

# Détection et prévention de la cavitation dans la construction hydraulique

Autor(en): **Bruschin, Jacques**

Objektyp: **Article**

Zeitschrift: **Ingénieurs et architectes suisses**

Band (Jahr): **106 (1980)**

Heft 20

PDF erstellt am: **13.07.2024**

Persistenter Link: <https://doi.org/10.5169/seals-73983>

## **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.

Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.

Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

## **Haftungsausschluss**

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

# Détection et prévention de la cavitation dans la construction hydraulique

par Jacques Bruschin, Lausanne

Les dommages produits par la cavitation sont connus depuis longtemps dans le domaine des machines hydrauliques et des pompes plus spécialement. Le phénomène même et ses lois générales étaient suffisamment connus il y a 25 ans déjà pour permettre des progrès considérables [1]<sup>1</sup>. Toutefois, dans la construction hydraulique, malgré un premier symposium consacré à ce problème par l'ASCE<sup>2</sup> en 1947, ce n'est que 20 ans plus tard que l'on commence à s'en inquiéter sérieusement. C'est ainsi qu'en 1967, à la demande de la section Machines de la SHF<sup>3</sup>, une communication sur les dommages constatés dans les bétons des ouvrages de l'EDF<sup>4</sup>, fait état de dégradations significatives, parfois importantes, dans les aménagements de Fessenheim, Cize-Bolozon, Châteauneuf-du-Rhône, Castillon et Serre-Ponçon [2]. En 1971, au 14<sup>e</sup> congrès de l'AIHR<sup>5</sup>, le US-Bureau of Reclamation présente une liste de 8 aménagements ayant subi des dommages de cavitation, dont le cas déjà bien connu du barrage de Grand Coulee [3]. Sept autres (dont 2 au Canada) s'y ajoutent en 1976 [4]. Bien entendu, des cas isolés au Portugal, USA, etc. ont été signalés avant et pendant cette période. Fait surprenant pour l'auteur, aucun barrage suisse ne semble avoir été affecté par des dommages de cavitation.

D'une manière générale les zones endommagées se situent dans les vidanges de fond, les évacuateurs de crues, à l'aval immédiat de vannes de réglage, d'irrégularités, de changements de direction ou d'obstacles sur les parois (niches, coudes, décrochements, etc.). Plus spécifiquement il s'agit de zones en aval de décollements d'écoulements à vitesses élevées, en nappe libre ou à faibles pressions ambiantes.

Ces «révélations» tardives ont quelque peu déconcerté les ingénieurs civils habitués à croire que la cavitation est affaire de machines hydrauliques. De plus, les laboratoires d'hydraulique auxquels ils avaient habituellement recours étaient mal préparés pour étudier ces problèmes et leur proposer des solutions. Si la situation n'a que peu évolué ces dernières années — le seul progrès notable est dû à l'introduction toujours plus répandue de l'injection d'air entre paroi et veine liquide, expérimentée en 1955 déjà par Peterka [5], reprise en 1968 par Tullis et Skinner, deux «machinistes» s'occupant de vannes [6] — elle n'est pas devenue dramatique pour autant. C'est tout au moins l'avis de l'auteur de ces lignes.

Le but de cette communication est de tenter de clarifier la nature et la portée du problème, de faire comprendre les limites des essais sur modèles et d'expliquer l'opinion exprimée ci-dessus.

## 1. Cavitation: pourquoi et comment?

Lorsque la pression locale  $p$  dans un liquide s'approche de la pression des vapeurs saturées  $p_v$ , il y aura formation de bulles de vapeur (ébullition à température ambiante). Dans un écoulement, ces bulles (cavités) microscopiques peuvent être entraînées vers des zones de pression plus élevée, où elles condensent instantanément. Ce phénomène, qui a la violence d'une véritable implosion, génère des ondes de pression-dépression alternatives reproduisant les mêmes effets. Si cela se passe au contact d'une paroi, cette dernière sera

dégradée d'une manière très caractéristique, «en surface piquée», et ceci en fonction de l'intensité de la cavitation, de la durée d'exposition au phénomène et de la résistance spécifique du matériau la constituant. Notons donc que:

1. Toute dépression dans les écoulements n'implique pas nécessairement la cavitation.
2. La cavitation comporte une zone de génération en basse pression à l'amont, une zone de condensation en pression plus élevée en aval et pour le cas qui nous concerne, une paroi. La présence d'un décollement-recollement dans des écoulements à vitesse élevée le long d'une paroi est un cas typique d'apparition possible de la cavitation.
3. Toute cavitation n'est pas inacceptable a priori.

Une certaine confusion, due au fait que les dépressions peuvent produire des

arrachements et les vitesses élevées des érosions (surtout si l'eau est chargée d'alluvions), indépendamment de toute cavitation, est probablement à l'origine de craintes exagérées concernant ce dernier phénomène. S'ajoute, de manière plus justifiée, la difficulté réelle de prévoir avec précision l'apparition effective de la cavitation et la portée véritable des dommages qu'elle pourrait occasionner. Citons à cet égard P. Bergeron [1]: «Je connais des centaines de pompes qui fonctionnent depuis plus de 30 ans et sont restées à l'état de neuveage, alors que des essais de visualisation récents, sur des modèles semblables, montrent d'amples figures de cavitation.»

Essayons de voir les choses de plus près. La variation des pressions dans l'écoulement irrotationnel et stationnaire (permanent) d'un liquide, est décrite par les équations générales du mouvement:

$$\partial_s \left( \frac{\rho v^2}{2} + p \right) = 0 \quad (1)$$

$$\partial_n p + \frac{\rho v^2}{R} = 0 \quad (2)$$

où  $s$  et  $n$  sont respectivement les directions tangentielle et normale au filet liquide qui nous intéresse — proche de la paroi par exemple —  $p$  et  $v$  la pression et la vitesse en tout point le long de l'écoulement,  $\rho$  la masse spécifique du liquide,  $R$  le rayon de courbure local du filet.

Contentons-nous pour l'éq. (2) de remarquer que  $R$  n'est pas nécessairement la courbure de la paroi et que la pression  $p$  dépendra aussi de la force centrifuge locale ( $\rho v^2/R$ ). Cela explique pourquoi un décollement suivi d'un recollement peut produire une variation de pression par changement et inversion de la courbure d'écoulement sans qu'il y ait variation de vitesse.

L'éq. (1), dont le développement conduit à la loi de Bernoulli, permet de décrire la variation des pressions le long d'une paroi par exemple, sous une forme adimensionnelle:

$$\frac{p-p_0}{\rho v_0^2/2} = 1 - \left( \frac{v}{v_0} \right)^2 \quad (3)$$

où  $p_0$  et  $v_0$  sont une pression et une vitesse de référence, prises de préférence là où l'écoulement n'est pas perturbé ou mieux encore, est uniforme. Les termes au carré de (3) étant éminemment positifs, on s'aperçoit qu'un accroissement important de la vitesse locale peut rapidement conduire à l'apparition de dépressions. Or, ces dernières ayant une limite physique, qui est comme nous l'avons vu  $p_v$ , Thoma a proposé que

$$\sigma = \frac{p_0 - p_v}{\rho v_0^2/2} \quad (4)$$

soit utilisé comme critère d'apparition de la cavitation.

<sup>1</sup> Les chiffres entre crochets renvoient à la bibliographie en fin d'article.

<sup>2</sup> American Society of Civil Engineers.

<sup>3</sup> Société hydrotechnique de France.

<sup>4</sup> Electricité de France.

<sup>5</sup> Association internationale des recherches hydrauliques.

$$\text{Ainsi } \sigma > \frac{p_0 - p}{\rho v_0^2 / 2} \quad (5)$$

le terme de droite étant souvent noté par  $c_p$ , revient à dire que  $p > p_v$ . Si cela est vérifié dans tout l'écoulement ou au moins le long des parois où nous mesurons  $p$ , il n'y aurait pas de cavitation possible.

Il se trouve toutefois que les écoulements des liquides « naturels » ne sont jamais entièrement irrotationnels, que par ailleurs  $p$  fluctue dans les couches limites (turbulence) et que l'éq. (3) ne tient pas compte de l'éventuelle courbure locale des filets. Cela fait que dans la plupart des cas d'intérêt  $p$  et par conséquent  $c_p$  ne peuvent pas être déterminés par calculs. Ajoutons que, considérée à une échelle plus fine, la cavitation peut apparaître dans les noyaux des tourbillons d'interface (aux décollements par exemple) bien avant que la pression ambiante ou celle à la paroi ait atteint la valeur  $p_v$ , comme le prouvent les calculs et les expériences souvent cités de H. Rouse [7], pour conclure que le critère de Thoma est une approximation par excès. On se contente alors souvent de la condition

$$\sigma \gg \bar{c}_{p, \min} \quad (6)$$

où  $\bar{c}_{p, \min}$  est la plus petite valeur de  $c_p$  le long de la paroi, calculée pour les pressions moyennes, déterminées expérimentalement.

L'interprétation de l'inéquation (6) et le placement des capteurs de pression est laissé au jugement des ingénieurs.

## 2. Détection d'un danger de cavitation

Il s'agit, comme nous l'avons vu, d'une étude expérimentale préalable à l'exécution de l'ouvrage, bien entendu. Nous aurons donc recours à des essais sur modèle hydraulique. Cela implique qu'il faut déterminer si l'on souhaite:

- faire apparaître la cavitation et étudier des figures de cavitation possibles comme on le fait pour les machines hydrauliques;
- mesurer des pressions à la paroi afin d'utiliser la condition (6).

Etant donné que la très grande majorité sinon la presque totalité des laboratoires d'hydraulique du génie civil ne sont pas équipés pour le premier type d'étude, qui exige des essais en dépression ambiante, il reste dans les faits peu de choix.

Il serait peut-être utile d'indiquer ici que le « sous-développement » de nos laboratoires dans ce domaine particulier n'est ni fortuit, ni déraisonnable. Ainsi:

1. Les ouvrages susceptibles de caviter sont souvent destinés à un fonctionnement occasionnel à faible ou très faible fréquence (évacuateurs de crues, vidanges de fond).

2. Il est rare dans ces cas que la cavitation soit le seul facteur pouvant produire la dégradation des bétons.
3. Les essais en dépression sont coûteux parce qu'exigeant une installation ad-hoc, adaptable à des modèles très divers de formes et de dimensions et qui ne serait utilisée que rarement.
4. Les résultats obtenus sont, comme nous l'avons vu pour les pompes, plutôt incertains quant aux dommages effectifs en vraie grandeur.

Cette parenthèse fermée et la décision prise de limiter l'étude de la cavitation aux mesures de pression, reste le problème de la similitude. Sur ce point, la littérature spécialisée [8, 9] est particulièrement discrète, parfois confuse. Une tentative de clarification nous paraît dès lors utile.

S'agissant d'écoulements d'eau à forte vitesse en nappe libre et compte tenu du fait que les modèles sont le plus souvent conçus pour une étude débordant le seul problème de la cavitation, la similitude choisie est celle de Froude.

Dès lors, nous nous trouverons en présence des deux conditions de similitudes suivantes:

$$Fr = \frac{v^2}{gL} \text{ et } c_p = \frac{p_0 - p}{\rho v_0^2 / 2} \quad (7a)$$

valeurs étant les mêmes pour le modèle et la vraie grandeur.

En arrangeant ces expressions, on peut les écrire sous la forme:

$$Fr = \frac{v^2/g}{L} \text{ et } c_p^{-1} = \frac{v_0^2/2g}{(p_0 - p) \gamma} \quad (7b)$$

où

$Fr$  = nombre de Froude

$g$  = accélération de la pesanteur

$L$  = une longueur au sens dimensionnel

$\gamma = \rho g$ , poids spécifique du liquide (eau)

Les conditions (7) montrent que sur le modèle correspondant, la pression différentielle, exprimée en colonne piézométrique, sera réduite comme les longueurs. Si la pression de référence  $p_0$  est la pression atmosphérique (dans un jet par exemple) et si nous travaillons en pressions relatives, il ne restera à considérer que le terme  $p/\gamma$ , soit les dépressions mesurées sur modèle, pour autant qu'il y en ait. D'où l'impression, erronée, qu'il suffit de multiplier ces dépressions par l'échelle de réduction géométrique adoptée pour identifier un danger de cavitation.

Cette impression est erronée parce que:

1.  $p < p_v$  en pression absolue est physiquement impossible. L'oublier, comme l'a fait l'auteur d'une des premières études d'une forme d'entrée non cavitante pour une vidange sous forte charge [10], conduit à des résultats qui prêtent à sourire ( $p/\gamma = -10$  mce (-33 ft) par exemple).

2. Une fois la multiplication opérée et sachant que toute dépression ne produit pas nécessairement la cavitation, nous nous sommes privés du seul critère de jugement rationnel exprimé par le nombre de cavitation  $\sigma$  — éq. (4).

Il est vrai toutefois, une approximation s'ajoutant à une autre, que si les dépressions mesurées sur modèle sont faibles, l'échelle de réduction géométrique raisonnable pour ces études (1:10 à 1:30), les  $p_v$  réduites, ce qui est bien le cas pour l'eau « naturelle » dans les conditions climatiques les plus courantes, l'inéquation (6) peut s'exprimer sans trop d'erreur sous la forme:

$$|\lambda_L| - p/\gamma|_M \ll 10 \text{ en mce} \quad (8)$$

où

mce = mètres colonne d'eau

$\lambda_L$  = échelle de réduction géométrique

$M$  = indice se référant au modèle

Cela étant, serons-nous vraiment à l'abri de la cavitation dans ce cas? L'expérience prouve qu'une sécurité totale n'est pas garantie: des irrégularités d'exécution ou survenues à cause de dégradations dues à d'autres facteurs [4], des dépassements de vitesses (débits) de dimensionnement [11], etc., peuvent être sources de cavitation.

Il faudra alors apprécier l'ensemble des conditions citées ici ainsi qu'au chap. I et, sans que la crainte de la cavitation tourne à l'obsession, envisager des mesures de prévention ou de protection à proprement parler.

## 3. Prévention de la cavitation

Prévenir la cavitation c'est l'empêcher de se produire ou de déployer ses effets au cas où elle devrait malgré tout apparaître.

Nous avons vu que l'étude sur modèle réduit des formes permettant de satisfaire de la manière la plus favorable aux conditions (6) ou (8), ne résout pas entièrement le problème.

Il reste alors surtout le moyen cité en introduction, objet de plusieurs études et applications [11, 12, 13, 14]: contrôler la cavitation par aération des écoulements.

Le propos de l'auteur n'est pas d'entrer dans le détail des dispositifs adoptés, décrits aux ouvrages cités ci-dessus. Le principe, toujours le même, est d'amener l'air à la pression atmosphérique au contact de la zone en dépression ou susceptible de l'être (décollements), où il sera aspiré par l'écoulement. Cela est fait au moyen de canaux à déflecteurs ou de dégagements (gradins) aménagés dans les parois et/ou fonds. Le choix du point d'injection et de la géométrie du dispositif (dimensions, formes) est déterminant.

L'émulsionnement qui s'ensuit:

- réduit la dépression locale;
- désorganise les tourbillons générateurs éventuels de cavitation;
- absorbe et condense les bulles de vapeur;
- agit en ressort amortisseur des ondes d'implosion.

L'injection d'air, si elle est bien faite, a un effet certain et spectaculaire [5, 6, 12]. Elle réduit par ailleurs aussi les fluctuations de pression en basses fréquences [6], stabilisant ainsi les écoulements.

Sur les supports des jets à forte vitesse, où la cavitation peut être déclenchée par des irrégularités dont l'emplacement n'est pas connu d'avance, un bon émulsionnement par en dessous est une couverture « tous risques ». Le faire systématiquement sur les coursiers des évacuateurs de crue haute chute, pour éviter les raccordements en courbe et ne pas avoir à se préoccuper de l'exécution correcte des surfaces nous paraît toutefois injustifié. Sans nous attarder sur des considérations concernant la fréquence des écoulements, l'augmentation de la profondeur due à l'émulsionnement et aux éventuelles ondes stationnaires générées par les raccordements anguleux et/ou irrégularités, peut devenir coûteuse. Il y a en plus les risques d'usure et de mise hors service des dispositifs d'aération prévus.

Par contre, là où le point de recollement ou d'impact (jets) est connu, il est possible de provoquer la condensation des bulles de vapeur loin de la paroi. Le moyen utilisé est d'y injecter de l'eau sous pression adéquate pour dévier la trajectoire de l'écoulement porteur [15]. Si cette eau est disponible à la pression souhaitée et doit être évacuée de toute manière, le procédé est envisageable.

#### Bibliographie

- [1] BERGERON, P.: *Nouvelles possibilités offertes par les machines hydrauliques*. Journ. Hydr. Research, No. 1, 1980.
- [2] DESTENAY, J., BERNARD, J.: *Quelques exemples de dégradation des bétons par cavitation dans les ouvrages hydroélectriques*. La Houille Blanche, n° 2-3, 1968.
- [3] WAGNER, W. E., JABARA, M. A.: *Cavitation Damage Downstream from Outlet Works Gates*. Communication n° 214, 14<sup>e</sup> Congrès AIRH, vol. 5, 1971.
- [4] BALL, J. W.: *Cavitation from Surface Irregularities in High Velocity*. Journ. Hydr. Div., ASCE, HY9, 1976.
- [5] PETERKA, A. J.: *The Effect of Entrained Air on Cavitation Pitting*. Proc. Minnesota Internat. Hydr. Conv., 1955.
- [6] TULLIS, J. P., SKINNER, M. M.: *Reducing Cavitation in Valves*. Journ. Hydr. Div., ASCE, HY6, 1968.
- [7] ROUSE, H.: *Engineering Hydraulics*. J. Wiley Inc., 6th Printing, 1967, pp. 29-30.
- [8] YALIN, M. S.: *Theory of Hydraulic Models*. MacMillan, 1971.
- [9] *Wasserbauliches Versuchswesen*. Ouvrage collectif, DVWW, Mitteilungsheft n° 4, Edit. H. Kobus, 1978, pp. 228-232.
- [10] MC CORMMACH, A. L.: *Dworshak Dam Spillway and Outlets Hydraulic Design*. Journ. Hydr. Div., ASCE, HY4, 1968.
- [11] COLGATE, D. M.: *Hydraulic Model Studies of Aeration Devices for Yellowtail Dam Spillway Tunnel*. US-Burec, REC-ERC-71-47, 1971.
- [12] BEICHLEY, G. I., KING, D. L.: *Cavitation Control by Aeration of High Velocity Jets*. Journ. Hydr. Div., ASCE, HY7, 1975.
- [13] DE S. PINTO, N. L.: *Cavitação e aeração em fluxos de alta velocidade*. CEHPAR, Univ. da Parana, Publicação n° 35, 1979.
- [14] QUINTELA, A. C.: *Flow aeration to prevent cavitation erosion*. Water Power, January, 1980.
- [15] GRANDAGE, R. E.: *Experiences with cavitation in waterworks valves*. Water Service Annual Techn. Survey, 1978.

Toutefois, les trois conditions mentionnées sont rarement réunies.

Enfin, là où l'usure par abrasion s'ajoute au risque de cavitation, seule la protection de la surface exposée entre en ligne de compte. Les blindages en acier ou en acier inoxydable sont, comme on le sait, les plus utilisés.

#### 4. Conclusions

Nous pensons avoir pu démontrer les points suivants:

1. La cavitation n'est pas un phénomène fréquent dans les ouvrages hydrauliques. De plus, elle est confinée, lorsqu'elle risque de se pro-

duire, à certains types d'ouvrages et de conditions d'écoulement.

2. Il existe des moyens simples, efficaces et éprouvés pour prévenir ou tout au moins limiter fortement les dommages éventuels.
3. La détection d'une cavitation possible dans les ouvrages hydrauliques est affaire expérimentale ou de jugement.

Adresse de l'auteur:

Jacques Bruschin  
Laboratoire d'hydraulique  
Ecole polytechnique fédérale  
CH-1015 Lausanne

## Bibliographie

### Klärschlamm — Les boues d'épuration

Exposés présentés au cours des Journées d'information des 5 et 6 septembre 1979 à Mürren. Publication de l'Association suisse pour l'aménagement des eaux (SWV), de la Ligue suisse pour la protection des eaux et de l'air (VGL) et de l'Office fédéral pour la protection de l'environnement (BUS). Editeur: « Wasser, Energie, Luft — Eau, énergie, air », CH-5401 Baden. Numéro spécial 1/2, 1980. 80 pages. 21 cm x 29,6 cm. Cartonné. Prix Fr. 39.—.

L'épuration des eaux usées restera discutable tant que l'on n'aura pas réussi à éliminer son produit final, c'est-à-dire les boues d'épuration, en le rendant aussi inoffensif que possible et de manière économique. La technique de l'épuration des eaux usées devient de plus en plus une technique du traitement

et de l'utilisation finale des boues. Du point de vue de la quantité, les boues d'épuration se placent à la tête de tous les déchets produits. Il s'agit en Suisse d'éliminer 2,6 millions de tonnes de boues par an, et cela de façon irréprochable, c'est-à-dire en les introduisant dans le sol sous forme concentrée après un traitement approprié (décharge) ou en les épandant sur le sol comme amendement. Ce dernier mode d'utilisation est, du reste, le plus avantageux tant du point de vue de l'économie publique que de celui d'une bonne gestion des déchets.

Les « Journées d'information 1979 de Mürren », organisées par l'Office fédéral pour la protection de l'environnement qui y a invité tous les groupements spécialisés dans la protection des eaux, ont transmis, sous forme concentrée, les plus récentes connaissances acquises par la recherche, le développement et la pratique dans le domaine du traitement, de l'utilisation et de l'élimination des boues d'épuration en Suisse. Des 17 exposés

présentés par des représentants compétents de l'administration publique, de la pratique et de la science, il ressort clairement qu'il n'existe pas de recette universelle pour résoudre le problème des boues, car ce sont les conditions locales qui influencent le mode de traitement et d'utilisation.

Les questions relatives à l'hygiénisation des boues et aux substances nocives sont en rapport étroit avec l'utilisation des boues dans l'agriculture. Comme auparavant, les paysans acceptent d'utiliser les boues comme engrais, à condition qu'elles aient été suffisamment stabilisées et débarrassées autant que possible de germes pathogènes et de substances nocives. Les conséquences qui en résultent pour ce qui est de la technique des procédés, de la rentabilité et de la « politique de protection des eaux » de la Confédération furent également abondamment discutées durant ces mémorables Journées d'information. C'est à l'Office fédéral pour la protection de l'environnement et

à la rédaction de la revue « Wasser, Energie, Luft — Eau, énergie, air » que revient le mérite d'avoir publié tous les exposés — la plupart d'entre eux en allemand et en français — dans un numéro spécial de belle présentation, richement illustré et rédigé avec le plus grand soin.

Il serait souhaitable que tous les groupements responsables du traitement des boues d'épuration ou s'y intéressent soient en possession de ce numéro spécialement consacré aux boues.

#### Ouvrages reçus

##### Erläuterungen zum Ermüdungsnachweis von Kranbahnen

Manfred Hirt. Tiré à part de « Schweiz. Ingenieur & Architekt » n° 30/31, 1979.

##### Die Verlandung von Flusstauhaltungen

Daniel Vischer, Zurich. Tiré à part de « Schweiz. Ingenieur & Architekt », n° 14/1980.