Communication
présentée le 20 mars 1964 au Comité Technique
de la Société Hydrotechnique de France

INFLUENCE DES DIVERS TYPES DE CAVITATION SUR LES BRUITS, LES ÉROSIONS ET LES MODIFICATIONS DES PERFORMANCES

PAR R. HUGUENIN *

Ce texte a été élaboré dans le cadre de la Commission de la Cavitation de la Société Hydrotechnique de France par le Groupe de Recherche n° 2 dont la composition était la suivante :

MM. HUGUENIN, professeur à l'E.N.S.A.M. de Paris;
rapporteur du groupe;
BERGERON, de la Maison L. Bergeron, Paris;
BEAUFRÈRE, du Centre de Recherches et d'Essais de Chatou;
CANAVELIS, du Centre de Recherches et d'Essais de Chatou;
CHEVALIER, du Centre de Recherches et d'Essais de Chatou;
CORMAULT, en service au Bassin des Carènes de Paris;
H. GIRAUD, de la SO.GR.E.A.H., Grenoble;
GUITON, de la Maison L. Bergeron, Paris.

Ont contribué par leurs informations à l'élaboration du présent document :

- Laboratoire de Physiologie et d'Acoustique de Jouy-en-Josas.
- Laboratoire d'Hydraulique de l'E.N.S.A.M. de Paris.
- Laboratoire de Mécanique des Fluides de l'Institut Polytechnique de Grenoble.
- Maison L. Bergeron, Paris.
- Société Rateau, La Courneuve.

- Sociétés des Forges et Ateliers du Creusot.
- SO.GR.E.A.H., Grenoble.
- Pompes Sulzer, Paris.
- Pompes Worthington, Paris.
- Centre de Recherches et d'Essais de Chatou.
- Bassin des Carènes de Paris.
- Anstalt für Stromungsmaschinen, Aradritz (Autriche).
- Escher Wyss, Zurich (Suisse).
- Atelier des Charmilles, Genève (Suisse).
- Karlstads Mekamka Werhstad, Kristineham (Suède).
- J. M. Voith, G.m.b.H., Heidenheim/Brenz (Allemagne).
- Université de Padoue (Italie).

Préambule.

Le présent rapport est une synthèse des diverses informations reçues de nos correspondants, dont on trouvera la liste ci-dessus.

Ces informations se situent dans le cadre constitué par la lettre circulaire et le questionnaire-guide en date du 14 décembre 1962 établi par le Groupe de Recherche n° 2.

Elles peuvent se diviser en deux catégories :

1. — Des informations de caractère général, relatives :
 - a) aux divers facteurs d'influence pouvant affecter l'aspect des figures, leur stabilité, le bruit et l'érosion qui peuvent les accompagner;

* Professeur à l'Ecole Nationale Supérieure des Arts et Métiers, Paris.

b) aux relations qui peuvent exister entre les figures, le bruit, l'érosion et l'altération des performances.

2. — Des informations de caractère particulier, relatives aux figures de cavitation définies précédemment.

Il y a lieu de mettre en relief les difficultés rencontrées quand il s'agit de dégager des généralités relatives à un groupe de machines de même famille, mais dont les missions sont aussi variées que celles des pompes, des turbines et des hélices marines.

Ces généralités pourront évidemment être mises en défaut par l'exposé d'un cas particulier, comme le montrera l'examen des divers facteurs d'influence.

Si l'on voulait être d'une rigueur absolue, il faudrait alors poser que, en l'état des connaissances actuelles, chaque cas de cavitation apparaît comme un cas particulier. Cependant, personne ne peut nier que beaucoup de turbo-machines hydrauliques cavitent ou peuvent être amenées à cavitier dans certains cas de fonctionnement, et de ce fait, créent des bruits audibles, sont plus ou moins sujettes à l'érosion et ont quelquefois leurs performances altérées. La seule considération de ces évidences suffit à justifier la tentative de synthèse des informations reçues, si ambitieuse et si imparfaite soit-elle.

**Examen des facteurs
qui peuvent intervenir sur l'aspect
de la figure de cavitation,
sur la stabilité de la figure, sur le
bruit et l'érosion.**

L'aspect de la figure de cavitation

Le développement d'une figure de cavitation bien définie peut être influencé par :

— *Le coefficient de cavitation σ* : Quand σ diminue, le volume de la figure de cavitation augmente et sa forme peut changer. (Exemple : torches sur turbines Francis).

— *Le point de fonctionnement réalisé* : Il a pour conséquence des angles d'attaque différents et peut amener des développements différents des figures de cavitation.

— *La teneur en air* : Rappelons qu'il n'existe pas d'usage général pour exprimer la teneur en air dans les comptes rendus de cavitation.

Cette teneur est exprimée :

- soit en cm^3/l ;
- soit en mg/l ;
- soit en p.p.m. (partie par million) en poids;
- soit en p.p.m. en volume.

Pour plus de rigueur, il serait souhaitable de caractériser le facteur d'influence : teneur en air, par un paramètre sans dimension, exprimant la saturation relative du liquide en air dissous.

La solubilité d'un gaz dans un liquide dépend :

- de la nature du gaz;
- de celle du liquide;
- de la température;
- de la pression.

La saturation relative du liquide en gaz dissous est définie par le rapport α/α_s .

α = volume de gaz (réduit à 0 °C et 76 cm Hg), dissous par unité de volume du liquide;

α_s = volume de gaz (réduit à 0 °C et 76 cm Hg), que le liquide peut dissoudre à la température de l'expérience et sous une pression de 76 cm de Hg.

Ainsi :

- 1 000 cm^3 d'eau, saturée d'air sous 76 cm Hg contiennent à une température de 15 °C, 21 cm^3 d'air (réduit aux conditions normales);
- Si l'on conduit une expérience de cavitation avec une teneur en air $\alpha = 7 \text{ cm}^3/\text{l}$, la saturation relative est :

$$\frac{\alpha}{\alpha_s} = \frac{7}{21} = 0,30$$

Cette saturation relative correspond à une eau déjà très désaérée.

— *La vitesse d'écoulement, la chute* (turbine) ou ses équivalents : Ce fait a été nettement constaté pour des torches, des lames et des poches. Par contre, les effets peuvent être de nature différente; par exemple :

- Dans le cas d'une turbine Francis (point de fonctionnement bien défini et valeur bien définie de σ) la figure de cavitation peut être affectée ou non par la chute; ainsi la figure va rester insensible à la chute pour des valeurs variant entre 80 et 40 m, alors que pour des chutes de l'ordre de 10 m, le volume de la poche sera en diminution; tout ceci indépendamment de la teneur en air [$\sigma = 0,18$ — eau saturée d'air — ($\alpha/\alpha_s \approx 1$)].
- Pour une turbine Kaplan à axe horizontal (groupe bulbe) il a été trouvé, au voisinage du seuil de cavitation, que la figure de cavitation était d'autant plus gazeuse que la chute d'essai était plus faible. Il faut remarquer que dans cet essai, la teneur n'a pas été mesurée, et était variable avec σ .

Il y a lieu de préciser que la chute ou la vitesse, pas plus que la teneur en air, ne peuvent modifier le caractère fondamental d'une figure de cavitation, à fonctionnement homologue.

— *Le nombre de Reynolds et l'état de surface* : Les lames se révèlent particulièrement sensibles à ces paramètres.

— *La température, la tension de vapeur et les autres facteurs thermodynamiques des phases liquide et vapeur* : Ces paramètres prennent une grande importance pour les pompes.

La stabilité de la figure de cavitation

— La stabilité peut être un caractère spécifique d'une figure de cavitation.

— La stabilité dépend des conditions de l'écoulement amont sans cavitation et en particulier du degré de turbulence (hélice derrière carène par exemple).

— La stabilité peut être affectée par la teneur en air (par exemple sur une Francis, une injection d'air stabilise une torche).

Le bruit

En principe, le présent rapport ne doit porter que sur les bruits audibles. Il est bien évident que toute forme de cavitation est bruyante et que tout expérimentateur pourvu d'un détecteur de bruit suffisamment sensible, pourra enregistrer des bruits pour toute figure de cavitation.

Toutefois, sur le plan pratique, il est logique de ne s'intéresser qu'aux bruits audibles pour une oreille normale.

Il est bien sûr nécessaire de rappeler qu'il est souvent très difficile de différencier les bruits de cavitation des bruits propres de l'installation (sur telle plateforme d'essais, par exemple, des mesures ont montré que le niveau du bruit de fond pouvait varier entre 60 et 70 décibels, l'apport des bruits propres à la cavitation portant le niveau global à 64 et 75 décibels).

Dans le même ordre d'idées, on peut citer que souvent, en plateforme, une turbine est freinée par un frein hydraulique qui lui aussi cavite; il est, de ce fait, très difficile de déceler les bruits de cavitation propres à la machine qui est étudiée.

On peut néanmoins constater que le bruit d'une figure de cavitation peut être influencé par :

— *La chute ou ses équivalents.*

— *La teneur en gaz* : La propagation d'une onde dans un milieu compressible est caractérisée par :

- sa vitesse de phase (de propagation);
- son atténuation (atténuation qui résulte de l'absorption d'énergie par rayonnement, conductibilité thermique et viscosité).

Ces deux grandeurs sont influencées par la quantité de *gaz libre* U que contient l'unité de volume du liquide.

- Pour les fréquences élevées (cas des impulsions de cavitation), l'atténuation augmente avec la concentration U en gaz.
- Pour les fréquences faibles (cas des bruits mécaniques), l'atténuation est très faible et ne dépend pratiquement pas de U .

Ceci explique pourquoi, par exemple, l'introduction d'air dans une pompe ou une turbine qui cavite, diminue le bruit audible.

— *Le point de fonctionnement* : Par exemple une cavitation à l'entrée des aubes d'une Francis peut provoquer des crépitements augmentant avec la charge de la machine.

— *La température.*

— *La tension de vapeur.*

— *L'épaisseur et la nature du corps de la machine.*

1/

2/

— *La nature même de la cavitation* (cavitation de gaz ou cavitation de vapeur).

Les études conduites par les physiciens sur la cavitation par ultra-sons les ont amenés à distinguer deux formes de cavitation : la cavitation de gaz et la cavitation de vapeur. Ils ont établi en particulier que le bruit est plus faible dans le cas d'une cavitation de gaz que dans le cas d'une cavitation de vapeur.

L'érosion

Il faut noter que les érosions n'apparaissent pratiquement jamais sur les modèles.

Les observations résultant d'essais en laboratoire conjugués avec des essais sur prototypes ont permis de déceler l'influence des facteurs suivants :

— *La vitesse d'écoulement ou la chute et ses équivalents* : Des essais en laboratoire ont établi que, à égalité de σ , la rapidité du processus d'érosion était lié à une certaine puissance de la vitesse, vraisemblablement la puissance 8,9 ou 10.

— *La teneur en gaz* : Elle agit sur la compressibilité du milieu et réduit les effets d'érosion.

— *Le développement de la figure de cavitation* (à fonctionnement homologue) : Une figure de cavitation très développée augmentera l'élasticité du milieu et tempèrera les effets d'érosion. Ainsi les figures 1 et 2 montrent deux mêmes types de cavitation, mais d'intensités différentes. L'érosion la plus faible correspond à la figure 2, bien que la cavitation y soit plus développée et le σ plus petit.

A la limite et dans le même ordre d'idées, on peut citer les fonctionnements des machines supercavitantes où systématiquement l'érosion est faible.

— *La nature de la cavitation* (cavitation de gaz ou cavitation de vapeur). Il a été constaté en *cavitation ultra-sonore* :

- a) que les effets chimiques et la luminescence ne se produisent que dans le cas de cavitation de gaz;
- b) que dans le cas d'une cavitation de vapeur les effets chimiques sont nuls ainsi que la luminescence;
- c) que les effets mécaniques (érosion) sont produits en cavitation de gaz parallèlement aux effets chimiques et à la luminescence; ils sont très réduits ou nuls en cavitation de vapeur.

— *La précision de l'exécution des formes à l'usage* : Dans le cas d'une érosion par tourbillon marginal, il a été constaté que d'infimes modifications des profils marginaux pouvaient éloigner ou rapprocher le tourbillon marginal de la pale et de ce fait modifier considérablement l'érosion.

Ces petites différences de forme géométrique peuvent échapper au constructeur : ainsi il a été signalé que deux groupes identiques, ayant fonctionné approximativement au même régime, pendant le même laps de temps, et dans la même centrale, présentaient des érosions différentes. Ces différences étaient vraisemblablement dues à des congés ou raccords différents résultant de l'exécution. (Dans le cas cité ci-dessus, la figure de cavitation était vraisemblablement une lame).

— *L'état de surface* : Un poli très poussé des surfaces retarde le démarrage de l'érosion.

— *La température.*

— *La tension de vapeur.*

— *La nature du métal* (pour mémoire).

Considérations sur les relations entre les figures, le bruit, l'érosion et l'altération des performances

Il faut noter que les aspects élémentaires de cavitation n'apparaissent que rarement dans leurs formes pures; les aspects de cavitation sont en général très complexes.

— L'altération des performances se produit la plupart du temps, lorsque la figure de cavitation est suffisamment développée et alors que les figures sont combinées.

— Pour cette raison, il est très difficile de faire une véritable distinction, quant à la participation des différentes formes de cavitation au bruit, à l'érosion et à la modification des performances.

En conséquence, il est impossible d'établir *pour toutes les figures de cavitation*, une relation systématique entre le bruit, l'érosion, et l'altération des performances.

Néanmoins :

— Pour les modèles réduits étudiés au laboratoire, il est possible d'établir *dans certains cas* une relation entre les diverses figures de cavitation et les bruits.

— Il y a lieu de noter que, souvent, c'est de la nature du bruit constaté sur le prototype que l'expérimentateur déduira la nature de la figure de cavitation sur ce prototype.

— Les examens des dommages créés par la cavitation sur les prototypes permettent d'établir, *dans certains cas*, une corrélation entre le bruit, l'érosion et l'altération des performances.

Étude des différentes figures de cavitation

Il reste bien entendu que les paragraphes qui suivent seront considérés comme des informations générales applicables aux prototypes et aux modèles (sauf en ce qui concerne l'érosion pour les modèles).

Nous avons respecté la terminologie et la classification établie par M. BEAUFRÈRE dans le cadre du groupe de travail n° 3. Cependant en ce qui concerne la localisation et la stabilité des figures, nous avons été quelquefois obligés par la nature des réponses reçues, de simplifier les rubriques détaillées qui avaient été établies.

LA POCHE

Poche au sein d'un écoulement

— *Variable dans le temps.*

— *Apparition et évolution aléatoire lente.*

— *Fixe dans l'espace.*

Une telle poche n'est pas bruyante. Tout au plus créera-t-elle un cognement sourd; elle ne créera pas d'érosion, mais pourra amener des déformations et ruptures à sa résorption.

POCHE AU SEIN D'UN ÉCOULEMENT. Variable dans le temps. Apparition et évolution aléatoire lente. Fixe dans l'espace. Poche consécutive à un coup de bélier. Point haut d'une conduite. Vitesse moyenne d'évolution de la longueur de la poche : $\approx 0,15$ m/s) Cav. 114.

Poche au sein d'un écoulement

— *Variable dans le temps.*

— *Apparition et évolution aléatoire rapide.*

— *Fixe dans l'espace.*

POCHE AU SEIN D'UN ÉCOULEMENT. Variable dans le temps. Apparition et évolution aléatoire rapide. Fixe dans l'espace. Coup de bélier dans conduite ascendante. Formation de la poche au point bas de la conduite. (Vitesse moyenne d'évolution de la poche : ≈ 3 m/s) Cav. 115.

POCHE AU SEIN D'UN ÉCOULEMENT. Variable dans le temps. Apparition et évolution aléatoire rapide. Fixe dans l'espace. Coup de bélier dans conduite ascendante. Résorption de la poche au point bas de la conduite. Vitesse moyenne d'évolution de la longueur de la poche : ≈ 3 m/s. Cav. 115.

Une telle poche sera bruyante, le bruit se traduira par un claquement violent, dont la violence :

- a) pourra être atténuée par une teneur élevée en gaz dissous;
- b) augmentera avec la vitesse de fermeture de la poche. Elle ne provoquera pas d'érosion, mais pourra amener des déformations et des ruptures à sa résorption.

Poche accrochée à une surface

On remarquera que, quand une telle poche est très développée, il est souvent difficile de faire la distinction entre la poche, et les grappes de bulles; ce fait a eu pour conséquence quelques divergences dans les informations reçues.

— *Stable.*

Elle sera peu bruyante (crépitements); le bruit sera affecté par la teneur en air.

Ne crée pas d'érosion.

Elle pourra altérer les performances (chute du rendement, de la puissance et du débit) suivant son importance.

POCHE ACCROCHÉE A UNE SURFACE. Stable. Turbine Kaplan à axe vertical. Poche à l'emplacement de la pale. Cav. 231.

Poche accrochée à une surface

— *Variable dans le temps.*

— *Evolution pseudo-périodique lente.*

— *Fixe dans l'espace.*

Elle sera peu bruyante (crépitements).

POCHE ACCROCHÉE A UNE SURFACE. Variable dans le temps. Evolution à caractère pseudo-périodique lent. Fixe dans l'espace. Poche accrochée à l'implanture d'une pale de turbine Kaplan. Cav. 233.

Elle pourra créer ou ne pas créer d'érosion suivant les cas.

L'altération des performances sera variable.

Poche accrochée à une surface

- Variable dans le temps.
- Apparition pseudo-périodique rapide.
- Fixe dans l'espace.

Une telle figure de cavitation est en général peu développée en elle-même; de ce fait elle sera peu bruyante.

POCHE ACCROCHÉE A UNE SURFACE. Variable dans le temps. Apparition pseudo-périodique rapide. Fixe dans l'espace. Cav. 232.

Si elle est très développée, elle pourra se traduire par un crépitement, mais le niveau du bruit sera lié à la teneur en gaz dissous.

Erosion probable.

Elle n'altérera pas par elle-même les performances, mais elle pourra être liée à une autre figure altérant les performances.

LES BULLES ISOLÉES

Bulles isolées au voisinage d'une surface

- Variable dans le temps.
- Apparition et évolution à caractère aléatoire rapide.
- Fixe dans l'espace.

Bruit variable avec la teneur en gaz pouvant aller du crépitement au claquement.

L'importance et l'étendue de l'érosion sont difficilement estimables; plusieurs correspondants signalent la structure d'érosion en peau d'orange.

Pas d'altération des performances.

BULLES ISOLÉES AU VOISINAGE D'UNE SURFACE. Variables dans le temps. Apparition et évolution à caractère aléatoire rapide. Fixe dans l'espace. Bulles isolées sur pale d'hélice marine. Cav. 325.

LES GRAPPES DE BULLES

La grappe de bulles est un stade plus développé de la cavitation par bulles.

Grappes de bulles au sein d'un écoulement

- Stable.

Si l'image n'est pas très développée, le bruit sera faible.

Pour une figure très développée comme dans le cas d'un dissipateur d'énergie, il se produira des

crépitements. Une cavitation très développée en grappes de bulles se traduira systématiquement par des crépitements; le développement de la figure amènera notamment une diminution de débit de la machine résultant de l'obstruction des canaux; il pourra également amener des variations dans les caractéristiques de puissance par suite de la modification des écoulements.

Pas d'érosion.

— *A caractère instable pseudo-périodique.*

C'est l'image du lâcher de bulles à caractère pseudo-périodique provenant en particulier d'une lame.

Mêmes remarques que ci-dessus.

GRAPPES DE BULLES AU SEIN D'UN ÉCOULEMENT. Cav. 411.

Grappes de bulles au voisinage d'une surface

— *Stable.*

L'exemple le plus courant est celui de la cavitation marginale.

Le bruit, en général faible, pourra aller jusqu'au crépitements. L'intensité des crépitements secs plus ou moins violents augmente avec la charge (puissance) de la machine.

L'érosion apparaît progressivement et systématiquement au bout d'un certain nombre d'heures de service, en particulier sur la partie fixe pour les pompes, sans qu'il soit possible de dissocier les effets de la cavitation marginale des effets annexes (tourbillons et lames).

Une telle figure de cavitation très développée pourra amener des altérations de performances;

GRAPPES DE BULLES AU VOISINAGE D'UNE SURFACE. Stables. Cavitation marginale à l'extrémité d'une pale de turbine Kaplan. Cav. 421.

en particulier, elle pourra se traduire par une diminution du débit résultant des modifications d'écoulement dans la machine.

LES NUAGES DE BULLES

Les nuages de bulles se rencontrent dans tous les courants où la pression statique d'ensemble sera extrêmement réduite et où il existera suffisamment de noyaux de gaz pour permettre la croissance des bulles.

Nuage de bulles au sein d'un écoulement

— *Stable.*

Le bruit sera systématiquement faible ou très faible.

Aucune érosion.

Dans le cas de figures très développées, les caractéristiques pourront être légèrement modifiées par suite de la variation de densité du fluide.

NUAGE DE BULLES AU SEIN D'UN ÉCOULEMENT. Stable. Cavitation à l'aval d'un diaphragme. Cav. 511.

— *Instable.*

C'est le cas du lâcher de nuages de bulles accompagnant une lame instable (essai de cavitation au tunnel de cavitation ou profils supercavitants).

NUAGE DE BULLES AU SEIN D'UN ÉCOULEMENT. Instable. Nuage de bulles à l'arrière d'une lame sur un profil placé au tunnel de cavitation. Cav. 515.

LA LAME

Lame accrochée à une surface, se termine sur une surface

— *Stable.*

Si elle est peu développée, ne crée pratiquement pas de bruit audible, ni d'érosion. (L'hydrophone révèle cependant que le bruit augmente avec l'importance de la figure).

Les caractéristiques sont affectées au voisinage du seuil; la réduction des pertes par frottement résultant de la présence de la lame peut amener une augmentation de rendement.

LAME ACCROCHÉE A UNE SURFACE, SE TERMINE SUR UNE SURFACE. Stable. Lame sur pale de turbine Kaplan. Cav. 631.

LAME ACCROCHÉE A UNE SURFACE, SE TERMINE SUR UNE SURFACE. Stable. Lame sur pale de pompe hélice. Cav. 631.

LAME ACCROCHÉE A UNE SURFACE, SE TERMINE SUR UNE SURFACE. Stable dans le temps et dans l'espace. Lame sur pale de turbine Kaplan à axe vertical. Cav. 631.

Lame accrochée à une surface, se termine sur une surface.

- *Variable dans le temps.*
- *Evolution à caractère pseudo-périodique.*
- *Fixe dans l'espace.*

Le bruit peut aller du bruit faible au crépité-

ment; l'érosion peut, dans certains cas, être appréciable (vraisemblablement due à un phénomène associé).

Cette figure de cavitation peut amener une modification des caractéristiques de la machine.

LAME ACCROCHÉE A UNE SURFACE, SE TERMINE SUR UNE SURFACE. Variable dans le temps. Evolution à caractère pseudo-périodique. Fixe dans l'espace. Différents aspects d'une lame de cavitation sur un profil placé au tunnel de cavitation (lâcher pseudo-périodique de bulles). Cav. 632.

LAME ACCROCHÉE A UNE SURFACE AVEC LACHER DE BULLES. Variable dans le temps. Evolution à caractère pseudo-périodique. Fixe dans l'espace. Lame sur bord d'attaque de pale de pompe hélice à axe horizontal (Machine industrielle). Cav. 633.

Lame accrochée à une surface, va à l'infini au sein de l'écoulement

— *Stable.*

C'est la caractéristique de la figure des machines super-cavitantes.

Bruit audible continu qui peut être important.

Pas d'érosion.

Les performances de la machine sont altérées.

LAME ACCROCHÉE A UNE SURFACE, VA A L'INFINI AU SEIN DE L'ÉCOULEMENT. Stable. Cas d'une turbine supercavitante. Cav. 641.

LES TOURBILLONS

Tourbillon au sein d'un écoulement

C'est le cas du vortex pour les pompes.

Il peut être *stable* ou *instable*.

Il n'est pas bruyant et ne crée pas d'érosion.

Stable ou instable, il peut amener de grandes perturbations dans l'écoulement.

VORTEX à l'aspiration d'une pompe hélice. Cav. 716.

TOURBILLON ACCROCHÉ A UNE SURFACE. Stable. Tourbillon marginal sur hélices marines. Cav. 741.

Tourbillons accrochés à une surface

Ils peuvent être :

— *Stables.*

— *Variables dans le temps. Evolution à caractère aléatoire fixe dans l'espace.*

Dans les deux cas :

— le bruit sera faible,

— pas d'érosion.

Un tourbillon marginal n'affectera pas le rendement de la machine, à condition qu'il n'ait pas trop d'ampleur.

Tourbillons accrochés à une surface

— *Variable dans le temps.*

— *Evolution à caractère aléatoire.*

(Voir rubrique paragraphe précédent).

CAVITATION A L'AVANT DE L'OGIVE SUR HÉLICE MARINE. (en début de cavitation). Cav. 844.

LES TORCHES (turbines)

Elles ne peuvent être localisées que par l'expression accrochées ou non à une surface, mais vont à l'infini au sein de l'écoulement.

Torche accrochée ou non à une surface, mais va à l'infini au sein de l'écoulement

— *Stable* :

— quand σ diminue, la torche augmente de volume et sa forme change;

— quand la teneur en gaz diminue, la torche diminue de volume. Par contre, à partir d'une faible teneur en gaz ($\alpha/\alpha_s = 0,38$), le volume de la figure reste inchangé;

— pas ou peu de bruit;

— ne crée pas d'érosion.

Altération possible du rendement par altération du fonctionnement de l'aspirateur.

(Voir également paragraphes suivants).

TORCHE ACCROCHÉE A UNE SURFACE, VA A L'INFINI AU SEIN DE L'ÉCOULEMENT. Stable. Torche sur ogive de turbine Kaplan à axe horizontal. Cav. 841.

Trois aspects d'une torche accrochée à une surface, va à l'infini au sein de l'écoulement

— *Stable*.

(Voir observations sur bruit, érosion et performances au paragraphe précédent).

●
TORCHE SUR FRANCIS à σ variable entre 0,64 et 0,26.

Teneur en oxygène dissous = 2,5 mg/litre (soit $\alpha/\alpha_s = 0,25$).

●
Quand σ diminue, la torche augmente de volume et sa forme change.

●
Quand la teneur en air diminue, la torche diminue de volume. Cette influence n'est d'ailleurs décelable que lorsqu'on passe par exemple de la teneur en oxygène de 12 mg/litre (soit $\alpha/\alpha_s = 1,2$) à 8 mg/litre (soit $\alpha/\alpha_s = 0,8$). En dessous de 8 mg/litre, la figure reste la même.

Pas de bruit.

Pas d'altération des performances.

TORCHE STABLE (turbine Francis). Cav. 841.

Torche accrochée ou non à une surface, mais va à l'infini au sein de l'écoulement

— *Instable* (Francis).

Elle est liée à l'instabilité de l'écoulement.

Est bruyante.

Ne crée pas d'érosion.

Altère les performances.

TORCHE INSTABLE (turbine Francis). Cav. 844.

LE FILAMENT FULGURANT

Filament fulgurant

Il se trouve systématiquement localisé AU SEIN D'UN ÉCOULEMENT.
Il est variable dans le temps, il évolue d'une façon aléatoire rapide, il est variable dans l'espace.

FILAMENT FULGURANT AU SEIN D'UN ÉCOULEMENT. Instable dans le temps et dans l'espace. Filament fulgurant observé sur un déchargeur. Cav. 917.

Il est très bruyant et se caractérise par des claquements secs.
En principe il ne crée pas d'érosion et n'altère pas les performances de la machine. Dans certains cas : impulsion à la paroi dans le cas des vannes, ou répétition du filament fulgurant à cadence rapide, il peut y avoir altération des performances.

CONCLUSIONS

- Toutes les grappes de bulles crépitent.
- Les poches, comme les lames, si elles sont suffisamment développées, amènent, en bien ou en mal, des modifications des performances.
- L'érosion est intimement liée aux conditions dans lesquelles se produit le collapse sur la paroi.
- Il est très probable que l'altération des performances commence à se manifester dès que la cavitation est suffisamment importante pour provoquer des modifications d'écoulements dans la machine.

Rappel de la normalisation des figures de cavitation
(Rapport du groupe de travail n° 3)

ASPECT :	
Poche.	1
Bulle isolée.	2
Grappe de bulles.	3
Nuage de bulles.	4
Lame.	5
Tourbillon.	6
Torche.	7
Filament fulgurant.	8
	9

LOCALISATION :	
— au sein d'un écoulement.	1
— au voisinage d'une surface.	2
— accrochée à une surface, se termine sur une surface.	3
— accrochée à une surface, va à « l'infini » (au sein de l'écoulement).	4

STABILITÉ :	
— stable.	1
— stable dans l'espace, évolution pseudo-périodique rapide dans le temps.	2
— stable dans l'espace, évolution pseudo-périodique lente dans le temps.	3
— stable dans l'espace, instable dans le temps, évolution aléatoire lente.	4
— stable dans l'espace, instable dans le temps, évolution aléatoire rapide.	5
— instable dans l'espace et dans le temps, évolution lente.	6
— instable dans l'espace et dans le temps, évolution rapide.	7

Discussion

Président : M. BERGERON

M. le Président, avant de donner la parole à M. HUGUENIN pour son exposé, indique que ce rapport comporte la présentation de clichés représentant différents types de cavitation tels qu'ils ont été définis précédemment par M. BEAUFRÈRE(*). La meilleure façon de procéder est que les critiques soient faites après chaque projection.

Pour éviter des discussions inutiles, M. le Président rappelle que l'on se place, dans ce rapport, sur un plan industriel et que l'on cherche un seuil de cavitation industriellement acceptable.

En particulier, il est entendu que toute cavitation est bruyante si l'on dispose d'appareils suffisamment sensibles pour détecter les bruits mêmes faibles. Par contre, on déclarera non bruyante une cavitation dont le bruit n'est pas gênant en cours d'exploitation. Dans cette optique, M. HUGUENIN donne la définition de ce qu'il appelle « bruit audible », définition sur laquelle nous ne pensons pas nécessaire de revenir.

DISCUSSION

CAVITATION 421. — *Grappe et bulles au voisinage d'une surface.*

M. de SAINT-VAULRY demande à M. HUGUENIN s'il a pu observer, comme lui-même, un phénomène du genre décrit ci-après :

Dans une pompe hélicocentrifuge à roue ouverte et à grande vitesse spécifique, une cavitation était créée par l'entrée des aubes au point le plus éloigné de l'axe, mais le collapse se produisait avec bruit sur la paroi fixe, qui était rapidement attaquée et même percée.

Cependant, en raison des dissymétries de la conduite d'aspiration (coude, convergent excentrique, effet de pesantur dû à ce que la pompe était à axe horizontal), l'attaque n'avait pas lieu sur tout le tour de la paroi fixe, mais seulement sur un secteur de celle-ci.

Par contre, la roue restait intacte.

M. CHEVALIER ne croit pas que l'on puisse qualifier cette cavitation de peu bruyante, car cette figure prend naissance au voisinage de la paroi extérieure et on l'entend très bien, étant donné que le bruit qu'elle crée est moins amorti.

M. LIEBER et M. CHAIX pensent que s'il est indiqué de parler d'obstruction due à la cavitation dans les canaux des pompes, le terme est généralement excessif pour les turbines. Un amendement dans ce sens a été d'ailleurs enregistré page 18 du procès-verbal de la Commission de Cavitation, le 18 octobre 1963.

M. CANAVELIS ne croit pas qu'un problème se pose pour attribuer une érosion systématique à cette forme de cavitation, étant donné qu'elle apparaît toujours après une poche à l'implanture et même après une lame et que ces formes de cavitation sont localisées au même endroit.

M. HUGUENIN dit que l'on peut très bien avoir aussi un tourbillon. Qui érode ? La grappe de bulles ou le tourbillon ?

M. CANAVELIS pense que, puisque M. HUGUENIN dit que s'il y a une grappe de bulles, il y a érosion et que c'est systématique, on pourra remarquer également que la cavitation marginale, par définition, est toujours à l'extrémité de la pale, là où les vitesses sont les plus grandes, et l'on peut justement y comparer ce que lui-même avait dit de l'influence de la vitesse sur l'érosion de cavitation.

M. LIEBER dit que, si ces grappes sont très importantes, la bordure des profils est attaquée. Lorsque le profil est fortement entamé, les caractéristiques en sont affectées, mais il s'agit là d'un effet secondaire.

M. le Président conclut de la discussion que le mot « altération » est contestable, tout au moins au début lorsque le jeu est faible.

CAVITATION 917. — *Finalement fulgurant.*

M. le Président estime que cette figure de cavitation

n'apparaît que lorsque les fonctionnements et les performances de la machine sont déjà altérés.

M. CHAIX remarque que effectivement, dans certains cas, ce n'est pas la figure de cavitation qui altère l'écoulement, mais qu'au contraire, l'écoulement est tellement altéré qu'il amène les dépressions et la cavitation.

Il signale le cas particulier de l'altération des caractéristiques des pompes par un tourbillon à l'aspiration et estime que même si, le niveau de pression étant élevé, il n'y a plus formation de vapeur dans l'axe du vortex, les performances de la pompe sont quand même altérées.

M. CHAIX évoque ensuite des observations faites sur des modèles Francis. Aux grandes ouvertures de distributeur, il y a une forte rotation en aval de la roue. Dans l'axe de ce tourbillon, la théorie des écoulements non visqueux livre une pression infiniment faible, alors que l'observation en présence de viscosité et de turbulence révèle des masses d'eau vagabondantes et un minimum de pression atténué. Au fur et à mesure que l'on abaisse la pression dans l'aspirateur, un filament se forme, puis une torche se développe. Pendant que ces figures de cavitation prennent naissance et se développent, les caractéristiques de la turbine ne s'altèrent pas plus qu'elles ne l'étaient au départ sous l'influence du tourbillon. Ce dernier perturbe l'aspirateur, qu'il soit entièrement occupé par de l'eau ou non.

Compte tenu des discussions qui ont déjà eu lieu au cours des réunions de la Commission de la Cavitation, au sujet des filaments fulgurants, et d'une nouvelle intervention de MM. LIEBER et HUGUENIN, M. le Président conclut qu'on peut considérer que cette figure de cavitation n'apparaît que lorsque le fonctionnement de la machine est déjà altéré pour d'autres raisons et n'est pas la cause de cette altération.

M. le Président remercie M. HUGUENIN de s'être dévoué à une tâche ingrate qui a demandé de longs efforts persévérants.

Les avis émis sont tirés des réponses au questionnaire établi par M. HUGUENIN. 50 % des personnes interrogées ont répondu; 80 % des réponses ont pu être exploitées et ont ensuite été discutées en commission. Il ne s'agit donc pas d'avis personnels, mais ils résultent d'une confrontation de spécialistes.

S'il est vrai que, pour un certain nombre de figures de cavitation, les conclusions émises restent dans l'imprécision, il n'en reste pas moins que certains points sont acquis. Il s'agit là d'ailleurs d'un travail auquel on se référera et qui est appelé à être complété ou précisé progressivement.

Une remarque parmi bien d'autres peut être faite :

Il n'est parlé de claquement que pour les filaments fulgurants, à l'exclusion de toute autre figure. Comme tout le monde a été d'accord sur ce que les filaments fulgurants ne créaient pas d'érosions dans les machines et n'étaient pas la cause de l'altération des caractéristiques, on en arrive à la conclusion que le phénomène qui crée le bruit le plus pénible n'est pas dangereux par lui-même.

Cette conclusion très importante mériterait d'être entérinée définitivement à la suite d'une enquête encore plus étendue.

M. CANAVELIS fait remarquer que, dans son rapport, M. HUGUENIN a dit que l'on était assez sceptique sur les relations entre le bruit produit et l'érosion de cavitation gazeuse et de cavitation de vapeur. Peut-on nier, *a priori*, qu'il y ait une relation entre l'énergie acoustique provenant de l'implosion d'une bulle et l'énergie cinétique produite au moment de l'impulsion ? Il est tout de même évident que l'énergie est bien plus grande dans le cas de bulles de vapeur. De l'ensemble de l'enquête de M. HUGUENIN, il ressort que lorsqu'il y a érosion, il y a toujours du bruit, ce qui montre bien cette relation entre l'énergie de l'implosion d'une bulle et l'énergie acoustique dissipée.

M. HUGUENIN est tout à fait d'accord sur ce point.

M. CANAVELIS indique que la possibilité de détection de l'érosion sur les modèles dépend énormément du matériau

(*) *La Houille Blanche*, n° 4/1962, p. 521 à 536.

utilisé pour faire les pales du modèle, car le but même des expériences entreprises aux Ateliers des Charmilles avec la pâte molle à base de glycérine est justement de déceler de l'érosion sur les modèles de turbines.

M. HUGUENIN croit qu'avec cette méthode on n'a pas eu, jusqu'à présent, de résultats nets.

M. CANAVELIS confirme que l'on a détecté des érosions et que cela dépend donc, non seulement des dimensions de l'écoulement, mais aussi du matériau qui la subit.

M. HUGUENIN constate que, si l'on parvenait à faire de l'érosion sur les modèles, on ferait un grand pas dans la connaissance des effets des phénomènes de cavitation. Mais cette érosion faite sur un matériau particulier représentera-t-elle fidèlement ce qui se passe, par exemple, sur une pale en métal ?

M. CANAVELIS dit qu'étant donné qu'il y a une relation d'échelle, d'une part entre les écoulements dans le modèle et dans le prototype et, d'autre part, entre les résistances des matériaux du modèle et des matériaux du prototype,

on pourra peut-être dégager une méthode de prévision de l'érosion dans les prototypes.

M. CANAVELIS ajoute qu'au laboratoire de Chatou on a essayé de mesurer l'érosion sur modèle par le procédé des jauges électriques en matériau plus mou que celui des pales. Les résultats ne sont pas encore concluants, mais on espère bien, en persévérant, notamment en ce qui concerne la cavitation marginale, détecter une érosion sur les turbines Kaplan.

Sur la demande de M. CANAVELIS, M. HUGUENIN précise que les machines Kaplan semblables, sur lesquelles on pouvait observer des différences d'érosion, étaient, en fait, des machines identiques fonctionnant dans la même usine, dans les conditions de chutes. Les effets d'érosion différents étaient uniquement la conséquence de l'état de surface différent.

M. le Président remercie M. HUGUENIN et toutes les personnes ayant pris part à la discussion, et regrette toutefois que l'auditoire n'ait pas été plus fourni pour participer à la discussion de questions d'une telle importance.

Abstract

Effect of various types of cavitation on noise, erosion and performance

by R. Huguenin *

Introduction.

An initial reminder is given of a standard terminology and cavitation figure classification compiled by No. 3 Working Group of Société Hydrotechnique de France's Cavitation Commission. Applications of this classification are discussed and conclusions are drawn regarding cavitation noise, erosion and effects on performance for each figure.

The information in the article is the result of a survey carried out among hydraulic equipment manufacturers and users, and design or research organisations.

Analysis of factors involved.

The effects of the following factors are discussed: cavitation coefficient, operating point, gas content, flow velocity, Reynolds number, temperature, vapour pressure, surface condition, thickness and type of machine casing and type of cavitation, all of which are likely to affect the development of the cavitation figure or the noise and/or erosion accompanying it.

Study of particular cavitation figures.

The following figures are discussed:

- Single bubbles.
- Bubble clusters.
- Bubble clouds.
- Sheets.
- Vortices.
- Twisting streamers.
- Bright streaks.

Each figure is illustrated by one or more photographs, with amplifying remarks on the associated noise, erosion and effect on performance.

Conclusions.

The ambitious yet tremendously important aim of this study is to define the harmful or harmless effects of the various cavitation figures on industrial equipment. Though it has not been possible to reach any definite conclusions for all of them, a certain number of the points established can already serve as a reference basis.

* Professor at the Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, Paris.