

Mesure du niveau d'eau par photogrammétrie en laboratoire

Mémoire présenté par
Ferdinand DE SCHOUTHEETE
Thibault HUBERT

en vue de l'obtention du grade de Master
ingénieur civil des constructions

Promotrice
Sandra SOARES-FRAZÃO

Collaborateur
Olivier CARLIER

Lecteurs
Charles BIELDERS,
Didier BOUSMAR

Année académique 2017-2018

Remerciements

Avant tout, nous tenons à remercier toutes les personnes qui ont contribué de près ou de loin à l'avancement de ce travail de fin d'étude et tout particulièrement :

Notre promotrice Sandra Soares-Frazão, pour ses précieux conseils tout au long de l'avancement du travail.

Notre assistant Olivier Carlier pour sa collaboration, son suivi de qualité et sa disponibilité.

Toute l'équipe du LEMSC (Laboratoire Essais mécaniques, Structures et génie civil) pour leur accueil et leur aide. Principalement à Samuel Laurent qui a su nous donner des conseils avisés.

À Mr. Didier Bousmar et Mr. Charles Bielders d'avoir accepté de faire partie de notre jury.

À Chloé De Maesschalck, Ambroise Duquenne, Florence Eloy, Jean Regniers, Charlotte Servais et Nathan Verbruggen de nous avoir prêté du matériel photographique.

À nos familles et nos proches de nous avoir soutenus et aidés.

Résumé

Le problème de mesure du niveau d'eau n'est pas nouveau, cependant, les techniques pour les obtenir ont évoluées. Aujourd'hui les technologies proposent la photogrammétrie comme moyen d'y parvenir. La photogrammétrie consiste en la modélisation d'objets en trois dimensions à partir de photographies. Cette méthode, peu onéreuse et fiable, est déjà utilisée dans le secteur de l'hydraulique. Toutefois, les chercheurs se heurtent à nombres d'obstacles quand il s'agit de déterminer le niveau d'eau par photogrammétrie.

Le but de la présente étude est d'utiliser cette technique pour déterminer le niveau d'eau d'un modèle réduit de rivière en laboratoire, le but ultime étant de pouvoir utiliser cette technique de photogrammétrie sur des applications de terrains.

Deux types d'écoulements sont étudiés : les écoulements permanents et les écoulements transitoires. Pour confirmer la méthode développée, celle-ci est testée sur quatre débits différents : 6 l/s, 8l/s, 10 l/s et 11.5 l/s. Une étude de paramètres (luminosité, type d'appareils, type de modélisation, texturisation de l'eau...) est également présentée.

Les résultats pour les écoulements permanents sont encourageants, des erreurs de l'ordre de quelques millimètres sont obtenues. La méthode liée aux écoulements transitoires demande à être perfectionnée ; des premiers résultats sont toutefois exposés. Des pistes d'améliorations pour ce deuxième type d'écoulements sont suggérées.

Abstract

The challenge of measuring water levels is not new. However the techniques have evolved. Nowadays, the technologies propose a new way of doing : the photogrammetry. Photogrammetry consists of modelling objects in three dimensions by use of photography. This method, rather cheap and reliable, has been already used in the field of hydraulics. However, researchers face many obstacles when it comes to determining the water level by photogrammetry.

The purpose of the present study is to use this technique to determine the water level of a model river in a laboratory, the ultimate goal being to be able to use photogrammetry on land applications.

Two types of flows are studied : permanent flows and transient flows. To confirm the developed method, it is tested on four different discharges : 6 l/s, 8 l/s, 10 l/s and 11.5 l/s. A study of parameters (luminosity, type of camera, type of modelling, textures of water ...) is also presented.

The results for permanent flows are encouraging, errors of about few millimeters are obtained. The method linked to transient flows needs to be refined ; however first results are exposed. Improvement tracks for this second type of flow are suggested.

Table des matières

Introduction	1
I Etat de l’art	3
1 La photogrammétrie et ses applications	5
1.1 Introduction	5
1.2 Photogrammétrie appliquée au domaine de la topographie	5
1.3 Photogrammétrie dans le domaine de l’hydraulique	6
1.4 Conclusion	7
2 Réalisations antérieures à l’UCL	9
2.1 Dispositifs expérimentaux	9
2.1.1 Le canal	9
2.1.2 Matériel photographique	11
2.2 Logiciels utilisés et démarche	12
2.3 Résultats du travail de fin d’étude de 2016-2017	12
2.3.1 Modèle réduit	12
2.3.2 Analyse de la bathymétrie et pente	13
2.3.3 Mesure de la surface libre	13
II Améliorations du dispositif expérimental	15
1 Système d’axes	17
2 Pente	19
2.1 Introduction	19
2.2 Mesures au Laser Keyence, station totale et Agisoft-Photoscan	19
2.2.1 Le laser Keyence	19
2.2.2 La station totale	20
2.2.3 Le modèle Agisoft-Photoscan pour la Go Pro	20
2.2.4 Le modèle Agisoft-Photoscan pour l’appareil photo	20
2.3 Sources d’erreurs	22
2.3.1 Laser Keyence	22
2.3.2 Station totale	22
3 Bathymétrie	23
3.1 Introduction	23
3.2 Points de référence	23
3.3 Analyse de la bathymétrie	24
3.3.1 Matériels utilisés	24

3.3.2	Laser Keyence	24
3.3.3	Agisoft-Photoscan	25
3.3.4	Résultats et analyse	25
3.4	Sources d'erreurs	28
3.4.1	Les mesures au laser Keyence	28
3.4.2	La cage noire	29
3.5	Discussion	29
III	Analyse d'écoulements permanents	31
1	Introduction	33
2	Objectifs	35
3	Méthodologie	37
3.1	Mise en oeuvre	37
3.2	Modèle photogrammétrique	38
4	Résultats et sources d'erreurs	41
4.1	Modèle photogrammétrique	41
4.1.1	Résultats et analyse	41
4.2	Sources d'erreurs	44
4.2.1	Évolution du débit	44
4.2.2	Trusquin	45
4.2.3	Fuites d'eau sur les côtés du canal	46
4.2.4	Hypothèse de la surface d'eau	46
5	Mesures au laser de la surface d'eau	47
5.1	Méthodologie	47
5.1.1	Correction de la distorsion	48
5.1.2	Extraction laser	49
5.2	Résultats et sources d'erreurs	50
5.2.1	Résultats et analyse	50
5.2.2	Sources d'erreurs	52
6	Discussion	53
IV	Mesures en écoulement transitoire	55
1	Introduction	57
2	Méthodologie	59
2.1	Méthodes d'acquisition des photographies	59
2.2	Méthodes d'acquisition des mesures de références	59
2.3	Méthodes d'évolution des débits	60
2.4	Expériences retenues	61
3	Résultats et sources d'erreurs	65
3.1	Expériences focalisées sur une berge ou sur les deux berges.	65
3.2	Sources potentielles de l'échec	66
3.2.1	Mise en place : nombre d'images et angles de vue	67

3.2.2	Appareils photos différents	67
3.2.3	La qualité de photographies et synchronisation des caméras	68
3.3	Sources d'erreurs	68
3.4	Discussion	68
	Perspectives et conclusion	69
	Table des figures	73
	Liste des tableaux	75
	Bibliographie	76
	Annexes	78
A	Descriptif des appareils de mesures	79
A.1	Trusquin	79
A.2	Laser Keyence	79
A.3	Station totale	79
B	Evolution du débit	81
C	Résultats supplémentaires d'expériences en écoulement permanent	83
D	Résultats analyse forme de l'eau	85
E	Logiciel QGIS	87
F	Notice d'orthorectification	89
G	Pistes d'amélioration de la méthode de détection des points de décrochages	91
H	Fiabilité des mesures au trusquin	93

Introduction

Face à la nature, l'être humain peut se sentir délaissé. Il essaye souvent de comprendre et de maîtriser les phénomènes naturels qui l'entourent. Le secteur de l'hydraulique fait partie de ces phénomènes à propos duquel l'Homme se questionne depuis des siècles. Qui n'a jamais entendu parler du fameux "Eurêka" prononcé par Archimède lorsqu'il comprit les lois régissant les poussées subies par les objets dans l'eau trois siècles avant Jésus-Christ¹ ? Aujourd'hui ces connaissances ont évolué. Les technologies, la population ainsi que les catastrophes naturelles grandissent conjointement [VÖRÖSMARTY et al., 2000]. Des populations entières sont amenées à vivre sous le niveau de l'eau. La fonte des glaciers, la montée des eaux, le réchauffement climatique, les sécheresses, les crues et étiages, les pluies incessantes, le problème des ressources en eau, l'impossibilité de prédire les catastrophes naturelles, urgent le processus visant à déterminer le niveau d'eau des rivières, des mers...et ce de manière rapide, efficace et accessible à tous [SOLOMON et al., 2007].

Au-delà de l'aspect humain, déterminer le niveau d'eau pourrait être intéressant pour des applications liées au transport comme la navigation [MILLERD et DUFOURNAUD, 1993] ou environnementales comme l'écosystème [HUDON, 1997]. Connaître la profondeur des eaux pour une navigation sans risque, prédire les comportements de la faune et de la flore seraient alors plus simple.

La photogrammétrie est une science en plein essor dont le secteur hydraulique ne fait pas exception. Elle est utilisée dans plusieurs domaines (médecine, archéologie, architecture...) pour lesquels les résultats obtenus sont prometteurs. En plus d'être efficace, elle s'avère peu coûteuse et facile à mettre en œuvre [WESTOBYA et al., 2012]. La technique de photogrammétrie étudiée dans ce travail est la Structure from Motion (SfM). La technique SfM utilise des images prises selon plusieurs angles de vues et permet ainsi de reconstruire des géométries d'objets ou de surfaces en trois dimensions. Le matériel simple (une caméra grand public) et le nombre de logiciels grandissant sur le marché (open source ou non) ont fait de la photogrammétrie une technique accessible à tous [FONSTAD et al., 2013]. Le logiciel utilisé dans le cadre de ce projet est Agisoft-Photoscan.

Les problèmes auxquels les chercheurs font face lors de la recherche du niveau d'eau par photogrammétrie sont multiples. D'abord, la transparence de l'eau implique des soucis de réfraction et de réflexion sur la surface de l'eau[DIETRICH, 2016]. Lors de la modélisation d'une rivière via Agisoft-Photoscan, ces deux phénomènes physiques peuvent affecter l'authenticité de la réalité. Cette problématique de transparence va de pair avec l'intensité lumineuse du milieu. Pour détecter le niveau d'eau, certaines études tentent de donner une texture à l'eau évitant de ce fait les soucis de réfraction et réflexion ([FERREIRA et al., 2017],[FRANZINI et al., 2016]). Ensuite, le mode opératoire pour l'acquisition de données par photographie (angles de vue, nombre de points de vue, nombre de photographies...) doit être soigneusement étudié. Un mauvais jeu de données se répercutera sur les résultats.

1. Encyclopædia Universalis, 2018

L'étude en laboratoire présente de nombreux avantages par rapport aux études sur terrains. Il est intéressant de tester la fiabilité, la justesse et la robustesse de la technique de mesure du niveau d'eau sur des infrastructures connues. Un modèle réduit de la rivière Cavillon en Haïti est disponible en laboratoire. Ce modèle réduit dont la taille est connue (8.8 m sur 1.2 m) et l'équipement du laboratoire rendent aisé la prise de données. Sur le terrain, il peut être difficile d'obtenir des données pertinentes (conditions météorologiques, mise en place délicate, mauvaises photographies...), ce qui complique l'étude de la précision du modèle numérique. De plus, les essais en laboratoire permettent de changer facilement les multiples paramètres intervenant dans l'étude. Tout le processus d'acquisition de données et d'analyse est plus rapide car toutes les opérations sont contrôlées, automatisées et répétées. La difficulté qu'engendre la prise de mesures sur terrain est étudiée par [HELLEBAUT, 2017-2018].

Ce travail, qui tente d'étudier le plus précisément possible le niveau d'eau, pourrait dans le futur, être combiné à d'autres travaux. Les travaux de [BIA et SOMMERS, 2017-2018] étudient la vitesse de l'eau en surface en se basant sur le principe du PIV (Particle Image Velocimetry). Ainsi il est possible de trouver l'évolution du débit grâce aux vitesses et hauteurs de l'eau.

Le sujet s'inscrit dans la continuité des travaux de [COUTINHO et JANSSENS, 2017] qui ont également étudié la recherche du niveau d'eau par photogrammétrie. Leurs travaux se basaient essentiellement sur la modélisation de la bathymétrie et du niveau d'eau pour des écoulements permanents. Le premier thème fut maîtrisé tandis que la deuxième demande à être amélioré. Ils se sont arrêtés au problème de texturisation de l'eau en écoulement permanent. L'étude présentée ici se base sur leurs résultats, continue et tire des conclusions sur la recherche du niveau d'eau par photogrammétrie pour des écoulements permanents. Une première approche des écoulements transitoires est également abordée.

Le rapport s'articule en plusieurs parties qui se veulent indépendantes mais qui n'en sont pas moins complémentaires.

Tout d'abord un état de l'art comprenant une brève description de la photogrammétrie et des études antérieures est présenté.

Ensuite une partie intitulée "Améliorations du dispositif expérimental" présente les modifications faites par rapport à l'étude de [COUTINHO et JANSSENS, 2017] avec notamment la redéfinition de la pente, de la bathymétrie et du mode d'acquisition de données.

S'en suit les analyses d'écoulements permanents. Une étude importante sur plusieurs débits, plusieurs techniques de modélisation Agisoft-Photoscan, sur certains paramètres et sur les hypothèses est développée.

Les expériences en régime transitoire sont le sujet de la quatrième partie. Plusieurs modes opératoires et idées ainsi que les premiers résultats sont exposés.

Pour conclure, des perspectives d'avenir et des idées pour les futures recherches sont suggérées.

Première partie

Etat de l'art

Chapitre 1

La photogrammétrie et ses applications

1.1 Introduction

La photogrammétrie se définit comme l'ensemble des techniques qui permettent de déterminer la forme, les dimensions, la position dans l'espace d'un objet à partir de photographies. (Très utilisée pour les levés topographiques, la photogrammétrie a de nombreuses autres applications : archéologie, architecture, médecine, travaux publics, étude de phénomènes fugitifs [mécanique des fluides, balistique, etc.].)¹.

La littérature définit également la photogrammétrie comme l'ensemble des techniques qui permettent de déterminer la forme, les dimensions et la position d'un objet (au sens le plus large du terme) à partir de perspectives de cet objet enregistrées photographiquement.².

En résumé, la photogrammétrie est la reconstitution de modèles à partir de photographies. Elle a plusieurs secteurs d'applications. Dans cet état de l'art, l'accent est mis sur le domaine topographique et hydraulique.

1.2 Photogrammétrie appliquée au domaine de la topographie

L'application de la photogrammétrie réside dans le domaine des mesures topographiques. En effet, les photographies aériennes sont rapides, efficaces et abordables financièrement [CARBONNELL, 2018]. La topographie a pour définition toute technique de représentation sur un plan des formes du terrain, avec les détails des éléments naturels ou artificiels qu'il porte³. Dans le cas de l'étude du niveau d'eau par photogrammétrie, il est intéressant d'étudier la topographie car elle partage des points communs avec l'étude de la bathymétrie⁴.

[FONSTAD et al., 2013] présente la facilité et les nouvelles techniques que la photogrammétrie apporte aux mesures de la topographie. L'importance du géoréférencement de points de contrôle y est expliquée. Ces géoréférencements permettent de créer des modèles numériques d'élévation utiles pour l'étude des reliefs. On peut voir dans la photogrammétrie un grand potentiel en ce qui concerne la topographie.

1. Définition tirée du dictionnaire Larousse, 2018

2. Définition tirée de l'Encyclopædia Universalis, 2018

3. Définition tirée du dictionnaire Larousse, 2018

4. La bathymétrie est la mesure des profondeurs d'eau et des données correspondantes, Dictionnaire Larousse 2018

[LEJOT et al., 2007] explique que la télédétection a depuis son invention été utilisée pour caractériser les rivières et surtout leurs changements dans le temps. Un historique de cette technique est développé. Il explique que grâce à la technologie et le perfectionnement de la qualité des photographies, il est possible de travailler avec les photogrammétries sur des modèles plus petits qu'auparavant. Toutefois caractériser la bathymétrie semble compliqué et beaucoup de recherches et d'efforts sont fournis dans ce secteur. [LANE, 2000] appuyait cette thèse quelques années auparavant en affirmant que la photogrammétrie n'était pas encore exploitée au maximum de son potentiel. Des modèles physiques et empiriques se basant sur des techniques de télédétections classiques et des techniques de photogrammétries ont pourtant déjà été étudiés.

[WESTOBYA et al., 2012] aborde la notion de SfM (Structure from Motion). Il explique que cette technique permet d'obtenir des relevés topographiques facilement et de manière peu onéreuse (en utilisant un appareil photographique numérique grand public). Il estime que la SfM est un progrès majeur. Il attire également l'attention du lecteur sur le fait que les résultats ne sont pas donnés dans un repère référentiel mais dans un système de coordonnées relatives. Il tente d'appliquer ce modèle à plusieurs situations réelles. Les problèmes qu'il relève sont les suivants : une quantité importante de traitements post-expérience des photographies, le temps de compilation important du logiciel, la complexité des calculs qui induit une perte de complexité topographique et les éventuels problèmes de reconstitution si les terrains à analyser sont trop verticaux.

1.3 Photogrammétrie dans le domaine de l'hydraulique

L'application de la photogrammétrie dans le secteur de l'hydraulique grandit. Les débouchés et la technologie agissent comme un catalyseur dans l'utilisation de cette technique. En effet, cette technique permet de caractériser l'évolution des méandres, l'érosion, les transports de sédiments et de prévenir des inondations, des crues...

[LEJOT et al., 2007] fait référence à diverses études qui ont déjà eu lieu sur des sujets plus axés sur l'écoulement et les sédiments plutôt que la bathymétrie. Les résultats de la photogrammétrie dans le domaine de l'hydraulique devraient progresser grâce à l'évolution de la technologie.

[DIETRICH, 2016] explique que dans les grands cours d'eau, la bathymétrie peut être mesurée avec des sonars, des lidars ou profileurs à effet Doppler mais que dans le cas de petits cours d'eau, ces techniques sont inefficaces. Dans cette étude, il se focalise sur la photogrammétrie et la SfM avec tous les problèmes liés à la réflexion et réfraction de l'eau, afin de trouver la bathymétrie. Il met en pratique sa théorie sur deux cas : une piscine et sur la White River dans le Vermont. Il obtient de bons résultats (0.02% d'erreurs par rapport à la hauteur du vol pour l'acquisition de photographies) mais il explique qu'il a besoin de conditions idéales (par exemple, de l'eau parfaitement claire).

[FERREIRA et al., 2017] étudie la mesure de la surface d'écoulements de fluides naturels par photogrammétrie. La technique développée est étudiée en laboratoire mais [FERREIRA et al., 2017] affirme qu'elle peut également être appliquée à des terrains réels. Toutefois, pour réaliser des mesures correctes, il faut ajouter une texture à l'eau (des petites graines de 1 mm de diamètre). Les expériences sont également faites avec et sans végétation dans l'eau dans le but de comparer les résultats. Des précisions de l'ordre de 1 à 2 mm sont atteignables.

[CHANDLER et al., 2008] mesure la surface de l'eau grâce à de la photogrammétrie rapprochée (*close range photogrammetry*). Il utilise des appareils photos numériques synchronisés afin de pouvoir capter les mouvements de l'eau. La texture de l'eau est modifiée avec ajout d'un élément

biodégradable, comparable à du polystyrène, pour des raisons environnementales. Les résultats sont concluants avec une précision de 3 mm. La conclusion suggère de réunir ces travaux avec de la *particle image velocimetry* (PIV) afin de déterminer le débit d'une rivière.

Ecoulement transitoire

[FRANZINI et al., 2016] suggère des idées concernant l'étude des écoulements transitoires par photogrammétrie en laboratoire. L'utilisation d'un flash afin de synchroniser les caméras est évoquée. Le nombre de caméras peut être augmenté afin de modéliser l'entièreté du canal en une seule prise de vue. Cette dernière solution semble coûteuse et difficilement applicable.

1.4 Conclusion

On note le nombre important d'études utilisant la photogrammétrie. Les nouvelles technologies la rendent accessible et multiplient ses utilisations dans divers secteurs. Les secteurs de la topographie et de l'hydraulique ont été développés mais une multitude d'autres domaines exploitent ce procédé.

L'application de la photogrammétrie au domaine de la topographie semble être un sujet relativement maîtrisé à l'inverse du domaine hydraulique où les avis divergent. La recherche du niveau d'eau par photogrammétrie commence à donner des résultats intéressants. Les chercheurs font face à plusieurs problèmes lorsqu'on parle de photogrammétrie de la surface d'eau : la réflexion de l'eau, la réfraction, sa transparence... Des techniques se basant sur la possibilité de donner de la texture à l'eau (grains, colorants...) ou utilisant la végétation sont souvent évoquées. Les résultats sont souvent encourageants sauf en ce qui concerne les écoulements transitoires. Il semble en effet extrêmement difficile de caractériser ce genre d'écoulement.

Bon nombre de scientifiques croient en la faisabilité de projets utilisant la photogrammétrie pour le domaine hydraulique. Plusieurs études donnent d'excellents résultats. La fiabilité et le succès de ces études vont croître en parallèle avec les technologies et le nombre d'études grandissant.

Chapitre 2

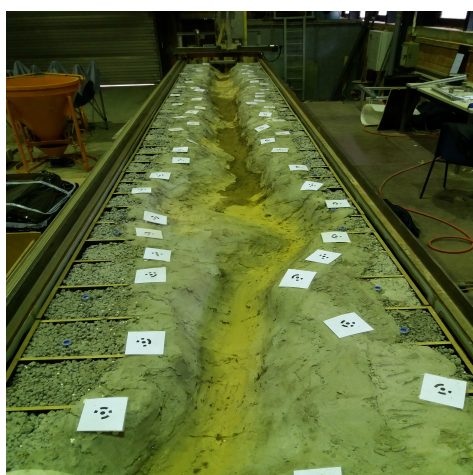
Réalisations antérieures à l’UCL

2.1 Dispositifs expérimentaux

Ce chapitre présente l’ensemble des dispositifs mis à disposition par l’Université Catholique de Louvain-La-Neuve ainsi que les études qui ont été faites précédemment. Cette partie s’inspire largement des travaux réalisés en 2017 par [COUTINHO et JANSSENS, 2017] et en 2004 par [BOUSMAR et FRASELLE, 2004].

2.1.1 Le canal

L’installation utilisée est celle pensée et construite par [COUTINHO et JANSSENS, 2017]. Celle-ci consiste en une rivière constituée de béton posée à l’intérieur d’un canal. La différence entre le mot “canal” et le mot “rivière” est primordiale. L’appellation “canal” désigne l’entièreté de la structure existante depuis des années, en acier et ajustable. Les mots “rivière” et “modèle réduit” sont considérés comme synonymes et désignent la reconstitution de la rivière en béton sans l’infrastructure autour. La méthode de construction et de mise en place est décrite par [COUTINHO et JANSSENS, 2017] dans leur travail de fin d’étude « Mesure de la surface libre d’écoulement en bathymétrie complexe par photogrammétrie ». La pente du canal est ajustable ; elle est étudiée au chapitre 2 de la partie II “Améliorations du dispositif expérimental”.



(a) Photographie du modèle réduit prise depuis l’aval.

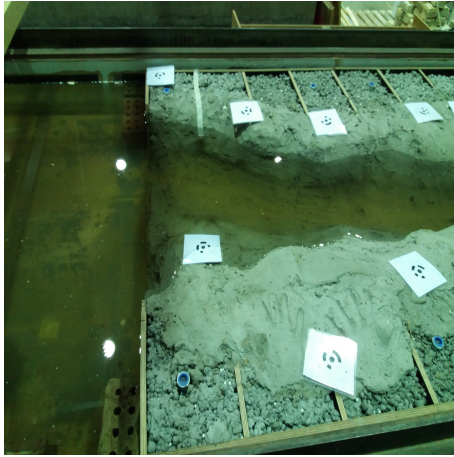


(b) Ensemble du canal avec à l’intérieur le modèle réduit.

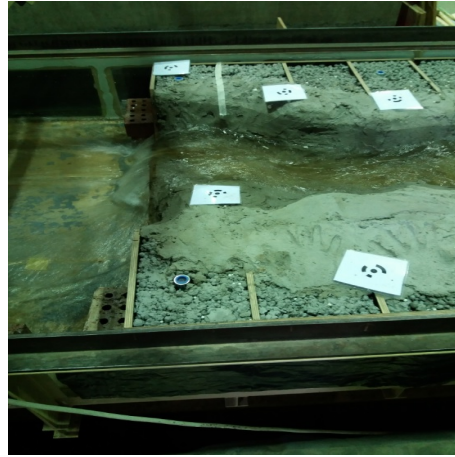
FIGURE 2.1 – Différence entre canal et modèle réduit.

De plus, une vanne clapet permet de changer les conditions d’écoulement. [SERRE, 1953] étudie

en profondeur les influences que peuvent avoir les conditions aval sur les écoulements. Si la vanne clapet est complètement relevée, l'eau monte énormément et donne lieu à un écoulement avec une surface régulière, sans remous sur tout le modèle réduit. Si la vanne clapet est complètement descendue, un écoulement plus turbulent est observable sur les dernières sections.



(a) Influence de l'aval lorsque la vanne clapet est relevée.



(b) Influence de l'aval lorsque la vanne clapet est descendue.

FIGURE 2.2 – Influence des conditions aval sur l'écoulement.

Structures mobiles

Deux structures mobiles sont utiles : l'une pour l'acquisition de photographies appelée cage et l'autre permettant d'accueillir les instruments de mesures appelée automate de mesure.

La première, la cage est un chariot roulant dont la structure interne permet l'utilisation de profilé en aluminium. Cette cage sert à l'acquisition de données photographiques. Les caméras sont fixées sur les profilés en aluminium et la cage est déplacée tout le long du canal sur des rails prévus à cet effet. Dans un premier temps, des draps noirs ainsi qu'un spot lumineux y sont installés pour des raisons de luminosité diffuse et de zones de surexpositions. Cette théorie de luminosité diffuse a été développée par [MICHELETTI, CHANDLER et LANE, 2015b]. Toutefois dans un second temps, ces draps noirs et le spot lumineux sont abandonnés.

La seconde, l'automate de mesure est un chariot de petite taille sur lequel se trouve un système d'automate. Il est possible de fixer des instruments de mesure sur cet automate. Ses déplacements transversaux et verticaux sont automatisés alors que les déplacements longitudinaux sont manuels. Le trusquin et le laser Keyence seront fixés à cet automate lors de leur utilisation. Ces instruments de mesures sont décrits dans les annexes A.1 et A.2. Les rails sur lesquels reposent ces deux structures mobiles sont inclinés et ne sont pas rectilignes. Une correction est nécessaire. La matrice de correction et la méthode de correction sont expliquées par [BOUSMAR et FRASELLE, 2004] et [COUTINHO et JANSSENS, 2017].



(a) Cage sur rails avec profilés en aluminium.



(b) Automate de mesure.

FIGURE 2.3 – Représentation des deux structures mobiles.

La pompe à eau

Le canal est alimenté à l'amont par une pompe. L'eau se trouve dans un circuit fermé. Pour alimenter le canal en eau, il faut allumer la pompe et ouvrir la vanne au débit désiré. Les capacités de la pompe permettent d'obtenir des débits se situant entre 0 litre par seconde (l/s) et 12 l/s. Une fois l'ensemble des manipulations réalisé, il faut attendre quelques minutes que le système et l'écoulement se stabilisent avant de débiter les expériences. La pompe présente le désavantage de varier dans le temps. En effet, une fois le débit fixé, en l'espace de quelques minutes, le débit peut diminuer de l'ordre quelques décilitres par seconde. A nouveau, ce phénomène a été remarqué et étudié par [BOUSMAR et FRASELLE, 2004] et [COUTINHO et JANSSENS, 2017].

2.1.2 Matériel photographique

Le matériel utilisé pour les photographies est repris dans le tableau suivant.

Type de caméra	Pixels [MPix]	Longueur focale [mm]	Dimensions [mm]
Go Pro Hero 4 Silver	12	3	59x41x30
Appareil photo Pentax 4D	14.6	18	141x101x70

Plusieurs paramètres de l'appareil photographique influencent la reconstruction 3D Agisoft-Photoscan. Le manuel de l'utilisateur Agisoft-Photoscan¹ explique clairement tous les détails à mettre en oeuvre pour aspirer à la meilleure modélisation. Les points suivants sont extraits de ce manuel Agisoft-Photoscan :

- Le manuel ne voit pas de différence entre un appareil photographique numérique métrique et non-métrique.
- Utiliser un appareil photographique de haute résolution, soit au minimum 5MPix. Cette suggestion est validée par l'étude de [PEIPE et STEPHANI, 2003]. Au plus la résolution est grande, au meilleur sera le modèle.
- Éviter le fish-eye et l'ultra grand angle.
- En cas d'utilisation de zoom, régler la focale à la valeur maximale ou à la valeur minimale.
- Régler une grande profondeur focale.

1. *Agisoft PhotoScan Manuel de l'utilisateur, Professional Edition, Version 1.1*

- Pour éviter tout flou dû aux mouvements, il ne faut pas une vitesse d'obturation trop importante.

2.2 Logiciels utilisés et démarche

Il existe dans la technique de photogrammétrie plusieurs familles de logiciels : commercialisés, open source ou même sur le web. Les solutions web sont souvent limitées et visent un public de débutants afin de se familiariser avec la photogrammétrie. Les logiciels commercialisés sont destinés à des professionnels et sont souvent les plus performants. Des solutions open source sont également présentes, ayant l'avantage d'être gratuites. Une étude approfondie des différents logiciels de photogrammétrie a été entreprise par [DUDKA, 2015].

Le logiciel de photogrammétrie utilisé dans le cadre de ce projet est Agisoft-Photoscan. Agisoft-Photoscan est développé en Russie depuis 2010 et est depuis lors commercialisé. Il possède une communauté considérable d'utilisateurs permettant de trouver des informations et des aides utiles sur internet [COUTINHO et JANSSENS, 2017]. C'est un des principaux logiciels de photogrammétrie, dépassant les solutions web ou open source [DUDKA, 2015]. Le choix de l'utilisation de ce logiciel relève du fait que l'UCL possède une licence. [Agisoft PhotoScan User Manual, Professional Edition, Version 1.4 2018] est la version anglaise la plus récente du manuel d'utilisateur. Une version moins récente existe en français [Agisoft PhotoScan Manuel de l'utilisateur, Professional Edition, Version 1.1 2015].

Le but de ce projet n'est pas d'étudier les algorithmes utilisés par Agisoft-Photoscan, ni d'expliquer toutes les capacités qu'offre ce logiciel. Il est donc utilisé comme une boîte noire. Le logiciel Agisoft-Photoscan permet d'obtenir des *Modèles Numériques Elevation* ou *Digital Elevation Models* en anglais (appelés DEMs pour la suite du projet). Ces DEMs vont permettre d'analyser la bathymétrie et de développer des méthodes de détection du niveau de l'eau. La procédure pour obtenir un DEM est décrite dans le travail de [COUTINHO et JANSSENS, 2017]. Un résumé des étapes à suivre sur le logiciel se trouve ci-dessous :

1. La détection des marqueurs automatiques et le géo-référencement de ceux-ci.
2. L'alignement des photos permettant de créer des points de liaison (*sparse cloud*).
3. Création d'un nuage dense de points (*dense cloud*).
4. Création d'un maillage (*mesh*). La pertinence de cette étape est étudiée plus tard.
5. Création d'un DEM. Les étapes 3 et 4 ne sont pas indispensables pour la création d'un DEM. L'étape 3 est fortement recommandée ; sa pertinence est étudiée dans les travaux de [COUTINHO et JANSSENS, 2017].

2.3 Résultats du travail de fin d'étude de 2016-2017

Cette section reprend les idées majeures du travail de [COUTINHO et JANSSENS, 2017] qui ont servi de base pour l'étude de l'année académique 2017-2018. Si le lecteur désire connaître les détails de ce travail, les références se trouvent dans la bibliographie.

2.3.1 Modèle réduit

Le canal existe depuis 1998 et a été perfectionné au fur et à mesure des années avec l'arrivée d'instruments de mesures comme l'automate. [BOUSMAR et FRASELLE, 2004] ont écrit un manuel d'utilisation du canal « Canal à lit composé et programme hydrocap. descriptif, mode d'emploi ». Le canal en lui-même mesure 10 m de longueur pour une largeur de 1.2 m.

Le modèle réduit est conçu en béton pour des raisons de facilités techniques et dans le but de tendre vers un modèle le plus réel possible avec une rugosité similaire à ce qui pourrait être observable dans la nature. Le modèle réduit s’inspire d’une rivière existante : la rivière Cavaillon en Haïti. Le modèle réduit a été conçu à l’extérieur du canal pour ensuite être posé dans celui-ci. Le béton repose sur 45 sections en bois espacées l’une de l’autre de 20 cm, donnant lieu à une rivière longue de 8.8 m, large de 1.2 m berges incluses et haute d’une quinzaine de cm. Le coffrage général est réalisé en bois et se trouve également dans le canal.

2.3.2 Analyse de la bathymétrie et pente

Une fois le système mis en place, [COUTINHO et JANSSENS, 2017] ont utilisé Agisoft-Photoscan pour étudier la bathymétrie et la pente du modèle réduit. Leurs points de référence sont également mesurés au moyen d’un laser Keyence. Cependant leur matrice de comparaison est constituée de 1320 valeurs, contrairement au projet actuel où la matrice est constituée de 4005 valeurs (voir point 2.2.1 Le laser Keyence de la partie II “Améliorations du dispositif expérimental”). Leurs résultats sont encourageants et sont similaires à ceux trouvés dans l’étude actuelle. En revanche, lors de l’étude du profil en long, ils ont remarqué que l’ouvrage était en contre-pente.

2.3.3 Mesure de la surface libre

Eau au repos

Ils ont commencé par étudier le cas de l’eau au repos et ont testé différentes techniques pour aider Agisoft-Photoscan à déterminer le niveau d’eau. Ainsi deux types de techniques ont été étudiées : l’une consistant à recouvrir l’eau et l’autre à changer l’opacité de l’eau.

Les expériences ont été réalisées en eau claire, avec du colorant, de la boue, de la frigolite et de la pliolite. Les résultats sont toutefois peu séduisants notamment avec l’eau claire où l’erreur relative peut atteindre 69%. Leur meilleure solution s’avère donc être la surface d’eau couverte de pliolite avec une erreur relative inférieure à 1% pour le cas de l’eau au repos.

Eau en écoulement permanent

L’étude des écoulements permanents a été réalisée sur deux débits différents 6[l/s] et 8[l/s]. Les valeurs mesurées à l’aide d’un trusquin servent de points de référence pour l’estimation de l’erreur.

La suite du chapitre, dans lequel ils ont étudié les problèmes et phénomènes liés à un écoulement permanent, est très intéressante et est réutilisée dans l’étude de 2017-2018. Ils ont dans un premier temps défini le coefficient de Manning comme étant égal à $0.0275 \left[\frac{s}{m^{1/3}} \right]$. Une fois ce coefficient de Manning trouvé, ils ont étudié l’influence de la variation de l’alimentation sur le niveau d’eau dont les résultats sont repris dans l’analyse des écoulements permanents.

Leur modèle numérique tente de trouver le niveau d’eau sur base de l’analyse de la différence entre un DEM de la bathymétrie et un DEM obtenu lors d’une expérience en écoulement permanent. Cette méthode sert de point de départ pour la conception d’un nouveau modèle numérique efficace.

Deuxième partie

**Améliorations du dispositif
expérimental**

Chapitre 1

Systeme d'axes

L'origine du référentiel du modèle réduit a été fixée en amont de la rivière sur la rive droite comme illustré à la figure 1.1. Le modèle réduit s'articule comme suit :

- un axe X longitudinal : l'origine $x = 0$ [m] se trouve en amont de la rivière. L'axe est positif dans le sens de l'écoulement. La fin de la rivière se situe en $x=8.8$ [m].
- un axe Y transversal : l'origine $y = 0$ [m] est fixée à l'extrémité de la rive droite. Les valeurs sont positives en direction de la rive gauche.
- un axe Z vertical : l'origine $z = 0$ [m] est fixée à l'amont de la rivière en $x = 0$ [m] et $y = 0$ [m]. Les coordonnées verticales ont donc des valeurs négatives sur tout le modèle réduit.

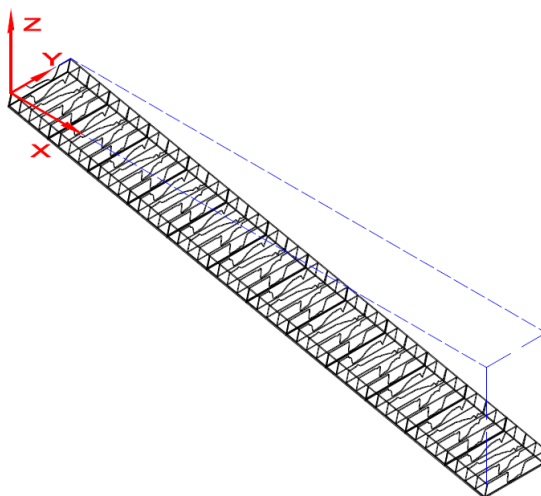


FIGURE 1.1 – Systèmes d'axes

Le mot "section" servira à définir une coupe du modèle réduit dans le plan de l'axe y, c'est-à-dire un plan perpendiculaire à l'écoulement. Ces sections sont au nombre de 45, distantes de 20 cm l'une de l'autre.

Chapitre 2

Pente

2.1 Introduction

La littérature définit *la pente dans le secteur public* comme le quotient de la différence de niveau de deux points de la surface de l'eau par la distance entre ces deux points mesurée suivant l'axe de la voie d'eau.¹ La définition de pente dans le secteur de l'hydraulique devient alors "le rapport entre la baisse du thalweg d'un cours d'eau par unité de distance". Par convention la pente est défini comme suit [ZECH, 2008] :

$$i = \frac{-dz}{ds} = \frac{z_1 - z_2}{s_2 - s_1}$$

Le point 1 (s_1, z_1) est pris comme le point amont et le point 2 (s_2, z_2), comme le point aval. Si ce rapport est négatif, la pente est dite "en contre-pente". Si ce rapport est positif, la rivière est en pente. La notion de thalweg se définit comme la ligne joignant les points les plus bas d'une vallée.² Par analogie, le thalweg d'une rivière correspond à la ligne joignant les points les plus bas du lit d'un cours d'eau. L'ensemble de l'ouvrage a été repositionné de manière à ce que celui-ci possède une pente, l'étude précédente se basant en effet sur l'analyse d'une rivière en contre-pente [COUTINHO et JANSSENS, 2017]. Une pente positive reflète des situations plus réelles qu'une rivière en contre-pente. Une analyse de la pente et du thalweg via la station totale, le laser Keyence et les modèles Agisoft-Photoscan est exposée dans ce chapitre.

2.2 Mesures au Laser Keyence, station totale et Agisoft-Photoscan

L'évolution du thalweg sur la longueur de la rivière a été trouvée via trois techniques : la station totale, le laser Keyence et le modèle Agisoft-Photoscan. Quatre jeux de données ont été réalisés, assurant ainsi une certaine fiabilité à la valeur de la pente : un jeu via la Station totale, un jeu via le laser Keyence, un modèle Agisoft-Photoscan avec des photos issues de la Go Pro Hero 4 Silver et finalement un modèle Agisoft-Photoscan avec des photos issues de l'appareil photo Pentax 4D. Afin de déterminer la pente générale, une régression linéaire a été nécessaire sur les quatre modèles.

Il faut s'assurer que la pente de la rivière soit calculée dans le repère référentiel (cfr figure 1.1). Les mesures au laser Keyence suivent la pente du canal et doivent donc être translatées.

2.2.1 Le laser Keyence

Les mesures au laser Keyence sont les points de référence pour toutes les analyses. Ce sont ces mesures qui sont considérées comme "réelles" contrairement aux modèles Agisoft-Photoscan.

1. Dictionnaire Larousse 2018

2. Dictionnaire Larousse 2018

Un maillage sur l'entièreté de la rivière a été effectué. L'analyse d'une section consiste en la prise de mesure tous les deux centimètres sur la largeur de la rivière (la largeur du maillage est de 0.9 m), donnant lieu à 45 mesures par section. Une analyse de section est réalisée tous les dix centimètres sur toute la longueur du modèle réduit, soit une distance totale de 8.8 m. Le déplacement sur la longueur (selon l'axe des X) se fait manuellement alors que les déplacements sur chaque section est automatisé. Une matrice de 45x89 mesures caractérisant l'entièreté de la rivière découle de cette manipulation. Le thalweg est trouvé en considérant le minimum des valeurs relevées sur chaque section. Le pente trouvée est de 0.21%.

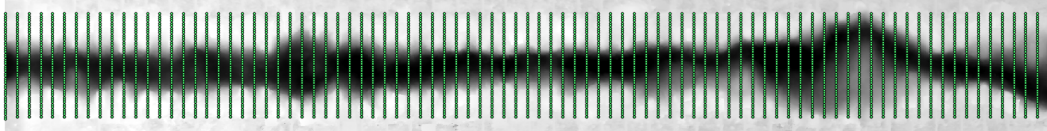


FIGURE 2.1 – Ensemble des points de mesure du laser Keyence.

2.2.2 La station totale

La station totale (ou tachéomètre) est un instrument qui permet de mesurer précisément des angles et des distances. Positionné à l'aval du modèle réduit, l'instrument permet, via un laser visant un point précis, de réaliser des mesures. A nouveau, cette technique peut être considérée comme manuelle car la pertinence du point à mesurer est soumise à l'appréciation de l'utilisateur. Des mesures ont été relevées tous les dix centimètres sur le fond de la rivière depuis l'amont. Le nombre de mesures ainsi relevées est de 89. La station totale donne sans surprise des valeurs similaires à celle du laser Keyence. La valeur de la pente ainsi trouvée est d'ailleurs égale à celle trouvée via le laser Keyence, soit 0.21%.

2.2.3 Le modèle Agisoft-Photoscan pour la Go Pro

Le modèle Agisoft-Photoscan pour la Go Pro est une méthode basée sur une série de photographies prises grâce à la Go Pro. La démarche à suivre est la suivante : plusieurs photographies sont réalisées, celles-ci sont alors traitées et le logiciel Agisoft-Photoscan offre des DEMs exploitables. Ces DEMs sont associés à des matrices de 1000x9000 (9000 coupes transversales sur 9 m selon l'axe X avec pour chaque coupe 1000 mesures allant de 0 à 1m selon l'axe Y) valeurs caractérisant le modèle réduit. Le minimum de chaque section est calculé via Matlab. Agisoft-Photoscan offre une quantité de points plus importante que les deux méthodes manuelles. La régression linéaire témoigne d'une pente de 0.2%. Il est à noter que la Go Pro présente des erreurs de l'ordre de 1 cm au début et à la fin de la rivière.

2.2.4 Le modèle Agisoft-Photoscan pour l'appareil photo

Le modèle Agisoft-Photoscan pour l'appareil photo suit la même démarche que le point précédent si ce n'est que le matériel utilisé dans ce cas-ci est l'appareil photo et non la Go Pro. La pente trouvée est de 0.24%.

Des valeurs pratiquement similaires ont été trouvées via ces quatre techniques et dorénavant la pente du canal sera considérée comme égale à 0.21%. La figure 2.2 illustre l'évolution de la pente sur l'ensemble du modèle réduit pour les quatre jeux de données réalisés.

Ces résultats sont également une première approche de la fiabilité des modèles Agisoft-Photoscan. La figure 2.2 montre qu'Agisoft-Photoscan donne un profil en long très proche de ce qui a été mesuré par le laser Keyence et la station totale.

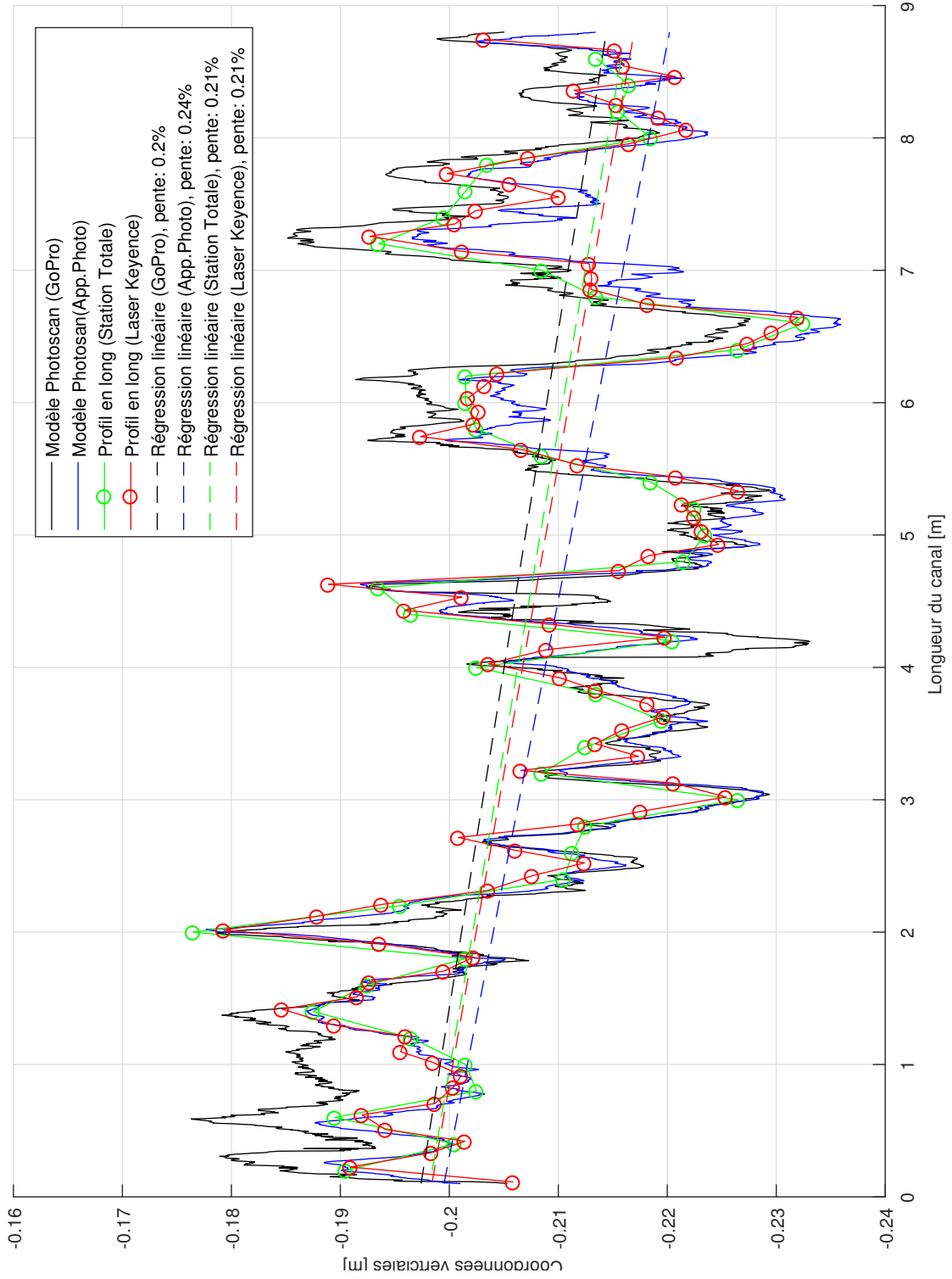


FIGURE 2.2 – Profil en long du thalweg de la rivière

2.3 Sources d'erreurs

Les sources d'erreurs dans cette recherche de la pente sont les suivantes.

2.3.1 Laser Keyence

Premièrement, les mesures sur chaque section sont faites tous les 2 cm. Le thalweg pouvant se situer entre deux prises de mesures, une petite imprécision de l'ordre du millimètre est possible.

Deuxièmement, l'eau de la rivière transporte de petits sédiments, ces couches de sédiments peuvent atteindre des épaisseurs de l'ordre de 5 mm. Lorsqu'une expérience est faite avec de l'eau, ces sédiments se déplacent légèrement. Entre les mesures au laser Keyence et les prises de photographies pour les trois modélisations, ces sédiments pourraient avoir bougé et dès lors avoir influencé la bathymétrie.

2.3.2 Station totale

Tout d'abord, le thalweg a été déterminé en tâtonnant manuellement le point le plus bas sur chaque section. Le thalweg pourrait donc se trouver quelques millimètres à coté de la valeur utilisée ici.

Ensuite, quelques dépôts se trouvent parfois dans le fond de la rivière et pourraient cacher le vrai thalweg. Ces deux sources d'erreurs liées à la station totale pourraient engendrer des imprécisions de l'ordre du millimètre dans la mesure du thalweg, n'ayant pas de répercussions majeures dans le calcul de la pente.

Chapitre 3

Bathymétrie

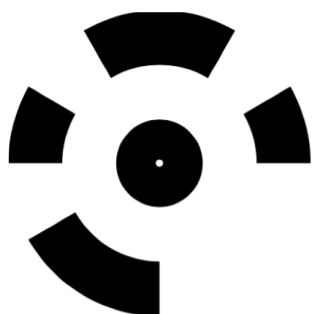
3.1 Introduction

La bathymétrie est la mesure des profondeurs d'eau et des données correspondantes¹. Il est important de définir le plus précisément possible cette bathymétrie car elle joue un rôle essentiel dans l'étude de la mesure du niveau d'eau. En effet, le modèle de la bathymétrie présenté ici sera utilisé lors des analyses d'écoulements permanents et transitoires. Ce chapitre traite de la caractérisation de cette bathymétrie au moyen de différentes méthodes, notamment Agisoft-Photoscan et le laser Keyence, ainsi que la comparaison des différents modèles obtenus.

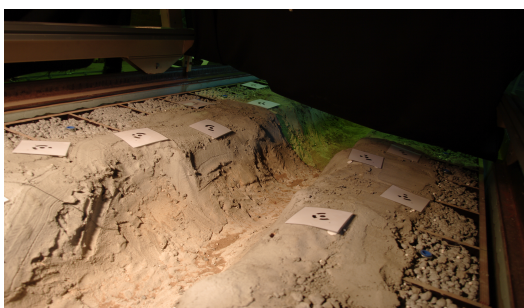
3.2 Points de référence

Le modèle réduit est doté de marqueurs Agisoft-Photoscan. Les points de référence (ou marqueurs) sont des points utiles au logiciel Agisoft-Photoscan. Ces marqueurs permettront à Agisoft-Photoscan d'obtenir des points de repère sur l'intégralité des photographies. Cela permet de faciliter sa tâche dans la recherche de points communs entre ces différentes photographies. Les points de référence sont dits "automatiques" : ils sont repérés directement par le logiciel, évitant ainsi de devoir les placer manuellement. Afin d'avoir un système d'axes et des dimensions cohérents, les coordonnées de ces marqueurs sont importées dans Agisoft-Photoscan. Le nombre de points de référence est de 66.

Le changement de pente nécessite une nouvelle géolocalisation de ceux-ci. Le géoréférencement a été fait une première fois via la station totale. Par la suite, l'idée de géoréférencer via le laser Keyence semblait plus simple. Elle a donc été préférée à la première option.



(a) Marqueur 12 bit.



(b) Marqueurs fixés sur les rives.

FIGURE 3.1 – Exemple de marqueurs et leurs dispositions tout le long du modèle réduit.

1. Dictionnaire Larousse 2018

3.3 Analyse de la bathymétrie

Le but de cette section est de définir la bathymétrie de la rivière utilisée grâce au modèle fourni par Agisoft-Photoscan. Afin de vérifier la fiabilité du modèle, les valeurs issues du DEM sont comparées à celles du laser Keyence, considérées comme le point de référence.

3.3.1 Matériels utilisés

Pour l'ensemble des expériences, les photographies sont prises via l'appareil photo Pentax 4D et la Go Pro Hero 4 Silver dont les caractéristiques sont exposées au point 2.1.2 "Matériel photographique" de la partie I.

Le laser Keyence est également utilisé comme appareil de mesure.

3.3.2 Laser Keyence

Les mesures du laser Keyence sont les mêmes que celles exploitées dans le point 2.2 "Mesures au Laser Keyence, station totale et Agisoft-Photoscan". Il s'agit d'une matrice de 45x89 (4005) mesures. L'analyse de chaque section est précise. Ces mesures peuvent être exploitées via le logiciel Matlab. Un exemple de ces points de mesures sur une section est donné à la figure 3.2. Une simulation (figure 3.3) de toutes les sections et donc de l'entière du modèle réduit peut être réalisée mais celle-ci est plus grossière que les modèles Agisoft-Photoscan obtenus. Les points de mesures du laser Keyence constituent les points de référence. Les données exploitables fournies par Agisoft-Photoscan permettent une comparaison avec le laser Keyence. Les modèles Agisoft-Photoscan sont validés si la différence entre les valeurs du laser Keyence et celles du logiciel Agisoft-Photoscan est faible.

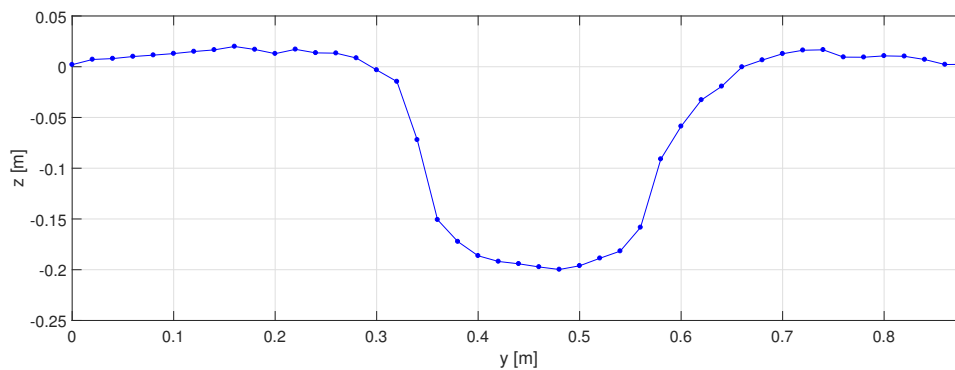


FIGURE 3.2 – Exemple de mesures de la bathymétrie de la section 11 ($x=1m$).

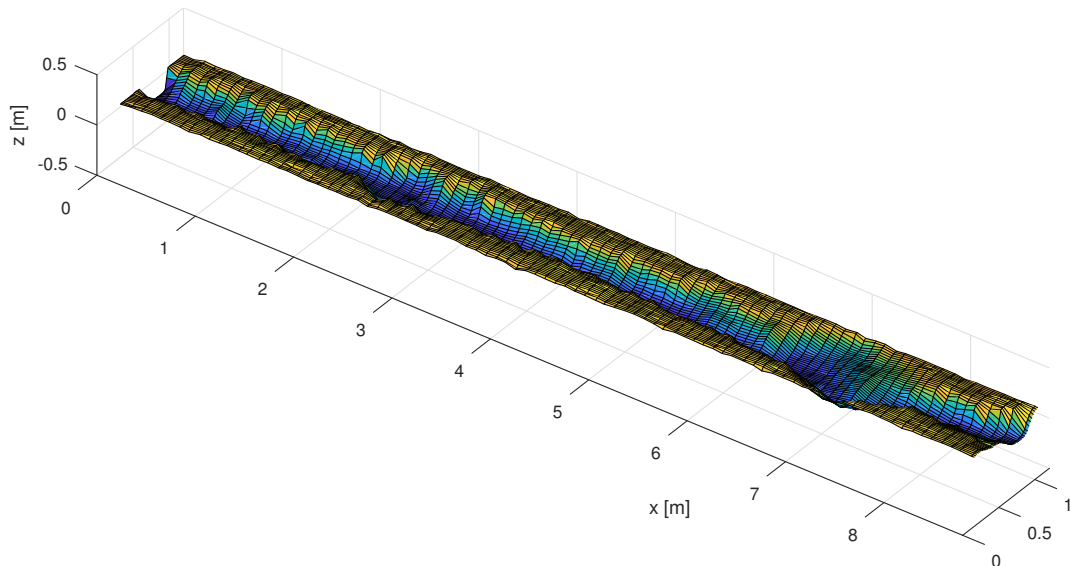


FIGURE 3.3 – Bathymétrie en 3D réalisée sur base des mesures du laser Keyence.

3.3.3 Agisoft-Photoscan

Comme expliqué au point 2.2 “Logiciels utilisés et démarche” de la partie I, le modèle Agisoft-Photoscan offre une multitude d’options et de manières de modéliser un problème. L’étude de la bathymétrie a été exécutée de plusieurs manières et a été perfectionnée tout au long du travail. Les premières acquisitions de données ont été réalisées dans la cage noire grâce à l’appareil photo Pentax et la Go Pro Hero 4 Silver. Lors des expériences en écoulement permanent, il s’est avéré que la cage noire n’apportait rien aux résultats des expériences (affecte même parfois négativement les résultats). L’idée d’un nouveau jeu de données sans cage noire et une comparaison des résultats semblaient inévitables.

Ces données sont traitées grâce à Agisoft-Photoscan et les DEMs sont sortis sur base de nuage dense de qualité haute.

3.3.4 Résultats et analyse

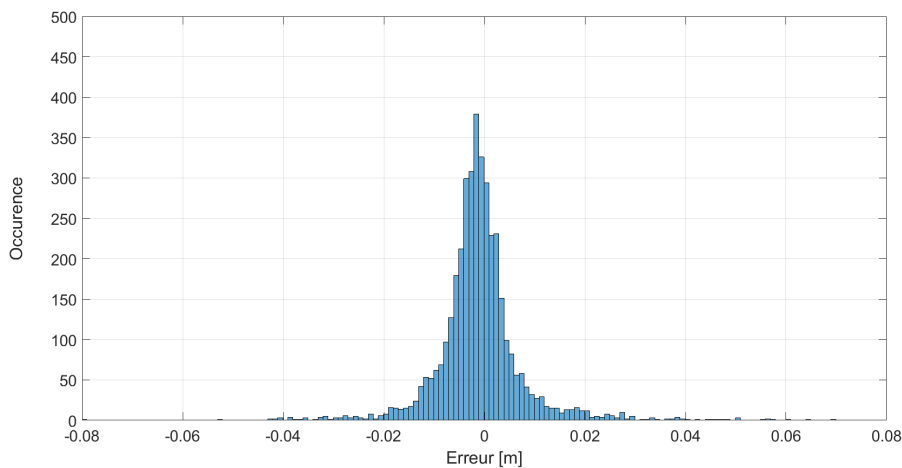
Tous les DEMs (au nombre de quatre) doivent être comparés avec le laser Keyence, considéré comme la référence. Ces trois DEMs se présentent comme suit :

1. Un DEM conçu en nuage dense de qualité haute dont les photographies sont basées sur l’appareil photo Pentax avec la cage noire,
2. Un DEM conçu en nuage dense de qualité haute dont les photographies sont basées sur l’appareil photo Pentax sans la cage noire,
3. Un DEM conçu en nuage dense de qualité haute dont les photographies sont basées sur la Go Pro Hero 4 Silver avec la cage noire,
4. Un DEM conçu en nuage dense de qualité haute dont les photographies sont basées sur la Go Pro Hero 4 Silver sans la cage noire,

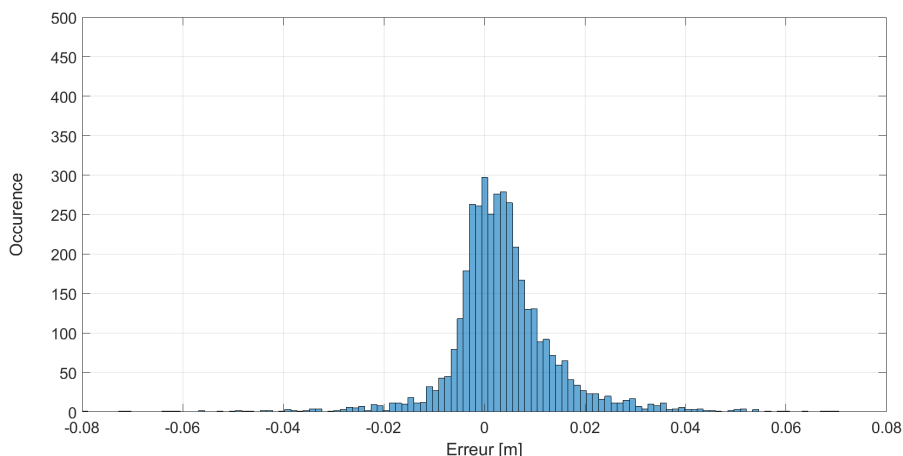
Dans un premier temps, il est utile de comparer l’erreur moyenne de ces DEMs par rapport au laser Keyence. Le terme erreur est employé pour signifier la différence entre la valeur de la mesure réalisée au laser Keyence et la valeur livrée par le logiciel Agisoft-Photoscan pour un même point du modèle réduit. Pour ce faire, il faut créer un maillage de 45x89 points sur le DEM. Ces points doivent être placés exactement aux mêmes endroits de la rivière que les mesures faites au laser

Keyence, c'est-à-dire aux points représentés à la figure 2.1. Cette démarche peut aisément être exécutée via le logiciel QGIS (Logiciel expliqué dans l'annexe E. Le logiciel renvoie les coordonnées en z du DEM pour des coordonnées (x,y). Il est dès lors possible de calculer la différence entre le DEM et les mesures du laser Keyence pour des points dont les coordonnées (x,y) sont les mêmes. Toutefois, les mesures présentent de temps à autre des outliers. Ces outliers sont des valeurs aberrantes qui sont dues à des imperfections ponctuelles du modèle Agisoft-Photoscan, des imperfections ponctuelles dans la mesure du laser Keyence ou des imperfections ponctuelles dans la conception de la rivière en béton. De plus, la section 1 et la section 45 ont été retirées. En effet, l'infrastructure de la cage noire ne permet pas d'avoir des points de vue de bonne qualité sur la première et la dernière section de la rivière (en $X = 0$ m et $X = 8.8$ m). L'acquisition de photographies faites à la main offre plus de maniabilité et permet d'avoir des points de vue de qualité au niveau des sections problématiques. Pour avoir une comparaison sensée, ces sections 1 et 45 ont donc été supprimées dans les analyses d'erreurs des DEMs (le nombre de points de comparaison passe alors de 4005 à 3915).

Les graphiques des figures 3.4 et 3.5 montrent les histogrammes de ces différences pour les quatre DEMs.

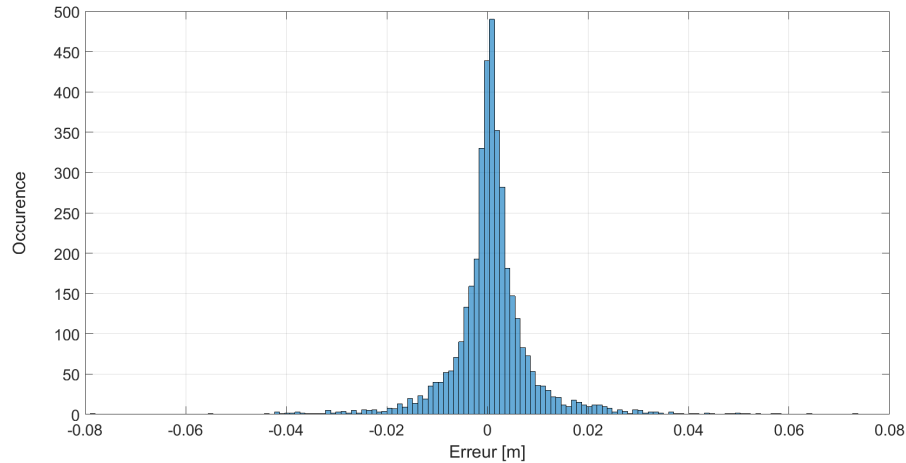


(a) Appareil Photo avec cage noire vs laser Keyence.

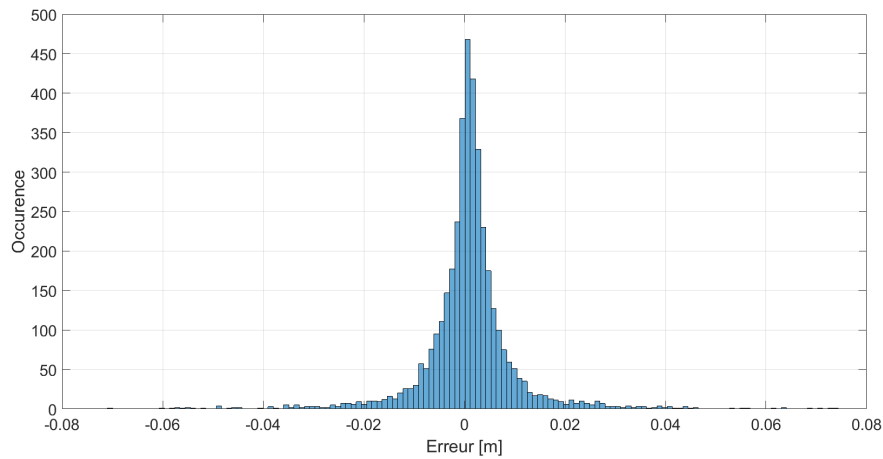


(b) GoPro avec cage noire vs laser Keyence.

FIGURE 3.4 – Histogramme des différences entre les modèles Agisoft-Photoscan et laser Keyence pour la Go Pro et l'appareil photo avec cage noire.



(a) Go Pro sans cage noire vs laser Keyence.



(b) Appareil Photo sans cage noire vs laser Keyence.

FIGURE 3.5 – Histogramme des différences entre les modèles Agisoft-Photoscan et laser Keyence pour la Go Pro et l'appareil photo sans cage noire.

Au vu du nombre de mesures (3915 après le traitement des outliners) et de l'allure des graphes, utiliser les règles liées à la loi normale semble logique. Le tableau 3.1 reprend les erreurs moyennes (\bar{e}), les erreurs moyennes absolues (\bar{e}_{abs}) et l'écart-type (σ) de 3915 valeurs pour chacun des quatre DEMs par rapport au laser Keyence. Ces erreurs moyennes, erreurs moyennes absolues et écart-types sont calculés comme suit :

Considérant n le nombre de mesures traitées (ici $n = 3915$) et e_i l'erreur de la i -ème valeur alors :

- $\bar{e} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_i$
- $\bar{e}_{abs} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |e_i|$
- $\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (e_i - \bar{e})^2}$

Qualité du DEM Type de Caméra	\bar{e} [mm]	\bar{e}_{abs} [mm]	σ [mm]
Appareil photo avec cage noire	1.0	5.6	10.6
Appareil photo sans cage noire	0.98	5.6	11.74
Go Pro avec cage noire	3.5	7.7	14
Go Pro sans cage noire	0.83	5.2	9.06

TABLE 3.1 – Erreurs moyennes, erreurs moyennes absolues et écart-types pour les erreurs entre les modèles DEM et le laser Keyence.

Dans le cas où les photographies ont été réalisées dans la cage noire, l'appareil photo présente de meilleurs résultats que la Go Pro. Cependant, sans cage noire, la Go Pro présente d'excellents résultats : la moyenne des erreurs est inférieure à 1 mm et l'erreur moyenne absolue est de l'ordre de 5 mm. Elle s'avère être donc du même ordre de grandeur que l'appareil photographique sans cage noire. L'avantage de la Go Pro est sa maniabilité et sa petite taille. L'appareil photographique ne présente pas de résultats considérablement meilleurs sans cage noire que les résultats avec cage noire. Celui-ci étant plus contraignant à manipuler que la Go Pro, il est écarté pour la suite des expériences.

3.4 Sources d'erreurs

3.4.1 Les mesures au laser Keyence

Le modèle réduit présente parfois de "petits trous" ou des fissures dans le béton. Une valeur mesurée via le laser Keyence revient plusieurs fois dans la matrice de 45x89 mesures. Cette valeur est la valeur maximale que le laser peut mesurer. Cela prouve que ces fissures et petits trous perturbent et empêchent le laser de mesurer correctement certaines valeurs.

Les valeurs erronées de ces trous ont été remplacées par la moyenne entre la valeur précédente et suivante de la mesure concernée sur la même section. Ces valeurs corrigées sont au nombre de 10. Cette approximation est rudimentaire et implique une très probable erreur de l'ordre de 1 ou 2 mm.

Les mesures au laser Keyence sont des mesures qui sont relevées automatiquement sur les axes Z et Y, le déplacement selon l'axe X étant manuel. Le laser se déplace automatiquement tous les deux centimètres sur une section et relève la coordonnée en Z qu'il enregistre sur une carte d'acquisition de données. La précision sur ces axes relève de la machine et non de l'homme. En revanche, le déplacement sur la longueur du modèle réduit (l'axe des X) doit être fait manuellement. Dès lors, le déplacement tous les dix centimètres sur l'axe de X pourrait être moins précis et engendrer des erreurs, qui restent faibles.

Les plus grandes erreurs, qui peuvent atteindre des valeurs de 8 cm, sont présentes au niveau des berges verticales. Elles sont dues à une erreur de translation suivant l'axe Y car une erreur de quelques millimètres suivant cet axe peut potentiellement engendrer des erreurs de l'ordre de plusieurs centimètres selon l'axe vertical Z. Ce type d'erreur est illustrée à la figure 3.6.

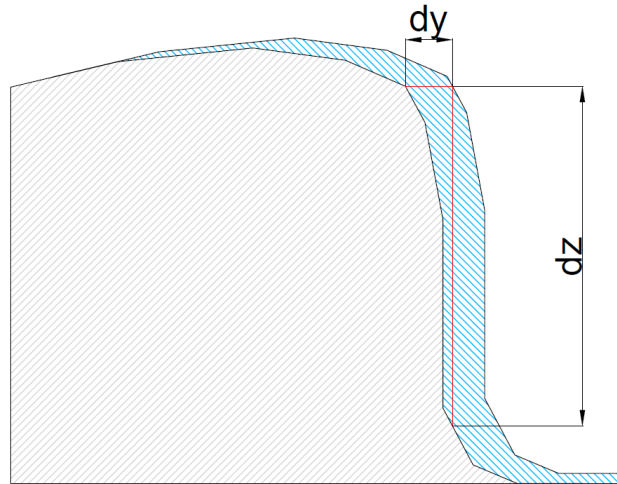


FIGURE 3.6 – Erreur potentielle du décalage en y

3.4.2 La cage noire

La cage noire utilisée pour les premières expériences n'est pas particulièrement utile. Lors de ces expériences, un spot lumineux est utilisé dans la cage pour tenter d'obtenir une lumière optimale et homogène. Cette lumière implique des reflets importants sur certaines berges ou certains repères plastifiés et peut fausser l'analyse Agisoft-Photoscan.

3.5 Discussion

Le modèle réduit est dorénavant en pente et la pente est considérée comme égale à 0.21%. Les modèles Agisoft-Photoscan employés pour la recherche de cette pente donnent des résultats très proches et rassurent quant à la fiabilité de ces modèles.

Les erreurs obtenues sont considérées comme acceptables et la bathymétrie de la Go Pro sans cage noire servira pour la suite de l'étude du niveau d'eau par photogrammétrie. Ces résultats ne sont pas parfaits ; les raisons de ces petites imprécisions peuvent être dues à d'autres facteurs (le laser Keyence et les outliners, les imperfections du béton du modèle réduit, les transports de dépôts) que le modèle Agisoft-Photoscan.

La Go Pro est plus maniable et plus pratique que l'appareil photo Pentax. Les résultats de l'appareil photo n'étant pas significativement meilleurs que la Go Pro, il ne sera pas privilégié dans la suite des expériences.

Troisième partie

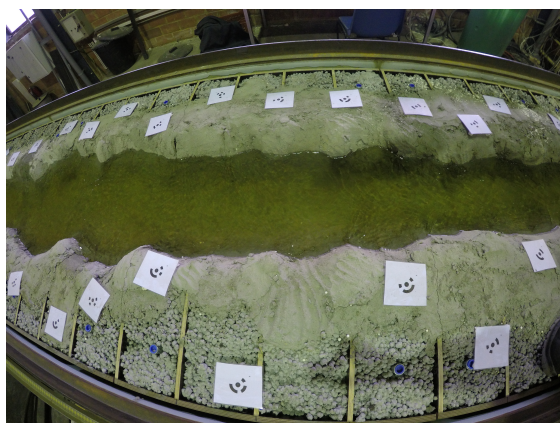
Analyse d'écoulements permanents

Chapitre 1

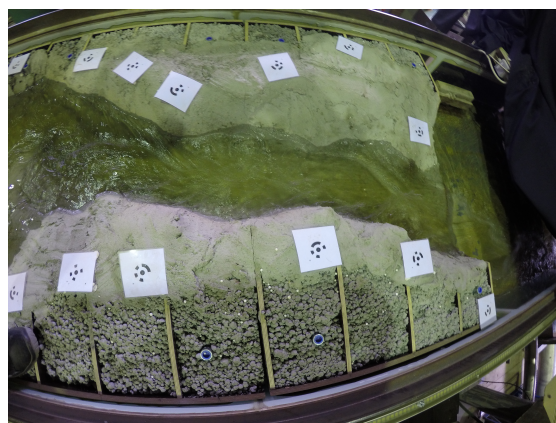
Introduction

Cette partie tente de caractériser la fiabilité du modèle Agisoft-Photoscan pour des écoulements de type permanent. Un écoulement est dit permanent ou stationnaire lorsqu'il n'évolue pas dans le temps. [ZECH, 2008] utilise les termes suivants "Un cliché des hauteurs d'eau, des vitesses, des débits, serait le même, quel que soit le moment de la prise de vue. On en déduit que les dérivées partielles de toutes les grandeurs physiques, par rapport au temps, sont nulles, et que les trajectoires ne se distinguent pas des lignes de courant." L'analyse des écoulements permanents a été au cœur de ce projet et s'inscrit dans la continuité des travaux de [COUTINHO et JANSSENS, 2017]. Un régime stationnaire permet à l'expert de prendre le temps de se concentrer sur les différents points de vue de la photographie et lui permet également de prendre le nombre de photographies nécessaires et cela seulement avec un unique appareil. La mise en application du logiciel Agisoft-Photoscan peut alors commencer.

Dans le modèle réduit, deux parties sont considérées : une partie sans remous et une partie avec remous. On trouve dans la partie sans remous un écoulement lent avec une surface libre régulière. À l'inverse, la partie avec remous possède un écoulement plus rapide et une surface libre irrégulière. Ces parties sont séparées aux alentours de la section 39. La figure 1.1 illustre les 2 parties.



(a) Partie du canal où les écoulements sont sans remous.



(b) Partie du canal où les écoulements sont avec remous.

FIGURE 1.1 – Les parties avec remous et sans remous du canal.

Le problème de la condition aval avec l'étude de [SERRE, 1953] a été évoqué auparavant. Dans la présente étude, la vanne clapet est totalement ouverte impliquant un écoulement plus agité sur les dernières sections. Ce choix se justifie par la nécessité de tester le modèle sur des écoulements avec remous pour connaître les limites de celui-ci.

Les objectifs, la méthodologie, les résultats et finalement les sources d'erreurs composent cette partie du travail relative à l'écoulement permanent.

Chapitre 2

Objectifs

L'objectif est de développer une méthode de photogrammétrie fiable qui permet d'identifier le niveau d'eau en écoulement permanent. L'étude actuelle a lieu en laboratoire, le but ultime étant cependant de pouvoir appliquer cette méthode à toute rivière. Pour trouver le niveau d'eau avec la technique développée dans cette étude, il faut connaître la bathymétrie de la rivière et donc se fier aux résultats trouvés précédemment. A nouveau, le modèle issu de Agisoft-Photoscan devra être comparé à des valeurs de référence, mesurées manuellement et précisément. La différence entre le modèle Agisoft-Photoscan et ces valeurs de référence doit être minimale.

Agisoft-Photoscan offre plusieurs manières de traiter les photographies. La création de fichiers DEMs exploitables se base sur les maillages ou les nuages denses générés par Agisoft-Photoscan. Un DEM basé sur un maillage demande un temps considérable de compilation sur ordinateur par rapport à un DEM basé sur un nuage dense (de l'ordre de quelques heures de temps d'exécution supplémentaire pour un maillage de haute qualité). Il est dès lors intéressant de savoir si la qualité des DEMs basés sur des maillages justifie un tel temps d'attente supplémentaire.



(a) Exemple de bathymétrie en nuage dense.



(b) Exemple de bathymétrie en maillage.

FIGURE 2.1 – Différence entre une modélisation en nuage dense et en maillage.

La structure de la cage noire dotée d'une lumière puissante disponible au laboratoire est contraignante. Cette installation n'est pas pratique si la méthode de reconnaissance du niveau d'eau par photogrammétrie veut être réalisée sur des cas de terrain.

[COUTINHO et JANSSENS, 2017] ont étudié la possibilité de modifier la texture de l'eau de différentes manières : soit en couvrant l'eau avec de la pliolite ou de la frigolite (appelés traceurs) soit en mélangeant l'eau avec du colorant alimentaire ou de la boue, changeant ainsi l'opacité de l'eau. A nouveau, ces solutions peuvent être exploitées en laboratoire mais leurs applications aux rivières à taille réelle sont compromises. De plus, pour positionner les traceurs à un endroit désiré et éviter qu'ils ne se fassent emporter par le courant, il faut installer un système de retenue en aval. Ce dispositif perturbe l'écoulement originel et fausse la réalité de la situation. Quant au colorant ou la boue, ces solutions ne sont que peu séduisantes, elles pourraient impacter

l'écosystème en place. [VILLENEUVE et al., 2009] a fait l'étude sur les périphytons¹ qui seraient dépendants de la quantité de lumière sur leur développement, influençant donc la faune et la flore. En outre, après un certain temps, la boue mélangée à l'eau se dépose dans le fond ou sur les berges des cours d'eau, participant ainsi au même titre que la sédimentation ou l'érosion à la redéfinition de la bathymétrie. [ZECH]

Un dernier point important abordé dans cette partie est le problème de la forme de la surface d'eau. En effet, l'hypothèse d'une surface d'eau plane est utopique pour des cas avec remous. La méthode de détection du niveau d'eau développée ici pose pourtant cette hypothèse de platitude de l'eau, il est dès lors intéressant de savoir si cette supposition engendre des erreurs importantes ou des aberrations.

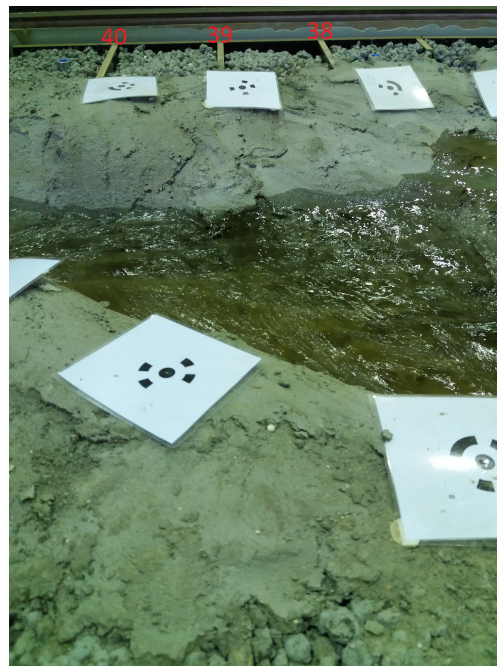


FIGURE 2.2 – Différence du niveau d'eau pour les sections 38, 39 et 40 pour un débit de 11.5 l/s.

1. Périphytons : Organismes qui vivent collectivement, attaché aux ruisseaux et les feuilles des plants d'eau douce [MORFÍN et al., 2012]

Chapitre 3

Méthodologie

3.1 Mise en oeuvre

La méthode utilisée pour l’acquisition de données, la modélisation et la création de fichiers exploitables est décrite au point 2.2 Logiciels utilisés et démarche de la partie I “Etat de l’art”. Le modèle Agisoft-Photoscan est comparé à des valeurs mesurées au trusquin qui servent de valeurs de référence. Pour chaque section, la valeur du niveau d’eau est mesurée en un point, considérant ainsi que la surface de l’eau est plane et horizontale. Cette hypothèse est rediscutée dans la section 5 “Mesures au laser de la surface d’eau”.

Le matériel utilisé pour les photographies est la Go Pro Hero 4 Silver dont les principales caractéristiques sont expliquées à la section 2.1.2 “Matériel photographique” de la partie I Etat de l’art.

L’appareil photo Pentax n’a pas été utilisé. Il donne des résultats de qualité similaire à la Go Pro mais ne présente pas l’avantage d’être maniable. La modélisation sur Agisoft-Photoscan nécessite un certain nombre de photos prises d’angles de vue différents et de positions différentes. Le manuel d’utilisation Agisoft-Photoscan [*Agisoft PhotoScan User Manual, Professional Edition, Version 1.4* 2018] conseille de réaliser des données selon un maximum d’angles de vue différents dans le but d’éviter les angles morts ou d’éventuels trous dans la modélisation. La figure 3.1 présente les angles de vue choisis tout au long de l’étude d’écoulements permanents. Pour les expériences avec cage noire, la caméra est liée à une structure fixe. Les distances et les portées sont donc conservées. Lors de la prise des données sans cage noire, les photographies sont prises manuellement, essayant toutefois de respecter cette disposition. Les distances et les portées de la Go Pro peuvent donc varier tout au long d’un même angle de vue.

Afin de valider le modèle développé, il faut l’appliquer à plusieurs cas différents. Ainsi, des expériences ont été faites sur plusieurs débits à savoir : 6 litres par seconde, 8 litres par seconde, 10 litres par seconde et 11.5 litres par seconde. Pour chaque débit, le mode opératoire suivi est le même, le but étant de dépeindre le modèle de photogrammétrie et non l’écoulement en lui-même.

Quant à l’étude de qualité des maillages et des nuages denses, une comparaison des résultats permet de voir quelle méthode est la plus fiable. Cela signifie que chaque jeu de données correspondant à un débit a été modélisé quatre fois :

1. Une fois en nuage dense de qualité haute,
2. Une fois en nuage dense de qualité basse,
3. Une fois en maillage de qualité haute,
4. Une fois en maillage de qualité moyenne.

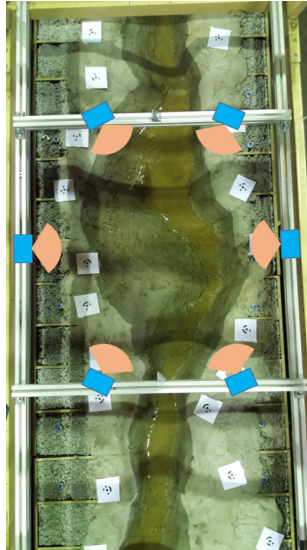


FIGURE 3.1 – Installation et points de vue utilisés pour l'écoulement permanent.

3.2 Modèle photogrammétrique

Le modèle numérique actuel se base sur le code Matlab développé par [COUTINHO et JANSSENS, 2017] et a été amélioré en collaboration avec [HELLEBAUT, 2017-2018].

[COUTINHO et JANSSENS, 2017] se sont basés sur une méthode analysant les différences et détectant les points de décrochage comme étant les premiers points supérieurs à un certain seuil (ex : 1 cm). Cette méthode n'est pas efficace car elle exige un DEM de bathymétrie extrêmement précis. En effet si la différence d'un point de comparaison, se trouvant sur les berges, entre la bathymétrie et le modèle Agisoft-Photoscan est supérieure à 1 cm, la méthode entière est faussée. La méthode a donc été revue.

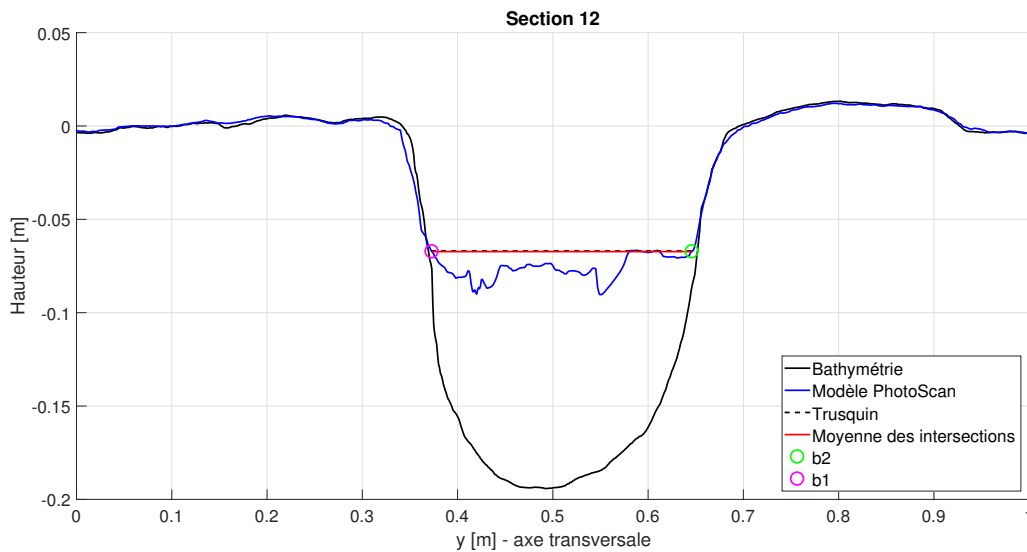
La hauteur d'eau est trouvée en considérant la valeur absolue de la différence entre les DEMs obtenus lors d'écoulements permanents et les DEMs de la bathymétrie. Le principe du modèle numérique consiste à parcourir les berges des deux DEMs depuis les extrémités vers le centre du modèle réduit. Pour chaque point analysé depuis les berges, la différence entre ces DEMs est enregistrée et lorsque cette différence augmente pour un certain nombre de points, cela signifie qu'il n'existe plus de points communs entre les deux DEMs. On appellera "point de décrochage" le premier point où une différence significative est observée. Il en existe donc deux, un pour la rive gauche et un pour la rive droite. On peut en déduire que le niveau d'eau se trouve aux alentours de ces deux points de décrochage.

Étant donné que les modèles Agisoft-Photoscan de la bathymétrie et de l'expérience en écoulements permanent ne sont pas exactement les mêmes, des différences sont déjà observables lors de la comparaison des berges. Pour que le modèle numérique détecte le niveau d'eau plutôt que ces différences inintéressantes, il faut imposer des conditions sur la différence des DEMs.

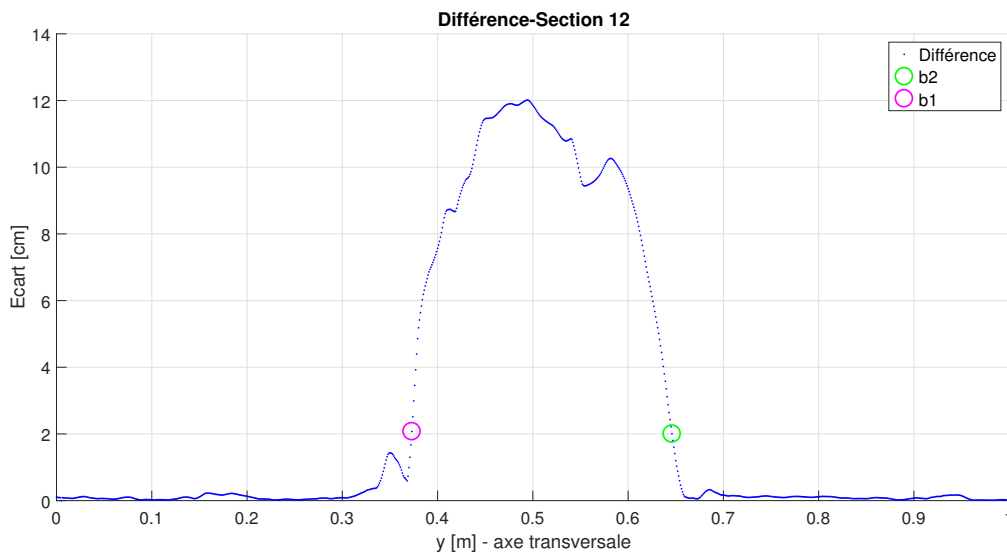
- La dérivée de la différence entre les DEMs doit être positive sur un certain nombre de points déterminés. Pour des écoulements de 6 l/s, 8 l/s, 10 l/s, 11.5l/s, le nombre de points utilisé est 10.
- La différence entre le DEM de la bathymétrie et celui du modèle Agisoft-Photoscan doit être supérieur à un certain seuil. A nouveau pour des écoulements de 6 l/s, 8 l/s, 10 l/s, 11.5 l/s, le seuil défini est de 2 cm.

Une fois les deux points de décrochage établis, il reste à estimer le niveau d'eau. Les points de décrochage seront appelés b_1 , pour celui de la rive gauche et b_2 pour celui de la rive droite. Une fois les points b_1 et b_2 détectés, les coordonnées transversales y_{b_1} et y_{b_2} sont déterminées, ainsi que les élévations z_{b_1} et z_{b_2} correspondantes. Le niveau d'eau est alors obtenu en calculant la moyenne des élévations entre z_{b_1} et z_{b_2} . La surface de l'eau est de ce fait considérée comme plane et horizontale. C'est une hypothèse importante et restrictive. Elle sera rediscutée dans la suite de cette étude sur les écoulements permanents.

Le but de ce modèle numérique est d'éviter tout changement de texture de l'eau en trouvant un algorithme assez sensible pour détecter la différence entre les DEMs de manière fiable.



(a) Section transversale



(b) Graphe de différence

FIGURE 3.2 – Analyse section 12

Chapitre 4

Résultats et sources d'erreurs

4.1 Modèle photogrammétrique

4.1.1 Résultats et analyse

Les expériences avec la cage noire n'étant pas concluantes, elles ont été refaites sans cage noire. Les résultats ainsi obtenus sont meilleurs, tout comme les résultats de la bathymétrie sans cage noire. Deux problèmes pourraient être à l'origine de ce phénomène. Premièrement, la cage noire combinée à la lumière puissante induit des reflets sur l'eau ou sur les repères en plastique et deuxièmement, certaines parties du modèle réduit sont inaccessibles avec cette installation. Cette hypothèse s'appuie sur des observations et sur le manuel d'utilisation Agisoft [*Agisoft PhotoScan Manuel de l'utilisateur, Professional Edition, Version 1.1* 2015] qui préconise d'éviter les photos de tout objet luisant, réfléchissant ou transparent. Les DEMs de la bathymétrie et des écoulements permanents utilisés ici sont ceux obtenus via la Go Pro sans cage noire et sans lumière artificielle. La figure 4.1 montre un exemple de ces reflets. Sur la totalité des photographies de ce point de vue, un reflet est visible soit sur les marqueurs soit sur l'eau. Le tableau C.1 de l'annexe C compare les résultats d'une expérience réalisée pour 6 litres par seconde avec et sans cage noire.



FIGURE 4.1 – Photographie où un reflet sur un marqueur et des reflets sur l'eau sont visibles.

Un des objectifs de ce chapitre est également de caractériser les techniques offertes par Agisoft-Photoscan. Les DEMs basés sur des maillages ne valent pas le temps de compilation et les résultats obtenus ne sont pas meilleurs que ceux basés sur des DEMs en nuage dense. Les résultats présentés se basent donc sur des nuages denses. Les DEMs de la bathymétrie obtenus sur base d'un nuage dense de haute qualité et de qualité moyenne présentent une différence minimale entre eux. La différence moyenne entre les deux DEMs de qualité haute et moyenne est de 0.06 mm ; elle est donc négligeable.

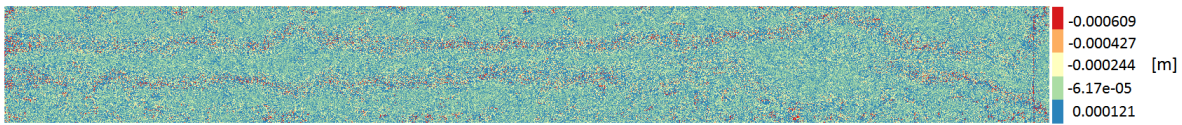


FIGURE 4.2 – Différence entre les DEMs de bathymétrie de Go Pro de qualité haute et qualité moyenne (en nuage dense).

La figure 4.3 donne l'évolution du niveau d'eau sur le modèle réduit, mesurée au trusquin et via le modèle Agisoft-Photoscan. On note que les profils sont proches l'un de l'autre sans pour autant être parfaitement identiques. Les écarts maximaux se trouvent sur les sections avec remous (section 39 à 44).

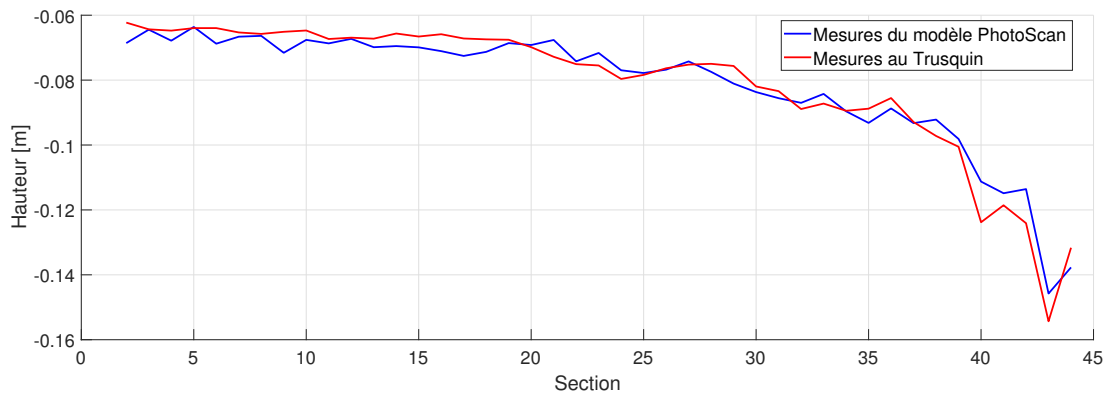


FIGURE 4.3 – Evolution du niveau d'eau pour un débit de 10 l/s sur l'entièreté du canal

Le tableau 4.1 reprend la différence entre les valeurs mesurées au trusquin et les DEMs liés aux écoulements permanents pour différents débits basés sur des jeux de données réalisés avec Go Pro sans cage noire. La deuxième colonne du tableau donne la qualité du nuage dense utilisé pour le DEM de l'écoulement permanent correspondant au débit de la première colonne. L'erreur absolue ainsi trouvée est comparée au niveau d'eau dans la rivière afin de trouver l'erreur relative. Le tableau C.2 à l'annexe C est similaire mais pour des DEMs basés sur des maillages plutôt que des nuages denses.

Débit [l/s]	Qualité du nuage dense	erreur absolue [mm]	erreur relative [%]
6	haute	7.1	7
	moyenne	5.4	5.44
8	haute	8.7	7.04
	moyenne	7	5.59
10	haute	4.4	3.54
	moyenne	3.3	2.81
11.5	haute	10.2	7.06
	moyenne	6.3	4.38

TABLE 4.1 – Tableau comparatif des résultats issus d'un DEM de Go Pro basé sur un nuage dense de qualité haute ou moyenne.

Des erreurs absolues de l'ordre de 3 à 10 mm et des erreurs relatives de l'ordre de 3 à 7% sont observées. En général les résultats obtenus avec des nuages denses de qualité moyenne présentent de meilleurs résultats.

Une réflexion basée sur plusieurs observations tente d'expliquer cette constatation. On sait que la méthode se base sur une différence de deux DEMs. Si Agisoft-Photoscan modélise en qualité supérieure, des points indésirables risquent d'être modélisés. Il arrive que les angles de prises de vue des photographies soient mal organisés et que des angles morts apparaissent dans les modèles. Agisoft-Photoscan modélise des points qui n'existent pas dans la réalité. Ainsi pour des DEMs en bonne qualité, Agisoft-Photoscan tente absolument de modéliser ces points inexistantes. La différence entre les DEMs en est dès lors impactée donnant lieu à des erreurs plus importantes. Une solution proposée est d'améliorer le code responsable du calcul de cette différence. Le but serait de trouver la méthode optimale de détection de points de décrochage.

Il est également intéressant de noter la différence entre les sections avec remous et sans remous. Les figures 4.4 et 4.5 montrent respectivement l'évolution des écarts absolus et des écarts relatifs entre le trusquin et le modèle Agisoft-Photoscan et ce pour des DEMs basés sur un nuage dense de qualité moyenne. A nouveau, on note que ces écarts sont importants pour les sections 39 à 44. Ces écarts peuvent monter jusqu'à 13% d'erreur relative sur certaines sections avec remous pour un débit de 10 l/s.

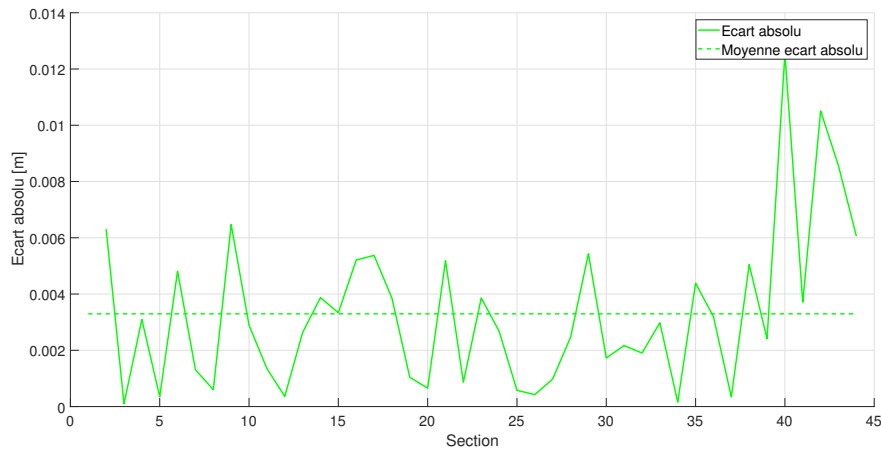


FIGURE 4.4 – Ecart absolu entre les mesures au trusquin et les mesures du modèle Agisoft-Photoscan pour un débit de 10 l/s.

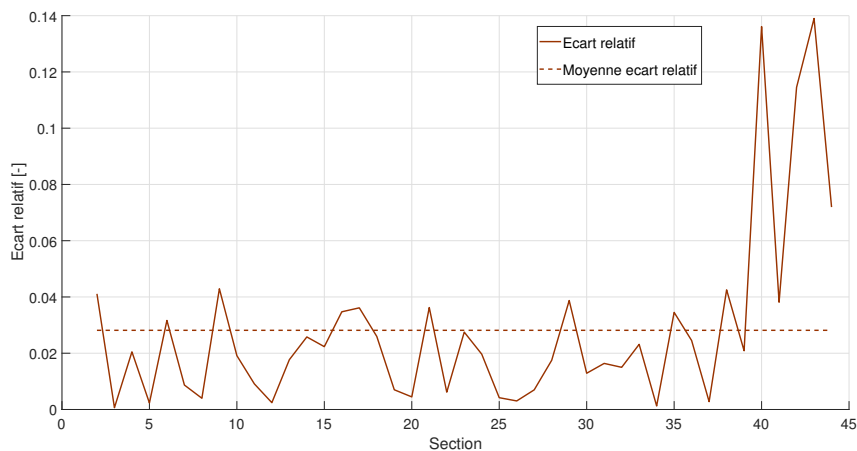


FIGURE 4.5 – Ecart relatif entre les mesures au trusquin et les mesures du modèle Agisoft-Photoscan pour un débit de 10 l/s.

Le tableau 4.2 donne l'erreur moyenne absolue (mm) et l'erreur moyenne relative (%) pour la partie sans remous (sections 2 à 38) et la partie avec remous (sections 39 à 44) pour un débit de 10 l/s. Ces résultats sont obtenus à partir des graphes des figures 4.4 et 4.5.

Partie du canal	erreur moyenne absolue [mm]	erreur moyenne relative [%]
Ensemble du canal	3.3	2.81
Partie sans remous	2.6	1.94
Partie avec remous	8.3	9.9

TABLE 4.2 – Tableau comparatif des moyennes des erreurs absolues et relatives sur l'ensemble du canal, sur la partie sans remous et celle avec remous pour un débit de 10 l/s.

Le tableau 4.3 quant à lui reprend la moyenne des erreurs moyennes absolues et relatives pour des débits de 6l/s, 8l/s, 10l/s et 11.5 l/s.

Partie du canal	erreur moyenne absolue [mm]	erreur moyenne relative [%]
Ensemble du canal	5.5	4.55
Partie sans remous	5.42	4.45
Partie avec remous	6.51	8.12

TABLE 4.3 – Tableau comparatif des moyennes des erreurs moyennes absolues et relatives des différents débits sur l'ensemble du canal, sur la partie sans remous et celle avec remous.

On observe, comme attendu, des erreurs plus faibles pour la partie sans remous et plus importantes pour la partie avec remous. L'erreur moyenne relative est toutefois toujours inférieure à 10%.

4.2 Sources d'erreurs

Les sources d'erreurs se doivent d'être exposées et discutées car elles impactent les résultats de manière significative.

4.2.1 Évolution du débit

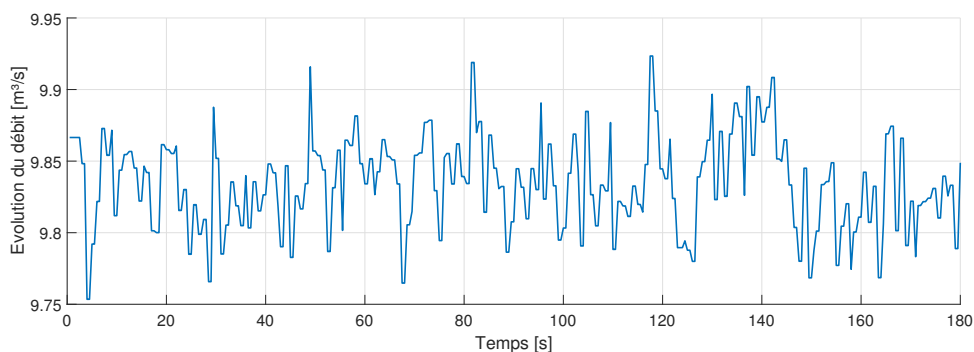


FIGURE 4.6 – Évolution du débit dans le temps pour un débit initial de 10 l/s.

Le débit fixé au début de l'expérience ($t=0$) tend à diminuer au cours de l'expérience. [COUTINHO et JANSSENS, 2017] ont étudié l'influence de cette baisse de débit sur le niveau d'eau dans leur travail de fin d'étude. Leur étude est basée sur un modèle numérique appelé

“Augmented Roe’s Scheme with energy balance” dont les équations sont développées par [MURILLO et GARCIA-NAVARRO, 2014] et [FRANZINI et SOARES-FRAZAO, 2016]. [COUTINHO et JANSSENS, 2017] estime qu’une baisse de 0.15l/s a une influence d’environ 1 mm sur la hauteur d’eau. Il faut tenir compte de cette variation potentielle dans la critique du modèle Agisoft-Photoscan.

4.2.2 Trusquin

La mesure manuelle du trusquin peut s’avérer approximative en ce sens qu’elle est laissée au bon jugement de l’utilisateur. Ainsi pour caractériser l’erreur due aux mesures, une série de prises de données a été réalisée de la manière suivante : Pour un débit fixé (6 l/s, 8 l/s, 10 l/s et 11.5 l/s), le niveau d’eau est calculé sur l’entièreté de la rivière à quatre reprises. La vanne est réajustée régulièrement (environ toutes les minutes) pour éviter le problème de baisse de débit. De cette manière, une section est mesurée cinq fois pour un même débit. Il est possible de comparer ces 4 valeurs entre elles et caractériser l’erreur de la prise de mesure. Le raisonnement suivi pour caractériser cette erreur est le suivant :

Si d_{ij} (mm) est la i -ème mesure de la j -ème section, m_j (mm) est la moyenne des mesures sur la section, n est le nombre de mesures par section ($n=4$), e_{ij} (mm) est la différence entre la moyenne m_j et la mesure d_{ij} sur la j -ème section et \bar{e}_{ij} (mm) est la moyenne des différences e_{ij} sur la section j .

- $m_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n d_{ij}$
- $e_{ij} = |m_j - d_{ij}|$
- $\bar{e}_{ij} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_{ij}$

Cette moyenne des différences e_{ij} est représentée graphiquement pour un débit de 11.5 litres par seconde sur la figure 4.7. Les autres représentations graphiques se trouvent à l’annexe H. Deux paliers de valeurs se distinguent l’un de l’autre. A partir de la section 39, une hausse de la moyenne des différences est observée. De fait, la section 39 marque le changement d’une zone où l’écoulement est sans remous à une zone où la surface de l’écoulement est irrégulière et présente des remous. La mesure en écoulement avec remous est en toute logique moins précise qu’en écoulement sans remous.

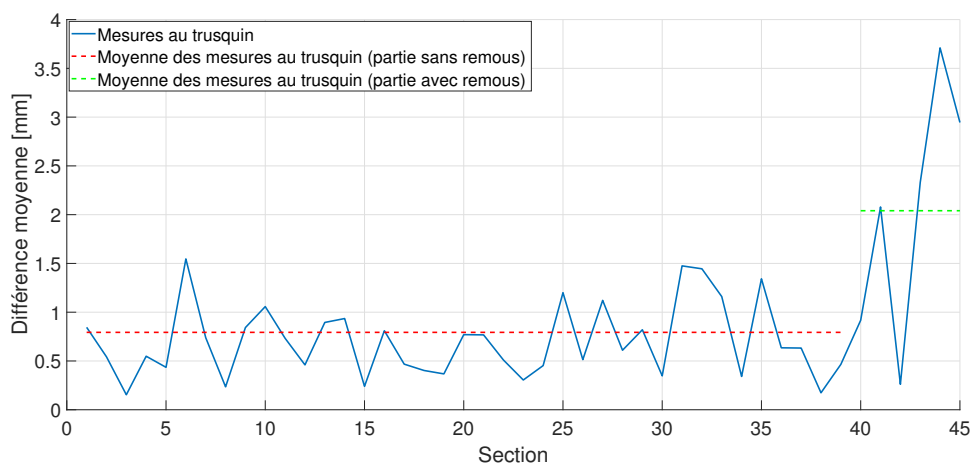


FIGURE 4.7 – Graphique présentant les écarts moyennes de mesures par rapport à la moyenne des mesures pour un débit de 12 l/s.

Le tableau 4.4 recense ces moyennes des différences pour ces deux zones.

Débit [l/s]	\bar{e}_{ij} en écoulement sans remous [mm]	\bar{e}_{ij} en écoulement avec remous [mm]
6	1.49	2.60
8	0.95	1.98
10	1.30	1.57
11.5	0.79	2.04

TABLE 4.4 – Tableau récapitulatif des moyennes des différences \bar{e}_{ij} des valeurs mesurées au trusquin.

Il est possible de calculer les moyennes pour les parties avec remous et sans remous :

— Moyenne sans remous = $\frac{1.49+0.95+1.30+0.79}{4} = 1.13\text{mm}$

— Moyenne avec remous = $\frac{2.60+1.98+1.57+2.04}{4} = 2.04\text{mm}$

On note qu'une mesure au trusquin s'écarte donc en moyenne de 1.13 mm et 2.04 mm par rapport à la moyenne des mesures sur cette section pour les parties sans remous et avec remous respectivement.

4.2.3 Fuites d'eau sur les côtés du canal

Le canal est alimenté à l'amont par une pompe via une vanne ouvrable manuellement. L'eau injectée dans le canal fuit en certains endroits à l'amont. Cette perte d'eau n'est pas importante et donc négligeable par rapport au débit du modèle réduit. Cette source d'erreur a été remarquée et soulevée par [COUTINHO et JANSSENS, 2017].

4.2.4 Hypothèse de la surface d'eau

L'hypothèse de la surface d'eau comme étant plane est douteuse pour certaines sections, notamment à l'aval où l'écoulement est avec remous. Ces différences de niveau d'eau sur une section sont visibles et calculables au trusquin. Ainsi, l'écart entre le point de la surface d'eau le plus haut et le point de la surface d'eau le plus bas sont parfois écartés de 1.5 cm. La fiabilité de cette hypothèse fait l'objet du prochain chapitre.

Chapitre 5

Mesures au laser de la surface d'eau

5.1 Méthodologie

Lors de l'analyse des écoulements permanents, l'hypothèse d'une surface plane de l'eau a été posée. Par section, une seule valeur de trusquin est mesurée. Cette valeur est considérée comme étant le niveau d'eau sur toute la section. Cependant il est possible de constater à l'aval que cette hypothèse est discutable car des vagues sont observables. Une étude poussée de la forme de la surface d'eau est réalisée afin de comprendre les erreurs générées par le modèle Agisoft-Photoscan dues à cette hypothèse. Le principe consiste à projeter une feuille laser sur la surface de l'eau et de photographier le résultat. Le laser est perpendiculaire à la surface de l'eau pour éviter tout reflet. L'opération doit avoir lieu dans l'obscurité et ainsi une partie du laser est reflétée à la surface de l'eau. Le matériel utilisé reste la Go Pro Hero 4 Silver décrite précédemment.

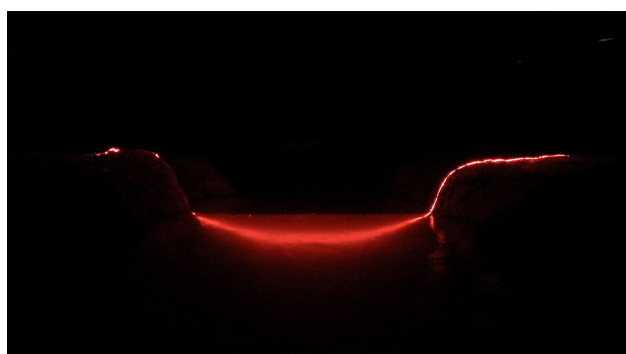


FIGURE 5.1 – Exemple du laser reflété à la surface de l'eau sur la section 7.

Le problème de ce genre d'analyse réside dans le fait que les images obtenues subissent des distorsions dites en barillet. Une correction s'impose pour pouvoir exploiter ces photographies. Le code de correction en barillet a été développé par les étudiants [DESCANTONS et DUJARDIN, 2014] via le logiciel Matlab et est décrite dans l'annexe F.

Sur la figure 5.2, on peut noter en (1) la Go Pro, en (2) le laser et en (3) la projection du laser sur l'eau et le fond du canal.

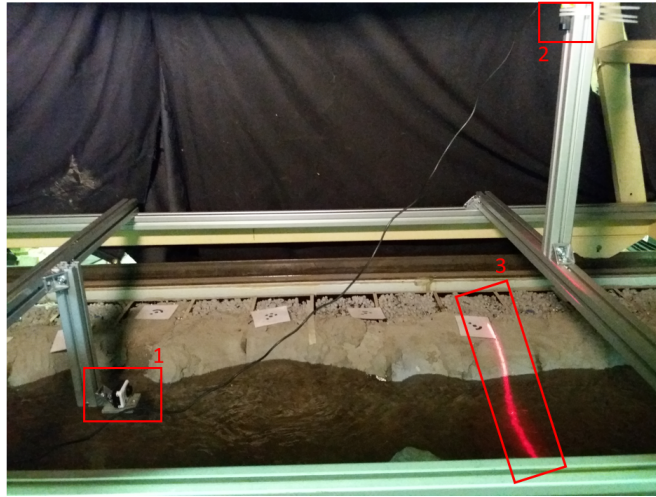


FIGURE 5.2 – Installation pour les mesures au laser de la surface d'eau.

5.1.1 Correction de la distorsion

[GRIBBON, JOHNSTON et BAILEY, 2003] explique l'algorithme à suivre pour corriger la distorsion de photographies. Le principe consiste à prendre l'image non corrigée et de la transformer dans un système de coordonnées polaires. Tous les pixels sont référencés par rapport au centre (variable c) de la distorsion. Chaque pixel sera caractérisé par un angle (variable θ) et un rayon (variable r). L'équation utile à cette démarche est la suivante.

$$r_c = r(1 + ar^2) \quad (5.1)$$

r_c est la distance du pixel à corriger au centre de l'image non distordue, soit l'image corrigée.

r est la distance du pixel à corriger au centre de l'image distordue, soit l'image initiale, non corrigée.

a est le paramètre de distorsion, spécifique à la lentille utilisée.

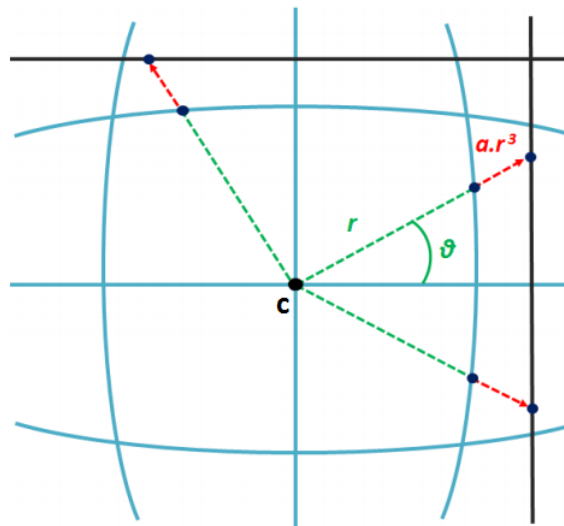


FIGURE 5.3 – Ensemble des variables nécessaires pour la correction en barillet. Image tirée du travail de fin d'étude de DESCANTONS et DUJARDIN, « Formation, par débordement, d'une brèche dans une digue en matériau non cohésif ».

Le code de [DESCANTONS et DUJARDIN, 2014] a été modifié pour convenir au mieux à la situation étudiée dans ce travail. Le paramètre a est trouvé par essai-erreur. Pour vérifier la justesse de ce paramètre, un damier composé de points noirs espacés de 1 cm est également photographié du même point de vue que les photographies avec laser. Si les lignes verticales sont droites, parallèles entre elles et perpendiculaires aux droites horizontales, le paramètre de distorsion est correct. Si ce n'est pas le cas, il faut affiner ce paramètre.

La correction en perspective n'est pas utile dans les cas étudiés. En effet un angle de vue perpendiculaire au damier a été pris afin d'éviter ce genre de correction. Les corrections en perspective sont traitées de manière explicite dans le travail de fin d'étude de [DESCANTONS et DUJARDIN, 2014].



(a) Damier non corrigé.

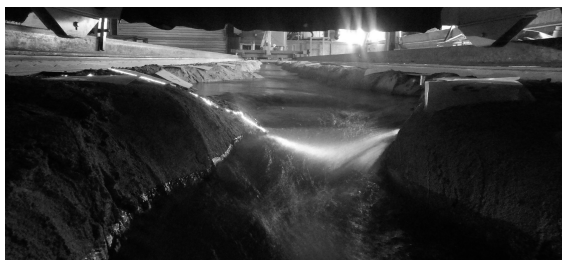


(b) Damier corrigé par orthorectification.

FIGURE 5.4 – Photographies des damiers.

5.1.2 Extraction laser

Après l'orthorectification des photographies, il est possible d'analyser la forme de la surface libre pour chaque section. Des codes se basent sur la différence de contraste de couleurs pour repérer la lumière réfléchiée à la surface de l'eau. [DESCANTONS et DUJARDIN, 2014] ont déjà implémenté un tel code. Néanmoins, le problème est que le contraste dans le laboratoire n'est pas évident. En journée, la lumière du jour implique des contrastes trop importants sur des parties de photographies alors que la nuit, la réflexion du laser est trop puissante et réfléchit à des endroits indésirables. La figure 5.5 montre deux exemples de photographies où l'application du code est compromise.



(a) Photographie en journée où les contrastes sont importants partout sur l'image



(b) Photographie de nuit où le laser réfléchit de manière trop intensive

FIGURE 5.5 – Problèmes liés au laser et à la luminosité.

Une solution alternative a été envisagée. L'option la plus adéquate afin d'étudier la surface de l'eau a été d'utiliser la fonction Matlab *ginput* [MathWorks® 2018]. Cela nous permet d'obtenir les coordonnées (en abscisses et ordonnées) de l'image. L'image corrigée du damier sur la figure 5.4(b) permet d'obtenir l'échelle pixels=mm en faisant correspondre le nombre de pixels comptabilisés entre les points noirs du damier avec le nombre de centimètres mesurés en réalité. Deux points noirs sur le damier sont distants de 1 cm dans la réalité et 30 pixels sont

comptabilisés sur les images. On peut donc affirmer que l'échelle de nos images est de $1 \text{ cm} = 30$ pixels.

Afin de pouvoir translater les images dans le repère de référence, il faut obtenir une image avec un point de coordonnées connues (par ex : un marqueur Agisoft-Photoscan). Ainsi il est possible de déterminer la translation nécessaire pour repositionner l'image dans le système référentiel.

5.2 Résultats et sources d'erreurs

5.2.1 Résultats et analyse

Écoulement sans remous à surface régulière

La plupart des sections présentent un écoulement sans remous où la surface de l'eau paraît plane. Sur la figure 5.6, il est possible de constater que la surface de l'eau, la valeur du trusquin et la valeur obtenue avec le modèle photogrammétrique sont quasiment égales. Le tableau 5.1 recense différentes valeurs types mesurées grâce à la méthode laser ainsi que la valeur mesurée au trusquin et la valeur fournie par le modèle photogrammétrique.

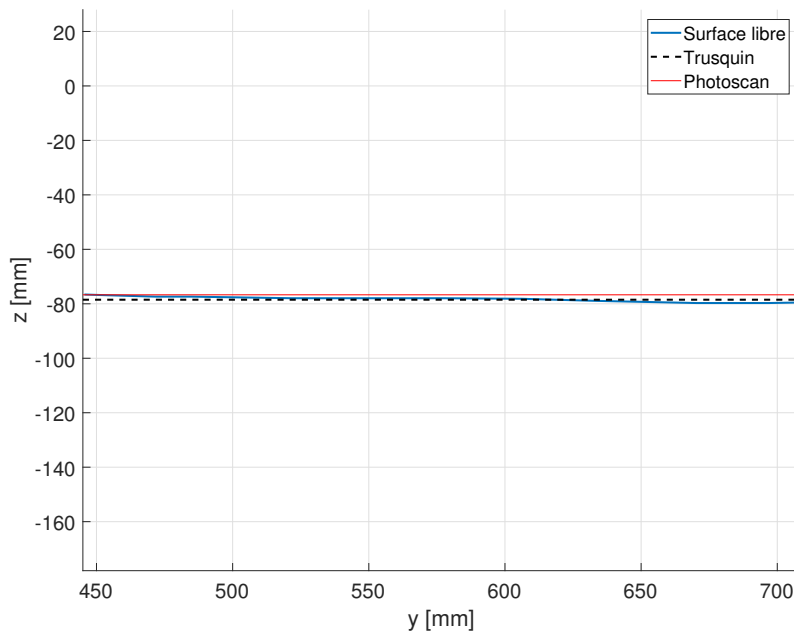


FIGURE 5.6 – Profil de la surface d'eau sur la section 20

Modèle de mesure	Valeur du niveau d'eau [mm]
Maximum via la méthode laser	-76.6
Minimum via la méthode laser	-79.7
Moyenne via la méthode laser	-78.2
Trusquin	-78.5
Modèle photogrammétrique	-76.7

TABLE 5.1 – Valeur du niveau d'eau pour l'écoulement sans remous de la section 20.

Il est aisé de constater que l'hypothèse d'une surface d'eau plane pour un écoulement à surface régulière peut être validée. En effet, les valeurs extrêmes sont proches de la valeur moyenne,

aucune vague n'est présente et la valeur du trusquin est similaire à la valeur moyenne du niveau d'eau mesurée avec le laser.

Écoulement avec remous

A l'aval du modèle réduit, des sections contenant un écoulement avec remous sont présentes. Les vagues, visibles à l'œil nu, peuvent atteindre des amplitudes de l'ordre du centimètre. La figure 5.7 montre la surface libre d'une section ayant un écoulement avec remous aux côtés de la valeur mesurée au trusquin ainsi que la valeur calculée avec le modèle photogrammétrique. Le tableau 5.2 compare différentes valeurs mesurées grâce à la méthode laser avec la valeur mesurée au trusquin et la valeur fournie par le modèle photogrammétrique.

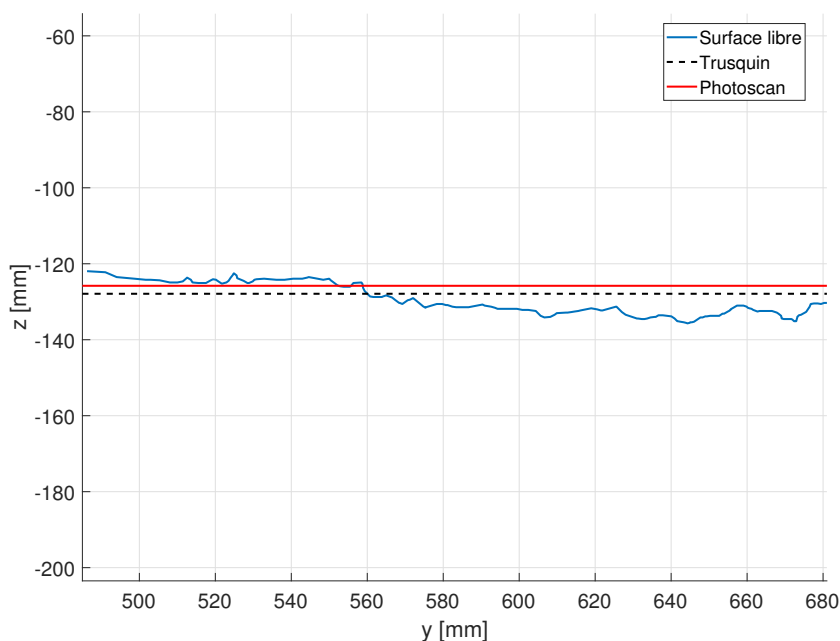


FIGURE 5.7 – Profil de la surface d'eau sur la section 40.

Modèle de mesure	Valeur du niveau d'eau
Maximum via la méthode laser	-121.9
Minimum via la méthode laser	-135.7
Moyenne via la méthode laser	-129.9
Trusquin	-127.9
Modèle photogrammétrique	-125.8

TABLE 5.2 – Valeur du niveau d'eau pour l'écoulement sans remous de la section 40.

Les valeurs extrêmes dans cet écoulement avec remous sont distantes d'environ 14 mm, engendrant une erreur potentielle sur le modèle photogrammétrique d'une valeur comparable. Cependant, le modèle photogrammétrique semble détecter une valeur se trouvant dans l'intervalle des deux valeurs extrêmes. La valeur du trusquin se situe également entre ces deux valeurs et est proche de la valeur moyenne. D'autres résultats et graphes pour différentes sections avec remous se trouvent en Annexe A.2.

5.2.2 Sources d'erreurs

Deux sources d'erreurs sont à mettre en avant en ce qui concerne l'analyse de la surface de l'eau. En premier lieu, une erreur humaine est notable en ce qui concerne la fonction *ginput* utile à trouver la surface libre. En effet, l'obtention des coordonnées se fait à l'œil nu différenciant les pixels affectés par le laser des pixels non affectés. Il est donc probable de faire une erreur de quelques pixels. Cependant ces erreurs restent minimales, n'affectant que très peu les résultats finaux.

En second lieu, la réflexion du laser est très apparente sur les photographies. Il est donc probable que la surface libre réfléchisse légèrement le laser et que les pixels choisis par le moyen de *ginput* soient légèrement décalés du à cette réflexion. Sur la figure 5.8, il est possible de voir de multiples reflets à la surface de l'eau.

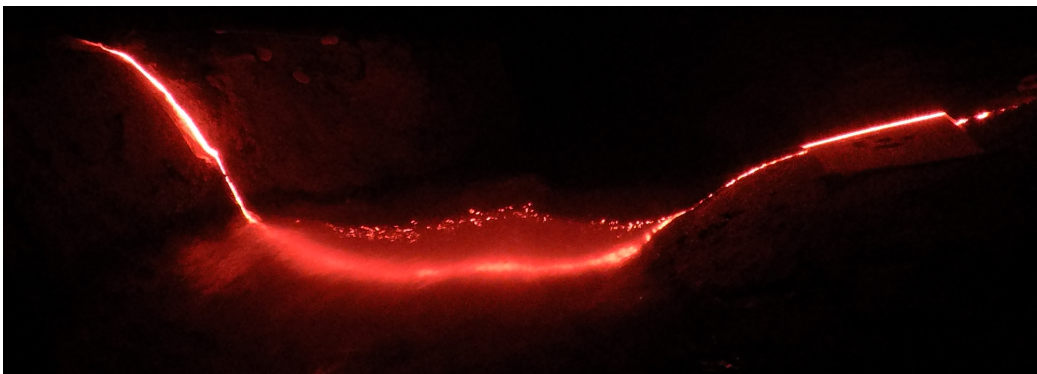


FIGURE 5.8 – Photographies de la section 44 lors de l'expérience au laser.

Ces erreurs restent faibles et ne compromettent que très peu les résultats.

Chapitre 6

Discussion

L'ensemble de la démarche de la mesure du niveau par photogrammétrie sur des écoulements permanents donne des résultats encourageants. Cette démarche consiste en l'acquisition et le traitement de photographies par Agisoft-Photoscan ainsi qu'une analyse numérique des DEMs fournis par Agisoft-Photoscan. Néanmoins, les résultats ne sont pas identiques pour les écoulements sans remous et les écoulements avec remous. Ce deuxième type d'écoulement pose problème en venant jouer avec les limites de l'hypothèse de la surface de l'eau plane et horizontale.

Cette hypothèse a été étudiée via l'expérience laser. L'hypothèse est forte et justifie les erreurs plus importantes en écoulements avec remous qu'en écoulements sans remous. Pour une expérience à dix litres par seconde, on observe aisément des différences de niveau de 1.5 cm entre deux points de la surface d'eau sur les sections 39 à 44. Le modèle numérique détecte généralement un niveau d'eau compris entre le niveau maximum et minimum mesuré au laser. En d'autres mots, il existe au moins un point de la surface d'eau réelle dont le niveau d'eau est égale ou est très proche du niveau d'eau trouvé par le modèle numérique.

Le terme "mesures réelles" a souvent été utilisé dans cette partie et peut-être de manière abusive. Ces mesures sont considérées comme des mesures de référence mais sont relevées manuellement, impliquant une erreur humaine qui, comme étudiée, est de l'ordre de 1 à 2 mm (toujours fonction de si la mesure est en écoulement avec remous ou sans remous).

L'hypothèse de la hauteur d'eau et les mesures au trusquin sont deux facteurs influençant énormément les résultats. Affirmer que les résultats pourraient être meilleur si ces deux facteurs sont traités de manière optimale ne semble pas une aberration. En tenant compte de cela et des autres sources d'erreurs (débits non-constants, fuites d'eau dans le modèle réduit, erreur de précision sur l'expérience laser), une erreur moyenne relative de 4.45% et de 8.12% pour des écoulements sans remous et avec remous respectivement paraît acceptable.

La méthode de détection des points de décrochage donne des résultats très satisfaisants. Elle n'a cependant pas la prétention d'être parfaite. Les choix de seuils ont été effectués afin de convenir à la rivière étudiée et de donner des résultats acceptables en laboratoire. Néanmoins si les expériences sont réalisées sur d'autres cas (notamment sur une rivière naturelle), les seuils devront probablement être adaptés. En ce qui concerne la détection des points de décrochage, des pistes alternatives ont été envisagées mais non développées. Elles sont introduites dans l'annexe G.

Quatrième partie

Mesures en écoulement transitoire

Chapitre 1

Introduction

Les écoulements transitoires, par opposition aux écoulements permanents, évoluent dans le temps. Leur analyse est difficile car la variable temporelle joue un rôle majeur. Les expériences doivent être réalisées de manière rigoureuse car un décalage d'une seconde peut fausser tous les résultats. La littérature fournit peu d'informations concernant le sujet. [FRANZINI et al., 2016] a exploré l'analyse des écoulements transitoires par photogrammétrie sans résultats concluants. Néanmoins certaines pistes présentées portent à réflexion.

L'objectif principal est de pouvoir déterminer l'évolution du niveau d'eau en fonction du temps selon un hydrogramme¹ précis et fixé par les soins de l'utilisateur. Dans un premier temps, l'évolution du débit est calme afin de pouvoir caractériser une lente montée des eaux. Dans un second temps des hydrogrammes plus raides, s'apparentant à des ruptures de barrages, pourront être analysés pour tester la robustesse du modèle.

Les expériences réalisées en régime transitoire ont été effectuées seulement sur une seule section (section 13) et non sur le modèle réduit dans son entièreté dû aux grands nombres de photographies et points de vue nécessaires.

Premièrement, les différentes méthodes de mise en œuvre sont présentées et discutées dans le but de déterminer la plus efficace. Les méthodes d'acquisition de photographies, les méthodes d'acquisition des mesures de références et les méthodes d'évolution des débits sont présentées. En second lieu, les résultats et sources d'erreurs sont développées.

1. L'hydrogramme est la courbe des débits en fonction du temps [*Universalis Encyclopaedia*, <https://www.universalis.fr/encyclopedie/hydrologie/6-les-debits-des-cours-d-eau/>, consulté le 26/05/2018]

Chapitre 2

Méthodologie

2.1 Méthodes d'acquisition des photographies

Une difficulté dans ces expériences est la synchronisation des caméras afin de marquer un temps initial, équivalent à $t=0$, dans le but de prendre toutes les photographies au même instant. Plusieurs mises en oeuvre sont possibles dont voici quelques exemples :

- La première mise en oeuvre serait de plonger la salle d'expérience dans le noir complet. L'idée serait donc d'utiliser des caméras avec un temps de pose élevé¹ et d'actionner un flash pendant ce temps de pose. Les photographies laisseront donc apparaître l'objet à modéliser (en l'occurrence la rivière) exactement au même instant grâce à l'utilisation du flash. Cette mise en oeuvre est difficilement applicable au modèle réduit. De plus, les Go Pros utilisées ont un temps de pose très faible. Cette solution n'a donc pas été retenue dans le cadre de ce projet.
- Une seconde méthodologie serait de faire des photographies à intervalles réguliers et de donner le temps de début avec un changement de luminosité (flash ou spot). La durée du flash doit être plus élevée que l'intervalle de temps entre les photographies. Cette solution est plus susceptible d'engendrer des erreurs car un décalage temporel de la durée de l'intervalle est probable.
- La dernière idée se base sur les mêmes principes que la précédente à une différence près : ce ne sont pas des photographies mais des films qui sont effectués. Les films sont une succession d'images, le temps d'intervalle devient donc minime et les erreurs engendrées par ce décalage temporel deviennent acceptables. Par exemple, des caméras qui filment à du 30 images par seconde engendreront une erreur de maximum $1/30$ de seconde. C'est cette solution qui a été retenue pour ce projet.

2.2 Méthodes d'acquisition des mesures de références

Contrairement aux écoulements permanents, les mesures aux trusquins ne sont pas facilement applicables aux écoulements transitoires. Il faut donc trouver un autre outil de mesure. Les écoulements permanents présentent une particularité qui est de pouvoir relever les mesures réelles après l'expérience, car le niveau d'eau n'évolue pas dans le temps. La difficulté des écoulements transitoires réside dans le fait que la mesure du niveau d'eau réel doit être réalisée en même temps que l'expérience, car les écoulements transitoires sont des événements uniques dans le temps. L'alternative serait d'effectuer plusieurs fois exactement la même expérience.

1. En photographie, le temps de pose (synonyme de durée d'exposition) est la durée pendant laquelle l'appareil photographique, via l'obturateur, laisse pénétrer la lumière [GENET, 1920].

Deux différentes méthodes d'acquisition de mesures de références sont présentées :

- Une première manière de procéder est de séparer l'expérience d'acquisition de mesures de références de l'expérience d'acquisition de photographies, comme il est fait dans l'écoulement permanent avec le trusquin. Pour ce faire, un hydrogramme doit être prédéfini et reproductible de manière exacte. Dans le cas contraire, des erreurs non négligeables sont mesurées. De plus, un outil de mesure permettant de mesurer le niveau d'eau évoluant dans le temps est nécessaire. Le trusquin, n'étant pas automatisé, peut difficilement remplir cette fonction. Le laser Keyence est un outil avec les caractéristiques requises. Cependant, le laser n'est pas assez sensible au changement de milieu et passe à travers l'eau claire.
- Une latte jouant le rôle d'échelle limnimétrique² est positionnée très légèrement à l'amont de la section à modéliser. Une caméra doit dès lors être positionnée de manière à ce que la valeur puisse être lue sur les images tirées du film et ce à chaque pas de temps désiré. Il faut procéder à une correction de la mesure pour obtenir la hauteur d'eau dans le système de référence.

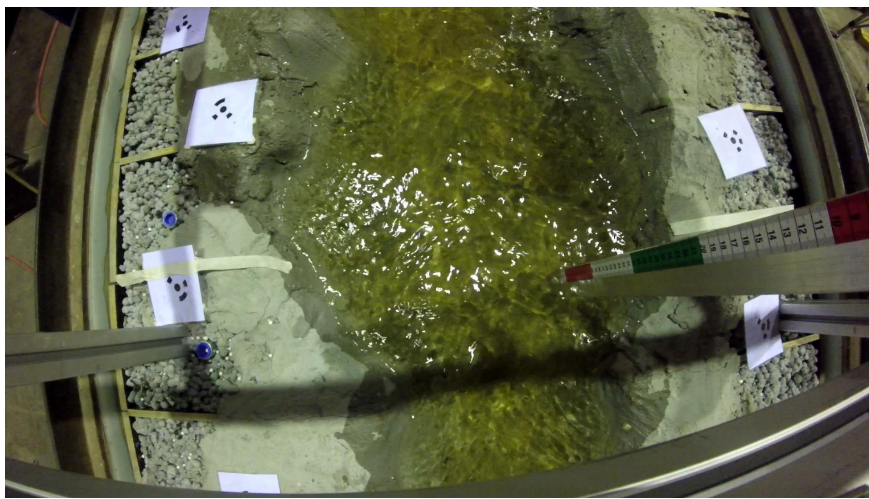


FIGURE 2.1 – Image issue d'une vidéo où la latte est apparente et permet de lire le niveau d'eau (Les papiers collants blancs sur les berges marquent la section 13).

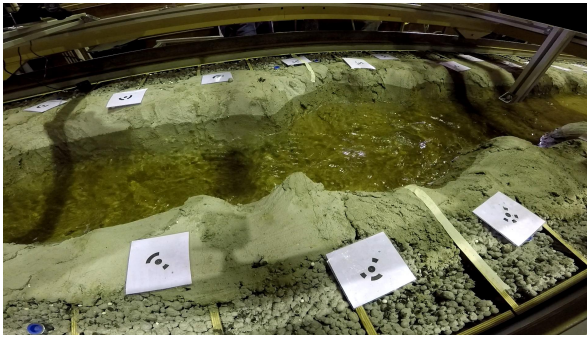
2.3 Méthodes d'évolution des débits

L'expérience proposée consiste au passage d'un faible débit à un débit plus important en un laps de temps limité. Deux moyens sont utilisés pour procéder à ce changement de débit :

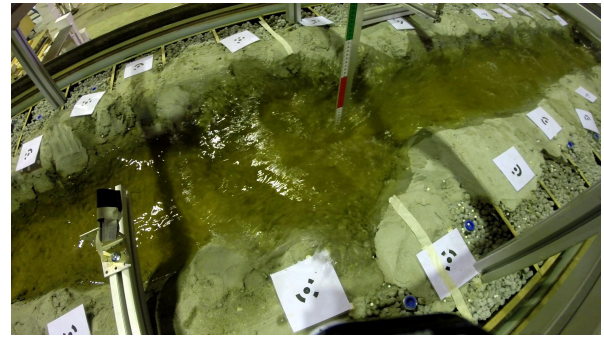
- En ouvrant la vanne d'alimentation de manière très rapide. La hauteur d'eau monte alors de quelques centimètres dans le canal en l'espace d'environ 30 secondes où il est possible de passer d'un débit initial de 4 l/s à un débit final de 12 l/s. L'évolution de la montée du niveau d'eau est lente.
- En bloquant l'accès de l'eau depuis le réservoir jusqu'au modèle réduit (principe d'un barrage), l'eau monte alors dans le réservoir. Au temps $t=0$ de l'expérience, le barrage est levé et une vague importante se répand sur tout le canal en l'espace de seulement quelques secondes. L'évolution de la montée du niveau d'eau est brutale.

La première solution est retenue car elle est moins brutale et est plus simple à modéliser dans un premier temps. La deuxième solution est envisageable une fois que la première solution est bien maîtrisée.

2. une échelle limnimétrique indique l'altitude du plan d'eau par rapport à un repère fixe [*Universalis Encyclopaedia*, <https://www.universalis.fr/encyclopedie/hydrologie/6-les-debits-des-cours-d-eau/>, consulté le 26/05/2018]



(a) Exemple d'écoulement transitoire où l'évolution du niveau d'eau est progressive.



(b) Exemple d'écoulement transitoire où l'évolution du niveau d'eau est brutale.

FIGURE 2.2 – Exemple d'évolution du niveau d'eau pour un cas lent et un cas rapide.

2.4 Expériences retenues

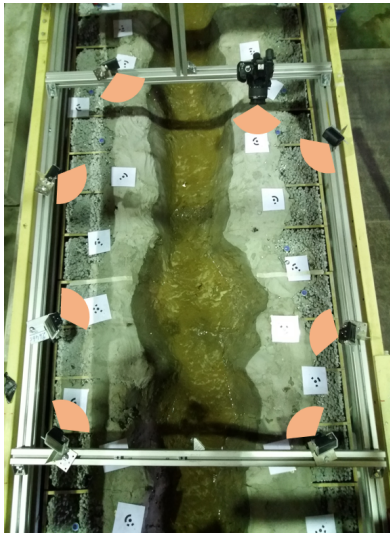
Cette augmentation de débit va provoquer une hausse du niveau d'eau qu'il faut caractériser et modéliser. La technique proposée se base sur des vidéos plutôt que des photographies. Étant donné que le mouvement transitoire évolue dans le temps, il faut savoir capter et modéliser un instant précis. Pour ce faire, plusieurs angles de vue sont nécessaires : 8 appareils photographiques sont utilisés. Les caractéristiques de ceux-ci sont repris dans le tableau 2.1.

Type de caméra	Pixels [MPix]	Longueur focale [mm]	Dimensions [mm]
Go Pro Hero 2	5	5	59x41x30
Go Pro Hero 3 (3 appareils)	2.5	21.9	60x42x30
Go Pro Hero 3+	12	2.5	59x40x27
Go Pro Hero 4 Silver	12	3	59x41x30
Go Pro Hero 5 Black	12	3	62x44.5x33
Canon EOS 1300 D	18	18	129x101.3x77.6

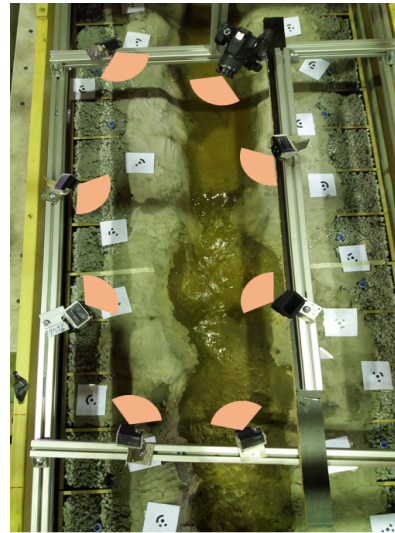
TABLE 2.1 – Liste du matériel photographique utilisé.

Avant même de commencer les expériences avec écoulement, une première étape utile est de tenter de reconstruire la bathymétrie avec ces huit caméras. Le but est de voir la pertinence des points de vue et du nombre de caméras. Cette première étape se fait lorsque la rivière est à sec.

Une première manière de réaliser l'expérience consiste à placer ces huit caméras sur la structure mobile du canal de manière à se focaliser sur une section complète. La position des caméras est donnée sur la figure 2.3. Toutefois, réaliser un DEM complet d'une section à partir de 8 appareils photos peut induire des imperfections dues au manque de points de vue. Ces petites imprécisions prennent souvent la forme de trous dans le modèle ou des modélisations de points inexistants. Dès lors une seconde méthode consiste à se focaliser sur une seule et unique berge afin de trouver le point de décrochage uniquement sur celle-ci. De cette manière, les huit appareils photographiques sont mobilisés pour une surface plus petite.



(a) Installation et points de vue pour une expérience focalisée sur deux berges.



(b) Installation et points de vue pour une expérience focalisée sur une seule berge.

FIGURE 2.3 – Installations pour les écoulements transitoires.

Le déroulement de l'expérience et de l'interprétation des données se déroulent comme suit :

1. L'expérience débute en $t=0$ avec les caméras filmant une situation stable. En $t=0$, un flash est actionné et sert de signal de début d'expérience, l'ouverture de la vanne a lieu à ce moment précis également. Ce flash est visible sur les vidéos. Une image de la vidéo contenant le flash se trouve sur la figure 2.4.
2. Ainsi une fois l'expérience finie, il est possible de récupérer les vidéos et de les séparer en images distinctes. L'ensemble des caméras proposent des films de 30 images par seconde exceptés la Go Pro Hero 4 Silver et le canon EOS 1300 D qui filment en 25 images par seconde. Il est important d'extraire les images des vidéos par ordre chronologique.
3. Ensuite, il est possible de trouver l'image où le flash est clairement identifiable. Pour les vidéos en 30 images par seconde, une image correspond à une situation chaque $1/30$ de seconde ; pour celle en 25 images par seconde, une image correspond à une situation chaque $1/25$ de seconde. L'image qui suit chronologiquement celle où le flash est visible marque le temps $t=0$.



FIGURE 2.4 – Image d'une vidéo où le flash est visible, marquant le début d'une expérience transitoire.

4. De cette manière, il est aisé de trouver les photographies correspondantes à un temps précis. Les photos correspondantes à des temps similaires sont utilisées pour modéliser la rivière et le niveau d'eau. Il faut donc prendre des photographies comparables malgré les vidéos de 25 images par seconde et de 30 images par seconde. Pour répondre à cette condition, le pas de temps doit être un multiple de 0.2 seconde. Un pas de temps de 0.2 seconde correspond à 5 images dans le cas des vidéos de 25 images par seconde et à 6 images dans le cas de 30 images par seconde. Il faut alors rassembler les huit images pour chaque pas de temps.

Par exemple

- En $t=0$, toutes les photographies qui suivent le flash correspondent au temps $t=0$, elles représentent une même situation dans l'évolution du niveau d'eau.
 - En $t=0.2$, les 6ème photographies sont récoltées pour les appareils filmant en 30 images par seconde et les 5ème photographies sont récoltées pour les appareils filmant en 25 images par seconde.
 - En $t=0.4$, les 12ème photographies sont récoltées pour les appareils filmant en 30 images par seconde et les 10ème photographies sont récoltées pour les appareils filmant en 25 images par seconde.
 - ...jusque $t=T$.
5. Une fois ces photographies triées, chaque lot de huit photographies est traité avec Agisoft-Photoscan pour obtenir un modèle et un DEM.

L'analyse Agisoft-Photoscan est plus délicate que l'écoulement permanent. Il y a peu de photographies et le logiciel a souvent plus de difficultés à repérer tous les marqueurs présents sur les images. Il faut donc les rajouter manuellement afin de permettre au logiciel d'aligner correctement les photographies. Le traitement post-expérience sur Agisoft-Photoscan des images est donc plus long mais la modélisation est bien plus rapide dû au petit nombre de photographies à aligner.

Chapitre 3

Résultats et sources d'erreurs

3.1 Expériences focalisées sur une berge ou sur les deux berges.

Tout d'abord les expériences focalisées sur une berge ne donnent pas de meilleurs résultats que les expériences sur toute la section. Agisoft-Photoscan ne parvient pas à mieux modéliser sur une seule berge. Au contraire le fait de modéliser les 2 berges lui permet de repérer plus de marqueurs et de mieux aligner les photos. Les résultats obtenus sur une seule berge ne sont donc pas présentés.

La figure 3.1 montre les résultats obtenus pour une expérience transitoire au temps $t=0$ où le débit est initialement égal à 4 l/s.

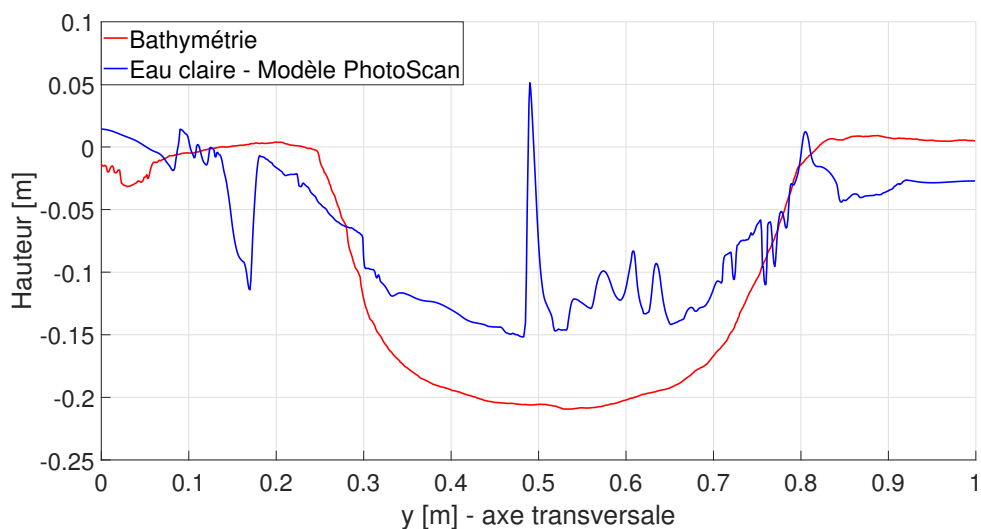


FIGURE 3.1 – Section 13 en $t=0$ (environ 4 l/s)

Les résultats du modèle ne sont pas concluants. La modélisation faite par Agisoft-Photoscan est approximative. La crainte d'avoir des DEMs imprécis était justifiée. La figure 3.2 est un nuage dense de la section 13 modélisée à partir des données obtenues lors d'une expérience transitoire. Cette figure tente de visualiser les problèmes de modélisation de Agisoft-Photoscan. Les modèles Agisoft-Photoscan sont remplis de trous de points qui n'existe pas dans la réalité.

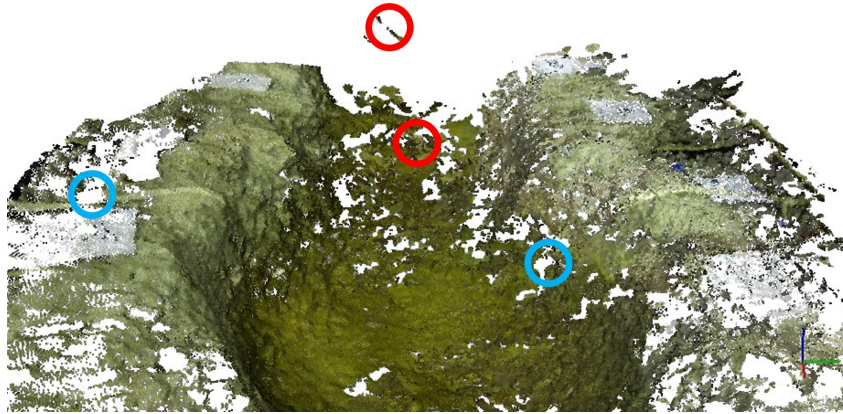


FIGURE 3.2 – Nuage dense de la section 13 : les trous en bleu et les points non-existants en rouge.

3.2 Sources potentielles de l'échec

L'échec pourrait avoir plusieurs origines. Cette section soulève les principaux problèmes techniques rencontrés et tente d'analyser les raisons du non aboutissement de la méthode. Les hypothèses ou les démarches qui auraient pu altérer les résultats sont exposées au point 3.3 "Sources d'erreurs".

L'analyse consiste en la comparaison de plusieurs modélisations de la bathymétrie de la section 13 sur base de différentes méthodes d'acquisitions de photographies. Le but est de pouvoir cibler les différentes sources du problème. Les bathymétries sont représentées sur la figure 3.3 et ont été modélisées à partir de :

- (a) Photographies issues d'une Go Pro Hero 4 pour 8 points de vue différents avec 1 seule photographie par point de vue.
- (b) Photographies issues de 8 appareils différents avec 1 seul point de vue pour chaque appareil. Les caractéristiques des appareils utilisées sont disponible dans le tableau 2.1 avec 1 seule photographie par point de vue.
- (c) Images issues de films pris avec une Go Pro Hero 4 pour 8 points de vue différents.
- (d) Images issues de films pris avec 8 appareils différents avec 1 seul point de vue pour chaque appareil.

C'est la dernière solution (d) qui a été retenue pour l'acquisition de données.

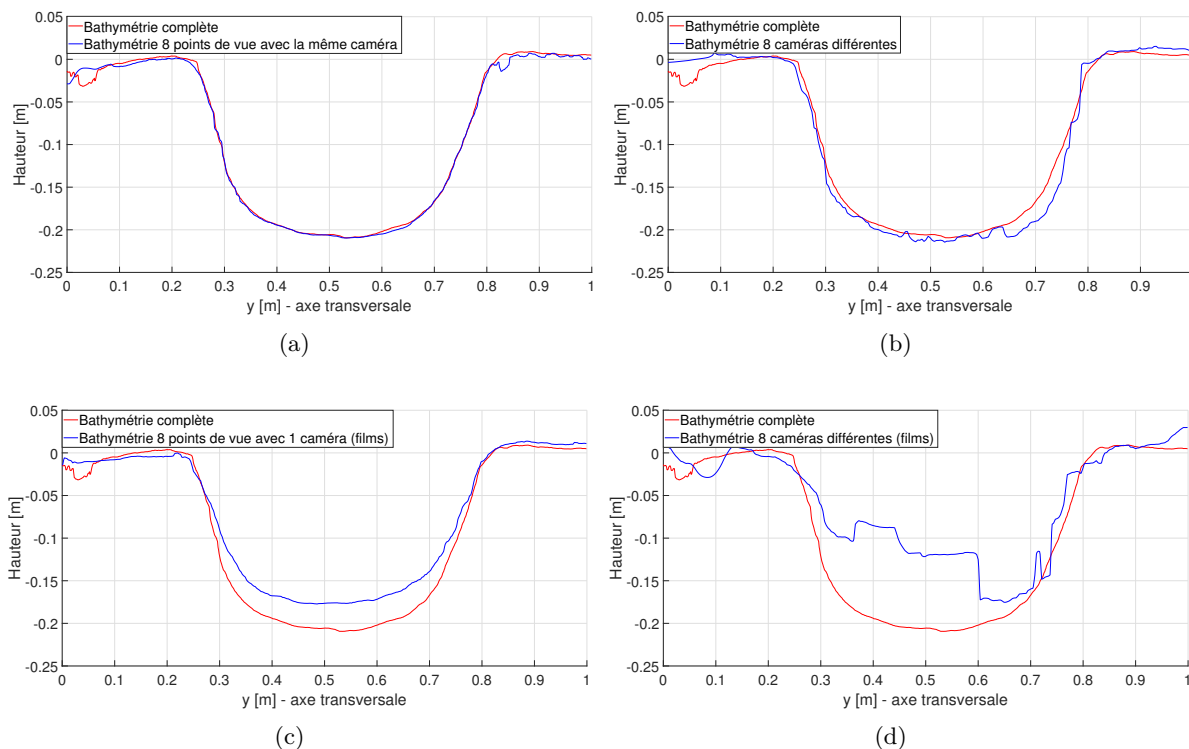


FIGURE 3.3 – Comparaison de la bathymétrie de la section 13 avec la bathymétrie modélisée au moyen de (a) photographies prises avec le même appareil, (b) photographies avec appareils différents, (c) images issues de films d’un même appareil, (d) images issues de films d’appareils différents.

Le tableau 3.1 reprend les écarts moyens entre chacun des 4 DEMs ((a),(b),(c),(d)) et la bathymétrie modélisée dans la partie II, considérée comme la bathymétrie de référence.

	1 seul appareil (Go Pro Hero 4)	8 appareils
Photographies	(a) 2.7mm	(b) 8.6 mm
Images issues de films	(c) 15.8 mm	(d) 36.8 mm

TABLE 3.1 – Erreur moyenne des comparaisons de bathymétrie

3.2.1 Mise en place : nombre d’images et angles de vue

Le nombre d’images et angles de vue permettant de modéliser une section est limité par le nombre d’appareils mis en place. Un plus grand nombre d’appareils photos facilite dès lors la modélisation. Cependant, le nombre d’images utilisé afin de modéliser la section désirée semble suffisant. La figure 3.3(a) montre une bathymétrie modélisée à partir de 8 photographies d’un même modèle de caméra en comparaison avec la bathymétrie de référence. Cela permet d’affirmer que le nombre de photographies est suffisant.

3.2.2 Appareils photos différents

La figure 3.3(b) montre la bathymétrie modélisée avec des photographies prises avec 8 appareils différents. L’erreur moyenne est de 8.6 mm. Il est donc préférable d’utiliser le même appareil pour réaliser l’expérience. Cependant la bathymétrie modélisée reste dans la même forme que la bathymétrie complète. En adaptant les seuils, il est probable de trouver des résultats acceptables. L’utilisation de différents appareils n’est donc pas recommandée mais n’est pas à exclure.

3.2.3 La qualité de photographies et synchronisation des caméras

Les figures 3.3(c) et 3.3(d) montrent des bathymétries modélisées à partir d'images issues de films. En comparaison avec les figures 3.3(a) et 3.3(b), on constate que les bathymétries sont nettement moins représentatives de la réalité avec des erreurs de l'ordre du cm (1.58 cm avec une seule caméra et 3.68 cm pour des caméras différentes). L'avantage de la synchronisation obtenue grâce au film est perdue en raison de la perte de qualité des images. De plus, Agisoft-Photoscan ne parvient plus à calibrer les images. Contrairement aux photographies où Agisoft-Photoscan calibre automatiquement la taille des pixels et la longueur focale. La synchronisation grâce à la combinaison film/flash doit donc être améliorée et de nouvelles pistes doivent être envisagées. [CHANDLER et al., 2008] utilise un câble reliant les appareils photos afin de synchroniser les appareils photos d'une précision de 1/100ème de seconde.

3.3 Sources d'erreurs

Cette méthode demande à être perfectionnée. Cependant, il est important de souligner certains points qui auraient pu être à l'origine d'erreurs dans la méthodologie. Les sources d'erreurs sont identiques à celles relevées pour les écoulements permanents si ce n'est que pour les écoulements transitoires, la difficulté de prise de mesures réelles et la coordination du flash-ouverture viennent s'ajouter.

Les vidéos opérant en 25 ou 30 images par seconde et le flash étant visible à chaque fois sur une seule image, on peut s'attendre à une erreur de synchronisation de l'ordre du 1/25ème de seconde.

Il est à noter également que l'hypothèse de la surface d'eau engendre des erreurs importantes (plus importantes que dans les écoulements permanents). Il est à nouveau possible d'observer des remous sur la surface d'eau mais cette fois-ci sur l'ensemble des sections du modèle réduit, à l'inverse des écoulements permanents où ces remous n'apparaissent que sur les dernières sections.

3.4 Discussion

Malgré plusieurs essais et plusieurs méthodologies différentes, les résultats montrent que les méthodes ne sont pas optimales. Ces expériences sont une première approche dans la caractérisation du niveau d'eau dans les écoulements transitoires.

Au fur et à mesure de l'avancée des travaux, certaines idées ont dû être écartées, particulièrement dans l'acquisition des mesures. Tout d'abord la latte jouant le rôle d'échelle limnimétrique a dû être rapidement abandonnée car elle obstruait certains points de vue, empêchant Agisoft-Photoscan de modéliser correctement les berges. Ensuite l'idée de reproduire un hydrogramme pour chaque expérience n'est pas réalisable dans le laboratoire au vu de l'ouverture non-automatisée de la vanne.

Perspectives et conclusion

L'objectif du présent travail est de caractériser la méthode de mesure du niveau d'eau par photogrammétrie. Le mode opératoire consiste en :

- Acquisition d'images avec un appareil photo,
- Traitement des images,
- Modélisation via Agisoft-Photoscan,
- Création d'un fichier exploitable (DEM),
- Analyse du DEM avec le modèle numérique.

Deux grands types d'écoulements ont été analysés : des écoulements permanents et des écoulements transitoires. La mise en place des expériences et les résultats de ces écoulements sont différents :

La technique développée pour **les écoulements permanents** donnent de bons résultats et est fiable. Celle-ci a été testée sur quatre débits différents : 6 l/s, 8 l/s, 10 l/s et 11.5 l/s. Les erreurs moyennes absolues obtenues vont de 3 à 7 mm (soit 2.81% à 5.59% d'erreur relative). Une différence est observable pour les sections avec remous et sans remous : les sections sans remous présentent des erreurs moyennes absolues de 5.42 mm, alors que les erreurs des sections avec remous valent 6.51 mm (soit 4.45% et 8.12 % d'erreurs relatives respectivement).

Au niveau de la mise en place, les résultats des expériences amènent à plusieurs constatations. D'abord, la structure constituée de la cage noire et de la lumière artificielle est inutile. Cette installation n'apporte pas de meilleurs résultats et est de plus très contraignante à manipuler. Ensuite, la Go Pro et l'appareil photographique donnent des résultats similaires. Cependant, la Go Pro est, de par sa petite taille et sa facilité d'emploi, une solution plus intéressante que l'appareil photographique.

La modélisation d'un DEM Agisoft-Photoscan passe par plusieurs étapes. Il faut d'abord détecter les repères et aligner toutes les photographies. Ensuite vient la phase de modélisation, il faut alors créer un nuage de points. Il est possible sur base de ce nuage de points de créer un maillage. La création de DEMs se base soit sur un maillage soit sur un nuage dense, ces deux possibilités pouvant chacune être modélisée soit en qualité haute soit en qualité moyenne. Suite à différents essais, il s'avère que la modélisation basée sur des nuages denses de qualité moyenne est la plus fidèle à la réalité.

Beaucoup d'études ([FRANZINI et al., 2016], [COUTINHO et JANSSENS, 2017], [FERREIRA et al., 2017], [CHANDLER et al., 2008]) suggèrent et étudient la possibilité de donner une texture ou colorer l'eau. Le modèle numérique développé dans cette étude présente justement l'avantage de ne pas dépendre d'éventuels changements de texture. Ce modèle numérique est constitué de seuils. Ces seuils peuvent être ajustés en fonction des différents terrains sur lesquels on procède aux mesures. Le code peut évidemment encore être amélioré afin d'être plus robuste ou adaptable à n'importe quelle rivière.

D'autres sources d'erreurs indépendantes de la méthode doivent être discutées.

- Tout d'abord, on note que les mesures réelles au trusquin sont parfois imprécises. L'expert en charge de la mesure fait en moyenne une erreur de 1.13 mm et 2.04 mm pour les mesures en écoulement sans remous et avec remous respectivement.
- Ensuite, l'hypothèse de la surface d'eau plane utilisée dans le modèle numérique peut engendrer des imprécisions importantes. La différence de niveau d'eau observable sur une section turbulente peut être de 1.5 cm.

Pour tenter d'avoir de meilleurs résultats, il faudrait résoudre les problèmes liés à ces deux sources d'erreurs. La fiabilité du modèle a également été prouvée par l'étude de la surface d'eau au laser. En effet, on observe que le modèle numérique détecte pour chaque section un niveau d'eau situé entre le niveau maximum et le niveau minimum observés sur les analyses de l'expérience laser.

Pour **les écoulements transitoires**, les résultats sont plus approximatifs. Le modèle n'est pas fiable. Les DEMs ne permettent pas de trouver le niveau d'eau. Les écoulements transitoires sont difficiles à caractériser. Les causes de l'échec sont multiples. Pour chaque erreur, des suggestions de corrections ou des pistes d'améliorations sont soumises pour les recherches futures.

Tout d'abord un paramètre discutable est le nombre d'appareil photos. Huit caméras sont utilisées donnant lieu à huit points de vue. Considérer la possibilité d'avoir plus de points de vue, donc moins d'angles morts et plus de précisions pour certains points est une première piste. Il peut être intéressant de savoir également s'il existe des points de vue plus pertinents et de mettre cela en relation avec le nombre de prises de vue. Néanmoins cela n'est pas la piste la plus intéressante à exploiter. Des DEMs permettant de modéliser la section voulue ont été obtenus avec un nombre limité de photographies (8 photographies).

Le fait de faire une expérience avec huit modèles de caméras différentes impactent les résultats. Une modélisation de la bathymétrie a été réalisée avec une Go Pro suivant les mêmes points de vue que les huit caméras différentes. Les différences obtenues par rapport au bathymétrie de référence sont moindres dans le cas où un même modèle d'appareil photos est utilisé. L'idéal serait donc de n'utiliser que des modèles de caméras identiques.

Le plus gros problème semble résider dans la qualité des images issues des films. Les résultats obtenus avec les images issues de films présentent un taux d'erreur plus important que ceux obtenus avec des photographies. On peut dès lors affirmer qu'il y a une perte de qualité causée par les vidéos. Faire des expériences avec des prises de photographies par pas de temps pourrait améliorer la modélisation (par exemple faire une expérience de 30 secondes avec des caméras travaillant en 5 images par seconde). Le désavantage de cette technique est le décalage temporel de prise de vue des caméras. Le décalage temporel est inversement proportionnel au nombre de capture par unité de temps. Cela peut devenir contraignant pour des écoulements transitoires se produisant sur de courtes périodes.

Tous ces résultats ne sont pas parfaits mais sont encourageants. Combiner ce travail avec d'autres études telles que la recherche des vitesses superficielles [BIA et SOMMERS, 2017-2018] et la recherche du niveau d'eau par photogrammétrie en terrain [HELLEBAUT, 2017-2018] permettra de trouver la hauteur d'eau ainsi que le débit dans des situations réelles. Toutefois pour appliquer la méthode de mesure du niveau d'eau par photogrammétrie, il est nécessaire de bien connaître la bathymétrie de la rivière étudiée.

Le travail exposé permet de caractériser les écoulements permanents, il pourrait donc déjà être testé sur des rivières à niveau stable. La prise de donnée pourrait être exécutée via drone. La facilité de mise en œuvre la rend accessible à tous. La mesure du niveau d'eau par photogrammétrie ne saurait tarder à donner de bons résultats sur terrain et dès lors servir de nobles causes comme la prédiction de phénomènes ou catastrophes naturels.

Table des figures

Partie I	5
2.1 Différence entre canal et modèle réduit.	9
2.2 Influence des conditions aval sur l'écoulement.	10
2.3 Représentation des deux structures mobiles.	11
Partie II	17
1.1 Systèmes d'axes	17
2.1 Ensemble des points de mesure du laser Keyence.	20
2.2 Profil en long du thalweg de la rivière	21
3.1 Exemple de marqueurs et leurs dispositions tout le long du modèle réduit.	23
3.2 Exemple de mesures de la bathymétrie de la section 11 (x=1m).	24
3.3 Bathymétrie en 3D réalisée sur base des mesures du laser Keyence.	25
3.4 Histogramme des différences entre les modèles Agisoft-Photoscan et laser Keyence pour la Go Pro et l'appareil photo avec cage noire.	26
3.5 Histogramme des différences entre les modèles Agisoft-Photoscan et laser Keyence pour la Go Pro et l'appareil photo sans cage noire.	27
3.6 Erreur potentielle du décalage en y	29
Partie III	33
1.1 Les parties avec remous et sans remous du canal.	33
2.1 Différence entre une modélisation en nuage dense et en maillage.	35
2.2 Différence du niveau d'eau pour les sections 38, 39 et 40 pour un débit de 11.5 l/s.	36
3.1 Installation et points de vue utilisés pour l'écoulement permanent.	38
3.2 Analyse section 12	39
4.1 Photographie où un reflet sur un marqueur et des reflets sur l'eau sont visibles.	41
4.2 Différence entre les DEMs de bathymétrie de Go Pro de qualité haute et qualité moyenne (en nuage dense).	42
4.3 Evolution du niveau d'eau pour un débit de 10 l/s sur l'entièreté du canal	42
4.4 Ecart absolu entre les mesures au trusquin et les mesures du modèle Agisoft-Photoscan pour un débit de 10 l/s.	43
4.5 Ecart relatif entre les mesures au trusquin et les mesures du modèle Agisoft-Photoscan pour un débit de 10 l/s.	43

4.6	Évolution du débit dans le temps pour un débit initial de 10 l/s.	44
4.7	Graphique présentant les écarts moyennes de mesures par rapport à la moyenne des mesures pour un débit de 12 l/s.	45
5.1	Exemple du laser reflété à la surface de l'eau sur la section 7.	47
5.2	Installation pour les mesures au laser de la surface d'eau.	48
5.3	Ensemble des variables nécessaires pour la correction en barillet. Image tirée du travail de fin d'étude de DESCANTONS et DUJARDIN, « Formation, par débordement, d'une brèche dans une digue en matériau non cohésif ».	48
5.4	Photographies des damiers.	49
5.5	Problèmes liés au laser et à la luminosité.	49
5.6	Profil de la surface d'eau sur la section 20	50
5.7	Profil de la surface d'eau sur la section 40.	51
5.8	Photographies de la section 44 lors de l'expérience au laser.	52

Partie IV **57**

2.1	Image issue d'une vidéo où la latte est apparente et permet de lire le niveau d'eau (Les papiers collants blancs sur les berges marquent la section 13).	60
2.2	Exemple d'évolution du niveau d'eau pour un cas lent et un cas rapide.	61
2.3	Installations pour les écoulements transitoires.	62
2.4	Image d'une vidéo où le flash est visible, marquant le début d'une expérience transitoire.	62
3.1	Section 13 en t=0 (environ 4 l/s)	65
3.2	Nuage dense de la section 13 : les trous en bleu et les points non-existants en rouge.	66
3.3	Comparaison de la bathymétrie de la section 13 avec la bathymétrie modélisée au moyen de (a) photographies prises avec le même appareil, (b) photographies avec appareils différents, (c) images issues de films d'un même appareil, (d) images issues de films d'appareils différents.	67

Annexes **78**

B.1	Evolution du débit dans le temps pour un débit initial de 6 l/s.	81
B.2	Evolution du débit dans le temps pour un débit initial de 8 l/s.	81
B.3	Evolution du débit dans le temps pour un débit initial de 12 l/s.	82
D.1	Profil de la surface d'eau sur la section 44.	85
D.2	Profil de la surface d'eau sur la section 42.	86
E.1	Exemple de bathymétrie exploitable via le logiciel QGIS.	87
G.1	Histogramme des différences pour un débit de 10 l/s	92
H.1	Graphique présentant les écarts moyennes de mesures par rapport à la moyenne des mesures pour un débit de 6 l/s.	93
H.2	Graphique présentant les écarts moyennes de mesures par rapport à la moyenne des mesures pour un débit de 8 l/s.	93
H.3	Graphique présentant les écarts moyennes de mesures par rapport à la moyenne des mesures pour un débit de 10 l/s.	94

Liste des tableaux

Partie I	5
Partie II	17
3.1 Erreurs moyennes, erreurs moyennes absolues et écart-types pour les erreurs entre les modèles DEM et le laser Keyence.	28
Partie III	33
4.1 Tableau comparatif des résultats issus d'un DEM de Go Pro basé sur un nuage dense de qualité haute ou moyenne.	42
4.2 Tableau comparatif des moyennes des erreurs absolues et relatives sur l'ensemble du canal, sur la partie sans remous et celle avec remous pour un débit de 10 l/s.	44
4.3 Tableau comparatif des moyennes des erreurs moyennes absolues et relatives des différents débits sur l'ensemble du canal, sur la partie sans remous et celle avec remous.	44
4.4 Tableau récapitulatif des moyennes des différences \bar{e}_{ij} des valeurs mesurées au trusquin.	46
5.1 Valeur du niveau d'eau pour l'écoulement sans remous de la section 20.	50
5.2 Valeur du niveau d'eau pour l'écoulement sans remous de la section 40.	51
Partie IV	57
2.1 Liste du matériel photographique utilisé.	61
3.1 Erreur moyenne des comparaisons de bathymétrie	67
Annexes	78
A.1 Caractéristiques principales du trusquin	79
C.1 Tableau comparatif des expériences avec ou sans la cage noire pour un débit de 6 l/s.	83
C.2 Tableau comparatif des résultats obtenus sur base d'un DEM de Go Pro basé sur des mesh.	83
D.1 Valeur du niveau d'eau pour l'écoulement sans remous de la section 44.	85
D.2 Valeur du niveau d'eau pour l'écoulement sans remous de la section 42.	86

Bibliographie

- Agisoft PhotoScan Manuel de l'utilisateur, Professional Edition, Version 1.1* (2015). URL : http://www.agisoft.com/pdf/manuals_other/pscan_pro_fr_1_1.pdf.
- Agisoft PhotoScan User Manual, Professional Edition, Version 1.4* (2018). URL : http://www.agisoft.com/pdf/photoscan-pro_1_4_en.pdf.
- AgisoftWiki* (2012). URL : http://www.agisoft.ru/w/index.php?title=Main_Page.
- BIA, T. et H. SOMMERS (2017-2018). In :
- BOUSMAR, D. et G. FRASELLE (2004). « Canal à lit composé et programme hydrocap. descriptif, mode d'emploi ». Mém.de mast. Louvain-La-Neuve : Ecole Polytechnique de Louvain.
- CARBONNELL, M. (2018). « Photogrammetrie [en ligne], consulté le 24/05/2018, <http://www.universalis-edu.com/encyclopedie/photogrammetrie/> ». In : *Encyclopædia Universalis*.
- CHANDLER, J. H. et al. (2008). « Measuring a dynamic and flooding river surface by close range digital photogrammetry ». In : *International Society for Photogrammetry and Remote Sensing*, p. 211–216.
- COUTINHO, G. et N. JANSSENS (2017). « Mesure de la surface libre d'écoulement en bathymétrie complexe par photogrammétrie ». Mém.de mast. Louvain-La-Neuve : Ecole Polytechnique de Louvain.
- DESCANTONS, C. et R. DUJARDIN (2014). « Formation, par débordement, d'une brèche dans une digue en matériau non cohésif ». Mém.de mast. Louvain-La-Neuve : Ecole Polytechnique de Louvain.
- DIETRICH, J.T. (2016). « Bathymetric Structure-from-Motion : extracting shallow stream bathymetry from multi-view stereo photogrammetry ». In : *Earth Surface Processes and Landforms*, p. 355–364.
- DUDKA, Thibaut (2015). « Photogrammétrie et Modélisation 3D à partir d'images drone au sein de TPLM-3D ». Mém.de mast. Strasbourg : INSA.
- FERREIRA, E. et al. (2017). « Automated extraction of free surface topography using SfM-MVS photogrammetry ». In : *Flow Measurement and Instrumentation, Volume 54*, p. 243–249.
- FONSTAD, Mark A. et al. (2013). « Topographic structure from motion : a new development in photogrammetric measurement ». In : *EARTH SURFACE PROCESSES AND LANDFORMS*, p. 421–430.
- FRANZINI, F. et al. (2016). « Measurement of the free-surface elevation in a steady flow in complex topography using photogrammetry ». In :
- FRANZINI, F. et S. SOARES-FRAZAO (2016). « Efficiency and accuracy of lateralized hll, hlls and augmented roe's scheme with energy balance for river flows in irregular channels. » In : *Applied Mathematical Modelling*, 40(17) :7427–7446.
- GENET, E. (1920). « Le temps de pose en photographie ». In : *Revue française de photogrammétrie*, p. 3–16.
- GRIBBON, K.T., C.T. JOHNSTON et D.G. BAILEY (2003). « A Real-time FPGA Implementation of a Barrel Distortion Correction Algorithm with Bilinear Interpolation ». In : *Image and vision computing NZ, Palmerston North*, p. 408.
- HAMSHAW, S.D. et al. (2017). « Quantifying streambank movement and topography using unmanned aircraft system photogrammetry with comparison to terrestrial laser scanning ». In : *River Research and Applications, Volume 33*, p. 1354–1367.

- HELLEBAUT, F.-X. (2017-2018). « Mesure du niveau d'eau par photogrammétrie à partir d'un drone ». Mém.de mast. Louvain-La-Neuve : Ecole Polytechnique de Louvain.
- HUANG, Guang-Bin, Qin-Yu ZHU et Chee-Kheong SIEW (2006). « Extreme learning machine : Theory and applications ». en. In : *Neurocomputing* 70.1-3, p. 489–501. ISSN : 09252312. DOI : 10.1016/j.neucom.2005.12.126. URL : <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0925231206000385>.
- HUDON, Christiane (1997). « Impact of water level fluctuations on St. Lawrence River aquatic vegetation ». In : *Can. J. Fish. Aquat. Sci. Vol. 54*, p. 2853–2865.
- LANE, S. N. (2000). « The measurement of river channel morphology using digital photogrammetry ». In : *Photogrammetric Record*, p. 937–961.
- LEJOT, J. et al. (2007). « Very high spatial resolution imagery for channel bathymetry and topography from an unmanned mapping controlled platform ». In : *Earth Surface Processes and Landforms, Wiley-InterScience*, p. 1723–1725.
- Logiciel QGIS (2002). URL : <https://www.qgis.org/fr/site/>.
- MathWorks® (2018). URL : <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/ginput.html>.
- MICHELETTI, N., J. H. CHANDLER et S. N. LANE (2015b). « Structure from motion (sfm) photogrammetry ». In :
- MILLERD, F. et C. DUFOURNAUD (1993). *The Impact of Water Level Changes on Commercial Navigation in the Great Lakes and St. Lawrence River*. Working Papers. Wilfrid Laurier University, Department of Economics.
- MORFÍN, Armando Pérez et al. (2012). « Glosario de biodiversidad ». In : *Universidad de Quintana Roo*, p. 88.
- MURILLO, J. et P. GARCIA-NAVARRO (2014). « Accurate numerical modeling of 1d flow in channels with arbitrary shape. application of the energy balanced property ». In : *Journal of Computational Physics*, 260 :222–248.
- PEIPE, J. et M. STEPHANI (2003). « Performance evaluation of a 5 MegaPixel digital metric camera for use in architectural photogrammetry ». In : *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXIV, Part 5/W12*, p. 259–261.
- SCHNEEBELI, G. (1955). « Expériences sur la limite de validité de la loi de Darcy et l'apparition de la turbulence dans un écoulement de filtration ». In : *LA HOUILLE BLANCHE*, p. 141–149.
- SERRE, F. (1953). « Contribution à l'étude des écoulements permanents et variables dans les canaux (conclusion) ». In : *La Houille Blanche*, p. 830–872.
- SOLOMON, S. et al. (2007). « Climate Change 2007 : The Physical Science Basis ». In : p. 338–383.
- Systeme d'exploitation GNU (1983). URL : <https://www.gnu.org/>.
- VILLENEUVE, A. et al. (2009). « Influence of slight differences in environmental conditions (light, hydrodynamics) on the structure and function of periphyton ». In : *Aquatic Sciences, Research Across Boundaries*, p. 33–44.
- VÖRÖSMARTY, C.J. et al. (2000). « Global Water Resources : Vulnerability from Climate Change and Population Growth ». In : *Sciences - Volume 289*, p. 284–288.
- WESTOBYA, M.J. et al. (2012). « 'Structure-from-Motion' photogrammetry : A low-cost, effective tool for geoscience applications ». In : *Geomorphology-Volume 179*, p. 300–314.
- ZECH, Y. « Hydraulique fluviale - Anciens syllabus ». In : *Université Catholique de Louvain-La-Neuve*.
- (2008). « AUCE 2151, hydraulique appliquée ». In : p. 31–32.

Annexe A

Descriptif des appareils de mesures

A.1 Trusquin

Un trusquin est un instrument de mesure. Il est utilisé dans ce projet afin de mesurer les niveaux d'eau sans perturber l'écoulement. Il faut calibrer le trusquin au niveau zéro du repère pour ensuite le rapprocher le plus possible de la surface libre. La précision de cet outil est de ± 0.03 mm. L'erreur engendrée par le trusquin est discutée dans la Partie III "Analyse d'écoulements permanents" au point 4.2 "Sources d'erreurs". Le trusquin utilisé est un trusquin de la marque Mitutoyo® dont les caractéristiques principales se trouvent dans le tableau A.1 ¹

Capacité	0-200 mm
Précision	± 0.03 mm

TABLE A.1 – Caractéristiques principales du trusquin

A.2 Laser Keyence

Le laser Keyence est un instrument de mesure permettant d'obtenir la distance entre l'endroit d'où il émet son faisceau et le premier obstacle rencontré. Il est important de changer de repère afin de se retrouver dans le système d'axes préalablement défini. La méthode est simple : obtenir les coordonnées Keyence de notre point (0,0,0) pour ensuite effectuer les transformations nécessaires afin de se retrouver dans le système d'axes désiré.

Les informations relatives au laser Keyence utilisé sont les suivantes :

1. Sensor Head LK-G502 ².
2. Display Panel LK-GD500 ³.

A.3 Station totale

Une station totale, de son nom scientifique « le Tachéomètre » est un appareil servant à déterminer les coordonnées des points de manière précise (de l'ordre du mm) dans un espace donné ⁴. La station totale n'a pas été retenue car sa maniabilité et son utilisation n'était pas adéquate à l'intérieur du laboratoire. Le Laser Keyence et l'automate proposent une utilisation plus aisée dans le géoréférencement des marqueurs .

1. https://shop.mitutoyo.fr/web/mitutoyo/fr_FR/all/all/Trusquin%20Absolute%20Digimatic/\protect\T1\textdollarcatalogue/mitutoyoData/PR/570-227/keywords.xhtml?result=1527079017601
2. <https://www.keyence.com/products/measure/laser-1d/lk-g3000/models/lk-g502/index.jsp>
3. https://www.keyence.com/products/measure/laser-1d/lk-g3000/models/lk-gd500/index.jsp?_ga=2.108065217.2133517974.1527075547-404356743.1527075547
4. Manuel d'utilisation écrit par *Hugo GRANGEON*, disponible chez Sébastien GOESSENS

Annexe B

Evolution du débit

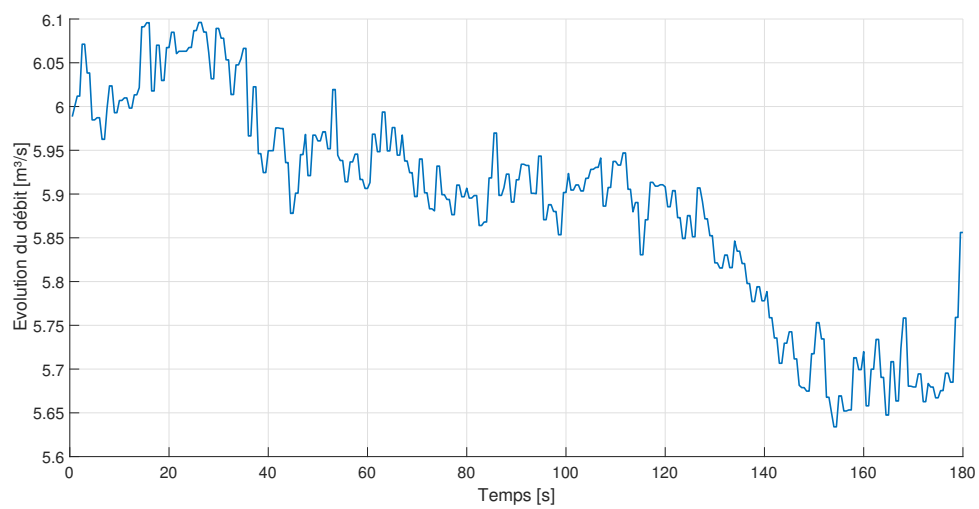


FIGURE B.1 – Evolution du débit dans le temps pour un débit initial de 6 l/s.

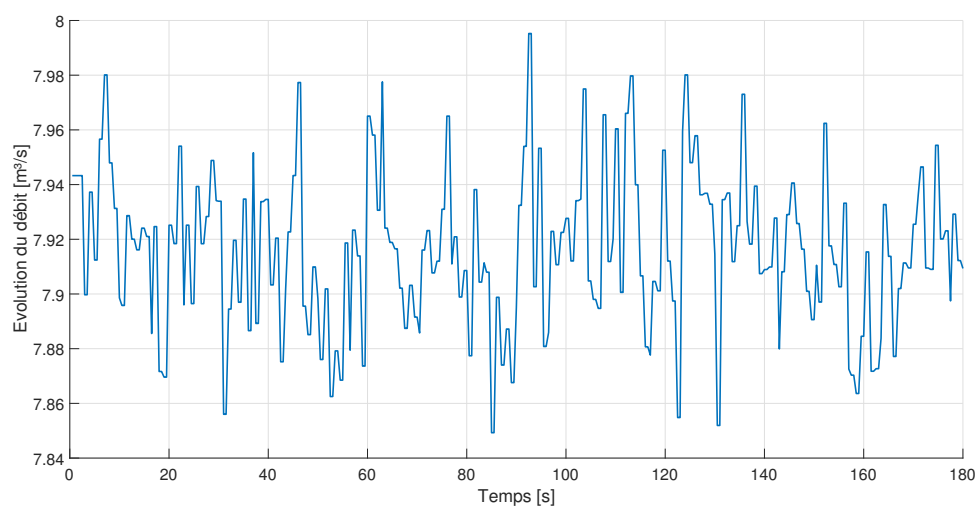


FIGURE B.2 – Evolution du débit dans le temps pour un débit initial de 8 l/s.

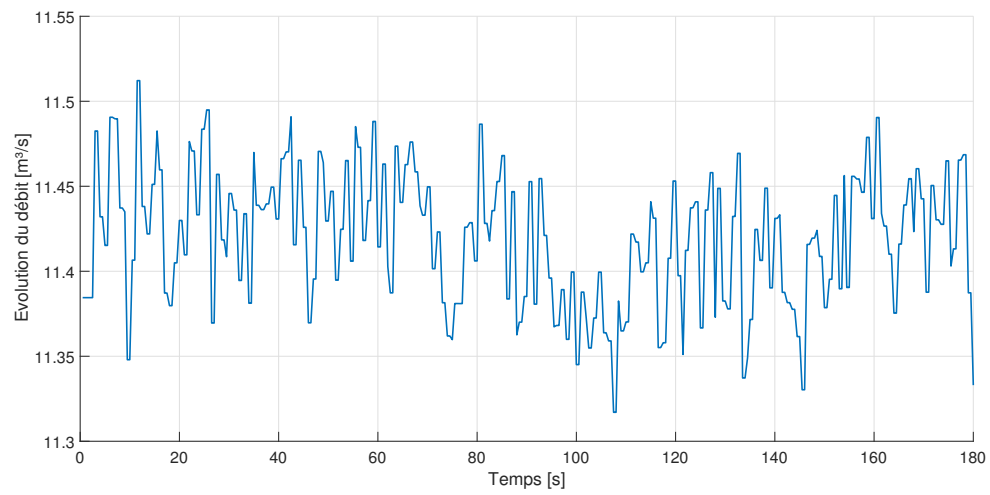


FIGURE B.3 – Evolution du débit dans le temps pour un débit initial de 12 l/s.

Annexe C

Résultats supplémentaires d'expériences en écoulement permanent

Cage noire	erreur absolue [mm]	erreur relative [%]
Avec	9.2	8.91
Sans	5.4	5.44

TABLE C.1 – Tableau comparatif des expériences avec ou sans la cage noire pour un débit de 6 l/s.

Débit [l/s]	Qualité du dense cloud	erreur absolue [mm]	erreur relative [%]
6	haute	5.3	5.43
	moyenne	5.3	5.41
8	haute	8.8	6.93
	moyenne	7.7	6.12
10	haute	4.6	3.63
	moyenne	4.6	3.61
11.5	haute	7.8	5.33
	moyenne	7.8	5.33

TABLE C.2 – Tableau comparatif des résultats obtenus sur base d'un DEM de Go Pro basé sur des mesh.

Cette différence de précision entre les DEMs basés sur des maillage et les DEMs basés sur les nuages denses est probablement dû au forçage de triangularisation.

Annexe D

Résultats analyse forme de l'eau

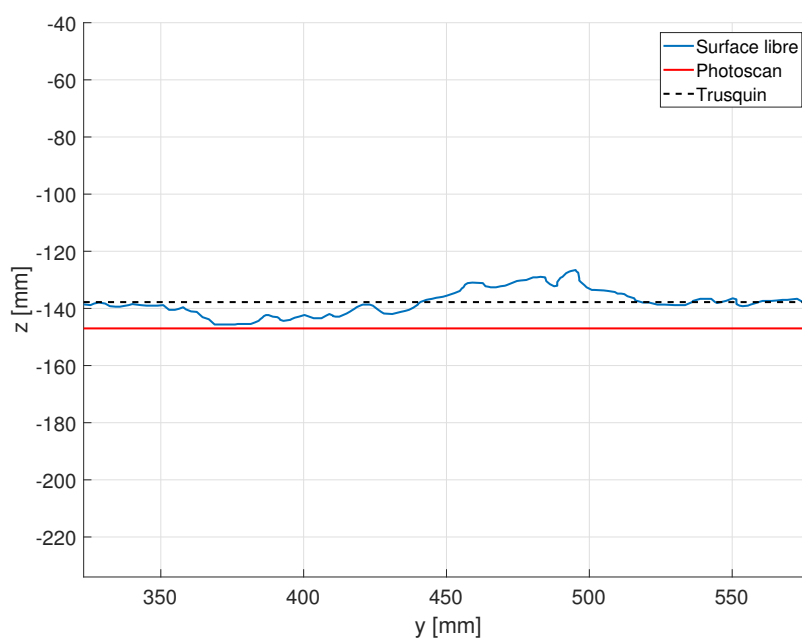


FIGURE D.1 – Profil de la surface d'eau sur la section 44.

Modèle de mesure	Valeur du niveau d'eau
Maximum	-126.6
Minimum	-145.6
Moyenne	-137.9
Trusquin	-137.8
Modèle photogrammétrique	-147.0

TABLE D.1 – Valeur du niveau d'eau pour l'écoulement sans remous de la section 44.

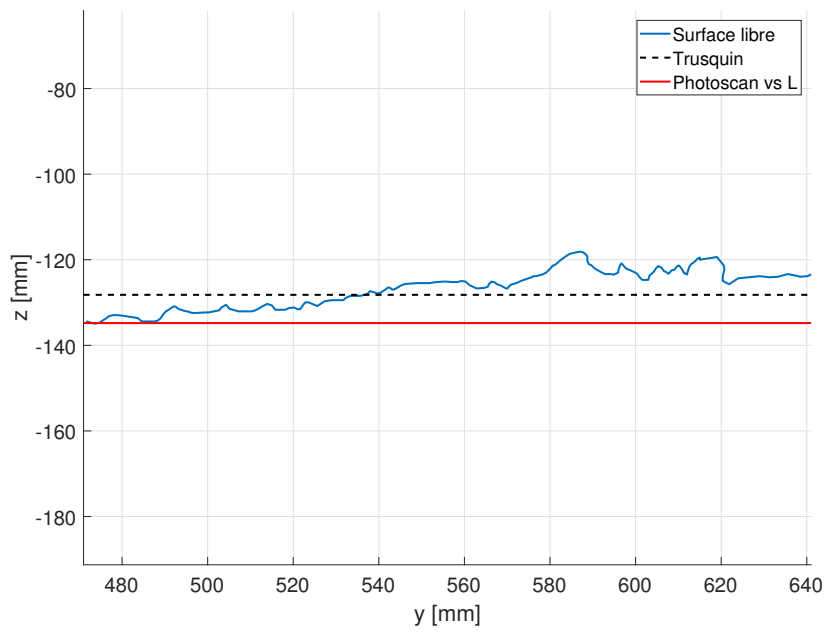


FIGURE D.2 – Profil de la surface d'eau sur la section 42.

Modèle de mesure	Valeur du niveau d'eau
Maximum	-118.1
Minimum	-134.9
Moyenne	-126.5
Trusquin	-128.2
Modèle photogrammètrie	-134.8

TABLE D.2 – Valeur du niveau d'eau pour l'écoulement sans remous de la section 42.

Annexe E

Logiciel QGIS

Cette annexe décrit brièvement QGIS. Toutes les informations sont tirées de leur site internet *Logiciel QGIS 2002*. QGIS se définit comme *un Système d'Information Géographique (SIG)*. Il est distribué sous licence public générale GNU.¹ QGIS travaille avec des images vectorielles et matricielles (raster). Il traite également des bases de données. Il est écrit en C++, Python et Qt. QGIS Desktop permet de *Créer, éditer, visualiser, analyser et publier des informations géographiques*.

Dans ce travail, QGIS a été utilisé dans l'étude dans le chapitre II Améliorations du dispositif expérimental et principalement dans l'étude de la bathymétrie. Le logiciel a permis de trouver la différence entre les mesures au laser Keyence et les DEM d'Agisoft-Photoscan de la bathymétrie. Il a également permis de comparer les DEM de bathymétrie obtenus via la Go Pro en bonne qualité et qualité moyenne. Le logiciel traite dans le cas des DEM, des fichiers de type *.tif*

La figure E.1 montre la bathymétrie modélisée par QGIS sur base d'un DEM de Go Pro basé sur un dense cloud de qualité haute.

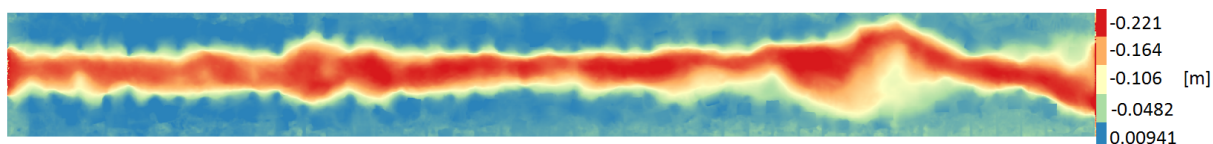


FIGURE E.1 – Exemple de bathymétrie exploitable via le logiciel QGIS.

1. La licence public générale GNU est une licence raliée au système d'exploitation libre GNU et qui donne les conditions légalement applicables pour la distribution d'un logiciel libre. *Système d'exploitation GNU 1983*

Annexe F

Notice d'orthorectification

Comme expliqué dans la partie III : Analyse d'écoulements permanents chapitre 5 : Mesures au laser de la surface d'eau, le code *supermodifior.m*, permettant d'obtenir la correction en barillet est décrit par [DESCANTONS et DUJARDIN, 2014].

Les étapes à suivre pour orthorectifier les photos sont les suivantes :

1. Réaliser l'expérience, centraliser les photos et les classer par ordre de section.
2. Les photos à corriger doivent être en format *.bmp*.
3. Créer un fichier Excel avec le numéro des photos (ex : pour une photo avec le nom `img001_000000_2` : le fichier Excel doit contenir **1** dans la première colonne et **2** dans la seconde colonne).
4. Lancer le code *supermodifior.m* en choisissant le bon fichier Excel d'entrée et les paramètres nécessaires à la orthorectification. Les paramètres sont à choisir par les soins de l'utilisateur. Le paramètre de rotation est nécessaire si la photographie n'a pas été prise de manière parfaitement horizontale. Le paramètre de distorsion a est trouvé par essai-erreur afin que les lignes horizontales soient parallèles entre elles et perpendiculaires aux lignes verticales également parallèles entre elles.
5. Si une correction en perspective est nécessaire, le lecteur est invité à lire et comprendre les travaux réalisés par [DESCANTONS et DUJARDIN, 2014]

Annexe G

Pistes d'amélioration de la méthode de détection des points de décrochages

Cette annexe est le fruit d'un bref entretien avec le Prof. John Lee, Maître de recherche FNRS, en mai 2018.

Cette annexe est une piste d'amélioration de la technique développée afin de détecter les points de décrochages. Ces pistes n'ont pas été développées car elles s'éloignaient de notre domaine d'expertise. C'est principalement le cas de la piste sur l'Extreme Learning Machine (ELM).

Statistique sur les différences

L'idée émanant est de définir le seuil de différence le plus adéquat sur base d'une étude statistique sur les différences entre modèles Agisoft-Photoscan et bathymétrie. Ces différences sont minimales sur les berges et augmentent dans les zones où l'eau est présente. Aux alentours des berges ces différences suivent une loi normale autour de 0 (Gaussienne).

La loi normale n'est plus respectée lorsque les points représentant la surface de l'eau sont comparés à ceux de la bathymétrie. Une augmentation dans les différences peut dès lors être visible sur l'histogramme de celles-ci comme il est possible d'apercevoir sur la figure G.1. Un outil statistique sur toutes les sections et avec plusieurs débits pourrait déterminer quel est le seuil le plus adéquat pour différencier la bathymétrie et le DEM de l'écoulement. En résumé l'idée est de trouver un intervalle de confiance pour les différences autour des berges afin d'établir le seuil le plus pertinent.

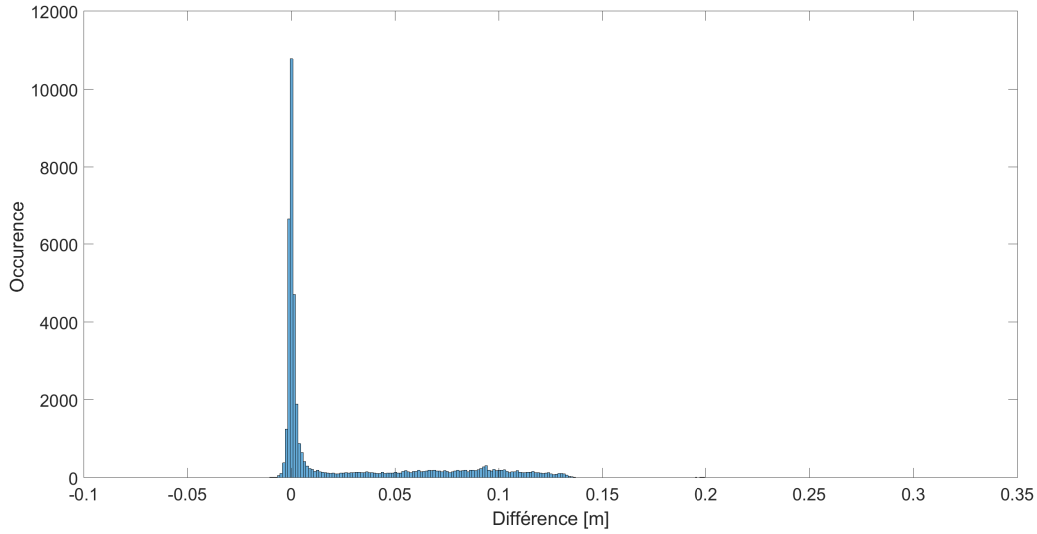


FIGURE G.1 – Histogramme des différences pour un débit de 10 l/s

Extreme machine learning

L'ELM (Extreme Machine Learning) est un type de réseau de neurones qui a été développé par [HUANG, ZHU et SIEW, 2006]. L'idée serait qu'à partir d'un grand nombre de données, on crée une matrice dans laquelle on trouve les sections et les valeurs des graphes de différences correspondantes.

$$w = \begin{bmatrix} \text{section 1} & 1000 \text{ points du graphes de différences de la section 1} \\ \text{section 2} & 1000 \text{ points du graphes de différences de la section 2} \\ \dots & \dots \\ \text{section 45} & 1000 \text{ points du graphes de différences de la section 45} \end{bmatrix} \quad (\text{G.1})$$

Une autre matrice est créée avec les valeurs du trusquin. Rappelons que le modèle photogrammétrique doit calculer une valeur qui doit être le plus proche du trusquin possible.

$$z = \begin{bmatrix} \text{Valeur du trusquin de la section 1} \\ \text{Valeur du trusquin de la section 2} \\ \dots \\ \text{Valeur du trusquin de la section 45} \end{bmatrix} \quad (\text{G.2})$$

Le but est donc de trouver une fonction qui, à partir des valeurs des différences, renvoie la valeur du trusquin. Cette fonction f_θ peut être trouvée grâce à l'ELM qui se base sur un système de nœuds et de poids sur les nœuds

$$f_\theta(w) = z \quad (\text{G.3})$$

Cette méthode nécessite une bonne base en informatique ou en mathématiques appliquées. (Pour plus d'informations, la littérature fournit beaucoup d'article sur les réseaux de neurones).

Annexe H

Fiabilité des mesures au trusquin

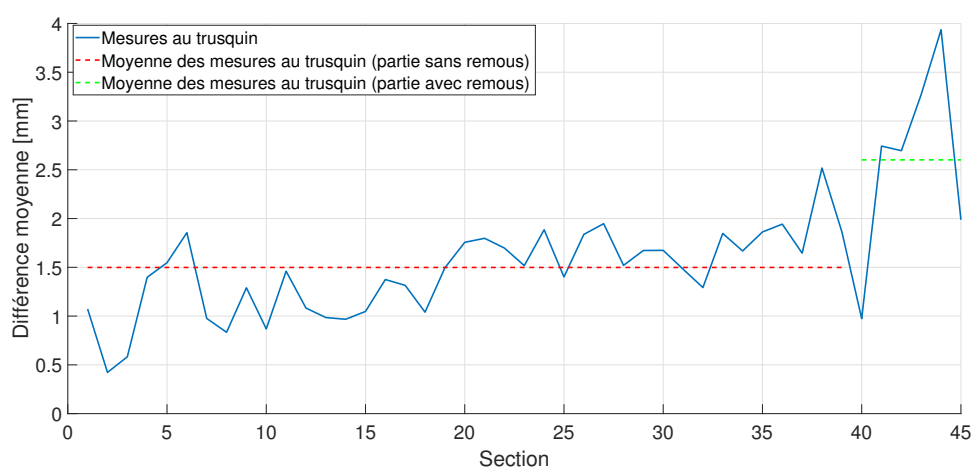


FIGURE H.1 – Graphique présentant les écarts moyennes de mesures par rapport à la moyenne des mesures pour un débit de 6 l/s.

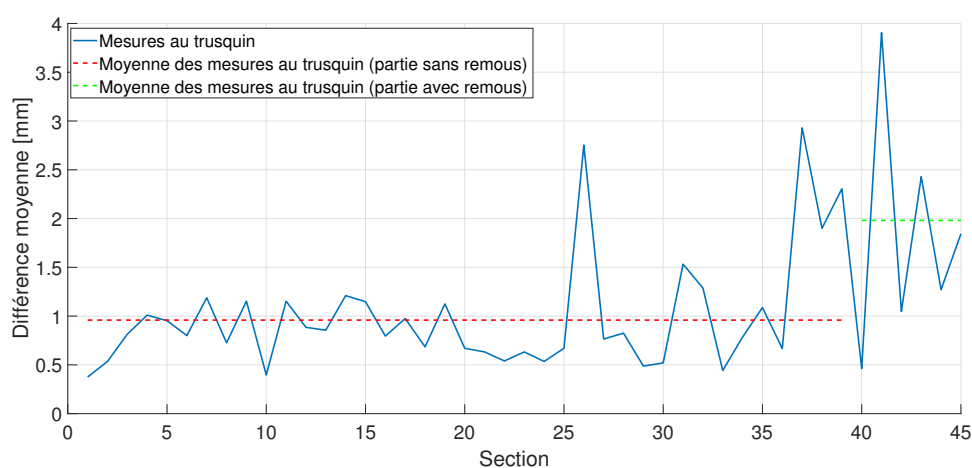


FIGURE H.2 – Graphique présentant les écarts moyennes de mesures par rapport à la moyenne des mesures pour un débit de 8 l/s.

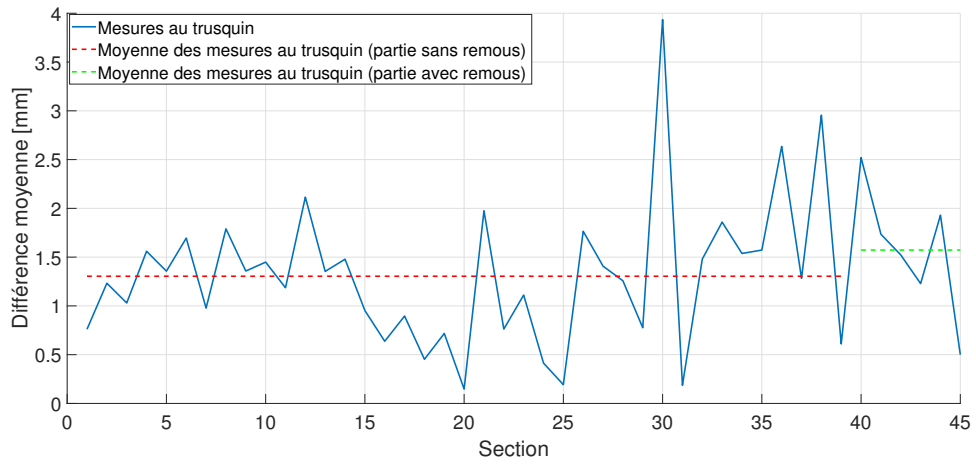


FIGURE H.3 – Graphique présentant les écarts moyennes de mesures par rapport à la moyenne des mesures pour un débit de 10 l/s.

