

## QUATRIÈME ÉCLUSE DE LANAYE : CAMPAGNE DE MESURE RÉALISÉE LORS DE LA MISE EN SERVICE

	<p><b>SAVARY CELINE</b></p> <p>Attachée</p> <p>Direction des Recherches hydrauliques DGO2-22</p> <p>Rue de l'Abattoir, 164 6200 Châtelet</p> <p>Tél. : 071/240431 Fax : 071/240499 Email : <a href="mailto:celine.savary@spw.wallonie.be">celine.savary@spw.wallonie.be</a></p>
---	---

### Résumé

### INTRODUCTION

Dans le cadre du 18<sup>ème</sup> projet prioritaire européen de transport concernant le corridor Rhin-Main-Danube, une nouvelle écluse a été inaugurée en 2015 sur le canal Albert, à Lanaye, à la frontière entre la Belgique et les Pays-Bas. Le site éclusier de Lanaye comportait déjà 2 petites écluses et une écluse de 16 m de largeur et de 136 m de longueur. La nouvelle écluse de 250 m de long, de 25 m de large permet à des bateaux jusqu'à 9000 tonnes de franchir un dénivelé de 13.7 m (la figure 1 est une photo aérienne du chantier datant de juillet 2014). Le système de remplissage et de vidange de la nouvelle écluse est composé de deux aqueducs avec des larrons courts (figure 2) et le débit est régulé au moyen de vannes papillon de 3.5 m de diamètre.



Figure 1 : chantier 4<sup>ème</sup> écluse juillet 2014 (photographie de [www.paraflly.be](http://www.paraflly.be))

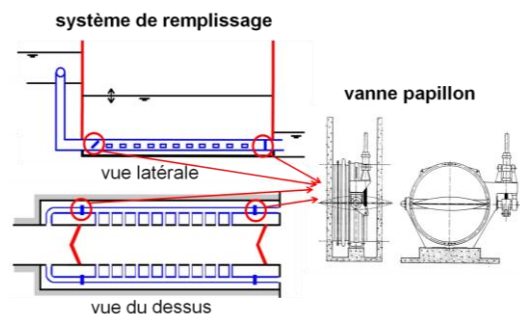


Figure 2 : système de remplissage et vidange par aqueduc-larrons, vanne papillon

Lors de la mise en service, une campagne d'essais a été réalisée conjointement par la Direction des Recherches hydrauliques pour les aspects hydrauliques et par la Direction de l'Expertise des Ouvrages pour les vibrations des structures. Cette campagne avait pour but de vérifier le bon fonctionnement de l'écluse, elle a permis de contrôler (1) les hydrogrammes de vidange et de remplissage, (2) les mouvements d'eau dans le sas pendant les opérations de sassement, (3) l'amplitude des ondes de sassement dans les biefs amont et aval, (4) les pressions, vibrations et le niveau sonore au niveau des vannes de sassement afin d'évaluer le niveau de cavitation et (5) les vibrations à différents endroits de la structure. En vue de diminuer les problèmes de cavitation et de vibration remarqués lors de la période de marche probatoire, les essais ont été réalisés pour deux lois d'ouverture de vannes : loi A = loi linéaire préconisée lors du prédimensionnement, loi B = loi bilinéaire, plus rapide en début d'ouverture.

### DISPOSITIF DE MESURE

Des capteurs de pression permettant de connaître les niveaux d'eau ont été disposés au niveau de plusieurs échelles dans le sas de l'écluse (figures 3 et 4), ils ont notamment permis de suivre l'évolution du niveau d'eau pendant les opérations de sassement.

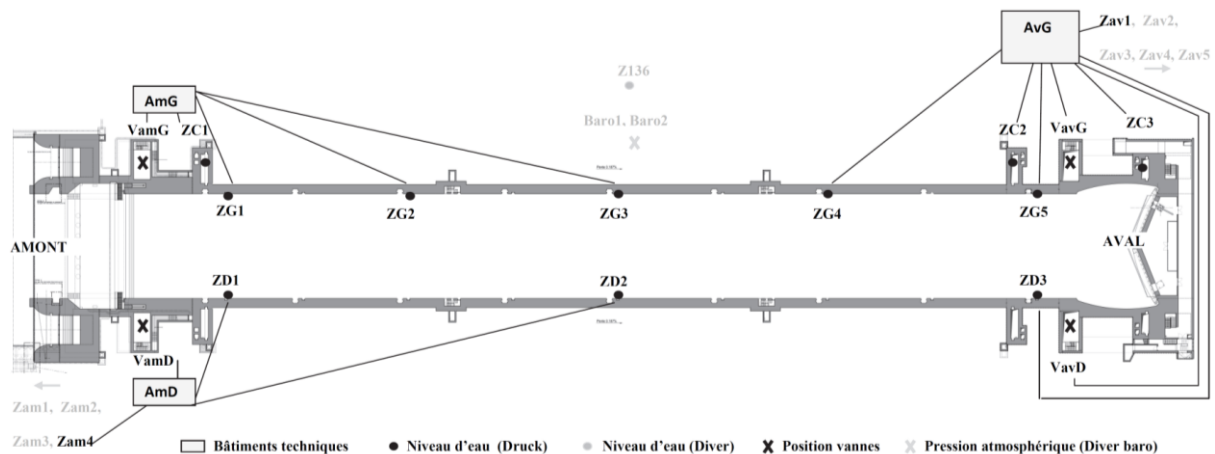


Figure 3 : Implantation des sondes de pression

Les vérins actionnant les vannes sont équipés de capteurs de distance à corde permettant de mesurer le déploiement du vérin et donc de déduire la position de la vanne. L'ensemble de ces capteurs sont connectés de manière filaire à 3 postes d'acquisition de données (AmG, AmD, AvG) parfaitement synchronisés entre eux (figure 5).



Figure 4 : Mise en place des sondes de pression

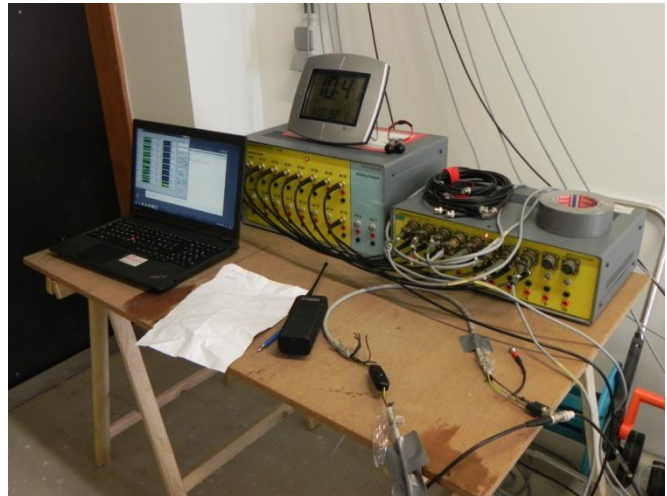


Figure 5 : Poste d'acquisition des données

Les capteurs de pressions répartis dans les biefs amont et aval afin d'y mesurer les ondes induites par les sassements sont dotés d'un enregistrement des données intégré.

Pour évaluer le niveau de cavitation, des capteurs de pression ont été placés à l'amont et à l'aval des vannes en rive gauche dans les rainures de batardeau. La cavitation produisant du bruit et des vibrations à haute fréquence, un accéléromètre (10 kHz) et un hydrophone (mesure de la pression acoustique en milieu aqueux, 100 kHz) ont été placés contre la conduite à proximité aval de la vanne (figure 6). L'hydrophone est placé dans un gel de manière à garantir une bonne transmission acoustique.

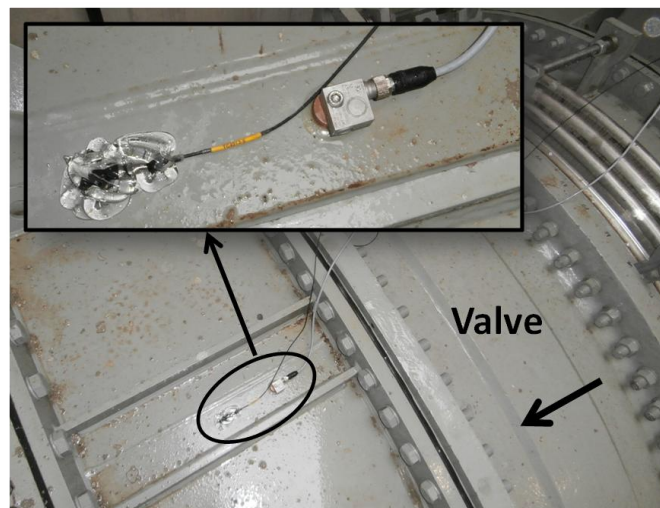


Figure 6 : accéléromètre et hydrophone

La Direction de l'Expertise des Ouvrage a mis en place des capteurs de vitesse au niveau du poste de commande où des vibrations importantes du vitrage avaient été observées. Les chambres de vannes et galeries techniques ont également été équipées d'accéléromètres.

## PLANNING DES MESURES

Les mesures ont été réalisées pendant 5 jours, montage et démontage des instruments de mesure compris. Les deux lois d'ouverture de vannes testées sont reprises à la figure 7.

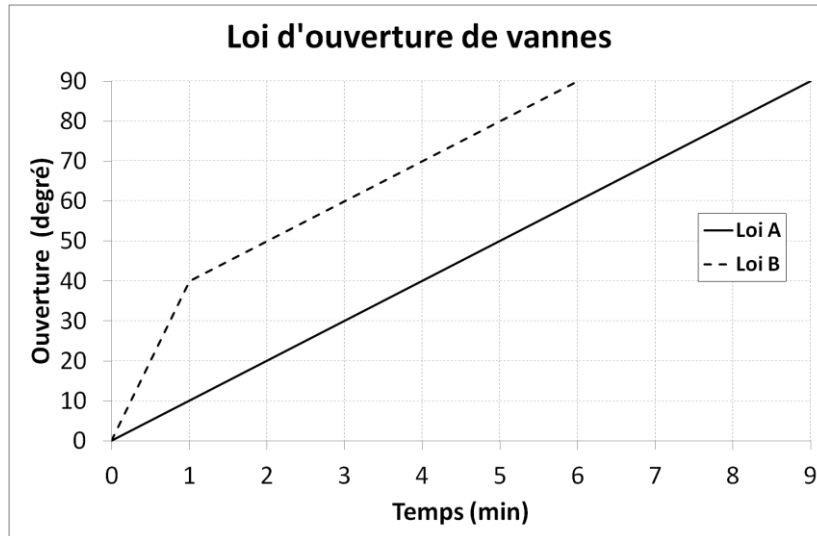


Figure 7 : Lois d'ouverture de vannes testées

Pour chacune des lois d'ouverture, des opérations de remplissage et de vidange ont été réalisées en mode normal (symétrique, les 2 aqueducs fonctionnent) et en mode dégradé (1 seul aqueduc fonctionne). Pour s'assurer de la reproductibilité, chaque configuration est testée au minimum 2 fois. La dénomination des tests réalisés est reprise dans le tableau 1.

		Loi d'ouverture de vanne	
		Loi A	Loi B
Vidange	normale	VNA1-4	VNB1-3
	dégradée	VDA1-2	VDB1-2
Remplissage	normal	RNA1-6	RNB1-4
	dégradé	RDA1-4	RDB1-2

Tableau 1 : Dénomination des essais réalisés

## HYDROGRAMMES

Un hydrogramme représente l'évolution du débit en fonction du temps. Le débit de vidange ou de remplissage ( $Q$ ) est calculé à partir de la dérivation dans le temps du niveau d'eau dans le sas ( $z_{moy}$ ) multiplié par l'aire du sas ( $A_{sas} = 6140 \text{ m}^2$ ) :

$$Q = \frac{dz_{moy}}{dt} A_{sas} \quad (1)$$

La figure 8 illustre l'évolution dans le temps du niveau d'eau dans le sas et du débit de vidange dans le cas d'une vidange en mode normal avec la loi A (courbes grises) et la loi B (courbes rouge et bleue).

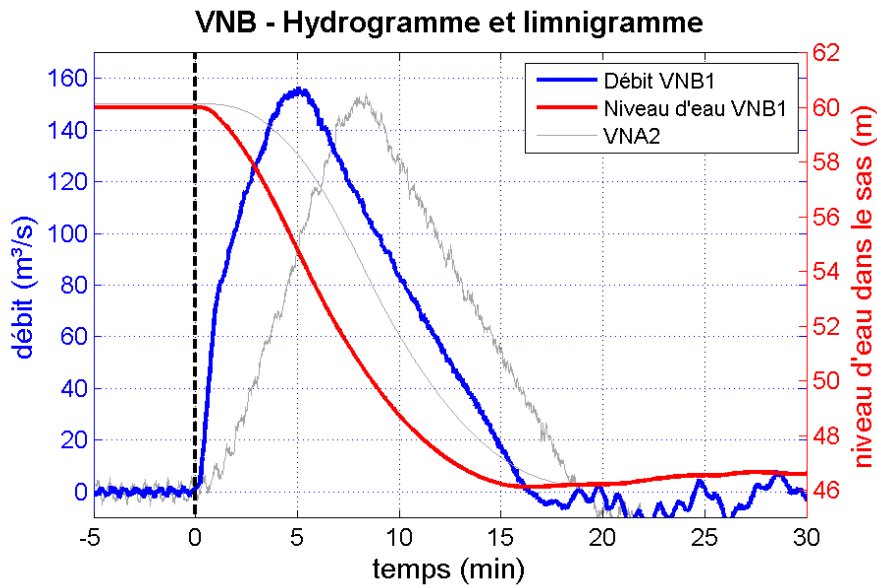


Figure 8 : Evolution dans le temps du débit et du niveau d'eau dans le sas

Le tableau 2 reprend les temps de sasement et débits maximums observés pour les différentes configurations testées.

		Opération	Débit maximum (m <sup>3</sup> /s)	Temps de sasement
<b>Loi A</b>	Vidange	normale	153	17 min 40 s
		dégradée	92	28 min 30 s
	Remplissage	normal	160	16 min 45 s
		dégradé	95	28 min 30 s
<b>Loi B</b>	Vidange	normale	156	14 min 30 s
		dégradée	92	25 min 40 s
	Remplissage	normal	163	13 min 30 s
		dégradé	98	24 min 40 s

Tableau 2 : Débit maximum et temps de sasement

### PENTES D'EAU DANS LE SAS

De manière à limiter les efforts dans les amarres, les pentes d'eau dans le sas pendant la bassinée doivent rester inférieures à 0.5 ‰ pour tous les types de bateaux. Ce critère est sécuritaire, les pentes limites proposées par le rapport de l'AIPCN consacré au dimensionnement des écluses (2009) sont supérieures (plus le bateau est grand, plus la pente acceptée est grande, la plus faible pente requise est 0.85 ‰ pour un bateau de classe Va CEMT en remplissage).

C'est en remplissage que le plan d'eau est le plus chahuté. La figure 9 illustre l'évolution de la pente d'eau moyenne dans le sas (estimée par régression linéaire sur les différents points de mesure) pour un remplissage en mode normal avec les deux lois testées. La pente est supérieure avec la loi B, mais reste inférieure à la valeur critique de 0.5 ‰.

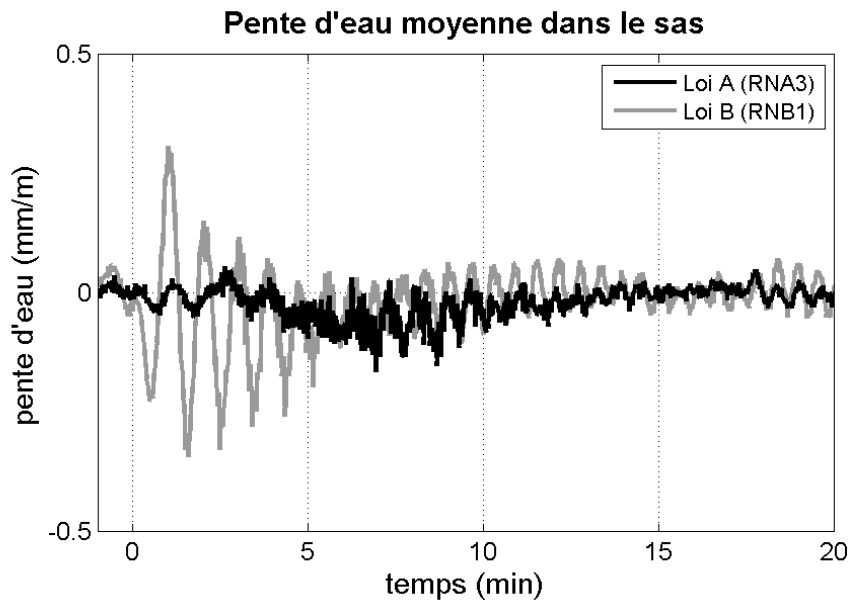


Figure 9 : Pente d'eau longitudinale moyenne dans le sas

Par contre en remplissage en mode dégradé, lorsqu'un seul aqueduc fonctionne, on observe des pentes latérales importantes (= 5 ‰ pour la loi A et = 9 ‰ pour la loi B) qui nécessitent de prendre des dispositions de sécurité. Il est recommandé d'éviter la loi B en remplissage en mode dégradé. De plus, il est conseillé aux bateaux de s'amarrer du côté de l'aqueduc fonctionnel et d'éviter de se mettre à plusieurs sur la largeur du sas.

### **ONDES DE SASSEMENT**

A chaque opération de sassement, une onde se propage dans le bief amont pour un remplissage et dans le bief aval pour une vidange. Si l'amplitude de ces ondes est trop importante, cela peut être préjudiciable pour la navigation et altérer les berges qui ne seraient pas correctement protégées. Le canal Albert, à l'amont du complexe éclusier de Lanaye, présente une grande largeur, les ondes de sassement y posent peu de problèmes. A l'aval, le canal de Lanaye, en raison de sa faible largeur, présente une plus grande sensibilité.

La figure 10 illustre les ondes de sassement suite à une vidange simultanée de la troisième et la quatrième écluse (vidange en mode normal avec la loi B, VNB1). Pour une meilleure visibilité, les courbes représentatives du niveau d'eau mesuré aux différents points de mesure ont été décalées sur l'axe des ordonnées (Zav3 + 0.5 m, Zav4 + 1 m, Zav5 + 1.5 m). Les hydrogrammes des deux écluses sont repris en seconde partie de la figure 10.



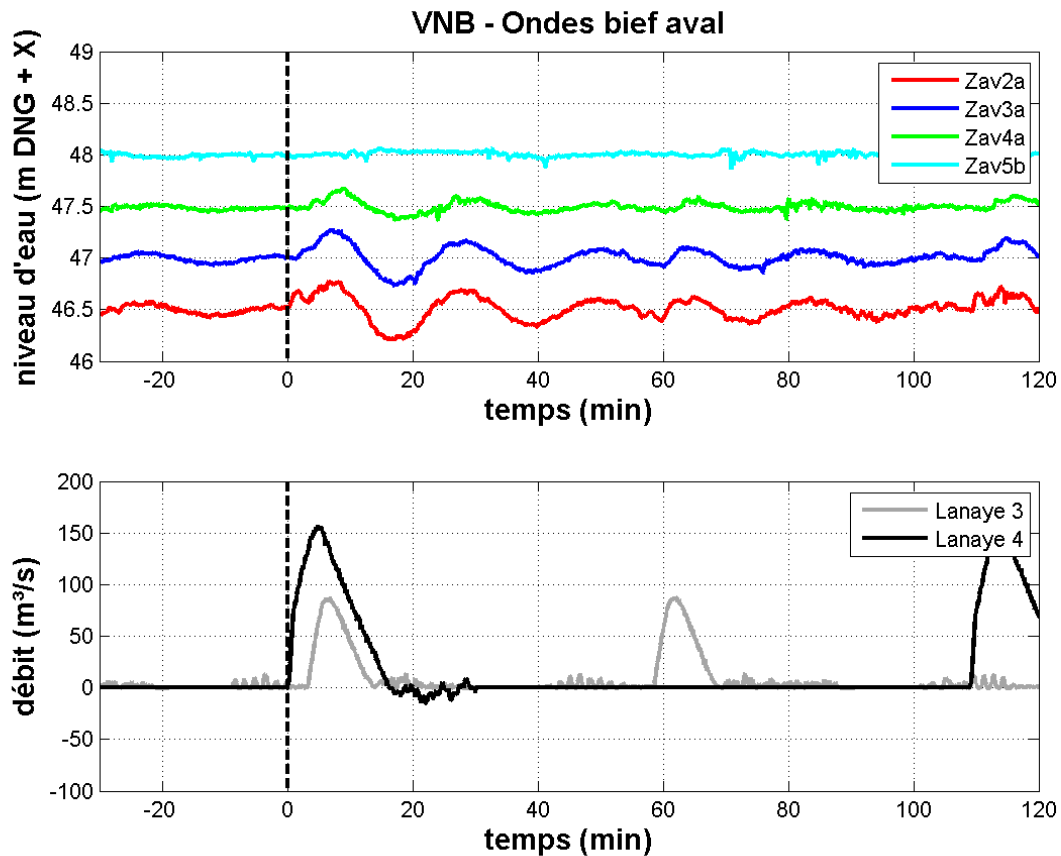


Figure 10 : Ondes de sassement dans le bief aval - Lanaye 3 et 4 en phase

Le cas illustré à la figure 10 est le cas le plus défavorable car les ondes de vidange des deux écluses sont en phase. Si les ondes produites par les deux écluses sont en opposition de phase, l'amplitude de l'onde résultante est fortement réduite.

Le tableau 3 compare l'amplitude maximale des ondes mesurées avant (Bertrand et al., 1995) et après la construction de la quatrième écluse. L'augmentation d'amplitude suite à la construction de la nouvelle écluse est de l'ordre de 20 % à l'amont du canal de Lanaye et de 10 % à l'aval du canal de Lanaye dans le pire des cas. L'amplitude des ondes en Meuse néerlandaise (Zav5) est très faible.

	Amplitude maximale (cm)		
	Remplissage Zam	Vidange	
		Amont canal de Lanaye Zav2	Aval canal de Lanaye Zav3
Avant construction Lanaye 4	?	46	23
Après construction Lanaye 4	22	25-57	11-25

Tableau 3 : amplitude des ondes de sassement avant - après

## CAVITATION

La cavitation est caractérisée par la formation de vapeur au sein de l'écoulement suite à une diminution de la pression sous le seuil de la pression de vaporisation correspondant à la température ambiante (figure 11).

Lorsque l'eau vaporisée redevient liquide, il y a une implosion qui, par impact, peut détériorer les surfaces avoisinantes (vanne, conduite en acier, béton). La figure 12 illustre des dégâts dus à la cavitation au niveau d'une hélice de bateau.

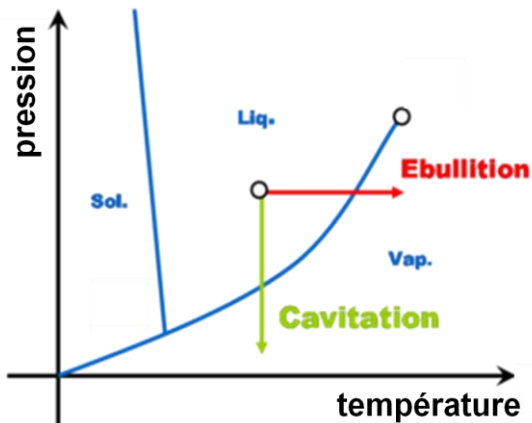


Figure 11 : diagramme de phases

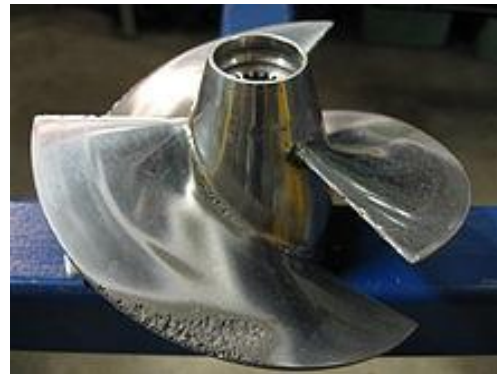


Figure 12 : dégâts de cavitation sur hélice de bateau

Ce phénomène peut notamment être observé lors de la contraction de l'écoulement au niveau d'une vanne papillon qui donne lieu à une dépression importante.

Il existe dans la littérature plusieurs coefficients adimensionnels représentatifs de la cavitation. Le coefficient  $C$ , pris en considération par le fabricant de vannes, est défini par l'équation 2.

$$C = \frac{H_2 - H_{vap}}{\Delta H + v^2/2g} \quad (2)$$

- où
- $H_2$  = cote piézométrique absolue à l'aval de la vanne (niveau de référence = axe de rotation de la vanne = 43 m DNG)
  - $H_{vap}$  = pression de vaporisation (à t° ambiante habituelle  $H_{vap} \approx 0.3$  m)
  - $\Delta H$  = différence de cote piézométrique entre l'amont et l'aval de la vanne
  - $v$  = vitesse dans la conduite à l'aval de la vanne

Ce coefficient exprime le rapport entre le paramètre physique qui limite la cavitation (la pression à l'aval) et ceux qui l'augmentent (la perte de charge et la vitesse). Plus le coefficient est grand, plus la cavitation est faible.

La figure 13 illustre l'évolution du coefficient de cavitation pendant une vidange en mode normal avec les deux lois d'ouverture testées.



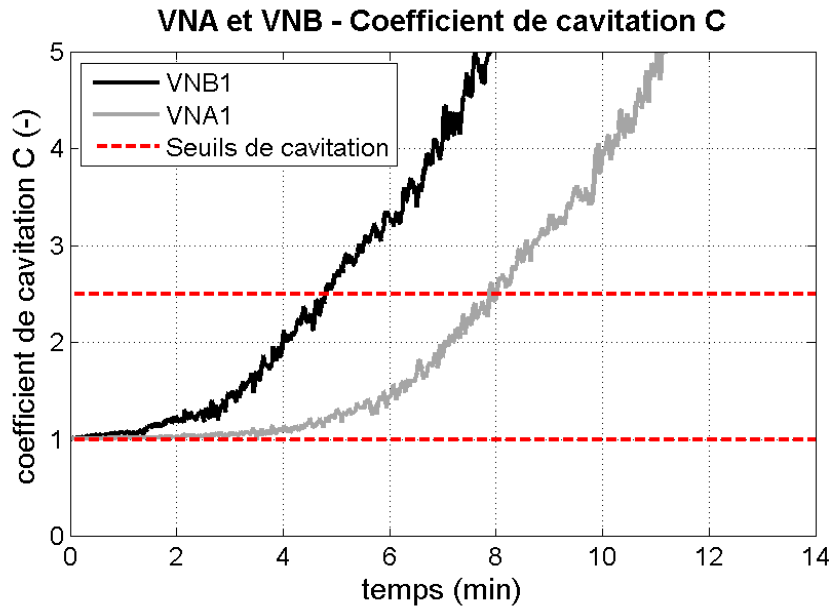


Figure 13 : Evolution du coefficient de cavitation, vidange en mode normal (comparaison lois A et B)

Les lignes rouges représentent deux niveaux de cavitation :  $C = 2.5$  correspond à la naissance de la cavitation (Bleuler 1939) et  $C = 1$  correspond à une cavitation développée (Kurkjian et Pratt, 1974). La figure 13 révèle la présence de cavitation pendant environ 8 min pour la loi A. La durée de la cavitation est diminuée de 3 minutes environ quand la loi B est utilisée. Cette observation est valable pour les autres types d'opération de sassement.

Les mesures réalisées avec l'hydrophone et l'accéléromètre sont cohérentes avec les coefficients de cavitation. A titre d'exemple, la figure 14 illustre la valeur moyenne de la pression acoustique mesurée (Pa) pour les lois A et B lors d'une vidange en mode normal. La pression acoustique reste moins longtemps à son maximum avec la loi B qu'avec la loi A.

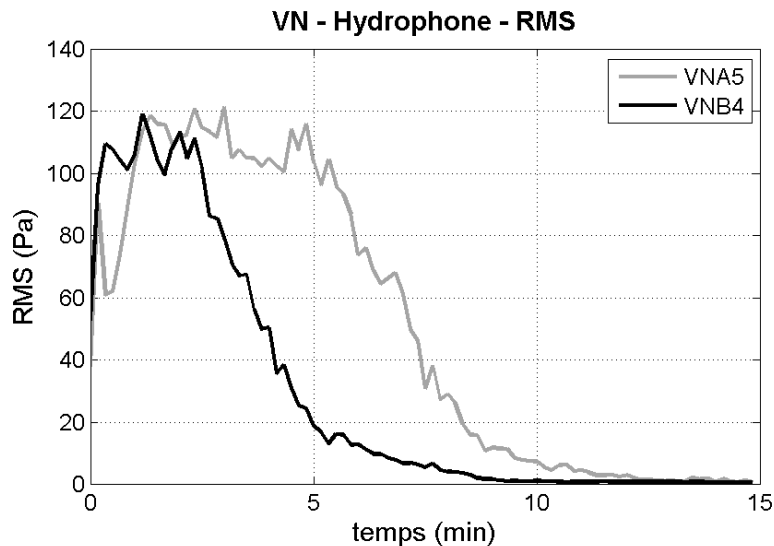


Figure 14 : Valeurs moyennes mesurées avec l'hydrophone en vidange normale (comparaison lois A et B)

## VIBRATIONS

Les vibrations au niveau de la structure ont principalement été remarquées au niveau du premier étage du poste de commande (situé près de la porte aval de l'écluse, AvG à la figure 3). En effet, il comporte de larges baies vitrées qui manquent de rigidité et entrent rapidement en vibration. L'amplitude des vibrations mesurées par les capteurs de vitesse dans ce bâtiment ( $< 0.7 \text{ mm/s}$ ) sont largement sous les valeurs susceptibles de causer des dégradations ( $5 \text{ mm/s}$ ).

Deux périodes de vibration ont été identifiées. (1) La première se produit pour une ouverture de vanne autour de  $50^\circ$ , plusieurs fréquences sont concernées avec une amplitude limitée. Ces vibrations se produisent pour toutes les opérations de vidange. (2) La seconde période de vibration apparaît seulement pour les vidanges en mode dégradé. Les vibrations se produisent quand la vanne est complètement ouverte, aux alentours du débit maximum. Leur amplitude est plus importante et elles se caractérisent par une fréquence spécifique de  $6 \text{ Hz}$ . Les vibrations durent environ  $5 \text{ min}$ . Ces vibrations ont été mesurées uniquement par les capteurs situés au premier étage du poste de commande.

Ces deux périodes de vibrations se retrouvent également dans les mesures de pression réalisées dans les rainures de batardeau (ZC1, ZC2 et ZC3). La figure 15 illustre le résultat d'une analyse spectrale appliquée aux mesures de ZC2 (amont de la vanne aval) pour une vidange en mode dégradé avec la loi A. Des ondes de pression correspondant aux périodes de vibrations sont visibles. L'origine de ces ondes reste à déterminer. L'intensité et la durée des vibrations sont similaires pour les deux lois d'ouverture.

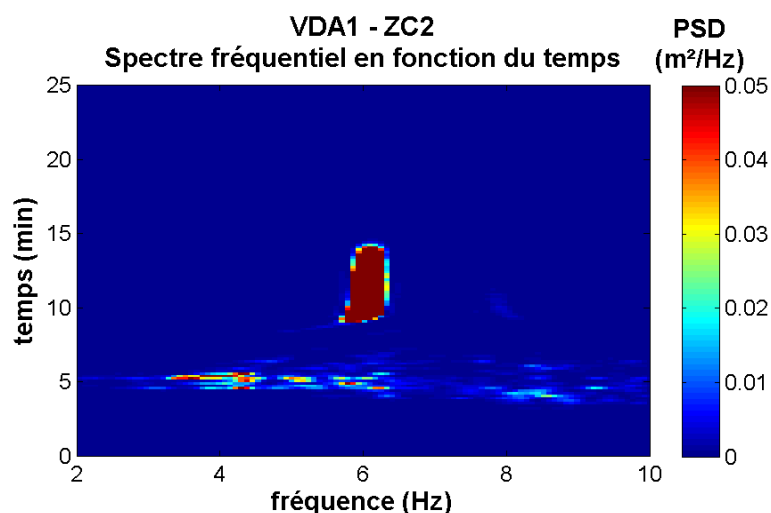


Figure 15 : Spectre fréquentiel en fonction du temps pour ZC2 pendant une vidange en mode dégradé avec la loi A

Concernant les mesures des 7 accéléromètres répartis sur les murs des chambres de vanne et des galeries techniques, les fréquences prédominantes mesurées par chaque capteur sont différentes et la fréquence de  $6 \text{ Hz}$  n'apparaît jamais comme une fréquence dominante.

## **CONCLUSION**

Les mesures ont permis de déterminer certaines valeurs caractéristiques concernant les différentes opérations de sassement (temps de sassement, débit maximum).

De manière à limiter la durée de la cavitation lors de l'ouverture des vannes, il est recommandé d'utiliser la loi d'ouverture B, sauf en remplissage dégradé où la loi A doit être utilisée de manière à éviter des pentes d'eau trop importantes dans le sas. Dans ce cas, il est de plus recommandé aux bateaux de s'amarrer du côté de l'aqueduc fonctionnel. Pour garder une uniformité entre le mode normal et le mode dégradé (éviter les erreurs au moment du changement de mode), il est recommandé de piloter les vannes amont avec la loi A et les vannes aval avec la loi B.

Le niveau de cavitation atteint est intense, mais il n'y a pas d'information concernant les dégâts associés. Comme les vannes ne sont pas en fonctionnement continu (15 cycles de remplissage-vidange par jour), il est possible que les dégâts causés soient faibles. Il est recommandé de procéder à une inspection des surfaces après environ 1 an d'utilisation de manière à observer les dégâts occasionnés. La méthode d'inspection reste à définir.

Concernant les vibrations, si elles sont jugées dérangeantes, des mesures complémentaires pourraient être réalisées (mesure angulaire de la position du papillon, pression dans la commande hydraulique,...) pour déterminer leur origine.

Plus de détails concernant les mesures réalisées et l'analyse des résultats peuvent être obtenus dans les rapports rédigés par la Direction des Recherches hydrauliques (Savary et Libert 2016) et la Direction de l'Expertise des Ouvrages (Auguste 2016).

## **REMERCIEMENTS**

Nous souhaitons remercier ici les personnes qui ont apporté leur aide dans la réalisation de cette campagne de mesures sur terrain :

Didier Bousmar, Catherine Swartenbroekx, Gil Zorzan, Freddy Ronflette, Jason Cornez, Jean-Paul Bouvier José Luis Espinosa, Laurent Michaux et Dany Remy de la Direction des Recherches Hydrauliques pour la préparation et la réalisation de la campagne de mesures.

Le personnel de la Direction de l'Expertise des Ouvrages, en particulier Thierry Auguste pour la réalisation et l'analyse des mesures de vibrations et Patrice Toussaint pour avoir dépêché rapidement les ressources humaines et matérielles nécessaires.

Christian Muyshond et Jules Staes de la Direction des Voies hydrauliques de Charleroi pour avoir piloté le zodiac lors de la mise en place et du démontage des sondes. Olivier Gilsoul pour avoir permis aux pilotes de participer et avoir prêté le zodiac malgré le lieu éloigné de la mission.

Philippe Fransolet et Vincent Herbillon de Direction de la gestion des équipements des voies hydrauliques de Liège et des barrages pour nous avoir assistés lors des préparatifs et pendant la campagne de mesures.

Patrick Ledoux et Philippe Dierickx de la Direction de la Gestion hydrologique intégrée pour le prêt des radios et pour la transmission des données hydrologiques.

## **RÉFÉRENCES**

Auguste, T. (2016). *Rapport d'instrumentation, Ecluse de Lanaye 4*. Direction de l'Expertise des Ouvrages, SPW, Liège, Belgique

Bertrand, G., Zorzan G. et Hiver J-M (1995). *Quatrième écluse de Lanaye, Etude des ondes de sassement – rapport intermédiaire 1, Campagne de mesures dans le bief aval du 23 et 24-25 septembre 1995*. Laboratoire des Recherches hydrauliques, M.E.T., Chatelet, Belgique.

Bleuler, H. (1939). L'écoulement avec cavitation dans les vannes-papillon. Bulletin Escher Wyss, tome 12, n°1-2, 31-35. S.A. des Ateliers de Constructions Mécaniques Escher Wyss, Suisse.

Kurkjian G.A.Jr and Pratt H.C. (1974). Follow these simple rules to get long life from your large butterfly valves. Air Gas and Liquid Handling, Power, July 1974, McGraw-Hill, Inc.

PIANC (2009). *Innovation in lock design*. Report 106, 2009

Savary C et Libert Y (2016). *Quatrième écluse de Lanaye, Mesures hydrauliques in situ*. Rapport intermédiaire 1. Direction des Recherches hydrauliques, SPW, Chatelet, Belgique.