POLYPUBLIE

# Analyse expérimentale des écoulements transitoires diphasiques dans le système de drainage urbain

Rolando-Yezid Perez-Pulido

Document en libre accès dans PolyPublie
Open Access document in PolyPublie

| | |
|---|---|
| **Date** | 2021 |
| **Type** | Mémoire ou thèse / Dissertation or Thesis<br>Mémoire de maîtrise/Master's thesis |
| **URL de PolyPublie**<br>PolyPublie URL | https://publications.polymtl.ca/10005/ |
| **Conditions d'utilisation**<br>Terms of use | © Tous droits réservés / All rights reserved |
| **Référence**<br>Citation | Perez-Pulido, R.-Y. (2021). Analyse expérimentale des écoulements transitoires diphasiques dans le système de drainage urbain [Mémoire de maîtrise, Polytechnique Montréal]. PolyPublie. https://publications.polymtl.ca/10005/ |

**Détails de la thèse**
Thesis details

| | |
|---|---|
| **Directeurs de recherche**<br>Advisors | Musandji Fuamba |
| **Programme**<br>Program | Génie civil |

**Ce fichier a été téléchargé à partir de PolyPublie, le dépôt institutionnel de Polytechnique Montréal**
This file has been downloaded from PolyPublie, the institutional repository of Polytechnique Montréal
https://publications.polymtl.ca

**POLYTECHNIQUE MONTRÉAL**

affiliée à l'Université de Montréal

# Analyse expérimentale des écoulements transitoires diphasiques dans le système de drainage urbain

**ROLANDO YEZID PEREZ PULIDO**

Département de Génie civil, géologique et des mines

Mémoire Présenté en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise en sciences appliquées*

Génie civil

Décembre 2021

© Rolando Yezid Perez Pulido, 2021.

**POLYTECHNIQUE MONTRÉAL**

affiliée à l'Université de Montréal

Ce mémoire intitulé :

# Analyse expérimentale des écoulements transitoires diphasiques dans le système de drainage urbain

Présenté par **Rolando Yezid PEREZ PULIDO**

en vue de l'obtention du diplôme de *Maîtrise ès sciences appliquées*

a été dûment accepté par le jury d'examen constitué de :

**Ahmad SHAKIBAENIA**, président
**Musandji FUAMBA**, membre et directeur de recherche
**Elmira HASSANZADEH**, membre

# DÉDICACE

*Je dédie ce travail à :*

*Ma fille **Paula**, moteur et source d'inspiration de ma vie,*
*qui remplit mes journées de joie et de tendresse.*

*Ma femme **Ginna**, mon amour, ma partenaire, l'être humain sur qui j'ai toujours compté*
*pour mes aventures, aussi difficiles qu'elles puissent paraître.*

*Dedico este trabajo a:*

*Mi hija **Paula**, el motor e inspiración de mi vida,*
*quien llena mis días de alegría y ternura.*

*Mi esposa **Ginna**, mi amor, mi compañera, el ser humano con quien siempre he contado*
*para mis aventuras, por difíciles que parezcan.*

# REMERCIEMENTS

Je voudrais reconnaitre la collaboration des personnes et des institutions qui m'ont permis d'arriver à la fin de ce chemin devenu plus complexe en raison des circonstances de notre temps.

J'exprime ma gratitude à mon directeur de thèse, le professeur Musandji Fuamba, pour m'avoir accepté dans son groupe de recherche et pour avoir été mon directeur de thèse. Son aide pour trouver un sujet de recherche intéressant et ses conseils m'ont permis de réaliser un rêve important sur le plan professionnel.

Je voudrais remercier tout particulièrement Dr. Arman Rokhzadi pour son aide inestimable, ses conseils, sa patience et pour le temps consacré au cours du développement de la recherche.

*I would especially like to thank Dr. Arman Rokhzadi for his invaluable help, advice, patience and for the dedicated time during the research development.*

Je voudrais mentionner M. Ilian Tosan qui a été un grand partenaire du groupe de recherche et ami avec qui j'ai eu plaisir à travailler.

Le travail de laboratoire a été complexe en raison de circonstances différentes, mais enrichissant. Avec beaucoup de diligence et de patience, Étienne Bélanger m'a aidé à découvrir ces équipements de laboratoire et à trouver des solutions et pour cette raison, je tenais à le remercier.

Je remercie également Polytechnique Montréal pour la collaboration et au gouvernement du Québec pour l'aide financière.

Enfin, je termine ces remerciements avec ma famille, mon épouse Ginna qui m'a patiemment soutenu, écouté et aidé depuis le début de cette aventure et ma fille Paula Andrea. Je les aime. Merci.

# RÉSUMÉ

Les problèmes de fonctionnement et le remplissage rapide des réseaux de drainage peuvent générer un front d'onde de pressurisation, par lequel l'air peut être emprisonné et devenir fortement pressurisé. De plus, pendant le processus de vidange et de retour à l'état normal, un front d'onde de dépressurisation est généré, l'air peut pénétrer dans les réseaux d'égouts et une pression sous-atmosphérique peut se produire dans les réseaux. Notez que pendant les processus de pressurisation et de dépressurisation, l'infrastructure hydraulique peut être sérieusement endommagée. Les conséquences peuvent inclure l'explosion ou l'effondrement de canalisations, la pollution de la nappe phréatique ou des inondations.

Par conséquent, les écoulements transitoires dans les réseaux de drainage peuvent être étudiés suivant deux types d'expériences différents. Dans le premier type, le processus de vidange d'un écoulement sous pression est simulé dans deux conditions initiales différentes : 1) lorsque l'eau est stagnante dans la canalisation (débit nul) et 2) lorsque l'eau se déplace à une vitesse constante (débit permanent). Dans le deuxième type, un écoulement partiellement pressurisé, dont un écoulement pressurisé en amont et un écoulement à surface libre en aval, est développé dans la canalisation, qui est alimentée par un réservoir connecté à l'extrémité amont. L'air présent sur la surface de l'eau en écoulement à surface libre est attrapé en obstruant soudainement l'extrémité aval. Notez que les résultats de cette expérience sont également utilisés pour étudier l'effet du comportement d'instabilité des pertes par frottement sur la simulation numérique des variables d'écoulement, y compris la pression et le débit.

Il a été constaté que, lors du processus de vidange d'un écoulement sous pression dans les réseaux de drainage, lorsque le front de la cavité d'air atteint une distance égale à un diamètre de l'extrémité aval de la conduite ($x/D \approx 1{,}0$), il se développe une pression négative à l'intérieur de la cavité égale à -0,28D. Cette pression négative devient moins intense lorsque la cavité se propage vers l'amont. En outre, la pression à l'intérieur de la conduite est presque constante ; ce qui implique que l'effet de la pression négative est plus important que l'effet de la perte de charge. De plus, la pression négative à l'intérieur de la cavité augmente à mesure que la cavité se déplace vers l'amont. Aussi, pour une cavité avançant sur une distance de x/D = 1,0–3,0 à partir de l'extrémité aval, les lignes d'eau montrent des lignes de courant parallèles, impliquant une distribution de la pression hydrostatique, uniquement pour 1,0D à partir de l'extrémité aval de la canalisation. Cependant,

lorsque la cavité se propage vers l'amont, la ligne de courant parallèle se développe de l'extrémité aval jusqu'à une distance de 1,0D du front de la cavité.

Il a été constaté que, lors du remplissage rapide des réseaux de drainage, l'air emprisonné peut-être fortement pressurisé à plus de deux fois la pression initiale. De plus, il existe une relation inverse entre l'amplitude et la fréquence de la pression d'air induite et le volume d'air initial. En outre, étant donné que le débit dans les réseaux de drainage est instable, l'utilisation du facteur de friction de Darcy-Weisbach en régime permanent pour calculer les pertes par friction est une approximation trop simplifiée et une formule variant dans le temps est nécessaire pour simuler correctement les effets des pertes par frottement. Cette formule est fonction de variables influentes, notamment la densité et la longueur des phases d'air et d'eau ainsi que de la hauteur de pression motrice. La capacité du facteur de friction supplémentaire proposé a été examinée en résolvant différents exemples avec différentes longueurs d'air et d'eau, différents diamètres de conduites, différentes vitesses d'ondes acoustiques et différentes pressions de réservoir.

# ABSTRACT

The operational problems and rapid filling of sewer network systems can generate a pressurization wavefront, by which the air can be entrapped and get highly pressurized. Also, during the emptying process and returning to the normal condition, a depressurization wavefront is generated, the air can enter the sewer network systems, and a sub-atmospheric pressure can occur in the systems. Note that, during both pressurization and depressurization processes, the hydraulic infrastructure can be seriously damaged. The consequences can include burst, collapse, contamination of the water table, or flooding.

Therefore, the transient flows in sewer network systems are studied in two different experiments. In the first experiment, the emptying process of a pressurized flow is simulated under two different initial conditions: 1) when the water is stagnant in the pipe (zero flow) and 2) when the water flows at a constant rate (steady flow). In the second experiment, a partially pressurized flow, a pressurized flow at upstream, and a free-surface flow at downstream, is developed in a pipe, which is supplied by a reservoir connected at the upstream end. The air existing at the top of the free-surface flow is entrapped by suddenly obstructing the downstream end. Note that the results of this experiment are also used to study the effect of unsteadiness behavior of friction losses in numerically simulating the flow variables, including pressure and flow rate.

It was found that, during the emptying process of a pressurized flow in sewer network systems, when the air cavity's head reaches a distance equal to a diameter from the downstream end of the conduit ($x/D \approx 1.0$), a negative pressure inside the cavity, equal to $-0.28D$, develops. This negative pressure becomes less intense when the cavity further propagates upstream. Also, the pressure inside the pipe is almost constant, which implies that the effect of negative pressure is more pronounced than the effect of friction loss. In addition, the negative pressure inside the cavity increases as the cavity moves further upstream. Moreover, for a cavity advancing a distance of $x/D = 1.0–3.0$ from the downstream end, the water lines show parallel streamlines, implying the hydrostatic pressure distribution, only for $1.0D$ from the pipe's downstream end. However, when the cavity further propagates upstream, the parallel streamline develops from the downstream end up to a distance of $1.0D$ from the cavity's head.

It was found that, during rapid filling of sewer network systems, the entrapped air can get highly pressurized to over more than twice the driving pressure. Also, there is an inverse relationship

between the amplitude and frequency of the induced air pressure and the initial air volume. In addition, since the flow in sewer network systems is unsteady, using the steady-state Darcy-Weisbach friction factor to calculate the friction losses is a too simplified approximation, and a time-variant formula is needed to simulate the effects of friction loss appropriately. This formula is a function of influential variables, including the density and the length of air and water phases and the driving pressure head. The ability of the proposed additional friction factor has been examined by solving different examples with different air and water lengths, different pipe diameters, different acoustic wave speeds, and different reservoir pressures.

# TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE ..... III

REMERCIEMENTS ..... IV

RÉSUMÉ ..... V

ABSTRACT ..... VII

TABLE DES MATIÈRES ..... IX

LISTE DES TABLEAUX ..... XII

LISTE DES FIGURES ..... XIII

LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS ..... XV

LISTE DES ANNEXES ..... XVI

CHAPITRE 1 INTRODUCTION ..... 1

1.1 Objectifs ..... 2

CHAPITRE 2 REVUE CRITIQUE DE LA LITTÉRATURE ..... 4

2.1 Écoulement transitoire ..... 4

2.2 Processus de vidange ..... 7

2.3 Air emprisonné ..... 11

CHAPITRE 3 DÉMARCHE DE L'ENSEMBLE DU TRAVAIL DE RECHERCHE ET ORGANISATION GÉNÉRALE DU DOCUMENT INDIQUANT LA COHÉRENCE DES ARTICLES PAR RAPPORT AUX OBJECTIFS DE LA RECHERCHE ..... 14

3.1 Méthodologie ..... 14

3.1.1 Méthodologie pour le Front d'onde de dépressurisation (DWF) ..... 17

3.1.2 Méthodologie pour l'Air Emprisonné ..... 20

3.2 Plan de la mémoire ..... 21

3.2.1 Structure de la mémoire ..... 21

3.2.2 Liste de publications ..... 22

CHAPITRE 4 ARTICLE 1: EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE EMPTYING PROCESS AND AIR CAVITY DYNAMIC IN PIPELINES ..... 24

4.1 Abstract ..... 24

4.2 Introduction ..... 25

4.3 Objectives ..... 26

4.4 Methodology ..... 27

4.4.1 Description of the experiments ..... 27

4.4.2 Initial conditions ..... 28

4.5 Results and discussion ..... 29

4.6 Pressure distribution inside cavity ..... 34

4.7 Conclusion ..... 36

4.8 Data availability Statement ..... 37

4.9 Acknowledgment ..... 37

CHAPITRE 5 RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX COMPLEMENTAIRES POUR LE PROCESSUS DE VIDANGE ..... 38

5.1 Résultats expérimentaux ..... 38

5.1.1 Expérience type EXP1 ..... 39

5.1.2 Expérience type EXP2 ..... 42

CHAPITRE 6 RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX DES ÉCOULEMENTS TRANSITOIRES IMPLIQUANT UNE POCHE D'AIR EMPRISONNÉE ..... 46

6.1 Description des expériences en laboratoire ..... 47

6.2 Résultats conservés pour l'étude du facteur de frottement supplémentaire ..... 48

6.2.1 Résultats du laboratoire ..... 48

6.2.2 Facteur de frottement permanent de Darcy-Weisbach ..... 50

6.3 Résultats complémentaires pour l'analyse de l'air emprisonné ..... 52

6.3.1 Résultats pour la condition initiale ..... 52
6.3.2 Hydrogrammes de pression ..... 53
CHAPITRE 7 ÉTALONNAGE DES APPAREILS DE MESURE ..... 56
7.1 Appareils de mesure ..... 56
7.1.1 Caméra à Haute Vitesse (HV) ..... 56
7.1.2 Niveau numérique ..... 57
7.1.3 Débitmètres ..... 58
7.1.4 Capteurs de pression ..... 60
7.1.5 Logiciel LabView ..... 60
7.2 Étalonnage des appareils de mesure ..... 62
7.2.1 Étalonnage des débitmètres ..... 62
7.2.2 Courbes d'étalonnage des capteurs de pression ..... 63
7.2.3 Étalonnage des capteurs de pression ..... 65
7.2.4 Calcul d'incertitudes ..... 66
7.3 Mesure du coefficient de frottement de Darcy-Weisbach ..... 68
CHAPITRE 8 DISCUSSION GÉNÉRALE ..... 69
CHAPITRE 9 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS ..... 70
9.1 CONCLUSION ..... 70
9.2 RECOMMANDATIONS ..... 72
LISTE DE RÉFÉRENCES ..... 74
ANNEXES ..... 80

# LISTE DES TABLEAUX

Table 4.1 Values of different measured parameters.....33

Tableau 5.1 Paramètres mesurés de la cavité pour H/D=1.5 .....43

Tableau 5.2 Paramètres mesurés de la cavité pour H/D=1.8 .....43

Tableau 6.1 Résultats de laboratoire pour $Hres = 0.30\ m$ .....49

Tableau 6.2 Résultats de la méthode des moindres carrés .....51

Tableau 7.1 Calculs des incertitudes. .....67

# LISTE DES FIGURES

Figure 3.1 Schéma du montage de laboratoire pour l'analyse de l'air emprisonné ..... 16

Figure 3.2 Schéma du montage de laboratoire pour l'analyse du processus de vidange ..... 16

Figure 3.3 Photos du laboratoire. a) Air emprisonnée et b) Processus de vidange ..... 17

Figure 3.4 Condition initiale pour EXP1 ..... 18

Figure 3.5 Condition initiale pour EXP2 ..... 19

Figure 3.6 Emplacement modifié des capteurs de pression ..... 20

Figure 3.7 Condition initiale pour l'analyse du poche d'air ..... 20

Figure 4.1 Laboratory setup schematic ..... 27

Figure 4.2 Pressure in sensors before the cavity begins. a) EXP1, b) EXP2 ..... 29

Figure 4.3 Photos of the cavity at x/D ≈ 1.0. a) EXP1, b) EXP2. ..... 30

Figure 4.4 Pressure in sensors when cavity is at x/D ≈ 1.0. a) EXP1, b) EXP2 ..... 30

Figure 4.5 Photos of the cavity at x/D ≈ 3.0. a) EXP1, b) EXP2 ..... 31

Figure 4.6 Pressure in sensors when cavity is at x/D ≈ 3.0. a) EXP1, b) EXP2 ..... 32

Figure 4.7 Flow number at upstream (F2), at downstream (F5) and the cavity speed $w/gD$ ..... 33

Figure 4.8 New location of sensors at the downstream end of the pipe ..... 34

Figure 4.9 Pressure distribution along the cavity ..... 34

Figure 5.1 *Flow number* en amont ($F_2$) pour EXP1 ..... 39

Figure 5.2 *Flow number* en aval ($F_5$) pour EXP1 ..... 40

Figure 5.3 Distance de propagation de la cavité pour EXP1 ..... 40

Figure 5.4 Vitesse de propagation de la cavité ($w$) pour EXP1 ..... 41

Figure 5.5 $F_2$ en amont, $F_5$ en aval et $w/gD$ à x/D, pour H/D=1.5 ..... 44

Figure 5.6 $F_2$ en amont, $F_5$ en aval et $w/gD$ à x/D, pour H/D=1.8 ..... 44

Figure 5.7 Distance de propagation de la cavité .....45

Figure 6.1 Conditions initiales pour l'étude de l'air emprisonné.....48

Figure 6.2 Dessins obtenues du logiciel DAO. (a) Section de la conduite et (b) Figure 3D .....48

Figure 6.3 Répartition de la pression en aval de la conduite.....49

Figure 6.4 Relation entre la perte de charge et la vitesse .....51

Figure 6.5 Pression initiale le long de la conduite. a) Volume élevé, b) Volume faible.....52

Figure 6.6 Hydrogramme de pression pour H/D=0.5. a) Volume élevé, b) Volume faible.....53

Figure 6.7 Hydrogramme de pression pour H/D=2.5. a) Volume élevé, b) Volume faible.....54

Figure 6.8 Hydrogramme de pression pour H/D=4.5. a) Volume élevé, b) Volume faible.....55

Figure 7.1 Caméra à haute vitesse StreamView-LR .....57

Figure 7.2 Fenêtres de la caméra à haute vitesse pour a) la capture et b) la visualisation.....57

Figure 7.3 Niveau numérique Mastercraft .....58

Figure 7.4 Débitmètre ultrasonique Hedland HTTP. a) boîtier de l'émetteur, b) transducteurs....58

Figure 7.5 Fenêtre d'affichage du débit en temps réel (HTTP) .....59

Figure 7.6 Débitmètre électromagnétique MAG910E .....59

Figure 7.7 Capteur de pression sur le fond du conduit.....60

Figure 7.8 Interface utilisateur de VI ou *Face-avant* .....61

Figure 7.9 Diagramme du VI avec le code graphique.....61

Figure 7.10 Fenêtre de configuration des paramètres du débitmètre Hedland.....62

Figure 7.11 Fenêtre de calibration du débitmètre Hedland .....63

Figure 7.12 Courbe d'étalonnage pour les capteurs de pression .....64

Figure 7.13 Fenêtre de configuration des données de l'étalonnage pour les capteurs .....65

Figure 7.14 Interface utilisateur de VI (*Face-avant*) après l'étalonnage .....65

Figure 7.15 Perte de charge en fonction de la vitesse .....68

# LISTE DES SIGLES ET ABRÉVIATIONS

| | |
|---|---|
| ASCE | American Society of Civil Engineers |
| ASME | American Society of Mechanical Engineers |
| CERIU | Centre d'expertise et de recherche en infrastructures urbaines |
| DAO | Dessin assisté par ordinateur |
| DME | Débitmètre électromagnétique |
| DMU | Débitmètre ultrasonique |
| DWF | Depressurisation wavefront |
| IAHR | International Association for Hydro-Environment Engineering and Research |
| ISEH | International Symposium on Environmental Hydraulics |
| MDDEFP | Ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques |
| MOC | Method of characteristics |
| NSERC | Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada |
| PWF | Pressurisation wavefront |
| PVC | Polyvinyl chloride |
| RC | Rigid colon |
| SWS | Stormwater Systems |

# LISTE DES ANNEXES

Annexe A  Montage du Laboratoire. Plan et Section.....80

Annexe B  Montage du Laboratoire. Isométrique.....81

Annexe C Équations pour obtenir les graphiques du *flow number* dans une conduite circulaire..82

Annexe D Estimations d'entrée (tensions) pour calculer la grandeur à mesurer (hauteur) .....90

# CHAPITRE 1 INTRODUCTION

Les réseaux de drainage des eaux pluviales urbaines sont conçus pour capter, transporter et évacuer les eaux de ruissellement. Les conduites du réseau de drainage sont dimensionnées en fonction des conditions spécifiques de conception telles que le type de recouvrement des sols (rugosité), la taille de la surface collectée et les caractéristiques de la pluviométrie de la région, de plus, il est primordiale de connaître la pente du terrain, la configuration des besoins en drainage et les règles ou normes qui s'appliquent à la conception (Brière, 2012). Le système de drainage des eaux pluviales est fondamental pour maintenir la santé publique, réduire l'impact des inondations dans la vie humaine et les biens matériels et aussi pour protéger l'environnement (Butler & Davies, 2004). Cependant, si les conditions de conception sont modifiées, le fonctionnement hydraulique des conduites qui composent le système de drainage des eaux pluviales est altéré (Brière, 2012).

Les conditions de conception peuvent être altérées par des événements telles que des tempêtes qui surpassent la capacité des conduites, une réduction ou blocage des tuyaux, des inondations ou une panne des équipements de pompage (Li & McCorquodale, 1999). L'accroissement de la surface urbanisée dans un territoire modifie l'imperméabilité de la surface, réduisant ainsi la quantité d'eau qui s'infiltre dans le terrain et par conséquent augmente le débit de ruissellement qui entre dans le réseau de drainage (Brière, 2012). Le développement urbain entraîne une augmentation du ruissellement due à des changements dans des conditions initiales qui augmentent la vitesse du ruissellement, affectant ainsi le temps de réponse hydrologique qui augmente les débits de point, de plus, les épisodes de pluie deviennent plus fréquents entraînant une plus grande récurrence des inondations (MDDEFP, 2011). La conduite devient également pressurisée si la durée de la crue est suffisamment prolongée, si un barrage est brisé ou bien si le niveau d'un plan d'eau monte soudainement (Chaudhry, 2014). Les villes dotées de réseaux unitaires ou de réseaux pseudo-séparatifs acheminent l'eau du réseau de drainage vers une station d´épuration. Donc si la capacité de l'usine est dépassée, les conduites peuvent se retrouver sous pression (Guo & Song, 1990). Les évènements exceptionnels, comme la fonte de neige à court terme avec des pluies importantes peuvent également pressuriser les conduites (MDDEFP, 2011).

Ces événements provoquent l'augmentation de la quantité d'eau entrant dans le système de drainage urbain. L'accroissement du débit peut causer le dépassement de la capacité de la conduite

ou, autrement dit, sa mise en charge (Brière, 2012). La mise en charge de la conduite est une circonstance qui transforme l'écoulement à surface libre en écoulement sous pression dans la conduite, révélant un phénomène appelé « écoulement transitoire » (Fuamba, 2002) ou écoulement mixte (Cardle, J. A., 1984).

Chaudhry (2014) définit l'état d'écoulement transitoire comme l'étape au cours de laquelle le débit permanent passe d'un état à un autre; autrement dit, lorsque les conditions d'écoulement permanent sont modifiées. Wylie et Streeter (1978) indiquent que l'écoulement transitoire est un terme qui décrit le flux non permanent dans une conduite, dans laquelle l'état d'un écoulement permanent a été perturbé à cause de la modification des conditions aux limites.

Le développement des écoulements transitoires comporte quatre étapes et reproduit deux phases : la première étape commence par un écoulement uniforme à surface libre où le débit et le niveau d'eau dans la conduite augmentent tranquillement. Pendant la deuxième étape, la conduite est sur le point de se remplir, un front d'eau de pressurisation (PWF) ou interface se crée immédiatement et pousse l'air emprisonné. Ces deux étapes comportent la première phase où l'écoulement passe d'un régime à surface libre vers un régime pressurisé. Dans la troisième étape, l'eau a déplacé l'air et la conduite est sous pression. La dernière étape se produit quand le débit diminue et la conduite commence un processus de vidange ; donc le niveau d'eau baisse et en conséquence, un front d'onde de dépressurisation (DWF) ou cavité avance jusqu'à ce que la conduite passe à un régime d'écoulement à surface libre. Les deux dernières étapes composent la deuxième phase où l'écoulement passe d'un régime pressurisé vers un régime à surface libre (Fuamba, 2002).

## 1.1 Objectifs

L'étude se concentre sur les analyses expérimentales des écoulements transitoires qui se produisent dans les systèmes de drainage urbain (SWS en anglais) en raison des perturbations liées aux blocages soudain de l'eau et à la diminution du débit. Ces perturbations produisent des fronts d'ondes qui se déplacent en amont ou en aval et provoquent des problèmes tels que la pressurisation, la dépressurisation et les poches d'air emprisonnées.

Cette recherche sera décomposée en trois étapes principales. L'objectif final de l'investigation sera de produire des données utilisables pour développer des modèles mathématiques et informatiques. En outre, de détails sur les écoulements transitoires seront fournies davantage afin de clarifier ce

phénomène. Ainsi, les chercheurs seront orientés vers des solutions qui peuvent répondre aux préoccupations des gestionnaires et des concepteurs d'infrastructures de drainage urbain et conduire à des descriptions approfondies et des solutions possibles pour les processus pertinents dans les SWS.

- Examiner expérimentalement le front d'onde de dépressurisation (DWF en anglais) d'un écoulement transitoire, pendant le processus de vidange, dans une conduite circulaire fermée à pente horizontale et l'impact du débit sur ce processus. Le but de cette étude est de compléter davantage les travaux expérimentaux précédents et d'apporter plus de détails sur les variables pertinentes telles que la célérité, la profondeur d'eau et la pression dans la cavité d'air.
- Observer expérimentalement un écoulement transitoire partiellement sous pression dans une conduite circulaire fermée avec une pente horizontale dans lequel l'extrémité aval sera bloquée et une poche d'air est attrapée. Le but de cette expérience est de fournir des données pertinentes pour calculer et calibrer un nouveau facteur de frottement instable à ajouter au facteur de Darcy-Weisbach, où l'impact de la poche d'air emprisonné est avéré. De plus, l'expérience contribuera à l'analyse de la poche d'air pendant le processus du remplissage des conduites dans les SWS.
- Apporter des données pertinentes, basées sur des résultats expérimentaux d'écoulements transitoires pour les phénomènes de poche d'air emprisonnée et pour le processus de vidange d'une conduite circulaire avec une pente horizontale. Ces données seront utiles pour enrichir les bases de données et permettront également la validation des modèles numériques actuellement développés et ceux à venir.

# CHAPITRE 2 REVUE CRITIQUE DE LA LITTÉRATURE

## 2.1 Écoulement transitoire

Les écoulements transitoires ont été classifiés selon le type de courant d'eau perturbé, comme suit : les flux dans des conduites fermées, par exemple les systèmes qui fonctionnent sous pression; les courants d'eau de surface libre comme les canaux; et les écoulements mixtes qui passent de surface libre à sous pression et vice versa, situation pouvant survenir dans les systèmes du drainage urbain ou dans les tunnels hydroélectriques (Chaudhry, 2014).

Les fluctuations de pression rapides qui se déplacent sous la forme des ondes dans une conduite fermée, provoquées par le changement brusque des conditions du flux, est un phénomène connu sous le nom de coup de bélier (« *water hammer »* en Anglais). Ce phénomène transitoire peut avoir des origines diverses, par exemple la fermeture ou l'ouverture rapide d'une vanne en aval d'une canalisation sous pression, une pompe qui démarre ou arrêt, le fonctionnement défectueuse d'un système (Zhang et al., 2018) ou le changement de la demande d'un turbine ou du niveau d'un réservoir (Wylie & Streeter, 1978). Le coup de bélier est un phénomène transitoire susceptible d'engendrer des fortes variations de pression, former des cavités, créer des vibrations dans le fluide et les structures, et provoquer des oscillations (Bergant et al., 2006) qui à leur tour peuvent provoquer des incidents tels que l'éclatement, l'affaissement ou l'endommagement des conduites forcées, vannes, turbines, corps des pompes et autres équipements, en plus des inondations (Chaudhry, 2014). Ce type d'écoulement transitoire est un facteur important dans le design des systèmes hydrauliques qui sont présents dans les centrales hydroélectriques, les automobiles, les réseaux d'alimentation d'eau, les lignes pour le transport des fluides, les pompes, les valves et les systèmes de contrôle (Ghidaoui, M. et al.,2005).

Dans un système qui devient pressurisé à cause de l'augmentation du niveau d'eau, le déplacement des cavités d'air qui séparent le régime pressurisé du régime à surface libre peut aussi engendrer des pressions importantes de coup de bélier (Song et al., 1983).

Le changement de comportement de l'eau lors des transitions d'un écoulement à surface libre à sous pression et d'un écoulement sous pression vers un régime à surface libre a été l'origine de problèmes différents et variés dans les réseaux de drainage pluvial. Les écoulements transitoires peuvent être à l'origine de flux très dynamiques pouvant générer des pressions et des vitesses très

importantes au-delà des valeurs admissibles, ce qui peut endommager les structures hydrauliques. Pour résoudre ce type de problèmes, les concepteurs des infrastructures ont opté pour des solutions telles que le surdimensionnement des structures hydrauliques, augmentant ainsi les couts de construction (Cardle, J. A., 1984).

Des événements majeurs ont également été rapportés dans la littérature à cause des écoulements transitoires, comme l'éclatement d'une grosse conduite à la ville de Mexico, en raison des fortes oscillations de pression causées par un remplissage rapide de la conduite et la fuite soudaine d'air par un regard. Les conséquences de cet incident comprenaient le déplacement des personnes, la destruction des biens matériels et la mort d'habitants (Pozos-Estrada et al., 2015).

L'air attrapé dans une conduite du réseau urbain libéré à haut fréquences d'oscillation est susceptible de créer un jet d'air et eau de grande vitesse appelé « geyser ». Le jet a le potentiel d'engendrer des dommages physiques et d'avoir un impact négatif sur l'environnement (Leon et al., 2019). Le développement des geysers a été rapporté par de chercheurs dans de villes comme Amhersburg 1980 (Hamam & McCorquodale, 1982), Edmonton 1995 (Zhou, F. et al. 2002(a)), Minneapolis 1997 (Wright et al., 2011), Minnesota 1999 (Leon et al., 2019), Montréal 2010 et 2011 (Bousso & Fuamba, 2014).

Les cycles de remplissage et de vidange des conduites sont susceptibles de provoquer des problèmes supplémentaires dans les réseaux de drainage urbain. Durant les périodes d'écoulement sous pression ou à cause des vibrations induites par le mouvement de l'air, les joints ou les raccordements de la canalisation peuvent perdre leur étanchéité en augmentant l'infiltration/exfiltration, ces situations sont liées à l'effondrement des tuyaux, aux dommages des infrastructures avoisinantes telles que les conduites ou les routes, et au risque de contamination de la nappe phréatique. Les changements du régime hydraulique et les vibrations peuvent occasionner des fissures, des fractures, des bris ou des trous qui déclenchent le lessivage du sol autour de la canalisation et des vides, provoquant des refoulements, des effondrements de chaussée et la détérioration d'autres infrastructures. L'infiltration ou les fractures peuvent provoquer des déformations qui rendent les tuyaux inefficaces et conduisent à une capacité hydraulique réduite, blocage, entretien accru ou effondrement. Les cycles d'infiltration/exfiltration constituent également un risque d'effondrement des canalisations en matériel sujet à l'érosion en raison de la perte de support latéral dans les parois des conduits (CERIU, 2012). Plusieurs de ces situations ont

une forte probabilité de réduire la capacité et l'efficacité hydraulique des canalisations, provoquant des inondations qui causent des dommages aux biens publics et privés, affectant également les réseaux routiers, l'économie directement et indirectement, et le développent social (Schmitt et al., 2004).

Plusieurs chercheurs se sont concentrés sur l'étude expérimentale des écoulements transitoires afin d'approfondir la connaissance du phénomène et trouver ainsi des solutions permettant d'éliminer ou de réduire les impacts que ces types des écoulements représentent. Les résultats expérimentaux des études des écoulements mixtes ont également permis d'augmenter les bases de données sur lesquelles les chercheurs, qui travaillent dans le domaine théorique, ont développé et amélioré des modèles mathématiques qui tentent de simuler et de prédire le comportement du phénomène.

Les écoulements transitoires, dans lesquels se produisent des coups de bélier, ont été largement étudiés (Bergant, A. et al., 2004), (Ghidaoui et al., 2005). Plusieurs chercheurs ont développé des expressions pour décrire ces phénomènes, basés sur des études théoriques et expérimentales. Les équations comprennent un terme qui exprime la perte de charge par le frottement en écoulement permanent et un terme pour le frottement en écoulement non permanent. Les développements mathématiques, nommés modèles de frottement (*friction models* en Anglais), les plus étudiés sont les modèles de frottement quasi-permanents (Adamkowski & Lewandowski, 2006) et les modèles de frottement non permanent. Les modèles non permanents les plus connus sont le modèle Zielke (Zielke, 1968), l'approche de Trikha (1975), le modèle à deux couches (Vardy & Brown, 2003), le modèle de Zarzycki (Urbanowicz et al., 2012) et le modèle k (Brunone et al., 2004).

Les transitions d'un écoulement à surface libre vers un écoulement sous pression ont été étudiées sous différents points de vue par des chercheurs. Hamam et McCorquodale (1982) ont constaté que, pendant la transition vers un débit sous pression, la pression instantanée peut surmonter la ligne piézométrique de plusieurs fois le diamètre de la conduite et aussi que divers facteurs tels que les caractéristiques de la conduite, la vitesse et la hauteur de l'eau et les conditions aux limites affectent les oscillations de la pression.

Selon Cardle, J. et al., (1989), la pressurisation de la canalisation est accompagnée par une onde qui se déplace vers la région d'écoulement à surface libre. De plus, des pressions de coup de bélier peuvent se produire pendant le phénomène. Les expériences de Li et McCorquodale (1999) ont montré qu'un niveau d'eau plus élevé pendant les conditions initiales, autrement dit un débit à

surface libre plus élevé dans la conduite, subit des variations de pression plus importantes lors du passage à l'écoulement pressurisé. Guizani et al., (2006) ont observé que la forme de la cavité formée durant la pressurisation d'une conduite était similaire au front d'onde d'une rupture de barrage. D'après les expériences de pressurisation de Bousso et Fuamba (2014), dans un système avec un réservoir en amont relié à une conduite inclinée, la forme et la vitesse de l'onde de pressurisation sont liées au niveau de l'eau dans le réservoir en amont et à la pente de la conduite.

Les études expérimentales des geysers de plusieurs chercheurs ont apporté diverses connaissances sur le phénomène. Par exemple, Guo et Song (1990) indiquent que les geysers sont fréquemment causés par la pressurisation de la conduite, que l'eau sous la cavité d'air se déplace souvent dans la direction opposée au front d'onde, et qu'un ressaut hydraulique mobile est également créé au cours du processus. Les données de terrain prises par Wright et al. (2011), les ont conduits à la conclusion que les geysers sont formés par l'action réciproque de l'eau et de l'air attrapé dans les regards (structures verticales) lorsque la pression augmente. Les expériences de Huang et al. (2016) ont montré que pendant un remplissage rapide, trois types de geysers peuvent être développés et que l'intensité dépend du mélange air/eau et les auteurs ont conclu que ce phénomène était lié aux chutes de pression sur laquelle l'air joue un rôle importante. Récemment, les résultats des tests sur geysers violents développés par Leon et al. (2019) ont indiqué que la hauteur développée est liée au mouvement de la masse d'air et à la taille de l'orifice de sortie du mélange air/eau.

## 2.2 Processus de vidange

Après la troisième étape du développement d'un écoulement transitoire, comme cela a été déjà mentionné précédemment, le débit diminue et le niveau d'eau baisse dans la conduite, cédant la place à un processus de vidange qui favorise la création d'un front d'onde de dépressurisation (DWF) ou cavité d'air qui avance à travers la conduite. Le processus de vidange dans un réseau de drainage urbain peut être généré par la fin ou la réduction d'un événement pluvieux, par le déblocage de la conduite, par le drainage de l'eau d'inondation, par la descente de l'eau au bout de la conduite ou par la libération de la pression par des moyens mécaniques dans la conduite. D'autres réseaux hydrauliques commencent un processus de vidange après l'ouverture soudaine d'une vanne (Reichstetter & Chanson, 2013), après l'arrêt d'une pompe ou une turbine (Chaudhry, 2014), lors des manœuvres opérationnelles dans les réseaux d'eau potable ou les réseaux sous pression (Coronado-Hernández et al., 2017), ou par la rupture d'une conduite sous pression.

Le processus de vidange crée éventuellement des pressions négatives lorsque la conduite ne comporte pas des protections ou que celles-ci ne sont pas bien dimensionnées, ce phénomène provoque l'effondrement de la conduite (Coronado-Hernández et al., 2017), des dommages aux mécanismes de protection ou affecte les raccords ou les vannes (Coronado-Hernández et al., 2018). De plus, les pression négatives ont un impact sur les joints défectueux, en augmentant la quantité d'air qui s'infiltre dans la conduite (Besharat et al., 2018).

Bien que le processus de vidange soit susceptible de produire des écoulements transitoires qui occasionnent des problèmes dans les réseaux de drainage urbain, les chercheurs ont privilégié l'étude du processus de remplissage des conduits (Fuertes-Miquel et al., 2019). Cependant, le processus de vidange et la dynamique de la cavité d'air dans les fronts d'onde de dépressurisation (DWF) ont attiré l'attention de certains auteurs qui ont mené des investigations théoriques et développé des modèles numériques qui ont également été testés en laboratoire, qui ont produit des résultats probants.

Zukoski (1966) a mesuré la vitesse de la cavité d'air lorsque des conduites fermées, de différents diamètres, matériaux et inclinations, se sont vidées d'eau et d'autres liquides. L'auteur a indiqué que la tension de surface augmente si le diamètre de la conduite diminue. Ses expériences ont montré que le taux de propagation de la cavité d'air ($w_b$) était indépendant des effets visqueux si le nombre de Reynolds était majeur que 200 (Re > 200). Le $w_b$ augmentait également lorsque la tension de surface (Σ) diminuait et a atteint sa valeur maximale lorsque l'inclinaison de la conduite a atteint 45° et la tension de surface était $\Sigma < 0.1$, en d'autres termes, lorsque le diamètre de la conduite était supérieur à 2.16 cm (D > 2.16 cm.). Finalement les résultats ont montré qu'une pente horizontale de la canalisation avait un effet négligeable sur le $w_b$.

Benjamin (1968) a analysé théoriquement un écoulement permanent où un liquide remplit une conduite de hauteur *d* en amont et devient un écoulement à surface libre et uniforme en aval, avec une hauteur *h*. Il a indiqué que cet écoulement peut être comparé avec l'intrusion produit dans une boite rectangulaire pleine d'eau qui est soudainement ouverte à une extrémité. L'analyse théorique présente des formules et des graphiques qui permettent de calculer des paramètres tels que la vitesse non dimensionnelle en amont de la cavité ou *flow number* ($f = c_1/\sqrt{(gd)}$) et l'écoulement non dimensionnel $\left(Q/\sqrt{(gd^3)}\right)$, en fonction de la hauteur d'eau en aval de la cavité $(h/d)$ pour une canalisation rectangulaire. Le chercheur a obtenu également la hauteur d'eau en aval pour laquelle

l´écoulement est permanent et exempt de dissipation d'énergie $(h/d = 0.5)$. Par la suite, l'auteur a analysé le cas d'une conduite circulaire et a obtenu des expressions pour calculer la quantité de mouvement en amont, en aval et le *flow number*. Cependant, les équations développées ont tenu compte de l'angle $(\alpha)$ qui se forme entre le vertical et le rayon vers la surface libre, ainsi pour un écoulement permanent et sans dissipation d'énergie l'angle calculé était $\alpha = 82.78°$, en conséquence, cette valeur doit être transformée pour obtenir la hauteur de l'eau en aval, qui corresponde à $h/d = 0.563$. Le cas d'une conduite circulaire ne dispose pas des graphiques qui permettent d'obtenir le *flow number* pour différentes hauteurs d'eau. Pour cette raison, dans le cadre de la présente recherche, l'Annexe C contient les équations qui ont été développées pour une conduite circulaire en fonction de l'angle $\alpha$, afin d'obtenir la hauteur de l'eau et ainsi dessiner le graphique de $f\ vs\ h/d$ ($f$ en fonction de $h/d$). Également, dans la même annexe, des équations ont été développées pour représenter graphiquement $f\ vs\ h/d$, mais en utilisant la hauteur de l'eau comme la seule variable $(h/d)$, sans avoir besoin de l'angle $(\alpha)$.

Alves et al. (1993) ont obtenu des expressions mathématiques pour appliquer l'approche de Benjamin (1968) aux conduites circulaires inclinées. À l'aide des tests dans des tubes transparents ($D$=5.10cm), il a observé que la vitesse de la bulle d'air est plus élevée lorsque que l'angle de la conduite augmente jusqu'à 40°, comme l'indiquait Zukoski (1966). De plus, les résultats théoriques de la vitesse de la bulle d'air $\left(f = c_1/\sqrt{(gd)} = 0.542\right)$ et de la hauteur de l'eau $(h/d = 0.563)$ étaient les mêmes que ceux obtenus de Benjamin (1968) pour une conduite horizontale.

Montes (1997) a étudié la cavité d'air théoriquement et expérimentalement dans une conduite circulaire ($D$=44mm) et horizontale en utilisant des écoulements permanents qui étaient réduits par étape afin de vérifier les caractéristiques de la cavité stagnante. L'auteur a observé que l'air commençait à pénétrer dans la conduite lorsque $f \cong 1.0$. Il a en outre déclaré que la cavité d'air n'est plus pas naissante si $f < 0.581$ et que lorsque l'eau atteint cette vitesse, la tête de la cavité d'air était à une distance $x/D \geq 3.0$ de l'extrémité en aval de la conduite. Le chercheur a également observé que l'intrusion d'air était un demi-cercle qui se transforme en une section du flux presque horizontale, laquelle termine au point de la hauteur critique près de l'extrémité en aval du tube. L'analyse mathématique lui a permis d'obtenir des tableaux avec la valeur du *flow number* pour différentes hauteurs d'eau en aval de la cavité $(h/d)$ pour les cas des conduites rectangulaires et circulaires. Il suppose que la pression à l'intérieur de la cavité d'air est atmosphérique. Les résultats

des calculs de Montes et de Benjamin pour une conduite circulaire sont inclus sur le même graphique $f\ vs\ h/d$ dans l'Annexe C où il est évident que les valeurs correspondent.

Hager (1999) a également développé des expériences dans une conduite circulaire (*D*=240mm) et horizontale en utilisant des écoulements permanents et réduites par étapes. Il a indiqué que l'intrusion d'air à une distance $x/D \leq 3.0$ de l'extrémité en aval est une cavité naissante, mais si $x/D > 3.0$ donc la cavité est long. L'auteur a en outre observé que l'intrusion d'air apparaît lorsque le flux est $f \cong 1.15$ et ajoute que la hauteur moyenne expérimentale du niveau d'eau en aval de la cavité est $h/d = 0.63$ pour différents *flow numbers*.

Vasconcelos et Wright (2008) ont développé des expériences dans un montage de laboratoire qui comptait un réservoir en amont d'une conduite circulaire et horizontale où les conditions initiales comprenait un débit nul et la cavité a été créée après la libération soudaine de l'eau stockée. Les résultats ont montré que la hauteur de l'eau en aval de la cavité était environ égale à la moitié du diamètre de la conduite ($h/d \approx 0.50$) et que le gradient de pression entre le réservoir et la décharge pouvait déterminer un écoulement sous pression tout au long de la conduite. L'auteur indique que la pression devient atmosphérique après l'arrive de l'intrusion, en d'autres termes, la pression à l'intérieur de la cavité était nulle.

La vidange d'une conduite circulaire (*D*=250mm), initialement remplie, au moyen d'une vanne en bout du système, dont l'eau est poussée par l'air sous pression, a été analysée en laboratoire par Laanearu et al. (2012). D'une part, ses expériences ont montré que lors de la vidange de la conduite, le débit changeait son accélération, c'est-à-dire que le régime devenait non permanent. D'autre part, les résultats ont montré que des paramètres tels que la pression et l'inertie de l'eau ont subi des variations. Dans la même configuration de laboratoire, Tijsseling, A. et al. (2015) ont observé que, pendant le processus de vidange forcé par l'air, 90% de l'eau sortait de la conduite comme une colonne et 10% sortait combinée avec de l'air.

Les expériences impliquant la vidange d'une canalisation réalisées dans le laboratoire de Polytechnique Montréal par Bousso et al. (2014) comportaient un réservoir en amont relié à une conduite circulaire avec des différentes pentes. Les conditions initiales étaient d'écoulement permanent et la cavité d'air a été créée lorsque la vanne en aval était ouverte et la vanne en amont fermée. Les résultats ont montré que le processus de vidange présentait un écoulement permanent, une célérité d'onde constante et un niveau d'eau stable en aval de la cavité ($h/d \approx 0.50$). Les

expériences ont également montré que la pression mesurée en amont de la cavité était positive, mais que lorsque l'onde arrivait, la pression devenait nulle à l'intérieur de la cavité. La pente de la conduite a très légèrement affecté le comportement de la cavité.

Des expériences de laboratoire sur la cavité d'air, durant le processus de vidange rapide dans un tube horizontal ($D$=0.05m.) avec un déversoir à l'extrémité aval du conduit, ont été menées par Bashiri-Atrabi et al. (2016). Les auteurs ont constaté que la présence du déversoir provoquait des turbulences et augmentait le niveau d'eau dans la section de surface libre en aval de la cavité.

La vidange des conduites circulaires (D=63mm) inclinées avec une poche d'air dans la partie la plus haut du système a été également analysé expérimentalement. Lorsqu'il existe une soupape de décharge dans la partie la plus haut du système, Coronado-Hernández, O. E. et al. (2017) ont montré que la pression dans la poche d'air a diminué jusqu'à atteindre des valeurs négatives, puis a augmenté pour atteindre la pression atmosphérique. Parallèlement, la vitesse de l'eau a augmenté jusqu'à atteindre un maximum puis a diminué lentement jusqu'à la fin du processus. Sans le système de soulagement, Coronado-Hernández, O. E. et al. (2018) indiquent que la pression et la vitesse ont diminué avec des oscillations jusqu'à zéro. Les auteurs ont noté que lorsque la poche d'air était plus petite, la pression négative atteinte était plus faible.

## 2.3 Air emprisonné

Des perturbations qui changent les conditions initiales du drainage peuvent affecter les écoulements permanents dans les réseaux de drainage urbain, provoquant le passage d'écoulement à surface libre à un écoulement sous pression et en conséquence l'air peut être emprisonné dans la conduite. L'air est également susceptible d'être emprisonné de diverses autres manières dans les conduites comme par des équipements mécaniques pouvant injecter de l'air, des soupapes brise-vide qui permettent l'entrée d'air ou de bulles accumulées à cause d'un jet d'eau (Pozos et al., 2010). L'air est aussi attrapé dans une conduite lorsque la différence de vitesse entre l'air et l'eau crée des vagues instables qui bloquent la sortie de l'air, en raison d'une pauvre ventilation qui empêche la sortie de l'air de la conduite, favorisant la formation des poches d'air (Vasconcelos & Wright, 2006) ainsi qu'une conséquence du remplissage rapide des conduits fermés (Vasconcelos, J. G. et al., 2011). L'air est également emprisonné devant des ondes de pressurisation qui avancent vers l'amont, lorsque la conduite se remplit et que l'écoulement subit une inversion de sens (Zhou et al., 2002(a)).

La chute de pression en dessous de la pression de vapeur provoque la formation et la croissance des cavités d'air dans un liquide, ceci est occasionné par la fermeture rapide d'une vanne à l'extrémité amont ou aval d'une conduite, ou par l'ouverture rapide d'une vanne amont. La croissance ou l'explosion de ces cavités augmente la pression et peut provoquer des dommages dans les conduites (Chaudhry, 2014).

Les cavités d'air dans les conduites des réseaux du drainage urbain provoquent des situations complexes et variées telles que des oscillations, des dommages structurels, des ressauts hydrauliques et la diminution de la section hydraulique qui provoque l'augmentation des pertes de charge dans les canalisations (Pozos et al., 2010).

La compression de l'air emprisonné peut occasionner des pressions excessives dans les conduites (Vasconcelos & Leite, 2012), lesquelles provoquent des inondations, des dommages structurels dans les regards et des débits inverses dans les conduits (Zhou et al., 2002(a)).

Dans des réservoirs souterrains, utilisés par certaines villes pour collecter les eaux de pluie afin de soulager le système de drainage urbaine lors de fortes tempêtes, les poches d'air se créent lorsque les conduits se remplissent rapidement, générant des fortes surpressions qui sont dangereuses, et provoquent des dommages aux structures, perte de la capacité de stockage et geysers (Chosie & Vasconcelos, 2013).

Chaudhry (2014) indique que l'air libre qui se trouve dans une masse d'eau en mouvement augmente sa compressibilité et qu'une partie d'air dans 10000 parties de volume d'eau est capable de réduire de moitié environ la vitesse de propagation des ondes dans un liquide lors d'un changement brusque de régime.

L'air dans les conduites du système de drainage urbain est un phénomène qui a suscité la curiosité de plusieurs chercheurs et a été la source de plusieurs recherches aux niveaux théorique et expérimental.

Á cet égard, les tests effectués par Li et McCorquodale (1999) ont montré que l'écoulement était ralenti lorsque le mouvement de l'eau en aval de la conduite était interrompu, générant une pression élevée à basse fréquence, puis que l'air attrapé sortait par l'extrémité en amont produisant une basse pression à haute fréquence. De plus, les pressions étaient plus élevées lorsque le débit était lui aussi plus grand.

Vasconcelos, Jose G. et Wright, Steven J. (2003a); (2003b); (2005) ont développé des expériences pour comprendre le rôle de différents paramètres du design, tel que l'hydrogramme de ruissellement, le niveau initial d'eau et la pente de la conduite, ceci afin de déterminer l'ampleur des surpressions. Ils ont trouvé que des mauvaises conditions d'aération impliquent que la pression de l'air change de manière significative à mesure que le front d'onde avance. Ils ont également observé que le pic de pression augmente si le débit augmente aussi.

Zhou, F., et al. (2002(a); 2002(b)), ont détecté trois types de comportements lors du remplissage rapide d'une conduite avec un orifice de taille différent à l'extrémité : un petit orifice (volume élevé d'air emprisonné) a provoqué une pression haute de coup bélier et une longue période d'oscillation ; un orifice grand (faible volume d'air emprisonné) a induit la réduction de la pression et un orifice de taille intermédiaire a induit une longue période des oscillations suivie d'une courte période. Vasconcelos et Leite (2012), dans un système de réservoir-conduite avec une vanne à l'extrémité de la conduction, ont constaté que la fermeture totale a provoqué un pic de haute pression, des pressures négatives et des oscillations, tandis que la fermeture partielle a entraîné la réduction des pics de pression et la réduction des oscillations, sans pressions négatives. Les résultats présentés par Hatcher, T., et al. (2015), dans le même montage de laboratoire, ont montré que l'augmentation du volume d'air emprisonné a induit la réduction du premier pic de pression et la réduction des oscillations.

Hatcher et al. (2017) ont mené des études expérimentales afin d'analyser l'effet de la géométrie du conduit, le débit et la taille du poche d'air sur les pics de surpression lors de la fermeture d'une vanne en aval du conduit.

# CHAPITRE 3 DÉMARCHE DE L'ENSEMBLE DU TRAVAIL DE RECHERCHE ET ORGANISATION GÉNÉRALE DU DOCUMENT INDIQUANT LA COHÉRENCE DES ARTICLES PAR RAPPORT AUX OBJECTIFS DE LA RECHERCHE

## 3.1 Méthodologie

Les essais ont été réalisés dans le laboratoire d'hydraulique du Polytechnique de Montréal. Le montage était composé d'un réservoir d'alimentation principal, un réservoir initial (R1) cuboïde avec des dimensions de 1.01 m. × 1.01 m. × 1.04 m (largeur × longueur × hauteur), un réservoir intermédiaire (R3) cylindrique de 0.355 m. × 1.775 m. (Diamètre × hauteur), et un réservoir final (R4) cuboïde 1.01 m. × 1.01 m. × 1.50 m (largeur × longueur × hauteur), après quoi l'eau quitte le système. Chacun des trois réservoirs possèdent un tuyau transparent vertical où il est possible de mesurer le niveau à l'intérieur. Il y avait aussi une conduite (C1) reliant R1 et R3 et une conduite (C2) de raccordement R3 et R4. La sortie du réservoir principal était contrôlée par une vanne OS&Y (VC-R) et l'entrée d'eau au R1 était contrôlée par une vanne à boisseau (Va1). L'ensemble comprend les vannes (V1 et V2) en amont et en aval de C1 et les vannes (V3 et V4) en amont et en aval de C2.

La conduite C1 était en PVC-Sch 40 transparent DN=100mm et longueur L=5.12 m., dont la pente était horizontale, la conduite C2 était aussi en PVC-Sch 40 transparent, mais le DN=150mm. Le montage comprenait également six capteurs de pression dans la conduite, dont quatre était Omega type PX409-2.5G5V, dont la précision est de 0.08%, un Hoskin type P9-1H1-DNIC0-3PSI-15V, de précision 0.5%, et un type AB (P) 15V, de précision 0.4%. Un débitmètre électromagnétique (DME) arkon type MAG910E, avec une précision de 1.0%, a été installé en amont du réservoir R1 et deux débitmètres ultrasoniques (DMU1 et DMU2) Hedland type HTTF, avec une précision de 1.0%, en amont et en aval de la conduite C1. Les plans du montage du laboratoire en plan/coupe et isométrique, où les expériences ont été réalisées, sont montrés en détail dans les Annexes A et B respectivement.

Les tests ont été enregistrés par une caméra vidéo à haut vitesse SVSi StreamView-LR, 60 images par seconde (ips), résolution de 1280x1024 pixels et une caméra vidéo SONY Cyber-shot DSC-RX100M5, 30 ips, résolution de 1920x1080 pixels. Une troisième caméra (Cam3), 30 ips, a été

installée en aval de la conduite C1 afin de mesurer le temps de fermeture de la valve V2, pour les expériences impliquant l'analyse de la poche d'air.

Les données des capteurs de pression ont été collectées sur deux cartes d'acquisition de données accessibles à l'aide du logiciel d'application de tests, de mesure et de contrôle LabVIEW de l'entreprise National Instruments. Le logiciel LabView a été configuré pour mesurer 500 données de pression par second à partir des capteurs, ce qui signifie une donnée de pression chaque 0.002 seconds.

La conduite était fixée au sol par des supports métalliques dotés des mécanismes qui permettaient de changer le niveau afin d'ajuster la pente. La pente de la conduite a été vérifiée à l'aide d'un niveau numérique Mastercraft avec une précision de 0 à 90°= ±0.1°.

Un logiciel de dessin assisté par ordinateur (DAO) a été utilisé pour dessiner les profils de l'eau, produites dans la conduite par les phénomènes transitoires, à l'aide des images obtenues par des caméras vidéo. De plus, les données de laboratoire ont été analysées à l'aide des logiciels Excel et Matlab.

Deux phénomènes ont été analysés en laboratoire. Le premier était un écoulement transitoire produit par un processus de dépressurisation qui a eu lieu après le vidange d'une conduite circulaire rempli dans lequel l'écoulement initial était permanent. L'analyse de ce cas a été faite grâce à deux types d'expériences. La première expérience considère qu'il n'y a pas de flux dans la conduite car l'eau est stockée dans le système, puis une onde de dépressurisation s'est formée en aval de la conduite parce que l'eau a été libéré. La deuxième expérience commence avec un écoulement permanent dans une conduite pressurisée, ensuite le débit a été constamment réduit en raison de la fermeture de l'approvisionnement en eau en amont, ce processus de vidange a créé une cavité d'air qui s'est déplacé de l'aval vers l'amont de la conduite.

Le deuxième phénomène était un écoulement transitoire créé par un débit permanent dans une conduite circulaire partiellement remplie, où une poché d'air a été emprisonnée en raison d'une fermeture brusque en aval de la conduite.

Les tests réalisés pour les deux phénomènes (poche d'air et vidange) ont été exécutés pour différents débits et pour différents niveaux d'eau dans le réservoir R1. De plus, les tests pour chaque niveau d'eau ont été répétés au moins trois fois afin d'obtenir des résultats plus consistants.

Le montage du laboratoire a subi de subtiles modifications pour les deux phénomènes étudiés. Dans le cas de l'écoulement transitoire avec une poche d'air emprisonnée, le système a besoin de la vanne V2 à l'aval de la conduite C1 afin de piéger la poche d'air. Le capteur C1P5 était placé en avant de la vanne V2 afin de mesurer la pression dans la poche d'air emprisonnée après la fermeture de cette vanne. La Figure 3.1 montre un schéma du montage de laboratoire pour le cas de l'air emprisonné.

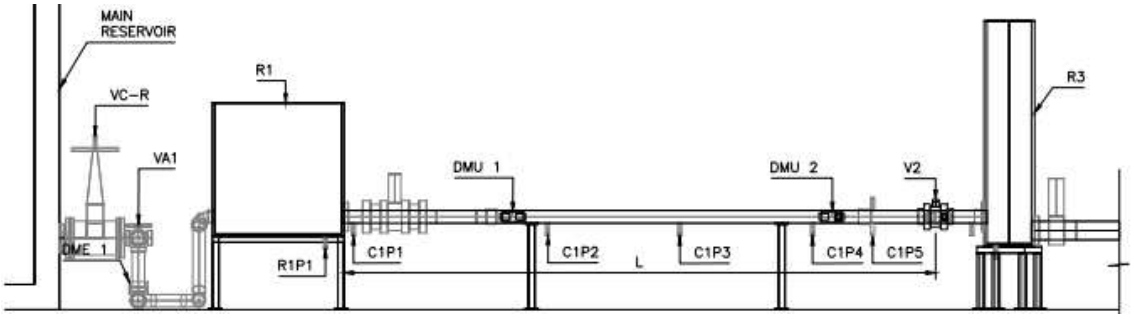



Figure 3.1 Schéma du montage de laboratoire pour l'analyse de l'air emprisonné

Pour l'analyse du DWF, la vanne V2 en aval de la conduite C1 a été retirée afin de réduire les pertes de charge, car cet élément n'était pas nécessaire pour ce type d'expérience. Dans ce dernier cas, le capteur de pression C1P5 a été placé près de l'extrémité aval de la conduite. La Figure 3.2 montre un schéma du montage de laboratoire pour le cas du processus de vidange.

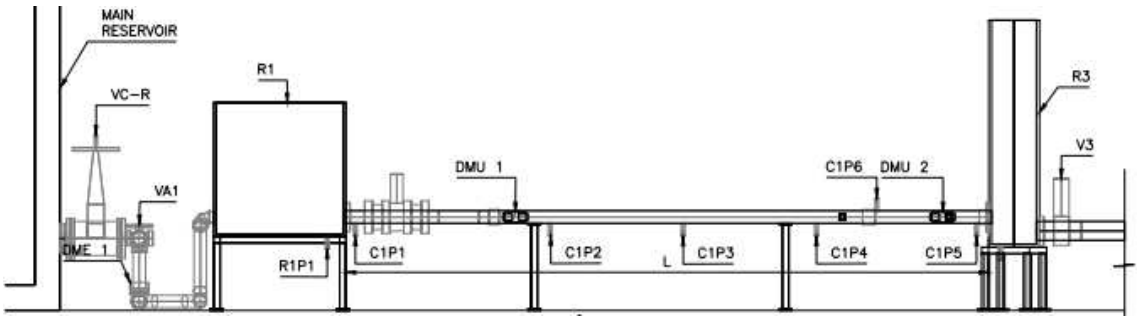
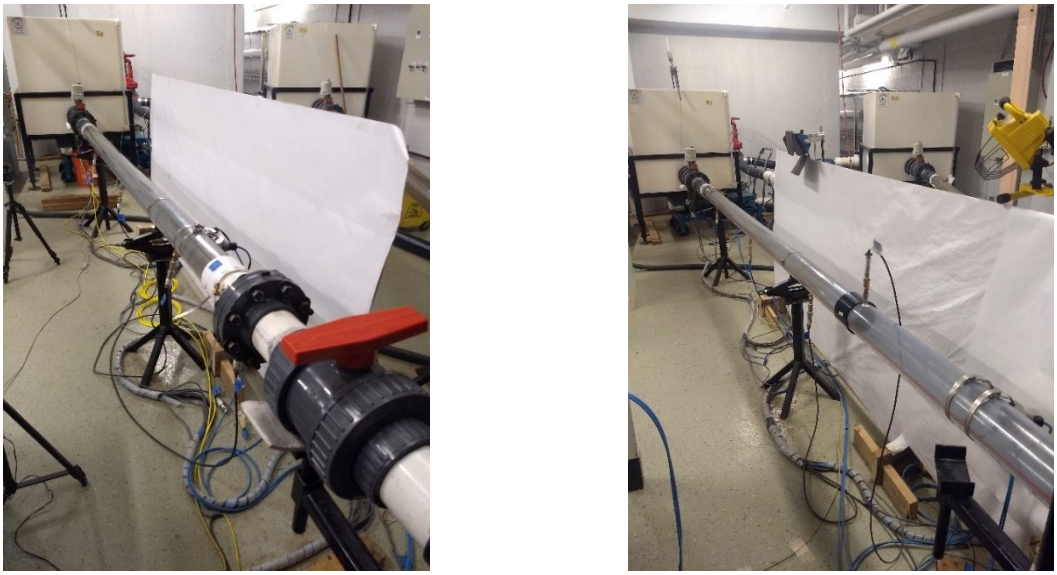



Figure 3.2 Schéma du montage de laboratoire pour l'analyse du processus de vidange

Des images avec la configuration du laboratoire pour chaque phénomène analysé sont affichées à la Figure 3.3.



a) b)

Figure 3.3 Photos du laboratoire. a) Air emprisonnée et b) Processus de vidange

### 3.1.1 Méthodologie pour le Front d'onde de dépressurisation (DWF)

L'étude du front d'onde de dépressurisation (DWF) dans une conduite circulaire fermée avec une pente horizontale a été réalisée avec de deux types d'expériences, la première sans écoulement à la condition initiale et la deuxième avec un débit permanent à la condition initiale. Les tests pour les deux types d'expériences ont été exécutés pour trois différents niveaux d'eau dans le réservoir R1, H/D=1.4, 1.5 et 1.8, où H était le niveau d'eau à partir de l'axe de la conduite et D le diamètre.

#### 3.1.1.1 Expériences type 1 (EXP1)

Les tests pour le premier cas ont été nommés EXP1 et ont commencé avec le système préalablement vide d'eau. Les vannes V1 et V2 étaient ouvertes afin de permettre le passage d'eau par le système tandis que la vanne V3 était fermée afin d'éviter la sortie de l'eau du système. La vanne Va1, qui contrôlait l'alimentation d'eau en amont de R1, a été ouverte jusqu'à obtenir le niveau d'eau souhaité dans le système. La condition initiale a été atteinte lorsque l'écoulement est stable dans la conduite C1, en conséquence l'eau était stockée dans le système, le niveau d'eau était le même dans les réservoirs R1 et R3 et le débit était nul dans la conduite C1. La Figure 3.4 montre un schéma du système dans la condition initiale de l'expérience EXP1.

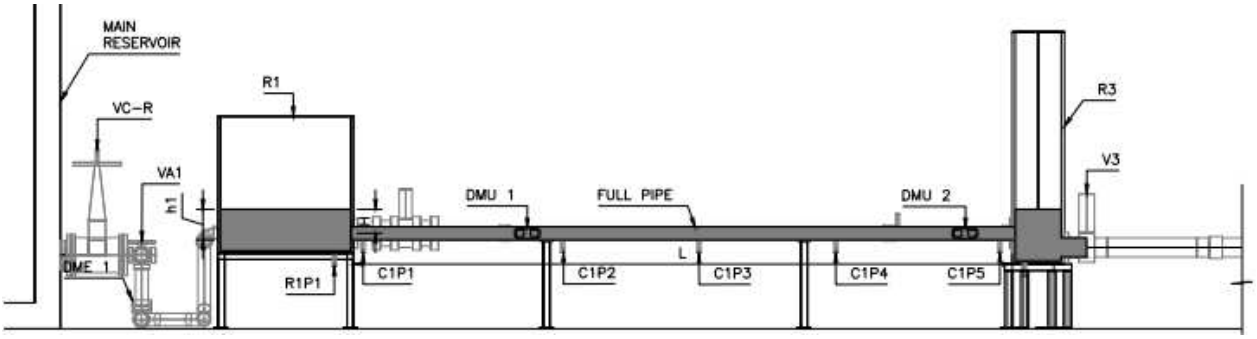



Figure 3.4 Condition initiale pour EXP1

Lorsque le débit était stable dans la conduite C1, les débitmètres (DME, DMU1 et DMU2), les capteurs de pression avec le logiciel LabVIEW et les caméras vidéo (haut vitesse et Sony) ont été initialisés afin d'obtenir des données dans la condition initiale. Le niveau d'eau a été mesuré dans le réservoir R1 avec l'aide du tuyau transparent.

Par la suite, la vanne V3 en aval du réservoir R3 a été ouverte rapidement et l'eau libérée a circulé par la conduite C2, en conséquence le niveau d'eau a baissé dans le réservoir R3 et l'air a commencé à entrer par l'extrémité en aval lorsque le liquide a atteint la couronne de la conduite C1. En même temps, la vanne Va1 a été ouverte afin d'alimenter le système et ainsi conserver le niveau d'eau dans le réservoir R1.

Finalement, lorsque l'écoulement était stable dans la conduite C1, grâce au débit d'alimentation, les appareils de mesure ont été arrêtés. Les données extraites pour analyses comprennent des vidéos, des courbes de débit et des courbes de pression dans le temps.

#### 3.1.1.2 Expériences type 2 (EXP2)

Les essais pour l'étude du DWF dans le cas d'un écoulement initial permanent ont été appelés EXP2 et ont débuté avec le système vide. Les vannes V1, V2 et V3 étaient ouvertes afin de permettre le passage d'eau par le système. La vanne Va1, qui contrôlait l'alimentation d'eau en amont de R1, a été ouverte jusqu'au obtenir un écoulement permanent dans la conduite C1. La condition initiale a été atteinte lorsque le débit était stable, l'eau pressurisait toute la conduite et était également au niveau sélectionné dans le réservoir R1. La Figure 3.5 montre un schéma du fonctionnement du système dans la condition initiale de l'expérience EXP2.

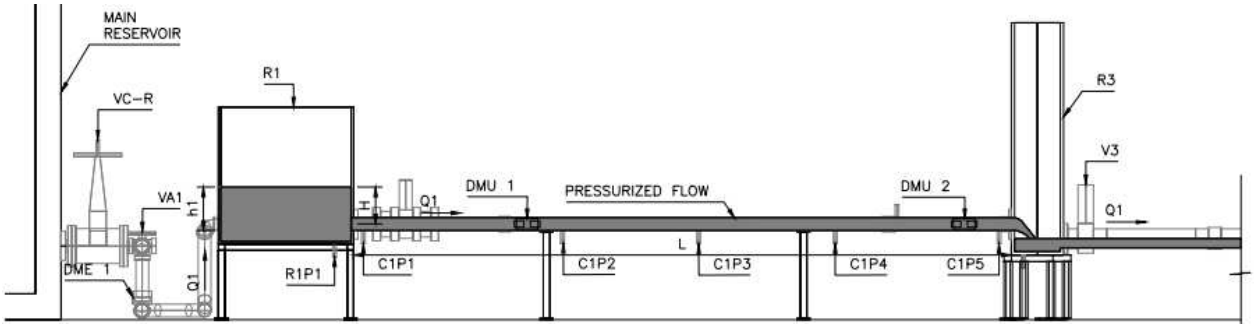



Figure 3.5 Condition initiale pour EXP2

Lorsque le débit était stable dans la conduite C1, les débitmètres (DME, DMU1 et DMU2), les capteurs de pression avec le logiciel LabVIEW et les caméras vidéo (haut vitesse et Sony) ont été initialisés. Le niveau d'eau a été aussi mesuré dans le réservoir R1.

Par la suite, la vanne Va1 d'alimentation en amont du réservoir R1 a été fermée rapidement et le niveau d'eau a commencé à baisser de façon constante dans le réservoir R1, en conséquence le débit a diminué dans la conduite C1 et de l'air a pénétré par l'extrémité aval lorsque le niveau descendait à l'intérieur de la conduite.

Finalement, lorsque le régime dans la conduite C1 était un écoulement à surface libre, les appareils de mesure ont été arrêtés. Les données extraites pour l'analyse comprennent des vidéos, des courbes de débit et des courbes de pression dans le temps.

Dans les tests du processus de vidange (EXP2), la cavité a été créée en aval de la conduite C1 et a également développé une pression négative, puis l'intrusion d'air a avancé en amont à une certaine distance, finalement le régime est devenu un écoulement à surface libre. Ainsi, afin de développer une analyse plus profonde sur la pression négative dans la cavité au processus de vidange, l'emplacement des capteurs de pression a été modifié et l'expérience EXP2 a été répété pour différents niveaux d'eau. Les capteurs de pression ont été placés à l'extrémité en aval de la conduite C1, séparés par une distance égale au diamètre de la conduite.

La procédure pour la réalisation des essais expérimentaux et les données extraites pour l'analyse sont identiques à celles correspondant à la localisation initiale des capteurs. La Figure 3.6 montre une image de l'emplacement modifié des capteurs de pression à l'extrémité aval de la conduite C1.

Les expériences effectuées pour étudier le front d'onde de dépressurisation dans la condition initiale sans écoulement (EXP1) et dans la condition initiale avec un écoulement permanent (EXP2) ont été répétées au moins trois fois afin de garantir la consistance des résultats.

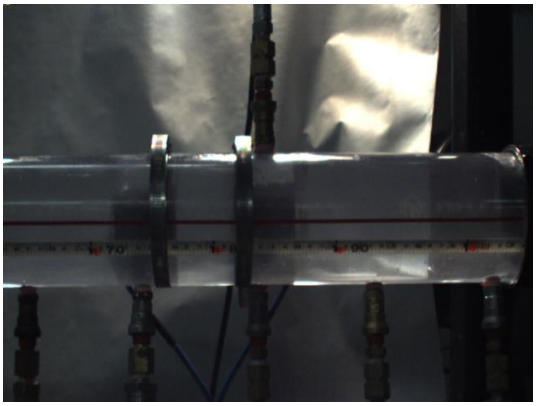


Figure 3.6 Emplacement modifié des capteurs de pression

### 3.1.2 Méthodologie pour l'Air Emprisonné

Les tests de laboratoire pour analyser l'effet de la poche d'air emprisonnée dans une conduite circulaire avec une pente horizontale, commencent avec un système vide d'eau. Tout d'abord, les vannes V1, V2 et V3 sont ouvertes afin de permettre le passage d'eau par le système. La vanne Va1, qui contrôle l'alimentation d'eau en amont de R1, est ouverte au point d'obtenir un écoulement permanent qui configure une conduite pleine en amont et un débit à surface libre en aval de la conduite C1. La condition initiale est atteinte lorsque l'écoulement est stable dans la conduite C1, la Figure 3.7 montre un schéma du système dans cette condition.

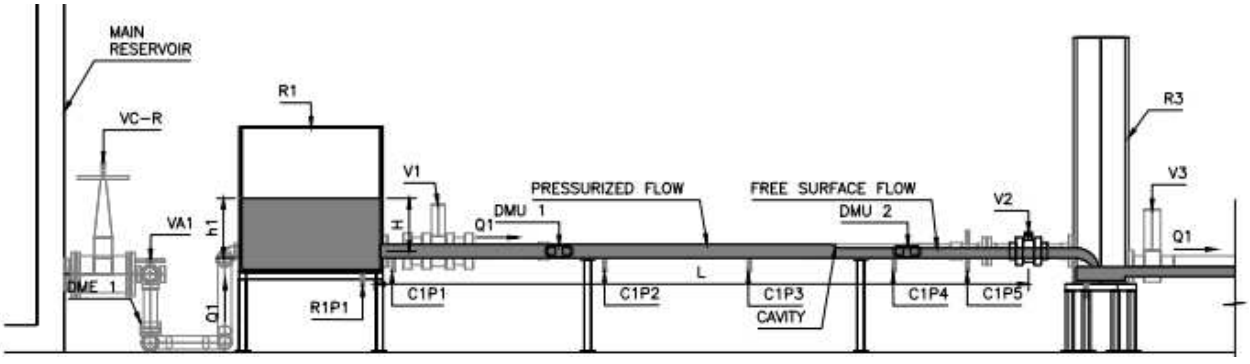



Figure 3.7 Condition initiale pour l'analyse du poche d'air

Lorsque la condition initiale a été atteinte, les débitmètres (DME, DMU1 et DMU2), les capteurs de pression avec le logiciel LabVIEW et les caméras vidéo (haut vitesse, Sony et Cam3) ont été initialisés afin d'obtenir les données expérimentales correspondant à la condition initiale. Dans cette condition, l'écoulement permanent a été mesuré et des photos ont été prises le long de la conduite afin de capturer le profil d'eau puis dessiner ce dernier afin de calculer le volume d'air emprisonné. Les photos du profil d'eau ont aussi permis d'obtenir la longueur de la colonne d'eau et par conséquent la distance entre la cavité et la vanne V2. Le niveau d'eau a été mesuré dans le réservoir R1 avec l'aide du tuyau transparent.

Par la suite, la vanne V2 en aval de C1 a été fermée rapidement, donc l'air dans la surface libre en aval de la conduite a été emprisonné. En même temps, l'alimentation d'eau a été fermée (Va1) afin de conserver le niveau d'eau dans le réservoir R1. Le temps de fermeture de la vanne V2 a été obtenu à l'aide de la camera Cam3.

Finalement, lorsque le niveau d'eau dans le réservoir R1 et la lecture de flux dans les débitmètres places dans la conduite étaient stables, les appareils de mesure ont été arrêtés et l'expérience était terminée. Les données extraites pour analyse comprennent des photos, des vidéos, des courbes de débit et des courbes de pression dans le temps.

Les tests développés pour étudier l'effet de la poche d'air emprisonnée ont été réalisés pour différents débits initiaux, ceci afin d'obtenir plusieurs tailles de cavité d'air. Les tests pour chaque niveau d'eau ont étés répétés au moins trois fois afin d'obtenir des résultats plus consistants.

## 3.2 Plan de la mémoire

### 3.2.1 Structure de la mémoire

Les thématiques des chapitres composant la mémoire sont listées ci-dessous :

- Chapitre 1 : L'introduction présente le contexte de la recherche, l'importance du sujet traité et les objectifs.
- Chapitre 2 : Montre la revue critique de la littérature que va à soutenir les résultats obtenus en laboratoire.

- Chapitre 3 : Présente la démarche de l'ensemble du travail de recherche et l'organisation générale du document indiquant la cohérence des articles par rapport aux objectifs de la recherche.
- Chapitre 4 : Ce chapitre corresponde à l'article soumis à une revue scientifique, lequel analyse les résultats expérimentaux d'un front d'onde de dépressurisation qui a été créé par le processus de vidange d'une conduite circulaire sous deux conditions initiales différentes.
- Chapitre 5 : Présente les résultats expérimentaux complémentaires pour les différents niveaux d'eau dans le processus de vidange.
- Chapitre 6 : Montre les résultats expérimentaux d'un écoulement transitoire créé par la fermeture d'une vanne qui emprisonne une poche d'air en aval de la conduite. Les résultats expérimentaux ont également été utilisés pour optimiser et valider un modèle mathématique développé par une autre étude réalisée au Polytechnique de Montréal.
- Chapitre 7 : Décrit les appareils de mesure utilisés dans les expériences, les procédures d'étalonnage et les procédures pour calculer deux paramètres de la conduite.
- Chapitre 8 : Présente la discussion générale de la recherche.
- Chapitre 9 : Expose les conclusions de la recherche.

### 3.2.2 Liste de publications

Deux documents de recherche soumis à une revue scientifique, qui ont été élaborés conformément aux exigences de Polytechnique Montréal, font partie de cette thèse :

- Additional Friction Factor Optimized to Model Transient Flows following Air Pocket Entrapment in Stormwater Systems
    - Coauteurs : Ilian Tosan M.Sc., Rolando-Yezid Perez-Pulido, Arman Rokhzadi Ph.D., Musandji Fuamba Ph.D.
    - Revue : Journal of Irrigation and Drainage Engineering
    - Statut : Accepté. Septembre 2021

- Experimental investigation of the emptying process and air cavity dynamic in pipelines
    - Coauteurs : Rolando-Yezid Perez-Pulido, Arman Rokhzadi Ph.D., Musandji Fuamba Ph.D.
    - Revue : Journal of Irrigation and Drainage Engineering
    - Statut : En cours de révision. Soumis le Juillet 2021

Une conférence pour un congrès d'hydraulique a été présentée par l'auteur de cette thèse, basée sur les résultats de laboratoire :

- The effects of air cavity propagation on transient full pipe flows during emptying process
    - Coauteurs : Rolando-Yezid Perez-Pulido, Arman Rokhzadi Ph.D., Musandji Fuamba Ph.D.
    - Événement : 9th International Symposium on Environmental Hydraulics (ISEH)
    - Seoul, Corée. Juillet 2021

# CHAPITRE 4 ARTICLE 1: EXPERIMENTAL INVESTIGATION OF THE EMPTYING PROCESS AND AIR CAVITY DYNAMIC IN PIPELINES

Ce chapitre a été extrait du document technique :

**Recherche expérimentale du processus de vidange et de la dynamique de la cavité d'air dans les conduits**

Les natures de la contribution de l'auteur de cette mémoire pour l'article indiqué étaient la conceptualisation, la méthodologie, le réglage des équipements de laboratoire, le développement des expériences de laboratoire, l'analyse de résultats, la conclusion, la recherche bibliographique et la rédaction.

Nom du journal: Journal of Irrigation and Drainage Engineering

Rolando-Yezid Perez-Pulido[1], Arman Rokhzadi, Ph.D.[2], Musandji Fuamba, Ph.D.[3]

[1]Master Student, Civil, geological and mining engineering, Polytechnique Montréal, P.O. 6079, station centre-ville, Montréal, QC, H3C 3A7, Canada. Email: rolando-yezid.perez-pulido@polymtl.ca. (Corresponding author).

[2]Ph.D. Postdoctoral Researcher, Civil, geological and mining engineering, Polytechnique Montréal, P.O. 6079, station centre-ville, Montréal, QC, H3C 3A7, Canada. Email: arman.rokhzadi@polymtl.ca.

[3]Ph.D. Professor, Civil, geological and mining engineering, Polytechnique Montréal, P.O. 6079, station centre-ville, Montréal, QC, H3C 3A7, Canada. Email: musandji.fuamba@polymtl.ca.

## 4.1 Abstract

The emptying process in full-pipe flows may develop, and the following air intrusion and depressurization wavefronts can cause several issues. The present study focuses on the impact of continuously decreasing the initial flow rate on the emptying process and the air cavity dynamic. For this purpose, two experiments with and without initial flow conditions were performed in a laboratory setup consisting of reservoir-polyvinyl chloride (PVC) pipe system. It was found that for the experiment without initial flow, the air cavity with the atmospheric pressure propagates

upstream. However, when there is an initial flow rate, at the onset of the air intrusion a negative pressure occurs inside the pipe and afterward, sub-atmospheric pressure develops inside the air cavity. However, this negative pressure becomes less intense as the cavity propagates upstream. In addition, the negative pressure inside the pipe upstream of the cavity remains almost constant, implying that the effect of friction loss is less significant than the effect of negative pressure. This sub-atmospheric pressure increases at the upstream end of the pipe to reach the water level in the upstream reservoir. It was also found that the experimental flow numbers are less than the theoretical ones calculated in the literature. This difference could be linked to the effect of friction loss, as it was neglected in the calculation. In addition, the cavity's propagation speed is initially constant and then increases due to the increasing velocity difference between upstream and downstream of the cavity. Further experimental analysis shows that a hydrostatic pressure distribution developed from a distance of one pipe diameter from the head of the cavity to the downstream.

**Keywords:** Partially transient flow; Air cavity; Depressurization wavefront; Emptying process; Negative pressure.

## 4.2 Introduction

The Sewer Network Systems (SWSs) or hydraulic gravity systems can be pressurized by events such as storms that exceed design conditions, reduction of system capacity, failure of mechanical systems (Li & McCorquodale, 1999), floods, or increasing impervious surface. Eventually, the emptying pipe causes the conduit to undergo a transition from pressurized to a free-surface flow (Fuamba, 2002). During the emptying process, Depressurization Wavefronts (DWFs) develop so that air cavities form and propagate upstream in the conduit. The air cavities may cause several problems, including deterioration of pipe fittings and joints, oscillation, structural damage, increasing head losses, and overflows (Pozos et al. 2010). In addition, the motion of air cavities can generate important water hammer pressures (Song et al.1983). Also, the emptying process may generate sub-atmospheric pressures, which provide a risk of collapse or buckling of pipelines (Coronado-Hernández et al. 2017; 2018). These sub-atmospheric pressures can negatively impact defective joints or valves and increase the air entering the pipelines (Besharat et al. 2018).

The emptying process causes a transient flow that has obtained less attention than the filling process numerically and experimentally. Note that the emptying process and the dynamic of the air cavity

have been studied experimentally and theoretically. For example, Zukoski (1966) experimentally studied the influence of viscosity and surface tension on air cavity propagation in a closed pipe. Benjamin (1968) theoretically analyzed the air intrusion produced by suddenly opening the downstream end in a horizontal conduit. Cardle et al. (1989) analyzed the pressure along the pipe and the celerity of the interface in a pipe with stagnant and steady-state initial flow conditions. Alves et al. (1993) mathematically and experimentally obtained the propagation speed of the cavity in sloped pipes. Montes (1997) investigated the cavity inception and mathematically estimated the cavity shape in the free-surface section. The researcher analyzed the cavity behavior for constant flow numbers and stagnant cavity so that the pressure inside the cavity is the atmospheric pressure. Montes found that the cavity begins to propagate when the flow number is around one. In addition, the author found that the cavity forms when the stagnation point is at a distance of three pipe's diameter from the downstream end. Hager (1999) described the cavity shape, the distance of the stagnation point from the downstream end, and the pressure at the outlet in terms of the upstream flow number. The author experimentally found the limit between bubble washout, an air intrusion of less than three pipe's diameter (3D) from the outlet, and cavity outflow, an air intrusion of more than 3D. The experimental results of Vasconcelos and Wright (2008), for stagnant initial flow conditions, showed that the water depth behind the negative interface is around half of the pipe, and the pressure inside the cavity is atmospheric. Bousso et al. (2014) generated a DWF under stagnant initial flow conditions to measure the variation of wavefront celerity, the flow depth behind the wavefront, velocity in the free-surface section, and the wavefront length. Bashiri et al. (2020) studied cavity propagation in two directions within a square conduit and found that to simulate mixed flow conditions, three-dimensional models are more accurate than one-dimensional models.

## 4.3 Objectives

In the previous studies, cavity formation and other parameters have been analyzed under stagnant or steady-state flow conditions. Thus, the purpose of the present study is to further investigate the cavity propagation in a pipe segment containing the initial flow rate, which is continuously decreasing as the air cavity propagates upstream. Therefore, this study is to further complete the previous experimental studies of DWF in a horizontal closed conduit to explore the effect of flow rate on the cavity and to provide more details of the relevant variables such as celerity, flow depth,

and pressure inside the cavity. The study develops two types of experiment, the first without initial flow rate and the second with initial flow rate (Q), hereafter called EXP1 and EXP2, respectively.

## 4.4 Methodology

In this section, the details of the experiments and the procedure of measuring the relevant data, including the pressure head, the velocity, and the water depth, will be explained. In the laboratory of the École Polytechnique de Montréal, two experiments were developed, the fist started with stored water filling the conduit and the second started with a filled pipe in steady flow condition.

### 4.4.1 Description of the experiments

The experimental setup consists of an upstream reservoir (R1), with the dimensions of 1.01 m (length) × 1.01 m (width) × 1.04 m (height), connected to a transparent PVC horizontal pipe (C1), and a reservoir (R3) downstream of the pipe, with the dimeter of 0.355 m and height of 1.775 m. Note that the length and diameter of the pipe are L = 5.12 m, and D = 10 cm, respectively. The system includes valves to control the inlet and outlet of water, sensors to measure the pressure in five points located at the pipe's invert, and one at the bottom of R1. An Arkon electromagnetic flowmeter (DME1) type MAG910E with accuracy of 1.0%, was placed upstream of R1 and two Hedland ultrasonic flowmeter type HTTF with the accuracy of 1.0%, to record the flow rate upstream (DMU1) at 0.264L and downstream (DMU2) at 0.928L of the pipe (Figure 4.1). The shape and velocity of the cavity were recorded by a high-speed camera located at the downstream end of the pipe, and a digital camera was also placed at downstream.

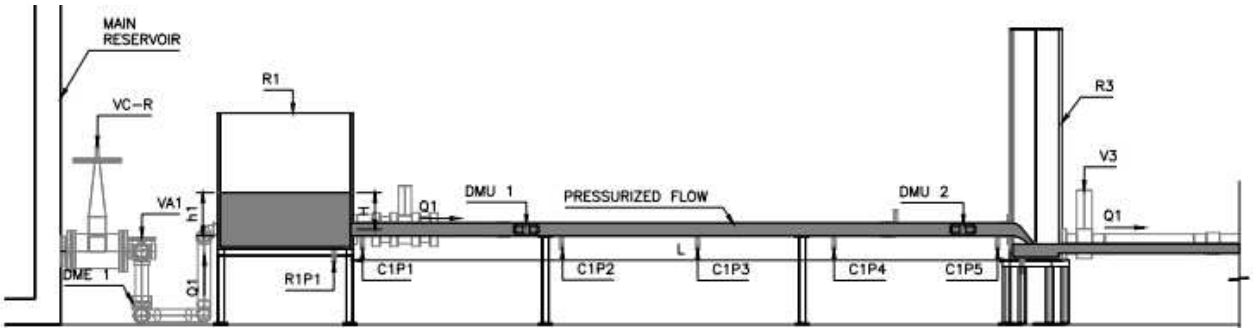



Figure 4.1 Laboratory setup schematic

To measure the pressure in the pipe, five sensors were installed on pipe C1, of which four were Omega type PX409-2.5G5V with the accuracy of ±0.08%, called C1P2, C1P3, C1P4, and C1P5.

These sensors were installed at 0.317L, 0.524L, 0.732 L, and 0.98L, respectively. Another sensor, Hoskin type P9-1H1-DN1C0-3PSI-15V with the accuracy of ±0.5%, was called C1P1 and installed at 0.015L. In addition, a pressure sensor, called R1P1, which was the Omega type PX-603-015G5V with the accuracy of ±0.4%, was installed on R1.

The experiments were recorded by a SVSi StreamView LR High-Speed camera, 60 frames per second (FPS), 1280 × 1024 resolution and a conventional video camera SONY Cyber-shot DSC-RX100M5. The pressure data of sensors were collected in two data-acquisition cards using National Instruments' LabVIEW data acquisition software. The LabVIEW software was configured to measure 500 pressure data from sensors in one second, in other words, one pressure data every 0.002 seconds.

The behavior of the air cavity in both EXP1 and EXP2 were tested for three different initial water levels in the reservoir R1 and each experiment was run three times to verify the consistency of the results.

The test case EXP2 was repeated for all three water levels in reservoir R1 to more precisely analyze the air cavity's pressure distribution. In this repetition, the location of the sensors was moved downstream of pipe C1. Thus, C1P1, C1P2, C1P3, and C1P4 were installed at 0.902L, 0.922L, 0.941L, 0.961L, respectively. Note that C1P5 was remained at the same position as before, i.e., 0.98L.

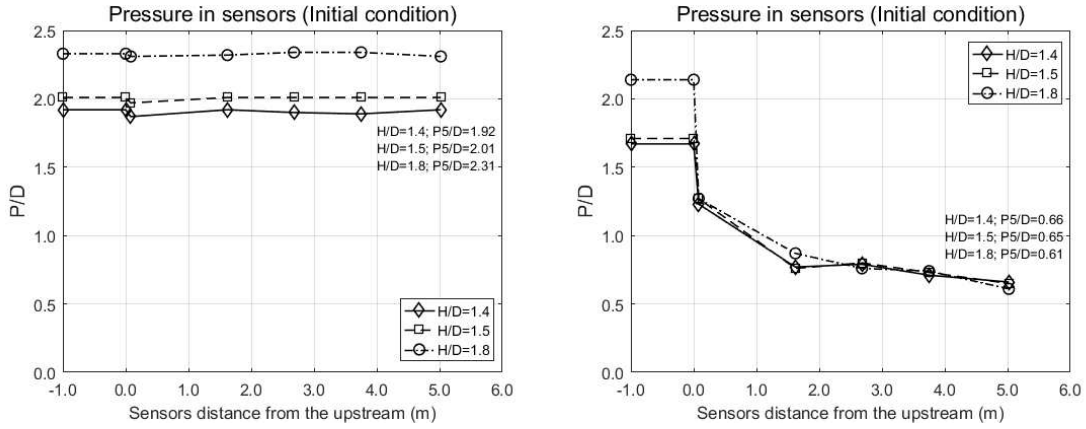
### 4.4.2 Initial conditions

For EXP1, the water is supplied to R1, and the downstream end of R3 is closed to prevent water from exiting the pipe and the reservoirs. Once the desired water level is reached in both reservoirs, the supply is closed, and the water stabilizes. Therefore, the initial flow rate through the pipe for EXP1 is zero. Then, the downstream end of R3 is opened (V3), and the supply is opened to maintain the water level in R1. Once the water level in R3 reaches the pipe crown, the air enters the pipe, and the cavity propagates upstream.

For EXP2, the downstream end is opened (V3), and the water is supplied to R1. Once the full flow is formed in C1 and the desired water level is obtained in R1, the supply is stopped. When the velocity at the downstream end decreases, the full flow changes to a free-surface flow, and the cavity propagates upstream.

## 4.5 Results and discussion

Three different water levels of reservoir R1 are tested for both EXP1 and EXP2. The water levels in the dimensionless form are H/D = 1.8, 1.5, 1.4, in which H is the water level in R1 measured from the pipe centerline. The flow is expressed in the form of flow number, $F = V/\sqrt{gD}$, in which V is the flow velocity, measured by the flowmeter DMU1, and g is the acceleration of gravity, equal to 9.81 m s-2.




a) b)

Figure 4.2 Pressure in sensors before the cavity begins. a) EXP1, b) EXP2

Figure 4.2 shows the distribution of the ratio of initial pressure head to the pipe diameter at the sensors along the pipe for a) EXP1 and b) EXP2. As shown in Figure 4.2a, when there is no initial flow, the pressure head distribution is uniform, while the value increases as the water level in R1 increases. In addition, as mentioned before, the sensors were installed at the pipe invert, thus, the value of D/2 needs to be subtracted from the values shown in Figure 4.2a to find the pressure head distributions at the pipe centerline.

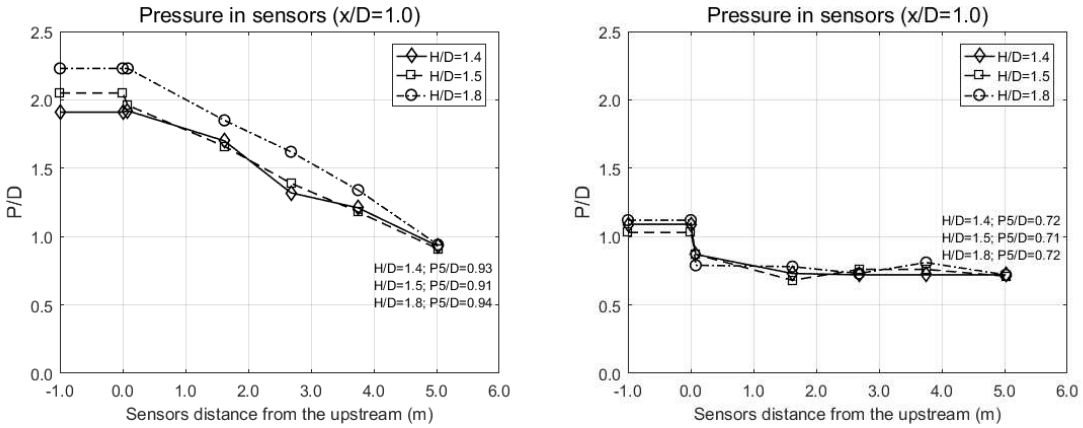
As explained by Montes (1997), when the water exits the pipe as a jet flow, a negative pressure has to develop along the pipe cross-section to balance the momentum between inside and outside the pipe. This fact indicates that the point at which zero pressure occurs is not the pipe crown and, by increasing flow number, this point moves toward the pipe center. Thus, as shown in Figure 4.2b, the reason that the pressures of EXP2 are smaller than EXP1 can be justified. Note that in EXP2, the pressure head decreases from upstream to downstream due to the friction loss. In addition, it can be seen in Figure 4.2b that the pressure distribution along the pipe does not noticeably change

with the increasing water level in the reservoir. It implies that the effect of negative pressure to balance the momentum is more significant than the effect of friction loss.

Figure 4.3 shows the small cavity, which appears at the downstream end of the pipe as the water detaches from the pipe wall, for both EXP1 and EXP2. Note that the cavity's head location, measured from the downstream end, is represented by x, which for this case is very close to the downstream, i.e. x/D ≈ 1.0. As can be seen, for both cases the water depth is almost at the pipe crown.

a) b)

Figure 4.3 Photos of the cavity at x/D ≈ 1.0. a) EXP1, b) EXP2.




a) b)

Figure 4.4 Pressure in sensors when cavity is at x/D ≈ 1.0. a) EXP1, b) EXP2

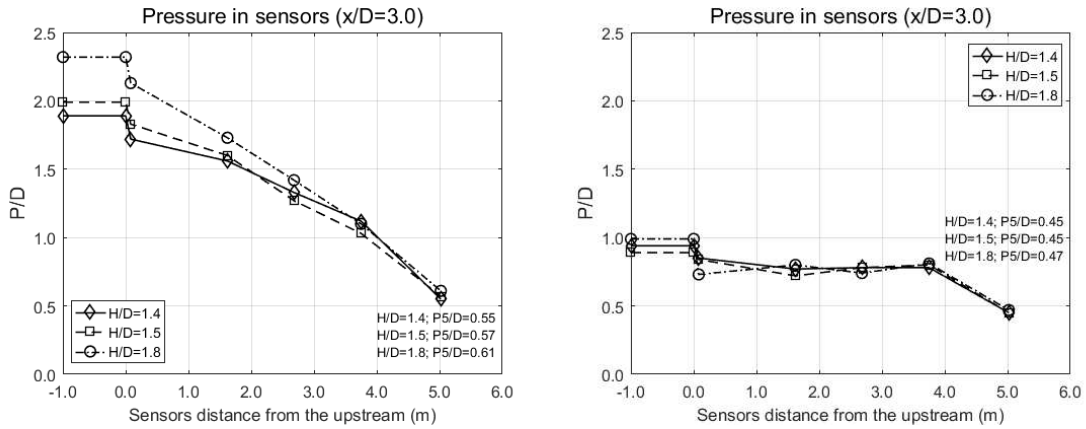
Figure 4.4 illustrates the pressure distribution when the flow detaches from the wall and a small cavity appears. Figure 4.4a shows that in EXP1 the pressure starts to decrease from upstream to downstream due to friction loss and the pressure at the last sensor (P5), which is located at x/D≈1.0,

is almost equal to the pipe diameter. Also, as can be seen, the pressure increases with the increase of the pressure head in the reservoir. Figure 4.4b shows a similar pressure distribution for EXP2. As can be seen, the pressure distribution does not depend on the pressure head in the reservoir. Also, Figure 4.4b shows that the pressure head at the sensor P5 is equal to 0.72D. Note that subtracting the pressure head (0.72D) from the water depth (1.0D) at this location shows a pressure difference equal to -0.28D, which can be counted as a negative pressure head inside the cavity. It is also worth mentioning that Montes (1997) indicated that for a rectangular conduit, when the cavity appears, the negative pressure in front of the cavity is equal to -0.3D, which is close to the value found from Figure 4.4b. Comparing Figure 4.2b and Figure 4.4b shows that once the cavity appears, less intense negative pressure develops because the pressure head in P5 in Figure 4.4b is relatively greater than that in Figure 4.2b. In addition, as shown in Figure 4.4b, the effect of negative pressure, which occurs to balance the momentum between inside and outside of the pipe, becomes more significant because the pressure loss due to friction is negligible so that the pressure is almost constant for a large distance in front of the cavity. However, close to the reservoir at upstream, the effect of the supplied energy of the reservoir becomes more pronounced as can be seen in Figure 4.4b.

a) b)

Figure 4.5 Photos of the cavity at x/D ≈ 3.0. a) EXP1, b) EXP2

Figure 4.5 shows the cavity when it arrives at x/D ≈ 3.0 from the pipe's downstream end. As can be seen, the water profile consists of a curve that starts from the top of the pipe, then, the streamlines become horizontal toward the downstream end. Note that the water depth at the location of the sensor P5 for EXP1 is 0.56D and for EXP2 is 0.608D.




a) b)

Figure 4.6 Pressure in sensors when cavity is at x/D ≈ 3.0. a) EXP1, b) EXP2

Figure 4.6 shows the pressure distributions measured by the sensors when the cavity is at x/D ≈ 3.0 from the pipe's downstream end. For EXP1, the sensor P5 (Figure 4.6a) shows the pressure head equal to 0.57D for different water levels in the reservoir. In addition, the pressure head is almost the same as the water depth (0.56D) measured in Figure 4.5a, implying the atmospheric pressure within the cavity. Note that, the measured water depth for EXP1 at this location is close to the value found by Benjamin (1968) when the energy dissipation is negligible, i.e. $y_5 \cong 0.563D$.

As can be seen in Figure 4.6b, for EXP2, the sensor P5 shows the pressure head equal to $0.45D$, while the water depth measured at this location is $y_5 \cong 0.608D$. As seen in Figure 4.5b, the streamline is horizontal, which implies the hydrostatic pressure distribution across the flow. Therefore, the difference between the pressure head and the water depth could be caused by a negative pressure, equal to -0.158D inside the cavity. Comparing this negative pressure value with the value when the cavity head is located at x/D ≈ 1.0 (-0.28D) (Figure 4.4b) shows that when the cavity advances upstream to x/D ≈ 3.0 the negative pressure inside the cavity increases. Figure 4.6b also shows that the pressure loss in front of the cavity is insignificant for some distance from the cavity. However, close to the pipe upstream end, the pressure head rises, which is caused by the reservoir.

Table 4.1 shows the flow number ($F_2$) measured at far upstream by the flowmeter DMU1, the water depth (y5), and the pressure head at the location of the sensor P5 and the pressure inside the cavity (pc) for different x/D's. Note that pc is calculated as $pc = P_5 - y_5$. It can be seen that the inception

cavity, which is when x/D ≈ 1.0, occurs when the flow number is 0.859, while Montes (1997) calculated the flow number equal to one for the inception cavity. In addition, Montes (1997), for circular pipes, calculated the flow number as $F_2 = 0.581$ when cavity arrives x/D ≈ 3.0. However, as can be seen in Table 4.1, in the present study, the flow number for x/D ≈ 3.0 is 0.635. The difference between these values could be related to the effect of friction loss, which was neglected in the calculation of Montes (1997). Also, as can be seen in Table 4.1, the pressure inside the cavity decreases overall as the cavity further moves upstream.

Table 4.1 Values of different measured parameters

| **x/D** | **$F_2$** | **y5/D** | **P5/D** | **\|pc\|/D** |
|---|---|---|---|---|
| 1.0 | 0.859 | 1.000 | 0.718 | 0.282 |
| 2.0 | 0.752 | 0.679 | 0.550 | 0.129 |
| 3.0 | 0.635 | 0.608 | 0.452 | 0.156 |
| 4.0 | 0.555 | 0.617 | 0.451 | 0.166 |
| 5.0 | 0.519 | 0.626 | 0.455 | 0.171 |
| 6.0 | 0.488 | 0.617 | 0.454 | 0.163 |

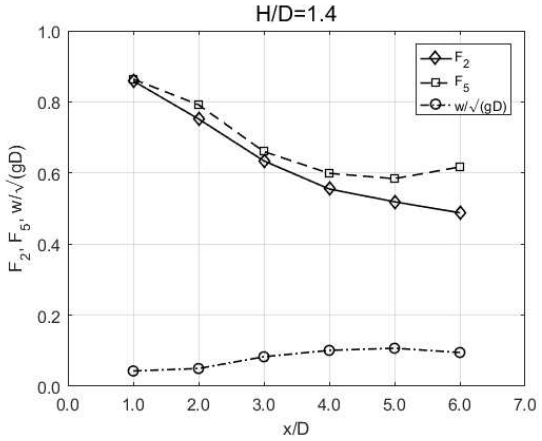



Figure 4.7 Flow number at upstream (F2), at downstream (F5) and the cavity speed $w/\sqrt{gD}$

Figure 4.7 shows the propagation speed of the cavity ($w/\sqrt{gD}$) and the flow numbers across the cavity moving along the pipe. The propagation speed of the cavity was calculated using the cavity trajectories and the time obtained from the high-speed camera. Note that there are no significant differences between the results of test cases with different water levels in R1. Thus, only, the result of the test case, in which H/D is equal to 1.4, is presented. As can be seen in Figure 4.7, the

propagation speed of the cavity is low and constant until cavity arrives at x/D ≈ 2.0. Then, the cavity speed increases, which is more noticeably up to x/D ≈ 4.0. In addition, Figure 4.7 shows that the increasing cavity speed is due to the difference between water velocities across the cavity.

## 4.6 Pressure distribution inside cavity

To further analyze the negative pressure inside the cavity, the EXP2 experiments were repeated, while locations of the pressure sensors were changed. The sensors P5, P4, P3, P2, and P1 were installed at x/D =1.0, 2.0, 3.0, 4.0, and 5.0, respectively, from the pipe downstream end (Figure 4.8).

The test was run for the case with H/D =1.4. Note that the experiment was run three times to verify the consistent results.

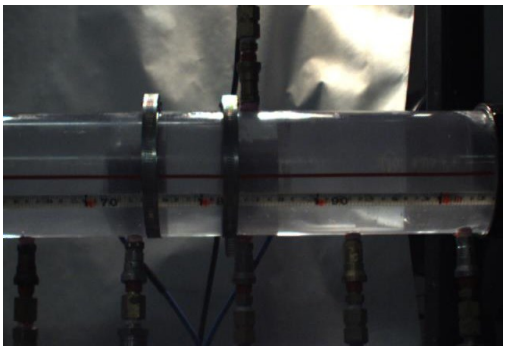
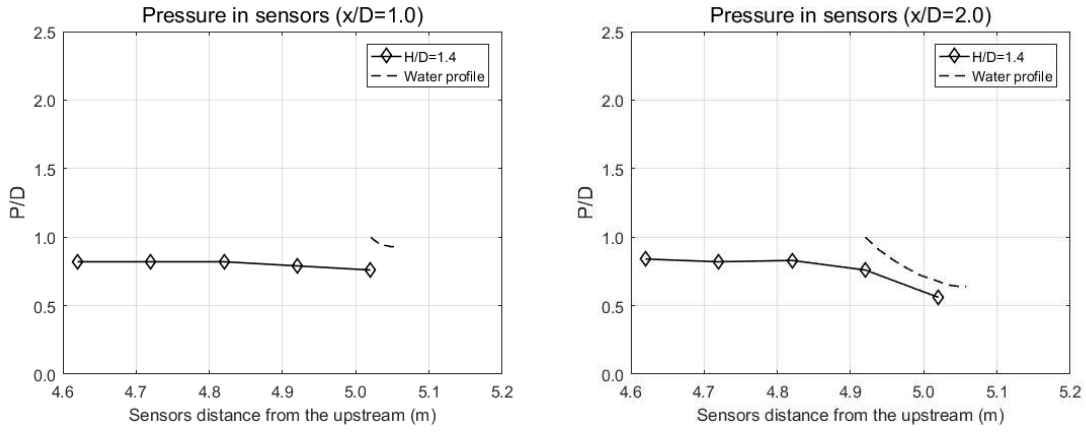
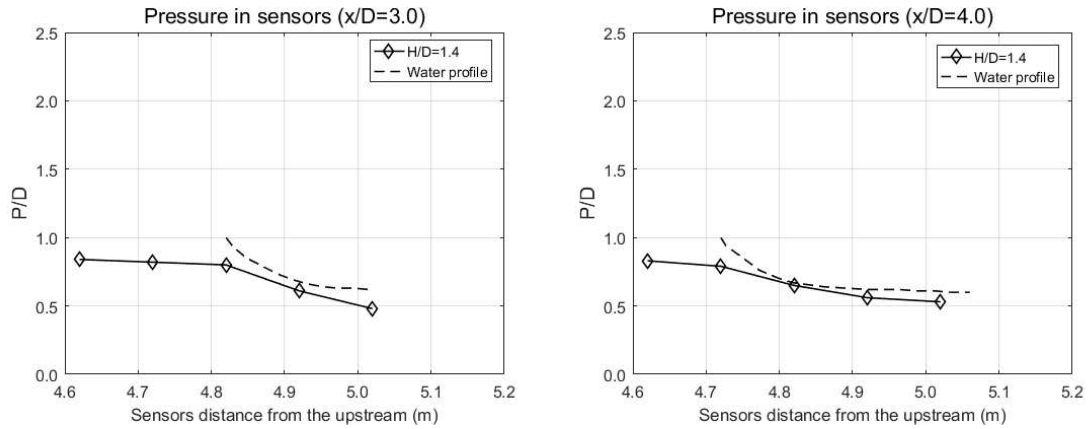


Figure 4.8 New location of sensors at the downstream end of the pipe

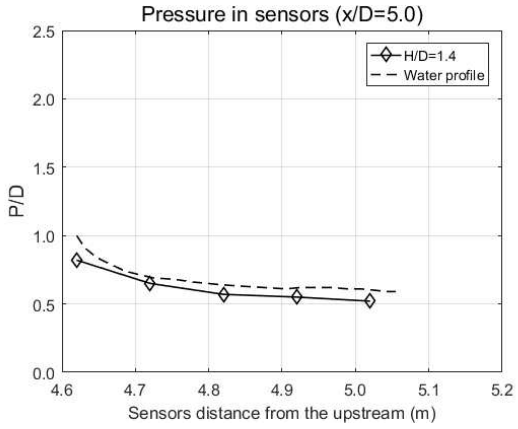



a) b)

Figure 4.9 Pressure distribution along the cavity




c) d)




e)

Figure 4.9 Pressure distribution along the cavity (suite)

Figure 4.9 shows the pressure at the sensors (pressure line) in continuous line and the water depth's profile below the air cavity (water line) in dashed line. As shown in Figure 4.9 , when the cavity's head is at x/D = 1.0, a negative pressure equal to -0.24D forms inside the cavity at the location of P5 (Figure 4.9 a). This negative pressure increases as the cavity moves upstream and it reaches -0.08D when the cavity arrives x/D = 5.0 (Figure 4.2e).

For x/D = 1.0–3.0, the water lines show parallel streamlines only at P5, which implies the hydrostatic pressure distribution. However, when the cavity further propagates to x/D = 3.0–5.0, the parallel streamline develops from the downstream end up to a distance of 1.0D from the cavity's head.

## 4.7 Conclusion

The depressurization wavefront develops and propagates in pipelines during the emptying process, which can cause structural or hydraulic problems. This process has been analyzed in previous studies focusing on stagnant and steady-state flow rates. However, the present study analyzed the effect of continuously decreasing flow rate on the emptying process and the depressurization wavefront. For this purpose, two types of experiments, without and with the initial flows, called EXP1 and EXP2, respectively, were carried out.

It was found that when the cavity arrives at $x/D \approx 1.0$, a negative pressure inside the cavity, equal to -0.28D, develops, which is close to the negative pressure mentioned by Montes (1997) for a rectangular conduit. This negative pressure becomes less intense when the cavity further propagates upstream. In addition, it was found that the pressure inside the pipe is almost constant, which implies that the effect of negative pressure is more pronounced than the effect of friction loss. Note that the negative pressure inside the cavity was not reported by Montes (1997) because Montes assumed that the cavity is stagnant, with the atmospheric pressure, so that the cavity shape can be calculated.

It was found that the negative pressure inside cavity increases as the cavity moves upstream. In addition, for $x/D = 1.0–3.0$, the water lines show parallel streamlines, implying the hydrostatic pressure distribution, only for 1.0D from the pipe's downstream end. However, when the cavity further propagates upstream, the parallel streamline develops from the downstream end up to a distance of 1.0D from the cavity's head.

The measured flow number for the inception cavity ($x/D \approx 1.0$) was 0.859, while Montes (1997) calculated the flow number equal to one for the inception cavity. Also, when the cavity arrives at $x/D \approx 3.0$, which is where the cavity forms, the flow number is 0.635, while Montes calculated the flow number for this location as 0.581. This discrepancy could be due to the effect of friction loss because Montes (1997) did not consider the friction loss term in the calculation. Finally, the experimental results showed that the propagation speed of the cavity is constant for $1 < x/D < 2$. Then, it is increasing because the difference between the velocities of upstream and downstream of the cavity is increasing.

## 4.8 Data availability Statement

Some or all data, models or code that support the findings of this study are available from the corresponding author upon reasonable request.

## 4.9 Acknowledgment

The writers would like to express their gratitude to the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC) for the financial support.

# CHAPITRE 5 RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX COMPLEMENTAIRES POUR LE PROCESSUS DE VIDANGE

L´analyse de la cavité d'air qui se propage de l'aval vers l'amont dans le processus de vidange a été faite au CHAPITRE 4. Les analyses ont été élaborées sur la base des résultats obtenus lors des tests de laboratoire, effectués au Polytechnique de Montréal. Le modèle physique utilisé pour effectuer les tests, dont la Figure 4.1 présente un schéma, a été décrit dans le même chapitre.

Deux types d'expériences ont été réalisées afin de comparer les résultats de la propagation de la cavité : le premier type (EXP1) était une conduite pleine sans débit dans la condition initiale qui impliquait que l'eau était stockée dans le système, ensuite la cavité a été créée lors de l'ouverture de la canalisation en aval. Le deuxième type d'expérience (EXP2) conduisait initialement un écoulement permanent dans une canalisation pleine, où le débit a été réduit en continu, provoquant la vidange de la canalisation et la création de la cavité en aval. Les expériences ont été effectuées pour trois niveaux d'eau dans le réservoir amont (H/D=1.4, 1.5 et 1.8) et les tests pour chaque niveau d'eau ont été exécutés trois fois afin d'assurer la consistance. Bien que les essais ont été développés pour trois niveaux initiaux d'eau dans le réservoir amont, le CHAPITRE 4 a juste présenté, à titre explicatif, les résultats pour un niveau d'eau (H/D=1.4).

Ainsi, le présent chapitre vise à présenter les résultats de l'ensemble des tests exécutés au laboratoire d'hydraulique dans le but d'analyser la cavité dans les deux types d'expériences et de confirmer les conclusions du chapitre précédent, où seuls les résultats pour H/D=1.4 ont été présentés.

## 5.1 Résultats expérimentaux

Les résultats expérimentaux de la pression pour les capteurs installés le long de la conduite, lorsque la cavité d'air se propage vers l'amont, ont été analysés dans le chapitre précédent pour les trois niveaux d'eau en R1 (H/D=1.4, 1.5 et 1.8) dans les deux types d'expériences (EXP1 et EXP2). Cependant, les résultats de paramètres tels que le *Flow number* pour les deux débitmètres installés sur la canalisation, la hauteur de l'eau dans le lieu du capteur P5 (0.98L), la vitesse de propagation d'air et la pression à l'intérieure de la cavité et n'ont pas été montrées pendant l'élaboration de l'analyse pour les hauteurs de H/D=1.5 et 1.8.

### 5.1.1 Expérience type EXP1

Les résultats pour les expériences du type EXP1 ont montré que quelques secondes après l'ouverture de la vanne aval V3, la pression du capteur P5 a chuté rapidement. Le chapitre précédent a expliqué qu'au moment où la pression de P5 a atteint la valeur du diamètre de la conduite (10 cm.), le détachement de l'eau de la couronne a également commencé, selon la caméra à haute vitesse (HS). Cet événement indique que l'air a commencé à entrer une fois que l'eau a atteint la couronne du conduit, marquant le début de la cavité. La vidéo de la caméra à haute vitesse a montré que la cavité s'est déplacée vers l'amont, puis s'est arrêtée et a reculé vers l'aval en se dissipant, pour laisser un écoulement qui remplit la conduite d'eau.

La Figure 5.1 présente le débit calculé pour les trois niveaux d'eau sur la base des données obtenues du débitmètre en amont situé à 0.264L, où «*L*» est la longueur de la conduite. Notez que le temps t=0 est pris lorsque la cavité est visible dans le tuyau. Ce graphique montre que pour un niveau d'eau élevé, le débit augmente rapidement. Ceci indique que plus l'énergie est grande, plus l'accélération de l'eau sera grande. La Figure 5.2, qui montre le débit du débitmètre en aval (0,928L), confirme les résultats de la figure précédente.

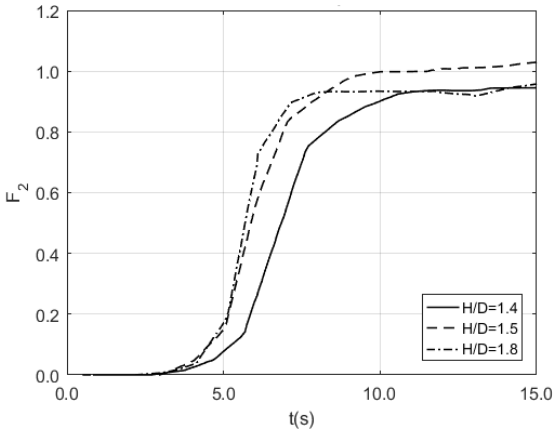



Figure 5.1 *Flow number* en amont ($F_2$) pour EXP1

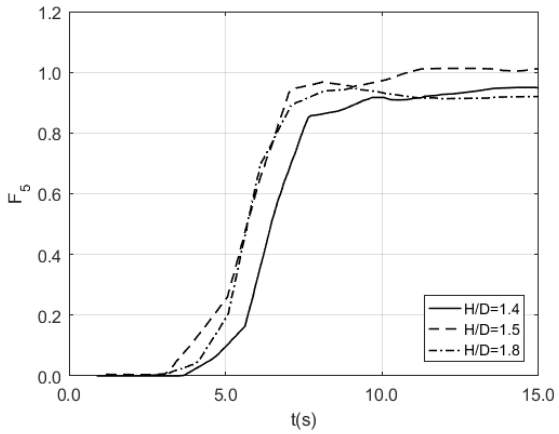



Figure 5.2 *Flow number* en aval ($F_5$) pour EXP1

La Figure 5.3 exhibe la distance de propagation de la cavité au fil du temps pour les trois niveaux d'eau, obtenus à partir des enregistrements vidéo de la caméra haute vitesse. Ce graphique présente la distance relative entre l'extrémité amont et la tête de la cavité, au fur et à mesure que l'onde avance dans le temps. Les résultats montrent que pour un niveau d'eau initial plus élevé, la distance d'avance de la cavité est moindre.

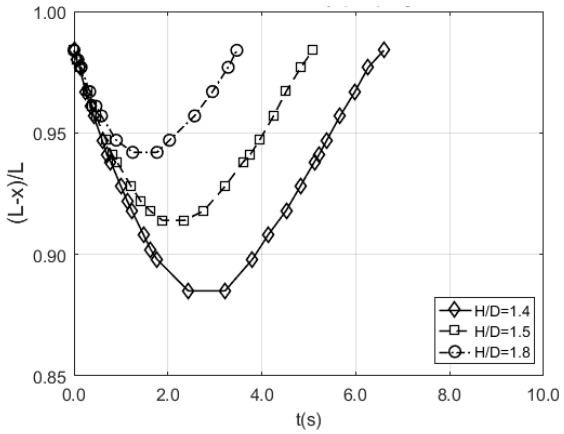



Figure 5.3 Distance de propagation de la cavité pour EXP1

La Figure 5.4 présente la vitesse de propagation de la cavité ($w/\sqrt{gD}$) au fil du temps, où $w$ est la vitesse de la cavité en m/s, $g$ est l'accélération de la gravité et $D$ est le diamètre de la conduite. La vitesse de propagation de la cavité a été calculée en utilisant les trajectoires de la cavité et le temps obtenus de la caméra de haute vitesse. Le graphique montre qu'une fois la vitesse de propagation atteint zéro ($w/\sqrt{gD} = 0$), les valeurs sont absolues.

Les résultats montrent que la vitesse de propagation diminue jusqu'à une valeur nulle, indiquant que la cavité ralentit jusqu'à l'arrêt et recule ensuite. Notez que plus le niveau d'eau est élevé dans le réservoir, plus le temps pour atteindre la vitesse zéro est court.

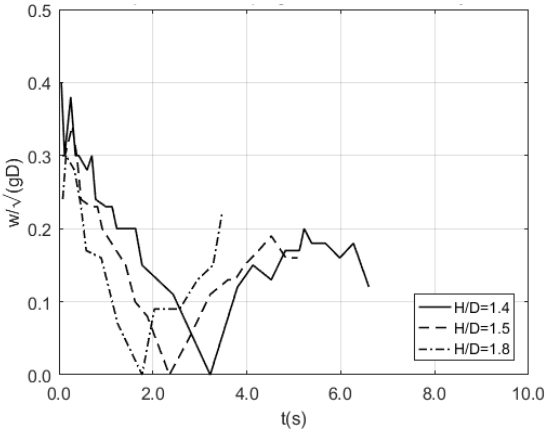



Figure 5.4 Vitesse de propagation de la cavité (*w*) pour EXP1

Les données montrent que la vitesse de propagation diminue après la création de la cavité, tandis que le *flow number* reste nul. Cependant, avant que la cavité s'arrête ($w/\sqrt{gD} = 0$), le *flow number* commence à augmenter lentement. Enfin, lorsque la cavité recule, la vitesse de propagation augmente à nouveau et le *flow number* le fait aussi. En d'autres termes, lorsque la cavité se déplaçait vers l'amont, la vitesse de l'eau devant la cavité restait nulle ($V_1$). Peu de temps avant que la cavité s'arrête, l'eau devant l'onde a commencé à se déplacer et à mesure que la cavité reculait en aval, la vitesse de l'eau augmentait considérablement. L'onde avançant vers l'amont correspond au développement d'une cavité dans une conduite fermée présentée par Benjamin (1968).

La cavité d'air a cessé d'avancer dû à l'équation de continuité, car si le débit en amont de la cavité ($A_1V_1$) est égal au débit dans la section de la surface libre ($A_2V_2$), la vitesse de propagation de la cavité ($w$) sera égale à zéro. L'équation de continuité selon Bousso et al. (2014) est :

$$A_1V_1 = A_2V_2 + (A_1 - A_2) \tag{5.1}$$

Où l'indice 1 est pour la section en amont de la cavité, l'indice 2 est pour la section de surface libre, $A$ est la section humide de la conduite, $V$ est la vitesse de l'eau et $w$ est la vitesse de la cavité.

Le fait que la cavité a commencé à se déplacer vers l'aval, met en évidence que si le débit en amont de la cavité ($A_1V_1$) était plus élevé que le débit en aval ($A_2V_2$), la vitesse de la cavité ($w$) change de signe, autrement dit se déplace vers la direction opposée.

En comparant les trajectoires et la vitesse de propagation, on constate que l'accélération de la cavité est faible lorsque le niveau d'eau du réservoir est plus élevé et qu'elle augmente lorsque le niveau d'eau diminue.

Les résultats des essais de type EXP1, effectués dans les installations du laboratoire de Polytechnique Montréal pour les trois niveaux d'eau (H/D=1,4, 1,5 et 1,8), ont indiqué que lorsque le niveau d'eau initial était bas, un gradient de pression plus faible se créait entre le réservoir et la canalisation aval. Cette situation a créé une accélération lente de l'écoulement, permettant à la cavité d'avancer sur une plus grande distance vers l'amont. Par conséquent, lorsque le niveau d'eau initial dans le réservoir amont augmentait, ce gradient était plus élevé et l'accélération augmentait plus rapidement, ainsi la cavité avançait sur une distance plus courte.

Les tendances pour le *flow number* et pour la propagation de la cavité étaient semblables aux trois niveaux d'eau testés. Notez que la vitesse de l'eau devant la cavité, qui était égale à zéro, a commencé à augmenter peu de temps avant que la cavité ne s'arrête. Les expériences ont montré que, lorsque le niveau d'eau était plus élevé dans le réservoir amont : le débit (*flow number*) augmentait plus rapidement ; la distance de déplacement de la cavité vers l'amont était plus courte et le temps pour atteindre la vitesse nulle était également plus court.

### 5.1.2 Expérience type EXP2

Les résultats pour les expériences type EXP2, dans les différents niveaux d'eau initiale en amont (H/D=1.4, 1.5 et 1.8), présentés dans les tableaux 4.1, 5.1 et 5.2, ont montré un comportement similaire pour le *flow number*, le niveau d'eau dans la section à surface libre, la pression sur le capteur P5 et la pression négative dans la cavité. Les tests du processus de vidange, pour H/D=1.5 et 1.8 (Tableau 5.1 et Tableau 5.2), comme dans le chapitre précédent, ont également montré que dans le début de la cavité (x/D=1.0) le *flow number* était inférieur à l'unité ($F_2$<1.0) et que pour la cavité formée (x/D=3.0) le *flow number* était différent de la valeur de Montes (1997) ($F_2$=0.581) affectés par les pertes de charge. Les différences de la tendance sont attribuables aux appareils de mesure, dans ce cas, les débitmètres ultrasoniques.

Tableau 5.1 Paramètres mesurés de la cavité pour H/D=1.5

| **x/D** | **$F_2$** | **y5/D** | **P5/D** | **\|pc\|/D** |
|---|---|---|---|---|
| 1.0 | 0.882 | 1.000 | 0.714 | 0.286 |
| 2.0 | 0.598 | 0.678 | 0.554 | 0.124 |
| 3.0 | 0.539 | 0.600 | 0.447 | 0.153 |
| 4.0 | 0.523 | 0.630 | 0.449 | 0.181 |
| 5.0 | 0.501 | 0.627 | 0.426 | 0.201 |
| 6.0 | 0.477 | 0.625 | 0.469 | 0.156 |

Tableau 5.2 Paramètres mesurés de la cavité pour H/D=1.8

| **x/D** | **$F_2$** | **y5/D** | **P5/D** | **\|pc\|/D** |
|---|---|---|---|---|
| 1.0 | 0.875 | 1.000 | 0.719 | 0.281 |
| 2.0 | 0.773 | 0.663 | 0.561 | 0.102 |
| 3.0 | 0.696 | 0.610 | 0.466 | 0.144 |
| 4.0 | 0.613 | 0.634 | 0.435 | 0.199 |
| 5.0 | 0.561 | 0.613 | 0.454 | 0.159 |
| 6.0 | 0.526 | 0.593 | 0.454 | 0.139 |

Les tests effectués aux différents niveaux d'eau dans le réservoir amont ont également montré des tendances similaires pour la vitesse de propagation de la cavité. La Figure 5.5 et la Figure 5.6, pour H/D=1.5 et 1.8 respectivement, confirment que jusqu'à x/D=2.0 la vitesse de propagation de la cavité est faible, entre x/D=2.0 et 4.0 la vitesse augmente sensiblement et après x/D=4.0 décroît lentement. Les figures indiquées confirment les résultats présentés dans le chapitre précédent pour H/D=1.4 où la vitesse de propagation de la cavité a été influencée par la différence entre les vitesses de l'eau à travers la cavité.

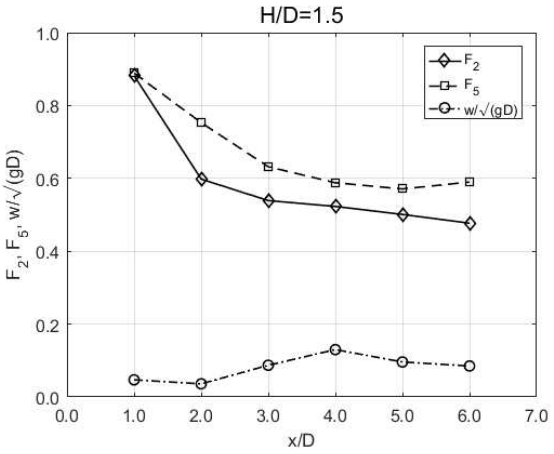



Figure 5.5 $F_2$ en amont, $F_5$ en aval et $w/\sqrt{gD}$ à x/D, pour H/D=1.5

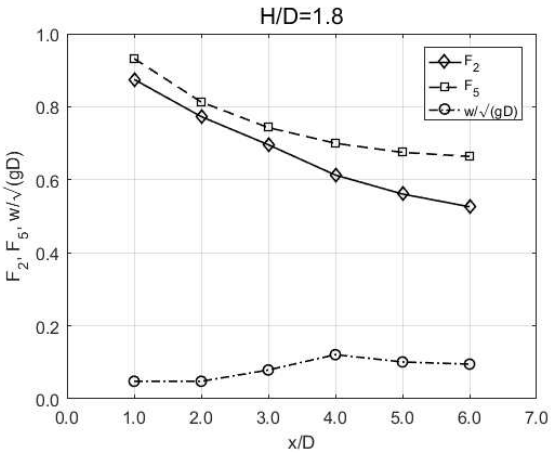



Figure 5.6 $F_2$ en amont, $F_5$ en aval et $w/\sqrt{gD}$ à x/D, pour H/D=1.8

La Figure 5.7 présente la propagation de la cavité au fil du temps pour les trois niveaux d'eau, obtenus à partir de la caméra haute vitesse. Ce graphique montre une tendance de propagation de la cavité similaire pour les trois niveaux d'eau. Cependant, la Figure 5.7 met en évidence que pour un niveau d'eau initial plus élevé, la cavité s'est formée plus tard.

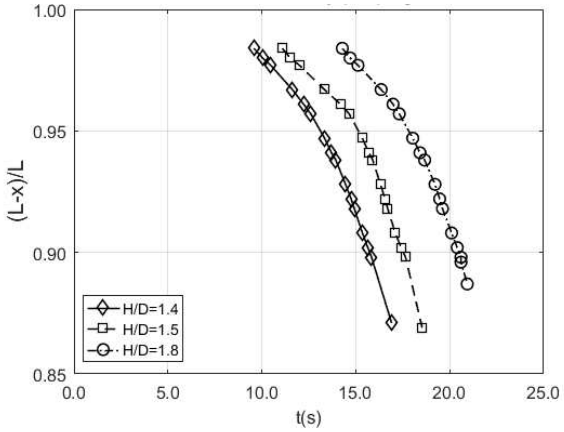



Figure 5.7 Distance de propagation de la cavité

Les tests pour les niveaux d'eau de H/D=1.5 et 1.8 effectués pour le processus de la vidange au laboratoire d'hydraulique du Polytechnique Montréal, ont confirmé les résultats dévoilés dans le chapitre précédant. Les résultats ont montré des différences dans les valeurs du *flow number* entre les expériences et la littérature, car les pertes par frottement n'ont pas été prises en compte dans la théorie. La vitesse de propagation de la cavité a d'abord été lente, mais quand la cavité a progressé, cette vitesse a augmenté, comme indiqué dans le chapitre précédent.

Les données obtenues au laboratoire ont également montré la cohérence, car les graphiques ont exhibé des résultats et des comportements similaires.

# CHAPITRE 6 RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX DES ÉCOULEMENTS TRANSITOIRES IMPLIQUANT UNE POCHE D'AIR EMPRISONNÉE

La première partie de ce chapitre présente la procédure et les résultats des essais de laboratoire réalisés afin d'optimiser et de valider le modèle mathématique élaboré par Tosan, et al. (2021) au Polytechnique Montréal. Les natures de la contribution de l'auteur de cette mémoire pour l'élaboration de l'article développé au Polytechnique Montréal (Tosan et al., 2021) étaient le réglage des équipements et le développement des expériences de laboratoire, l'auteur a également apporté diverses contributions à la présentation des résultats de laboratoire, à la recherche bibliographique et à la rédaction. La modélisation développée simule le comportement de la pression en aval d'un l'écoulement permanent partialement pressurisé, dans une conduite circulaire, où l'air a été emprisonnée à la suite de la fermeture d'une vanne située à l'extrémité aval, comme le montre la Figure 6.1. Le modèle mathématique, qui introduit un facteur de frottement supplémentaire, a été calibré à l'aide des données expérimentales et les résultats ont été analysés et comparés à certains des résultats d'essais développés au laboratoire d'hydraulique du Polytechnique de Montréal.

La deuxième partie de ce chapitre présente les résultats des tests complémentaires effectués au laboratoire d'hydraulique dans le but d'approfondir l'analyse du comportement de l'air emprisonné. Les tests ont été réalisés pour deux cas : un premier cas avec un volume d'air élevé et un deuxième cas avec un volume d'air inférieur. La section pressurisée, ou colonne rigide, avait dans le premier cas une longueur moyenne de $0.41$L qui a produit un volume d'air moyen non dimensionnel de $V_a^* \approx V_a/D^3 \approx 2.11$, où la longueur de la conduite, du réservoir R1 à la vanne V2 en aval, était L=4.73 m., $V_a$ était le volume de l'air attrapé et D était le diamètre (Figure 6.1). Dans le deuxième cas, la longueur moyenne de la colonne rigide était de $0.76$L et le volume d'air attrapé moyen non dimensionnel était de $V_a^* \approx 1.17$.

Les tests, dans les deux cas, ont été effectués pour trois niveaux d'eau dans le réservoir amont (R1), H/D≈0.5, H/D≈2.5 et H/D≈4.5, où H était la hauteur de l'eau mesurée à partir de l'axe de la conduite. Les essais ont été réalisés trois fois pour chaque niveau d'eau afin d'assurer la consistance des résultats.

L'objective de ce chapitre est d'analyser l'effet de l'air emprisonné sur l'onde de pression lorsque la sortie de la canalisation est brusquement fermée. Les résultats ont montré qu'il existe une relation inverse entre la taille de la poche d'air et l'amplitude et la fréquence de l'onde de pression.

## 6.1 Description des expériences en laboratoire

Les expériences ont été réalisées au laboratoire d'hydraulique du Polytechnique Montréal et le modèle physique était tel qu'indiqué à la Figure 6.1. Le système était composé d'un réservoir d'alimentation (R1) et d'une conduite horizontale en PVC transparent (C1) avec SCH 40 et diamètre intérieur D = 100 mm, et la longueur $L_{pipe}$ = 5,06 m. Une vanne (V2) était installée à l'extrémité aval de la conduite C1 afin de complètement bloquer la conduite. Il y avait aussi une autre valve (V1) en amont, qui était totalement ouverte. Le temps de fermeture de la vanne ($t_c$) était de l'ordre de 0,2 à 0,5 s. La pression de l'eau en amont était mesurée par un capteur appelé C1P1, type Hoskin P9-1H1-DN1C0-3 PSI-15V avec une précision de 0,5 % et installé au fond de la conduite. De plus, pour mesurer la pression de l'eau en aval, un capteur appelé C1P5, type Omega PX409-2.5G5V avec une précision de 0,08 %, a été installé au fond de la conduite. En outre, pour mesurer la pression d'air, un capteur nommé C1P6, type de AB (P) 15V avec une précision de 0,5 % a été installé sur la couronne de la conduite à l'extrémité aval. Le débit a été mesuré à l'aide d'un débitmètre électromagnétique (DME1) arkon type MAG910E, avec une précision de 1.0%, installé en amont du réservoir R1 et confirmé par un débitmètre ultrasonique Hedland (DMU1) type HTTF avec une précision de 1,0%, installé sur la conduite (Figure 6.1).

La Figure 6.1 montre l'écoulement permanent dans la conduite C1 pour la condition initiale. La conduite transportait un écoulement pressurisé en amont et un écoulement a surface libre en aval, à noter qu'une cavité stable s'est formée au-dessus du flux de surface libre. Les photos de l'écoulement permanent ont été utilisées dans un logiciel de design assisté par ordinateur (DAO) afin d'obtenir les volumes d'eau et d'air de la cavité. La Figure 6.2 montre en (a) le profil dessiné avec la photo et en (b) la figure 3D obtenu à l'aide du logiciel pour obtenir les volumes air/eau.

Le logiciel LabVIEW a été initialisé avant de fermer de la vanne V2 en aval afin de lire la pression de la conduite dans la condition initiale, ainsi que la répartition de la pression au fil du temps à partir de la fermeture de la vanne.

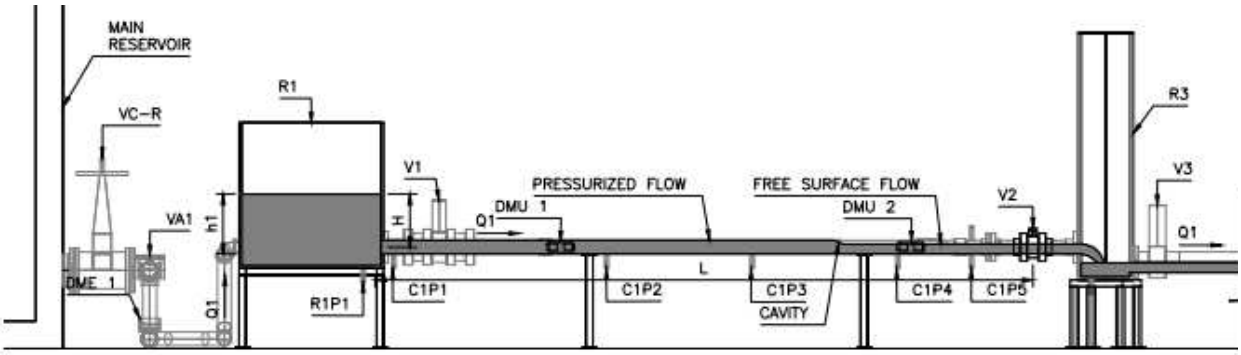
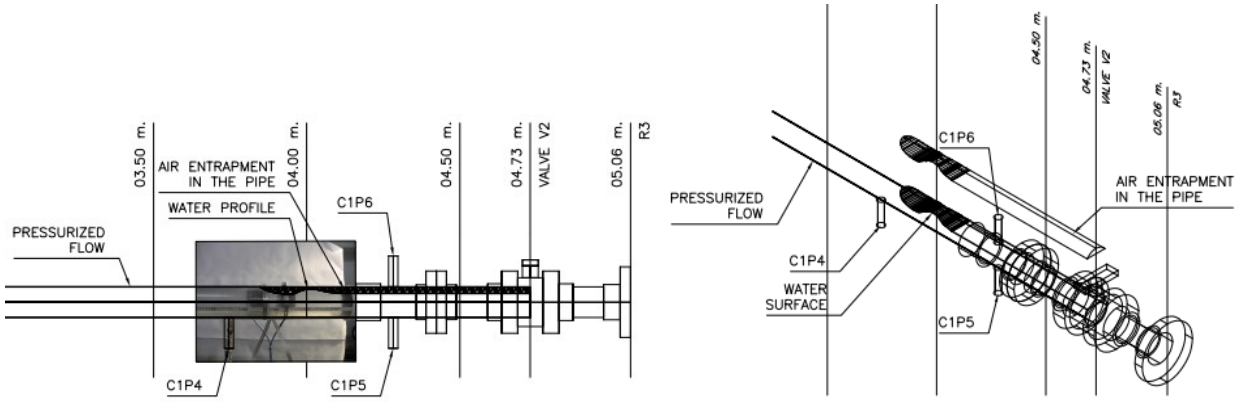



Figure 6.1 Conditions initiales pour l'étude de l'air emprisonné




(a) (b)

Figure 6.2 Dessins obtenues du logiciel DAO. (a) Section de la conduite et (b) Figure 3D

## 6.2 Résultats conservés pour l'étude du facteur de frottement supplémentaire

### 6.2.1 Résultats du laboratoire

Les essais de laboratoire ont été effectués plusieurs fois pour deux débits différents et par conséquent, pour des volumes d'air différents dans la condition initiale. Les données obtenues à partir des appareils de mesure pour un niveau d'eau de $H_{res} = 0.30\ m$, dans le réservoir en amont, ont été conservées pour optimiser et valider le facteur de frottement supplémentaire. Les résultats des essais, pour les cas d'essai développés, sont présentés dans le Tableau 6.1, et les résultats de pression au cours de temps, après la fermeture de la vanne V2, sont présentés dans la Figure 6.3. Les graphiques montrent la répartition de la pression dans le temps, mesurée par le capteur installé en aval de la conduite.

Tableau 6.1 Résultats de laboratoire pour $H_{res} = 0.30\ m$

| Cas | Q (l/s) | Q* | $V_a$ ($m^3$) | $V_a$* | $t_c$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 4.150 | 0.419 | 0.00128 | 1.281 | 0.34 |
| 2 | 4.190 | 0.423 | 0.00105 | 1.047 | 0.44 |
| 3 | 4.180 | 0.422 | 0.00111 | 1.115 | 0.50 |
| 4 | 3.820 | 0.386 | 0.00197 | 1.967 | 0.33 |
| 5 | 3.820 | 0.386 | 0.00217 | 2.174 | 0.56 |
| 6 | 3.800 | 0.384 | 0.00166 | 1.660 | 0.39 |

Où $Q$ est le débit initial à l'état permanent, $Q^* = Q/\sqrt{gD^5}$, $V_a$ est le volume d'air initial emprisonné, $V_a^* = V_a/D^3$, g est l'accélération gravitationnelle, $D$ est le diamètre de la conduite et $t_c$ est le temps de fermeture de la vanne V2 en aval de la conduite.

La Figure 6.3 montre que la distribution de la pression présente une certaine oscillation, qui est clairement causée par le capteur de pression. Cependant, pour le cas 2 et 3, Figure 6.3 (b) et (c), l'oscillation est beaucoup moins intense. Par conséquence, les deux cas ont été sélectionnés pour les analyses du facteur de frottement supplémentaire développés dans l'étude de Tosan et al. (2021).

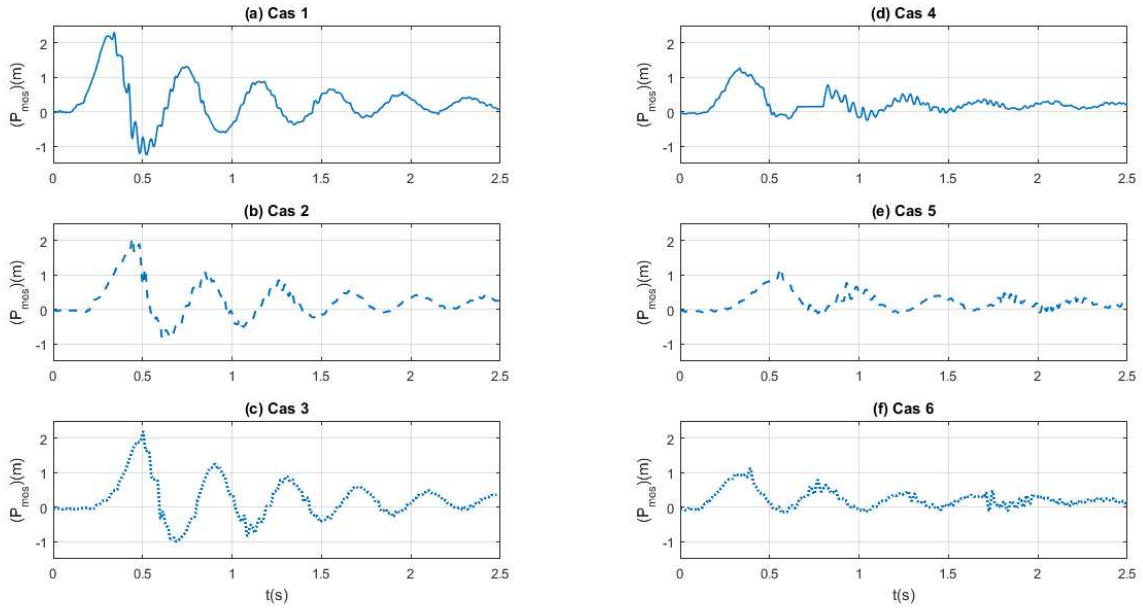



Figure 6.3 Répartition de la pression en aval de la conduite

### 6.2.2 Facteur de frottement permanent de Darcy-Weisbach

Le facteur de frottement permanent de Darcy-Weisbach est une donnée d'entrée importante dans l'étude du facteur de frottement supplémentaire développé par Tosan et al. (2021). Des expériences ont été effectuées au laboratoire du Polytechnique Montréal pour calculer le facteur de frottement permanent de Darcy-Weisbach correspondant au modèle physique. Pour cette raison, l'écoulement permanent pressurisé avec différents débits a été développé expérimentalement et a été mesuré par le débitmètre ultrasonique DMU1. En outre, la perte de charge entre les capteurs C1P1 et C1P5 de la conduite (Figure 6.1) a été calculé. La formule de Darcy-Weisbach qui utilise le facteur de frottement permanent $(f)$ est :

$$h_{fi} = f\frac{L_{pipe}}{D}\frac{V_i^2}{2g} \tag{6.1}$$

où l'indice $(i)$ représente le nombre d'expérience, $D$ est le diamètre de la conduite, $h_{fi}$ est la perte de charge, c'est-à-dire la différence de pression entre C1P1 et C1P5, $L_{pipe}$ est la longueur de la conduite, $V_i$ est la vitesse de l'écoulement mesuré, $g$ est l'accélération gravitationnelle, qui est fixé à $9.81\ m.s^{-2}$.

L'équation (6.1) est simplifié comme :

$$h_{fi} = K_1 V_i^2 \tag{6.2}$$

où $K_1 = f\ L_{pipe}/(D * 2g)$.

La méthode des moindres carrés a été utilisée pour minimiser la somme des pertes de pression expérimentales et numériques calculées par l'Eq. (6.1) entre les capteurs C1P1 et C1P5. L'Équation (6.2) a été réorganisé afin d'appliquer la méthode, comme indiqué ci-dessous :

$$r_i(K_1) = \left[h_{fi} - K_1 * V_i^2\right]^2 \tag{6.3}$$

où l'indice $(i)$ représente le nombre de test et $r_i(K_1)$ est le résidu en fonction de la constante $K_1$.

Les résultats de laboratoire utilisés pour calculer la valeur du facteur de frottement permanent de Darcy-Weisbach (*f*) sont présentés dans le Tableau 6.2.

Tableau 6.2 Résultats de la méthode des moindres carrés

| **Test** | **Q (l/s)** | **$P_{C1P1}$(cm)** | **$P_{C1P5}$(cm)** | **V(m/s)** | $\boldsymbol{h_{fi}^2}$ | $\boldsymbol{2h_{fi}K_1V^2}$ | $\boldsymbol{(K_1V^2)^2}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 5.070 | 10.975 | 8.472 | 0.646 | 0.0006 | -0.021 $K_1$ | 0.1736 $K_1^2$ |
| 2 | 5.350 | 11.493 | 8.835 | 0.681 | 0.0007 | -0.025 $K_1$ | 0.2153 $K_1^2$ |
| 3 | 5.570 | 11.734 | 8.939 | 0.709 | 0.0008 | -0.028 $K_1$ | 0.2530 $K_1^2$ |
| 4 | 5.870 | 12.231 | 9.064 | 0.747 | 0.0010 | -0.035 $K_1$ | 0.3120 $K_1^2$ |
| 5 | 5.980 | 12.458 | 9.100 | 0.761 | 0.0011 | -0.039 $K_1$ | 0.3361 $K_1^2$ |
| 6 | 6.090 | 12.673 | 9.130 | 0.775 | 0.0013 | -0.043 $K_1$ | 0.3615 $K_1^2$ |

où $Q$ est le débit mesuré et $P_{C1Pi}$ est la pression mesuré dans le capteur indiqué.

Comme le montre la Figure 6.4, des expériences avec des vitesses élevées ont été développées car à des vitesses inférieures, l'écoulement devient complètement à surface libre. Notez que la valeur calculée à partir des données du Tableau 6.2 pour la constant est $K_1 = 0.0577$, en conséquence le facteur de frottement en régime permanent est calculé comme $f = 0.0269$.

De plus, en utilisant les valeurs calculées, l'expression (6.4) a été obtenue, qui a été utilisée pour calculer le graphique de la perte de charge par rapport à la vitesse (Figure 6.4).

$$h_{fi} = 0.0577V_i^2 \tag{6.4}$$

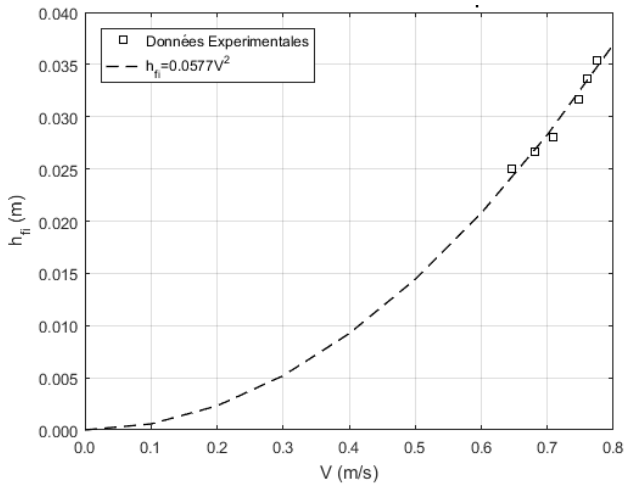
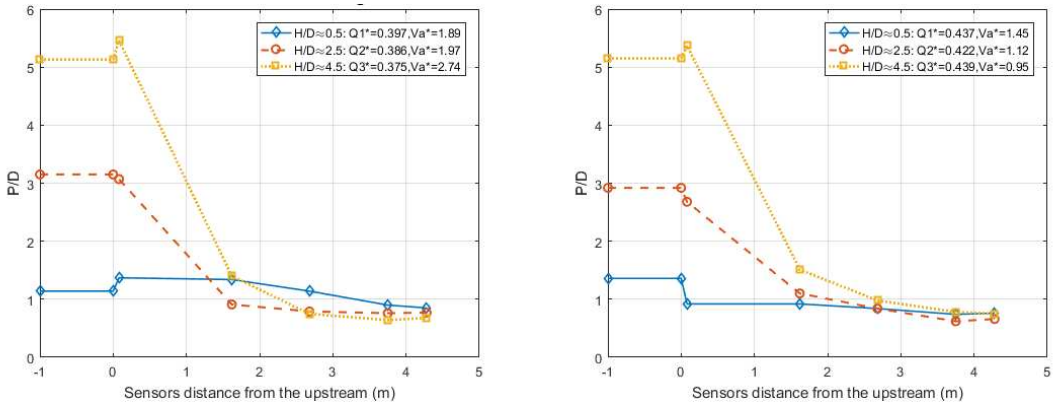



Figure 6.4 Relation entre la perte de charge et la vitesse

## 6.3 Résultats complémentaires pour l'analyse de l'air emprisonné

### 6.3.1 Résultats pour la condition initiale

En condition initiale, l'écoulement est permanent et établit une section pressurisée amont et une section partialement pressurisée en aval, comme le montre le schéma de la Figure 6.1. La variation de la pression (P/D) le long de la conduite dans la condition initiale, pour les deux cas de volume d'air emprisonné ($V_a^*$), est indiquée sur la Figure 6.5. Les résultats pour les différents niveaux d'eau dans le réservoir R1 (H/D) sont représentés sur la même figure.




a) b)

Figure 6.5 Pression initiale le long de la conduite. a) Volume élevé, b) Volume faible

Les résultats de laboratoire dans la condition initiale, reproduits à la Figure 6.5, indiquent que la pression établie par la hauteur d'eau dans le réservoir amont (R1) est réduite le long de la canalisation pour finalement atteindre une valeur inférieure à celle du diamètre (P/D≈0.8), à la fin du conduit. Les résultats présentés à la Figure 6.5 montrent la même tendance dans les deux cas, pour un volume d'air élevé et faible, et pour les trois niveaux d'eau en R1. La pression dans les deux cas diminuait plus rapidement lorsque le niveau d'eau était plus élevé, ceci pour atteindre la valeur de pression à l'extrémité de la canalisation.

Les essais ont montré que la taille de la poche d'air, pour la condition initiale, n'avait pas d'effet très significatif sur la distribution de la pression dans la canalisation pour les différents niveaux d'eau dans le réservoir amont.

### 6.3.2 Hydrogrammes de pression

La fermeture de la vanne V2 en aval de la conduite, a provoqué l'augmentation de la pression au maximum, puis elle a été réduite au minimum. Immédiatement après, la pression a subi une atténuation sinusoïdale pour finalement atteindre une condition de stabilité. Les résultats obtenus en aval de la canalisation sont présentés sur les Figure 6.6, 6.7 et 6.8, où la pression est représentée en fonction du diamètre de la conduite (P/D) au cours du temps (secondes) pour les différents niveaux d'eau dans le réservoir R1, de plus les graphiques sont divisés en fonction du volume d'air emprisonné. Les graphiques montrent les résultats pour les trois expériences menées pour chaque cas (test a, b et c). Il convient de noter que le temps de fermeture de la vanne V2 en aval de la canalisation est légèrement différent pour chaque expérience, ce qui a provoqué un décalage du premier pic de pression.

Les résultats de la Figure 6.6, pour une hauteur d'eau de H/D=0.5 dans le réservoir R1, indiquent que les valeurs des pics de pression en aval de la conduite augmentent lorsque la quantité d'air emprisonnée dans la conduite diminue, indiquant que l'amplitude de l'onde de pression est modifiée par le volume de la poche d'air. Il est également remarquable de noter que, dans le même laps de temps, le nombre de pics est faible lorsque le volume d'air emprisonné est plus important. Par conséquent, la fréquence de l'onde de pression augmente lorsque le volume d'air diminue dans la conduite.

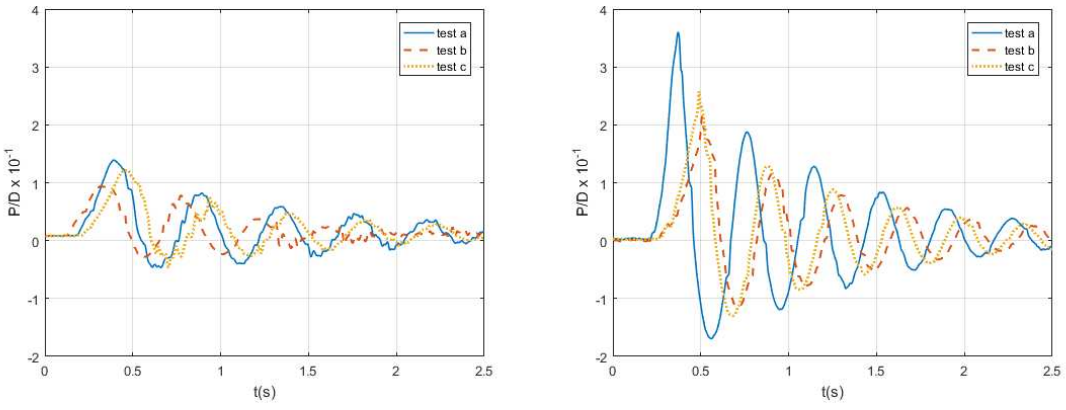
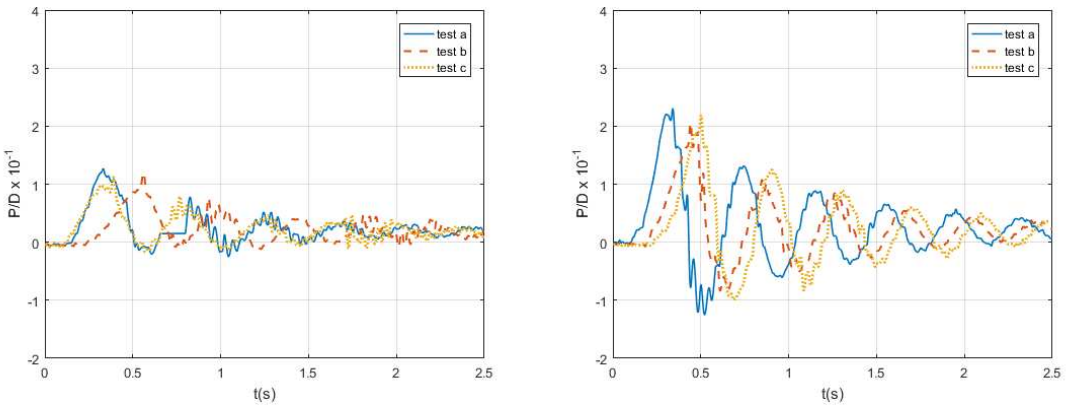



Figure 6.6 Hydrogramme de pression pour H/D=0.5. a) Volume élevé, b) Volume faible

Pour une hauteur d'eau de H/D=2.5, la Figure 6.7 montre que le comportement expérimental de l'amplitude et de la fréquence de l'onde de pression en aval de la conduite sont similaires à ceux de H/d=0.5. Ce scénario confirme que la réduction de la quantité d'air emprisonnée dans la canalisation entraîne l'augmentation de l'amplitude et de la fréquence de l'onde de pression.

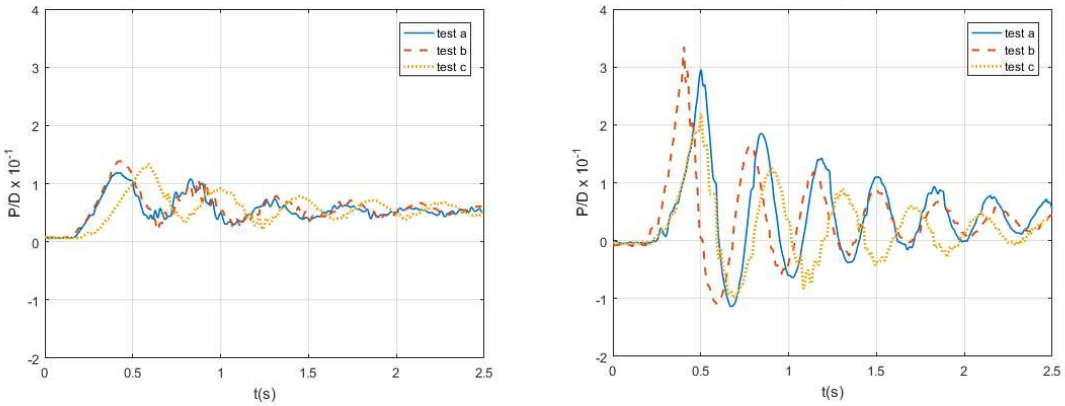
Notez que l'amplitude et la fréquence de l'onde de pression pour une hauteur de H/D=2.5 sont similaires à celles de H/D=0.5 pour un volume de la poche d'air similaire.




a) b)

Figure 6.7 Hydrogramme de pression pour H/D=2.5. a) Volume élevé, b) Volume faible

L'hydrogramme de la Figure 6.8, pour une hauteur d'eau de H/D=4.5 dans R1, met une fois de plus en évidence que la réduction de la taille de la poche d'air dans la canalisation entraîne l'augmentation de l'amplitude et de la fréquence de l'onde de pression en aval de la conduite lors de la fermeture de la vanne en aval.




a) b)

Figure 6.8 Hydrogramme de pression pour H/D=4.5. a) Volume élevé, b) Volume faible

Les tests complémentaires effectués au laboratoire d'hydraulique du Polytechnique Montréal, en vue d'approfondir l'analyse de l'effet de l'air emprisonné sur la distribution de la pression créée par la fermeture soudaine de l'extrémité aval d'une canalisation circulaire, ont permis de mettre en évidence deux résultats. Le premier indique que, dans la condition initiale, le volume de la cavité d'air n'a pas un effet notable sur la distribution de la pression le long de la conduite. Le deuxième expose une relation inverse entre le volume de la poche d'air et l'amplitude et une relation également inverse entre le volume de la poche d'air et la fréquence de l'onde de pression. Les résultats des tests montrent des similitudes avec des expériences développées par des auteurs comme Zhou, F., et al. (2002(a), 2002(b)), Vasconcelos et Leite (2012) et Hatcher, T., et al. (2015).

# CHAPITRE 7 ÉTALONNAGE DES APPAREILS DE MESURE

Les essais réalisés pour le développement de cette étude ont été exécutés sur le modèle physique localisé dans le laboratoire d'hydraulique du Polytechnique de Montréal (Annexe A et B). Les schémas correspondants pour chaque phénomène étudié sont détaillés au CHAPITRE 3 (Figure 3.1 et Figure 3.2). Les analyses ont été effectuées à partir des données provenant des appareils de mesure installés dans le laboratoire. Les instruments ont été sélectionnés pour mesurer des paramètres pertinents pour les écoulements transitoires tels que le débit, la pression, la hauteur de l'eau dans la section à surface libre, la distance et le temps de déplacement de la cavité. Les variables mesurées ont servi de base pour le calcul des paramètres complémentaires pour les analyses comme le *flow number*, la vitesse de propagation de l'onde et la pression négative. Les données obtenues à partir des appareils de mesure ont été enregistrées sur un ordinateur de bureau Dell Intel, le traitement de l'information a été effectué sur un ordinateur portable HP Pavilion et les données ont été analysées à l'aide des logiciels Excel 2016 et Matlab R2016a.

Des informations complémentaires sur les dispositifs de mesure et des variables de la conduite sont présentées dans ce chapitre. D'une part, ce chapitre détaille la procédure et les résultats de l'étalonnage des appareils de mesure utilisés dans les différents types de tests effectués au cours de l'élaboration de la recherche. D'autre part, cette section montre la procédure pour obtenir des variables de la conduite utilisé dans les essais tels que le facteur de friction de Manning et de Darcy-Weisbach.

## 7.1 Appareils de mesure

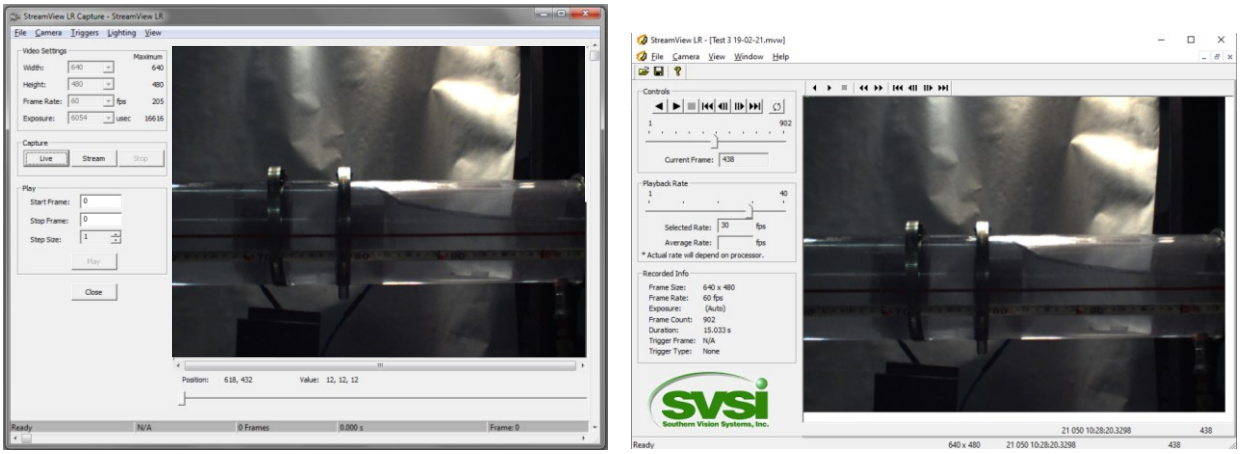
### 7.1.1 Caméra à Haute Vitesse (HV)

La caméra HV est un appareil qui permet d'enregistrer des évènements qui évoluent dans temps, ensuite, les images peuvent être ralenties ou arrêtées. Les écoulements transitoires étudiés au laboratoire du Polytechnique Montréal ont été enregistrés par une caméra HV SVSi qui utilise un logiciel StreamView-LR (Figure 7.1). Les paramètres de la camera HV ont été établis pour une résolution de 640x480 pixels et une vitesse de 60 images par second (ips).

La caméra HV a été installée à l'extrémité aval de la canalisation afin d'enregistrer et ainsi caractériser la propagation, la forme, la vitesse et la hauteur de l'eau dans la cavité qui se forme en aval et qui avance vers l'amont.

Figure 7.1 Caméra à haute vitesse StreamView-LR

Les images prises par la caméra HV sont affichées en temps réel dans une fenêtre de capture où la vidéo est également ajustée et enregistrée. Une fenêtre de visualisation permet d'effectuer les analyses au ralenti ou image par image. Les fenêtres de capture et de visualisation ouvertes sur l'ordinateur sont présentées à la Figure 7.2.




a) b)

Figure 7.2 Fenêtres de la caméra à haute vitesse pour a) la capture et b) la visualisation

### 7.1.2 Niveau numérique

La pente de la conduite C1 a été ajustée et vérifiée chaque jour avant de commencer les tests à l'aide d'un niveau numérique Mastercraft (Figure 7.3). L'appareil est doté d'un écran à cristaux

liquides qui mesure le niveau et affiche le résultat en différentes unités (%, degrés ou pouces) avec une précision de 0 à 90°= ±0,1°.

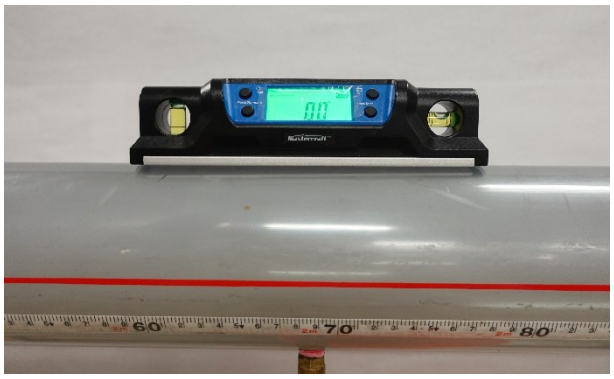


Figure 7.3 Niveau numérique Mastercraft

### 7.1.3 Débitmètres

- Le débitmètre ultrasonique Hedland de type HTTP, illustré à la Figure 7.4, comprend deux transducteurs installés sur le conduit, lesquels émettent et reçoivent l'ultrason. L'appareil calcule la vitesse du liquide à l'aide de la mesure des ondes et cette vitesse est utilisée pour obtenir le débit dans le conduit. Deux débitmètres Hedland ont été installés sur la canalisation, le premier en amont et le deuxième en aval.

a) b)

Figure 7.4 Débitmètre ultrasonique Hedland HTTP. a) boîtier de l'émetteur, b) transducteurs

Le comportement du débit au cours du temps est affiché sur l'ordinateur par la fenêtre de visualisation indiquée sur la Figure 7.5. L'heure affichée est utilisée pour déterminer le débit dans chaque étape du phénomène.

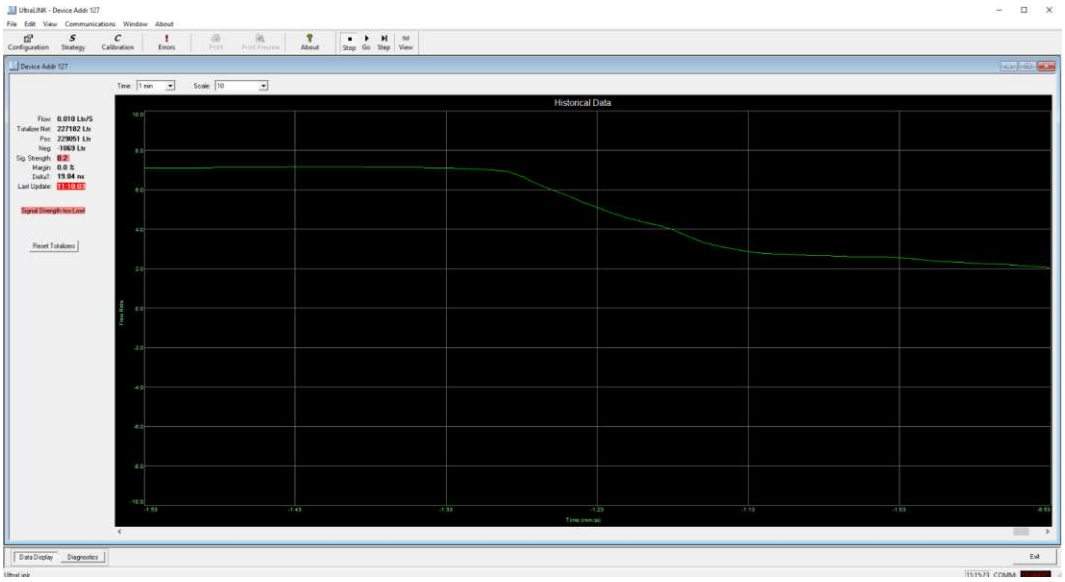



Figure 7.5 Fenêtre d'affichage du débit en temps réel (HTTP)

- Le débitmètre électromagnétique Arkon de type Mag910E (Figure 7.6) est un instrument qui montre et enregistre le débit instantané et total du milieu conducteur traversant le capteur. Le débitmètre DN100, installé au laboratoire, est conçu pour garantir une précision de 0,5 % dans une range de débit entre 0.8 et 78,5 l/s. Le débitmètre Mag910E a été placé en amont du réservoir R1 et a permis de mesurer le débit sortant du réservoir principal.

Figure 7.6 Débitmètre électromagnétique MAG910E

### 7.1.4 Capteurs de pression

Les capteurs sont des appareils qui transforment la pression mesurée en un signal électrique proportionnelle à la pression. Les informations provenant des capteurs de pression ont été traitées par le logiciel d'acquisition de données LabView. Les dispositifs pour enregistrer la pression ont été installés sur le fond, en plusieurs points le long de la conduite et dans les réservoirs, comme le montre la Figure 7.7. L'emplacement des capteurs installés dans le montage de laboratoire du Polytechnique Montréal est indiqué dans les annexes.

Le système de mesure de la pression de la conduite comprenait quatre capteurs de pression Omega de type PX409-2.5G5V, dont la gamme de pression était comprise entre 0 et 2,5 psi et la précision était de 0,08 % et un capteur Hoskin de type P9-1H1-DN1C0-3PSI-15V avec une gamme de pression entre 0 et 3,0 psi et une précision de 0,5 %. De plus, un capteur Omega de type PX-603-015G5V était installé dans le réservoir R1, dont le range de pression était comprise entre 0 et 15 psi et la précision était de ±0,4 %.

Figure 7.7 Capteur de pression sur le fond du conduit

### 7.1.5 Logiciel LabView

LabView est un logiciel qui contient un langage de programmation graphique qui utilise des icônes pour créer le code qui effectue l'acquisition et la présentation des données obtenues par les appareils de mesure, dans ce cas les capteurs de pression. Les données des capteurs de pression sont affichées sur une interface d'utilisateur ou *Face-avant* qui affiche les données en temps réel.

La disposition de la *Face-avant* illustrée dans la Figure 7.8 doit être configurée par l'utilisateur. Ensuite, le logiciel ajoute le code dans un diagramme comme dans la Figure 7.9, en utilisant les outils graphiques. La *Face-avant* créée pour l'étude comprend un graphique de la pression pour les capteurs situés sur la canalisation et un graphique pour les capteurs des réservoirs. Les résultats de la pression sont enregistrés sur l'ordinateur dans un type de fichier qui est compatible avec Excel.

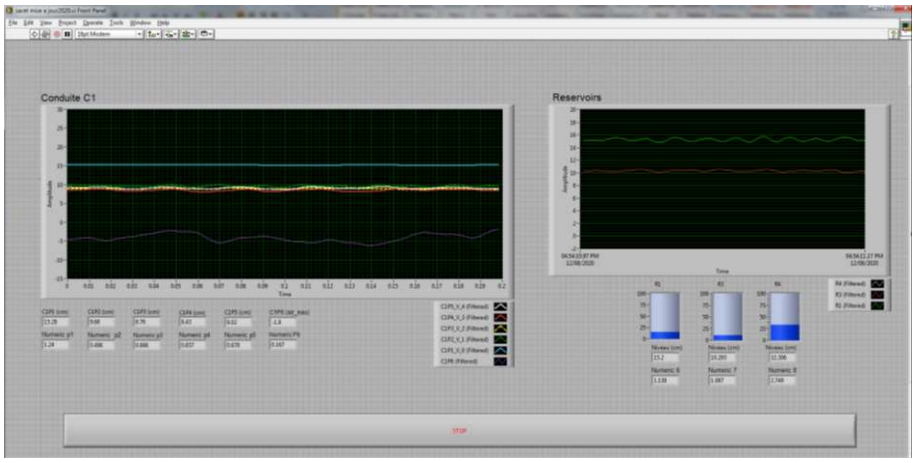



Figure 7.8 Interface utilisateur de VI ou *Face-avant*

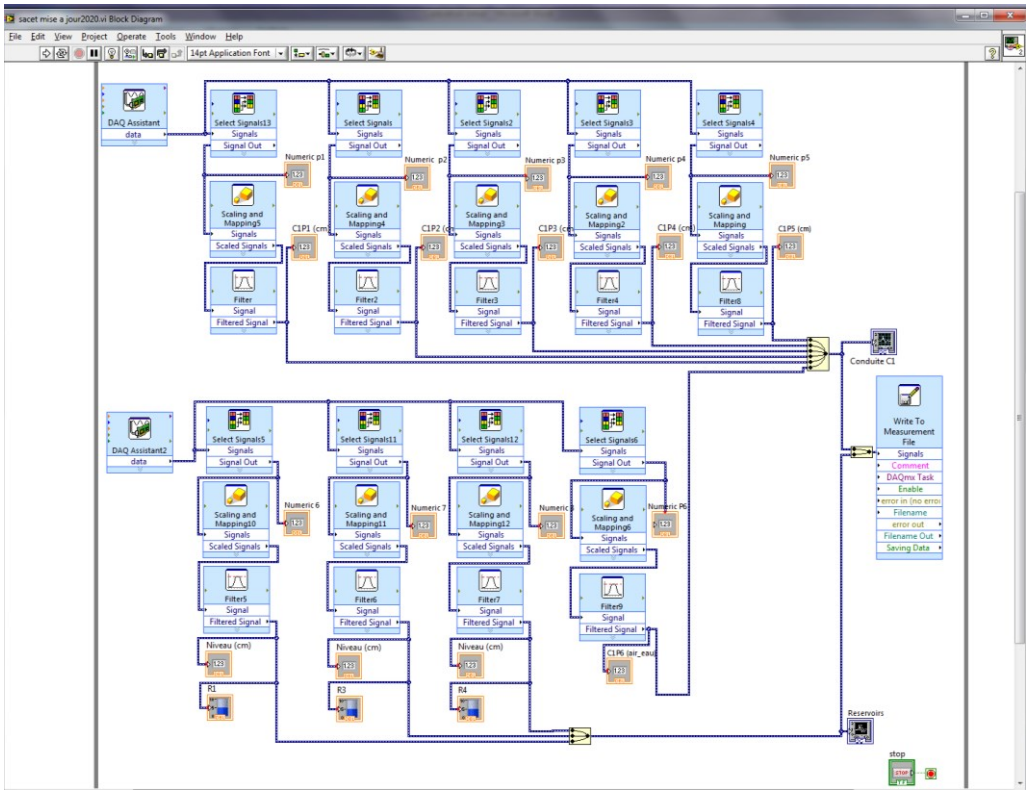



Figure 7.9 Diagramme du VI avec le code graphique

## 7.2 Étalonnage des appareils de mesure

L'étalonnage des appareils de mesure a été vérifié afin d'assurer la qualité des résultats obtenus au laboratoire.

### 7.2.1 Étalonnage des débitmètres

Le fabricant du débitmètre électromagnétique Mag910E indique que l'appareil a été livré prêt à l'emploi après avoir été branché, mais si les valeurs de calibration sont modifiées les données mesurées seront changées, donc la calibration du débitmètre doit être exécutée dans un laboratoire convenablement équipé.

Les paramètres des débitmètres ultrasoniques HTTP ont été ajustés dans la fenêtre de configuration montrée à la Figure 7.10.

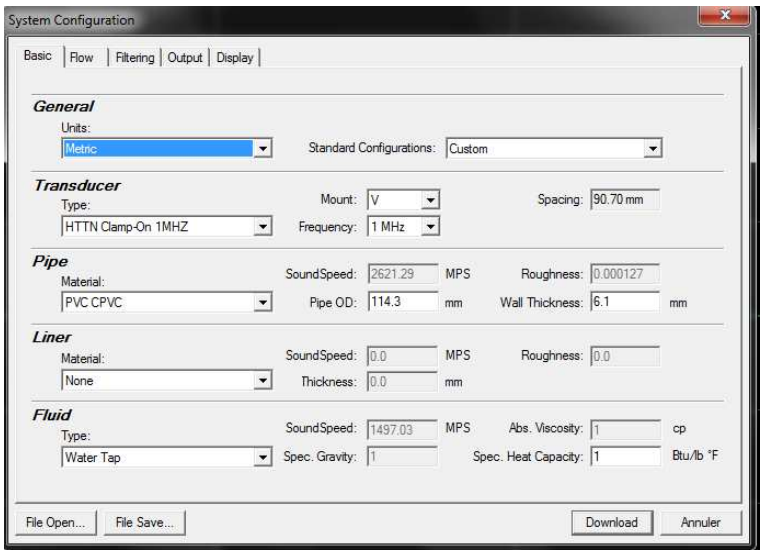



Figure 7.10 Fenêtre de configuration des paramètres du débitmètre Hedland

L'étalonnage du débitmètre a été effectué dans la fenêtre de calibration en trois étapes : premièrement, la canalisation est pleine et le débit nul est enregistré, deuxièmement, les unités d'étalonnage sont sélectionnées et enfin un débit de point permanent connu, circulant par le système, est enregistré dans la fenêtre de calibration observée sur la Figure 7.11.

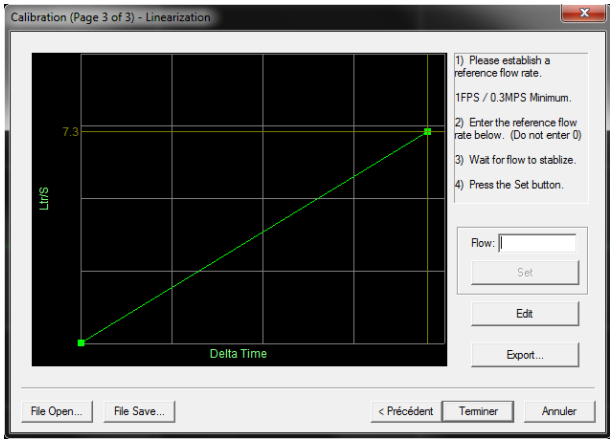



Figure 7.11 Fenêtre de calibration du débitmètre Hedland

### 7.2.2 Courbes d'étalonnage des capteurs de pression

L'étalonnage des capteurs de pression a été réalisée dans une colonne d'eau calibrée, en utilisant plusieurs hauteurs du liquide. Les différents niveaux d'eau mesurés dans la colonne d'eau ont généré une tension équivalente qui a été enregistrée dans le logiciel LabView.

Les données extraites de la colonne d'eau ont été représentées graphiquement (Figure 7.12) afin de connaitre la tendance de la tension par rapport à la hauteur de pression hydraulique pour chaque capteur de pression. Les résultats indiquent que les données s'approximent par des lignes droites, dont les équations obtenues par régression linéaire sont présentées sur la même figure. Les valeurs des équations pour chaque capteur de pression ont été insérées dans le logiciel LabView.

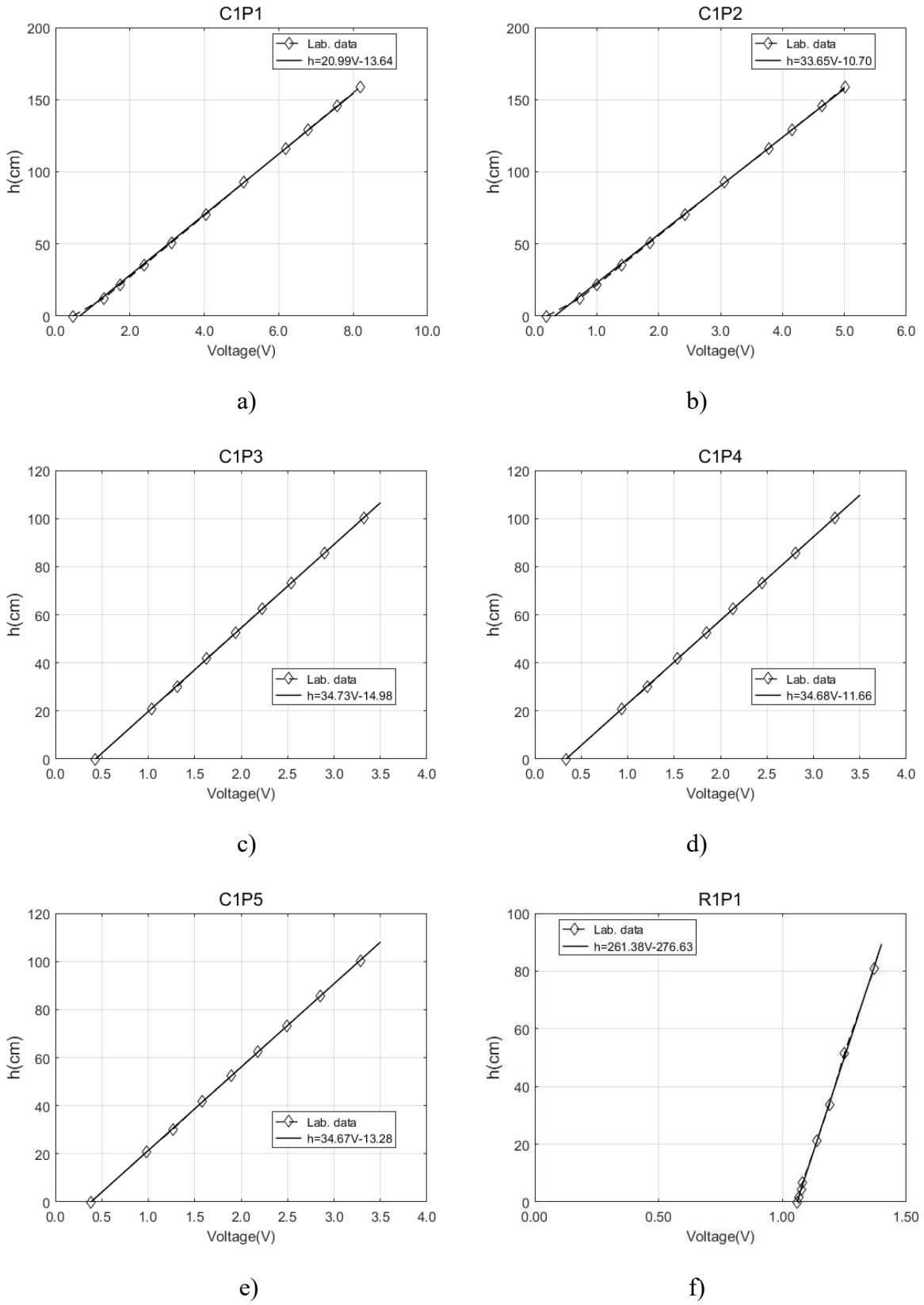



Figure 7.12 Courbe d'étalonnage pour les capteurs de pression

### 7.2.3 Étalonnage des capteurs de pression

Les données d'étalonnage des capteurs de pression ont été introduites au logiciel à l'aide du diagramme de VI (Figure 7.9). La Figure 7.13 montre la fenêtre de configuration où les équations des lignes droites (Figure 7.12) ont été incluses pour chaque capteur de pression et la Figure 7.14 présente les lectures de pression pour le débit nul sur la *Face-avant*, ceci après étalonnage. L'étalonnage des capteurs de pression a été vérifié chaque jour avant les tests. Si la calibration avait besoin des ajustements, l'ordonnée à l'origine (b) était modifiée.

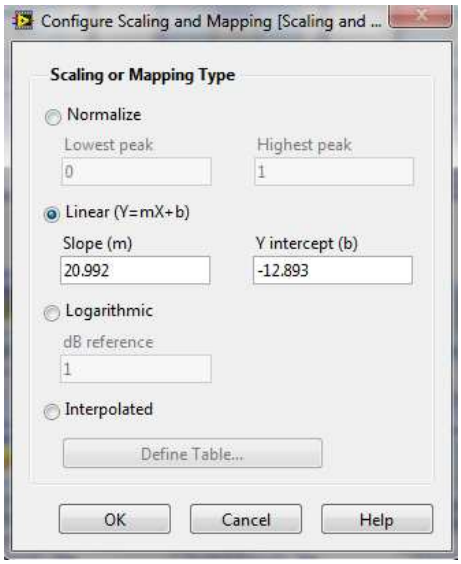



Figure 7.13 Fenêtre de configuration des données de l'étalonnage pour les capteurs

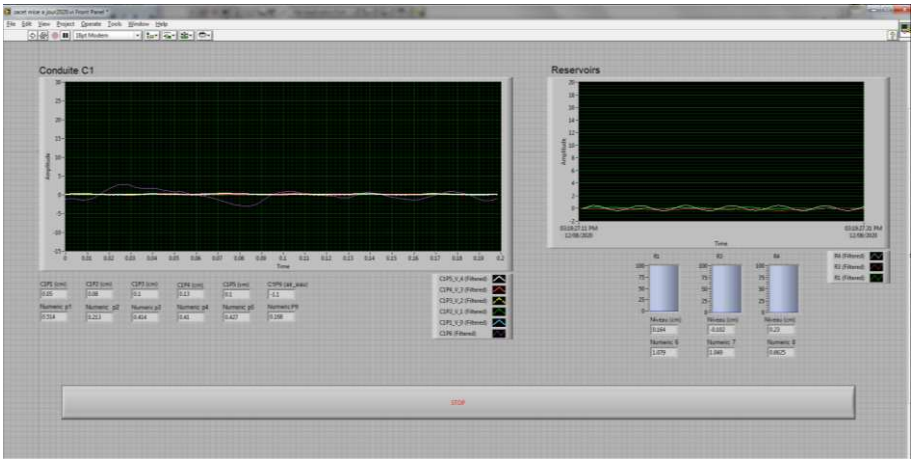



Figure 7.14 Interface utilisateur de VI (*Face-avant*) après l'étalonnage

### 7.2.4 Calcul d'incertitudes

L'incertitude de mesure des capteurs de pression est calculée pour indiquer la qualité des résultats et ainsi augmenter la confiance dans la validité des informations provenant des appareils de mesure. L'incertitude de mesure définie la plage des valeurs que la grandeur à mesurer pourrait prendre. Les capteurs de pression installés au laboratoire mesurent la hauteur de l'eau dans la conduite et dans les réservoirs en centimètres d'eau.

Les sources possibles d'incertitude dans le mesurage à l'aide des capteurs de pression sont la sensibilité et l'hystérésis de l'appareil, la précision du logiciel d'acquisition, les possibles erreurs de calibration, les biais lors de la lecture d'instruments analogiques ou la non-linéarité des lectures.

L'incertitude a été déterminée par l'analyse statistique de séries d'observations en utilisant l'expression suivante (BIPM, 2008) :

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^{N} \left(\frac{\partial f}{\partial x_i}\right)^2 u^2(x_i) \tag{7.1}$$

Où $y$ est l'estimation de la grandeur à mesurer, $f$ est une fonction qui détermine $y$ à partir des estimations d'entrée $x_1, x_2, \ldots, x_n$, $u(x_i)$ est l'écart type estimé ou incertitude type de chaque estimation $x_i$, $u_c^2(y)$ est la variance composée de $y$ et $u_c(y)$ est l'incertitude-type composée du paramètre $y$. Notez que la grandeur à mesurer par les capteurs de pression est la hauteur de l'eau et les estimations d'entrée sont les tensions enregistrées dans le logiciel LabView pour chaque capteur sur une période de temps.

Les incertitudes sont estimées à partir des équations des lignes droites pour les capteurs de pression (Y=aX+b), donc :

$$u_c^2(y) = u_a^2 \left(\frac{\partial Y}{\partial a}\right)^2 + u_X^2 \left(\frac{\partial Y}{\partial X}\right)^2 + u_b^2 \left(\frac{\partial Y}{\partial a}\right)^2 = u_a^2 X^2 + u_X^2 a^2 + u_b^2 \tag{7.2}$$

Où les écarts type pour $u_a$, $u_b$ et $u_X$ sont (Bousso, 2010):

$$u_a = \sqrt{\frac{\frac{1}{N-2}\sum_{i=1}^{N}(Y_i - \bar{Y})^2}{\sum_{i=1}^{N}(X_i - \bar{X})^2}} \tag{7.3}$$

$$u_b = \sqrt{\frac{\frac{1}{N-2}\sum_{i=1}^{N}(Y_i - \bar{Y})^2}{\frac{1}{N} + \frac{\bar{X}^2}{\sum_{i=1}^{N}(X_i - \bar{X})^2}}} \tag{7.4}$$

$$u_X = 2\sigma + u_h + u_{syst} \tag{7.5}$$

Les estimations d'entrée ($U_i$) pour calculer la grandeur à mesurer sont présentées en annexe D. Les moyennes des estimations d'entrée ($U_{moy}$), les écarts types (σ) des $U_{moy}$, les écarts dus à l'hystérésis de chaque instrument ($u_h$) et à la précision du système ($u_{sys}$), ainsi comme l'estimation de l'incertitude type composée ($u_y$) pour chaque capteur de pression est présenté dans le Tableau 7.1. Les appareils qui étaient installées dans la conduction montrent des résultats acceptables, sauf pour le capteur du réservoir R1. Pour cette raison, les mesures prises par une colonne d'eau calibrée, dans le réservoir R1, ont été conservées et les mesures prises par l'appareil R1 sont données à titre indicatif. A noter que le capteur de pression qui présente le meilleur résultat est le C1P5, qui mesure la pression dans la cavité d'air en aval de la conduite002E

Tableau 7.1 Calculs des incertitudes

| **Paramètre** | **C1P1** | **C1P2** | **C1P3** | **C1P4** | **C1P5** | **R1** |
|---|---|---|---|---|---|---|
| A | 20.9921 | 33.6504 | 34.7344 | 34.6836 | 34.6660 | 261.3839 |
| B | -3.985 | -3.364 | -2.622 | -2.502 | -3.502 | -276.629 |
| $U_{moy}$(V) | 1.2807 | 1.1826 | 0.9704 | 1.2651 | 1.7484 | 1.2397 |
| σ(V) | 0.0016 | 0.0005 | 0.0014 | 0.0012 | 0.0012 | 0.0012 |
| H(cm) à $U_{moy}$ | 22.9 | 36.4 | 31.1 | 41.4 | 57.1 | 47.4 |
| V de sortie $U_s$ | 10 | 10 | 10 | 10 | 10 | 5 |
| $u_h$ = %$U_S$ | 0.05 | 0.008 | 0.008 | 0.008 | 0.008 | 0.01 |
| $u_{syst}$ | 0.05 | 0.008 | 0.008 | 0.008 | 0.008 | 0.01 |
| $u_X$ | 0.1031 | 0.0171 | 0.0187 | 0.0183 | 0.0184 | 0.0224 |
| $u_a$ (V) | 3.369E-01 | 5.401E-01 | 2.948E-01 | 2.779E-01 | 2.953E-01 | 2.251E+00 |
| $u_b$ (V) | 1.379E-04 | 1.715E-05 | 2.462E-04 | 1.407E-04 | 9.951E-05 | 9.139E-04 |
| $u_Y$(cm) | 2.21 | 0.86 | 0.71 | 0.73 | 0.82 | 6.48 |
| $u_Y$ (%) | 9.6 | 2.4 | 2.3 | 1.8 | 1.4 | 13.7 |

## 7.3 Mesure du coefficient de frottement de Darcy-Weisbach

Le coefficient de frottement en régime permanent de Darcy-Weisbach pour l'expérience de l'écoulement transitoire impliquant une poche d'air emprisonné a été obtenu dans le CHAPITRE 6. Le schéma du montage de laboratoire dans lequel le coefficient a été calculé est présenté sur la Figure 3.1 et la valeur calculée était $f = 0.0269$.

Le coefficient de Darcy-Weisbach pour l'étude du front d'onde dans le processus de vidange était différent, puisque le montage a légèrement changé. Dans les deux expériences, le paramètre a été calculé à l'aide des capteurs C1P1 (amont) et C1P5 (aval). Cependant, pour le processus de vidange, le capteur C1P5 a été déplacé vers l'extrémité aval en augmentant la distance de la conduite (Figure 3.2).

La procédure de laboratoire afin d'obtenir le coefficient de Darcy-Weisbach dans le montage configuré pour l'étude du processus de vidange était le même que pour l'étude d'une poche d'air emprisonné. Le coefficient de frottement en régime permanent a également été calculé par la méthode des moindres carrés et le résultat obtenu était $f = 0.0279$. Les données de laboratoire et l'équation obtenue avec le *f* calculé sont montrées à la Figure 7.15.

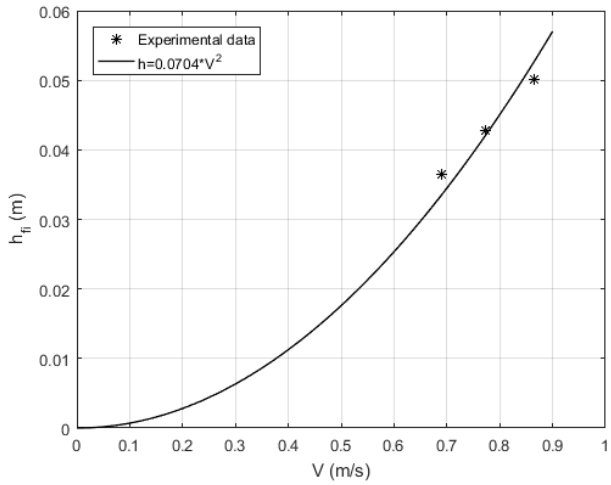



Figure 7.15 Perte de charge en fonction de la vitesse

# CHAPITRE 8 DISCUSSION GÉNÉRALE

La revue de la littérature a classé les écoulements transitoires en fonction du flux perturbé, a décrit en termes généraux le processus qui déclenche le phénomène, a souligné le mécanisme de fonctionnement et les conséquences des perturbations du flux. Également, dans ce chapitre, il a été montré que les écoulements transitoires ont été analysés à l'aide de différents tests de laboratoire et que plusieurs auteurs ont créé de modèles mathématiques pour étudier théoriquement le phénomène.

La revue de la littérature a permis de comprendre que le processus de remplissage des conduites qui crée des ondes de pressurisation a été privilégié par les chercheurs et que les écoulements qui provoquent des fronts d'onde de dépressurisation ont été analyses principalement pour les écoulements permanentes. Les chercheurs des fronts de dépressurisation ont développé des expériences où :

- Une canalisation, initialement remplie et à débit nul, crée une cavité d'air qui se déplace en amont après l'ouverture de la conduite.
- Une canalisation crée une cavité d'air stagnante au même temps qu'il transporte un écoulement permanent partialement pressurisé et le débit est réduit par étapes.

Les expériences de laboratoire développés dans le cadre de cette recherche ont été réalisés pour le processus de vidange dans une conduite circulaire, afin d'étudier l'écoulement transitoire de fronts d'onde de dépressurisation. Les résultats ont montré qu'une pression négative s'est développée dans la section remplie d'eau de la conduite, comme rapporté dans la littérature. D'autre part, la pression à l'intérieur de la cavité d'air était négative, contrairement aux cas étudies par d'autres chercheurs où la pression dans la cavité était atmosphérique. Des différences ont également été observées avec les investigateurs dans le *flow number*, induites par les pertes de charge.

Également, des essais impliquant une poche d'air emprisonné ont été développés afin d'optimiser un facteur de frottement supplémentaire implémenté dans un modèle mathématique développé au Polytechnique de Montréal. Dans les expériences, la canalisation transportait un écoulement permanent partialement pressurisé et une poche d'air a été emprisonnée lors de la fermeture d'une vanne en aval. Les résultats ont contribué à la validation du modèle mentionné et ont également permis d'étudier l'effet de l'air emprisonné, confirmant les résultats trouvés dans la littérature.

# CHAPITRE 9 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

## 9.1 CONCLUSION

Les écoulements transitoires sont créés dans les réseaux du drainage urbain lorsque les conditions de conception sont modifiées. Le changement de ces conditions augmente la probabilité de provoquer la mise en charge de la canalisation qui se traduit par la pressurisation du système, tandis que le retour aux conditions de conception détermine la dépressurisation de la conduite. La mise en charge de la canalisation crée une onde qui augmente la pression expulsant l'air emprisonnée, tandis que la réduction du débit modifie la pression à l'intérieur de la canalisation permettant à l'air d'entrer dans la conduite, ce qui déclenche un front d'onde de dépressurisation, provoquant le passage du fluide à un écoulement à surface libre. Les écoulements transitoires sont responsables de la modification de la pression et de la vitesse de l'eau qui coule dans les réseaux de drainage, pouvant endommager des structures hydrauliques, des infrastructures, des biens matériels voire même mettre des êtres humains en danger.

Des variables d'un écoulement transitoire généré par la vidange d'une conduite qui transportait initialement un écoulement permanent ont été observées et analysées au laboratoire. L'écoulement transitoire produit par le blocage d'une vanne en aval dans une conduite circulaire incluant une poche d'air à l'extrémité, a également été observé expérimentalement. À la suite de tests, plusieurs données pertinentes ont été obtenues pour calculer et calibrer un nouveau facteur de frottement où l'effet de l'air emprisonné a été pris en compte.

Les expériences ont été menées au laboratoire d'hydraulique du Polytechnique de Montréal. Le montage était composé de deux réservoirs reliés par une conduite horizontale circulaire en PVC transparent. Le système était alimenté par le réseau de l'université et la majorité de l'eau a été réutilisée grâce à une pompe de recirculation.

Le front d'onde de dépressurisation a été étudié par plusieurs chercheurs d'un point de vue théorique et expérimental. Cependant, la dynamique de la cavité d'air a été analysée notamment pour deux cas : d'une part pour des conditions initiales dans lesquelles le fluide est stocké dans la canalisation, autrement dit, le liquide est initialement au repos et, d'autre part, pour des conditions dans lesquelles la cavité a été formée à partir d'un écoulement permanent.

L'analyse de la cavité d'air de dépressurisation a été développée différemment, à travers des expériences de laboratoire où un débit initial permanent, remplissant une conduite horizontale, diminue continuellement lorsque l'alimentation d'eau est coupée. La cavité d'air a été formée à l'extrémité aval de la canalisation et s'est propagée vers l'amont.

Les résultats du laboratoire ont montré qu'un écoulement permanent, suffisamment fort pour maintenir la canalisation entière pleine d'eau, crée une pression négative à l'intérieur, comme l'indiquent les recherches précédentes. Cependant, la littérature ne met pas en évidence, comme dans les tests effectués, que la ligne de pression augmente pour atteindre le niveau de l'eau dans le réservoir en amont, ce qui est lié aux pertes de charge.

Les mesures de pression ont permis de constater que lorsque le front d'onde apparaît dans la conduite, une pression négative se forme à l'intérieur de la cavité. Lorsque la cavité d'air se propage en amont, la pression négative augmente progressivement, autrement dit, la mesure de la pression se rapproche du niveau de la surface de l'eau. Au contraire, la littérature indique que la pression à l'intérieur de la cavité est atmosphérique, cependant, cela se produit dans le cas d'une cavité stagnante.

Les expériences de laboratoire ont révélé que la pression à l'intérieur de la canalisation, dans la section pressurisée devant le front d'onde, reste presque constante, mettant en évidence que l'effet des pertes de charge est moins important que l'effet de la pression négative pendant la progression de la cavité.

Certains chercheurs ont indiqué dans le passé qu'une section hydrostatique est formée en aval d'une cavité stagnante, cependant, le point de départ de cette section n'a pas été signalé. Les données obtenues par des appareils de mesure et des caméras ont aidé à vérifier que la section hydrostatique se forme depuis une distance d'un diamètre à partir de la tête de la cavité et continue jusqu'à l'extrémité aval de la conduite.

Les pertes de charge ont également eu un effet sur le débit qui crée la cavité d'air qui s'est propagée à l'intérieur de la conduite. Les résultats de laboratoire pour le *flow number*, lorsque la tête de la cavité atteint des distances différentes de l'extrémité aval de la conduite, ont montré des divergences avec les valeurs des flow numbers tels que donnés dans la littérature ; ceci étant attribuable aux pertes de charge qui ne sont pas prises en compte dans ces études.

L'air emprisonné par la fermeture brusque d'une vanne en aval d'une canalisation horizontale partiellement pressurisée, laquelle coule à débit permanent, a permis d'étudier les effets du coefficient du frottement de la conduite. Ainsi, une formulation qui comprend le coefficient du frottement permanent de Darcy-Weisbach (D-W) et un facteur de frottement non permanent supplémentaire a été développé afin d'améliorer les prédictions de pression. Les résultats de laboratoire ont apporté des données qui ont aidé à calibrer les paramètres pertinents des modèles mathématiques, ainsi qu'à vérifier la précision des résultats obtenus à partir des modèles informatiques.

L'expression obtenue a été testée pour différentes conditions initiales en utilisant deux modèles mathématiques appelés la colonne rigide (RC) et la méthode des caractéristiques (MOC). Les résultats de la formulation utilisée dans les modèles montrent que les deux coefficients de frottement (D-W et non permanent proposé) ensemble prédisent les pics de pression et leur atténuation plus proche des données expérimentales. Pour le cas d'un niveau d'eau initial bas dans le réservoir en amont, le coefficient proposé modifiait le comportement de l'atténuation, tandis que si le niveau initial d'eau était élevé, ce coefficient augmentait le déphasage. Les résultats les plus proches des données expérimentales ont été obtenus avec le modèle MOC.

De plus, les essais de laboratoire ont mis en évidence l'importance de l'effet de l'air emprisonné dans les écoulements transitoires. Les résultats ont permis de valider les chiffres trouvés dans de la littérature selon lesquels un volume initial d'air emprisonné réduit, lors de la fermeture de la conduite aval, provoque un premier pic de pression élevé et, au contraire, un volume initial d'air élevé occasionne un premier pic de pression plus faible. Les résultats ont également montré l'effet sur la vitesse d'onde de pression, car une petite cavité d'air emprisonnée a provoqué un plus grand nombre de cycles qu'une cavité plus grande dans la même période de temps. En outre, les tests ont montré qu'une cavité d'air plus grande entraîne un amortissement des ondes de pression plus élevées, atteignant un état stable plus rapide par rapport à une cavité de volume inférieur.

## 9.2 RECOMMANDATIONS

Dans le futur, le travail consistera à utiliser les données obtenues au laboratoire, pour les différentes conditions initiales, dans des modèles numériques qui simulent le comportement de l'air emprisonné et du front d'onde de dépressurisation, afin d'améliorer la compréhension et d'augmenter la précision dans la prédiction du comportement des phénomènes transitoires étudiés.

Le volet expérimental présente plusieurs possibilités de recherche qui ouvrent des possibilités d'augmenter les cas de conditions initiales et d'obtenir plus de résultats applicables aux réseaux de drainage urbain, pour exemple :

- Examiner l'effet d'une conduite plus longue sur divers paramètres de la cavité qui se propage pendant le processus de vidange.
- Explorer le comportement de l'onde de dépressurisation dans le processus de vidange de conduites de diamètres, de pentes ou de matériaux différents.
- Étudier la dynamique de la cavité d'air pendant le processus de vidange, dans une conduite avec une section autre que circulaire.

# LISTE DE RÉFÉRENCES


Adamkowski, A., & Lewandowski, M. (2006). Experimental examination of unsteady friction models for transient pipe flow simulation. *Journal of Hydraulic Engineering, 128*(6), 1351-1363 doi:doi.org/10.1115/1.2354521

Alves, I. N., Shoham, O., & Taitel, Y. (1993). Drift velocity of elongated bubbles in inclined pipes. *Chemical engineering science, 48*(17), 3063-3070. doi:doi.org/10.1016/0009-2509(93)80172-M

Bashiri-Atrabi, H., Hosoda, T., & Shirai, H. (2016). Propagation of an Air-Water Interface from Pressurized to Free-Surface Flow in a Circular Pipe. *Journal of Hydraulic Engineering, 142*(12). doi:10.1061/(asce)hy.1943-7900.0001200

Bashiri, H., Shirai, H., Hosoda, T., & Karney, B. (2020). Experimental and numerical simulation of bidirectional propagation of an air cavity. *Journal of Hydraulic Research, 58*(4), 638-652. doi:10.1080/00221686.2019.1661290

Benjamin, T. B. (1968). Gravity currents and related phenomena. *Journal of Fluid Mechanics, 31*(2), 209-248. doi:doi.org/10.1017/S0022112068000133

Bennis, S. (2014). *Hydraulique et hydrologie*: PUQ.

Bergant, A., Simpson, A. R., & Tijsseling, A. S. (2004). *Water hammer with column separation: a review of research in the twentieth century*: Eindhoven University of Technology, Department of Mathematics and Computer ….

Bergant, A., Simpson, A. R., & Tijsseling, A. S. (2006). Water hammer with column separation: A historical review. *Journal of Fluids and Structures, 22*(2), 135-171. doi:10.1016/j.jfluidstructs.2005.08.008

Besharat, M., Coronado-Hernández, O. E., Fuertes-Miquel, V. S., Viseu, M. T., & Ramos, H. M. (2018). Backflow air and pressure analysis in emptying a pipeline containing an entrapped air pocket. *Urban Water Journal, 15*(8), 769-779. doi:10.1080/1573062x.2018.1540711

BIPM. (2008). Évaluation des données de mesure - Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure. Première édition. Tiré de www.bipm.org

Bousso, S. (2010). *Modélisation expérimentale des écoulements transitoires avec poches d'air emprisonnées dans les réseaux de drainage urbain.* (École Polytechnique de Montréal).

Bousso, S., Daynou, M., & Fuamba, M. (2014). Mixed flows with depressurizing wavefront in circular pipe. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 140*(1). doi:10.1061/(asce)ir.1943-4774.0000665

Bousso, S., & Fuamba, M. (2014). Numerical and experimental analysis of the pressurized wave front in a circular pipe. *Journal of Hydraulic Engineering, 140*(3), 300-312. doi:10.1061/(asce)hy.1943-7900.0000827

Brière, F. G. (2012). *Distribution et collecte des eaux* (3e éd.). Montréal, Québec, Canada.

Brunone, B., Ferrante, M., & Cacciamani, M. (2004). Decay of Pressure and Energy Dissipation in Laminar Transient Flow. *Journal of Fluids Engineering, 126*, 928-934. doi:doi.org/10.1115/1.1839926

Butler, D., & Davies, J. W. (2004). *Urban Drainage*. London: Taylor & Francis e-Library.

Cardle, J. A. (1984). *An investigation of hydraulic transients in combination free surface and pressurized flows.* (University of Minessota).

Cardle, J. A., Song, C. C., & Yuan, M. (1989). Measurements of mixed transient flows. *Journal of Hydraulic Engineering, 115*(2), 169-182.

CERIU. (2012). *Réseaux d'égouts - pathologies, diagnostics et interventions*. Québec, Canada: Gouvernement du Québec. Tiré de https://ceriu.qc.ca/system/files/2018-06/MANUEL-sur-les-reseaux-d-egouts-pathologies-diagnostics-et-interventions.pdf

Chaudhry, M. H. (2014). *Applied hydraulic transients*: Springer.

Chosie, C. D., & Vasconcelos, J. G. (2013). Kinematics of Entrapped Air Pockets in Stormwater Storage Tunnels. Dans *World Environmental and Water Resources Congress 2013* (p. 1638-1646).

Chow, V. T. (1959). *Open channel flow* (vol. 11).

Coronado-Hernández, O., Fuertes-Miquel, V., & Angulo-Hernández, F. (2017). Emptying Operation of Water Supply Networks. *Water, 10*(1). doi:10.3390/w10010022

Coronado-Hernández, O., Fuertes-Miquel, V., Besharat, M., & Ramos, H. (2017). Experimental and Numerical Analysis of a Water Emptying Pipeline Using Different Air Valves. *Water, 9*(2). doi:10.3390/w9020098

Coronado-Hernández, O., Fuertes-Miquel, V., Besharat, M., & Ramos, H. (2018). Subatmospheric pressure in a water draining pipeline with an air pocket. *Urban Water Journal, 15*(4), 346-352. doi:10.1080/1573062X.2018.1475578

Coronado-Hernández, O. E., Fuertes-Miquel, V. S., Besharat, M., & Ramos, H. M. (2018). Subatmospheric pressure in a water draining pipeline with an air pocket. *Urban Water Journal, 15*(4), 346-352. doi:10.1080/1573062x.2018.1475578

Fuamba, M. (2002). Contribution on transient flow modelling in storm sewers. *Journal of Hydraulic Research, November 2002*, 685-693. doi:10.1080/00221680209499915

Fuertes-Miquel, V. S., Coronado-Hernández, O. E., Iglesias-Rey, P. L., & Mora-Meliá, D. (2019). Transient phenomena during the emptying process of a single pipe with water–air interaction. *Journal of Hydraulic Research, 57*(3), 318-326. doi:10.1080/00221686.2018.1492465

Ghidaoui, M., Zhao, M., McInnis, D., & Axworthy, D. (2005). A Review of Water Hammer Theory and Practice. *Applied Mechanics Reviews - APPL MECH REV, 58*. doi:10.1115/1.1828050

Guizani, M., Vasconcelos, J., Wright, S. J., & Maalel, K. (2006). Investigation of Rapid Filling of Empty Pipes. *Journal of Water Management Modeling*. doi:10.14796/jwmm.R225-20

Guo, Q., & Song, C. C. S. (1990). Surging in Urban Storm Drainage Systems. *Journal of Hydraulic Engineering, 116*(12), 1523-1537. doi:10.1061/(ASCE)0733-9429(1990)116:12(1523)

Hager, W. H. (1999). Cavity outflow from a nearly horizontal pipe. *International Journal of Multiphase Flow, 25*(2), 349 - 364. doi:10.1016/S0301-9322(98)00046-9

Hamam, M. A., & McCorquodale, J. A. (1982). Transient conditions in the transition from gravity to surcharged sewer flow. *Canadian Journal of Civil Engineering, 9*(2), 189-196. doi:10.1139/l82-022

Hatcher, T. M., Malekpour, A., Vasconcelos, J., & Karney, B. (2015). Comparing Unsteady Modeling Approaches of Surges Caused by Sudden Air Pocket Compression. *Journal of Water Management Modeling*.

Hatcher, T. M., & Vasconcelos, J. G. (2017). Peak Pressure Surges and Pressure Damping Following Sudden Air Pocket Compression. *Journal of Hydraulic Engineering, 143*(4), 04016094. doi:10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001251

Huang, B., Wang, W., Wu, S., & Zhu, D. Z. (2016). Experimental Study of Cavity Outflow and Geysering in Circular Pipes. Dans *World Environmental and Water Resources Congress 2016* (p. 265-274).

Laanearu, J., Annus, I., Koppel, T., Bergant, A., Vučković, S., Hou, Q., . . . van't Westende, J. M. C. (2012). Emptying of Large-Scale Pipeline by Pressurized Air. *Journal of Hydraulic Engineering, 138*(12), 1090-1100. doi:10.1061/(asce)hy.1943-7900.0000631

Leon, A. S., Elayeb, I. S., & Tang, Y. (2019). An experimental study on violent geysers in vertical pipes. *Journal of Hydraulic Research, 57*(3), 283-294. doi:10.1080/00221686.2018.1494052

Li, J., & McCorquodale, A. (1999). Modeling Mixed Flow in Storm Sewers. *Journal of Hydraulic Engineering, 125*(11), 1170-1180. doi:10.1061/(ASCE)0733-9429(1999)125:11(1170)

MDDEFP. (2011). *Guide de gestion des eaux pluviales*. Quebec, QC, Canada: Gouvernement du Quebéc. Tiré de http://www.environnement.gouv.qc.ca/eau/pluviales/guide-gestion-eaux-pluviales.pdf

Montes, J. S. (1997). Transition to a Free-surface flow at end of a horizontal conduit. *Journal of Hydraulic Research, 35*(2), 225-241. doi:10.1080/00221689709498428

Pozos-Estrada, O., Pothof, I., Fuentes-Mariles, O. A., Dominguez-Mora, R., Pedrozo-Acuña, A., Meli, R., & Peña, F. (2015). Failure of a drainage tunnel caused by an entrapped air pocket. *Urban Water Journal, 12*(6), 446-454. doi:10.1080/1573062x.2015.1041990

Pozos, O., Gonzalez, C. A., Giesecke, J., Marx, W., & Rodal, E. A. (2010). Air entrapped in gravity pipeline systems. *Journal of Hydraulic Research, 48*(3), 338-347. doi:10.1080/00221686.2010.481839

Reichstetter, M., & Chanson, H. (2013). Negative Surges in Open Channels: Physical and Numerical Modeling. *Journal of Hydraulic Engineering, 139*(3), 341-346. doi:10.1061/(asce)hy.1943-7900.0000674

Schmitt, T. G., Thomas, M., & Ettrich, N. (2004). Analysis and modeling of flooding in urban drainage systems. *Journal of Hydrology, 299*(3-4), 300-311. doi:10.1016/j.jhydrol.2004.08.012

Song, C. C. S., Cardie, J. A., & Leung, K. S. (1983). Transient Mixed-Flow Models for Storm Sewers. *Journal of Hydraulic Engineering, 109*(11), 1487-1504. doi:10.1061/(ASCE)0733-9429(1983)109:11(1487)

Tijsseling, A. s., Annus, I., Hou, Q., & Laanearu, J. (2015). Water-column mass losses during the emptying of a large-scale pipeline by pressurized air. *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences, 64*(1). doi:10.3176/proc.2015.1.02

Tosan, I., Perez, R., Rokhzadi, A., & Fuamba, M. (2021). Additional friction factor optimized to model transient flows following air pocket entrapment in stormwater systems. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 11. doi:10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0001642

Trikha, A. K. (1975). An Efficient Method for Simulating Frequency-Dependent Friction in Transient Liquid Flow. *Journal of Fluids Engineering, 97*(1), 97-105. doi:10.1115/1.3447224

Urbanowicz, K., Zarzycki, Z., & Kudźma, S. (2012). Universal weighting function in modeling transient cavitating pipe flow. *Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 50*, 889-902.

Vardy, A., & Brown, J. (2003). Transient turbulent friction in smooth pipe flows. *Journal of Sound and Vibration, 259*(5), 1011-1036. doi:doi.org/10.1006/jsvi.2002.5160

Vasconcelos, J. G., & Leite, G. M. (2012). Pressure Surges Following Sudden Air Pocket Entrapment in Storm-Water Tunnels. *Journal of Hydraulic Engineering, 138*(12), 1081-1089. doi:10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0000616

Vasconcelos, J. G., & Wright, S. J. (2003). *Laboratory investigation of surges formed during rapid filling of stormwater storage tunnels.* Communication présentée à Proc., 30th IAHR Congress.

Vasconcelos, J. G., & Wright, S. J. (2003). *Surge Associated With Air Expulsion in Near-Horizontal Pipelines.* Communication présentée à Fluids Engineering Division Summer Meeting (vol. 36967, p. 2897-2905).

Vasconcelos, J. G., & Wright, S. J. (2005). Experimental investigation of surges in a stormwater storage tunnel. *Journal of Hydraulic Engineering, 131*(10), 853-861. doi:10.1061/(asce)0733-9429(2005)131:10(853)

Vasconcelos, J. G., & Wright, S. J. (2006). *Mechanisms for air pocket entrapment in stormwater storage tunnels.* Communication présentée à World Environmental and Water Resource Congress 2006: Examining the Confluence of Environmental and Water Concerns (p. 1-10).

Vasconcelos, J. G., & Wright, S. J. (2008). Rapid Flow Startup in Filled Horizontal Pipelines. *Journal of Hydraulic Engineering, 134*(7), 984-992. doi:10.1061/(ASCE)0733-9429(2008)134:7(984)

Vasconcelos, J. G., Wright, S. J., & Lautenbach, D. J. (2011). *Modeling approaches for the rapid filling of closed conduits with entrapped air.* Communication présentée à World

Environmental and Water Resources Congress 2011: Bearing Knowledge for Sustainability (p. 3449-3458).

Wright, S. J., Lewis, J. W., & Vasconcelos, J. G. (2011). Geysering in rapidly filling storm-water tunnels. *Journal of Hydraulic Engineering, 137*(1), 112-115.

Wylie, E. B., & Streeter, V. L. (1978). *Fluid transients*. New York: McGraw-Hill International Book Co.

Zhang, B., Wan, W., & Shi, M. (2018). Experimental and Numerical Simulation of Water Hammer in Gravitational Pipe Flow with Continuous Air Entrainment. *Water, 10*(7), 928.

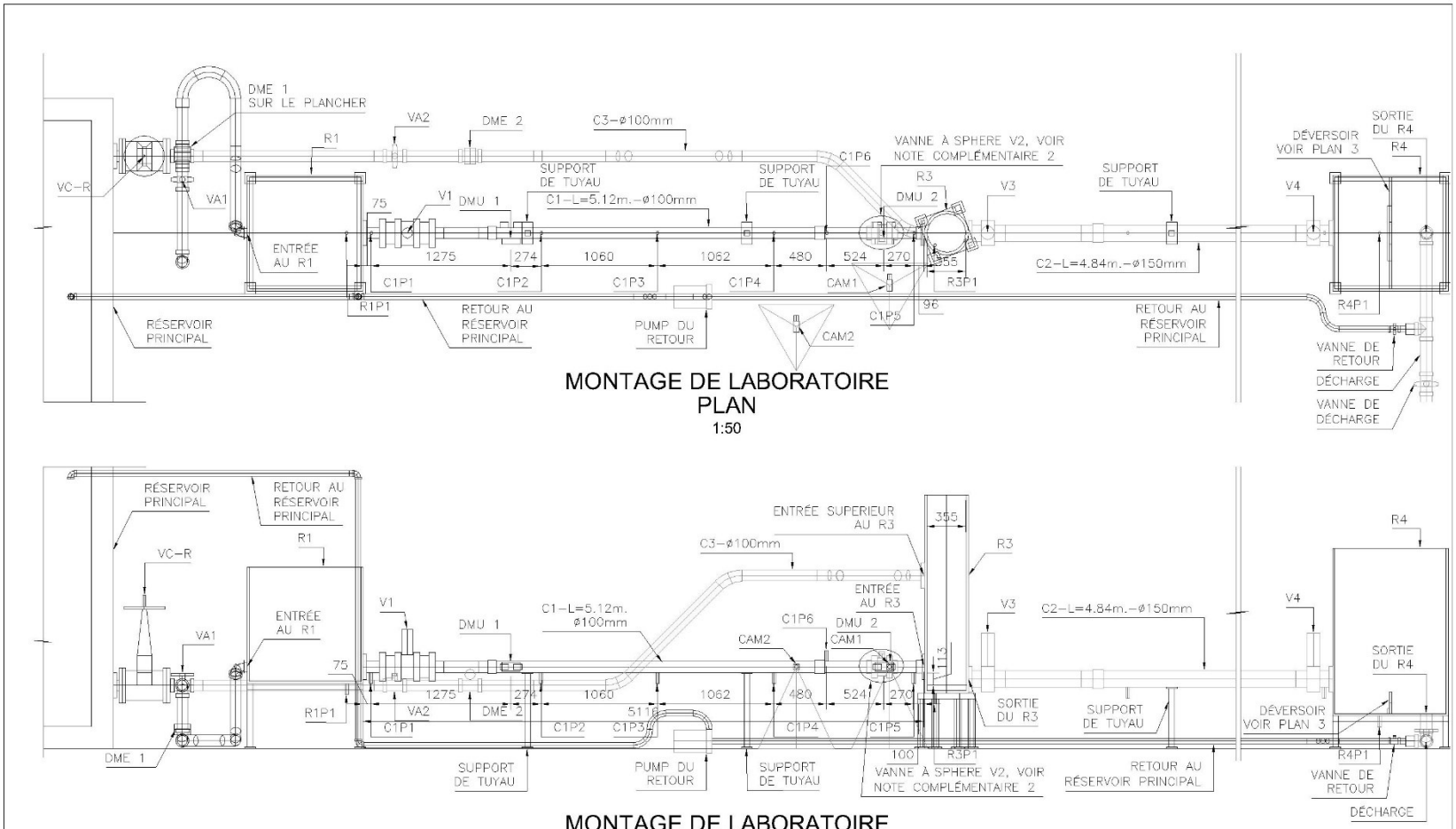
Zhou, F., Hicks, F. E., & Steffler, P. M. (2002(a)). Transient Flow in a Rapidly Filling Horizontal Pipe Containing Trapped Air. *Journal of Hydraulic Engineering, 128*(6), 625-634. doi:10.1061/(ASCE)0733-9429(2002)128:6(625)

Zhou, F., Hicks, F. E., & Steffler, P. M. (2002(b)). Observations of Air–Water Interaction in a Rapidly Filling Horizontal Pipe. *Journal of Hydraulic Engineering, 128*(6), 635-639. doi:10.1061/(ASCE)0733-9429(2002)128:6(635)

Zielke, W. (1968). Frequency-dependent friction in transient pipe flow. *Journal of Basic Engineering, ASME, 91*(4), 109-115. doi:doi.org/10.1115/1.3605049

Zukoski, E. E. (1966). Influence of viscosity, surface tension, and inclination angle on motion of long bubbles in closed tubes. *Journal of Fluid Mechanics, 25*(4), 821-837. doi:10.1017/S0022112066000442

# ANNEXE A MONTAGE DU LABORATOIRE. PLAN ET SECTION




MONTAGE DE LABORATOIRE
PLAN
1:50




MONTAGE DE LABORATOIRE
COUPE
1:50

| NOTES COMPLÉMENTAIRES |
|---|
| 1. LES EXPÉRIENCES EXP1 ET EXP2 ONT ÉTÉ DÉVELOPPÉS SUR LE MONTAGE MONTRÉ. |
| 2. LA VANNE À SPHERE V2 EN AVAL DE C1 A ÉTÉ INSTALLÉ UNIQUEMENT POUR EXP1. LE DMU 2 ET LE C1P5 ONT ÉTÉ DÉPLACÉS EN AMONT POUR CETTE EXPERIENCE. |
| 3. L'EMPLACEMENT DES CAMÉRAS EST APROXIMATIF. |

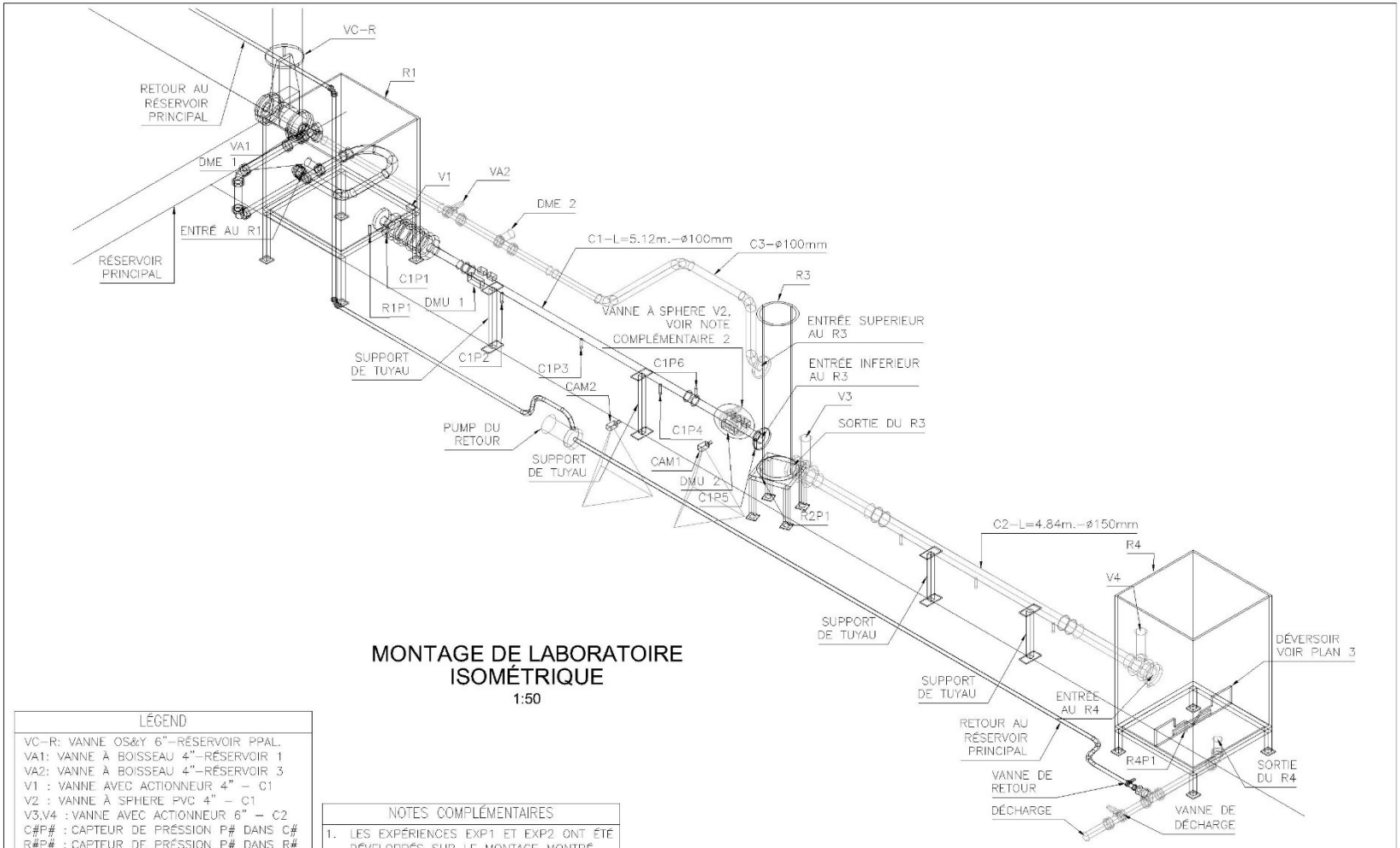
| LÉGEND |
|---|
| C1: CONDUIT 1 100mm(4") PVC TRANSPARENT |
| C2: CONDUIT 2 150mm(6") PVC TRANSPARENT |
| C3: CONDUIT 3 100mm(4") PEHD FLEXIBLE |
| R1 : RÉSERVOIR 1 (1.01m.x1.01m.X1.04m.) |
| R3 : RÉSERVOIR 3 (D=0.355m.xh=1.78m.) |
| R4 : RÉSERVOIR 4 (1.01m.x1.01m.X1.50m.) |

| LÉGEND |
|---|
| VC–R: VANNE OS&Y 6"–RÉSERVOIR PPAL. |
| VA1: VANNE À BOISSEAU 4"–RÉSERVOIR 1 |
| VA2: VANNE À BOISSEAU 4"–RÉSERVOIR 3 |
| V1 : VANNE AVEC ACTIONNEUR 4" – C1 |
| V2 : VANNE À SPHERE PVC 4" – C1 |
| V3,V4 : VANNE AVEC ACTIONNEUR 6" – C2 |
| C#P# : CAPTEUR DE PRÉSSION P# DANS C# |
| R#P# : CAPTEUR DE PRÉSSION P# DANS R# |
| DME# : DÉBITMETRE ELECTROMAGNETIQUE ARKON MAG 910E |
| DMU# : DÉBITMETRE ULTRASONIQUE HEDLAND HTTF |
| CAM1:CAMÉRA HAUTE VITESSE STREAMVIEW LR |
| CAM2:CAMÉRA SONY Cyber–shotDSC–RX100M5 |

| | | | |
|---|---|---|---|
| PROJET : ANALYSE EXPÉRIMENTALE DES ÉCOULEMENTS TRANSITOIRES DIPHASIQUES DANS LE SYSTEME DE DRAINAGE URBAIN | CONTENUE : MONTAGE DE LABORATOIRE PLAN ET COUPE | | |
| POLYTECHNIQUE MONTRÉAL UNIVERSITÉ D'INGÉNIERIE École Politechnique de Montreal Departement des genie civil, geologique et des mines | ÉCHELLE: 1/50 | DATE: MAR. 2021 | PLAN: 1 |

NOTES :
1. LES DIMENSIONS SONT EN MILIMETRES.
2. LES DIMENSIONS SONT APPROXIMATIVES.
3. LE SYSTÈME EST ALIMENTÉ PAR LE RÉSERVOIR PRINCIPAL
4. LE FLUX RETOURNE AU RÉSERVOIR PPAL.
5. LA PENTE DU CONDUIT C1 EST HORIZONTALE.

# ANNEXE B MONTAGE DU LABORATOIRE. ISOMÉTRIQUE




MONTAGE DE LABORATOIRE
ISOMÉTRIQUE
1:50

| LÉGEND |
|---|
| VC-R: VANNE OS&Y 6"-RÉSERVOIR PPAL. |
| VA1: VANNE À BOISSEAU 4"-RÉSERVOIR 1 |
| VA2: VANNE À BOISSEAU 4"-RÉSERVOIR 3 |
| V1 : VANNE AVEC ACTIONNEUR 4" - C1 |
| V2 : VANNE À SPHERE PVC 4" - C1 |
| V3,V4 : VANNE AVEC ACTIONNEUR 6" - C2 |
| C#P# : CAPTEUR DE PRÉSSION P# DANS C# |
| R#P# : CAPTEUR DE PRÉSSION P# DANS R# |
| DME# : DÉBITMETRE ELECTROMAGNETIQUE ARKON MAG 910E |
| DMU# : DÉBITMETRE ULTRASONIQUE HEDLAND HTTF |
| CAM1:CAMÉRA HAUTE VITESSE STREAMVIEW LR |
| CAM2:CAMÉRA SONY Cyber-shotDSC-RX100M5 |

| NOTES COMPLÉMENTAIRES |
|---|
| 1. LES EXPÉRIENCES EXP1 ET EXP2 ONT ÉTÉ DÉVELOPPÉS SUR LE MONTAGE MONTRÉ. |
| 2. LA VANNE À SPHERE V2 EN AVAL DE C1 A ÉTÉ INSTALLÉ UNIQUEMENT POUR EXP1. LE DMU 2 ET LE C1P5 ONT ÉTÉ DÉPLACÉS EN AMONT POUR CETTE EXPERIENCE. |
| 3. L'EMPLACEMENT DES CAMÉRAS EST APROXIMATIF. |

PROJET :
ANALYSE EXPÉRIMENTALE DES ÉCOULEMENTS TRANSITOIRES DIPHASIQUES DANS LE SYSTEME DE DRAINAGE URBAIN

CONTENUE :
MONTAGE DE LABORATOIRE ISOMÉTRIQUE

POLYTECHNIQUE MONTRÉAL
École Politechnique de Montreal
Departement des genie civil, geologique et des mines

| ÉCHELLE: | DATE: | PLAN: |
|---|---|---|
| 1/50 | MAR. 2021 | 2 |

NOTES :
1. LES DIMENSIONS SONT EN MILIMETRES.
2. LES DIMENSIONS SONT APPROXIMATIVES.
3. LE SYSTÈME EST ALIMENTÉ PAR LE RÉSERVOIR PRINCIPAL.
4. LE FLUX RETOURNE AU RÉSERVOIR PPAL.
5. LA PENTE DU CONDUIT C1 EST HORIZONTAL.

| LÉGEND |
|---|
| C1: CONDUIT 1 100mm(4") PVC TRANSPARENT |
| C2: CONDUIT 2 150mm(6") PVC TRANSPARENT |
| C3: CONDUIT 3 100mm(4") PEHD FLEXIBLE |
| R1 : RÉSERVOIR 1 (1.01m.x1.01m.X1.04m.) |
| R3 : RÉSERVOIR 3 (D=0.355m.xh=1.78m.) |
| R4 : RÉSERVOIR 4 (1.01m.x1.01m.X1.50m.) |

# ANNEXE C ÉQUATIONS POUR OBTENIR LES GRAPHIQUES DU *FLOW NUMBER* DANS UNE CONDUITE CIRCULAIRE

## C.1 Obtention du Flow Number à partir de l'angle ($\alpha$)

Cet annexe présente les graphiques générés à partir des équations développées par Benjamin (1968) pour calculer la vitesse de la cavité d'air lorsque le liquide sort d'une conduite circulaire. La Figure C.1 montre les éléments de la cavité dans une conduite circulaire selon le même article.

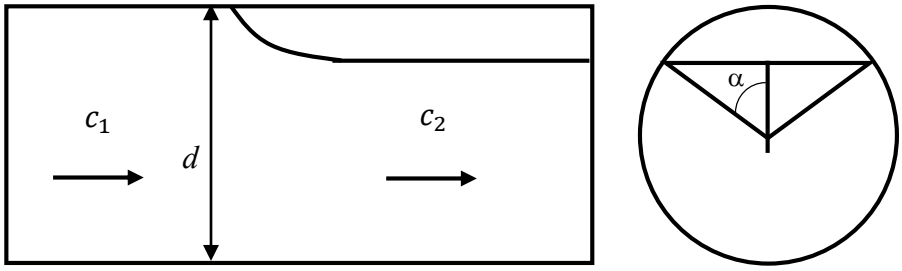



Figure C.1 Cavité d'air dans une conduite circulaire

En utilisant les équations de continuité et de Bernoulli :

$$c_1 = c_2(1 - \xi) \tag{C.1}$$

$$c_2 = \sqrt{gd(1 - \cos\alpha)} \tag{C.2}$$

Où $c_1$ est la vitesse de l'eau dans la section amont de la cavité et $c_2$ la vitesse en aval, dans la section à surface libre. Le paramètre $\xi$ est définie plus bas dans l'annexe, *g* est l'accélération de la gravité, *d* est le diamètre de la conduite et $\alpha$ est l'angle entre la ligne verticale et le rayon de la ligne d'eau, selon la Figure C.1.

Le *flow number* est définie comme :

$$f = \frac{c_1}{\sqrt{gd}} \tag{C.3}$$

Le chercheur a trouvé l'équation suivante pour calculer la quantité de mouvement (*M*) :

$$\xi^2(1 - \cos\alpha) + \xi\cos\alpha - (2/3\pi)sin^3\alpha = M \tag{C.4}$$

Où :

$$\xi = \frac{1}{\pi}\left(\alpha - \frac{1}{2}\sin 2\alpha\right) \tag{C.5}$$

Les expressions sont calculés selon l'angle $\alpha$, qui définit la hauteur de l'eau. Le tableau ci-dessous montre les résultats du *flow number* ($f$) pour différents angles $\alpha$, lesquelles sont transformés en hauteurs d'eau $h/d$ :

Tableau C.1 Calcul des paramètres de la cavité d'air

| $\boldsymbol{\alpha}$(°) | $\boldsymbol{\theta}$(°)* | $\boldsymbol{h/d}$ | $\boldsymbol{\xi}$ | $\boldsymbol{M}$ | $\boldsymbol{c_2/\sqrt{gd}}$ | $\boldsymbol{f = c_1/\sqrt{gd}}$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 0.000 | 360.000 | 1.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 53.074 | 253.852 | 0.80039 | 0.14198 | -0.01506 | 0.6318 | 0.5421 |
| 67.837 | 224.326 | 0.68862 | 0.26566 | -0.02439 | 0.7892 | 0.5795 |
| 82.783 | 194.435 | 0.56282 | 0.42023 | 0.00000 | 0.9351 | 0.5421 |

* $\theta$ est l'angle complémentaire de $2\alpha$ ($\theta = 360 - 2\alpha$)

Notez que l'équation de quantité de mouvement est égal à zéro ($M$=0) pour les valeurs $\alpha = 0°$ et $\alpha = 82.783°$ comme établi par l'auteur. La hauteur de l'eau dans la section à surface libre pour ce dernier angle $\alpha$ est $h/d = 0.56282$. De même, les résultats montrent les deux valeurs égales du *flow number* pour deux niveaux d'eau différents.

Les hauteurs d'eau ($h/d$) calculées à partir des angles $\alpha$ sont utilisées pour tracer le graphique de $f\ vs\ h/d$ ($f$ en fonction de $h/d$). Le graphique de la Figure C.2 montre les résultats pour les angles $\alpha$ compris entre 0° et 82.783° et également inclut les résultats obtenus par Montes (1997).

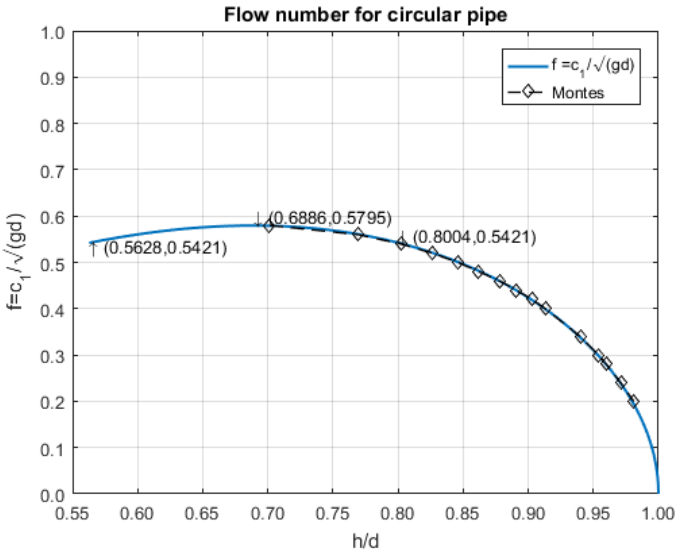



Figure C.2 Vitesse de propagation non dimensionnelle $c_1/\sqrt{gd}$ pour une conduite circulaire

**C.2 Obtention du Flow Number à partir de la hauteur de l'eau (h/d)**

Également, dans cette annexe, sont développées des équations pour représenter graphiquement $f\ vs\ h/d$, mais en utilisant la hauteur de l'eau $(h/d)$ comme seule variable, sans avoir besoin de l'angle $(\alpha)$. La procédure est développée dans les lignes suivantes, selon les éléments de la section circulaire illustrés à la Figure C.3.

Calcul de la surface mouillé dans une conduite circulaire :

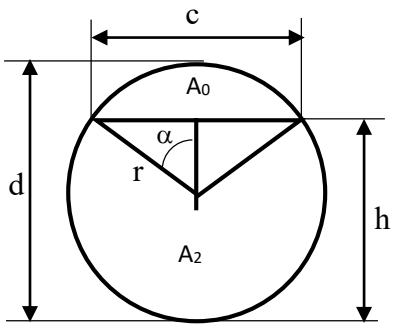



Figure C.3 Éléments de la section d'une conduite circulaire

Où *r* est le rayon de la conduite, *d* est le diamètre, *h* est la hauteur de l'eau, $\alpha$ est l'angle entre la ligne verticale et le rayon de la ligne d'eau, *c* correspond à la largeur de la surface libre, $A_0$ à la surface libre et $A_2$ à la surface mouillé.

Surface de la circonférence :

$$A_1 = \pi r^2 = \frac{\pi}{4} d^2 \tag{C.6}$$

Si la surface mouillé et surface libre sont incluses :

$$A_1 = A_0 + A_2 \tag{C.7}$$

Où $A_0$ est la surface libre et $A_2$ est la surface mouillée.

La surface libre $A_0$ est égale à :

$$A_0 = \frac{(2\alpha - \sin 2\alpha)}{2} \frac{d^2}{4} \tag{C.8}$$

Donc, la surface mouillée $A_2$ est :

$$A_2 = A_1 - A_0 = \frac{\pi}{4} d^2 - \frac{(2\alpha - \sin 2\alpha)}{2} \frac{d^2}{4} = \pi r^2 - \frac{(2\alpha - \sin 2\alpha)}{2} r^2 \tag{C.9}$$

En organisant les termes :

$$A_2 = \pi r^2 \left[1 - \frac{1}{\pi}\left(\alpha - \frac{1}{2}\sin 2\alpha\right)\right] = \pi r^2(1-\xi) = A_1(1-\xi) \quad \text{(C.10)}$$

Où :

$$\xi = \frac{1}{\pi}\left(\alpha - \frac{1}{2}\sin 2\alpha\right) \quad \text{(C.11)}$$

Si le terme $\xi$ est développé donc:

$$\sin 2\alpha = 2\sin\alpha\cos\alpha \quad \text{(C.12)}$$

De la Figure C.3 :

$$\sin\alpha = \frac{c}{2r} = \frac{c}{d} \quad \text{(C.13)}$$

$$\cos\alpha = \frac{(h-r)}{r} = \frac{(h-d/2)}{d/2} = 2\frac{h}{d} - 1 \quad \text{(C.14)}$$

Ainsi :

$$\alpha = \cos^{-1}\left(2\frac{h}{d} - 1\right); \quad \text{(C.15)}$$

Également de la Figure C.3:

$$r^2 = (h-r)^2 + \left(\frac{c}{2}\right)^2 \quad \text{(C.16)}$$

Si on résoudre pour *c* :

$$c = \sqrt{8hr - 4h^2} = \sqrt{4hd - 4h^2} \quad \text{(C.17)}$$

$$c = 2d\sqrt{\frac{h}{d} - \frac{h^2}{d^2}} \quad \text{(C.18)}$$

En replaçant *c* dans le $\sin\alpha$ (Eq. (C.13)) :

$$\sin\alpha = 2\sqrt{\frac{h}{d} - \frac{h^2}{d^2}} \quad \text{(C.19)}$$

En remplaçant dans le $\sin 2\alpha$ de l'Eq. (C.12), les termes $\sin\alpha$ et $\cos\alpha$ :

$$\sin 2\alpha = 2 * \left(2\sqrt{\frac{h}{d} - \frac{h^2}{d^2}}\right) * \left(2\frac{h}{d} - 1\right) \tag{C.20}$$

Finalement on met les termes $\sin 2\alpha$ (Eq. (C.20)) et $\alpha$ (Eq. (C.15)) dans $\xi$ de l'Eq. (C.11), donc :

$$\xi = \frac{1}{\pi}\left[\cos^{-1}\left(2\frac{h}{d} - 1\right) - 4\left(\sqrt{\frac{h}{d} - \frac{h^2}{d^2}}\right) * \left(\frac{h}{d} - \frac{1}{2}\right)\right] \tag{C.21}$$

En résumé :

$$A_1 = \frac{\pi}{4}d^2 \tag{C.22}$$

$$A_2 = A_1(1 - \xi) \tag{C.23}$$

En remplaçant : $A_0 = A_1 - A_2 = A_1 - A_1(1 - \xi)$

$$A_0 = A_1\xi \tag{C.24}$$

Les termes développés dans les équations (C.21) et (C.14) sont remplacés dans les équations (C.1), (C.2) et (C.4) de Benjamin (1968) pour une conduite circulaire. Le Tableau C.2 présente le calcul direct du *flow number* à partir de la hauteur de l'eau $(h/d)$ pour certains hauteurs d'eau et la Figure C.4 montre les résultats pour les hauteurs d'eau $(h/d)$ compris entre 0.5628 et 1.000.

Tableau C.2 Calcul des paramètres de la cavité d'air à partir de $h/d$

| $\boldsymbol{h/d}$ | $\boldsymbol{\xi}$ | $\boldsymbol{M}$ | $\boldsymbol{c_2/\sqrt{gd}}$[1] | $\boldsymbol{f = c_1/\sqrt{gd}}$[2] |
|---|---|---|---|---|
| 1.00000 | 0.00000 | 0.00000 | 0.0000 | 0.0000 |
| 0.80039 | 0.14198 | -0.01506 | 0.6318 | 0.5421 |
| 0.68862 | 0.26566 | -0.02439 | 0.7892 | 0.5795 |
| 0.56282 | 0.42023 | 0.00000 | 0.9351 | 0.5421 |

[1] $c_2/\sqrt{gd} = \sqrt{(1 - \cos\alpha)} = \sqrt{(2 - 2\,h/d)}$. Tiré des Eq. (C.2) et (C.14).

[2] $c_1/\sqrt{gd} = \left(c_2/\sqrt{gd}\right) * (1 - \xi)$. Tiré de la Eq. (C.1).

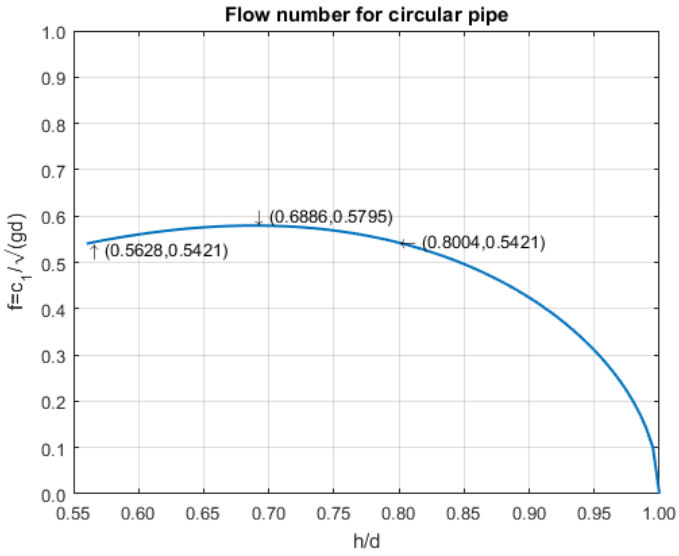



Figure C.4 Solution analytique pour la vitesse de propagation non dimensionnel $c_1/\sqrt{gd}$ d'une conduite circulaire

Les résultats calculés à partir des expressions analytiques correspondent à ceux calculés avec l'angle $\alpha$ du Tableau C.1 et de la Figure C.2. La solution non triviale pour que l'équation de quantité de mouvement soit nulle ($M$=0) est la même que la solution présentée précédemment ($h/d = 0.56282$).

### C.3 Équations analytiques en relations hydrauliques

Les équations analytiques développées sont remplacées dans d'autres expressions mathématiques utilisées en hydraulique pour les conduites circulaires.

L'équation de continuité pour une cavité d'air qui se propage selon Bousso et al. (2014) est :

$$A_1V_1 = A_2V_2 + (A_1 - A_2)w \tag{C.25}$$

Où $A_1V_1$ est le débit en amont et $A_2V_2$ en aval de la cavité et $w$ est la vitesse de la intrusion d'air. Cette expression est modifiée en utilisant les équations (C.23) et (C.24) comme suit :

$$A_1V_1 = A_1(1 - \xi)V_2 + A_1\xi w, \tag{C.26}$$

Alors on obtient finalement :

$$V_1 = (1 - \xi)V_2 + \xi w \tag{C.27}$$

Des formules hydrauliques pour les sections circulaires sont présentées dans le Tableau C.3 avec l'expression traditionnelle (Chow, 1959) et l'expression modifiée en utilisant les termes développés. La surface de la conduite pleine est :

$$A_1 = A_{\mathrm{p}} = \frac{\pi}{4} d^2 \tag{C.28}$$

Tableau C.3 Expressions pour les sections circulaires, traditionnelles et modifiées

| **Paramètre** | **Traditionnel**[1] | **Modifié**[2] | **Eq.** |
|---|---|---|---|
| Section mouillé $A_2$ | $A_2 = d^2/8 * (\theta - \sin\theta)$ | $A_2 = A_1(1-\xi)$ | (C.29) |
| Périmètre mouillé $P$ | $P_2 = \theta d/2$ | $P_2 = d[\pi - \cos^{-1}(2h/d - 1)]$ | (C.30) |
| Rayon Hydraulique $R_{h2}$ | $R_{h2} = d/4 * (1 - \sin\theta/\theta)$ | $R_{h2} = \frac{\pi d/4 * (1-\xi)}{[\pi - \cos^{-1}(2h/d-1)]}$ | (C.31) |
| $R_{h2}/R_{hp}$ | $\frac{R_{h2}}{R_{hp}} = (1 - \sin\theta/\theta)$ | $\frac{R_{h2}}{R_{hp}} = \frac{\pi(1-\xi)}{[\pi - cos^{-1}(2h/d-1)]}$ | (C.32) |
| $Q_2/Q_p$ | $\frac{Q_2}{Q_p} = \left(\frac{(\theta - \sin\theta)}{2\pi}\right) * \left(\frac{R_{h2}}{R_{hp}}\right)^{2/3}$ | $\frac{Q_2}{Q_p} = (1-\xi) * \left(\frac{R_{h2}}{R_{hp}}\right)^{2/3}$ | (C.33) |
| $V_2/V_p$ | $\frac{V_2}{V_p} = \left(\frac{R_{h2}}{R_{hp}}\right)^{2/3}$ | $\frac{V_2}{V_p} = \left(\frac{R_{h2}}{R_{hp}}\right)^{2/3}$ | (C.34) |

[1] Dans les expressions traditionnelles, $\theta$ est l'angle complémentaire de $2\alpha$ ($\theta = 360 - 2\alpha$) sur la Figure C.3.

[2] Le paramètre $\xi$ des expressions modifiées est obtenu grâce à l'équation (C.21).

Les paramétrés hydrauliques modifiés sont calculés pour différents niveaux d'eau dans le Tableau C.4, ceci afin de comparer les résultats avec les formules traditionnellement utilisées. Les résultats des paramètres modifiés indiqués dans le Tableau C.4 sont les mêmes que les paramètres traditionnels (Bennis, 2014). La valeur du paramètre $\xi$ définit dans l'équation (C.21) est également ajouté au tableau suivant.

Tous les paramètres présentés dans le Tableau C.4 sont calculés avec les paramètres modifiés du Tableau C.3 et la hauteur de l'eau $(h/d)$, par conséquent, ils sont calculés directement sans transformations supplémentaires.

Tableau C.4 Calculs des paramètres analytiques modifiés pour les sections circulaires

| $h/d$ | $\xi^*$ | $A_2/A_P$ | $R_{h2}/R_{hP}$ | $V_2/V_P$ | $Q_2/Q_P$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 0.05 | 0.9813 | 0.0187 | 0.1302 | 0.2569 | 0.0048 |
| 0.10 | 0.9480 | 0.0520 | 0.2541 | 0.4012 | 0.0209 |
| 0.15 | 0.9059 | 0.0941 | 0.3715 | 0.5168 | 0.0486 |
| 0.20 | 0.8576 | 0.1424 | 0.4824 | 0.6151 | 0.0876 |
| 0.25 | 0.8045 | 0.1955 | 0.5865 | 0.7007 | 0.1370 |
| 0.30 | 0.7477 | 0.2523 | 0.6838 | 0.7761 | 0.1958 |
| 0.35 | 0.6881 | 0.3119 | 0.7740 | 0.8430 | 0.2629 |
| 0.40 | 0.6265 | 0.3735 | 0.8569 | 0.9022 | 0.3370 |
| 0.45 | 0.5636 | 0.4364 | 0.9323 | 0.9544 | 0.4165 |
| 0.50 | 0.5000 | 0.5000 | 1.0000 | 1.0000 | 0.5000 |
| 0.55 | 0.4364 | 0.5636 | 1.0595 | 1.0393 | 0.5857 |
| 0.60 | 0.3735 | 0.6265 | 1.1106 | 1.0724 | 0.6718 |
| 0.65 | 0.3119 | 0.6881 | 1.1526 | 1.0993 | 0.7564 |
| 0.70 | 0.2523 | 0.7477 | 1.1849 | 1.1198 | 0.8372 |
| 0.75 | 0.1955 | 0.8045 | 1.2067 | 1.1335 | 0.9119 |
| 0.80 | 0.1424 | 0.8576 | 1.2168 | 1.1397 | 0.9775 |
| 0.85 | 0.0941 | 0.9059 | 1.2131 | 1.1374 | 1.0304 |
| 0.90 | 0.0520 | 0.9480 | 1.1921 | 1.1243 | 1.0658 |
| 0.95 | 0.0187 | 0.9813 | 1.1458 | 1.0950 | 1.0745 |
| 1.00 | 0.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 | 1.0000 |

*Le paramètre $\xi$ est obtenu de l'équation (C.21), où la hauteur de l'eau $(h/d)$ est remplacé directement.

# ANNEXE D ESTIMATIONS D'ENTRÉE (TENSIONS) POUR CALCULER LA GRANDEUR À MESURER (HAUTEUR)

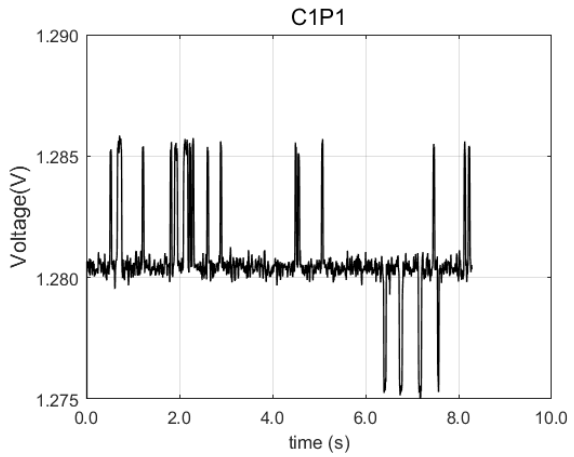



Figure D.1 Tension de sortie capteur C1P1 ($H_{moy}$=22.9)

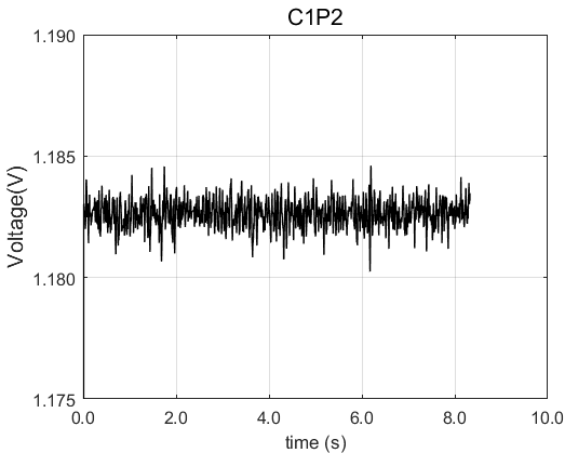



Figure D.2 Tension de sortie capteur C1P2 ($H_{moy}$=36.4)

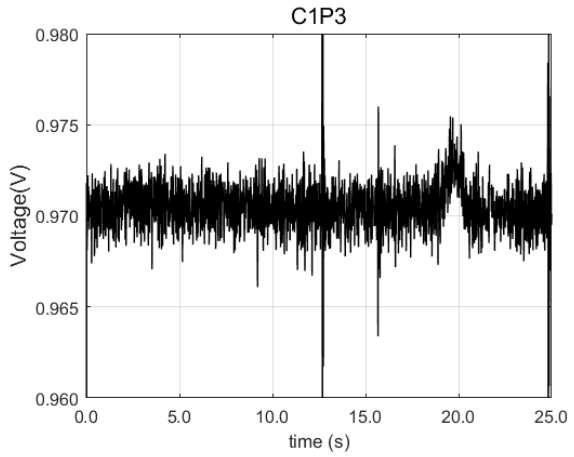



Figure D.3 Tension de sortie capteur C1P3 ($H_{moy}$=31.1)

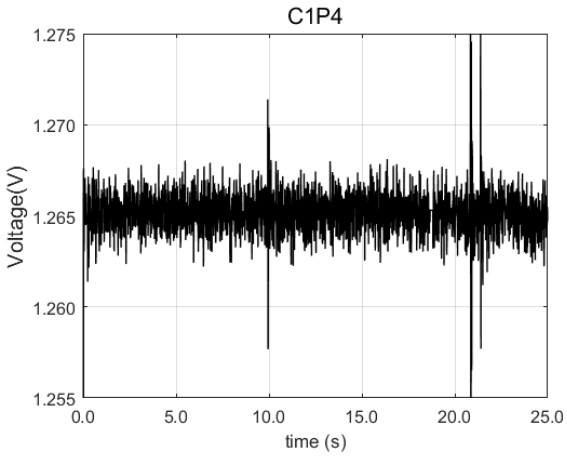



Figure D.4 Tension de sortie capteur C1P4 ($H_{moy}$=41.4)

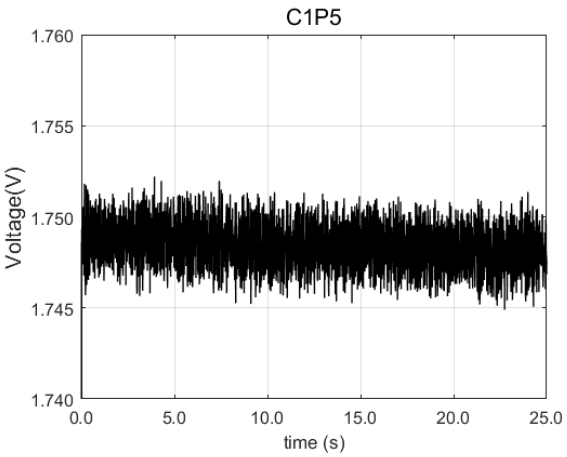



Figure D.5 Tension de sortie capteur C1P5 ($H_{moy}$=57.1)

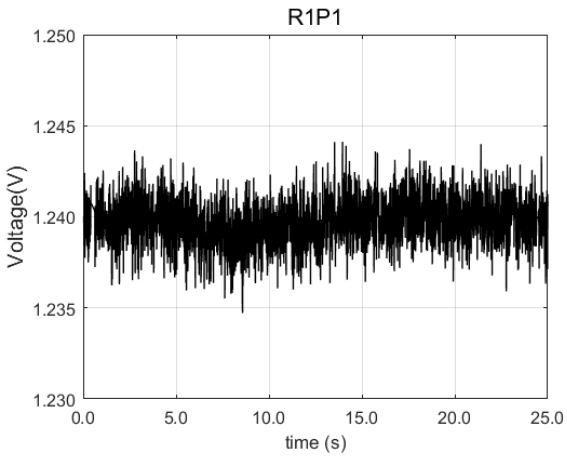



Figure D.6 Tension de sortie capteur R1P1 ($H_{moy}$=47.4)