

RETOUR D'EXPERIENCE SUR DES VANNES SEGMENT SOUMISES AUX VIBRATIONS HYDRAULIQUES

Feedback on radial gates and flow induced vibrations

Julien AUBONNET

BR Lingénierie, 1105 Avenue Mendès France Nîmes, France

julien.aubonnet@brl.fr

Jean-Marie HAM

Voies Navigables de France, Nancy, France

Jean-Marie.Ham@vnf.fr

Michael GEBHARDT

Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe, Allemagne

michael.gebhardt@baw.de

MOTS CLEFS

Vanne segment, sous-verse, hydraulique, phénomènes d'oscillation, vibration, mise en service, mesures in-situ, modélisation numérique, retour d'expérience après travaux.

KEY WORDS

Radial gate, underflow mode, hydraulics, Flow-induced vibrations, excitation mechanism, commissioning, in-situ measurements, numerical simulation, lessons learnt

RÉSUMÉ

Cet article traite de phénomènes de vibration rencontrés lors de la mise en service d'un barrage de navigation reconstruit sur la Moselle, France, pour VNF. L'ancien barrage était équipé de vannes wagons posant de nombreux problèmes d'exploitation. Le nouveau barrage est équipé de 3 vannes segment de 34 mètres de long pour 3,5 mètres de haut, surmontées de clapets de surverse. L'objectif des auteurs est de présenter le contexte de l'opération, les contradictions possibles entre les règles de l'art de la conception d'une structure métallique et les exigences hydrauliques à prendre en compte pour ce type d'ouvrage, le constat des différents phénomènes de vibration rencontrés, les mesures mises en place et les solutions de remédiation proposées, pour conduire aux travaux de modification du projet achevés en 2022. L'article permet d'illustrer par des exemples les questions de conception à prendre en compte pour la mise en service de vannes de grande dimension fonctionnant en sous-verse, sujets documentés par une bibliographie ancienne, sans l'apport des outils de calcul modernes, et figurant peu d'exemples de projets construits.

ABSTRACT

This article deals with vibration phenomenon encountered during the commissioning of a navigation dam rebuilt on the Moselle, France, for VNF. The former dam was equipped with submersible lifting gates, which caused a number of operating problems. The new weir is equipped with 3 radial gates, 34 meters long and 3.5 meters high, topped by overflow flap-gates. The authors present the context of the operation, the possible contradictions between the standards to design a steel structure and the hydraulic conditions to be taken into account, the observation of the various vibration phenomenon encountered, the measures done in place and the remedial solutions proposed, leading to the project modification works which were completed in 2022. The article should help designers and owners of hydraulic infrastructures to illustrate, through recent examples, the design issues to be taken into account in the design and commissioning of large gates operating in the underflow mode, documented by a literature dating from decades, without the benefit of modern calculation tools, and featuring few examples of built projects.

1. LE BARRAGE DU LIEGEOT

1.1. Contexte et objectifs du projet

L'opération de reconstruction du barrage du Liègeot, ouvrage mobile au fil de l'eau situé sur la Moselle entre Nancy et Metz, est lancée par Voies Navigables de France (VNF) en 2009. VNF gère l'infrastructure de transport fluvial de nombreux cours d'eau sur le territoire.

L'ouvrage initial, construit en 1958, était équipé de trois vannes wagons de 34 mètres. Après 50 ans de fonctionnement, l'ouvrage s'est dégradé et présentait un risque de rupture de la vantellerie.

Un arrêt de navigation sur la Moselle constitue un enjeu environnemental et économique important, puisque le transit hebdomadaire équivaut à un trafic routier d'environ 3500 camions par semaine.



Figure 1 : vue aérienne du barrage du Liègeot sur la Moselle © leuropevueeduciel.com

Les études de conception réalisées évaluent différentes options pour revenir à un niveau de sûreté optimal : La construction d'un nouveau barrage ou la rénovation du barrage existant étaient à mettre en balance. C'est cette dernière option qui est retenue, la réutilisation de l'ouvrage existant impliquant une contrainte majeure : la construction de vannes de plus de 30 mètres de long, fonctionnant en sur-verse (débits faibles) et en sous-verse (débits importants).

La conception aboutit à une vantellerie composée de trois vannes segments mues chacune par deux treuils - chaînes Galle (fonctionnement sous-verse) surmontées de clapets (fonctionnement sur-verse) actionnés par des vérins électromécaniques.

Chaque bouchure mesure 34 m de long x 4.70 m de hauteur, pour un poids unitaire d'environ 120 tonnes.



Figure 2 : ensemble vanne segment – clapet de surverse depuis l'aval du barrage © VNF

1.2. Phénomènes de vibration observés lors de la mise en service initiale

Au terme des études de conception, les travaux sont programmés sur trois années, une par passe à construire, avec un arrêt des travaux pendant la période des crues hivernales. Les travaux de la première passe se déroulent sans encombre.

Les essais de mise en service montrent pour la deuxième vanne, à faible ouverture en sous verse, deux phénomènes de vibration, qui se distinguent nettement en termes d'amplitude et de fréquence et qui s'expliquent par des mécanismes d'excitation différents. D'une part, des vibrations à haute fréquence, qui émettent un bourdonnement et génèrent une légère agitation en amont de la bouchure.



Figure 3 : à gauche constat d'un phénomène de bourdonnement à très faible ouverture, à droite vibrations de basse fréquence pour une ouverture de 30cm conduisant à une mise en résonance de la vanne segment © VNF

D'autre part, des vibrations à des ouvertures de quelques centimètres. La fréquence de ces oscillations est nettement plus basse, entre 3 et 4 Hz pour une ouverture de 30 cm, avec des amplitudes nettement plus élevées. L'ensemble de la structure de vanne entre en résonance, avec la présence d'agitation forte en amont et un courant pulsé en aval.

1.3. Premiers ajustements réalisés en phase chantier

La réalisation d'un modèle réduit ou de calculs aux Eléments Finis complexes, utiles pour analyser le détail des écoulements sous la vanne n'est pas engagé. Les enjeux de terrain l'emportent : le chantier est en cours et soumis au risque de crue de la Moselle. Un premier travail d'investigation permet néanmoins d'identifier quelques pistes simples d'amélioration à prendre en compte pour la troisième et dernière vanne à construire.

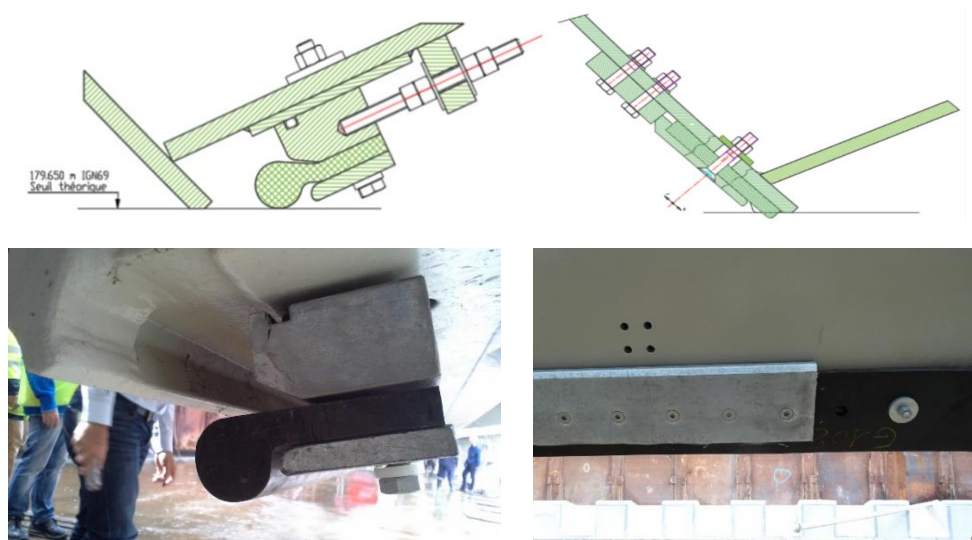


Figure 4 : à gauche dispositif de joint de seuil note de musique initialement prévu, à droite modification type joint plat sur les passes restant à construire © VNF-BRLi

A l'appui de la littérature [1] l'utilisation d'un joint en note de musique, choisi dans ce cas pour obtenir une étanchéité qui s'adapte à la possible déformation de la vanne, peut être source de vibrations. Pour les éviter, un décollement franc de l'écoulement en pied de vanne est préférable.

Alors que la première vanne en est équipée, le joint de seuil intégrant une étanchéité type note de musique (à gauche) est modifié par des joints plats (à droite) pour les passes centrale et en rive droite. Cette disposition reste sans effet sur le deuxième problème de vibrations. L'hypothèse de dégager l'angle en aval du couteau de vanne, également susceptible de générer des phénomènes de vibrations [2], est émise. Aucune modification n'est engagée à ce stade faute de consensus entre les Entreprises titulaires des travaux, le Maître d'œuvre et le Maître d'Ouvrage et de certitude quant à la pertinence de la piste avancée. A l'achèvement de la passe en rive droite (2018), celle-ci présente le même type de vibrations que celles déjà constatées sur la passe centrale.

2. IDENTIFICATION DES CAUSES DE VIBRATION

2.1. Mesures sur site

La Moselle est un cours d'eau international, des comités d'échanges existent entre les différents pays et notamment avec l'Allemagne. L'institut Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) basé à Karlsruhe étudie des cas similaires sur leur territoire. VNF sollicite leur appui pour réaliser des investigations sur l'ouvrage. L'exploitant du barrage réalise des filetages pour installer deux capteurs de pression au pied de la vanne, P1 et P2, avec une plage de mesure comprise entre 0 et 3 bars.

Sur la vanne rive gauche, les capteurs de pression sont placés en amont et en aval du joint « note de musique ». Pour protéger la membrane sensible des capteurs de pression contre les dommages mécaniques, un adaptateur qui comporte un dispositif d'aération est utilisé : l'air qui pourrait s'y accumuler en cas de faible niveau d'eau en aval aurait eu un effet négatif sur la mesure. Les adaptateurs sont vissés dans les trous filetés, avant d'installer les capteurs.



Figure 5 : Capteur d'accélération ACC1 (± 12 g) en partie centrale de la vanne (à gauche); capteur d'accélération ACC2 (± 12 g) sondes de pression P1 et P2 en pied de vanne (au centre); capteur à fil tendu S (à droite) 00

Des capteurs d'accélération triaxiaux avec une plage de mesure de ± 12 g sont fixés afin de déterminer les mouvements de flexion ou de rotation autour des points d'articulation de la vanne : deux capteurs, ACC1 et ACC2, ont été fixés au centre, un en haut (figure 5, gauche) un en bas (figure 5, centre) de la vanne. Un autre capteur ACC3 est fixé en rive. La largeur de l'ouverture est mesurée par un capteur sur le bajoyer (figure 5, droite). La position des capteurs utilisés est indiquée dans la figure 6.

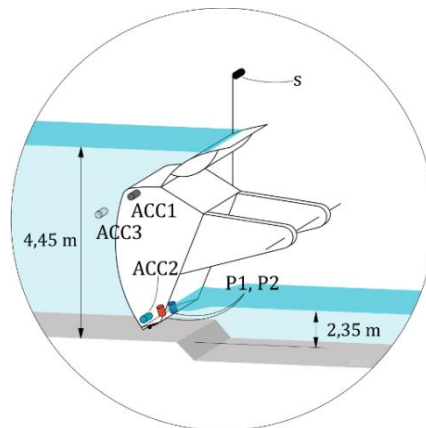


Figure 6 : Schéma de positionnement des capteurs installés sur les vannes du barrage de Liegeot 0

2.2. Analyse des résultats

Lors des premiers essais, la vanne rive gauche est relevée progressivement à partir de la position fermée, puis maintenue dans chaque position pendant environ 60 secondes.

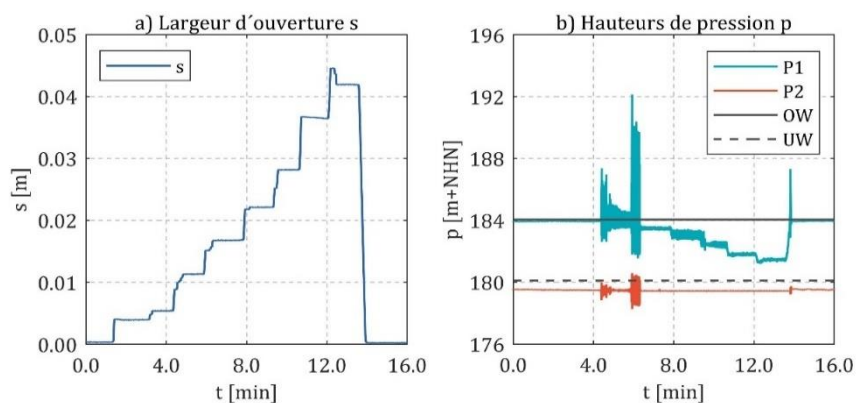


Figure 7 : a) Largeur d'ouverture au seuil ; b) Pression relevée P1 et P2 selon niveau amont (OW = 184,05 m+NHN) et niveau aval (UW = 180,10 m+NHN) 0

La figure 7 montre la largeur d'ouverture et les niveaux de pression aux capteurs P1 et P2 en fonction des niveaux d'eau amont (OW) et aval (UW).

La vanne est levée par étapes et abaissée à nouveau de manière continue après $t = 13,5$ min (figure 7a). La pression initiale est mesurée à la sonde P1, et correspond approximativement à la pression hydrostatique du niveau d'eau amont (184,05 m+NHN) et la pression à P2 est légèrement plus basse que le niveau aval (180,10 m+NHN) (Figure 7b).

La figure 8 montre les fluctuations de pression pour une largeur d'ouverture comprise entre 1 et 22 mm. On constate que les fluctuations de pression augmentent avec la largeur d'ouverture (figures 8a et b) et qu'elles sont plus importantes en amont qu'en aval du joint.

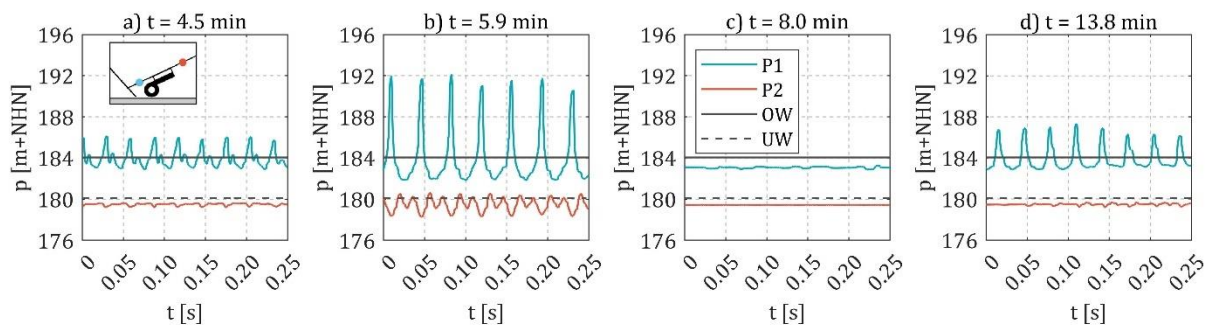


Figure 8 : Relevés de pression en P1 et P2 pour des ouvertures de a) $s = 1$ mm; b) $s = 13$ mm; c) $s = 22$ mm and d) $s = 15$ mm et les niveaux d'eau amont (OW = 184,05 m+NHN) et aval (UW = 180,10 m+NHN) 0

Au temps $t = 5,9$ min, avec une largeur d'ouverture de 13 mm, les pics de pression atteignent leur maximum. La hauteur de pression dynamique est trois fois plus élevée que la hauteur hydrostatique résultant du niveau d'eau en amont. Pour des largeurs d'ouverture plus importantes, les fluctuations de pression locales sont irrégulières, ne sont plus harmoniques et ont une amplitude beaucoup plus faible.

Les fluctuations de pression harmoniques peuvent à nouveau être observées pendant la procédure de fermeture, mais avec une amplitude plus faible (figure 8d). Les signaux d'accélération montrent que la porte ne subit aucun déplacement ou déformation significatif. Le spectre d'amplitude des accélérations ne présente pas non plus de composantes de fréquence notables, tandis que le spectre d'amplitude des niveaux de pression au niveau des capteurs P1 et P2 présente un pic à environ 26 Hz. En raison de la fréquence relativement élevée, il apparaît que le joint en note de musique est à l'origine de ces oscillations.

Des essais similaires sont effectués sur les vannes centrale et rive droite. L'apparition des vibrations est directement liée aux hauteurs d'eau. La vanne est progressivement relevée jusqu'à une largeur d'ouverture de 12 cm, puis abaissée à nouveau (figure 9a). Les pressions moyennes P1 et P2 sont négatives (figure 9b). Les signaux d'accélération présentent les plus grandes amplitudes à une largeur d'ouverture de 1 à 2 cm. Les composantes dans la direction verticale sont plus importantes que celles dans la direction horizontale (figures 9c et d).

Si l'on compare les spectres d'amplitude des hauteurs de pression et des accélérations (figure 10), les deux spectres montrent une réponse en fréquence typique d'une oscillation harmonique : une fréquence fondamentale à 3,6 Hz et des harmoniques à un multiple entier.

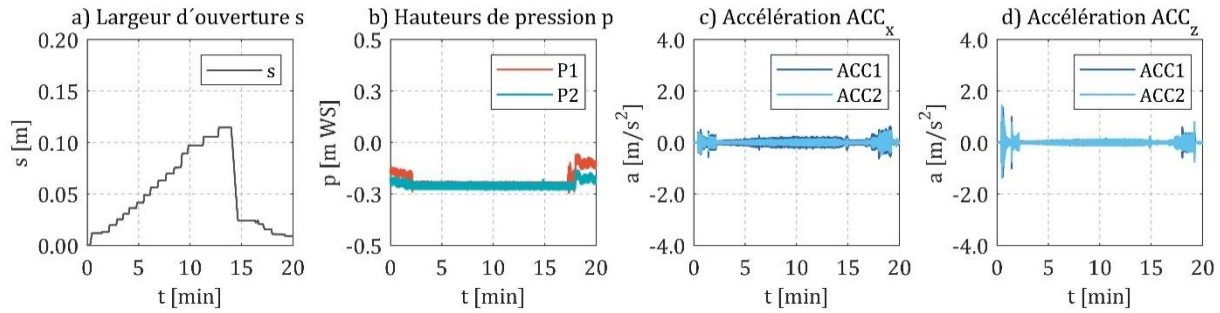


Figure 9 : Analyse des vibrations rive droite: a) largeur d'ouverture b) relevés de pression P1 et P2; accélération en c) x- et d) z 0

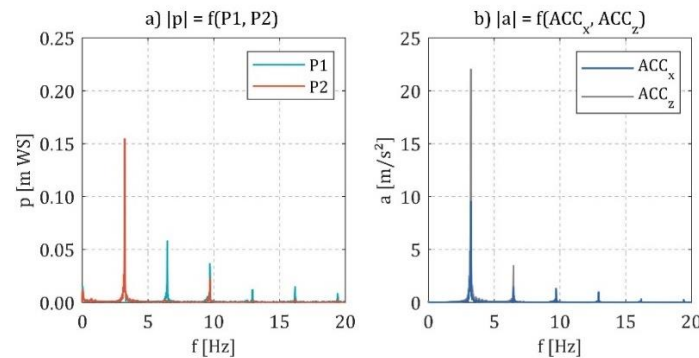


Figure 10 : Spectre d'amplitude a) Relevés de pression P1 et P2; b) Accélération ACCx et ACCz en partie sup. de vanne 0

Afin de déterminer si la vanne subit une vibration de flexion ou de rotation, le déplacement pour ACC1 (au centre de la vanne) et pour ACC3 (en rive) est déterminé en les intégrant deux fois. Il en résulte une amplitude d'environ ± 4 mm dans le sens de l'écoulement et d'environ ± 6 mm dans le sens vertical. Les différences entre les amplitudes pour ACC1 et ACC3 sont relativement faibles, environ 1 mm dans les deux directions, de sorte que l'on peut supposer que les vannes du barrage du Liègeot sont soumises à une oscillation de rotation autour de leur axe de pivotement.

3. OPTIONS D'AMÉLIORATION

3.1. Mécanisme d'excitation des vibrations induites par l'écoulement

Les mesures ont montré que les vannes subissaient deux types de vibrations ayant des causes différentes. D'une part, des vibrations se produisent au niveau du joint (vanne rive gauche). Il est probable que ces vibrations soient inoffensives pour l'ensemble de la construction, mais elles restent perceptibles lorsque la vanne est faiblement ouverte avec un fort bourdonnement. Les vibrations des joints sont des vibrations induites par le mouvement et sont bien documentées dans la littérature [8][9][10]. Le mouvement vertical du joint en note de musique est lié et dépendant de l'écoulement. Un choc de pression se produit lorsque le joint touche le seuil (mécanisme de fermeture par pression).

Le deuxième phénomène de vibration est de type auto-excité, constaté sur les vannes centrale et rive droite. Il s'agit d'un mécanisme de fermeture par pression. Il est dû à la géométrie de la partie inférieure de la vanne. En raison de l'inertie de l'eau, une chute de pression se produit sous la vanne. Si la vanne se déplace à nouveau vers le haut en raison de son élasticité, le débit augmente, l'écoulement est accéléré et une surpression est créée sous la vanne. La pression précède toujours l'oscillation [4]. Il convient de noter que l'oscillation ne se produit que lorsque l'aval est noyé ce qui ne permet pas l'apparition d'un jet. Ce phénomène a pu être observé sur site et sur modèle physique [6].

3.2. Mise en place d'un modèle numérique

L'étude des vibrations auto-excitées sur modèles physiques et numériques peut consister à autoriser le mouvement vibratoire de la vanne dans son écoulement. Cette méthode est complexe et délicate pour reproduire avec précision le fonctionnement réel selon différentes conditions d'écoulement. Une autre méthode consiste à piloter le mouvement : la force qui agit sur la vanne peut être déterminée [7]. Pour tirer des conclusions sur la nature de la vibration, le transfert d'énergie peut être déterminé à partir de la force relevée.

Le logiciel de CFD OpenFOAM est utilisé, en particulier le solveur interDyMFOam v 2.3.1, car il combine la simulation des écoulements à surface libre avec le mouvement des corps solides. Les équations régissant l'écoulement sont résolues à l'aide d'une méthode de volumes finis (FVM), tandis qu'une méthode de volume de fluide (VOF) est employée pour traiter la surface libre entre les deux faces, l'air et l'eau. Le mouvement du corps solide est couplé au régime d'écoulement avec un couplage à double sens ; les forces de pression sur la surface du corps sont prises en compte pour le mouvement du corps solide, tandis que le déplacement du corps solide est utilisé pour déformer les limites du fluide [5].

La géométrie de la vanne est simplifiée (non prise en compte du détail constructif du joint) afin de limiter le maillage. La région simulée mesure 25 m de long, 10 m de haut et 1 m de large. Le maillage hexaédrique se compose de 175 000 cellules d'arêtes comprises entre 0,3 cm et 10 cm. Pour caler le modèle, une mesure in-situ de 0,29 cm d'amplitude est choisie autour d'une largeur d'ouverture moyenne de 1,7 cm. Le modèle numérique montre une bonne concordance avec les mesures en déphasage et amplitude [4]. Pour évaluer le comportement vibratoire des vannes dans différentes conditions d'exploitation, l'ouverture et le niveau de l'eau aval sont modifiés. La largeur d'ouverture varie entre 2 cm et 20 cm. Le niveau de l'eau aval varie entre 0,95 m et 2,75 m au-dessus du seuil du déversoir. Pour chaque point de données, le transfert d'énergie est calculé. Les résultats indiquent qu'il y a un transfert d'énergie en particulier pour les petites ouvertures, ce qui correspond très bien aux mesures effectuées in-situ.

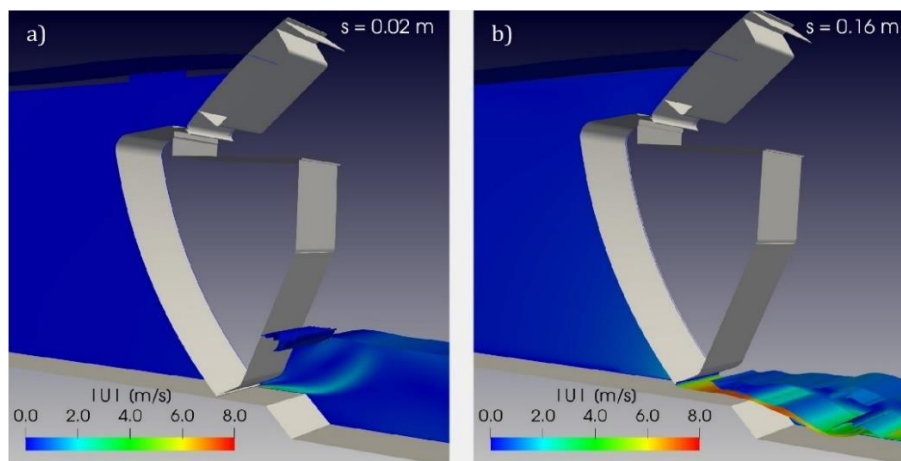


Figure 11 : Influence de la hauteur d'ouverture s ; vitesses pour a) $s = 0,02$ m and b) $s = 0,16$ m, pour un niveau aval de 0,95m de hauteur sur le radier 0

La figure 11 montre un exemple des simulations. Alors que pour de petites largeurs d'ouverture, le jet est toujours en contact avec le bord inférieur de la vanne (figure 11a), il se détache pour de plus grandes largeurs d'ouverture et est aéré sous l'eau (figure 11b).

Pour résoudre le phénomène de mise en résonance de la structure de vanne, un allongement du couteau de vanne est testé en utilisant la procédure décrite ci-avant. Le transfert d'énergie diminue globalement et devient même neutre ou négatif pour les conditions de fonctionnement considérées.

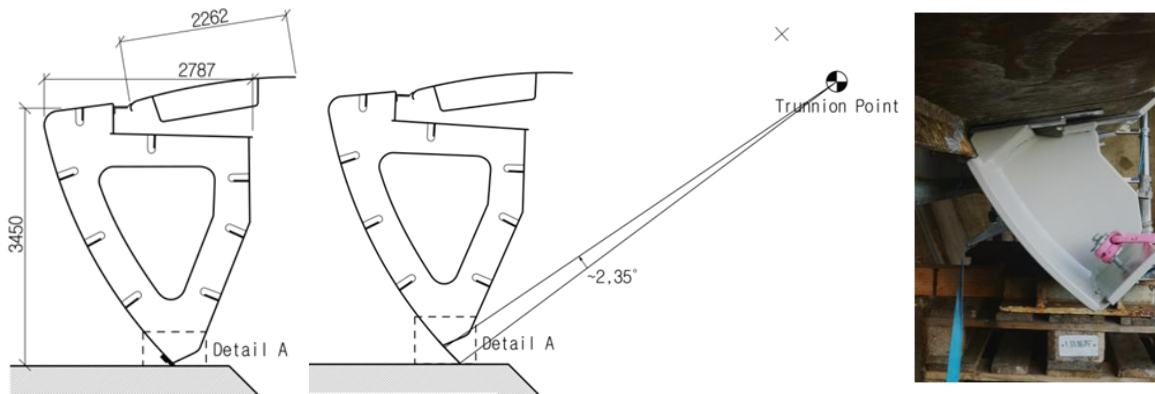


Figure 12 : à gauche section de vanne initiale ; à droite section modifiée avec allongement du couteau de 30cm

Une opération d'allongement des couteaux des vannes de 0,30 cm est préconisée. Après l'obtention d'un consensus des acteurs du projet, une rallonge des couteaux de vanne est conçue et réalisée sur site en 2022 sur les passes centrale et rive droite du barrage (fig.12).

3.3. Mesures sur site après travaux

En septembre 2023, des mesures sont effectuées sur le barrage du Liègeot dans des conditions comparables aux essais initiaux afin de vérifier les résultats de la modification apportée. Avec un allongement du couteau de vanne de 30 cm, aucune vibration n'est détectée.

4. CONCLUSIONS

Le constat d'oscillations potentiellement destructrices pour l'ouvrage à sa livraison a entraîné de fortes contraintes d'exploitation. Le phénomène oscillatoire étant apparu au final sur deux des trois vannes du barrage, celles-ci n'ont plus été utilisées en mode automatique pour la partie segment mais uniquement pour la partie clapet. La gestion des crues a été complexe avec de plus un risque faible mais non nul de voir apparaître ces oscillations sur la vanne en rive gauche jusqu'alors exempte du phénomène.

Le maître d'ouvrage a refusé de réceptionner un ouvrage présentant de tels risques. La question des responsabilités s'est posée pour entreprendre des travaux modificatifs, avec une multiplicité d'acteurs impliqués : maître d'ouvrage, maître d'œuvre, entreprises de travaux, contrôle extérieur.

Le préalable et la principale difficulté a été de poser le diagnostic pour identifier les mesures correctives à mettre en œuvre. Les premières investigations avaient conclu à une modification du joint (joint en forme de note de musique remplacé par un joint plat). Cette amélioration déployée sur la dernière vanne à construire n'a pas résolu les phénomènes oscillatoires majeurs.

Un état de l'art, réalisé par le CEREMA à la demande du maître de l'ouvrage, conclut que la littérature relate bien ces phénomènes mais reste ancienne : les articles datent de 20 à 30 ans au moins. Ces articles déconseillaient l'utilisation de joints en forme de note de musique et mettaient l'accent sur des géométries plus ou moins défavorables à l'apparition d'oscillations [1] et [2]. L'intervention du BAW a permis de caractériser précisément le phénomène et de préconiser une solution testée numériquement avant d'engager les parties prenantes du projet sur de nouveaux travaux.

Cette situation aurait-elle pu être évitée ? Cette question interroge le contenu du programme de maîtrise d'œuvre et des prestations d'études à prévoir. Faut-il inclure des modélisations numériques poussées ou des modèles physiques réduits ? Ces éléments sont-ils à réaliser par le maître d'œuvre qui ne décline pas les détails de la vantellerie, ou par l'entreprise travaux dans le cadre de sa mission d'études d'exécution ?

On perçoit une double problématique : celle de la connaissance perdue au fil du temps par les maîtres d'œuvre et les entreprises, également constatée outre Rhin, car il se construit assez peu de nouveaux barrages avec une vantellerie aussi spécifique que celle installée sur le barrage du Liègeot, et celle de la possibilité de concevoir ces ouvrages et évaluer leur comportement hydraulique local avec l'apport des outils numériques modernes.

Le constat des auteurs est que le dimensionnement des ouvrages est actuellement réalisé sur des critères de calcul mécanique en conditions statiques, pour lesquels les outils numériques sont très développés. L'étanchéité ou la résistance mécanique à la torsion de la vanne deviennent des critères prépondérants en conception. Le sujet des risques de vibration passe au second plan alors qu'il est indispensable à la fonctionnalité et à la durabilité de l'ouvrage.

Les possibilités de modélisation numérique existent mais s'avèrent limitées. Les outils restent peu nombreux et demandent un investissement important. Le calage des modèles passe par des mesures in-situ pour s'assurer de reproduire des phénomènes hydrauliques complexes.

Les travaux sont achevés, et l'expérience du barrage du Liègeot doit nous permettre de dépoussiérer la littérature existante et enrichir le savoir-faire dans le domaine de la vantellerie des grands ouvrages hydrauliques à l'appui de cas concrets.

RÉFÉRENCES ET CITATIONS

- [1] Naudasher (1991) : Hydrodynamic forces. IARH Hydraulic Design Manual. Balbema, Rotterdam.
- [2] Lewin Jack (1995) : Hydraulic gates and valves. In free surface flows and submerged outlets.
- [3] Gebhardt, Michael; Metz, Walter; Göbel, Georg and Deutscher, Martin (2023): Schwingungsmessung und Analyse an Wehren und Schleusen. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Ed.): BAWMitteilungen Nr. 108. Karlsruhe: BAW
- [4] Göbel, Georg; Gebhardt, Michael; Deutscher, Martin; Metz, Walter; Thorenz, Carsten (2019): Numerical simulation of flow-induced vibration on gates with underflow. In: Proceedings of the 38th IAHR World Congress.
- [5] Göbel, Georg (2023): Numerische Simulation strömungsinduzierter Schwingungen. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Ed.): BAWMitteilungen Nr. 108. Karlsruhe: BAW.
- [6] Pfrommer, Jennifer; Göbel, Georg (2023): Gegenständliche Untersuchungen zu Schwingungen an unterströmten Verschlüssen. In: Bundesanstalt für Wasserbau (Hg.): BAWMitteilungen Nr. 108. Karlsruhe: BAW.
- [7] Kobus, H. (1984): Wasserbauliches Versuchswesen. 2., revidierte Auflage. Hamburg und Berlin: Verlag Paul Parey (DVWK Schriften, 39).
- [8] Krummet, R. (1965): Schwingungsverhalten von Verschlussorganen im Stahlwasserbau bei großen Druckhöhen, insbesondere von Tiefschützen. In Forschung im Ingenieurwesen 31 (5), pp. 133–168.
- [9] Naudascher, E. & Rockwell, D. (1994): Flow-induced vibrations. An engineering guide. Rotterdam: A.A. Balkema (IAHR series of Hydraulic Structures Design Manuals, Volume 7)
- [10] Petrikat, K. (1980): Seal Vibration. In E. Naudascher, D. Rockwell (Eds.): Practical Experiences with Flow-Induced Vibrations. IAHR-IUTAM Symposium Karlsruhe 1979. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, pp. 476–497.