecté.

##### 4.1. Rôle de la vitesse spécifique

La nature des figures de cavitation au point de fonctionnement sommet est différente selon que nous considérons des turbines Francis lentes ou rapides.

Dans le cas des machines lentes, la baisse de rendement est provoquée par le développement d'une cavitation de sortie à bulles séparées, voir photo A de la figure 6. Comme les études précédentes (5) l'ont indiqué, cette cavitation, très dépendante de l'état de nucléation et de la chute, est due à une dépression, sans gradient important, située à la sortie de l'extrados de l'aubage. Quand le chiffre de vitesse augmente, les basses pressions dans la roue se font de plus en plus sous la forme de pics de dépressions profonds provoqués par des écarts d'incidence au bord d'attaque des aubes et/ou par des écoulements tridimensionnels à l'intersection de l'aube et de la ceinture. La cavitation apparaît alors sous la forme de queues qui prennent naissance à l'entrée de l'aubage, voir la photo D de la figure 6. Or, comme nous l'avons déjà constaté (5), ce type de cavitation est très peu affecté par des injections et par des variations de chute car la dépression est suffisante pour faire éclater les germes de faibles dimensions d'une eau dégazée.

##### 4.2. Phénomène de saturation

L'existence d'un seuil au-delà duquel aucune influence notable de la chute d'essai ne se fait sentir est manifeste sur la figure 4, toutes les courbes quel que soit l'état de nucléation de l'eau d'essai ont tendance à converger vers la même limite.

Nous définissons  $\sigma_{\text{standard}}$  par la valeur de  $\sigma$ , correspondante à  $\eta/\eta_0 = 1$ , atteinte par les droites de régression définies en 3. Pour chacun des essais nous avons reporté sur la figure 9 cette valeur  $\sigma_{\text{standard}}$  en fonction de la chute d'essai. De cette représentation, en regroupant les essais relatifs à chacun des modèles, nous pouvons déduire que:

- cette augmentation de  $\sigma_{\text{standard}}$  est soumise à une "saturation" c'est-à-dire qu'au-delà d'une certaine chute d'essai, sa valeur ne change plus;

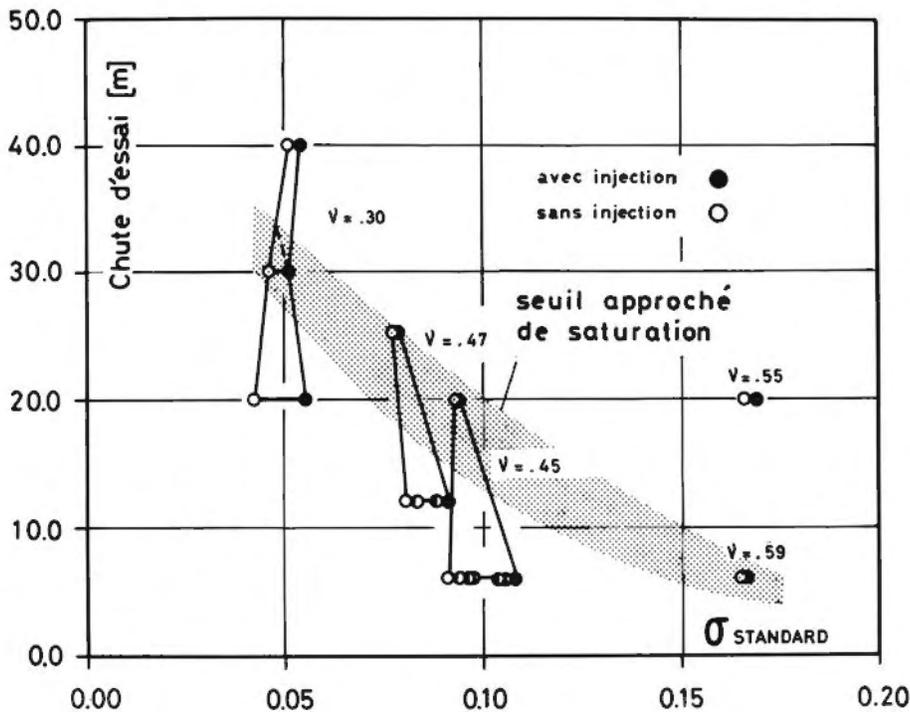


Figure 9  
Influence de la chute d'essai pour la détermination de  $\sigma_{\text{standard}}$  au point de fonctionnement optimal

bien que le nombre de chutes testées ici soit un peu insuffisant pour le prouver absolument, nous voyons néanmoins apparaître cet effet de saturation pour  $\nu = 0.45$  et  $\nu = 0.30$ . Quant à  $\nu = 0.59$  et  $\nu = 0.55$ , l'absence d'influence de la chute s'explique par le fait que celle-ci est déjà égale ou supérieure à la chute dite de saturation.

- la chute d'essai de saturation diminue visiblement lorsque  $\nu$  augmente, ce qui suggère une influence de l'évolution des pressions dans la machine sur le volume et la position des cavités (telle qu'elle a été présentée en 4.1).

Si nous comparons maintenant cette chute d'essai de saturation sur modèle avec la chute d'utilisation habituelle sur des prototypes de dimension moyenne ou grande, nous vérifions que la chute de saturation reste très inférieure à celle du prototype. Dans le cas d'une relation statistique classique entre  $H$  et  $\nu$ , ce rapport est inférieur à 30% dans la gamme des  $\nu$  que nous avons testée. Même si ce chiffre reste très approché, il a l'intérêt de montrer que la recherche d'une "chute prototype" pour les essais sur modèle n'a pas de signification scientifique sur le plan des mesures considérées dans cette contribution.

Les essais effectués avec différentes injections sur le modèle  $\nu = 0.45$  nous permettent de suivre cette même tendance à la saturation avec le nombre de germes. Sur la figure 10, nous avons indiqué la variation de  $\sigma_{\text{standard}}$  et de  $\sigma_{-3\%}$  (valeur de  $\sigma$  correspondante à une perte de rendement de 3%) en fonction du nombre de germes de rayon supérieur à  $.95 \mu$  et  $.96 \mu$ . Le choix de ces deux dimensions correspond à une évolution monotone des deux valeurs de  $\sigma$  pour la plus grande, alors que pour des dimensions plus faibles, nous perdons toute cohérence dans l'évolution de  $\sigma$ . Ceci permet de définir cette dimension de  $.96 \mu$  comme étant caractéris-

tique de l'état de nucléation et de mettre en évidence un seuil de saturation de l'ordre de 0.3 germes par  $\text{cm}^3$  associé à ce rayon pour la machine considérée.

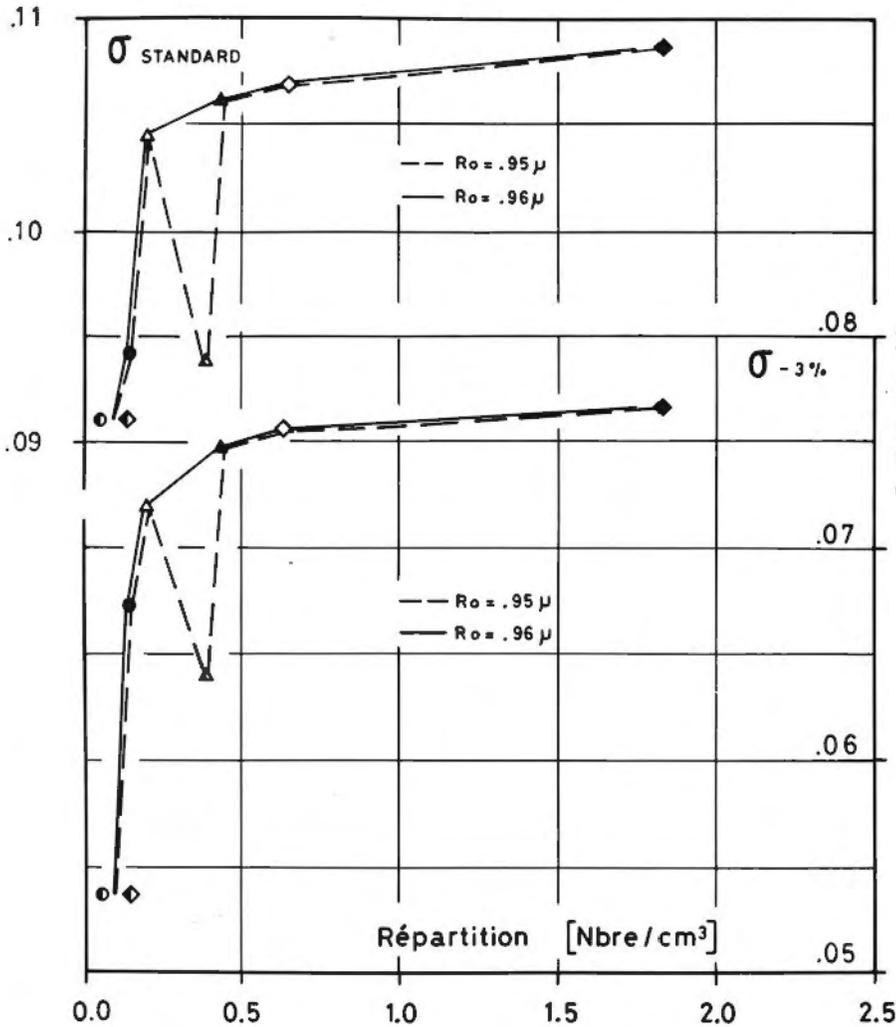


Figure 10  
Influence de la concentration des germes sur  $\sigma$

## 5. CONCLUSION

Une étude expérimentale de l'influence de la chute d'essai et d'une manière plus générale de la nucléation de l'eau sur l'altération des performances d'une turbine Francis avec le chiffre de cavitation a été menée dans quatre laboratoires différents. Cette étude, qui s'appuie sur des essais en cavitation au régime optimal de cinq modèles réduits de turbines de chiffre de vitesse s'étendant de  $v = 0.30$  à  $v = 0.59$ , permet de dégager deux éléments principaux pour les points de fonctionnement considérés.

— Un phénomène de saturation dans la population de germes actifs en évolution dans la machine a été découvert et vérifié dans tous les cas étudiés. Il consiste dans l'existence d'un seuil au-delà duquel les performances de la turbine en fonction du chiffre de cavitation ne sont plus

affectées. Ce seuil peut être atteint soit en injectant suffisamment de germes en amont du modèle, soit en augmentant suffisamment la chute d'essais pour que la population des germes de cavitation de très petites dimensions soit activée. Notre étude a permis de déterminer à la fois les valeurs de chute d'essai et de concentration en germes nécessaires pour atteindre ce seuil de saturation. De plus, nous avons pu définir une dimension de germes représentative de l'état de nucléation dans un des cas.

Une conséquence scientifique découle d'abord de la vérification de ce phénomène, à savoir que la loi de concentration en germes selon  $\lambda^3$  ne se justifie pas. La seule loi de similitude applicable entre modèle et prototype est d'obtenir sur modèle un état saturé en germes, ce qui devrait être également le cas pour l'eau du prototype.

Deux conséquences industrielles apparaissent également:

- les chutes d'essai correspondant à la saturation trouvées pour les différents modèles sont très inférieures à celles des prototypes correspondants, et l'on ne voit donc pas l'intérêt qu'il y aurait à rechercher sur modèle des chutes voisines de celle du prototype
- pour un modèle de chiffre de vitesse donné, le seuil de saturation peut être atteint soit en augmentant la chute d'essai, soit en augmentant la population de germes actifs. Dans les deux cas, le résultat de l'essai en cavitation sera identique.

■ Les chutes de saturation classées en fonction de la vitesse spécifique  $v$  font apparaître une évolution décroissante. Cette décroissance s'explique hydrodynamiquement par l'évolution des répartitions de pression sur les aubes de la roue et aussi par l'évolution de l'état de pression à l'entrée de cette roue. Le nombre et la répartition de ces chutes de saturation mesurées sont encore cependant insuffisants pour déterminer la frontière exacte entre les deux domaines de chutes en fonction de  $v$ .

Les perspectives de la recherche s'ouvrent d'une part dans la direction du calcul (histoire des germes le long des aubes) et d'autre part vers de nouvelles expérimentations, en particulier dans le cas des fortes charges qui déterminent le calage industriel des machines.

#### REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier vivement les Ateliers de Constructions Mécaniques de Vevey, la société Neyrpic et la société Sulzer Escher Wyss pour avoir soutenu activement le travail présenté. Notre gratitude s'adresse également au personnel d'essais des différents laboratoires concernés qui ont permis la réalisation des études expérimentales.

## REFERENCES

- 1 P. Henry, "Influence of the amount of bubble nuclei on cavitation tests of a Francis turbine"  
Cavitation and Polyphase Flow Forum, ASME Symposium, Fort Collins, June 12-14, 1978.
- 2 P. Henry, Y. Lecoffre, P.Y. Larroze, "Effets d'échelle en cavitation"  
10th IARH Symposium, Tokyo, 1980.
- 3 J.W. Holl, G.F. Wisclienus, "Scale effects on cavitation"  
ASME, Journal of Basic Engineering, 1961, pp. 385-398.
- 4 Y. Lecoffre, "Contrôle de la nucléation d'une eau en moyens d'essai"  
8th IARH Symposium, Leningrad, 1976.
- 5 F. Avellan, P. Henry, "Theoretical and experimental study of the inlet and outlet cavitation in a model of a Francis turbine"  
12th IARH Symposium, Stirling, 1984.
- 6 Y. Lecoffre, J. Marcoz, "Essais en cavitation à bulles séparées"  
Méthodes de contrôle-Venturi de mesure de germes  
La Houille Blanche, No 5 - 1978

## REFERENCES

