

Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 77 (1985)
Heft: 5-6

Artikel: Le nouveau tunnel de cavitation
Autor: Henry, Pierre
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-940927>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 10.02.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

Tripet J. P. (1976 b): Dye tests in remote areas. Application to the karst of Alta Verapaz, Guatemala. Paper presented at the 3rd International Symposium of Underground Water Tracing (3. SUWT), Ljubljana-Bled, Yugoslavia, 1976, p. 299-307.

Tripet J. P. (1982): Investigation on hydraulic characteristics of karstified limestone formations, with reference to the use of a finite element model (Alta Verapaz, Guatemala). International Workshop «Karst Hydrology of the Caribbean Region», La Havana, Cuba, December 5-12, 1982 (sous le patronage de l'UNESCO) (à paraître).

Organisation du projet, remerciements

Nous remercions l'«Instituto Nacional de Electrificación» (INDE), maître d'œuvre de l'aménagement hydro-électrique Pueblo Viejo-Quixal, et particulièrement la direction de l'INDE, de sa coopération et son assistance. Le projet Pueblo Viejo-Quixal a été élaboré, et la construction de l'aménagement supervisée par un consortium constitué par les trois compagnies suivantes: Lahmeyer International GmbH, chef de file du consortium, Motor-Columbus Ingénieurs-Conseils SA et International Engineering Company Inc. A côté du projet du barrage et de la galerie d'aménée de 26 km, Motor-Columbus a été chargée du programme de recherches géologiques et hydrogéologiques du début de la phase des études jusqu'à la phase de construction.

Texte préparé d'après un exposé présenté à la journée d'étude «Constructions souterraines» du Groupement suisse de la géologie de l'ingénieur, Zurich, le 23-9-1983.

Adresse de l'auteur: *Jean-Pierre Tripet, Dr sc., hydrogéologue principal, Motor-Columbus Ingénieurs-Conseils SA, Parkstrasse 27, CH-5401 Baden/Suisse.*

Le nouveau tunnel de cavitation

de l'Institut de machines hydrauliques et de mécanique des fluides à l'EPFL

Pierre Henry

1. Description du phénomène

La cavitation est une ébullition de l'eau due à un abaissement de la pression, généralement à température normale (10 à 20°). La formation de bulles de vapeur dans un liquide peut en effet se produire de deux manières différentes:

- Augmentation de la température à pression constante (ébullition)
- Diminution de la pression à température constante (cavitation).

Dans le cas de l'ébullition, les bulles apparaissent dans le liquide et leur diamètre augmente d'une manière progressive, alors que dans le phénomène de cavitation, cette augmentation se produit de manière explosive lorsque la pression baisse en dessous d'un certain seuil.

Le phénomène de cavitation se présente sous plusieurs aspects distincts. Nous décrirons les deux principaux, qui sont la cavitation à bulles séparées et la cavitation à poche.

La *cavitation à bulles séparées* se présente sous forme de cavités isolées. Ces cavités (bulles) sont initiées à partir de germes contenus dans le liquide. Les germes sont des microbulles de gaz (en général il s'agit d'air libre ou fixé sur des particules solides). Les bulles se déplacent avec le fluide. Elles prennent naissance dans la zone de pression minimale, croissent dans la zone de pression faible puis disparaissent en implosant lorsque la pression remonte. La figure 1 montre l'aspect typique des bulles à la sortie d'une turbine Francis.

La *cavitation à poche* a l'aspect d'une cavité unique attachée à une paroi solide. Le contour de la poche est stable à l'amont et très fluctuant à l'aval. Cette forme de cavitation se développe en général sur le bord d'attaque des profils, à l'entrée des roues de pompes et de turbines. La figure 2 illustre une cavitation à poche à l'entrée d'une roue de pompe-turbine.

2. Effets néfastes de la cavitation

L'implosion brutale des bulles de cavitation provoque des dégâts lorsqu'elle se produit près d'une paroi. En outre, le phénomène de cavitation s'accompagne d'autres effets néfastes tels que bruit important, vibrations et diminution des performances des machines hydrauliques.

Le mécanisme d'érosion est loin d'être entièrement élucidé. La figure 3 montre l'évolution du phénomène de la cavitation à bulles. Un germe (microbulle d'air d'environ 50 µm) pénétrant dans une zone à basse pression, augmente brutalement de diamètre pour donner naissance à une bulle de cavitation. Lorsque cette bulle arrive dans une zone de pression plus élevée, elle se déforme et donne naissance à un microjet animé d'une très haute vitesse. Ce jet provoque un petit cratère, illustré par la figure 4. Cette photo a été prise au microscope à balayage sur un échantillon de laiton placé sur une roue modèle de turbine Francis.

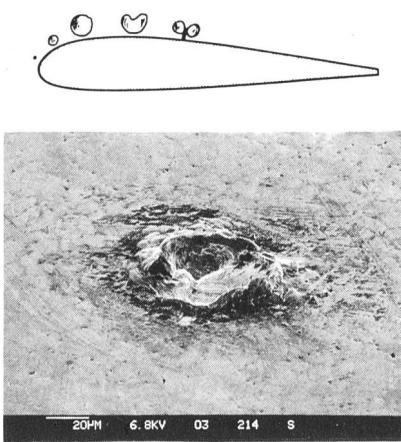
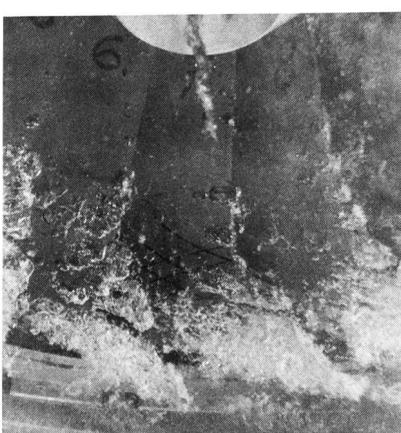


Figure 1, à gauche. Bulles de cavitation à la sortie d'une roue d'un modèle réduit de turbine Francis.

Figure 2, au milieu. Cavitation à poche à l'entrée d'une roue d'un modèle réduit de pompe-turbine, fonctionnant en pompe.

Figure 3, à gauche en haut. Schéma illustrant la cavitation à bulles avec, de gauche à droite, la phase de grossissement de la bulle puis l'implosion et la formation d'un microjet.

Figure 4, à gauche, en bas. Photographie au microscope électronique à balayage, d'un cratère provoqué par l'implosion d'une bulle sur un échantillon de laiton, placé sur une roue modèle de turbine Francis.



Figure 5. Schéma illustrant la cavitation à poche. On remarque la poche attachée au profil et les tourbillons dont l'effondrement provoque des dégâts.

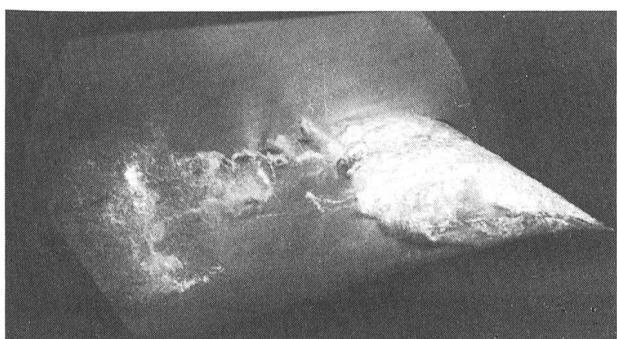


Figure 6. Cavitation à poche sur un profil installé dans la veine d'essai du tunnel de cavitation.



Figure 7. Dégâts de cavitation observés sur les aubes d'une turbine Francis d'une puissance de 250 MW.

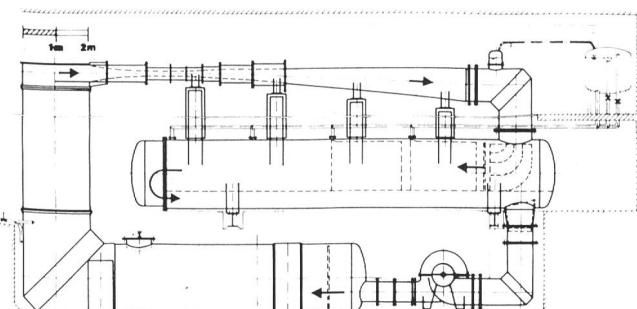
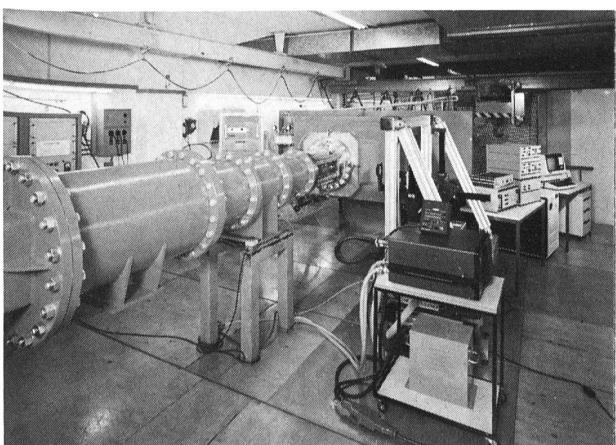


Figure 8. Vue d'ensemble en élévation du nouveau tunnel de cavitation. Longueur totale 20 m, hauteur 8 m.

Figure 9. Photographie montrant, de gauche à droite, le divergent, la veine d'essai, le convergent et l'appareillage de mesure de la vitesse d'écoulement par un système Laser-Doppler.



Le phénomène d'érosion, provoqué par la cavitation à poche, n'est pas encore complètement élucidé. On pense actuellement que les dégâts sont dus à l'effondrement violent des petits tourbillons qui se produisent à l'aval de la poche de vapeur. La figure 5 montre la poche et les tourbillons. La photographie 6, prise tout récemment dans notre tunnel de cavitation, semble confirmer cette hypothèse.

La répétition des chocs sur la paroi finit par occasionner une dislocation de la matière et par conséquent des dégâts qui peuvent atteindre des profondeurs importantes sur de grandes surfaces. La photo de la figure 7 montre une érosion profonde sur une grande turbine Francis.

L'aspect des dégâts de cavitation est typique d'une attaque perpendiculaire à la paroi, à la différence des dégâts dus au sable qui sont provoqués par une attaque tangentielle et ont de ce fait un aspect beaucoup plus lisse.

La réparation des érosions de cavitation se fait par soudure et meulage. Ces réparations sont longues, elles nécessitent l'arrêt du groupe turbine-alternateur et sont par conséquent très coûteuses. En outre, après plusieurs réparations, la roue subit des déformations importantes. Un démontage devient alors indispensable, pour réusiner la roue après un traitement thermique. Les constructeurs et les exploitants de machines hydrauliques sont donc confrontés de manière permanente au problème de la cavitation.

Il est par exemple extrêmement difficile, à l'heure actuelle, de donner des garanties précises de durée de vie d'une machine, de même que d'optimiser l'implantation de la machine, autrement dit sa position par rapport au niveau du plan d'eau aval. Si la machine est implantée trop bas, le génie civil coûtera trop cher, si elle est implantée trop haut, la durée de vie en souffrira.

L'industrie suisse s'est approchée de l'Institut de machines hydrauliques et de mécanique des fluides dès 1981 pour mettre sur pied un programme de recherche commune avec l'aide de la Commission pour l'encouragement des recherches scientifiques et du Nationaler Energie-Forschungs-Fonds.

L'outil principal de cette recherche est un grand tunnel de cavitation.

3. Tunnel de cavitation

L'Institut de machines hydrauliques et de mécanique des fluides possède des installations d'essai de machines hydrauliques sur modèle réduit très performantes qui permettent notamment de faire des mesures en cavitation.

Toutefois, la géométrie des machines hydrauliques est relativement complexe et les écoulements sont tridimensionnels, donc difficilement accessibles à la mesure et au calcul. La nouvelle installation se présente sous la forme d'une conduite en circuit fermé avec, comme partie principale, une veine de mesure, qui permet de reproduire, dans un premier temps, des écoulements bidimensionnels autour de profils.

Notre ambition était de concevoir une installation à très hautes performances, c'est-à-dire parmi les plus élevées du monde. Cette ambition est pratiquement réalisée avec néanmoins quelques contraintes dues à un budget et à un bâtiment de dimensions malheureusement limitées.

Les caractéristiques principales sont les suivantes:

Vitesse maximale dans la veine d'essai	50 m/s
Débit maximal	1,125 m ³ /s
Section de la veine	150 × 150 mm
Puissance de la pompe	500 kW

La figure 8 montre l'ensemble de l'installation. La disposition originale de l'installation, sur trois étages, a permis une utilisation optimale du bâtiment existant.

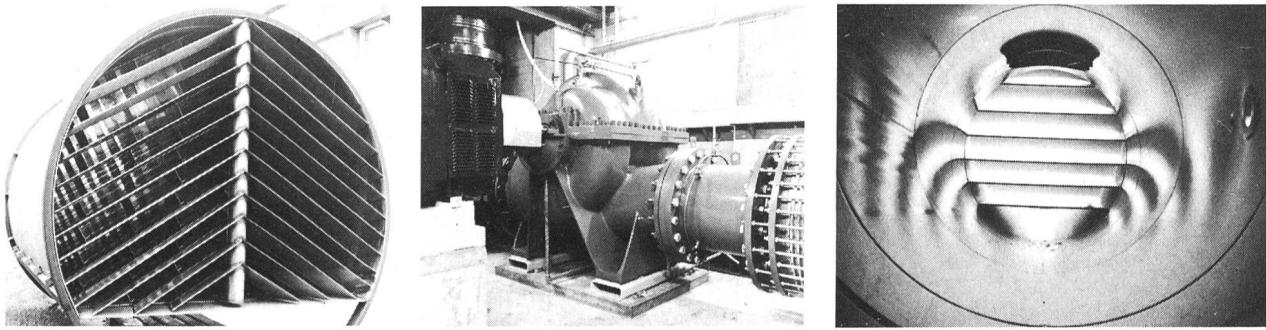


Figure 11, à gauche. Photographie du débulleur montrant les plaques et le tuyau d'évacuation de l'air.

Figure 12, au milieu. Pompe principale semi-axiale à double ouïe. Débit optimum 1,3 m³/s sous une pression de 20 mCE à 700 t/min.

Figure 13, à droite. Coude aileté entre la partie horizontale et la partie verticale du réservoir. Diamètre 2,2 m.

On remarquera en outre que tout le circuit est autoporteur et qu'il n'a aucune liaison avec le plancher qui supporte l'appareillage de mesure. On évite ainsi que les vibrations violentes produites par la cavitation ne se transmettent aux instruments de mesure.

La *veine d'essai* (figure 9) se compose d'une structure résistante supportant des fenêtres en plexiglas de haute qualité, de manière à permettre la mesure de vitesse par laser. La veine est prolongée par un long *diffuseur* dont l'enveloppe extérieure est constituée de plusieurs tronçons cylindriques. Le profil hydraulique à l'intérieur a été obtenu par un moulage en résine époxyde qui assure une excellente précision et un très bon état de surface.

L'eau descend ensuite et pénètre dans le *débulleur* qui est un cylindre de 2,1 m de diamètre et de 14 m de longueur. A l'intérieur, un système de plaques parallèles permet d'éliminer les bulles d'un diamètre supérieur à 0,1 mm. La figure 10 illustre ce dispositif en montrant le système de captation des bulles par des plaques horizontales et une conduite verticale. La photographie 11 montre le dispositif avant sa mise en place.

L'eau revient ensuite en arrière par la base du débulleur pour pénétrer dans la *pompe* (figure 12). Celle-ci est du type semi-axial à double ouïe. Son point de fonctionnement optimum est de 1,3 m³/s pour une pression de 20 m à une vitesse de rotation maximale de 700 t/min.

La pompe est entraînée par un moteur à courant continu alimenté par un système de redresseur à thyristors qui permet de faire varier la vitesse entre 50 et 700 t/min. Le circuit se poursuit par un *réservoir* dont la fonction est de dissoudre les petites bulles, d'un diamètre inférieur à 0,1 mm, et de les faire ainsi disparaître. Cet élément se présente sous forme d'une conduite avec un coude aileté (figure 13) d'un diamètre de 2,1 m et d'une longueur totale de 16 m. La faible vitesse d'écoulement donne le temps nécessaire aux microbulles pour se dissoudre. Un coude, suivi d'un convergent, amène l'eau dans la veine d'essai. Ce convergent très

prononcé (rapport de section de 46) permet d'avoir un écoulement excellent dans la veine.

Une *instrumentation de mesure* très performante complète l'installation. L'élément principal est constitué d'un anémomètre Laser-Doppler (figure 9) à deux composantes qui permet de mesurer la vitesse en un point quelconque de l'écoulement sans que celui-ci soit perturbé.

En guise de conclusion, on peut affirmer que l'installation, mise en service depuis septembre 1984, répond parfaitement au cahier des charges. L'équipe de recherche de l'Institut de machines hydrauliques et de mécanique des fluides possède ainsi un outil de travail magnifique qui sera une aide efficace dans la résolution des nombreux mystères que recèle encore le phénomène de la cavitation.

4. Recherche en cavitation

Le phénomène de la cavitation dans les turbomachines a été découvert il y a longtemps. Euler (1707–1783) l'a déjà observé. Toutefois, le développement de la connaissance scientifique du phénomène a été très lent, ceci pour des raisons évidentes. Les phénomènes de cavitation se déroulent extrêmement rapidement et dans un environnement géométrique complexe. Il faut donc des appareils de visualisation et de mesure sophistiqués afin de suivre et de quantifier ce qui se passe dans l'écoulement cavitant.

Les outils modernes (caméra ultrarapide, anémomètre Laser-Doppler, capteurs de pression d'un temps de réponse ultracourt, etc.) permettent d'analyser le mécanisme physique des phénomènes. Il s'agit d'abord de diagnostiquer ce qui se passe dans l'écoulement afin de déterminer le type de cavitation, et ensuite d'isoler les phénomènes et les étudier séparément.

La compréhension physique des phénomènes est naturellement d'une importance capitale pour

- prédire la cavitation – les lois de similitude;
- mieux agir sur la géométrie de la machine afin d'éviter une cavitation dangereuse – le tracé d'aubage;
- prédire quantitativement les dégâts éventuels et leur localisation en cas de cavitation – l'érosion.

Nos objectifs dans notre plan de recherche concernent tout particulièrement ces trois thèmes principaux. Ces thèmes sont très interdisciplinaires et, par conséquent, notre groupe de recherche est formé de spécialistes dans plusieurs domaines, à savoir: machines hydrauliques, mécanique des fluides, science des matériaux, mécanique des solides.

Adresse de l'auteur: Prof. Pierre Henry, Institut de machines hydrauliques et de mécanique des fluides, EPFL, 33, avenue de Cour, CH-1007 Lausanne.

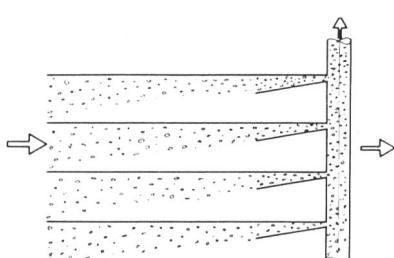


Figure 10. Schéma de principe du débulleur, avec les plaques et les pièges qui permettent l'expulsion des bulles d'air dans le tuyau vertical.