



SYMPOSIUM 1980 TOKYO

EFFETS D'ECHELLE EN CAVITATION

P. Henry

Ecole Polytechnique
Fédérale de Lausanne
Suisse

Y. Lecoffre

NEYRTEC
France

P. Y. Larroze

NEYRPIC
France

Summary

The article begins by a theoretical analysis of the causes of the scale effect found in cavitation observations and measurements. This analysis shows up the advantage of checking the active nuclei in flow, with similitude having been demonstrated with respect to prototype conditions.

Cavitation experiments are performed on a Francis type turbine model of average specific speed, with two test heads and with and without admission of active nuclei. The results confirm the existence of the scale effect on the various forms of cavitation and confirm that this scale effect disappears when a suitable quantity of active nuclei are introduced into the flow. Considerable variations of critical sigma, where performances fall off, are to be particularly observed, indicating the practical advantage of achieving control of the nuclei spectrum in scale model tests.

Résumé

On présente d'abord une analyse théorique des causes de l'effet d'échelle existant dans les mesures et observations de cavitation, analyse qui indique l'intérêt d'un contrôle des germes actifs dans l'écoulement avec une similitude démontrée par rapport aux conditions du prototype.

Des expériences de cavitation sont conduites sur un modèle réduit de turbine Francis de vitesse spécifique moyenne, avec deux chutes d'essai d'une part, avec et sans injection de germes actifs d'autre part. Les résultats confirment l'existence de l'effet d'échelle sur les diverses formes de cavitation et confirment que cet effet d'échelle disparaît lorsque des germes convenablement dosés sont injectés dans l'écoulement. Des variations importantes du sigma standard d'altération des caractéristiques sont observées en particulier qui indiquent l'intérêt pratique d'établir la maîtrise du spectre des germes dans les essais sur modèle réduit.

OBJET DE L'ETUDE

Quatre similitudes sont utilisées en général dans l'expérimentation de la cavitation sur les modèles réduits de turbines hydrauliques, à savoir :

- . La similitude géométrique $L/D = \text{constante}$
- . La similitude d'EULER $H/V^2 = \text{constante}$
- . La similitude de THOMA $\sigma = \text{constante}$
- . La similitude de FROUDE $H/D = \text{constante}$

Les deux premières similitudes se justifient entièrement sur le plan théorique et n'appellent pas de commentaires.

La similitude de THOMA {1} n'est justifiée qu'au début théorique de cavitation c'est-à-dire lorsque la pression minimum atteint la tension de vapeur. L'égalité des valeurs de σ garantit alors que l'écoulement atteindra la tension de vapeur en un point géométriquement homologue sur modèle et sur prototype. Mais dès que les pressions descendent au-dessous de la tension de vapeur, la similitude de THOMA n'a de démonstration théorique qu'en l'absence de cavitation. Donc, dès que la cavitation se développe, la similitude de THOMA devient insuffisante par principe.

Concernant la similitude de FROUDE, il est bien clair qu'elle présente l'intérêt de garantir la conservation des gradients de pressions $\partial P/\partial L$ dans la direction horizontale et la conservation des gradients de pressions $\partial P/\partial Z$ dans la direction verticale. Cette similitude est donc très utile lorsqu'il s'agit d'observer simultanément des phénomènes de cavitation à des altitudes différentes (torches dans les aspirateurs ...). Cependant la similitude de FROUDE ne corrige pas l'insuffisance de la similitude de THOMA déjà constatée, c'est-à-dire la non-représentation des pressions absolues minimales.

L'ensemble des remarques ci-dessus permet de conclure que des effets d'échelle perturbateurs doivent exister dans les expérimentations de cavitation lorsqu'on utilise les similitudes classiques. Ces effets d'échelle sont en effet constatés par tous les expérimentateurs, le plus simple à détecter consistant à mesurer sur un modèle réduit le σ standard d'altération des caractéristiques avec deux chutes d'essais différentes : les valeurs mesurées du σ standard présentent un écart significatif dans les conditions habituelles d'essais {2}.

L'objet de l'étude présentée ici consiste à répondre à la question suivante :

Une similitude nouvelle basée sur l'examen des populations de germes (nuclei) dans le milieu fluide, permet-elle de compléter les similitudes classiques et d'éliminer les effets d'échelle dans les observations de cavitation ?

Les limites de l'étude sont fournies par les précisions ci-dessous :

- . Les effets d'échelle étudiés sont provoqués par une variation de chute sur un modèle réduit de turbine Francis de vitesse spécifique moyenne. La première chute valant 8 m correspond à l'application de la similitude de FROUDE pour un prototype dont le diamètre de référence du rotor vaut environ 5 m. La deuxième chute vaut 16 m.
- . Les effets d'échelle concernent d'une part le début de cavitation visible sur l'extrados des aubes de la roue dans la zone de sortie, d'autre part la cavitation développée provoquant l'altération des caractéristiques (σ standard). Les phénomènes d'érosion ne sont pas mesurés ni interprétés.
- . Le fonctionnement hydraulique choisi est très voisin de l'optimum, de manière à observer des cavitations dites "à bulles séparées" et non "à poches" ou "à lames". L'altitude utilisée dans le calcul du σ peut donc être choisie ce qui élimine toute correction parasite dans les valeurs de σ lorsque la

chute varie.

La similitude nouvelle recherchée consiste à introduire dans le milieu fluide une population de germes (nuclei) déterminée tant en nombre qu'en dimensions par des lois démontrées sur le plan théorique.

Bien entendu, les auteurs considèrent que les expériences présentées ici sont une étape et non une fin dans la compréhension des lois de similitude de la cavitation.

ANALYSE THEORIQUE

Dans ce paragraphe, ne sera abordée que la cavitation à bulles séparées, la seule qui soit responsable, dans l'essai décrit ci-dessous, de la variation de chutes de rendement de la turbine. Seront analysés d'une part, le début de cavitation et l'influence des germes contenus dans l'eau sur la valeur du σ d'apparition ; d'autre part, dans un état de cavitation plus développé, l'influence de l'ensemble du spectre de germes sur la chute de performances.

a/ Début de cavitation

La valeur du σ d'observation du début de cavitation correspondant à l'apparition des premières bulles de vapeur sur le profil peut différer notablement suivant la valeur de la chute d'essais, l'installation utilisée et son réglage et les critères retenus par l'expérimentateur pour l'évaluer.

Influence directe du spectre de germes

D'un point de vue théorique, ce début de cavitation peut se produire dès qu'une partie de la surface du profil est soumise à une pression égale à la tension de vapeur, de manière continue ou intermittente. On définit alors un début de cavitation par le paramètre de similitude classique σ_i basé sur la tension de vapeur du liquide :

$$\sigma_i = \frac{P_i - P_v}{\frac{1}{2} \rho V_i^2} \quad \text{ou} \quad \sigma_i = \frac{H \Delta h_i - H_v}{\Delta h_i}$$

En toute rigueur, ce paramètre doit tenir compte des effets dus à la gravité, la pression de référence étant corrigée de la hauteur d'eau comprise entre le point de prise de pression et la zone de cavitation. Cet effet est d'autant plus marqué que le nombre de FROUDE est faible.

Les difficultés rencontrées pour évaluer avec précision la valeur de σ_i sont de deux ordres : D'une part lorsque le début de cavitation est détecté visuellement, il est nécessaire que les bulles formées aient un diamètre suffisant pour qu'elles soient visibles, ce qui implique qu'elles soient soumises pendant un certain temps à une pression inférieure à la tension de vapeur. Il en résulte une valeur de σ_i mesurée toujours inférieure au σ_i réel, cet écart ne dépendant pas théoriquement de la chute pour une valeur de diamètre de bulles donnée. D'autre part, et cet effet est beaucoup plus important que le précédent, la valeur de σ_i mesuré en cavitation à bulles dépend du spectre de germes contenus dans le liquide, la cavitation ne pouvant se produire que lorsque la pression locale sur le profil est inférieure à la pression critique des germes les moins résistants, cette pression P_s étant égale à la pression minimale à laquelle ils doivent être soumis pour donner naissance à une bulle de vapeur. Le début de cavitation ne doit plus alors être basé sur la tension de vapeur du liquide mais sur la valeur de la pression P_s appelée aussi "susceptibilité" (3) :

$$\sigma_i = \frac{P - P_s}{\frac{1}{2} \rho V^2} \quad \text{ou} \quad \sigma_i = \frac{H \Delta h_i - H_s}{\Delta h_i}$$

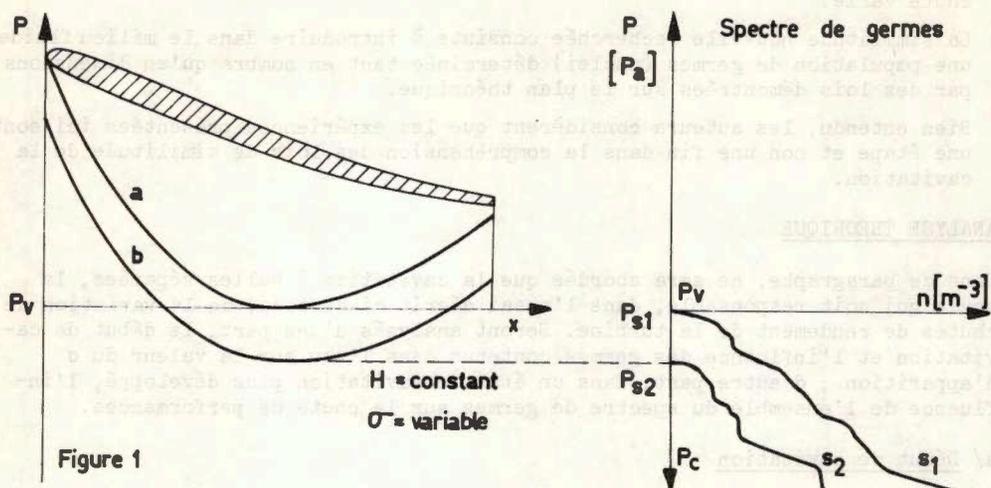


Figure 1

La figure 1 illustre ce phénomène. Elle représente une répartition de pression a sur un profil telle que son minimum soit égal à P_v . Lorsque le profil est soumis à un écoulement de liquide dont le spectre de germes est représenté en s_1 , de susceptibilité $Ps_1 = P_v$, son début de cavitation réel sera le même que le début de cavitation théorique, la valeur de Ps_1 étant égale à P_v .

Par contre, si le liquide utilisé lors des essais possède un spectre de germes représenté en s_2 , de susceptibilité Ps_2 , la cavitation sur le profil ne pourra apparaître que lorsque la pression locale atteindra la valeur Ps_2 et donc pour une valeur de σ , basée sur P_v , inférieure. En revanche, la valeur de σ_i , rapportée à Ps_2 sera identique à la précédente. La répartition de pression correspondante est représentée sur la courbe b .

Il est à remarquer que dans ce dernier cas, les bulles de vapeur formées au point de détection du début de cavitation seront d'un diamètre nettement plus élevé que dans le cas de la courbe a associée au spectre s_1 .

Influence de la chute

On constate fréquemment que le début de cavitation, basé sur P_v , est influencé par la chute d'essais, la tendance généralement rencontrée étant que le σ d'apparition diminue lorsque la chute est réduite.

Ce phénomène peut également être assez aisément expliqué par analyse du spectre de germes. Si l'on considère, à titre d'exemple, un profil fonctionnant au même σ de cavitation, pour deux chutes différentes, les courbes de répartition de pression correspondantes seront telles que sur la figure 2. Si l'on suppose par ailleurs que le spectre de germes est le même dans les deux expériences, la susceptibilité de l'eau Ps étant comprise entre les minimum de pression des deux courbes, on ne constatera aucune cavitation lorsque le profil est à basse chute (H_1). Par contre, pour la chute H_2 une partie du spectre sera excitée et le profil sera soumis à un état de cavitation situé au-delà du seuil d'apparition dans le cas de la figure.

Les écarts ainsi constatés sont évidemment d'autant plus importants que l'eau utilisée est appauvrie en germes et que la chute la plus basse est faible.

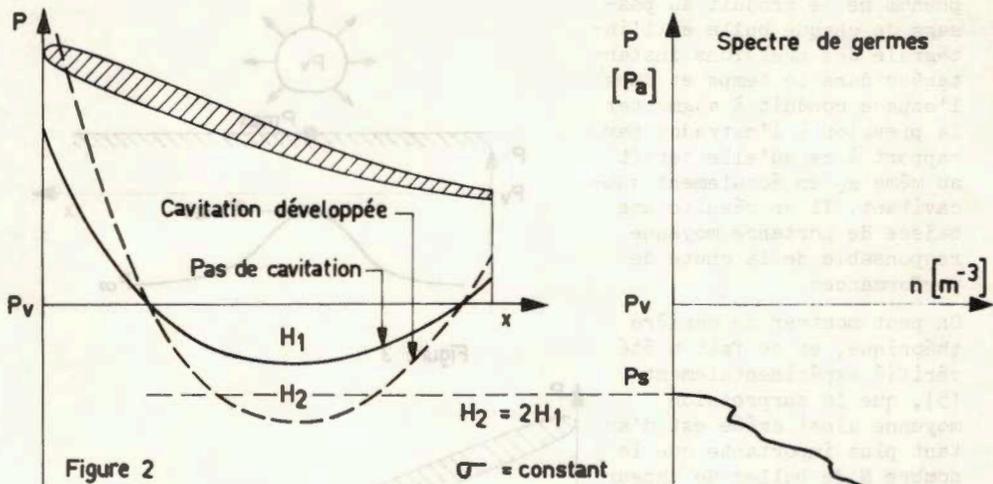


Figure 2

$\sigma = \text{constant}$

. Similitude

En conclusion, la détermination du seuil de cavitation impose que l'on connaisse la valeur de P_s de l'eau utilisée. Dans ce cas, le début de cavitation, correspondant à l'apparition des premières bulles de vapeur, sera fonction du paramètre caractéristique σ_i , basé sur P_s , égal à :

$$\sigma_i = \frac{P - P_s}{\frac{1}{2} \rho v^2} \quad \text{ou} \quad \sigma_i = \frac{H_{av} - H_s}{\Delta H}$$

les pressions de référence (P et H_{av}) étant ramenées au niveau où se produit la cavitation.

Cette condition implique pratiquement soit que l'on mesure P_s par une méthode de mesure de nucléation directe (Cf. Venturi), soit que l'on injecte dans l'eau du moyen d'essais un spectre de germes artificiels dont la valeur de P_s est connue.

b/ Cavitation développée

Au contraire du début de cavitation, dont les règles de transposition sont basées sur l'analyse de l'interaction entre un écoulement subcavitant et un spectre de germes caractérisé par sa susceptibilité, l'état de cavitation développée est d'un caractère essentiellement diphasique. On doit donc tenir compte pour le décrire non plus des seuls germes les plus "fragiles", mais d'une partie du spectre plus importante, celle qui donne effectivement naissance à des bulles de vapeur pour le point de fonctionnement envisagé.

. Mécanisme

La chute de portance d'un profil sous l'effet d'une cavitation à bulles séparées résulte de la modification du champ de vitesses instantanées lors du développement de chacune des bulles.

Lorsqu'une bulle est en expansion près d'une paroi solide dans un milieu semi-infini (Figure 3), la pression à l'infini de la bulle est inférieure à sa pression interne, égale à P_v . Par contre, sur la paroi solide, au droit de la bulle, les vitesses radiales de grossissement induisent une surpression locale d'autant plus importante que la vitesse radiale de grossissement est élevée et que la distance de la bulle à la paroi est faible {4}.

Sur un profil cavitant, ce phénomène se produit au passage de chaque bulle et l'intégrale des pressions instantanées dans le temps et dans l'espace conduit à augmenter la pression à l'extrados par rapport à ce qu'elle serait au même σ_v en écoulement subcavitant. Il en résulte une baisse de portance moyenne responsable de la chute de performances.

On peut montrer de manière théorique, et ce fait a été vérifié expérimentalement [5], que la surpression moyenne ainsi créée est d'autant plus importante que le nombre N de bulles de vapeur présentes à un instant donné sur le profil est élevé. A la limite, lorsque les parois des bulles sont très proches les unes des autres, leur développement n'est plus possible et la pression interne à la paroi est égale à la tension de vapeur.

La figure 4 représente la modification de pression moyenne sur un profil par rapport à sa valeur extrapolée pour une valeur de σ_v donnée en écoulement subcavitant.

En 1, aucune bulle n'est en expansion.

En 2, un nombre limité de bulles se développe.

En 3, de très nombreuses bulles de vapeur se développent sur le profil et la pression moyenne résultante est très proche de la tension de vapeur.

Similitude

La similitude à appliquer pour extrapoler les coefficients de portance d'un essai à un autre (chute variable ou dimensions variables) impose que les géométries d'écoulement soient identiques, et donc que le nombre de bulles de vapeur présentes à un instant donné sur le profil soit le même, et que d'autre part le diamètre des bulles formées rapporté à la corde du profil soit le même.

Pour réaliser ces conditions, il est nécessaire :

- que le nombre N de bulles soit le même sur modèle et prototype, soit :

$N_m = N_p$ pour transposition modèle-prototype ou

$N_{m1} = N_{m2}$ pour deux essais à même échelle.

- que le σ de cavitation basé sur P_v soit le même. La dynamique des bulles pour un N donné est en effet contrôlée par la valeur du σ .

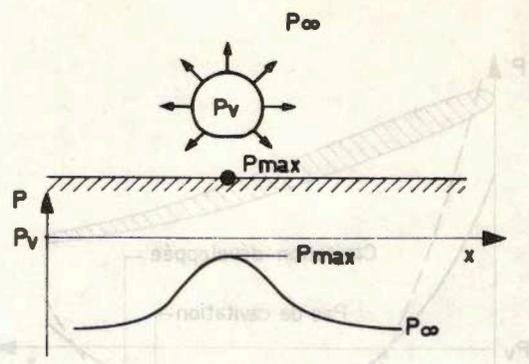


Figure 3

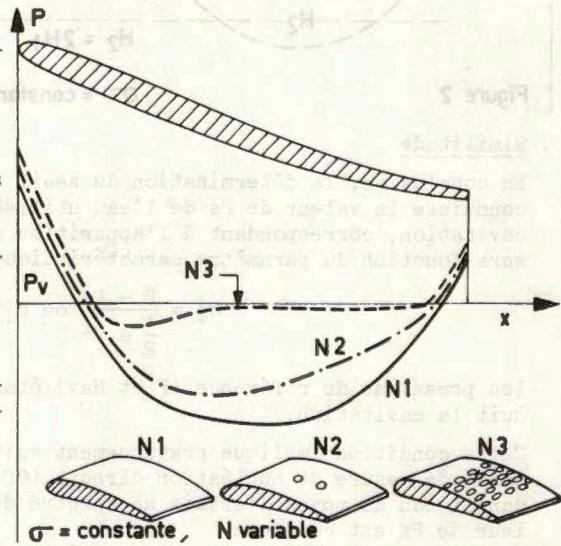


Figure 4

Soit : $\sigma_m = \sigma_p$ ou $\sigma_{m1} = \sigma_{m2}$

Population de germes

Il résulte des conditions de similitude exprimées ci-dessus que la population en germes actifs de l'eau doit être contrôlée. Le nombre N de bulles de vapeur formées est en effet fonction du nombre et de la pression critique des germes de cavitation contenus dans l'eau.

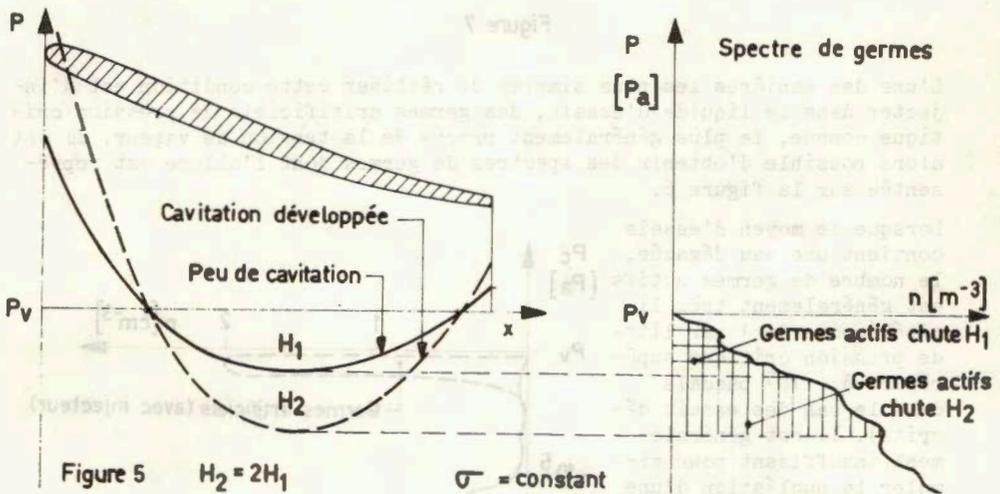
On montre aisément { 6 } que la concentration volumique n des germes actifs, dans les conditions d'essais qui permettent d'obtenir une valeur de N constante, doit être telle que :

- $n_{m1} = n_{m2}$ dans le cas de transpositions modèle-modèle, ou que
- $n_m = \lambda^3 n_p$ (avec $\lambda = L_p/L_m$ où P désigne le prototype et m le modèle).

Ceci conduit à imposer sur le modèle une concentration en germes actifs λ^3 fois plus élevée que dans l'eau prototype et à s'assurer qu'elle ne varie pas au cours des essais sur ledit modèle.

Effets de la chute

En dessous de σ_0 , l'influence de la chute d'essais en cavitation développée à bulles séparées se concrétise généralement par une moindre atténuation du rendement sous basse chute lorsque la teneur en germes ne varie pas. Lorsque la chute augmente pour un même σ , la pression statique absolue, en un point du profil, dans la zone où celle-ci est inférieure à la tension de vapeur, s'abaisse.



Il en résulte (Figure 5) qu'une partie plus importante du spectre de germes est excitée, d'où un nombre N de bulles de vapeur sur le profil plus élevé et, partant, une baisse de rendement plus forte, due à la cavitation plus développée.

La figure 5 représente une pale fonctionnant sous deux chutes : H_1 et H_2 où $H_2 = 2H_1$. En supposant qu'entre les deux essais, la nucléation de l'eau est inchangée, on constate que la concentration en germes efficaces est beaucoup plus élevée dans le second que dans le premier cas (Les courbes de pression sont directement extrapolées de celles de l'écoulement subcavitant).

• Nucléation artificielle

Ainsi que le montrent les essais décrits ci-dessous, les écarts de rendement à σ constant et de σ standard résultant de variations de la nucléation peuvent être importants (Figure 7). Il est donc nécessaire de contrôler ce paramètre en moyens d'essais.

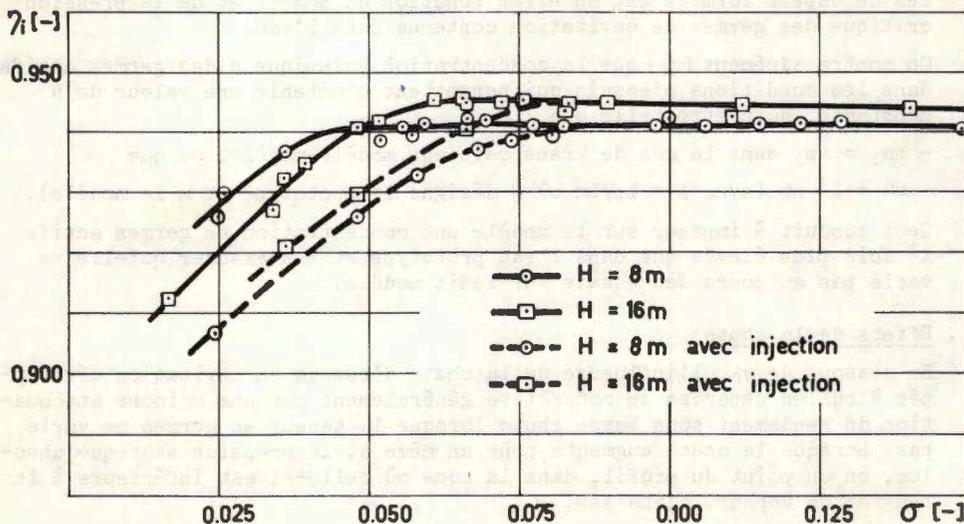


Figure 7

L'une des manières les plus simples de réaliser cette condition est d'injecter dans le liquide d'essais, des germes artificiels de pression critique connue, le plus généralement proche de la tension de vapeur. Il est alors possible d'obtenir des spectres de germes dont l'allure est représentée sur la figure 6.

Lorsque le moyen d'essais contient une eau dégazée, le nombre de germes actifs est généralement très limité (moins de 1 par litre de pression critique supérieure à -10^5 pascals dans le cas des essais décrits). Il est généralement insuffisant pour simuler la nucléation d'une turbine de grandes dimensions. Lorsque des germes artificiels sont injectés, ils deviennent pratiquement les seuls germes efficaces (environ deux germes actifs par cm^3 de pression critique supérieure à -10^4 pascals dans le cas des essais correspondant à une nucléation efficace de deux germes par litre sur le prototype, de dimensions dix fois supérieures à celles du modèle). Dans le cas d'une telle nucléation, il est possible en jouant sur le nombre de germes injectés, d'obtenir la même concentration en germes actifs

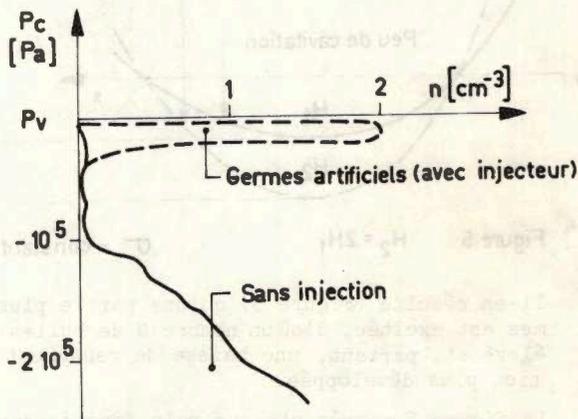


Figure 6

quelle que soit la chute. La baisse de rendement résultante ne dépend alors plus de la chute d'essais.

Mise en oeuvre pratique

Le contrôle de la nucléation nécessite d'une part, des moyens de création de noyaux artificiels, d'autre part des appareils de mesure, le tout étant associé en moyens d'essais à des procédures d'engagement et dégazage de l'eau ainsi qu'à des moyens de filtrage de l'eau. On a utilisé, lors de cet essai, un procédé par détente d'eau préalablement sursaturée en air sous haute pression.

Lors des essais décrits ci-dessus, la nucléation de l'eau a été mesurée au moyen des appareils suivants :

- un appareil de mesure directe par utilisation de microventuris dans lequel les germes comptés donnent effectivement naissance à des bulles de cavitation sous des niveaux de déséquilibre variables ;
- un appareil par diffraction placé en by-pass sur le moyen d'essais permettant d'avoir accès au spectre (nombre, dimensions) des particules ou bulles présentes dans l'eau.

Une description de ces moyens est donnée Réf. {7} et {8}.

RESULTATS DES ESSAIS ET COMPARAISON AU CALCUL

a/ Résultats

Les essais ont été exécutés sur le stand d'essai universel de l'Institut de Machines Hydrauliques (9). Le modèle utilisé du type Francis a un diamètre de sortie roue de 400 mm et une vitesse spécifique $n_{g_a} = 200$ ($v_a = 0,35$).

Une première série d'essais était destinée à mettre en évidence l'influence de la chute sur la forme et la dimension des figures de cavitation ainsi que sur la valeur de σ standard. Pour ces essais, l'eau du circuit a été fortement dégazée (teneur en oxygène dissous d'environ 1,7 ppm), ce qui est la pratique habituelle pour les essais de cavitation). La température de l'eau était de 15°C.

La teneur en germes de l'eau (nucléation) a été mesurée au moyen de l'appareil à microventuri. Le spectre fait l'objet de la figure 6.

Le point de fonctionnement choisi correspond au régime de meilleur rendement de la machine. La chute minimale d'essai adoptée, $H = 8$ m, est proche de la condition de FROUDE. La résistance mécanique du modèle d'essai a imposé une chute d'essai maximale de 16 m. Les résultats sont reportés sur la figure 7 donnant $\eta = f(\sigma)$.

Une deuxième série d'essais a ensuite été exécutée sous les mêmes chutes (8 et 16 m) et au même point de fonctionnement mais avec injection de microbulles de manière à obtenir la pleine cavitation dans la zone des aubes où règne une pression inférieure ou égale à la tension de vapeur. Le spectre de la nucléation a également été mesuré et reporté sur la figure 6. Les résultats d'essai sont reportés sur la figure 7.

Les σ d'apparition de la cavitation ont également été observés dans les diverses conditions. Le tableau ci-après donne les résultats.

	Sans injection de microbulles		Avec injection de microbulles	
Chute (m)	8	16	8	16
σ apparition (-)	0,090	0,110	0,130	0,130

Ces résultats appellent les commentaires suivants :

- Les mesures sans injection de microbulles font apparaître des valeurs de σ_0 (σ de baisse de rendement) très différentes :
 $H = 8 \text{ m} : \sigma_0 = 0,048$; $H = 16 \text{ m} : \sigma_0 = 0,060$
Les valeurs de σ apparition des premières bulles sont également très différentes comme le montre le tableau ci-dessus.
- Les mesures avec injection de microbulles montrent que les valeurs de σ_0 sont quasi identiques :
 $H = 8 \text{ m} : \sigma_0 = 0,083$; $H = 16 \text{ m} : \sigma_0 = 0,083$
- Les valeurs de σ apparition sont identiques pour les deux chutes, mais il faut noter que la définition visuelle du σ d'apparition reste délicate.
- Les photographies ci-après montrent que les figures de cavitation sont affectées par la chute, que l'injection de microbulles augmente considérablement la surface cavitante et que cette surface est beaucoup plus constante sur toutes les aubes.



$H = 8 \text{ m}$
 $\sigma = 0,064$



$H = 16 \text{ m}$
 $\sigma = 0,065$



$H = 16 \text{ m}$
 $\sigma = 0,067$
avec injection

b/ Comparaison avec le calcul

Les résultats expérimentaux présentés ci-dessus peuvent être comparés avec les résultats théoriques donnés par le programme de génération des aubages de turbines Francis de la Société NEYRPIIC.

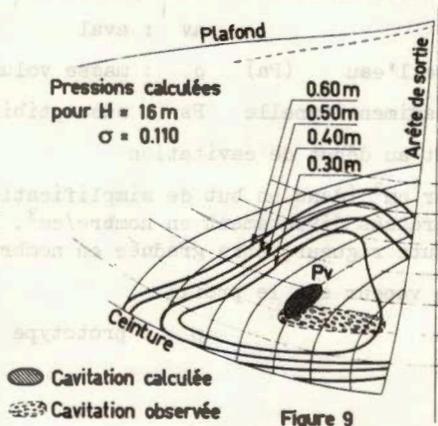
Ce programme de calcul hydrodynamique utilise une méthode quasitridimensionnelle de résolution des équations de NAVIER-STOKES pour un fluide parfait incompressible. Les conditions aux limites à l'amont et à l'aval de la grille d'aube sont données sous forme de spectres de vitesses. Ces répartitions de vitesses peuvent être soit théoriques lors du processus de génération du tracé ou issues de sondages de l'écoulement, lors des essais sur modèle réduit, pour un contrôle rétrospectif des performances de la machine.

Nous pouvons voir sur la figure 9 :

- la répartition théorique des pressions sur l'extrados de l'aubage dans la zone de sortie, ceci pour un point de fonctionnement testé sur la plate-

forme de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne,

- la zone de cavitation théorique correspondant à une pression absolue égale à la tension de vapeur,
- la zone de cavitation observée sur le modèle réduit, sans injection de germes.



Les zones de cavitation théorique et expérimentale coïncident dans leur partie amont où la pression est effectivement égale à la tension de vapeur.

Pour la partie aval, le calcul hydrodynamique indique une remontée des pressions tandis que l'on observe sur modèle réduit, des bulles entraînées par le fluide jusqu'à une zone d'implosion.

Ces résultats sont en accord avec la théorie selon laquelle les bulles naissent et se développent dans la zone de pression minimum (égale ou inférieure à la tension de vapeur) puis sont entraînées par le fluide jusque dans une zone où la pression est devenue suffisamment élevée pour permettre leur implosion.

CONCLUSIONS

- Les expériences réalisées sur un modèle réduit de turbine Francis confirment qu'un effet d'échelle important (20 à 30%) se manifeste sur les valeurs du σ standard et du σ apparition lorsque la chute d'essai passe de 8 m à 16 m sans contrôle des germes.
- L'injection dans l'écoulement de germes actifs en similitude (2 germes/cm^3) avec les conditions du prototype permet de faire disparaître l'effet d'échelle en question, il faut noter cependant que la détermination précise du σ apparition (ou " σ begin") demanderait un critère plus précis que l'observation visuelle directe. On remarquera que si l'effet d'échelle disparaît par injection des germes, c'est au prix d'une augmentation très sensible du σ standard et du σ apparition mesurés en l'absence de contrôle des germes.
- Compte tenu des résultats précédents, il semble nécessaire de maîtriser la teneur en germes de l'eau dans les expériences de cavitation sur modèle réduit, au moins en ce qui concerne les observations visuelles et la mesure des σ standards. Lors de l'injection des germes, des baisses de rendement sensibles sont en effet mesurées pour des valeurs de σ nettement supérieures à celles du σ standard mesurées sans injection de germes actifs.

