Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria

Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband

Band: 110 (2018)

Heft: 3

Artikel: Dimensionnement des orifices pour étranglement des cheminées d'équilibre

Autor: Adam, Nicolas J. / De Cesare, Giovanni / Schleiss, Anton J.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-941585

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: 10.07.2025

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

Dimensionnement des orifices pour étranglement des cheminées d'équilibre

Nicolas J. Adam, Giovanni De Cesare, Anton J. Schleiss

Résumé

Les orifices sont utilisés dans divers domaines de l'hydraulique par exemple pour des étranglements au pied de cheminées d'équilibre sans modification constructive de la cheminée d'équilibre. Dans ce cas, un orifice permet d'adapter un aménagement hydroélectrique existant à une augmentation modérée de débit. Une étude systématique a permis d'améliorer la connaissance de ces orifices du point vue de leur comportement asymétrique, vis-à-vis de la cavitation ou de leurs longueurs caractéristiques. Ces différents comportements ont été évalués en détail afin d'en tirer des relations empiriques permettant de caractériser chaque géométrie d'orifice du point de vue de pertes de charge cibles et du risque de cavitation. L'établissement d'un catalogue interactif sur la base des essais physiques et numériques permet aux ingénieurs de trouver une géométrie correspondant aux pertes de charge souhaitées obtenues par l'analyse numérique du comportement transitoire du système d'adduction d'eau de l'aménagement hydroélectrique.

Zusammenfassung

Drosseln werden in verschiedenen Gebieten der Hydraulik verwendet, beispielsweise beim Einlass in das Wasserschloss ohne konstruktive Veränderung des Wasserschlosses. In diesem Fall ermöglicht eine Drossel die Anpassung einer bestehenden Wasserkraftanlage an eine moderate Zunahme des Abflusses. Eine systematische Untersuchung hat es ermöglicht, die Kenntnis dieser Drossel in Bezug auf ihr asymmetrisches Verhalten bezüglich Kavitation oder ihre charakteristischen Längen zu verbessern. Diese unterschiedlichen Verhaltensweisen wurden im Detail ausgewertet, um empirische Beziehungen zur Charakterisierung jeder Drosselgeometrie unter dem Gesichtspunkt der Zieldruckverluste und des Kavitationsrisikos herzuleiten. Die Erstellung eines interaktiven Katalogs auf der Grundlage physikalischer und numerischer Tests ermöglicht den Ingenieuren, die Drosselgeometrie zu optimieren, sodass diese den gewünschten Druckverlusten aufbaut. Der Zieldruckverlust wird durch die numerische Analyse von instationäre Abflussvorgängen im Druckleitungssystem erniert.

1. Introduction

Augmenter la flexibilité des aménagements hydroélectriques à haute chute permet d'améliorer leur compétitivité sur le marché électrique. Un moyen d'améliorer la flexibilité est de concentrer la production d'électricité dans un plus court laps de temps en augmentant le débit installé de l'aménagement. En règle générale, la mise en place d'un étranglement au bas des cheminées d'équilibre suffit à adapter un aménagement pour des augmentations modérées de débits et ainsi de puissance.

La perte de charge souhaitée des étranglements par orifice est généralement définie avec des simulations transitoires numériques 1D (*De Cesare et al.* 2015; *Hachem et al.* 2013; *Nicolet* 2007) du système d'adduction d'eau complet de l'aménagement hydroélectrique. Un orifice est un moyen simple de modifier la géométrie au pied des cheminées d'équilibre et permet d'insérer une asymétrie dans le comportement hydraulique locale qui permet d'assurer la stabilité globale du système (*Gabl et al.* 2011) sans modification de la cheminée d'équilibre elle-même.

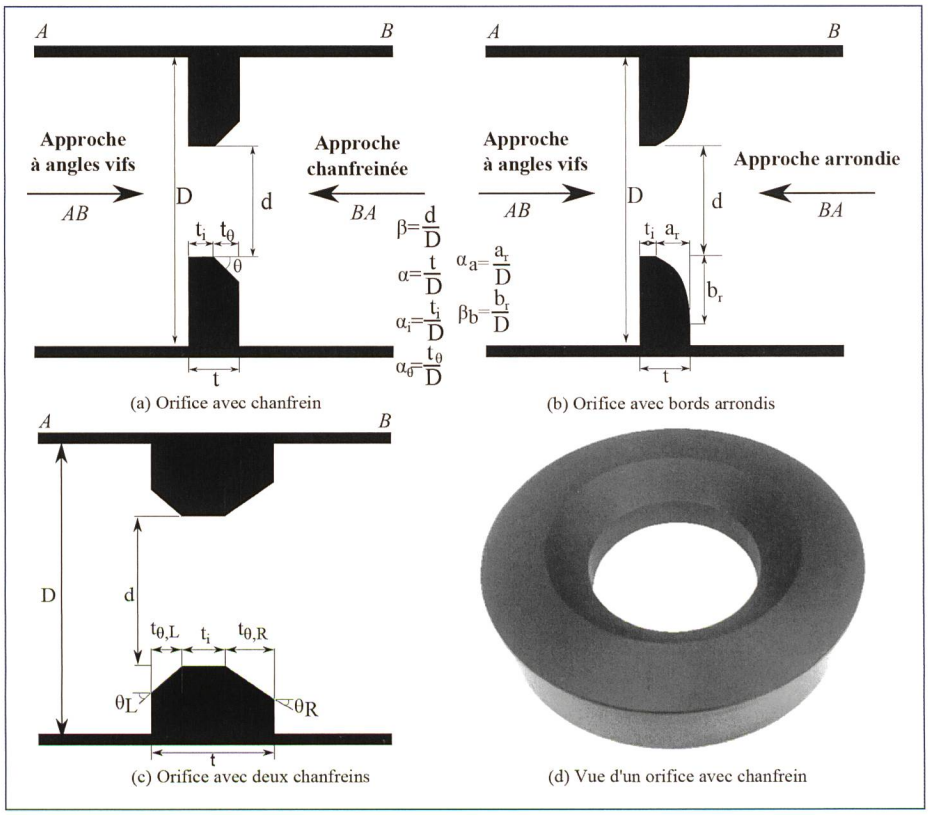


Figure 1. Trois différentes géométries d'orifices testées dans l'étude avec définition des paramètres géométriques.

Le dimensionnement d'un orifice et, principalement, le lien entre l'étude numérique 1D et la géométrie est actuellement réalisé au cas par cas souvent au moyen d'une étude sur modèle physique (*Adam et al.* 2017; *Alligne et al.* 2014; *De Cesare et al.* 2015; *Hachem et al.* 2013; *Kendir* and *Ozdamar* 2013). C'est pourquoi un grand nombre d'orifices avec trois différentes géométries ont été testés dans cette étude. Le but est de créer une base de données avec des essais expérimentaux et numériques reliant les caractéristiques géométriques et des coefficients de perte de charge.

2. Méthodes

2.1. Types d'orifices

Trois différentes géométries d'orifices ont été testées durant cette étude : orifice avec chanfrein, orifice avec bords arrondis ou orifice avec deux chanfreins comme montré à la *Figure 1* avec la définition des paramètres géométriques testés. Ces différents orifices permettent d'introduire un comportement asymétrique entre les deux sens d'écoulement. Au total, 55 différentes géométries d'orifice ont été testées avec différents rapports de contractions β, d'épaisseurs α, d'épaisseurs internes α_i et d'angle θ.

2.2. Modèle expérimental et simulations numériques

Lors de cette étude, les orifices ont été étudiés avec une installation expérimentale *(Figure 2)* et des simulations numériques *(Figure 4)*.

D'un côté, l'installation expérimentale est située au Laboratoire de Constructions Hydrauliques à l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne. Comme montré à la *Figure 3*, la conduite principale, connectée à l'alimentation du laboratoire via deux coudes à 180 degrés, est faite en PVC avec un diamètre de 0.216 m et d'une longueur de 4 m. Afin de limiter le comportement asymétrique induit par les changements de direction des tuyaux d'alimentation du laboratoire, deux types de stabilisateur d'écoulement sont utilisés: un nid d'abeille et une croix en PVC (d'une longueur d'environ $10D_{LS}$). La pression est enregistrée au moyen de capteurs de pression, KELLER-series 25, et le débit au moyen de débitmètre ENDRESS+HAUSER PROMAG 50 W.

D'un autre côté, les simulations numériques ont été effectuées au moyen d'ANSYS CFX version 17.1. Le domaine de fluide est défini comme la conduite principale du modèle expérimental *(Figure 4)*. L'orifice est donc placé en partie centrale de la conduite et distant de 10D des conditions de bords: débit à l'amont et pression à l'aval. Un maillage de type «O-Mesh» (*ANSYS* 2016) a été mis en œuvre au niveau de la section circulaire de la conduite afin d'améliorer sa qualité. Différents raffinements de maillage ou types de modèle de turbulence ont été testés et comparés aux résultats du modèle physique. Finalement, le modèle SST a été choisi avec un maillage de 1.5 millions de cellules.

Les résultats (Section 3) ont été déterminés, expérimentalement, au moyen de dix débits et, numériquement, au moyen de trois débits. Même le plus petit débit caractérise un écoulement pleinement turbulent, $Re_D > 10^4$ (*Blevins* 1984; *Idel'cik* 1969).

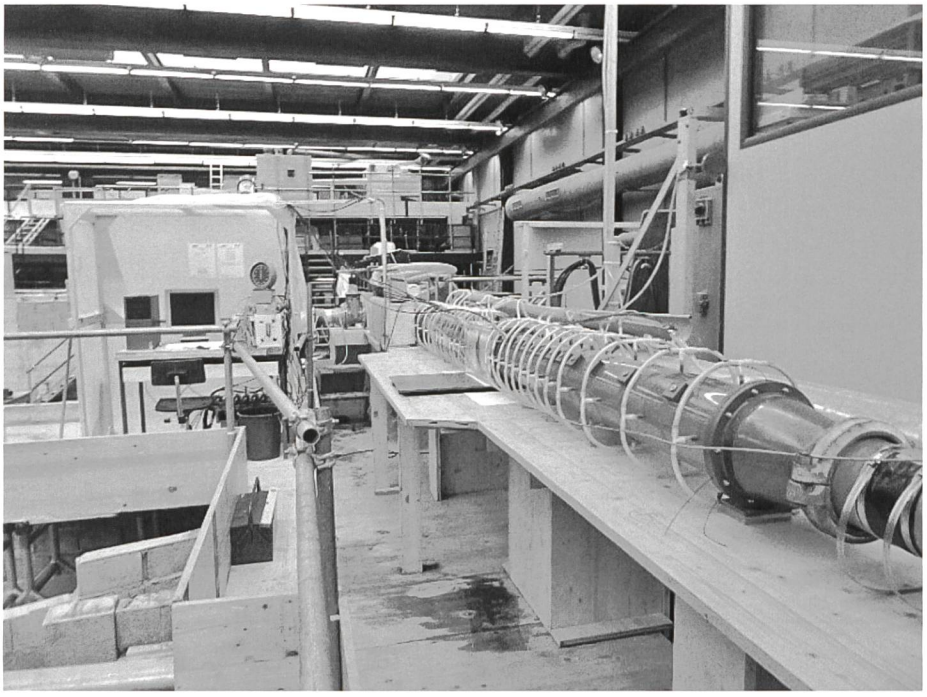


Figure 2. Vue générale du modèle expérimental au LCH (EPFL).

3. Dimensionnement d'un orifice

3.1. Perte de charge stationnaire

Comme abordé à la Section 1, la première étape est généralement de réaliser une étude transitoire numérique 1D dont le résultat est une paire de coefficients de perte de charge dans les deux sens d'écoulements, i. e. vers et hors de la cheminée d'équilibre. L'étude permet de trouver une ou plusieurs géométries d'orifice produisant cette paire de coefficients de perte de charge donnée. Différentes méthodes ont été développées:

1) Une feuille excel est disponible en ligne (*Adam*, 2017), voir Section 4.
2) Il est possible de déterminer via les relations empiriques ajustées sur les

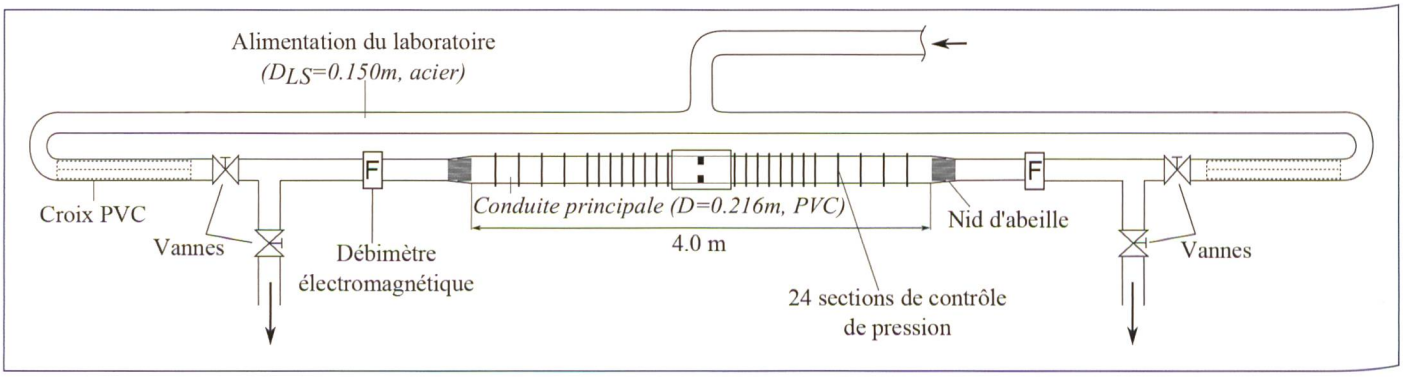


Figure 3. Vue schématique en plan du modèle expérimental (LCH-EPFL).

résultats numériques et empiriques et résumées ci-dessous:

- Approche à angles vifs: Le coefficient de perte de charge dépend seulement du coefficient de contraction β et de l'épaisseur interne de l'orifice α_i. Il est donc possible de déterminer des paires (β,α_i) comme montré à la *Figure 5* ou par l'équation (1) et le *Tableau 1*.
- Approche chanfreinée : Pour les orifices avec un chanfrein, l'asymétrie est déterminée principalement par l'angle du chanfrein, par son épaisseur caractérisée par le coefficient α_θ (Figure 1) mais aussi par le coefficient de l'épaisseur interne de l'orifice α_i. Pour les orifices avec deux chanfreins, chaque coefficient de perte de charge peut être défini individuellement comme donné par l'équation (1) et le *Tableau 1*.
- Approche arrondie: Le coefficient de perte de charge dans cette approche d'écoulement dépend très peu de la forme de l'arrondi mais plus de l'épaisseur de celui-ci, α_a, comme donné par l'équation (1) et le *Tableau 1*.

$$k = \lambda_k \cdot \Upsilon_{\alpha i} \frac{\left(1+\tau\sqrt{1-\beta^2}-\beta^2\right)^2}{\beta^4} \qquad (1)$$

Avec λ_k et $\Upsilon_{\alpha i}$ ont été déterminés expérimentalement et sont donnés par le Tableau 1 pour les approches chanfreinée et arrondie.

3.2. Longueurs caractéristiques

Comme montré dans la Section 2, tous les orifices ont été placés dans une situation idéale avec des conduites rectilignes. Afin de pouvoir appliquer les différentes relations empiriques définies à la Section 3.1, des longueurs caractéristiques ont été mises en évidence et leur influence sur les coefficients de perte de charge ont été évaluées. D'un côté, la longueur d'influence *(Figure 6)* caractérise la partie de la conduite à l'aval de l'orifice qui est perturbée par l'orifice. D'un autre côté, la longueur de rattachement caractérise la longueur aval où le jet se rattache à la paroi de la conduite *(Figure 6)*.

Les équations (2) et (4) prédisent respectivement les longueurs d'influence et de rattachement.

$$l_j = \left[1.47 + 6.90 \cdot \beta + 0.77 \cdot \alpha_i\right] \cdot \lambda_j\left(\alpha_i, \theta\right) \qquad (2)$$

avec λ_j est donné par l'équation (3) pour les orifices avec un chanfrein.

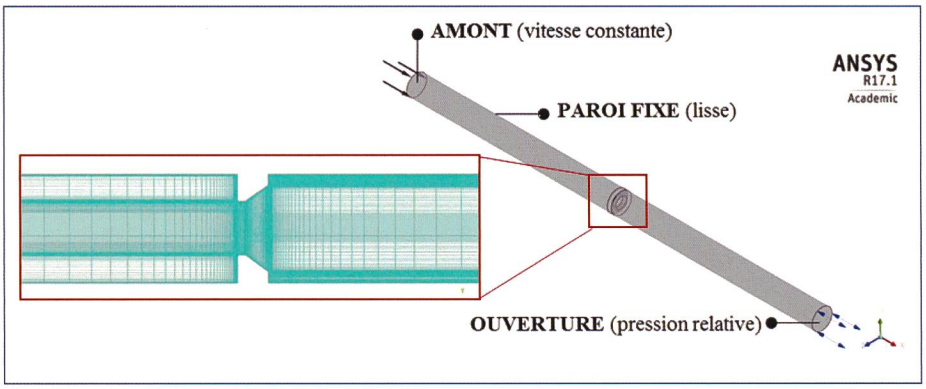


Figure 4. Géométrie utilisée dans le modèle numérique avec zoom sur une coupe du maillage utilisé.

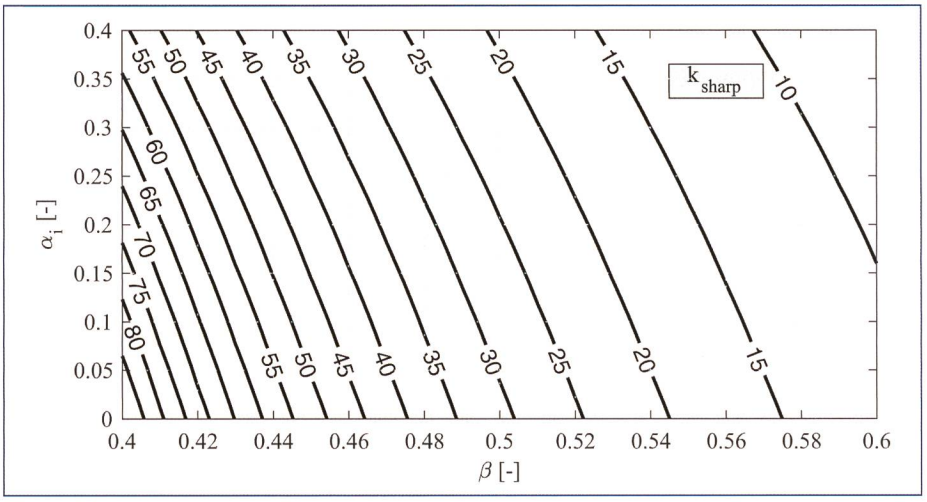


Figure 5. Variation du coefficient de perte de charge pour l'approche à angle vif pour le coefficient de contraction β variant de 0.4 à 0.6 et du coefficient d'épaisseur interne de l'orifice α_i variant de 0 à 0.4.

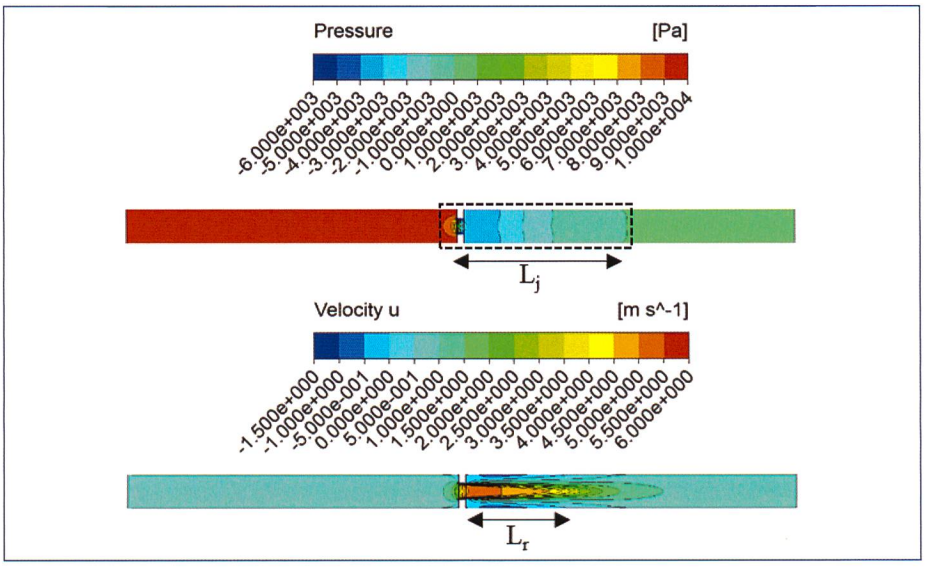


Figure 6. Champs de pression et de vitesse dans la conduite avec un orifice en position centrale – définition des longueurs d'influence Lj et de rattachement Lr.

	λ_k	λ^0_k	$\Upsilon_{\alpha i}$	$\kappa_{\alpha i}$
Approche à angle vif	1	/	$1-\kappa_{\alpha i}\cdot\alpha_i$	0.9486
Approche chanfreinée	$\frac{\lambda_0^k\cdot(\alpha-\alpha_i)+0.0125}{(\alpha-\alpha_i)+0.0125}$	$1.30\theta^4-5.97\theta^3+9.05\theta^2-4.55\theta+1$		$3.18\theta^4-13.88\theta^3+18.66\theta^2-7.29\theta+0.95$
Approche arrondie		0.271		0.071

Tableau 1. Coefficients utilisés pour l'évaluation empirique (donnée à l'équation [1]) des pertes de charge en fonction des différentes approches définies à la Figure 1.

$$\lambda_j(\alpha_i,\theta) = 1 + d_{l,j}(\alpha_i)\cdot\sin^2(2\theta) \quad (3)$$

avec $d_{l,j} = 0.97 \cdot \alpha_i + 0.14$

$$l_r = \begin{cases} a_{l,r}(\alpha_i)\cdot\gamma_o & si \quad \beta \geq 0.5 \\ b_{l,r}(\alpha_i)\cdot\gamma_o + c_{l,r}(\alpha_i) & si \quad \beta < 0.5 \end{cases} \quad (4)$$

avec

$$\gamma_o = \frac{1-\beta}{2}$$

et $a_{l,r}$, $b_{l,r}$, $c_{l,r}$ sont données par l'équation (5).

$$a_{l,r} = -5.46\cdot\alpha_i + 14.10$$
$$b_{l,r} = 3.95\cdot\alpha_i + 2.32 \quad (5)$$
$$c_{l,r} = \frac{a_{l,r} - b_{l,r}}{4}$$

La *Figure 7* montre les variations de l_r et l_j pour différents paramètres géométriques: le coefficient de contraction β, d'épaisseur interne de l'orifice α_i et du l'angle de chanfrein θ.

Des essais expérimentaux sur l'influence de la position de l'orifice dans une jonction en Té ont été réalisés et ont montrés que l'influence des conditions avales se limitent à la longueur de rattachement (*Adam* 2017; *Adam* and *De Cesare* 2015). Cependant, la longueur d'influence reste intéressante afin de déterminer la mise en place de différents orifices en série (*Zhang* and *Chai* 2001).

3.3. Cavitation

Il est possible de trouver différentes géométries d'orifice produisant le même couple de pertes de charge. Cependant, certaines géométries sont plus susceptibles de subir de la cavitation que d'autres. La cavitation peut être acceptée selon certaine occurrence et sévérité si elle n'influence pas les pertes de charge (*Ferrarese et al.* 2015; *Malavasi* and *Messa* 2011) et donc le fonctionnement global du système en charge.

Le nombre d'apparition de la cavitation caractérise les conditions d'apparition des premières bulles de cavitation au bord de l'orifice. Cette faible cavitation influence peu les pertes de charge et peut être trop conservateur pour le design. C'est pourquoi, un nombre d'apparition de la cavitation dans la veine contractée à l'aval de l'orifice a été développé. L'équation permet de prédire le nombre d'apparition de la cavitation tandis que l'équation prédit le nombre d'apparition de la cavitation dans la veine contractée. Pour chaque orifice, σ_{vc} est toujours plus petit que σ_i comme la cavitation dans la veine contractée se produit après.

$$\sigma_i = \left(1 + 2.02\beta^2 + 2.50\alpha_i^{1.5}\right)\lambda_\sigma(\theta) \quad (6)$$

avec $\lambda_\sigma = 1 + 4.15\sin^2(2\theta)$

$$\sigma_{vc} = \begin{cases} 1 + 1.47\beta^2 + 0.45\alpha_i^{1.5} \\ 1 + 2.01\beta^2 + 0.23\alpha_i^{1.5} \end{cases} \quad (7)$$

(approche angle vif)
(approche chanfreinée)

Lier à chaque géométrie d'orifice avec un chanfrein et un nombre d'apparition de la cavitation permet de choisir l'orifice le moins sujet à la cavitation. En outre, il est possible de mettre en évidence l'apparition dans à supprimer de la cavitation durant des oscillations de masse dans une chambre d'équilibre (comme montré par la *Figure 8*).

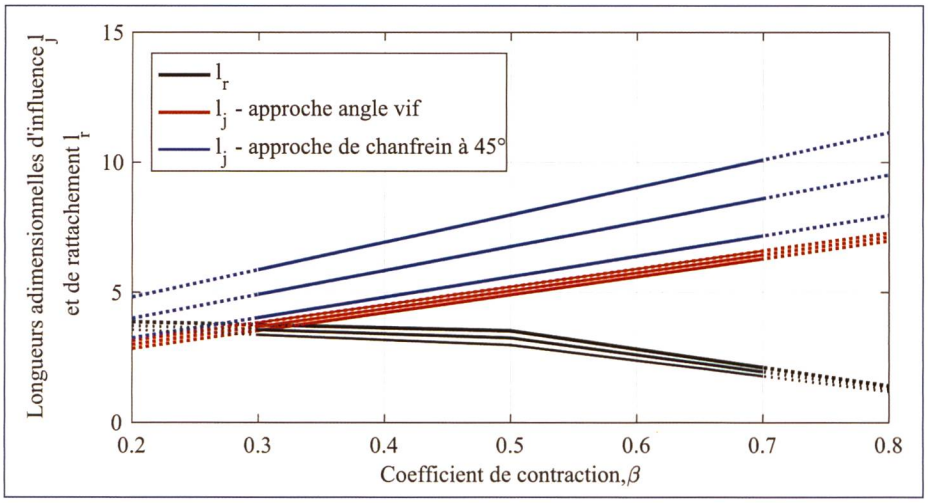


Figure 7. Evolution des longueurs adimensionnelles de rattachement l_r et d'influence l_j pour trois coefficients d'épaisseur (α_i=0, 0.2 et 0.4) et deux angles vifs (θ=0° et 45°).

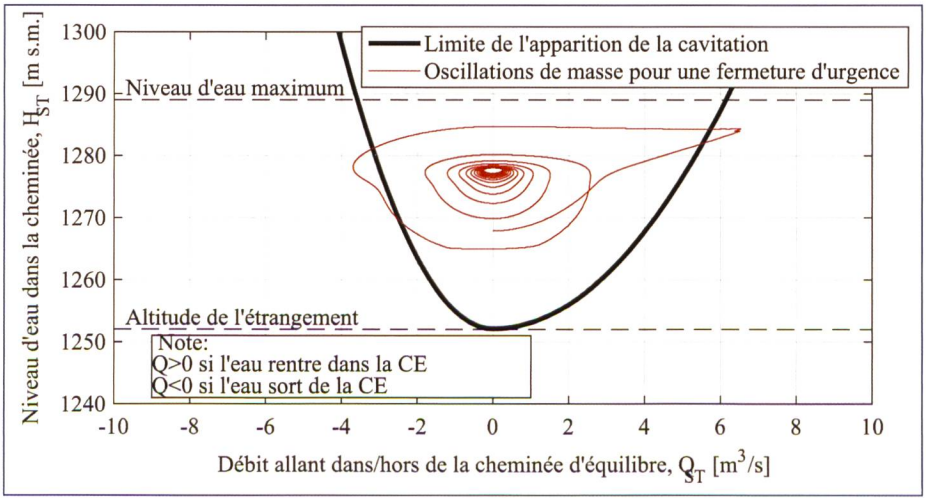


Figure 8. Evaluation graphique du risque d'apparition de la cavitation dans une cheminée d'équilibre soumis à une fermeture d'urgence entrant une oscillation de masse convergeante.

4. Utilisation de l' «ExpertSheet»

La *Figure 9* présente l'ExpertSheet disponible en ligne (*Adam* 2017). Ce fichier Excel résume tous les résultats expérimentaux et numériques réalisés durant la thèse. Il permet de déterminer les coefficients de pertes de charge voulus dans les deux directions d'écoulement et un intervalle de résultats acceptables. Il est ainsi possible de classer les orifices selon leur éloignement par rapport aux pertes de charge cibles avec les résultats cibles. Dès lors, il est possible de mettre en évidence les angles de chanfrein capables de produire l'asymétrie voulue.

5. Conclusions

Trois différentes géométries d'orifice ont été étudiées avec des modèles expérimentaux et numériques.

Pour ces trois géométries, il est possible de lier directement non seulement une géométrie à une paire de coefficient de perte de charge mais aussi l'inverse. Ceci est de grande utilité dans la pratique

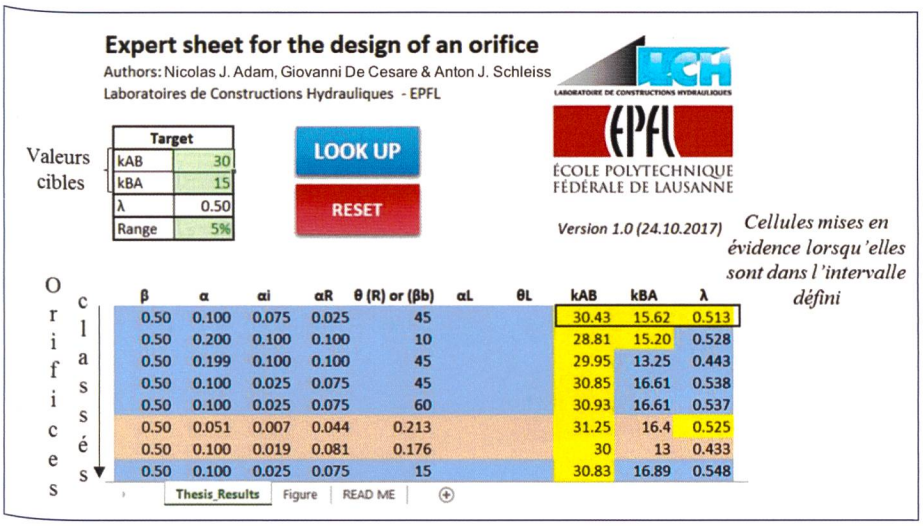


Figure 9. Capture d'écran de l' «Expertsheet» en ligne sur Adam (2017).

en permettant d'estimer rapidement une géométrie avec un catalogue interactif qui est disponible en ligne.

Les essais expérimentaux et numériques ayant été réalisés pour des conditions optimales (conduite rectiligne et champ de vitesse symétrique), il est possible d'évaluer les longueurs aval caractéristiques pour lesquelles les résultats sont utilisables. Hors de ces bornes, une analyse plus poussée devrait être réalisée même si le résultat expérimental ou numérique reste une bonne approximation.

Une démarche basée sur le nombre d'apparition de la cavitation donne un critère supplémentaire dans le choix de géométries produisant les mêmes paires de coefficients de perte de charge. Plus ce nombre d'apparition de la cavitation est faible, moins l'orifice est susceptible à la cavitation. Il est aussi possible d'utiliser ce nombre afin d'évaluer le risque de cavitation d'un orifice de cheminée d'équilibre lors d'une oscillation de masse.

Remerciements

Les auteurs remercient la fondation The Ark pour l'innovation en Valais et l'Office Fédérale de l'Energie via son programme sur la force hydraulique pour le financement de cette recherche.

Bibliographie

Adam, N. J. (2017). «Characterization of hydraulic behavior of orifice in conduits (EPFL Thesis 8090).» Ecole Polytechnique Fédérale de Lausane, Lausanne (Switzerland), doi:10.5075/epfl-thesis-8090.

Adam, N. J., De Cesare, G. (2015). «Diaphragm In Pressure Pipe: Steady State Head Loss Evolution And Transient Phenomena.» Spa, Belgium.

Adam, N. J., De Cesare, G., Nicolet, C., Billeter, P., Valluy, B., Schleiss, A. J. (2017). «Design of a Throttled Surge Tank for Refurbishment by Increase of Installed Capacity at a High-Head Power Plant.» Journal of Hydraulic Engineering, (publication process).

Alligne, S., Rodic, P., Arpe, J., Mlacnik, J., Nicolet, C. (2014). «Determination of Surge Tank Diaphragm Head Losses by CFD Simulations.» Advances in Hydroinformatics, Springer, 325–336.

ANSYS. (2016). «ANSYS IDEM CFD user's manual, Release 17.1 (available online).» ANSYS.

Blevins, R. D. (1984). «Applied fluid dynamics handbook.» New York, Van Nostrand Reinhold Co., 1, 568.

De Cesare, G., Adam, N. J., Nicolet, C., Billeter, P., Angermayr, A., and Valluy, B. (2015). «Surge tank geometry modification for power increase.» The International Journal on Hydropower & Dams, Bordeaux (France).

Ferrarese, G., Messa, G. V., Rossi, M. M., Malavasi, S. (2015). «New method for predicting the incipient cavitation index by means of single-phase computational fluid dynamics model.» Advances in Mechanical Engineering, 7(3), 168781401557597.

Gabl, R., Achleitner, S., Neuner, J., Gotsch, H., Aufleger, M. (2011). «3D-Numerical Optimisation of an Asymmetric Orifice in the Surge Tank of a High-head Power Plant.» Proceedings of the 34th World Congress of the International Association for Hydro-Environment Research and Engineering: 33rd Hydrology and Water Resources Symposium and 10th Conference on Hydraulics in Water Engineering, Valentine et al., 2428.

Hachem, F., Nicolet, C., Duarte, R., De Cesare, G., Micoulet, G. (2013). «Hydraulic Design of the Diaphragm's Orifice at the Entrance of the Surge Shaft of FMHL Pumped-storage Power Plant.» Proceedings of 35th IAHR World Congress: The wise find pleasure in water: meandering through water science and engineering, International Association for Hydraulic Engineering and Research, Chengdu (China).

Idel'cik, I. (1969). «Mémento des pertes de charges singulières et de pertes de charges par frottement [Handbook of singular and friction head losses].» Eyrolles, Paris.

Kendir, T. E., Ozdamar, A. (2013). «Numerical and experimental investigation of optimum surge tank forms in hydroelectric power plants.» Renewable Energy, 60, 323–331.

Malavasi, S., Messa, G. V. (2011). «Dissipation and Cavitation Characteristics of Single-Hole Orifices.» Journal of Fluids Engineering, 133(5), 051302.

Nicolet, C. (2007). «Hydroacoustic modelling and numerical simulation of unsteady operation of hydroelectric systems,Thesis report 3751.» Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne (Switzerland).

Zhang, Q. Y., Chai, B. Q. (2001). «Hydraulic characteristics of multistage orifice tunnels.» Journal of Hydraulic engineering, 127(8), 663–668.

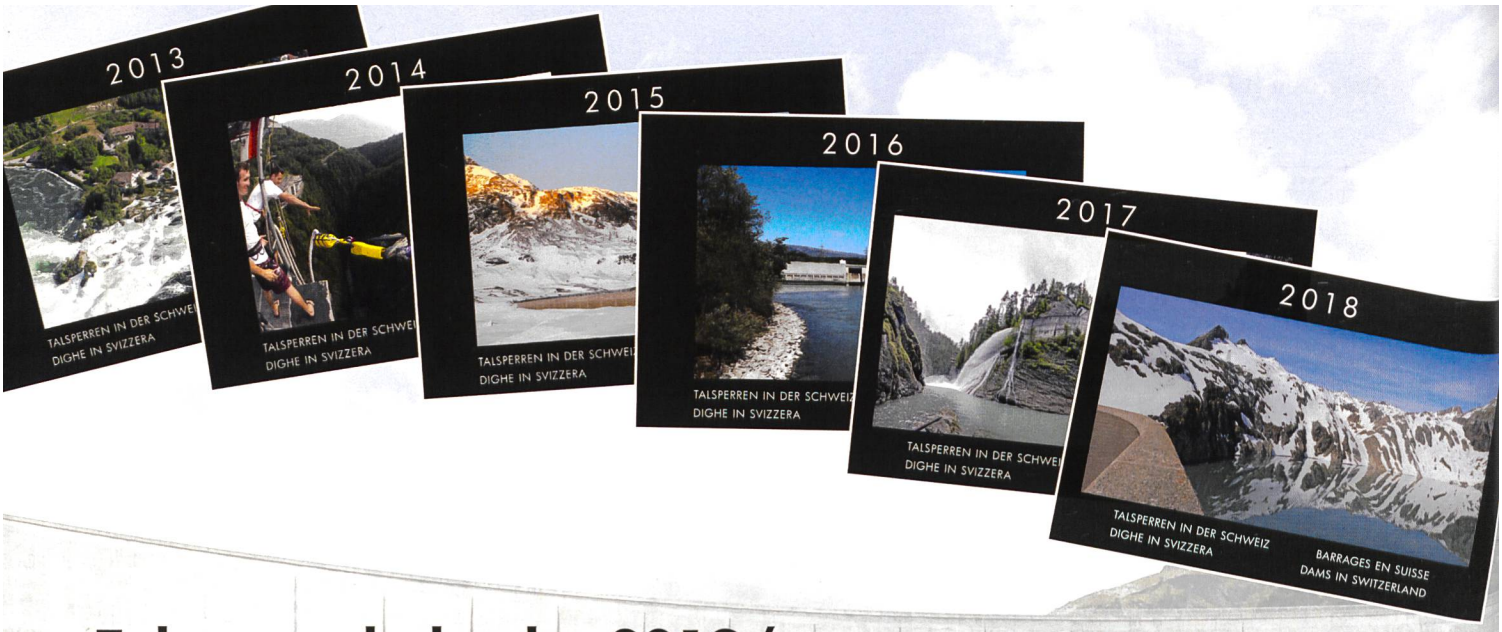
Adresse des auteurs

Nicolas J. Adam , Giovanni De Cesare, Anton J. Schleiss

Laboratoire de Constructions Hydrauliques (LCH), Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne (EPFL), CH-1015 Lausanne

Auteur de correspondance

nicolasjean.adam@alumni.epfl.ch



Talsperrenkalender 2019 / Calendrier des barrages 2019

Das Schweizerische Talsperrenkomitee wird auch für 2019 den beliebten Talsperrenkalender herausgeben. Folgende Stauanlagen werden vorgestellt: Lago bianco, Zervreila, Valle di Lei, Montsalvens, Cleuson, Naret, Bannalp, Rempen, Gigerwald, Sufers, Sella, Godey, Carassina und Vieux-Emosson. Auf der Rückseite der Abbildung finden sich Tourismus-Informationen in der Landessprache, in welcher die Stauanlage steht.

Alles in allem ein sympatisches Geschenk für Kunden, Freunde und Bekannte, mit welchem Ihre Firma im 2019 stets präsent ist.

Le Comité suisse des barrages publiera encore pour 2019 son calendrier tant apprécié. Les barrages suivants seront présentés: Lago bianco, Zervreila, Valle di Lei, Montsalvens, Cleuson, Naret, Bannalp, Rempen, Gigerwald, Sufers, Sella, Godey, Carassina et Vieux-Emosson. Au verso des images vous trouverez des informations d'ordre touristique sur la région du barrage (dans la langue de la région).

Il s'agit donc d'un joli cadeau pour vos clients et amis afin de leur rappeler votre entreprise de façon sympathique durant toute l'année.

Das Bestellformular ist auf der Homepage:
http://www.swissdams.ch unter «News» aufgeschaltet.
Bestellungen sind ab sofort bis spätestens am 10.09.2018 möglich per
E-Mail: bestellung_swissdams@lombardi.ch
oder per Post: Schweizerisches Talsperrenkomitee, P. Lazaro
c/o Lombardi AG, Winkelriedstrasse 37, 6003 Luzern

Le formulaire de commande est disponible sur le site internet du CSB:
http://www.swissdams.ch sous la rubrique «News».
Les commandes sont à adresser jusqu'au 10.09.2018 par email:
bestellung_swissdams@lombardi.ch
ou par poste: Schweizerisches Talsperrenkomitee, P. Lazaro
c/o Lombardi AG, Winkelriedstrasse 37, 6003 Luzern

Schweizerisches Talsperrenkomitee
Comité suisse des barrages
Comitato svizzero delle dighe
Swiss Committee on Dams