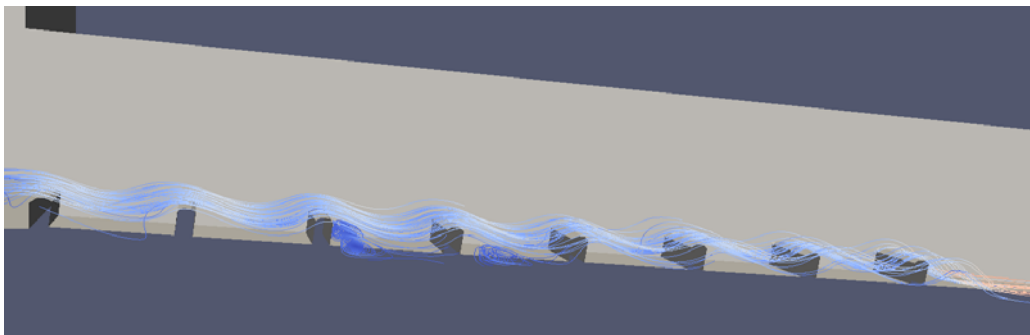


Contrat de recherche_MTQ_ULaval_R731_1

Détermination des vitesses à la sortie d'un ponceau avec seuils permettant le passage du poisson

Rapport final



Préparé pour le

Ministère des Transports du Québec

Premiers auteurs : Claire Deschênes¹, Yves Secretan²

Co-auteurs, Vincent Aeschlimann¹ et Sébastien Houde¹

¹Laboratoire de machines hydrauliques LAMH, Université Laval, ²INRS-ETE

4 octobre 2016

Table des matières

1. Synthèse des conclusions et recommandations.....	3
2. Rappel des objectifs et des livrables	4
3. Essais expérimentaux en laboratoire.....	5
4. Simulations numériques 3D	6
5. Procédure pour utiliser le logiciel 3D	7
6. Éléments administratifs.....	7
7. Conclusion et recommandations	8

Détermination des vitesses à la sortie d'un ponceau avec seuils permettant le passage du poisson

Contrat de recherche_MTQ_ULaval_R731_1 – rapport final

1. Synthèse des conclusions et recommandations

Nous présentons ici le rapport final pour le projet en rubrique dont les objectifs principaux sont :

Produire des relations empiriques à partir de résultats expérimentaux, sous formes d'abaques ou d'équations, en fonction des caractéristiques hydrauliques de ponceaux avec seuils et du débit y passant, pour déterminer la vitesse à leur sortie.

Produire un outil de calcul de la vitesse de l'écoulement à la sortie des ponceaux avec seuils aménagés pour le libre passage des poissons en fonction des caractéristiques hydrauliques et du débit y circulant.

Un modèle réduit de ponceau a premièrement été fabriqué et mis en eau au Laboratoire de machines Hydrauliques de l'Université Laval. Ce banc d'essais a permis de tester une géométrie de ponceau pour différentes pentes et débits. Avec ce modèle, plusieurs campagnes expérimentales ont été effectuées. L'écoulement a été caractérisé à partir des visualisations, des mesures de hauteur d'eau et des mesures de vitesse et de débit.

Ces données d'essai ont été utilisées pour valider une méthodologie de simulation 3D à l'étape de la preuve de concept, avec les codes de calcul commerciaux d'ANSYS CFX. Il a été constaté que les simulations 3D permettent de fournir des estimés réalistes. Il faudra investiguer d'autres phénomènes dans le futur, comme l'influence de l'érosion de la structure du champ de vitesse en double tourbillons contrarotatifs en sortie du ponceau.

La transposition à un code public a été effectuée avec succès dans la seconde étape du projet. Un ensemble de trois logiciels libres de droits et des tutoriaux sont proposés pour piloter la création du maillage, les simulations numériques et l'analyse des données.

Tous les objectifs ont été atteints, sauf la production des abaques parce que les temps de calculs 3D avec l'ensemble de logiciels libres de droit sont excessifs. Par contre une solution alternative bidimensionnelle a été proposée. Elle permettra dans le futur d'obtenir des relations empiriques sous formes d'abaques ou d'équations pour déterminer la vitesse à la sortie des ponceaux avec seuils.

2. Rappel des objectifs et des livrables

Tel que stipulé au Devis de recherche MTQ R731.1 [Doc 1], le but général du projet est de :

Déterminer les vitesses à la sortie de ponceaux avec seuils aménagés pour le libre passage du poisson, à partir des caractéristiques hydrauliques des ponceaux et du débit y passant.

Deux objectifs ont été identifiés:

1. Produire des relations empiriques à partir de résultats expérimentaux, sous formes d'abaques ou d'équations, en fonction des caractéristiques hydrauliques de ponceaux avec seuils et du débit y passant, pour déterminer la vitesse à leur sortie.
2. Produire un outil informatique du calcul des vitesses à la sortie des ponceaux avec seuils aménagé pour le libre passage du poisson, selon leurs caractéristiques hydrauliques et le débit y passant.

Seul le 2^e objectif fait l'objet de ce travail de recherche et donc de ce rapport.

Les étapes du projet stipulées au devis sont les suivantes :

Étape 1 : La première étape du projet de recherche consiste en des essais en laboratoire sur un modèle physique à échelle réduite afin de fournir des données précises d'étalonnage/validation pour un modèle numérique 3D. Une géométrie sera choisie (hauteur et espacement des seuils) et mesurée pour diverses pentes et débits. Les vitesses et niveaux d'eau seront mesurés par PIV et LDV.

Étape 2 : La seconde étape consiste en la modélisation numérique des cas mesurés par une approche numérique 3D. Les résultats des essais en laboratoire seront utilisés pour étalonner/valider ce modèle. L'utilisation d'un modèle du domaine public ou peu onéreux est requis.

Étape 3 : La troisième étape consiste à passer de l'échelle réduite à la taille réelle et à confronter les simulations 3D avec des données de terrain. Une procédure simple, éventuellement sous la forme d'une interface graphique, devra être développée pour permettre au ministère des Transports d'utiliser le logiciel 3D afin de calculer l'écoulement propre à une configuration de ponceau.

Étape 4 : La quatrième étape consiste en la production d'un outil déterminant les vitesses à la sortie d'un ponceau avec seuils. Le modèle numérique 3D sera utilisé, par la simulation d'un éventail de cas possibles, pour déterminer les relations empiriques permettant de déterminer les vitesses selon les caractéristiques du ponceau et le débit. Une interface graphique simple devra aussi être développée et fournie au ministère des Transports, afin de calculer la vitesse en exploitant les relations empiriques développées.

Comme prévu au départ, seules les étapes 1, 2 et 4 sont visées par ce projet de recherche et donc ce rapport.

Les éléments livrables sont présentés dans le tableau suivant, accompagnés du contenu sommaire de chaque livrable et des dates de transmission :

Éléments livrés	Transmission
Rapport d'étape no 1 - Conception et validation d'un modèle réduit d'un ponceau et programme expérimental [Doc 2] <ul style="list-style-type: none"> • Modèle de ponceau et programme expérimental • Annexe 1 Plan du banc d'essai de ponceau modèle 	2 juin 2014
Note A - Essai préliminaire - Mise en eau du ponceau [Doc 3]	11 novembre 2014
Rapport d'étape no 2 - Essais en laboratoire et simulations numériques exploratoires [Doc 4] <ul style="list-style-type: none"> • Campagne expérimentale • Simulation numériques exploratoires • Annexe 1. Principales dimensions du modèle réduit de ponceau • Annexe 2. Photos du ponceau à 5% de pente avec 5 seuils espacés de 430 mm • Annexe 3. Comparaisons des champs de vitesse mesurés et simulés • Base de données digitale (dossier « Data ») [Doc 11] 	2 mars 2015
Rapport d'étape no 3 - Validation d'OpenFOAM pour la simulation des ponceaux avec seuils [Doc 5] <ul style="list-style-type: none"> • Méthodologie (OpenFOAM et HELYX-OS) • Résultats et analyse 	30 septembre 2016
Procédure pour utiliser le logiciel 3D <ul style="list-style-type: none"> • Tutorial 1. Création de maillage [Doc 6] • Tutorial 2. Procédure pour effectuer une simulation d'écoulement [Doc 7] • Tutorial 3 Utilisation de ParaView pour le post-traitement [Doc 8] • Simulations d'un cas test de ponceau [Doc 10] 	30 septembre 2016
Rapport final (conforme aux exigences du Guide de présentation des rapports de recherches finaux)	30 septembre 2016
Article de vulgarisation scientifique (en français de 2 à 4 pages) [Doc 9]	30 septembre 2016
Activité de transfert de connaissances (formation ou support technique)	A venir

3. Essais expérimentaux en laboratoire

Les mesures expérimentales ont été effectuées dans un canal modèle à l'échelle 1:10 imitant un ponceau avec seuils de 3 x 3 m², réalisé au Laboratoire de Machines Hydrauliques du département de génie mécanique de l'Université Laval.

Le rapport d'étape 1 [Doc 2] détaille la conception et la validation du modèle réduit d'un ponceau, le programme expérimental et les moyens de mesure envisagés. La section intérieure du canal modèle est de 300 x 300 mm². La longueur du ponceau est d'environ 2000 mm. Huit seuils de 60 mm de haut et 30 mm d'épais sont espacés de 200 mm. Cet espacement correspond aux critères de dimensionnement d'un ponceau pour une pente de 10%.

Des campagnes d'essais ont été menées pour trois pentes du ponceau: 5%, 10% et 15%. Le rapport d'étape 2 [Doc 4] présente ces campagnes de mesures. Pour chaque pentes choisies, quatre débits ont été testés de 10 à 40 l/s pour simuler un ponceaux jusqu'en condition de fort débit. Des mesures de vitesse ont été effectuées pour obtenir les composantes de vitesse débitantes, normales au fond du canal et transversale à plusieurs endroits. Pour chacun des cas étudiés, la hauteur d'eau a été mesurée à plusieurs positions le long du ponceau. Des photos ainsi que des films ont été enregistrés pour visualiser le comportement et le profil de la surface libre.

La base de données expérimentale digitale (dossier « *Data* ») [Doc 11], un des livrables du projet, contient les photos, les films ainsi que les tableaux de mesures de vitesses et de hauteurs d'eau.

4. Simulations numériques 3D

Des simulations numériques tridimensionnelles (3D) ont permis de valider une méthodologie de simulation pouvant être utilisé pour remplir l'objectif principal du projet.

Une première a permis de démontrer qu'il était possible de reproduire les principales caractéristiques de l'écoulement mesuré dans le modèle de ponceau avec seuils avec des simulations de type Reynolds Average Navier Stokes (RANS). Il a été constaté qu'il est relativement facile de réaliser ces simulations avec un logiciel commercial comme ANSYS-CFX. Le rapport d'étape 2 [Doc 4] présente une comparaison avec les mesures expérimentales de résultats de simulations numériques réalisées avec ANSYS CFX. Les mesures réalisées sur le modèle ont été utilisées pour valider les simulations au travers de comparaisons des champs de vitesse et des niveaux d'eau. De plus, les mesures ont aussi fourni les conditions frontières nécessaires aux simulations.

Les résultats obtenus avec ANSYS CFX ont démontré qu'il était possible d'utiliser une approche RANS avec un modèle bi-phasique simple pour simuler la dynamique de l'écoulement dans les ponceaux. Les simulations sont parvenues à reproduire les transitions entre les différents types d'écoulement : de critique au seuil au plus faible débit vers supercritique à tous les seuils au plus fort débit. Les simulations montrent aussi que l'écoulement au-dessus des seuils est dominé par deux tourbillons contrarotatifs. À plus fort débit, les calculs semblent indiquer que cette configuration est instable.

Globalement, les simulations parviennent à reproduire les positions mesurées de la surface avec moins de 10 mm d'écart. Une comparaison des vitesses moyennes calculées à partir des points de mesure LDV, permet de voir que les différences entre les simulations et les mesures sont de l'ordre de 0.1 à 0.2 m/s. Les simulations 3D permettent donc de fournir un estimé réaliste des vitesses en sortie de ponceaux. De plus, la hauteur de la surface de l'eau et la vitesse moyenne ne sont peut-être pas les seuls critères importants de conception des ouvrages aval. En effet, la

structure du champ de vitesse en sortie du ponceau présente une paire de tourbillons contrarotatifs qui pourrait influencer significativement l'érosion.

Une fois la preuve de concept réalisée, la méthodologie de calcul développée sur CFX a été transférée au code de calcul du domaine public OpenFOAM, tel que demandé par le ministère.

Des procédures de simulation basées sur OpenFOAM ont été développées et validées. Le rapport no 3 [Doc 5] présente les résultats finaux d'une série de tests sur des géométries complètes en 3D et des géométries simplifiées 2D. Les résultats indiquent qu'OpenFOAM parvient à reproduire l'écoulement mesuré dans le ponceau modèle du LAMH aussi bien que le logiciel commercial ANSYS CFX. La principale limitation d'OpenFOAM provient des temps de calcul en 3D qui sont relativement long puisque la simulation doit inclure les effets des variations temporelles de l'écoulement. Pour offrir une alternative viable aux calculs 3D une procédure de calcul 2D a aussi été validée. Les calculs 2D offrent une réduction significative du temps de calcul. Nous pensons qu'une stratégie globale de simulation combinant un grand nombre de simulations 2D avec un nombre restreint de simulations 3D, servant de point de validation, permettrait la réalisation d'abaques dans des temps raisonnables.

5. Procédure pour utiliser le logiciel 3D

Trois logiciels libres de droit ont été rassemblés pour fournir un contrôle intuitif des simulations 3D et de l'analyse des écoulements dans les ponceaux avec dissipateurs d'énergie.

- Le maillage utilisé dans les simulations est préparé soit par celui d'*OpenFOAM*, soit par *blockMesh* et *snappyHexMesh*. Voir le tutorial 1 [Doc 6].
- L'interface conviviale *Helyx-OS* permet de préparer et lancer les simulations numériques des écoulements par OpenFOAM et de préparer les données pour la visualisation et l'analyse par ParaView. On doit lui fournir un maillage adéquat et les différents paramètres numériques et physiques nécessaires à la simulation. Voir le tutorial 2 [Doc 7].
- *ParaView* est le logiciel qui permet l'analyse des maillages et l'analyse des résultats de simulations numériques. Il permet de visualiser les vecteurs de vitesse, la surface libre et les lignes de courant. Il permet également d'effectuer des calculs/intégrations à partir des résultats de simulations, pour évaluer, par exemple, le débit en sortie. Voir le tutorial 3 [Doc 8].

Cet ensemble de logiciels libres de droits permet d'accéder aux détails des écoulements et des vitesses de sortie pour diverses configurations avec une très bonne précision.

Les résultats d'un cas test de simulations 3D de ponceau avec seuils effectué à l'aide de cette série d'outils est jointe à titre de référence [Doc 10]).

6. Éléments administratifs

Le contrat de base *Détermination des vitesses à la sortie d'un ponceau avec seuils permettant le libre passage du poisson*, R731.1, daté du 27 février 2014, devait couvrir la période de février

2014 au 31 décembre 2015. L'avenant no 1 au contrat de base, signé le 31 mars 2016, a eu pour effet de porter la date de fin du projet le 30 septembre 2016.

La chargée de projet du côté du MTQ, qui à l'origine était Josée Émond, a été remplacée en cours de projet par Philippe-Hubert Roy-Gosselin. L'équipe de recherche est composée de Yves Secretan et Jannette Frandsen de l'INRS-ETE, ainsi que de Claire Deschênes, Vincent Aeschlimann, Richard Fraser et Sébastien Houde de l'Université Laval. Mme Frandsen s'est retirée du projet en cours de route. Frédéric Gagnon et Julie Lefrançois ont en outre travaillé au projet pour l'INRS-ETE et David Stefen pour l'Université Laval.

Une entente de transfert entre l'Université Laval et l'INRS a été signée autour du 1^{er} février 2016. (\$15000 à la signature de l'entente et \$10 000 au paiement final par le MTQ).

Un montant maximum de 141 000 \$ a été alloué pour réaliser ce projet de recherche excluant les taxes applicables et frais indirects. La répartition des budgets et dépenses réelles au 30 septembre 2016 est la suivante.

2016-10-03	totaux	Budget / par université		Réel / par université	
		UlaVal	INRS	UlaVal	INRS
Co-chercheurs	37 500 \$	12 500 \$	25 000 \$	0 \$	0 \$
Professionnels et techniciens	78 500 \$	52 000 \$	26 500 \$	106 636 \$	25 000 \$
Matériaux et mesures	15 000 \$	15 000 \$		9 364 \$	
Imprévus	10 000 \$	10 000 \$	0 \$	0	0
Total	141 000 \$	89 500 \$	51 500 \$	116 000 \$	25 000 \$
Répartition par institution		63%	37%	82%	18%

7. Conclusion et recommandations

L'ensemble du contrat a été réalisé avec succès moyennant un retard de 9 mois. Par contre, des rencontres de suivi fréquentes ont été faites avec les chargés de projets du MTQ, ce qui a permis de justifier ce retard en cours de route.

Un modèle réduit de ponceau a été fabriqué et mis en eau au Laboratoire de machines Hydrauliques de l'Université Laval. Ce banc d'essais a permis de tester une géométrie de ponceau pour différentes pentes et débits. La géométrie choisie est un modèle à l'échelle 1:10 d'un ponceau à 10% de pente de 3x3 m avec 8 seuils. Avec ce modèle, trois campagnes expérimentales ont été effectuées, pour les pentes de canal 5%, 10% et 15%. A chaque fois plusieurs débits ont été mesurés. Les résultats sont fournis sous forme de visualisations, de hauteur d'eau et de champs de vitesse.

Ces données d'essai ont été utilisées pour établir et valider une méthodologie de simulation 3D à l'étape de la preuve de concept, avec les codes de calcul commercial ANSYS CFX. Il a été constaté que les simulations 3D permettent de fournir un estimé réaliste des vitesses en sortie de

ponceaux, de la hauteur de la surface de l'eau et de la vitesse moyenne. Il faudra investiguer dans le futur l'influence l'érosion de la structure du champ de vitesse en double tourbillons contrarotatifs en sortie du ponceau. La transposition à un code public, OpenFOAM, a été effectuée avec succès dans la seconde étape du projet. Un ensemble de 3 logiciels libre de droits et de tutoriaux ont été proposés pour piloter la création du maillage, les simulations numérique et l'analyse des données.

Les simulations 3D qui ont été testées lors de ce contrat permettent de simuler les ponceaux avec seuil. Leur utilisation est cependant trop lourde en temps de calcul et en ressources pour être utilisable au jour le jour. En alternative aux simulations tridimensionnelle, l'équipe de recherche propose une simulation bidimensionnelle. On peut espérer une précision de l'ordre de 10%.