

Mesure de la surface libre d'écoulement en bathymétrie complexe par photogrammétrie

Travail de fin d'étude présenté par
Guilherme COUTINHO, Nils JANSSENS

pour l'obtention du grade de master en
Ingénieur civil des constructions

Promotrice
Sandra SOARES-FRAZÃO

Assistants
Olivier CARLIER, Fabian FRANZINI

Lecteurs
Charles BIELDERS, Didier BOUSMAR

Année Académique 2016-2017

Remerciements

Avant de commencer directement avec le vif du sujet, nous aimerions profiter de cette page pour remercier certaines personnes qui nous ont aidées à mener ce travail de bout en bout.

Nos premiers remerciements vont à notre promotrice Sandra Soares qui a, par sa disponibilité et son encadrement, pu nous aiguiller sur de bonnes pistes au fil des semaines.

Nous remercions également Fabian Franzini et Olivier Carlier pour leur grande disponibilité et leur suivi tout au long de ce travail. Un remerciement plus particulier à Ilaria Fent et Olivier Carlier d'avoir mis à notre disposition un espace dans leur bureau.

L'équipe du laboratoire de Génie Civil fut d'une grande efficacité lors de la construction du modèle réduit de la rivière ainsi que lors de l'installation des appareils de prise de mesures. Un merci tout particulier à Samuel et Stéphane pour leurs conseils avisés.

Nous souhaitons remercier Charles Bielders et Didier Bousmar d'avoir accepté de faire partie de notre jury et d'être lecteurs de notre travail de fin d'étude.

Pour le prêt de matériels photographiques, nous remercions Quentin Wijns, Michaël Gendebien ainsi que Martin Musyck sans qui l'acquisition des photographies aurait été une longue et laborieuse tâche. Pour le prêt d'un distomètre laser Keyence, nous remercions Didier Bousmar et le laboratoire du Service Public de Wallonie de Châtelet.

Finalement, nous nous remercions mutuellement pour la bonne entente et la belle complémentarité tout au long de ce travail d'équipe.



Résumé

La photogrammétrie est une technique établie de longue date mais la révolution digitale et la commercialisation de nouvelles technologies la propulsent encore plus vers l'avant. Elle se présente comme une solution économiquement efficace et non intrusive pour modéliser un objet, une scène en 3D à partir de photographies. La photogrammétrie est multidisciplinaire mais profite principalement aux domaines scientifiques. L'hydraulique n'en est pas exception et est une application qui se popularise de nos jours. En effet, la plupart des techniques traditionnelles qui mesurent le niveau de la surface libre d'un écoulement ne permettent pas de couvrir de grandes surfaces et peuvent être intrusives, perturbant ainsi l'écoulement.

Ce travail étudie la photogrammétrie comme outil de mesure dans un modèle réduit d'une rivière au laboratoire Génie Civil de l'Université Catholique de Louvain. L'étude se structure selon deux étapes importantes. L'objectif est de mettre en place un dispositif pour modéliser la bathymétrie du modèle réduit pour, ensuite, tester cette disposition dans la mesure de la surface libre d'écoulement permanent en essayant différentes méthodes et textures appliquées à l'eau.

Les résultats sont encourageants mais loin d'être parfaits. Des erreurs de l'ordre de quelques millimètres sont observées dans les modèles de la bathymétrie. La mesure de la surface de l'eau s'avère compliquée et chaque texture a ses avantages et ses inconvénients. Différentes méthodes de traitement de données sont envisagées pour contrecarrer l'imprécision des modèles issus de la photogrammétrie. Ce travail ouvre la voie pour des recherches plus approfondies en exposant les défauts et le potentiel des dispositifs et des textures utilisés.

Abstract

Photogrammetry is a well-established technique but the digital revolution and the launch of new technology catapults it to the front of the scene. It presents itself as an economically efficient and non-invasive solution to create a model of an object, a scene in 3D, using photographs. Photogrammetry is multidisciplinary but the scientific field benefits the most from it. Hydraulics is not an exception and is an application that is getting popular nowadays. Indeed, most of traditional techniques that measure the water surface level can't cover large areas and can be invasive, disrupting the flow.

This work studies photogrammetry as a measuring tool in a reduced model of a river in the "Genie Civil" laboratory at the UCL. The study is structured in two important steps. The objective is to set up a device that can model the bathymetry of the reduced model so that afterwards, the set up can be tested to measure the water surface by means of different textures and methods.

The results are encouraging but far from perfect. Errors of the order of a few millimeters are observed in the bathymetry models. The measuring of the water surface proves to be a complicated task and each texture has its own pros and cons. For the data processing, different methods are contemplated to counter the imprecision of the photogrammetry models. This work paves the way for future more advanced research, exposing the flaws and potential of the device and used textures.

Table des matières

Introduction	1
1 Etat de l'art	3
1.1 Évolution de la photogrammétrie	3
1.2 Domaines d'application	4
1.3 Conclusion	7
2 Description du modèle réduit	9
2.1 Canal préexistant	9
2.2 Concept	10
2.3 Réalisation des coffrages en bois	12
2.4 Pose du béton	13
2.5 Levage et couche de finition du modèle	15
3 Dispositifs	17
3.1 Logiciel de SfM : Photoscan Agisoft	17
3.2 Système d'axes	20
3.3 Dispositif d'acquisition de données	21
3.4 Protocole d'acquisition des photos	26
3.5 Alimentation du canal	27
4 Bathymétrie	29
4.1 Laser Keyence	29
4.2 Modèles Photoscan	30
4.3 Thalweg	36
4.4 Approximation de la pente du modèle réduit	36
4.5 Source d'erreurs	37
5 Mesure de la surface libre	39
5.1 Eau au repos	39
5.2 Eau en écoulement permanent	45
Recherches futures	59
Conclusion	61
Bibliographie	64

Table des figures	65
Annexe A Illustrations du modèle réduit d'une rivière à bathymétrie complexe	67
A.1 Construction du modèle réduit	67
A.2 Modèle réduit	68
Annexe B Instrumentation	69
B.1 Station totale topographique	69
B.2 Laser Keyence	69
B.3 Trusquin	70
B.4 Calcul de la pente du canal préexistant	71
Annexe C Bathymétrie	73
C.1 Modèles Photoscan	73
C.2 Différence entre thalweg laser et thalweg Photoscan	74
Annexe D Description du modèle numérique	75
Annexe E Résultats supplémentaires	77
E.1 Modèle Numérique d'Élévation	77
E.2 Illustration de la Méthode 2	78
Annexe F Logiciel Agisoft Photoscan	79
Annexe G Guide pour les futurs étudiants	81

Introduction

La science permet de nos jours de modéliser numériquement des phénomènes naturels afin d'en prédire leurs conséquences. Modéliser tout type d'écoulement dans tout type de topographie est un des grands défis de l'hydraulique fluviale. En effet, connaître le temps d'évacuation dont une population dispose avant que son village ne se fasse engloutir par la vague d'une rupture de barrage, ou bien connaître les zones susceptibles d'être inondées lors de grandes crues sont deux exemples parmi tant d'autres où la simulation numérique peut être utilisée pour minimiser les dégâts lors de catastrophes naturelles.

Afin d'évaluer la précision et la robustesse des modèles numériques, il est important d'avoir un grand nombre de données de terrain ou expérimentales. En effet, l'accès sur le terrain n'est pas toujours praticable. De plus, les techniques actuelles demandent, pour couvrir une large zone, une main-d'oeuvre importante et souvent trop coûteuse. L'utilisation de modèles réduits en laboratoire est une bonne solution car ceux-ci permettent de contrôler avec plus de précision tous les paramètres de l'écoulement et d'effectuer de nombreux essais avant de faire face à la réalité du terrain.

Ce travail de fin d'étude cherche à développer une technique d'acquisition de données et, plus particulièrement, comment mesurer la surface libre d'un écoulement en laboratoire. Actuellement, il existe déjà différents dispositifs mais la majorité d'entre eux ont le défaut d'être des appareils de mesure ponctuelle. Pour avoir un jeu de données suffisant à comparer avec les modèles numériques, il faut donc répéter plusieurs fois les mesures.

La technique explorée dans ce mémoire se base sur la photogrammétrie et est appelée "Structure from Motion". L'idée est de reconstituer un modèle 3D exact d'un objet à partir d'une série de photos de celui-ci. La photogrammétrie est déjà utilisée dans de nombreux domaines tels que la géologie, la cartographie, l'architecture, la médecine ou bien la cinématographie. Ce travail a pour objectif d'explorer cette technologie dans le domaine de l'hydraulique et d'en étudier ses limites.

Ce travail s'articule suivant cinq principaux chapitres.

Premièrement, un état de l'art reprend les principaux domaines d'application de la photogrammétrie et développe certaines recherches faites dans le domaine de l'hydraulique.

Le procédé de la construction du modèle réduit d'une rivière naturelle utilisée pour les expériences est décrit dans la seconde partie. Le modèle est pensé pour être polyvalent et modulable dans le futur.

La troisième partie de cet ouvrage décrit les divers dispositifs qui ont été mis en place pour l'acquisition des résultats. Le logiciel de photogrammétrie choisi ainsi que ses fonctionnalités sont présentées.

Le cœur du travail se situe dans les deux chapitres qui suivent.

Tout d'abord, les bathymétries du modèle expérimental obtenues à l'aide, d'une part, de modèles de photogrammétrie et, d'autre part, d'un laser ponctuel sont comparées. Le thalweg et une approximation de la pente du modèle en sont extraits.

Par après sont présentées les expériences pour mesurer la surface libre. Dans un premier temps, une série d'expériences avec de l'eau au repos sont menées pour ensuite, les tester sur un écoulement permanent établi dans le modèle réduit.

Des futures pistes de recherche permettant d'améliorer ce travail et de le compléter sont développées dans la dernière partie.

Chapitre 1

Etat de l'art

La photogrammétrie est définie comme "Ensemble des techniques qui permettent de déterminer la forme, les dimensions, la position dans l'espace d'un objet à partir de photographies".¹ Le principe est de reconstituer un modèle 3D exact d'une surface, comme un terrain ou un objet, à partir de photographies.

Ce premier chapitre a pour objectif, dans un premier temps, de définir la photogrammétrie et d'en préciser les grandes étapes d'évolution dans l'histoire. Dans un second temps, les principaux domaines d'application dans lesquels la photogrammétrie est utilisée sont présentés. Des recherches dans le domaine de l'hydraulique, notamment, pour mesurer la surface libre d'écoulement, sont explorées.

1.1 Évolution de la photogrammétrie

Bien que certains scientifiques de l'époque avaient déjà commencé des recherches sur ce que l'on appelle communément aujourd'hui la photogrammétrie, la littérature s'accorde pour dire que la création de cette technique est née à la moitié du 19e siècle après l'apparition de la photographie. L'évolution de la technologie et les progrès de la science durant le dernier siècle ont fortement contribué à sa progression.

Le développement de la photogrammétrie est généralement résumé selon quatre phases² :

- **Première génération de la photogrammétrie** [1850 - 1900]

Avec l'apparition de la photographie, l'intérêt d'utiliser des images pour mesurer la distance entre deux points a vu le jour. Le domaine militaire voit rapidement une grande utilité dans l'acquisition de données sur la topographie du terrain et pousse la recherche.

- **Photogrammétrie analogique** [1900 - 1960]

Deux principales découvertes sont à la base de la photogrammétrie analogique. Premièrement, la stéréorestitution³ est développée et son utilisation devient commune. La seconde avancée se fait dans le domaine de l'aviation. Les avions et les ballons dirigeables sont de plus en plus performants et la prise de photos aériennes est très bénéfique pour développer la photogrammétrie topographique.

1. [Dictionnaire Larousse, 2016]

2. [Schenk, 2005] et [Gosh, 1981]

3. Le principe de la stéréorestitution est de créer une perspective de relief à partir de deux images en 2D.

- **Photogrammétrie analytique** [1960 - 2010]

L'invention de l'ordinateur a littéralement poussé la photogrammétrie vers une nouvelle génération : la photogrammétrie analytique. En effet, la photogrammétrie analogique devenait limitée par le nombre d'algorithmes et leur temps de résolution. L'ordinateur a permis de développer de nouvelles méthodes à partir d'algorithmes mathématiques plus puissants.

Un autre type de photogrammétrie s'est développé durant cette période : "close-range photography" (CRP). Tandis que la photogrammétrie était principalement utilisée pour la cartographie/topographie, la CRP se concentre sur une photogrammétrie à faible portée et à haute précision.

- **Photogrammétrie digitale (Structure from Motion)** [2010 -]

Le domaine de la photogrammétrie est encore actuellement en pleine expansion. Les progrès au niveau de la puissance des ordinateurs ainsi que les recherches pour perfectionner les algorithmes mathématiques apportent une nouvelle génération de photogrammétrie. La démocratisation de l'appareil photo rend la photogrammétrie bon marché de nos jours et des logiciels complètement automatisés ont vu le jour. Avec l'apparition de l'imagerie satellite et l'utilisation de drones, de nouveaux défis voient le jour comme la modélisation de villes en 3D.

1.2 Domaines d'application

De nos jours, les domaines d'application de la photogrammétrie sont divers et variés.

Les applications les plus courantes se situent dans un contexte scientifique et la principale utilisation de la photogrammétrie est la mesure de topographie de terrains (cartographie). La photogrammétrie est également utilisée pour faire progresser la médecine. L'archéologie fait partie des sciences qui mettent beaucoup la photogrammétrie à profit. Enfin, un domaine d'application qui voit de plus en plus le jour est l'hydraulique.

D'autres domaines comme la cinématographie utilisent la photogrammétrie pour réaliser des effets spéciaux en générant des arrière-plans, par exemple, dans des films comme *Matrix* (1999) ou *Fight Club* (1999). La photogrammétrie est également présente dans le sport. En effet, [Chong et Croft, 2009] explorent cette technologie pour développer un système d'entraînement virtuel pour le rugby ainsi qu'une technique d'évaluation de la performance des joueurs.

L'analyse de scènes d'accidents sur la route bénéficie aussi de la photogrammétrie. Cette dernière est une alternative rapide et précise pour faire une reconstitution de la scène, facilitant le travail de la police.

1.2.1 Mesure de la topographie

La mesure de la topographie est l'application la plus populaire de la photogrammétrie aérienne. Elle se présente comme une méthode bon marché et efficace pour modéliser la topographie de terrains qui peuvent être parfois difficile d'accès.

[Lane *et al.*, 2000] évalue l'application de la photogrammétrie à l'analyse de la surface de formes naturelles complexes, ce qui est utile pour des spécialistes de la géomorphologie. Une étude de la qualité des Modèles Numériques d'Élévation (MNE) est faite en abordant les thématiques de la calibration de

l'appareil photo, la qualité de l'image, etc...

[Westoby *et al.*, 2012] fait une introduction à la "Structure from Motion" (SfM) et illustre les étapes à suivre pour créer un modèle 3D à partir de cette méthode. Les applications de la SfM à une gamme de paysages contrastés et de reliefs comme des falaises côtières et des crêtes rocheuses sont décrites. De plus, une évaluation de la qualité des modèles obtenus est effectuée en comparant les résultats de la SfM d'une falaise en Aberystwyth, Pays de Galles, avec un modèle haute résolution qui dérive de mesures faite par balayage laser à haute précision.

[Fonstad *et al.*, 2013] choisit d'étudier l'approche SfM à "Pedernales Falls State Park" au Texas, USA. Le résultat est une modélisation du lit majeur de la "Pedernales River" comparée au même modèle obtenu avec la télédétection par laser (LiDAR). La SfM donne des résultats comparables à la LiDAR mais est mise en avant car elle est plus facile et plus rapide à utiliser. Les défauts de la SfM sont discutés, tout comme la difficulté de traiter les éventuelles distorsions des images et de détecter la surface des zones inondées.

1.2.2 Médecine

Dans l'univers de la médecine, la photogrammétrie est surtout utilisée pour faire des mesures du corps humain. C'est une solution non intrusive, non douloureuse avec un large champ d'application dans cette science.

Faire des mesures précises du corps est un atout pour les médecins afin de mieux visualiser les changements du corps après une opération (exemple : les opérations plastiques qui sont de plus en plus fréquentes). Ces mesures permettent aussi d'effectuer un meilleur suivi de problèmes de dos comme la scoliose ou de maladies de la peau comme les ulcères, les mélanomes. Combinée avec des radiographies, la photogrammétrie permet aussi de visualiser l'intérieur du corps humain et d'étudier le mouvement d'implants [Mitchell et Newton, 2002].

Cette technologie est particulièrement utile dans la dentisterie où des informations précises sur la forme, l'apparence et la position des dents du patient sont d'une importance vitale pour des spécialistes comme les orthodontistes [Knyaz *et al.*, 2008].

[Belin *et al.*, 1995] utilise la "close-range photogrammetry" pour faire une carte topographique de la surface de la cornée. Les applications cliniques de ces mesures sont nombreuses. Elles permettent de mieux suivre des maladies comme la kératocône (perte de la sphéricité de la cornée qui résulte en une distorsion de la vision). Connaître la topographie précise de la cornée favorise la conception et la mise en place de lentilles de contact, les suivis d'opérations à la cornée et une meilleure évaluation de pertes de vues soudaines.

1.2.3 Archéologie

L'archéologie est une des applications classiques de la photogrammétrie. Cette dernière permet d'enregistrer des modèles 3D de sites archéologiques ou d'objets du patrimoine culturel, de faire des mesures de surfaces complexes dans des excavations, des sculptures...

[Guidi *et al.*, 2009] explore la possibilité de faire un modèle 3D du Forum de Pompéi. Le Forum a été modélisé entièrement, en faisant attention aux détails. La photogrammétrie aérienne a permis de

modéliser la forme générale de cette place et la "close-range photogrammetry" modélise les détails des colonnes, des façades, des voûtes, etc...

[Drap *et al.*, 2007] se concentre sur l'approche photogrammétrique pour étudier le site archéologique sous-marin de Pianosa. Les sites sous-marins sont bien conservés grâce à une faible luminosité, des températures basses et un faible taux d'oxygène mais leur accessibilité s'avère compliquée. La photogrammétrie se présente comme une solution pour accéder aux sites de façon virtuelle. Un des buts principaux de ce projet est la préservation digitale.

[Lerma *et al.*, 2010] se penche sur la construction d'un modèle 3D de "La Cova del Parpalló", une grotte faisant partie du patrimoine culturel de l'humanité de l'UNESCO depuis 1998. Dans ce site se trouve la plus grande collection d'art préhistorique d'Europe. La photogrammétrie permet de documenter efficacement un site aussi complexe.

1.2.4 Hydraulique

La photogrammétrie est de plus en plus utilisée dans le domaine de l'hydraulique. Elle permet d'étudier, par exemple, les risques d'inondations lors de grandes crues en connaissant la topographie du terrain, ou bien de quantifier l'érosion des berges d'une rivière en comparant les bathymétries avant et après une augmentation de débit. Des recherches de nouvelles techniques sont actuellement en cours afin de pousser la photogrammétrie de manière à pouvoir mesurer le niveau de la surface d'un cours d'eau.

[Javernick *et al.*, 2014] présente une technique pour étudier la topographie de rivières en tresses sur des kilomètres. La topographie des rivières en tresses est, en effet, un défi car ce type de rivière est composé de sédiments à haute mobilité et, par conséquent, leur topographie évolue rapidement. Obtenir des résultats régulièrement est important pour avoir une bonne vision des changements morphologiques de la rivière. Actuellement, l'acquisition de mesures sur une longue distance a un coût non négligeable. [Javernick *et al.*, 2014] démontre que la photogrammétrie combinée à d'autres méthodes offre de bons résultats concernant la topographie de rivières en tresses. Conformément à d'autres études photogrammétriques, les modèles de terrains fluviaux générés par photogrammétrie ont du mal à identifier le niveau de lits de rivières inondées et, donc, cette portion importante reste approximative. [Javernick *et al.*, 2014] utilise d'autres méthodes (comme LiDAR) pour obtenir la bathymétrie sur ces zones.

[Butler *et al.*, 2002] applique la photogrammétrie ("close-range photogrammetry") pour étudier la rugosité des lits de rivières et le transport des sédiments. Il décrit et développe un algorithme pour corriger et prendre en compte les erreurs dues à la réfraction à l'interface eau/air. Cet algorithme s'applique sur les modèles numériques d'élévation (MNE) générés par n'importe quel logiciel de photogrammétrie. Des tests ont été effectués avec un canal à sec et, ensuite, immergé. Malgré l'utilisation de l'algorithme, les différences entre les MNE "sec" et "immergé" n'étaient pas systématiques. [Butler *et al.*, 2002] pense qu'elles sont causées par la diminution de la lumière due à l'eau et non à un défaut de son algorithme. [Woodget *et al.*, 2015] explore le potentiel de la SfM dans cette problématique. Les erreurs des zones submergées sont comprises entre 0,016 [m] et 0,089 [m]. La mise en place d'une simple correction de réfraction permet de diminuer l'erreur, qui est donc comprise entre 0,008 [m] et 0,053 [m].

La photogrammétrie est également utilisée pour étudier l'érosion de l'eau sur le sol. Effectivement les dégâts sur les terres agricoles peuvent être impressionnants. [Prosdocimi *et al.*, 2017] analyse l'éro-

sion provenant d'une pluie torrentielle sur le sol d'une vigne à l'aide de la photogrammétrie car elle a l'avantage de détecter des changements de topographie à petite échelle. [Prosdocimi *et al.*, 2017] compare également des résultats photogrammétriques obtenus avec un smartphone et un appareil photo reflex et il en conclut que la précision des résultats est du même ordre de grandeur.

Un des problèmes récurrents de la photogrammétrie est la mesure de la surface de l'eau. [Ferreira *et al.*, 2017] décrit l'application de la SfM dans la mesure de la surface libre de l'eau en laboratoire pour quantifier l'hétérogénéité d'un écoulement influencé par la végétation submergée. Les expériences ont été effectuées dans un canal de 5,24 [m] de long et 0,92 [cm] de large. Deux tests sont faits à titre comparatif : avec et sans végétation dans le canal. Trois appareils photos prennent les photos et des graines artificielles flottantes (1 [mm] de diamètre) sont utilisées pour donner de la texture à l'eau et la rendre plus reconnaissable. Le logiciel choisi pour traiter les photos est PhotoModeler. [Ferreira *et al.*, 2017] suggère que des précisions de 1-2 [mm] peuvent être obtenues.

[Franzini *et al.*, 2016] a travaillé sur un sujet similaire. Son étude porte sur l'utilisation de la photogrammétrie pour déterminer la surface libre d'écoulements permanents. Ses recherches sont effectuées sur un modèle réduit de 12 [m] de long et 2 [m] de large. Afin d'améliorer la détection de la surface libre, un colorant est dispersé dans l'eau lui donnant un aspect bleuâtre. Les mesures obtenues avec ses modèles de photogrammétrie approximent bien le niveau d'eau pour les zones plus profondes de son canal. Une précision de plus ou moins 5 [mm] sur le niveau de la surface libre est obtenue. Par contre, [Franzini *et al.*, 2016] indique que le manque de texture et la transparence de l'eau faussent complètement ces résultats dans les zones peu profondes (moins de 3 [mm]).

[Han et Endreny, 2014] appliquent la "close-range photogrammetry" pour mesurer la surface de l'eau à une échelle de l'ordre du sous-millimètre. Les expériences se déroulent sur un modèle d'une rivière mobile de 3,66 [m] de long et 1,83 [m] de large. L'importance d'avoir une surface opaque ou à réflexion non spéculaire et texturée est accentuée. Pour respecter ces conditions de la poudre de cire est mise sur la surface de l'eau. Deux appareils photo sont disposés à 1,3 [m] au-dessus de l'eau et six paires de photos sont prises pour générer le MNE, en pivotant les appareils de façon à avoir un recouvrement à plus de 80 %. Les résultats sont prometteurs avec une précision inférieure à 1 [mm]. Cette technique a seulement été testée dans des écoulements sous-critiques et à turbulence transitionnelle. De plus, l'importance d'avoir des appareils photos stables et une bonne luminosité est abordée.

1.3 Conclusion

Depuis son invention, la photogrammétrie a subi de nombreuses mutations. Les progrès de la science, le développement et la commercialisation de nouvelles technologies ont permis de la perfectionner et de diversifier ses domaines d'applications. Alors qu'il y a un siècle, la photogrammétrie était principalement utilisée pour la cartographie, à présent, elle est multi-disciplinaire.

Concernant le domaine de l'hydraulique, la photogrammétrie est un outil récent pour déterminer la bathymétrie des cours d'eau et aucun procédé ne semble, à l'heure actuelle, faire l'unanimité. La difficulté liée à la transparence de l'eau pour mesurer avec exactitude le niveau de la surface libre de cours d'eau est un grand défi pour la photogrammétrie. De nouvelles astuces et méthodologies voient le jour chacune avec leurs avantages et leurs inconvénients.

La littérature scientifique voit dans la photogrammétrie un moyen d'acquérir rapidement un grand

nombre de données sans déployer un dispositif gigantesque et onéreux. Les spécialistes sont tous d'accord : la photogrammétrie a un potentiel incontournable et la recherche poussée de cette technologie mérite une attention particulière.

Chapitre 2

Description du modèle réduit

Après avoir exposé la littérature sur le sujet de la photogrammétrie, ce chapitre a pour objectif de décrire le modèle réduit qui a été utilisé lors des phases d'essais.

La construction du modèle réduit d'une rivière à partir d'un canal préexistant est présentée dans le but que dans le futur, le canal puisse être modifié suivant la même approche.

2.1 Canal préexistant

Un canal expérimental se situant dans le laboratoire de Génie Civil de l'UCL a été mis à disposition pour la partie expérimentale de ce travail. Ce canal a été fabriqué en 1998 dans le cadre d'un travail de fin d'étude et l'instrumentation a été améliorée par la suite. Toutes les informations sur le canal sont décrites dans le mode d'emploi rédigé par [Bousmar et Fraselle, 2004]. Les principales informations sont reprises ci-dessous.

Le canal a une longueur utile de 10 [m] et une largeur de 1,2 [m]. Deux circuits permettent son alimentation en eau : un circuit dit "ouvert" et un circuit dit "fermé". Le circuit ouvert porte ce nom car il est relié à la fosse principale du laboratoire d'où d'autres dispositifs hydrauliques puisent leur source. Le second circuit permet de travailler sur un circuit autonome équipé d'un bassin de décantation offrant la possibilité d'étudier des écoulements chargés en sédiments, sans polluer la fosse principale.

Le canal dispose d'un système de trois compartiments à l'amont chacun alimenté par une vanne indépendante offrant la possibilité de remplir le canal suivant trois zones distinctes. A l'aval une vanne clapet permet de fixer le niveau d'eau aval. Le débit maximum de la pompe est de 30 [$\frac{l}{s}$]. En ce qui concerne la pente du canal, deux vérins hydrauliques sont situés à l'amont pouvant être actionnés pour modifier l'inclinaison générale du canal.

Durant l'année académique 2015-2016, [Depiereux et Godts, 2016] ont travaillé avec le canal et l'ont restauré. Malgré ces travaux, il reste encore quelques petites fuites dans les parois du canal mais elles sont minimales comparées à la quantité d'eau circulant dans le canal et elles ne sont pas dérangeantes pour les machines avoisinantes.

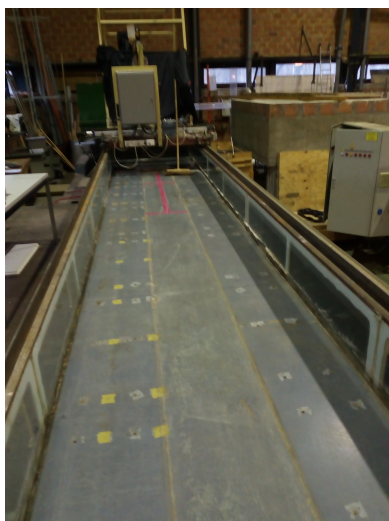


FIGURE 2.1 – Canal préexistant

2.2 Concept

La première étape de ce travail était de construire un modèle réduit d'une rivière en laboratoire afin de réaliser les expériences. Voulant pousser les modèles numériques de calculs et la photogrammétrie dans leur retranchement, l'idée n'était en aucun cas la création d'un canal rectiligne à surface lisse. L'idée était de s'éloigner du simple canal artificiel et de se rapprocher le plus possible d'une rivière réelle à topographie complexe.

La meilleure façon pour se rapprocher d'une topographie complexe est de partir d'une existante. Le département de Génie Civil de l'UCL possédant de nombreuses données sur la rivière Cavaillon en Haïti suite à des projets effectués en collaboration avec l'Université d'état d'Haïti, le choix de modéliser une partie de cette rivière a été fait.

Un nombre fini de sections (49) ont été extraites comme support pour la réalisation du modèle. Ces sections ont été mises à l'échelle du canal préexistant (25 cm de hauteur et 1,2 m de largeur) et espacées tous les 20 cm. L'axe Z correspondant à l'altitude a été étiré afin d'avoir une variation du fond du modèle prononcée. Une section et le modèle sont illustrés aux figures [2.2] et [2.3].

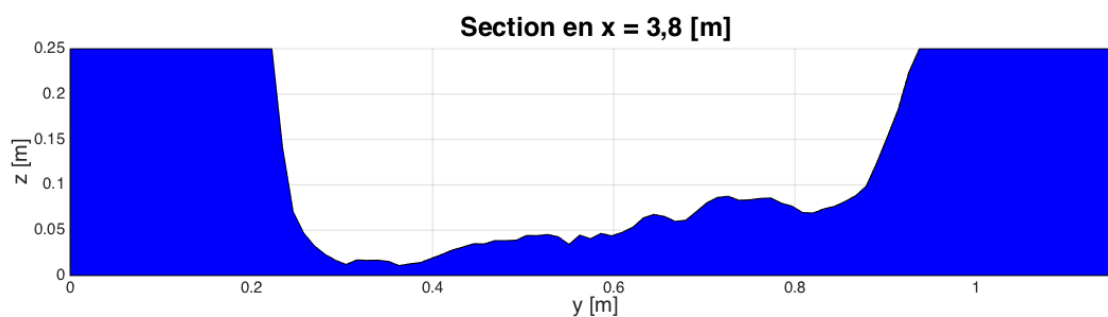


FIGURE 2.2 – Dessin d'une section

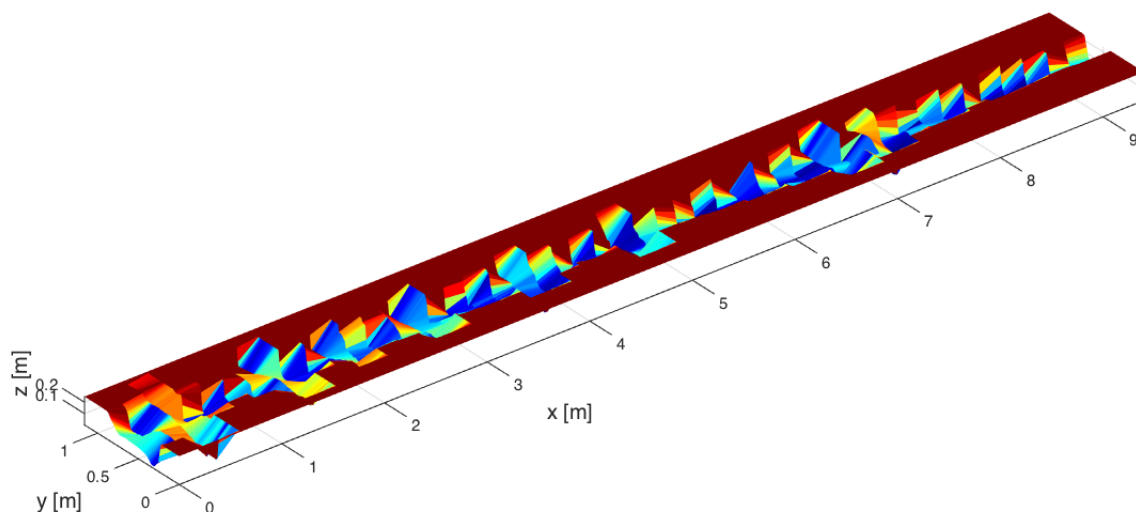


FIGURE 2.3 – Vue 3D de la rivière (49 sections espacées de 20 cm)

Concernant le matériau utilisé pour réaliser le modèle, plusieurs contraintes ont dû être prises en compte : la rugosité, le poids, la maniabilité, le prix, la main d'oeuvre, le temps,...

Deux versions ont été imaginées. La première version était de réaliser la rivière en mousse synthétique recouverte de fibre de verre. Le gros avantage de cette technique était une découpe très précise de la mousse suivant le profil souhaité. Par contre, la rugosité du modèle semblait trop faible et cette approche s'avérait beaucoup trop onéreuse.

La deuxième option, celle qui a été retenue, fut de réaliser le modèle en béton léger recouvert d'une couche de finition en ciment. La rivière devant être placée dans le canal préexistant, le choix de diviser la rivière en plusieurs modules a été pris, principalement, pour deux raisons :

- Le canal préexistant est un canal de laboratoire devant servir pour encore d'autres projets. En aucun cas, couler le béton directement à l'intérieur ne pouvait être envisagé. Il fallait donc une solution pour pouvoir enlever aisément la rivière en temps voulu.
- D'autre part, la liberté de modifier une partie du canal en enlevant, par exemple, deux modules et en les remplaçant par deux nouveaux offrait une polyvalence au canal qu'il n'avait pas s'il était en un seul morceau.

C'est ainsi qu'est née la solution de créer des coffrages en bois prenant le rôle de "squelette" du modèle et d'utiliser un béton malléable pour remplir les intersections.

2.3 Réalisation des coffrages en bois

La première étape fut le découpage des 49 sections en bois qui allaient donner la forme au modèle. Le traçage de la forme sur le bois est suivi d'un découpage à la scie sauteuse (voir figure [2.4]).



FIGURE 2.4 – Découpage des sections avec une scie sauteuse

Après avoir découpé toutes les sections et les avoir déposées au sol pour avoir une vue d'ensemble de la rivière, un manque de fluidité dans le modèle pouvait apparaître car certaines sections adjacentes différaient fortement, ceci compromettant la pose du béton et rendant la création de la forme de la rivière difficile. C'est pourquoi, une réorganisation des sections fut opérée afin d'avoir une rivière plus continue (malheureusement ce choix nous écartait de la rivière Cavaillon). Le modèle est ainsi passé à 45 sections. Certaines sections ont été mises de côté car elles différaient trop des autres. Une illustration des sections réorganisées se trouve à l'annexe A.1.

Le modèle a été divisé en 11 blocs de 80 [cm] de long et 118 [cm] de large ce qui assure qu'il pouvait être posé entre les bords du canal préexistant qui sont espacés de 120 [cm]. Le premier bloc est composé de cinq sections et a été coffré indépendamment des autres [2.5]. Les blocs suivants ont quatre sections et ont été à chaque fois coffrés en utilisant le bloc qui précède. Ce système permet de minimiser la quantité de bois utilisé.

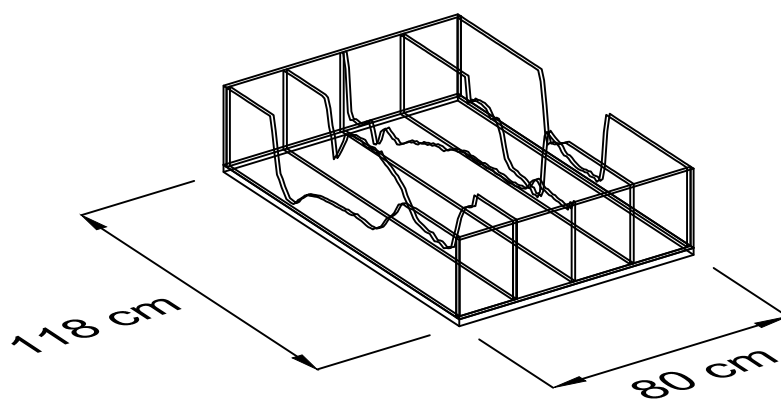


FIGURE 2.5 – Représentation 3D d'un module

Le bois qui a été utilisé pour les coffrages est du contreplaqué revêtu d'un film phénolique le rendant imperméable. Le coffrage est donc plus résistant aux poussées du béton et protégé de l'eau. Les panneaux verticaux ont une épaisseur de 15 [mm] et les panneaux horizontaux ont une épaisseur de 22 [mm] pour résister à la flexion lors des déplacements des blocs. Les sections, subissant des poussées des deux côtés, peuvent avoir une épaisseur inférieure donc de 12 [mm].

Un autre défi fut de trouver un moyen de fortifier les modules sachant qu'ils devaient pouvoir résister à leur propre poids lors de l'opération de levage. Pour cela, avant de couler le béton, des armatures longitudinales de 12 [mm] de diamètre ont été glissées dans les coffrages. Pour effectuer le levage, un système compatible avec les ponts de levage du laboratoire était essentiel. Pour satisfaire à cette problématique, des douilles de levage ont été insérées dans le béton, dans les quatre coins de chaque bloc. Ces douilles ont été ancrées dans le béton par l'intermédiaire d'un étrier qui, lui-même, est soudé aux armatures longitudinales (voir figure [2.6]).

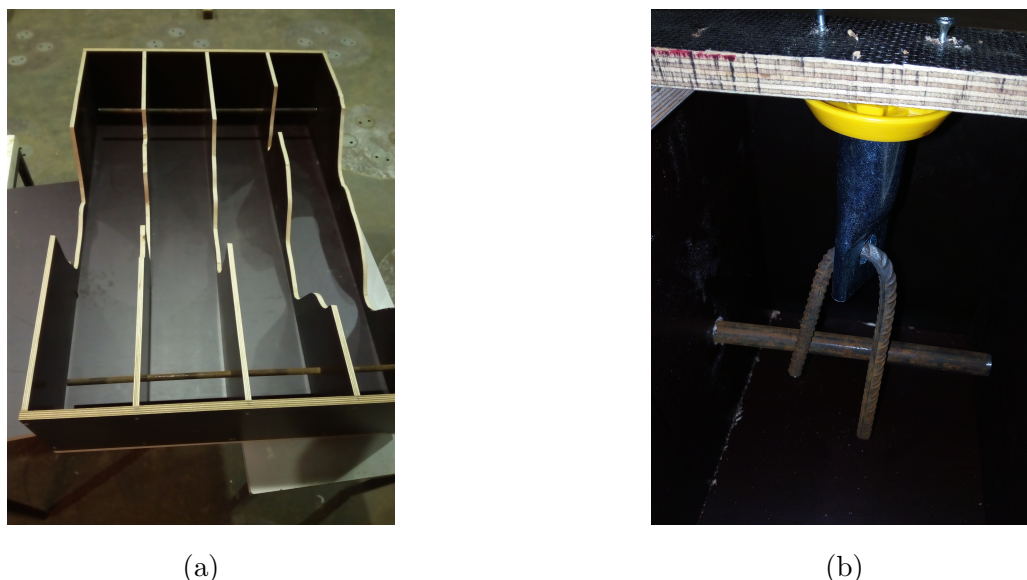


FIGURE 2.6 – (a) Exemple d'un module de coffrage avec armatures longitudinales (b) Détail de l'armature longitudinale avec la douille de levage et son étrier

2.4 Pose du béton

La pose du béton fut l'étape cruciale.

Tout d'abord, il fallait trouver un type de béton à la fois léger pour minimiser les efforts dus à la flexion, et malléable pour qu'il puisse épouser la forme des sections. La solution qui s'est présentée était de faire un mélange d'eau, de ciment, de sable et de billes d'argex. Ce dernier ayant une masse volumique faible permettait de diminuer le poids du béton. Après plusieurs essais de mélanges différents, le béton avec les caractéristiques recherchées a été obtenu. Le tableau [2.1] ci-dessous reprend les proportions des différents composants.

Composition	Masse volumique [$\frac{kg}{m^3}$]	Quantité [kg]
Argex 8/16	550	14
Ciment CEM II/B-M 32,5	2800	7
Sable du Rhin 0.5	1800	4
Eau	1000	4

TABLE 2.1 – Dosage du béton



FIGURE 2.7 – Pose du béton

2.5 Levage et couche de finition du modèle



FIGURE 2.8 – Levage d'un bloc

Une fois le béton sec, les modules étaient prêts à être transportés. L'opération de levage était possible par l'intermédiaire du pont du laboratoire comme illustré à la figure [2.8]. Chaque module pèse environ 150 [kg], il est donc possible d'ajuster manuellement les modules les uns à côté des autres afin de recréer le modèle dans son entièreté dans le canal préexistant.

La dernière étape était d'agréger les 11 modules ensemble et de rendre la surface continue. En effet, les billes d'argex faisant entre 8 et 16 [mm] rendait la surface du béton très rugueuse (voir figure [2.7]). La solution pour répondre à ces deux problématiques fut de placer une couche de finition. Celle-ci est composée de sable du Rhin, d'eau, de ciment et d'une résine liquide étanche. Pour chaque volume de ciment, 3 volumes de sable ont été ajoutés. Cette couche de surface a donc un triple rôle :

- Apporter une continuité au modèle. Les 11 modules sont reliés ensemble par cette couche.
- Garantir une rugosité proche de celle d'une rivière naturelle.
- Rendre le modèle étanche.

Une fois la couche de finition sèche, les premiers tests de mise sous eau ont eu lieu. Quelques semaines après, des fissures de retrait ont été observées sur la couche de finition mais n'affectant pas le bon fonctionnement du modèle.



FIGURE 2.9 – Modèle final

Chapitre 3

Dispositifs

Une fois le modèle réduit de la rivière présenté et l'état de l'art parcouru, cette troisième partie a pour objectif de présenter les différents dispositifs qui ont été utilisés et mis en place dans le but d'obtenir des résultats expérimentaux cohérents. Ce chapitre a aussi pour but de justifier et d'éclairer le lecteur sur les décisions qui ont été prises au sujet de ces dispositifs.

Premièrement, le logiciel de photogrammétrie utilisé pour le traitement d'images est présenté, puis le système d'axes utilisé dans les chapitres suivants est illustré. Ensuite, les dispositifs concernant l'acquisition de données sont passés en revue. L'instrumentation à savoir les appareils photos ainsi que les dispositifs permettant une reproductibilité des expériences sont présentés. Par après, le protocole pour l'acquisition des photos est développé. Enfin, la variation de l'alimentation du canal est discutée.

3.1 Logiciel de SfM : Photoscan Agisoft

Il existe différents logiciels sur le marché pour traiter la photogrammétrie, chacun ayant ses avantages et ses inconvénients. Le choix d'un logiciel plutôt qu'un autre dépend des moyens et des exigences de l'utilisateur. Les principaux facteurs dans le choix d'un logiciel sont : le budget, la qualité attendue, le type de photogrammétrie, la facilité de prise en main du logiciel, le système d'exploitation recommandé par le logiciel et la transparence sur le type d'algorithmes implémentés dans celui-ci.

Parmi les logiciels professionnels, Agisoft Photoscan, pour ne citer que celui-là, fait partie des leaders dans le domaine. Ce logiciel a vu le jour en 2010 par le développeur Agisoft LLC basé en Russie. Ayant une petite dizaine d'années, une communauté d'utilisateurs s'est créée autour du logiciel rendant la quantité d'informations plus importante. Contrairement à des logiciels open source, son interface intuitive facilite la prise en main par l'utilisateur. Bien que ce logiciel apparaît plutôt comme un pilier du traitement de photogrammétrie aérienne, il reste compétitif pour des modélisations à plus petite échelle [Agisoft, 2016b]. Comme souvent avec les logiciels commercialisés, il est difficile de trouver de l'information sur les processus qui y sont implémentés et l'utilisateur utilise le logiciel comme une boîte noire.

L'UCL possédant une licence de ce logiciel, les résultats présentés dans les chapitres suivants ont donc été obtenus à partir de Photoscan.

Cette section n'a pas la prétention, ni l'objectif d'exposer en long et en large toutes les possibilités qu'offre le logiciel Photoscan ainsi que les différents algorithmes implémentés mais plutôt de présenter

les grandes fonctionnalités qui ont été exploitées lors de ce travail et de familiariser le lecteur à un certain vocabulaire pour la bonne compréhension de la suite du travail.

3.1.1 Principe - Procédure

Généralement, l'objectif de tout utilisateur du logiciel Photoscan est d'obtenir un modèle 3D de l'objet, du paysage, du personnage, de la pièce archéologique qu'il veut étudier. Dans ce sens, le manuel [Agisoft, 2016b] présente une procédure reprenant les grandes étapes pour le traitement d'images :

1. La première étape consiste à importer les images et à supprimer les images floues ou en doublon. A ce stade, une option du logiciel propose d'estimer la qualité des images. Cela donne un bon indicateur sur les images à garder. Ensuite, les images sont triées par point de vue pour faciliter l'application des masques (voir section 3.1.3).
2. La seconde étape est appelée "l'alignement des photos". "Aligner les photos" signifie que le logiciel parcourt toutes les photos à la recherche de points communs à plusieurs photos. Ceci a pour but d'estimer la localisation des caméras dans l'espace pour chaque image et la création de **points de liaison**. Comme illustré à la figure [3.1], les points de liaison forment un modèle grossier du sujet étudié. A la fin de cette étape, il est possible de détecter et d'encoder les points de référence (voir section 3.1.2).
3. La troisième étape est la construction d'un **nuage de points** basée sur les photos et la position des caméras. Cette étape est la plus coûteuse en temps car les points de liaison sont affinés donnant un nuage s'approchant le plus de la réalité du sujet. Trois modes de précision (haute - moyenne - faible) peuvent être choisis par l'utilisateur, augmentant le nombre de points du nuage mais aussi le temps de calcul.
4. La quatrième étape consiste en la construction de **maillages** reliant les points de liaison ou les points du nuage de points. Ils offrent une continuité dans les modèles.
5. La dernière étape est la création d'une **orthophoto** ou d'un **modèle numérique d'élévation** (MNE) à partir des points de liaison, du nuage de points ou du maillage. Afin de gagner du temps, il est à noter que créer un MNE à partir des points de liaison permet de passer les étapes trois et quatre. La précision d'un MNE à partir des points de liaison ou du nuage de points est discutée dans le chapitre 4. Cette étape permet d'extraire un document au format Tiff dont la région et la discrétisation transversale et longitudinale sont choisies. Pour les expériences qui suivent, une discrétisation tous les millimètres a été utilisée. Le fichier .tiff est exploitable via un code Matlab.

Comme expliqué ci-dessus, plusieurs étapes sont requises entre le moment où les images sont importées dans le logiciel et la création d'un MNE. L'utilisateur a la possibilité de faire tourner un script Python rassemblant ces différentes étapes. Le script automatise le processus. Une bibliothèque [Agisoft, 2016a] regroupant toutes les fonctions est à disposition des utilisateurs. Un script utilisé pour ce travail est présenté à l'annexe F.

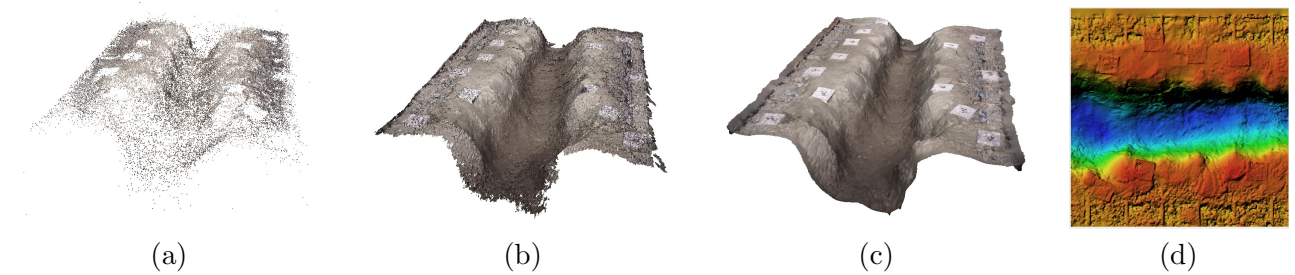


FIGURE 3.1 – (a) Points de liaison (b) Nuage de points (c) Maillage (d) MNE

3.1.2 Points de Références

Dans le but d'améliorer la reconnaissance des zones communes entre les photos, il est conseillé de placer des points de références (aussi appelés marqueurs) sur le sujet avant de le prendre en photo. Une fois la première étape réalisée et les points de liaison trouvés, il est possible d'encoder les points de références.

Il y a deux sortes de marqueurs : ceux qui sont reconnus automatiquement par le logiciel (voir figure [3.2]) et les marqueurs dits manuels (ceux que l'utilisateur crée lui-même sur une zone en évidence). La première catégorie permet un gain de temps et une augmentation de la précision non négligeable car le logiciel détecte lui-même les cibles et les numérote contrairement à la seconde catégorie où tout est réalisé manuellement.

Afin de placer l'élément étudié dans un repère d'axe et de lui donner des dimensions, il est possible d'encoder les coordonnées des points de références dans le logiciel. Après avoir encodé les coordonnées des points de références, le logiciel donne une idée de la précision du modèle par rapport aux points de références.

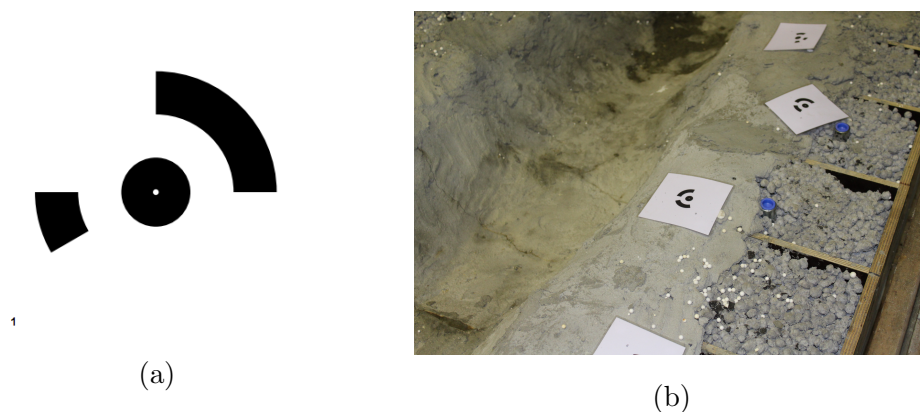


FIGURE 3.2 – (a) Exemple d'un marqueur 12 bit avec une cible de 10 [mm] (b) Marqueur fixé sur les rives du modèle réduit

Soixante-six marqueurs ont été placés sur les rives du modèle réduit tous les 25 [cm] environ visant à avoir minimum 6 marqueurs visibles sur chaque image. Il est important de noter qu'il faut éviter que les points de références soient immergés lors de la mise en charge du canal et il est conseillé qu'ils ne

soient pas alignés. L'utilisation d'une station totale (annexe B.1) a permis d'obtenir les coordonnées spatiales des marqueurs et de fixer un repère d'axe sur le canal (voir section 3.2).

3.1.3 Masque

La fonction Masque permet de sélectionner une partie de la photo que le logiciel va traiter en ne se préoccupant pas du reste. Cette option focalise le logiciel sur une zone définie par l'utilisateur et néglige les zones extérieures comme illustré sur la figure [3.3]. Pour un même point de vue, le masque étant enregistré, il peut être réutilisé. Par contre, il va de soi que, pour chaque nouveau point de vue, un nouveau masque doit être créé manuellement. Cette étape est répétitive et laborieuse mais cruciale afin que le logiciel néglige les zones hors-canal.

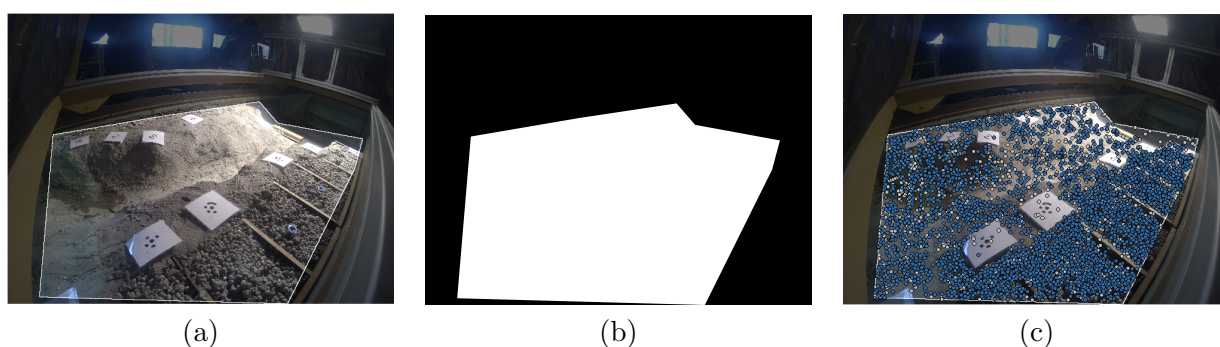


FIGURE 3.3 – (a) Création du masque sur Photoscan (b) Masque brut (c) Création du nuage de points dans le masque

3.2 Système d'axes

Le référentiel du canal a été fixé comme illustré à la figure [3.4] où la pente est fortement exagérée pour mieux visualiser la situation :

- L'axe X longitudinal : l'origine $x = 0$ [m] est fixée à l'amont, et la fin du canal se situe en $x = 8.8$ [m].
- L'axe Y transversal : l'origine $y = 0$ [m] est fixée à l'extrémité de la rive droite.
- L'axe Z vertical : l'origine $z = 0$ [m] est fixée à l'aval du canal en $x = 8.8$ [m] afin que toutes les coordonnées verticales soient positives.

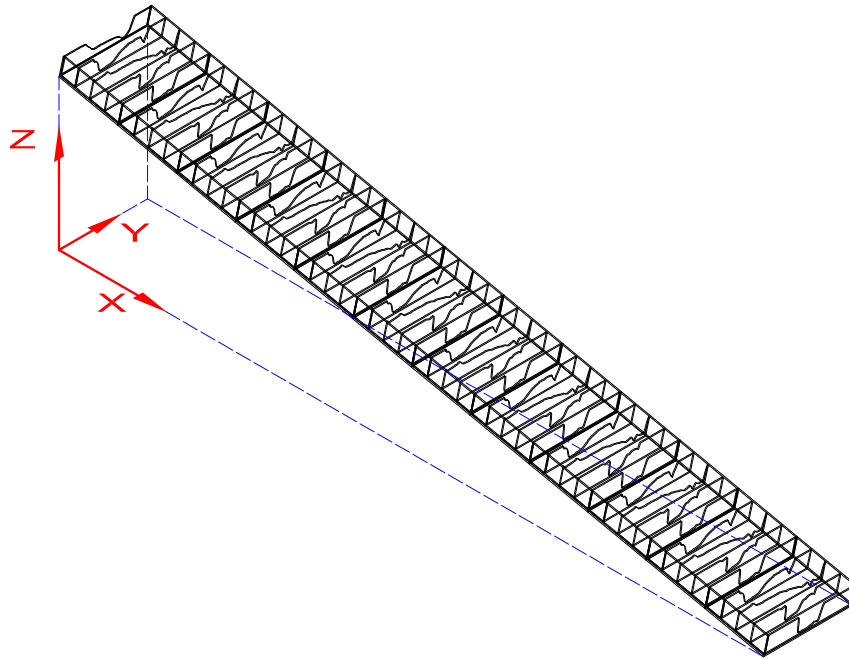


FIGURE 3.4 – Système d'axes

3.3 Dispositif d'acquisition de données

Cette section a pour but de présenter les dispositifs d'acquisition de données et le raisonnement derrière les choix effectués à leur sujet.

3.3.1 Structures mobiles

Le canal préexistant où le modèle réduit de la rivière a été placé possède un système de rails situé aux extrémités supérieures de ces rives comme illustré en annexe A.2. Sur ces rails, deux structures mobiles ont été placées facilitant les prises de mesures et de photographies. En effet, ces structures peuvent être déplacées manuellement le long de l'axe du canal.

Chariot de prise de vue

La première structure est un chariot de prise de vue facilitant la capture d'imagerie. [Micheletti *et al.*, 2015b] met l'accent sur l'importance d'une luminosité diffuse évitant les zones de sur-expositions. Dans ce sens, le chariot est équipé d'un drap opaque et d'un spot lumineux. Ce dispositif permet de capturer des images avec une luminosité constante, indépendamment de la lumière naturelle ou de toute autre source de pollution lumineuse. De plus, afin de pouvoir couvrir tous les angles de vue recherchés, des profilés métalliques ont été assemblés, aménageant ainsi un espace suffisant pour venir y fixer des caméras.



FIGURE 3.5 – (a) Chariot de prise de vue (b) Chambre noire

Automate de mesure

La seconde structure roulante est un automate qui offre la possibilité d'y installer des instruments de mesures pilotés automatiquement selon l'axe transversal du canal par le logiciel HydroCap¹. Malheureusement, le déplacement longitudinal n'est pas automatisé et reste donc manuel. Deux instruments de mesure ont été installés sur l'automate dans le cadre de ce travail : un laser Keyence et une pointe de trusquin. Plus d'informations concernant ces instruments se trouvent aux annexes B.2 et B.3.

Correction des résultats de l'automate et calcul de la pente du canal préexistant

Les rails sur lesquels l'automate de mesure se déplace ne sont pas horizontaux. En effet, ils suivent la pente du canal préexistant. Les mesures prises par l'automate doivent donc être corrigées pour être traitées dans le référentiel présenté à la section 3.1.2. En plus de ne pas être horizontaux, les rails ne sont pas parfaitement rectilignes ce qui engrange des erreurs dans les mesures. Le manuel détaillé de [Bousmar et Fraselle, 2004] explique la démarche à suivre pour réaliser une matrice de correction prenant en compte la pente du canal et les déformations des rails.

La méthode pour obtenir cette matrice de correction consiste à sceller l'aval du canal et de le remplir avec un certain niveau afin d'obtenir un plan d'eau au repos. Ce plan d'eau offre une référence parfaitement horizontale. La pente du canal et les déformations dues aux rails sont alors obtenues en mesurant (par exemple, à l'aide du trusquin) la distance de la surface de l'eau à un point de référence (par exemple en $x=8.8$ [m] et $y=0.6$ [m]) pour plusieurs points le long du canal (tous les 50 [cm]). En effet, cette variation de hauteur d'eau correspond à la pente et aux irrégularités des rails. Idéalement, afin de prendre en compte les déformations transversales (selon l'axe Y), il faut répéter l'opération en décalant l'automate transversalement. La pente du canal est alors égale à la pente de la régression linéaire autour de ces points.

Cette méthode a été utilisée afin de pouvoir corriger les mesures obtenues avec l'automate. Malheureusement, un seul jeu de mesures longitudinales (en $y=0.6$ [m]) a pu être obtenu car il était impossible d'obtenir un plan d'eau au repos sur toute la largeur du canal sans le faire déborder. Pour avoir une

1. HydroCap est un programme implémenté par le laboratoire de Génie Civil. Il est conçu pour réaliser plusieurs mesures simultanément. [Bousmar et Fraselle, 2004]

idée de l'ordre de grandeur du défaut du rail transversalement, la matrice de correction de [Bousmar et Fraselle, 2004] a été parcourue et l'amplitude transversale maximale est de 2 [mm]. Le graphe reprenant les points de mesure ainsi que la régression linéaire se trouve à l'annexe B.4. La pente calculée du canal préexistant n'a pas été modifiée et vaut :

$$S_i = -0.02 \%$$

Il est à noter que sceller l'aval du canal n'est pas facile et que de légères fuites étaient présentes durant le calcul de la pente faussant donc légèrement le résultat.

3.3.2 Appareil photo

L'appareil photo est au cœur de la photogrammétrie. Les images qu'il capture sont la matière première du logiciel. La qualité des modèles obtenus par photogrammétrie est directement liée à la qualité des images. Cette section a pour but d'expliquer les choix qui ont été faits concernant le type d'appareil photo, les angles de vues mais aussi le procédé d'acquisition d'images.

Choix de l'appareil photo

La question à se poser lors du choix de l'appareil photo à utiliser est :
"Quelles sont les exigences auxquelles mon appareil photo devra répondre ?"

[Agisoft, 2016b] préconise une caméra ayant au minimum 5 MPix, en privilégiant les caméras avec une lentille fixe (sinon de fixer le zoom à un de ses extremums), en étant attentif à bien calibrer sur le logiciel votre caméra si elle est équipée d'une lentille grand angle, et en évitant les temps de capture de l'image trop longs pouvant en affecter la netteté. Ces exigences sont, de nos jours, devenues banales et la plupart des smartphones sont même équipés de ce type de caméra rendant la photogrammétrie très accessible. D'autres paramètres qui ne sont pas des paramètres de performances pures sont à prendre en compte. La légèreté et les dimensions de l'appareil photo vont avoir un impact direct sur sa maniabilité qui, dans le cas d'un travail expérimental, n'est pas négligeable. Les différents modes de capture d'image (tel que le "time lapse", retardateur, "burst mode", etc.) qui sont déjà implémentés dans l'appareil photo sont aussi des paramètres à prendre en compte.

Quatre appareils photos ont été sélectionnés parmi ceux mis à notre disposition : la Go Pro Hero 3, la Go Pro Hero 4 Silver, le Canon EOS 1300D et l'Iphone 5S.

Type de caméra	Pixels [MPix]	Longueur focale [mm]	Dimensions [mm]
Go Pro Hero 3	12	2.77	59x40x27
Go Pro Hero 4 silver	12	2.98	59x41x30
Canon EOS 1300D	18	18-55	129x101.3x77.6
Iphone 5S	8	4.15	124x58.6x7.6

TABLE 3.1 – Fiche technique des appareils photo

Les quatre appareils ont été testés et la gamme de précision des modèles Photoscan est du même ordre de grandeur ([Prosdocimi *et al.*, 2017] présente des résultats similaires à partir d'un smartphone et d'un Reflex). Le choix s'est rapidement tourné vers l'aspect plutôt pratique de chacun des appareils et les Go Pro se sont illustrées grâce à leur légèreté et maniabilité. En effet, elles offrent une grande

facilité de manipulation (les changements d'angle de vue sont plus rapides). De plus, elles possèdent un mode "time lapse" qui simplifie le dispositif à mettre en place. Par contre, elles sont équipées d'une lentille grand angle qui peut amener une courbure de champ dont il faut être vigilant. Le grand angle permet de capturer un champ de vue plus vaste qu'un appareil photo normal. Ceci augmente la surface couverte par photo, diminuant le nombre de photographies à prendre pour couvrir la même surface qu'avec un appareil sans lentille grand angle. [Matthews, 2008]

Choix des angles de vue

Il va de soi qu'une zone du modèle qui ne se trouve sur aucune photo, ne peut être modélisée par le logiciel Photoscan. Le choix du nombre de prises de vue, leur angle par rapport à l'horizontale, leur distance par rapport au modèle sont des paramètres non négligeables à l'obtention d'un modèle Photoscan de qualité.

[Agisoft, 2016b] conseille dans son manuel de maximiser le nombre de points de vue afin de minimiser les angles morts et d'éviter des trous dans le modèle. [Micheletti *et al.*, 2015b] explique que les images n'ont pas besoin de provenir d'un appareil ayant la même distance avec le modèle et qu'au contraire, il est conseillé d'avoir des jeux d'images capturés avec différentes portées. Si, pour certaines zones, un niveau de détails plus exigent est demandé, il est suggéré de prendre, à ces endroits, des photos à plus courte portée. En effet, au plus les photos sont prises à courte portée du modèle, au plus il y a de pixels pour représenter la partie visée et les détails sur cette zone sont mieux pris en compte. Il y a donc un lien entre la précision du modèle et la distance entre l'appareil photo et le modèle.

Les recherches de [James et Robson, 2014] présentent une courbure systématique des modèles provenant d'images aériennes prises à la verticale. Un exemple d'un modèle avec ce problème est illustré à la figure [3.6]. [James et Robson, 2014] montrent que l'augmentation du nombre d'images prises avec un angle de vue zénithal ne réduit pas significativement ce problème. Par contre, faire varier l'orientation par rapport à l'horizontal et varier l'altitude des prises de vue ont un impact sur la diminution de ce problème. Typiquement, les vues rasantes sont bénéfiques (il faut tout de même rester vigilant car elles sont le plus sujettes aux angles morts dus au relief).

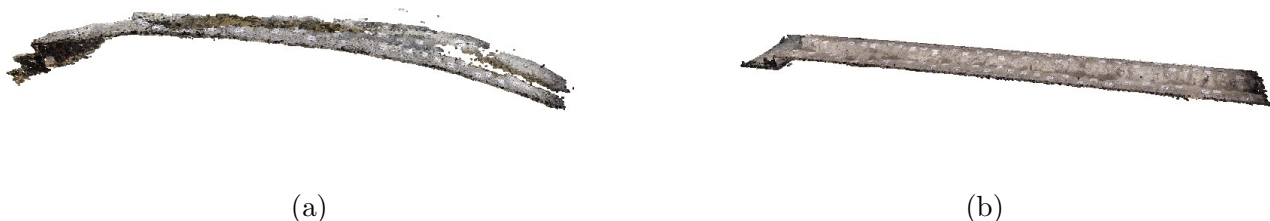


FIGURE 3.6 – (a) Modèle avec courbure (b) Modèle plane

Disposition des appareils photos

Suivant les conseils développés ci-dessus, plusieurs dispositions ont été testées. Celle obtenant les meilleurs résultats a été retenue et est présentée ci-dessous.

Six points de vue différents, tous situés à 30 [cm] au-dessus du modèle, sont utilisés comme illustré aux figures [3.7] et [3.8]. La structure métallique présente dans la chambre noire facilite le placement des Go Pro qui sont attachées à l'aide de ruban adhésif. Ce dispositif a l'avantage de pouvoir rapidement déplacer une Go Pro d'un point de vue à l'autre mais le désavantage est que les points de vue ne sont jamais reproduits exactement à l'identique. Les vues 5 et 6 étaient préalablement en face de la vue 4 et 3 respectant la symétrie mais elles ont été déplacées car pour le début du canal, un manque de recouvrement était présent.

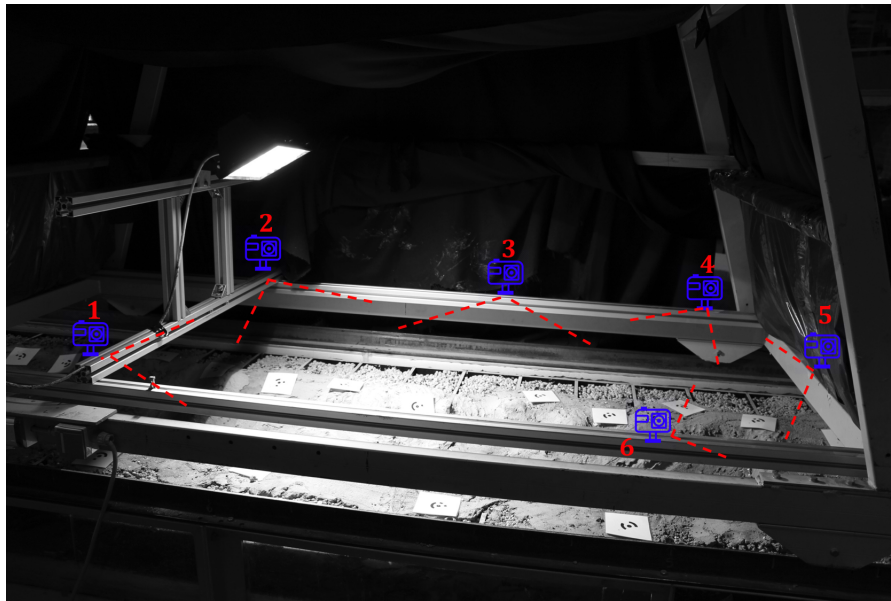


FIGURE 3.7 – Disposition des caméras

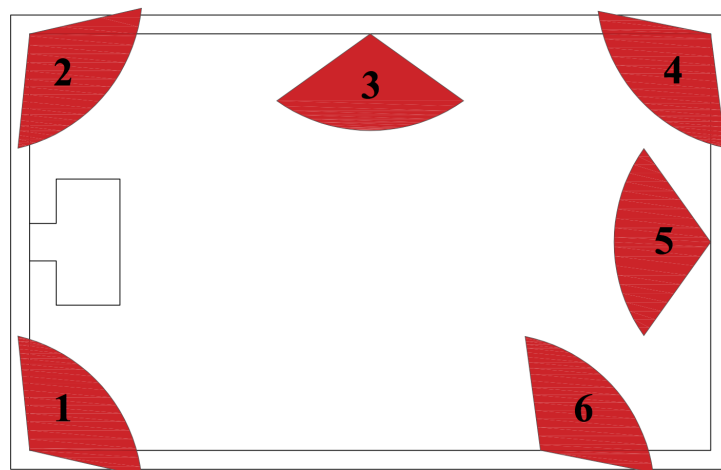


FIGURE 3.8 – Vue 2D : Disposition des caméras

3.4 Protocole d'acquisition des photos

Le procédé pour la capture d'image se veut rapide, simple et reproductible. Contrairement à [Franzini *et al.*, 2016], où une série de photos est prise lorsque la structure mobile est à l'arrêt, dans ce travail, les caméras Go Pro sont réglées sur leur mode "time lapse" afin de capturer les photos avec une fréquence de 1 [Hz] (une photo toutes les secondes) pendant que la structure mobile est mise en mouvement manuellement à une vitesse constante. La vitesse est déterminée par le recouvrement désiré entre les photos.

Ce procédé à l'avantage d'être rapide et de prendre un grand nombre d'images du canal. Par contre, l'acquisition de photos pendant que le chariot est en mouvement peut amener à une perte de netteté. Il faut veiller à ce que la vitesse de la structure mobile ne soit pas trop élevée.

Une fois que le chariot a parcouru l'ensemble du canal, les caméras Go Pro sont changées de point de vue. Dans notre cas, 3 passages étaient nécessaires pour couvrir les 6 points de vue avec deux Go Pro. De plus, afin d'analyser la variabilité des résultats et leur précision, pour chaque expérience présentée dans les chapitres 4 et 5, trois jeux d'images ont été capturés par angle de vue permettant de créer trois modèles Photoscan par la suite. Au total, neuf passages avec le chariot furent réalisés par expérience.

Recouvrement

Le recouvrement est un facteur important pour la construction des points de liaison. Pour un recouvrement suffisant, [Micheletti *et al.*, 2015a] préconise que chaque point se retrouve sur au moins trois images acquises de points de vue différents. Un recouvrement minimum de 60-80% est conseillé par le manuel [Agisoft, 2016b] dans le cas de photo aérienne. Au vu des essais de [Han et Endreny, 2014] et de [Franzini *et al.*, 2016] qui ont été réalisés en laboratoire, comme pour ce travail, le pourcentage de recouvrement désiré, noté r , a été fixé à 80%.

Dans ce travail, le modèle réduit ne faisant que 1,2 m de large, les photos prises avec les Go Pro englobent directement toute sa largeur. Le terme recouvrement est donc utilisé dans l'unique sens de recouvrement "frontal", c'est-à-dire dans le sens de la longueur du canal.

La couverture au sol, noté C , varie entre [1.2 m; 1.6 m] en fonction de l'angle de vue et du masque utilisé, et l'avancement entre clichés est noté d . La situation est montrée sur la figure [3.9].

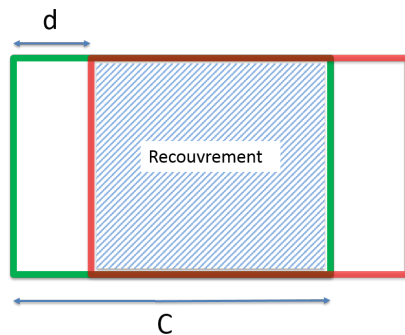


FIGURE 3.9 – Recouvrement frontal avec l'avancement et la couverture au sol

L'avancement d est obtenu avec l'équation suivante :

$$r = \frac{C - d}{C}$$

$$d = C - Cr = [24; 32] \text{ cm}$$

En poussant manuellement la structure de 25 [cm] entre chaque cliché, c'est à dire 25 [cm/s] car les photos sont prises toutes les secondes, un recouvrement de 80 % est assuré.

3.5 Alimentation du canal

Comme déjà expliqué à la section 2.1, le canal en circuit "fermé" est alimenté par une pompe et le débit est régulé par une vanne située à l'amont du canal (un débitmètre électromagnétique est installé juste à côté de la vanne pour faciliter le réglage). Pour les expériences effectuées dans la section 5.2 sur la capture du niveau d'eau en écoulement permanent, le canal doit être alimenté par un débit constant.

La plage des débits que le modèle réduit peut recevoir sans déborder est de plus ou moins 0 à 10 [$\frac{l}{s}$]. Malheureusement, pour cette plage de faibles débits, une diminution du débit en fonction du temps a été remarquée, comme illustré à la figure [3.10] et décrit dans le manuel [Bousmar et Fraselle, 2004]. Pour obtenir ces graphes, la pompe est mise en marche et la vanne est réglée au débit désiré. Quelques minutes sont nécessaires afin d'obtenir un signal stable. Ensuite, le débit est mesuré deux fois (graphe rouge et graphe bleu) à l'aide du débitmètre durant une période de trois minutes (cette période de trois minutes correspond à la durée d'une expérience pendant laquelle le débit ne peut être réajusté).

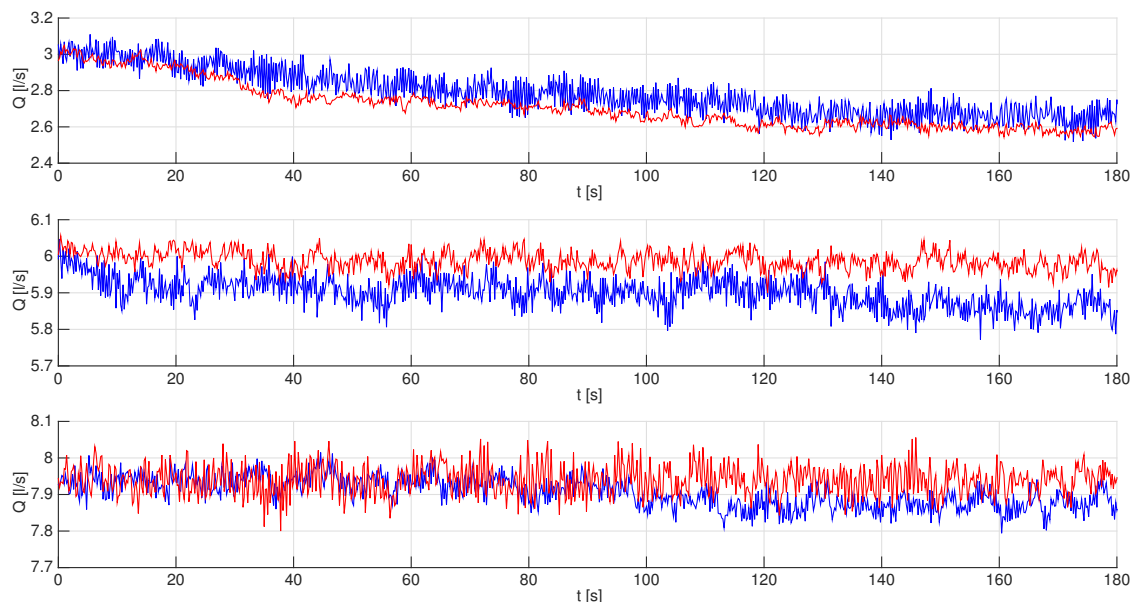


FIGURE 3.10 – Variation de trois débits ($Q = 3, 6$ et 8 [$\frac{l}{s}$]) pendant trois minutes

On observe sur les graphes de la figure [3.10] que, dans l'ensemble, les deux tests (rouge et bleu) suivent la même variation. Ceci est rassurant car la variation de débit n'est donc pas aléatoire. On observe une diminution de débit de moins en moins marquée en fonction que le débit est de plus en plus élevé. Pour un débit de $3 \left[\frac{l}{s}\right]$, une variation de $0.4 \left[\frac{l}{s}\right]$ est observée sur 3 minutes alors que pour un débit de $8 \left[\frac{l}{s}\right]$, une variation de $0.15 \left[\frac{l}{s}\right]$ est observée.

Une influence de plus de quelques millimètres sur le niveau d'eau aurait des conséquences directes sur la précision des résultats. Dans le chapitre 5, l'influence de cette variation de débit sur le niveau d'eau dans le canal va être abordée. Heureusement, elle ne sera environ que de 1 millimètre.

Chapitre 4

Bathymétrie

La mesure de la bathymétrie est la base des expériences de ce projet. En effet, à partir de la forme du modèle à sec combinée avec le modèle rempli d'eau, il est possible d'obtenir le niveau de la surface libre sur tout le canal. Ce chapitre commence par exposer la mesure de cette bathymétrie au moyen d'un laser, puis par l'intermédiaire de modèles Photoscan. Ensuite, les données obtenues sont traitées de façon à avoir la tendance générale de la pente du modèle réduit ainsi que le thalweg.

4.1 Laser Keyence

Le laser Keyence permet d'obtenir des mesures précises de la bathymétrie sur des sections à intervalles longitudinaux dx choisis. Comme expliqué à la section 3.3.1, le laser est monté sur l'automate facilitant la prise de mesures.

Dans cette étude, un intervalle $dx = 20$ [cm] a été choisi, totalisant 44 sections sur l'entièreté du canal. Par ailleurs, l'intervalle transversal est de 3 [cm] commençant en $y = 0,13$ [m] et terminant en $y = 1$ [m], totalisant 30 mesures par section. Ceci permet d'avoir la forme de la partie potentiellement mouillée sur tout le canal ainsi qu'une partie de ses berges. Au total, 1320 points sont mesurés par le laser (la figure [4.1] illustre une section mesurée avec le laser).

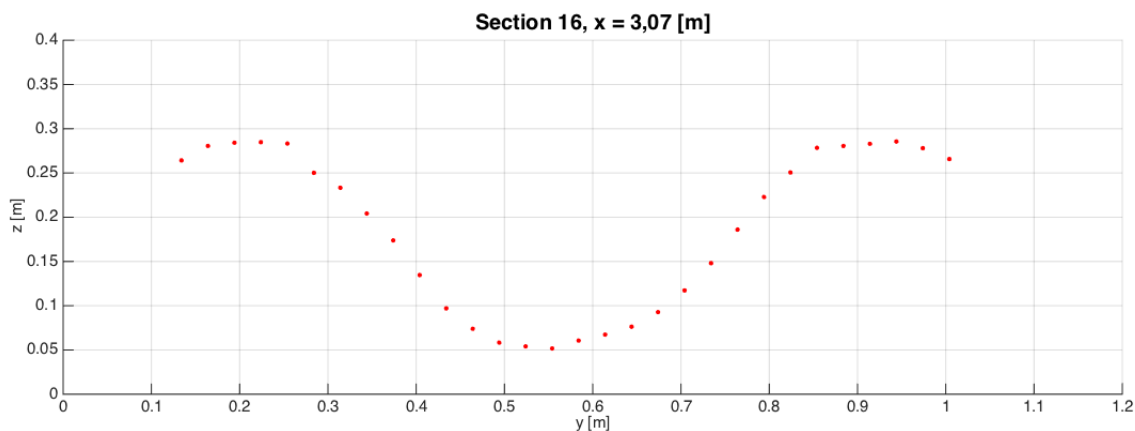


FIGURE 4.1 – Bathymétrie d'une section du canal obtenue avec le laser Keyence en $x = 3,07$ [m]

Les mesures au laser ont été effectuées deux fois de manière à vérifier une redondance dans les résultats. Ceci était bien le cas. Après avoir été corrigées à l'aide de la matrice de correction, les données obtenues avec le laser serviront comme référence de comparaison avec les données des modèles Photoscan car elles représentent, à priori, la réalité. La bathymétrie du canal est exposée à la figure [4.2].

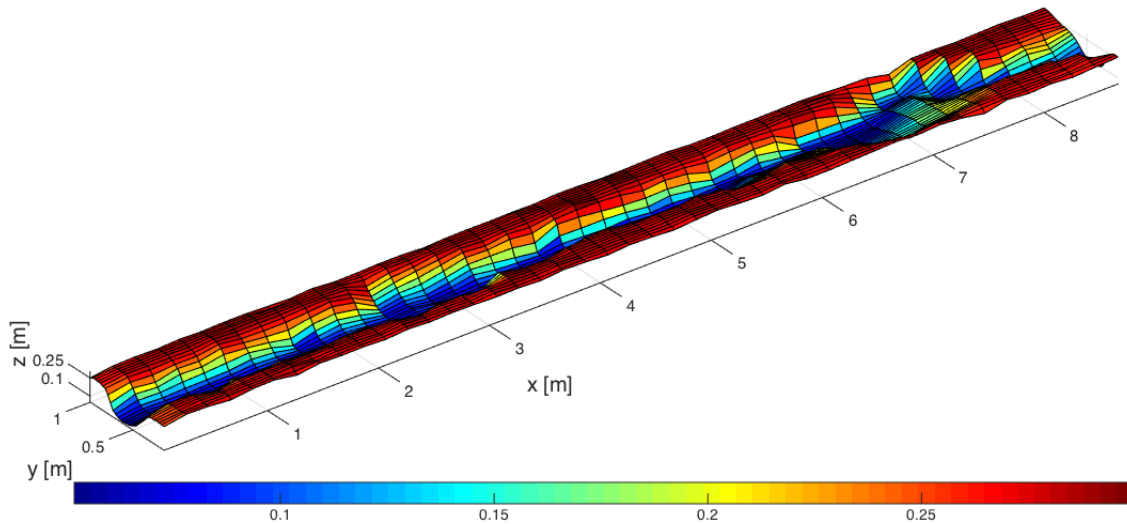


FIGURE 4.2 – Vue 3D de la bathymétrie du canal obtenu avec la sonde Keyence (1320 points)

4.2 Modèles Photoscan

Dans un deuxième temps, la bathymétrie du canal a été déterminée avec le logiciel Photoscan. Ce logiciel, comme mentionné dans le chapitre 3 sur les dispositifs, offre plusieurs manières d'obtenir un MNE. Ce dernier peut être créé sur base de points de liaison ou d'un nuage de points. L'alignement des photos crée directement des points de liaison. Puis, un nuage de points peut être généré et sa création dure plusieurs heures. La gestion du temps est essentielle dans des travaux expérimentaux tels que ceux abordés dans ce travail. Par conséquent, une étude critique des avantages et inconvénients de ces deux méthodes pour générer les MNE est inévitable. Cette section aura comme but principal de quantifier l'amélioration des nuages de points par rapport aux points de liaison pour juger si le temps supplémentaire pour générer le nuage de points est justifié.

4.2.1 Précision des deux méthodes

Trois modèles Photoscan sont créés avec des photos différentes mais des points de vue identiques pour observer la variabilité des résultats. À partir de chaque modèle, les deux méthodes sont utilisées pour générer des MNE (à partir des points de liaison ou du nuages de points). Tout d'abord, les coupes transversales illustrées dans la figure [4.3] donnent une première idée de la précision des modèles. À gauche, les 3 modèles sont présentés et à droite, une enveloppe entre les valeurs minimales et maximales des trois modèles est exposée.

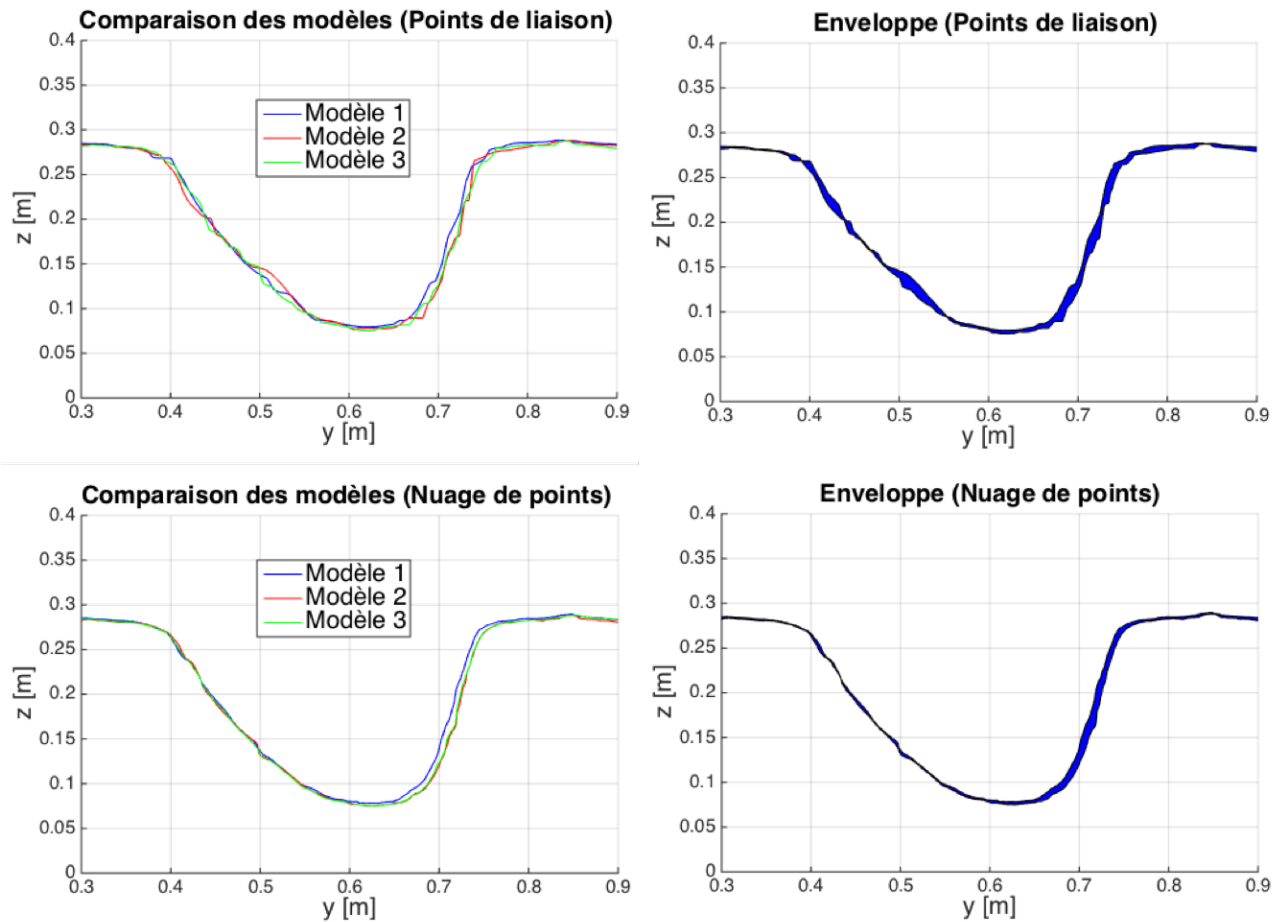


FIGURE 4.3 – Coupes transversales de la bathymétrie mettant en évidence la précision des modèles

Une différence nette entre les points de liaison et le nuage de points est visible. Comme attendu, les trois modèles des points de liaison diffèrent plus entre eux et sont plus saccadés. À l'inverse, le nuage de points offre trois modèles assez similaires. Dans le but de quantifier l'amélioration apportée par le nuage de points, une moyenne de la différence entre la valeur maximale et la valeur minimale de chaque point sur l'entièreté du canal a été réalisée (c'est à dire une moyenne de "l'épaisseur" de l'enveloppe). Le résultat obtenu pour le nuage de points est de 3,7 [mm] et de 6,8 [mm] pour les points de liaison, ce qui correspond presque au double. Sans surprise, le nuage de points est une option plus précise qui démontre une faible variabilité.

Pour le reste de l'étude, la moyenne entre les trois modèles est gardée pour les deux méthodes. Ceci permet de prendre en compte cette variabilité des modèles due aux différentes photos. Un MNE de chaque méthode est illustré dans la figure [4.4] ci-dessous. Deux autres vues supplémentaires sont mises dans l'annexe C.1 pour voir la vue 3D des modèles.

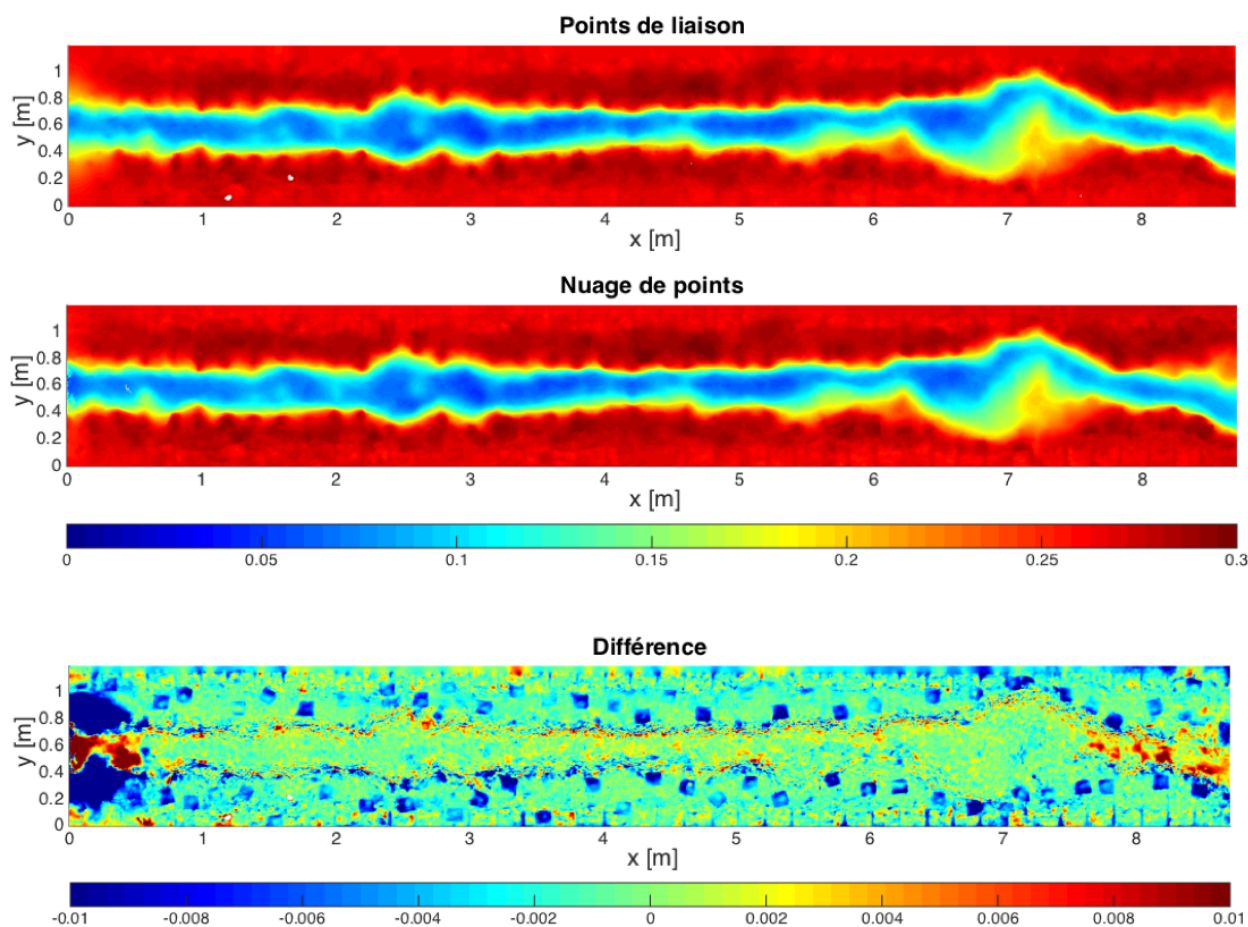


FIGURE 4.4 – Bathymétrie totale du canal avec les deux méthodes et leur différence ($Z_{Points\ de\ liaison} - Z_{Nuage\ de\ points}$)

Les différences entre les points de liaison et le nuage de points ne sont pas vraiment visibles dans les MNE car elles correspondent à quelques millimètres seulement. Le MNE de la différence met en évidence les zones plus délicates. Le niveau du début du canal diffère beaucoup entre les deux car c'est une zone où Photoscan possède moins d'informations (moins de photos prises). Le niveau des marqueurs est sous-estimé par le modèle des points de liaison, probablement dû au fait de leur réflectivité (les marqueurs sont plastifiés).

4.2.2 Comparaison entre les modèles Photoscan et le laser Keyence

Une façon de vérifier l'exactitude d'un modèle Photoscan est de le comparer aux données, que l'on suppose exactes, obtenues avec le laser. La première étape est de sélectionner les données du modèle Photoscan qui correspondent à celles du laser. Un échantillon de 1320 (30 points x 44 sections) points de comparaison est alors disponible. Pour calculer l'erreur, une simple différence entre les niveaux de bathymétrie est effectuée :

$$e_i = Z_{i,Photoscan} - Z_{i,Laser}$$

La figure [4.5] ci-dessous illustre les box plots des 44 sections pour les deux méthodes : points de liaison et nuage de points. Ceci permet de visualiser la répartition de l'erreur par section. Le rectangle montre la plage d'erreur allant du premier quartile au troisième quartile et les segments vont du premier au neuvième décile. Les croix rouges correspondent aux outliers.

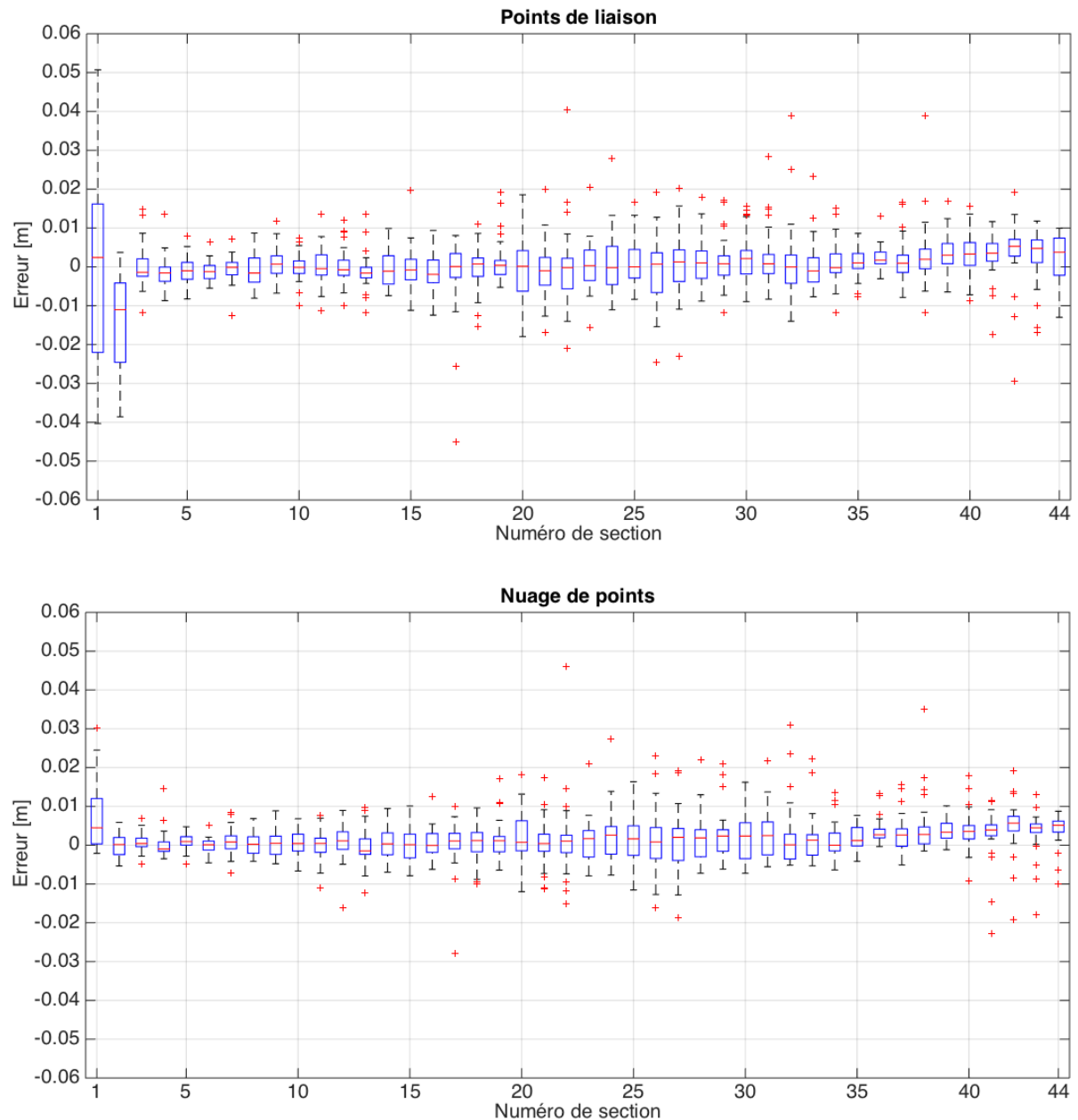


FIGURE 4.5 – Box plots de l'erreur par section pour les deux méthodes

La section 1 semble poser problème dans les deux cas. En effet, le rectangle est assez long (surtout pour les points de liaison), ce qui veut dire que la dispersion des erreurs est assez élevée. Ceci peut être expliqué par le fait que la section 1 est moins visible lors de la prise des photos, et que Photoscan aurait plus de mal à construire le modèle dans cette partie du canal. La section 2 pose problème aussi

dans le cas des points de liaison.

Les erreurs peuvent monter jusqu'à plus de 4 cm. Des erreurs aussi grandes sont rares mais méritent une explication. Une si grosse erreur est due à la façon dont elle est définie. Celle-ci est calculée verticalement ; donc, un léger décalage horizontal sur les bords où on a des pentes assez raides équivaut à un grand décalage vertical.

Une deuxième alternative pour visualiser cette erreur graphiquement est de faire un histogramme. Celui-ci permet de voir la répartition de l'erreur en considérant le canal en entier. Les histogrammes des deux méthodes sont représentés dans la figure [4.6].

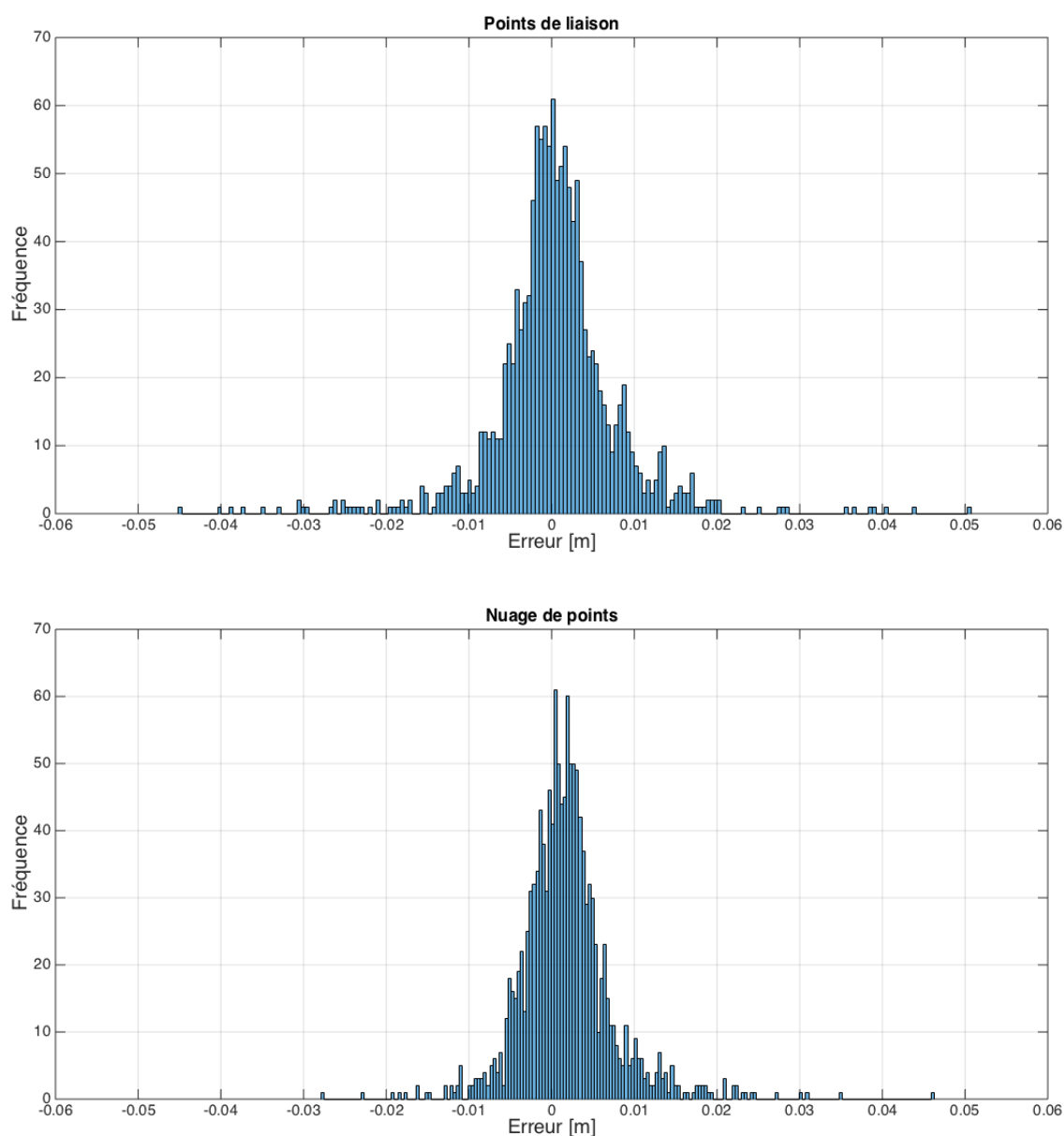


FIGURE 4.6 – Histogrammes de l'erreur pour les deux méthodes

Il semble que les points de liaison créent plus de outliers. Ceci doit être dû à l'imprécision de cette méthode qui peut générer de plus grandes erreurs verticales. L'histogramme du nuage de points a donc plus de valeurs concentrées autour de 0. Ceci sera abordé dans la section 4.2.3 qui suit.

4.2.3 Tableau récapitulatif

Cette section a comme but de quantifier cette erreur et de comparer les deux méthodes dans un tableau récapitulatif. Ce tableau reprend l'erreur absolue moyenne, l'erreur moyenne, l'écart type et l'intervalle de confiance à 68%.

L'échantillon des erreurs contient n valeurs ($n = 1320$) et l'erreur de la i -ème valeur est notée e_i . Les formules utilisées sont les suivantes :

- **Erreur moyenne** : $\bar{e} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n e_i$.
- **Erreur absolue moyenne** : $\bar{e}_{abs} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |e_i|$.
- **Écart type** : $\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (e_i - \bar{e})^2}$ (mesure la dispersion des erreurs)
- **Intervalle de confiance à 68%** : $[\bar{e} - \sigma; \bar{e} + \sigma]$. On considère qu'on a une distribution normale. Ceci n'est pas un abus vu le nombre de valeurs de l'échantillon étudié.

Le tableau 4.1 résume ces notions pour les deux méthodes.

Méthode	\bar{e} [mm]	\bar{e}_{abs} [mm]	σ [mm]	$[\bar{e} - \sigma; \bar{e} + \sigma]$ [mm]
Points de liaison	0,4	5,1	7,8	[-7,4; 8,2]
Nuage de points	1,8	4,1	5,7	[-3,9; 7,5]

TABLE 4.1 – Tableau reprenant l'erreur moyenne, l'erreur absolue moyenne, l'écart type et l'intervalle de confiance à 68% pour les points de liaison et le nuage de points

On observe que les deux erreurs moyennes sont assez proches de 0. L'erreur absolue moyenne et l'écart type sont plus petits pour le nuage de points. Ceci veut dire que ce dernier est plus proche de la réalité avec une dispersion plus faible. Cette dispersion se reflète dans un intervalle de confiance à 68% plus petit pour le nuage de points.

Ainsi, le nuage de points semble être, sans surprise, une méthode plus précise, avec moins de dispersion, qui se rapproche plus de la réalité. Ces avantages ont été jugés assez importants pour justifier l'attente de quelques heures pour la création de nuages de points. Le reste de cette étude est réalisé à partir de modèles issus d'un nuage de points.

4.3 Thalweg

Le thalweg est défini comme la ligne reliant les points les plus bas de chaque section le long d'un cours d'eau.¹

A partir du modèle obtenu via Photoscan et via le laser Keyence, il est possible de tracer le thalweg comme montré à la figure [4.7]. Les sections mesurées avec la sonde sont espacées tous les 20 [cm]. Ceci donne donc une valeur de comparaison tous les 20 [cm]. D'autre part, il est très probable que le laser ne passe pas par le point le plus bas pour chaque section mesurée à cause d'une discrétisation plus grossière que le modèle Photoscan (voir annexe C.2). Le thalweg obtenu avec le laser est donc à prendre avec précaution. Il reste tout de même un bon élément pour confirmer que le modèle Photoscan est correct. Aucune différence transversale de plus de 3 [cm] entre les points du thalweg du laser et du modèle Photoscan sur la même section n'est observée. Ceci confirme donc, dans le bon sens, l'exactitude du modèle Photoscan.

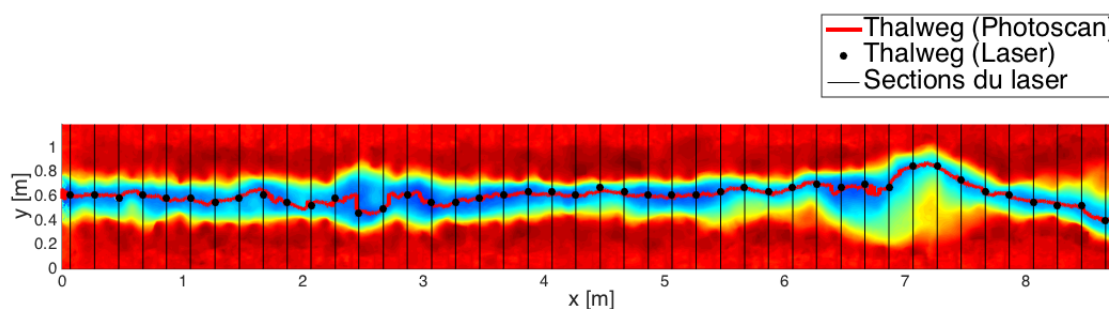


FIGURE 4.7 – Représentation du thalweg du modèle Photoscan et du laser Keyence

4.4 Approximation de la pente du modèle réduit

La pente d'un cours d'eau n'a jamais été facile à définir étant donné l'évolution très irrégulière des bathymétries le long des rivières. La littérature utilise le mot "pente" pour exprimer la tendance générale d'un cours d'eau à monter ou descendre en altitude. Si la pente est positive, on parle alors de contre-pente.

Afin d'avoir une représentation continue entre les points mesurés du profil en long au niveau du thalweg avec les données du laser, une interpolation linéaire a été utilisée à la figure [4.8]. Une régression linéaire a été appliquée sur le profil en long du modèle Photoscan et du laser. Les droites qui approximent au mieux ces profils en long donnent la tendance générale du canal et donc sa pente.

Deux éléments sont à observer sur le graphe de la figure [4.8]. Premièrement, la tendance générale du canal, tant pour le profil en long du modèle Photoscan que pour celui du laser, tend vers une contre-pente. D'autre part, on observe une différence entre les deux profils en long. Comme expliqué dans la partie précédente sur le thalweg, cette différence serait expliquée par une discrétisation plus

1. [Dictionnaire Larousse, 2016]

grossière des mesures du laser Keyence.

Malgré cela, on obtient une pente de 0.15 % pour le modèle Photoscan et une pente de 0.11 % pour le laser². Ce qui, dans l'ensemble, paraît être une bonne approximation.

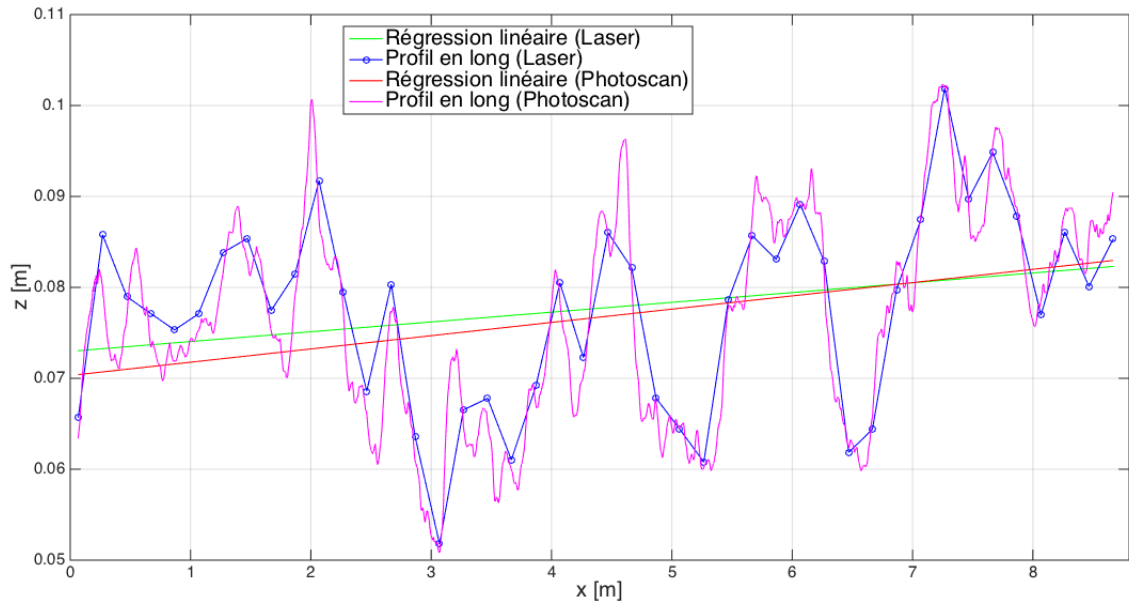


FIGURE 4.8 – Régression linéaire des profils en long obtenue avec le modèle Photoscan et le laser Keyence

4.5 Source d'erreurs

Cette section est un petit récapitulatif des principales sources d'erreurs :

- **Les coordonnées des points de référence :**

La première source est l'imprécision des coordonnées des points de référence effectuées avec la station totale. Comme expliqué à l'annexe B.1, la précision est de l'ordre de 5 [mm]. Cette imprécision impacte les modèles Photoscan.

- **La précision des modèles Photoscan :**

Comme présenté dans la section 4.2.1, on observe une certaine variabilité des modèles Photoscan de l'ordre de 4 [mm].

- **La correction des mesures de l'automate**

La correction des mesures de l'automate pour compenser des déformations des rails transversalement n'a pas été prise en compte, engendrant une imprécision de ses mesures de maximum 2 [mm] (voir section 3.3.1).

2. A noter que la pente du canal préexistant calculée à la section 3.3.1 est prise en compte

Chapitre 5

Mesure de la surface libre

L'ajout de l'eau dans les mesures par photogrammétrie est une étape cruciale de ce mémoire. Cette nouvelle variable soulève une nouvelle problématique qui est la transparence de l'eau, une contrainte dans la reconnaissance par photogrammétrie. Cette question est abordée dans cette partie et d'éventuelles alternatives sont proposées. Des expériences avec de l'eau au repos sont effectuées dans un premier temps, avant de commencer les tests en écoulement permanent. Ceci permet d'avoir une première idée des avantages et des inconvénients de chacune des alternatives proposées dans un cas moins complexe, avant de les confronter à de l'eau en mouvement.

5.1 Eau au repos

Afin de comprendre au mieux les limites du logiciel lors de la mesure de la surface libre, un premier cas est étudié. Un bac rempli d'eau au repos est modélisé et, une fois les limites de Photoscan atteintes, l'objectif est de modifier la texture de l'eau et d'en trouver une qui permette de mesurer au mieux le niveau de l'eau à l'aide du logiciel.

5.1.1 Description des expériences

Les expériences au repos ont été réalisées dans un bac ayant les dimensions suivantes : 30x30x12 [cm]. Il a été placé sur le canal préexistant à l'aval du modèle réduit de façon à pouvoir faire usage des marqueurs déjà présents. La figure [5.1] présente une image du bac vide. L'avantage principal est que les positions exactes de ces points sont connues, facilitant ainsi le traitement des résultats par Photoscan. Autour de 60 photos ont été prises par modèle Photoscan et au moins un marqueur du modèle est visible dans 80 % des photos. De plus, quelques marqueurs ont été placés sur le bac pour le rendre plus reconnaissable par le logiciel développé par Agisoft. Les bords sont couverts par des feuilles car leur minceur posait problème à Photoscan à cause des angles morts. Après avoir effectué le test à vide qui servira de base pour les mesures du niveau d'eau, cinq tests avec différentes textures de l'eau ont suivi. Pour chaque expérience, deux niveaux d'eau ont été testés : un à 4,5 [cm] et l'autre à 9 [cm]. Ceci permet de voir l'influence de la hauteur de l'eau dans les erreurs observées en fonction de la texture utilisée. Pour chaque texture, les mêmes hauteurs ont été examinées.

5.1.2 Test de différentes textures

Cette section présente les différentes textures. Les comparaisons et les résultats sont discutés dans la section suivante. La figure [5.1] reprend les différentes textures qui ont été expérimentées.

Les expériences qui suivent adoptent essentiellement deux approches différentes :

- L'eau est mélangée à un composant qui crée une texture particulière.
- Une texture flottante est diffusée sur la surface de l'eau.

Eau claire

La première expérience consiste simplement à remplir le bac avec de l'eau claire. Ceci est l'expérience la plus simple. Son but est de mettre en évidence les problèmes liés à la transparence de l'eau et de justifier la nécessité d'ajouter de l'opacité à l'eau. De plus, elle permet d'avoir un repère de comparaison pour évaluer la pertinence d'une texture.

Colorant

La deuxième expérience consiste à mélanger du colorant alimentaire à de l'eau claire. Un mélange de trois couleurs (bleu, rouge et jaune) de colorant alimentaire donne un aspect très foncé au liquide. L'objectif était d'obtenir une surface opaque. La concentration de colorant dans l'eau n'a pas été mesurée. Étudier la relation entre la concentration de colorant et le niveau d'eau capturé pourrait être un sujet intéressant dans des recherches futures.

Malgré une surface totalement opaque, cette texture a le défaut de générer des reflets très importants. Ces reflets modifient complètement l'apparence de la surface du liquide en fonction de l'angle de vue avec lequel la photo est prise.

Boue

Le test suivant a été effectué en utilisant de la boue. Pour ce cas, de la terre a été ajoutée à l'eau claire pour, à nouveau, la rendre plus opaque.

Malheureusement, le problème de reflets évoqué dans le test avec le colorant est toujours présent. À nouveau, la question de la concentration n'est pas traitée pour cette expérience.

Par contre, due à ses imperfections (brindilles de bois, brins d'herbe, etc.), la boue a comme caractéristique de donner une certaine texture à l'eau.

Frigolite

La frigolite a une masse volumique plus faible que celle de l'eau et flotte donc à la surface l'eau. Les billes de frigolite ont un diamètre compris entre 3 et 5 [mm]. L'avantage majeur d'utiliser la frigolite est la texture très visible et absente de reflets qu'elle génère à la surface de l'eau.

Par contre, le diamètre des billes de frigolite augmente le niveau de la surface de l'eau mesuré par le logiciel Photoscan.

Pliolite

La pliolite est fort similaire à la frigolite dans le sens où elle flotte aussi à la surface de l'eau et donne une texture avec de bonnes caractéristiques à la surface. La principale différence est qu'elle forme une couche sur l'eau beaucoup plus fine que la frigolite. Ceci permet de contrecarrer le problème du diamètre de la frigolite.

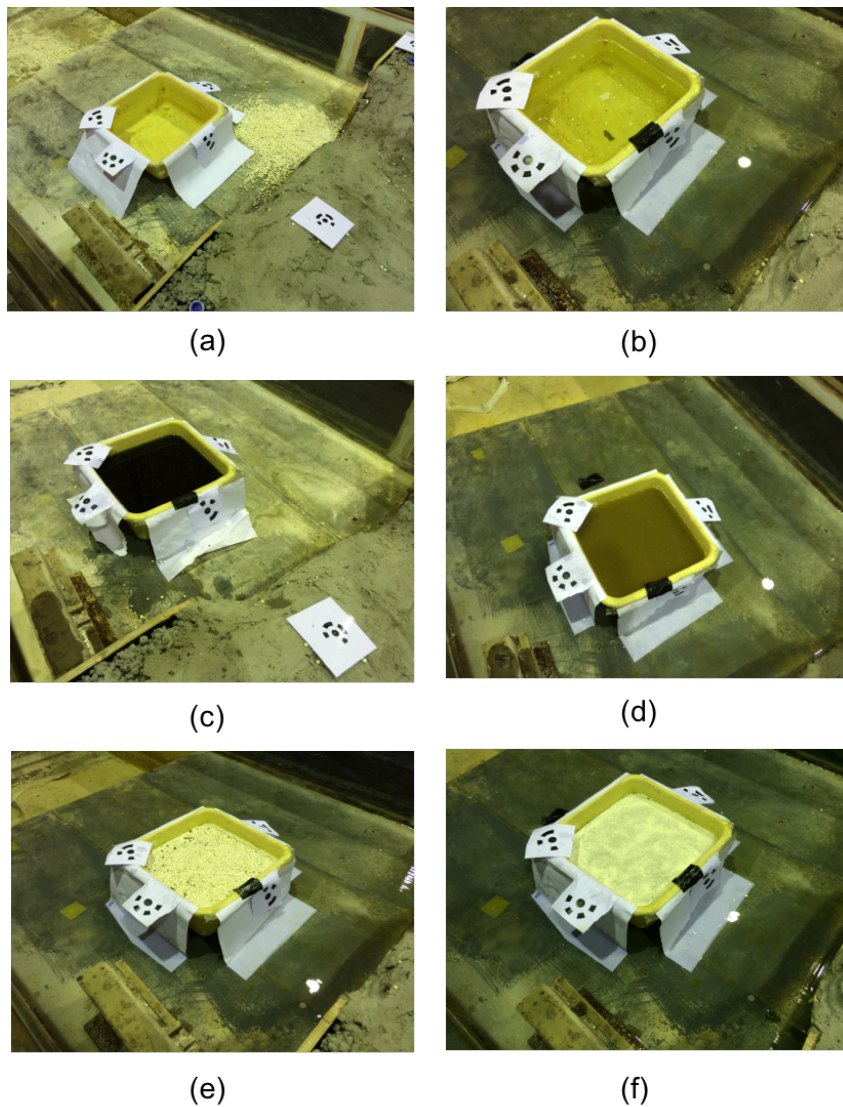


FIGURE 5.1 – Illustration des différentes textures expérimentées : (a) Vide (b) Eau claire (c) Colorant (d) Boue (e) Frigolite (f) Pliolite

5.1.3 Comparaison des résultats

A partir des modèles numériques d'élévation (MNE) générés par le logiciel Photoscan, l'efficacité des textures est déjà visuellement comparable (voir figure [5.2]).

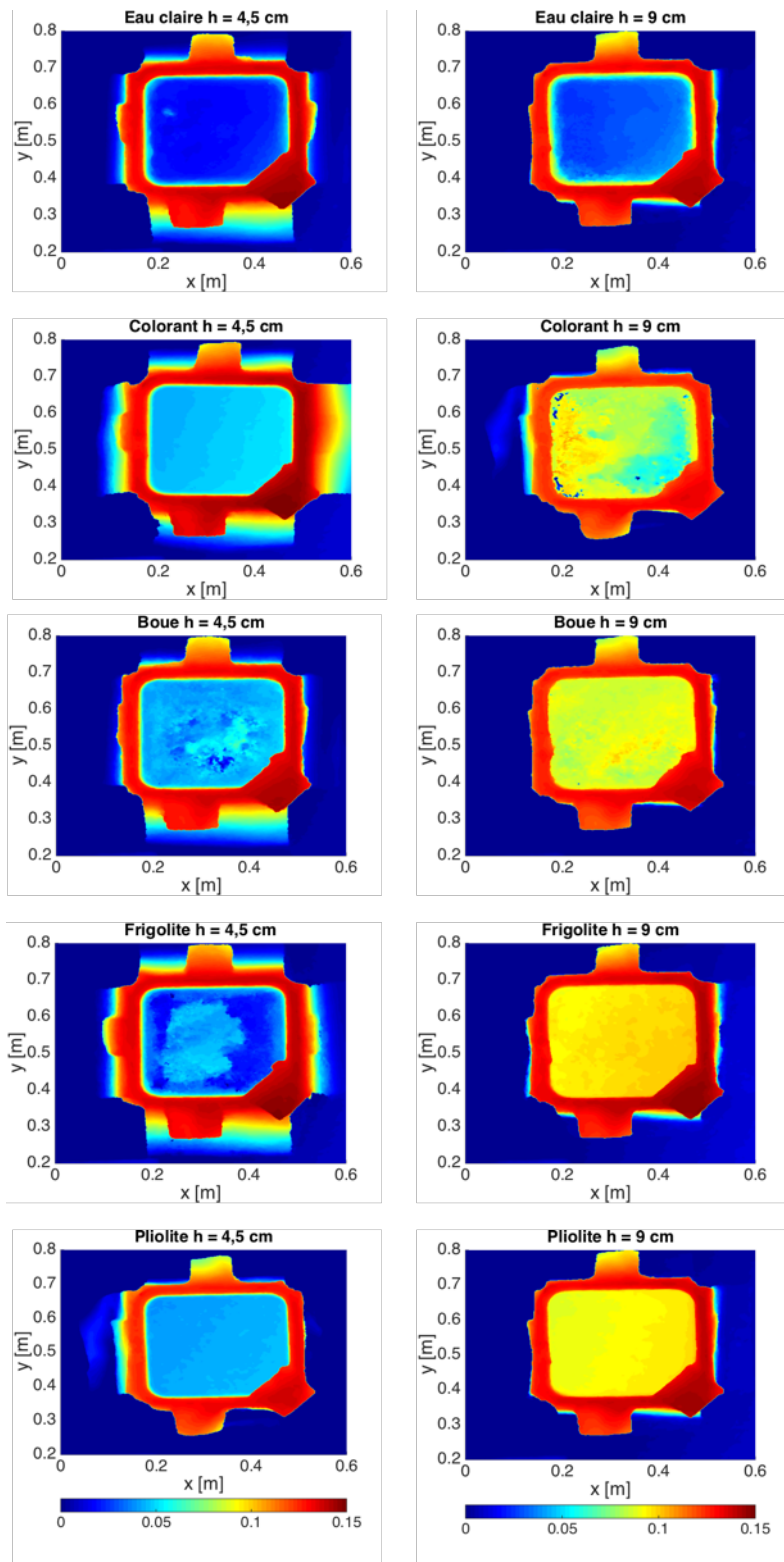


FIGURE 5.2 – MNE du bac avec de l'eau claire, du colorant, de la boue, de la frigolite et de la pliolute pour une hauteur d'eau de 4,5 [cm] et 9 [cm]

On observe sur la figure [5.2] que les tests avec la frigolite et la pliolute donnent, à première vue, des résultats encourageants. En effet, le niveau d'eau semble être proche des 4,5 et 9 [cm] attendus et paraît homogène sur toute la surface de l'eau. À l'inverse, les autres expériences semblent avoir un niveau d'eau plus irrégulier. L'eau claire et le colorant donnent des niveaux d'eau trop bas. La boue donne des résultats intermédiaires, même si on note une certaine irrégularité dans la surface, le niveau d'eau est proche des 4,5 et 9 [cm] attendus.

Afin de mieux comparer et visualiser les résultats des différentes textures, deux coupes pour chaque niveau d'eau sont réalisées. La figure [5.3] illustre ces coupes :

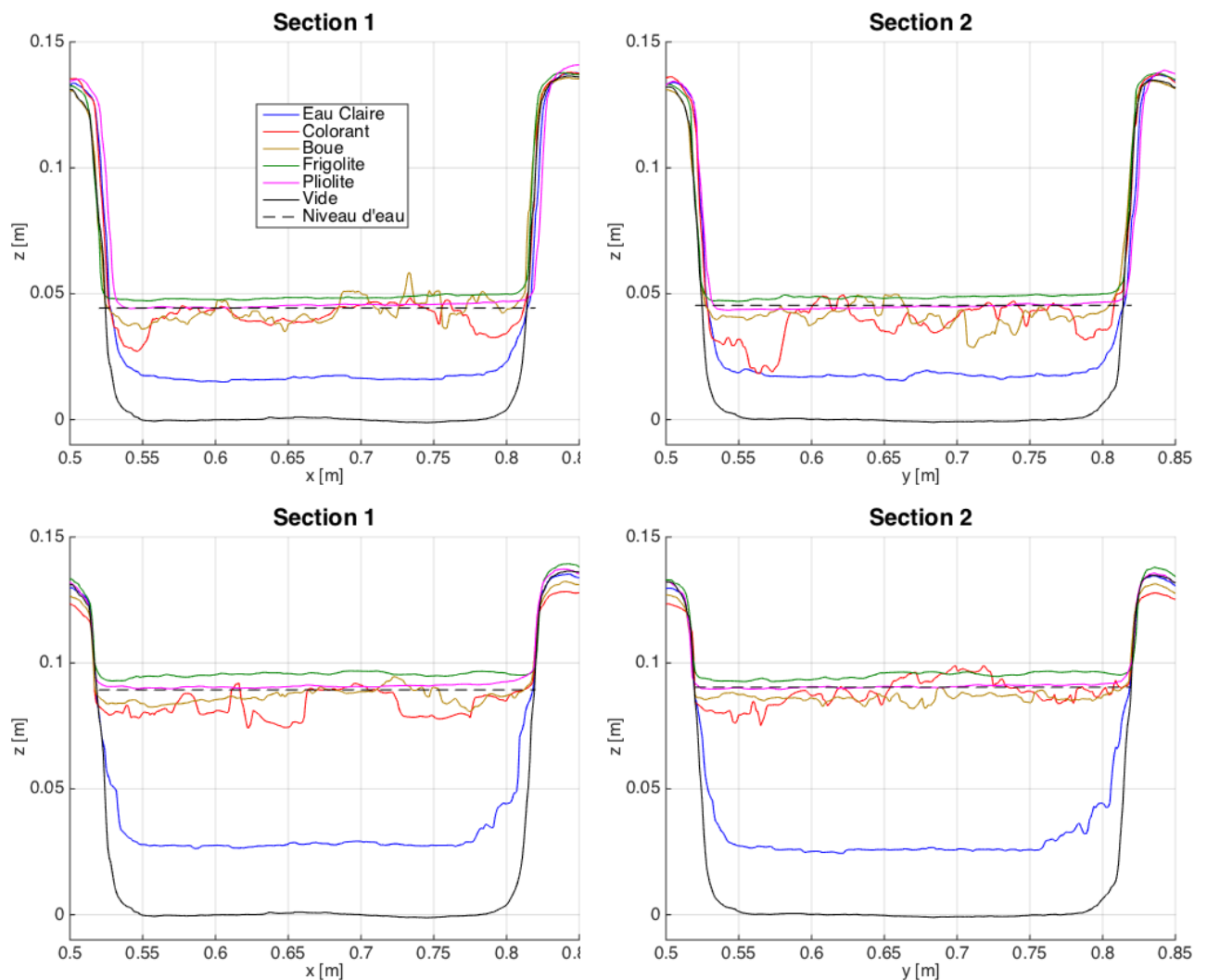


FIGURE 5.3 – Coupes transversales des bacs avec les différentes textures (en haut : $h = 4,5$ [cm] et en bas : $h = 9$ [cm])

On remarque directement que Photoscan ne reconnaît pas le niveau d'eau dans le bac avec de l'eau claire et le sous estime complètement. Ceci est probablement dû à la transparence de l'eau et au fait que le logiciel capte les points de liaison dans le fond du bac plutôt qu'à la surface.

Les résultats avec le colorant et la boue sont assez similaires avec un léger mieux pour la boue. On observe que, pour le colorant, le logiciel a du mal à détecter le niveau proche des bords du bac. Comme pour l'eau claire, le logiciel semble aller chercher le bord du bac plutôt que la surface du liquide, probablement à cause d'un manque d'opacité. La boue, par contre, permet de bien estimer le niveau dans ces zones. A noter aussi que la différence entre le niveau réel et celui obtenu avec le modèle de la boue ne semble pas avoir changé entre les deux hauteurs d'eau. Comme attendu, la frigolite se positionne légèrement au-dessus du niveau réel, du fait de la taille de ses billes qui correspond à la différence de niveau (rayon d'une bille ± 2 [mm]). Finalement, la pliolite semble être la solution idéale pour de l'eau au repos.

Pour aller plus en profondeur dans la comparaison des textures, une estimation de moyennes de niveau d'eau sur une zone choisie a été calculée. Cette zone est montrée à la figure [5.4]. La moyenne n'est pas prise sur l'entièreté du bac, car lors des manipulations, la position du bac a, pour chaque cas, été légèrement modifiée. Pour éviter d'erroner la moyenne, une zone plus restreinte de la surface est privilégiée.

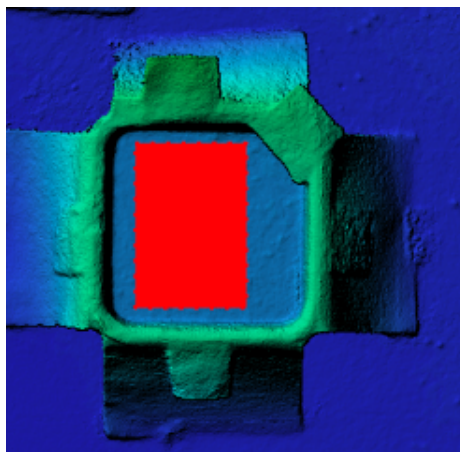


FIGURE 5.4 – En rouge, la surface utilisée pour le calcul de la moyenne du niveau de la surface libre

Les moyennes de la hauteur de la surface libre pour chaque méthode sont reprises dans les tableaux suivants [5.1] et [5.2]. L'erreur correspond à la valeur absolue de l'écart entre la hauteur mesurée et la hauteur réelle, divisée par cette dernière.

$$Erreur = \frac{|h_{mesurée} - h_{réelle}|}{h_{réelle}}$$

Méthode utilisée	Hauteur mesurée [cm]	Erreur [%]
Eau claire	1,78	60,4
Colorant	3,49	22,4
Boue	4,21	6,4
Frigolite	4,83	7,3
Pliolite	4,54	0,9

TABLE 5.1 – Comparaison de la moyenne de hauteur d'eau ($h = 4,5$ cm)

Méthode utilisée	Hauteur mesurée [cm]	Erreur [%]
Eau claire	2,76	69,3
Colorant	8,84	1,8
Boue	8,59	4,6
Frigolite	9,46	5,1
Pliolite	9,03	0,3

TABLE 5.2 – Comparaison de la moyenne de hauteur d'eau ($h = 9$ cm)

Les tables [5.1] et [5.2] confirment ce qui a déjà été dit précédemment. L'eau claire donne des hauteurs beaucoup trop basses. Le colorant et la boue sont des solutions avec un certain potentiel. L'erreur pour ces deux méthodes est assez faible dans l'expérience à 9 [cm]. Il est important de rappeler que ceci découle d'une moyenne et que le modèle Photoscan, comme démontré dans les coupes du bac, n'est pas très représentatif de la réalité pour ces deux méthodes. La moyenne de la frigolite confirme ce qui a été dit auparavant. La hauteur d'eau est quelques millimètres au-dessus de la hauteur réelle. La pliolite évite clairement ce problème et génère les résultats les plus proche des niveaux d'eau.

5.2 Eau en écoulement permanent

Après le cas de l'eau au repos, le cas de l'eau en écoulement permanent est traité. Une difficulté qui n'était pas présente dans la section précédente est ajoutée. L'eau est maintenant en mouvement et les solutions de textures trouvées précédemment doivent être adaptées.

Chaque expérience est réalisée avec deux écoulements permanents. Dans le premier, un débit $Q_1 = 6 \left[\frac{l}{s}\right]$ est appliqué et dans le second, le débit vaut $Q_2 = 8 \left[\frac{l}{s}\right]$.

Cette section est scindée en trois parties : la mesure de la surface libre à l'aide d'un trusquin, d'un modèle numérique et de modèles Photoscan.

5.2.1 Mesure de la surface libre au Trusquin

Comme le rôle du laser Keyence dans le chapitre sur la bathymétrie, le trusquin est utilisé ici pour avoir des mesures de référence auxquelles les modèles Photoscan peuvent être comparés par la suite. Dans ce cas-ci, l'utilisation du laser Keyence n'est pas adapté et un trusquin monté sur l'automate permet de mesurer le niveau de la surface libre sans perturber l'écoulement (Annexe B.3).

L'hypothèse que le niveau d'eau est le même sur chaque section du canal est faite. Bien que cette hypothèse soit forte pour des zones où l'eau est agitée, elle semble, par contre, raisonnable dans les zones où l'eau est plus calme. Une mesure par section est suffisante pour avoir le niveau de la surface libre de l'écoulement à intervalles réguliers. Une mesure du niveau de l'eau est prise tous les 20 [cm] le long du canal. Quarante-quatre niveaux de la surface libre sont obtenus pour un débit fixé. La figure [5.5] montre le niveau de la surface pour les deux débits Q_1 et Q_2 .

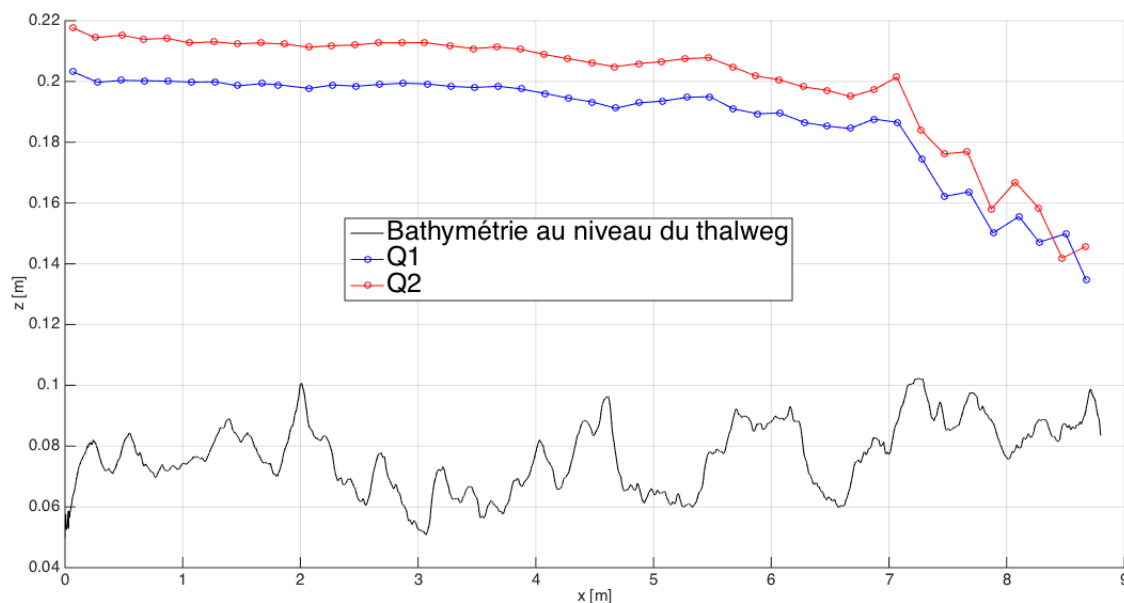


FIGURE 5.5 – Mesures au trusquin de la surface libre pour les débits Q_1 et Q_2

5.2.2 Modèle Numérique

Le modèle numérique utilisé est appelé "Augmented Roe's Scheme with energy balance". Les articles [Murillo et García-Navarro, 2014] et [Franzini et Soares-Frazão, 2016] développent les équations du modèle et le comparent à d'autres. Un résumé simplifié qui décrit le modèle numérique est mis en annexe D.

Dans un premier temps, les mesures du trusquin peuvent être utilisées pour obtenir le coefficient de Manning du canal. Ceci est fait en comparant ces données aux résultats obtenus avec le modèle numérique. Ce modèle a plusieurs paramètres d'entrée, dont le coefficient de Manning. Puis, il est aussi possible de faire une estimation du changement de niveau d'eau dû à la variation de débit abordée dans la section 3.5.

Détermination du coefficient de Manning

La figure [5.6] illustrée ci-dessous, représente le niveau d'eau dans le canal pour différents coefficients de Manning utilisés dans le modèle numérique. Le niveau d'eau obtenu avec le trusquin est aussi mis en évidence de façon à pouvoir faire la comparaison. Les deux débits Q_1 et Q_2 sont testés.

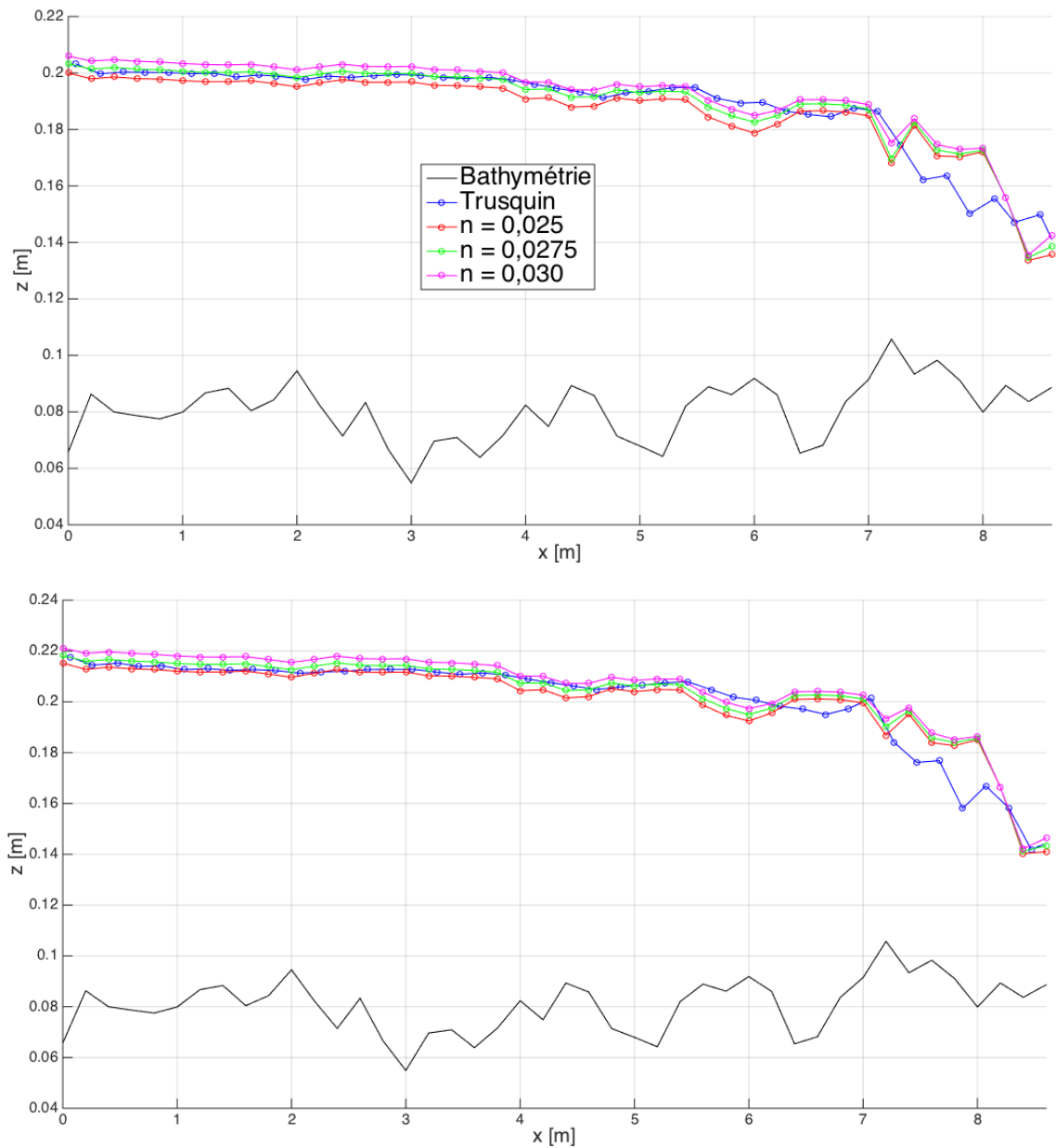


FIGURE 5.6 – Niveau d'eau obtenu avec différents Manning : en haut, $Q_1 = 6 \left[\frac{l}{s} \right]$ et en bas, $Q_2 = 8 \left[\frac{l}{s} \right]$

On observe que le niveau d'eau du trusquin se situe en général entre les niveaux d'eau obtenus avec le modèle numérique pour un coefficient de Manning de $0.025 \left[\frac{s}{m^{1/3}} \right]$ et $0.03 \left[\frac{s}{m^{1/3}} \right]$. Autour de $x = 6 \text{ [m]}$, le niveau d'eau mesuré est au-dessus du niveau calculé pour $n = 0,03 \left[\frac{s}{m^{1/3}} \right]$, ce qui voudrait dire que le canal est particulièrement rugueux à cet endroit. En effet, celui-ci n'a pas forcément la même rugosité partout car la pose du béton de surface a été faite manuellement, rendant le lissage pas spécialement uniforme sur toute la longueur du canal. De plus, vers la fin du canal, les niveaux d'eau obtenus par le modèle numérique et celui mesuré au trusquin ne sont pas en accord. Ceci serait plutôt dû à la difficulté de mesurer le niveau avec le trusquin. En effet, cette zone du canal est fort turbulente, avec des vagues qui se forment, donc l'hypothèse (faite à la section 5.2.1) d'un niveau d'eau constant pour chaque section du canal n'est plus réaliste dans cette zone du canal. En outre, le modèle

numérique simule l'écoulement en 1D ne prenant pas en compte les variations du niveau d'eau dans le sens transversal.

Influence de la variation de l'alimentation sur le niveau d'eau

Comme discuté à la section 3.5, l'alimentation du canal n'est pas totalement stable et tend à diminuer en fonction du temps. A l'aide du modèle numérique "Augmented Roe's Scheme with energy balance", il est possible d'estimer l'influence de la variation du débit sur le niveau d'eau dans le canal.

Une variation maximale de $0.15 \left[\frac{L}{s}\right]$ a été enregistrée durant 3 minutes pour les débits Q_1 et Q_2 (voir section 3.5). Au vu de la section précédente, un coefficient de Manning de $0.0275 \left[\frac{s}{m^{1/3}}\right]$ est retenu pour les simulations avec le modèle numérique.

Les résultats de la différence de niveau d'eau pour une baisse de $0.15 \left[\frac{L}{s}\right]$ à partir d'un débit $Q_1 = 6 \left[\frac{L}{s}\right]$ et $Q_2 = 8 \left[\frac{L}{s}\right]$ sont illustrés à la figure [5.7] sur toute la longueur du canal. Pour un débit initial de 6 et 8 $\left[\frac{L}{s}\right]$, on observe une diminution maximale du niveau d'eau de 1.3 [mm] et 1.6 [mm] respectivement. On remarque sur la figure [5.7] que la plus grande diminution de la hauteur d'eau se situe en $x = 7.2$ [m] où on retrouve la section la plus étroite. En général, on observe une différence de 1 [mm] sur toute la longueur du canal. Cette différence doit être prise en compte lorsque l'on discute de la précision des modèles Photoscan.

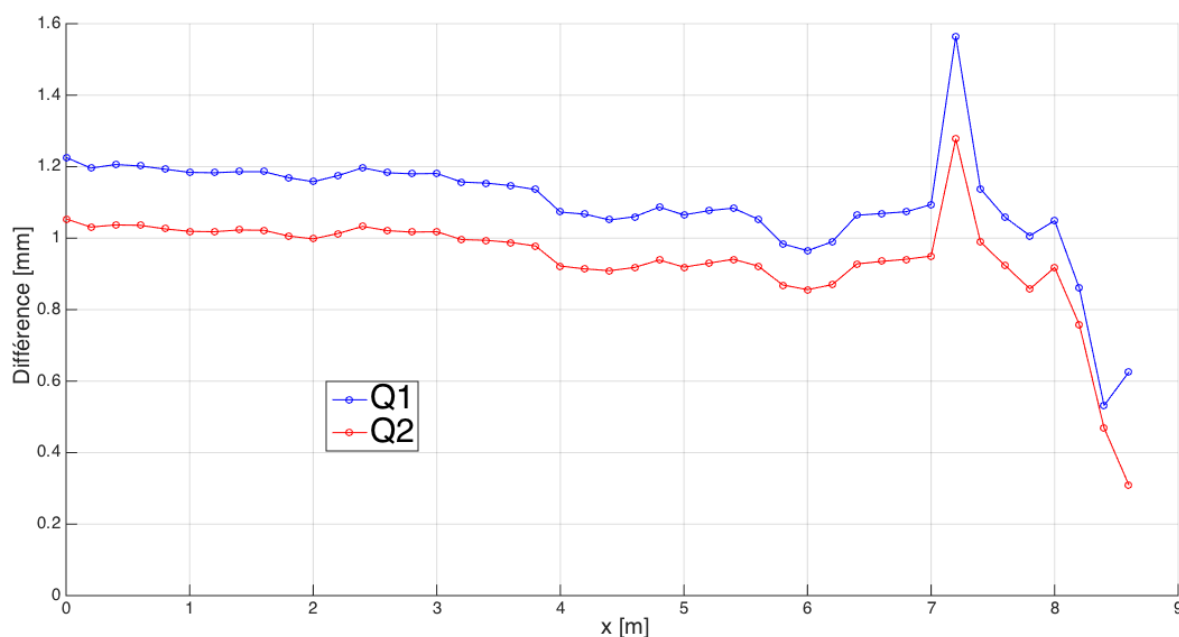


FIGURE 5.7 – Différence du niveau d'eau sur toute la longueur du canal pour une diminution du débit de $0.15 \left[\frac{L}{s}\right]$ à partir des débits Q_1 et Q_2

5.2.3 Modèles Photoscan

L'objectif final qui est de mesurer le niveau de la surface libre d'écoulement en bathymétrie complexe par photogrammétrie est présenté dans cette section. Comme déjà expérimenté lors des tests avec de l'eau au repos, la texture de l'eau claire doit être modifiée pour que le logiciel reconnaisse la surface de l'eau. Premièrement, les différentes textures expérimentées sont décrites. Ensuite, une présentation et une comparaison des résultats "bruts" sont discutées. Finalement, trois méthodes pour traiter les résultats "bruts" sont présentées.

Textures

Au vu des essais au repos, trois textures ont été retenues en plus de l'eau claire. La figure [5.8] illustre les textures expérimentées.

- **Eau claire**

Comme pour les essais dans le bac, des essais ont été effectués avec de l'eau claire. Cette fois, l'objectif est double : mettre en évidence le problème lié à la transparence de l'eau et avoir une première approche des difficultés de l'eau en mouvement. De plus, les modèles obtenus avec l'eau claire sont des bons modèles de comparaison pour valider la qualité des autres textures.

- **Colorant**

La texture au colorant a directement été mise de côté vu qu'elle demandait un plus grand investissement logistique et budgétaire que la boue pour être expérimentée dans le canal pour à priori, un résultat similaire (colorer des centaines de litres d'eau a un certain coût).

- **Frigolite**

L'eau étant maintenant en mouvement, la frigolite est entraînée par l'écoulement. Une solution pour éviter l'entraînement des billes de frigolite par l'écoulement est de placer une grille à l'aval de l'écoulement. La grille est positionnée en $x = 6,2$ [m] ce qui n'est pas optimal car elle modifie légèrement l'écoulement et le niveau de l'eau. Mais grâce à cette grille, les billes sont bloquées formant une couche statique à la surface de l'eau (optimale pour le logiciel Photoscan).

- **Pliolite**

Concernant la pliolute, il est plus difficile de la bloquer à l'aval car ses grains sont très fins. Un dispositif pour éviter qu'elle soit entraînée par l'écoulement causerait de trop grandes modifications du niveau d'eau.

Une technique allant à l'encontre des recommandations de [Micheletti *et al.*, 2015b] qui préconise que le sujet photographié soit statique est expérimentée. L'idée est de prendre les photographies en suivant une couche de pliolute préalablement déposée sur l'eau.

- **Boue**

Au début du canal, de la terre est diluée régulièrement pendant que les photos sont prises. Le débit est suffisant pour qu'un mélange d'eau/terre se forme et une eau boueuse opaque se forme très vite dans le canal. L'écoulement est légèrement modifié par l'ajout de terre mais cette texture écologique et économique est testée car elle semble facilement applicable à un cas de rivière sur le terrain.

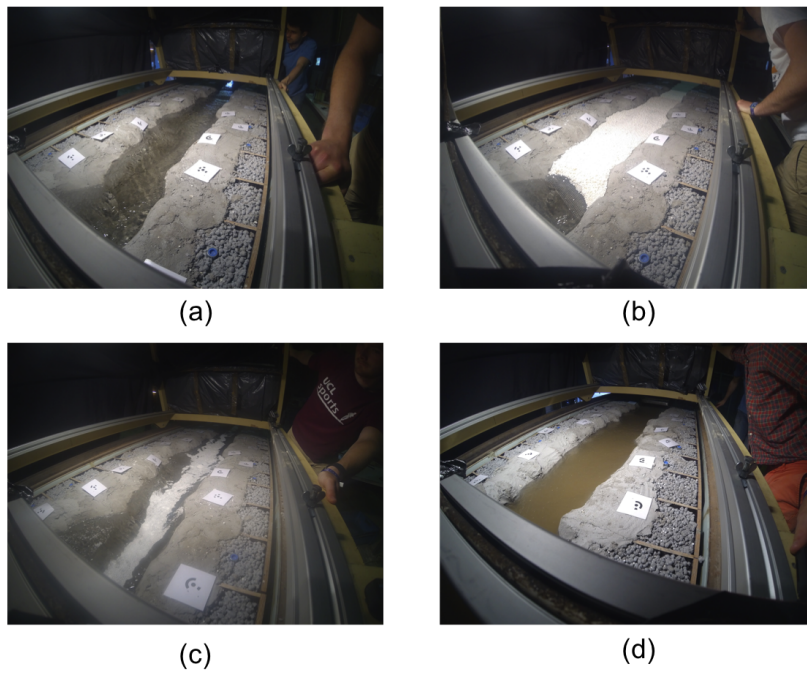


FIGURE 5.8 – Illustration des différentes textures dans le modèle réduit (a) Eau claire (b) Frigolite (c) Pliolite (d) Boue

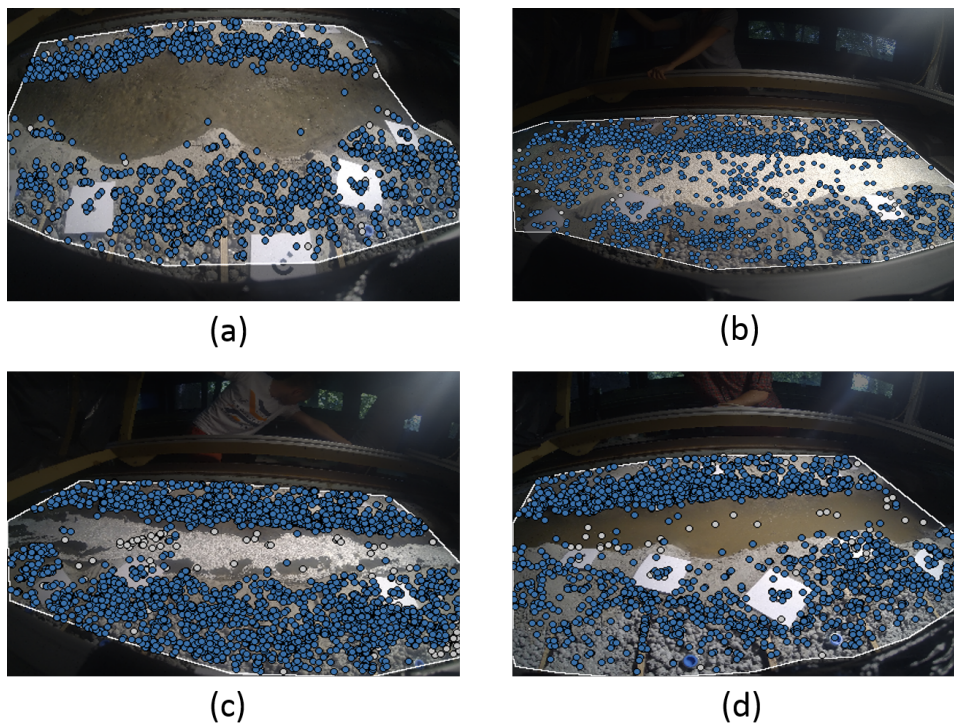


FIGURE 5.9 – Détection de points par Photocan pour chaque texture (a) Eau claire (b) Frigolite (c) Pliolite (d) Boue

La figure [5.9] donne un premier aperçu de l'efficacité de chaque texture à être reconnue par Photoscan et met en évidence les points utilisés pour l'alignement. La surface de l'eau claire n'a pas beaucoup de points reconnus tandis que la frigolite montre des résultats prometteurs. La boue et la pliolite semblent avoir des résultats intermédiaires avec un nombre limité de points reconnus. Il est important de noter que cinq autres angles de vue sont mis à disposition pour Photoscan.

Présentation et Comparaisons des résultats "bruts"

Comme pour la bathymétrie, au minimum trois modèles Photoscan ont été générés pour chaque texture. Les modèles les plus précis ont été retenus (c'est à dire, ceux se rapprochant les plus au modèle de la bathymétrie sur leurs rives).

Pour présenter les résultats, les modèles numériques d'élévation (MNE) des modèles Photoscan de chaque texture seront exposés pour donner une vue générale. Puis, deux coupes transversales comparant les différentes méthodes seront faites de façon à mieux visualiser les avantages et inconvénients de chaque approche.

- **Modèles numériques d'élévation de chaque expérience**

En faisant une soustraction entre le MNE avec de l'eau et celui de la bathymétrie, la hauteur d'eau dans tout le canal est obtenue. Ceci est fait pour chaque texture et est présenté dans la figure [5.10] pour le débit Q_2 . La figure équivalente pour le débit Q_1 se trouve à l'annexe E.1

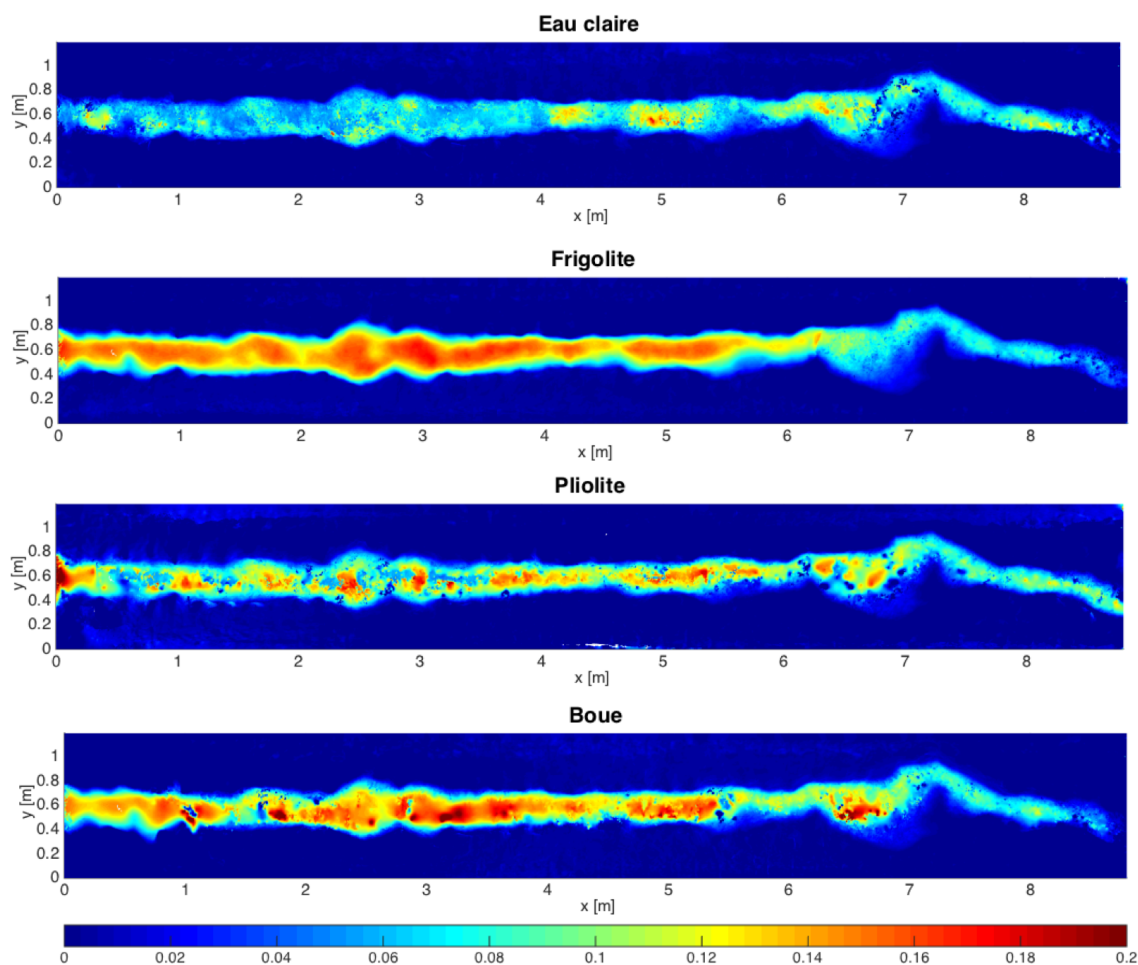


FIGURE 5.10 – MNE de la hauteur de la surface libre sur tout le canal pour $Q_2 = 8 \left[\frac{L}{s} \right]$

Au premier coup d’œil, on observe une certaine irrégularité du niveau de la surface libre pour les MNE de l’eau claire, de la pliolute et de la boue. Le modèle de la frigolite offre, par contre, un résultat continu (les transitions du niveau de la surface libre sont moins marquées). Il ne faut pas oublier de noter qu’une grille est disposée en $x = 6,2 \text{ [m]}$ et qu’à l’aval de cette position, l’expérience est équivalente à celle de l’eau claire.

Comme attendu, la pliolute ne semble pas avoir été reconnue partout sur le canal¹. La difficulté de Photoscan à analyser les photos de la pliolute est évidente.

On observe que le modèle de l’eau claire est celui qui capte le niveau le plus bas. La boue semble quant à elle plus efficace que l’eau claire et la pliolute, bien que des zones soient plus hautes que celles obtenues avec le modèle de la frigolite (ce qui semble incorrect). L’expérience n’est donc pas parfaite. Afin de mieux comprendre et visualiser ces irrégularités, il est intéressant de comparer des coupes transversales.

1. Pour rappel, une couche de pliolute est en mouvement à la surface de l’eau et les images sont prises en suivant cette couche.

- **Coupes transversales**

Deux coupes transversales (en $x = 2,3$ [m] et $x = 5,1$ [m]) sont présentées à la figure [5.11].

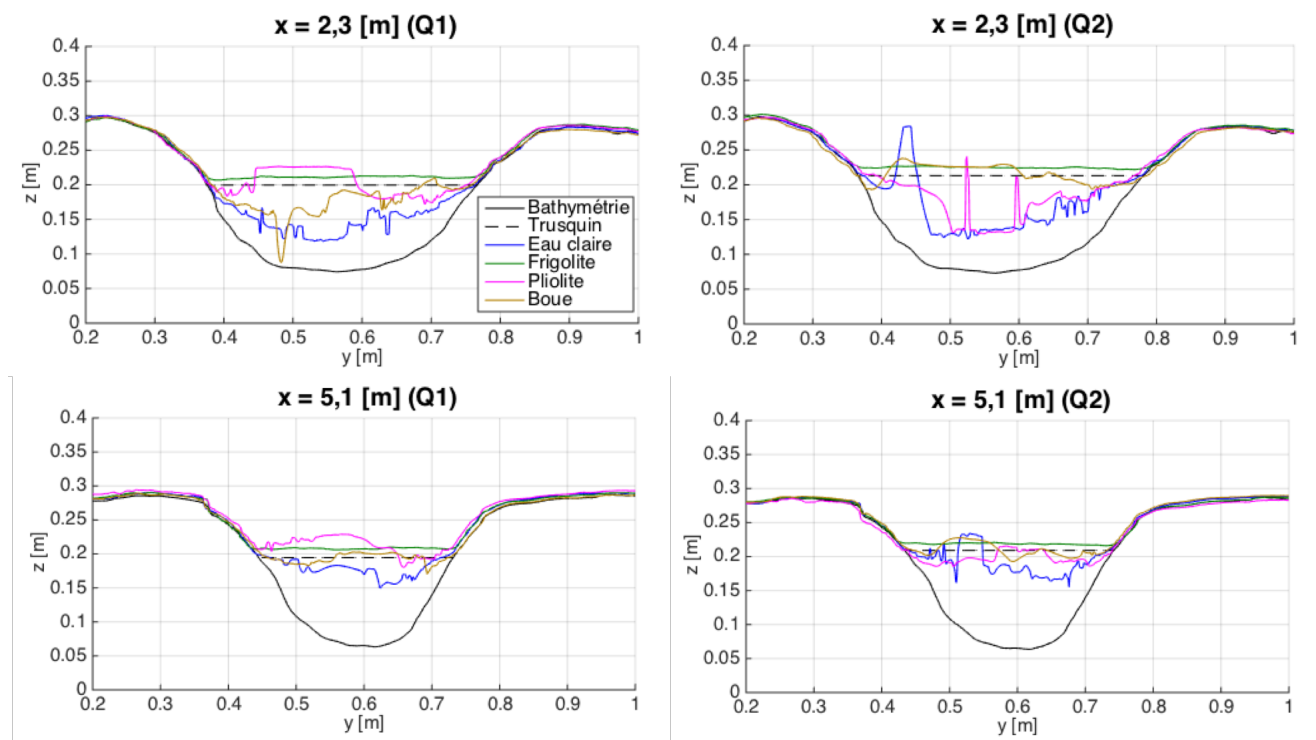


FIGURE 5.11 – Coupes transversales en $x = 2,3$ [m] et $x = 5,1$ [m] pour $Q_1 = 6$ [$\frac{L}{s}$] et $Q_2 = 8$ [$\frac{L}{s}$]

On remarque que l'eau claire, en bleu sur les graphes, est très instable et sa hauteur est généralement trop basse par rapport à la hauteur mesurée avec le trusquin, en pointillés noirs. Ceci est sans surprise car ces résultats avaient déjà été observés avec l'eau au repos. La pliolite est très aléatoire et imprévisible. Il semblerait que le logiciel a du mal avec cette technique et qu'il détecte par endroit un niveau plus élevé. La boue est loin d'être parfaite mais semble être une alternative plus fiable avec un niveau d'eau moins variable et plus proche du niveau obtenu avec le trusquin. La frigolite a un niveau d'eau constant mais légèrement plus haut que celui du trusquin. La différence est plus ou moins d'un centimètre. Une vérification de cette différence a été faite avec le trusquin et un centimètre environ est également mesuré.

Traitements des données

La difficulté avec les résultats "bruts" est d'avoir une homogénéité du niveau de la surface libre (à part pour le modèle de la frigolite). Trois méthodes ont alors été imaginées :

- **1° Méthode :**

La première méthode consiste à faire la moyenne du niveau de la surface libre. La difficulté réside dans la recherche de l'intervalle transversal à prendre pour faire la moyenne. La solution est d'utiliser les mesures du trusquin. En effet, en connaissant la hauteur d'eau dans la section, et en trouvant les deux points (a_1 et a_2) où le modèle Photoscan de la bathymétrie intercepte cette hauteur d'eau, un intervalle transversale $[y_{a_1}; y_{a_2}]$ est connu. La méthode prend alors la moyenne des données des différents modèles sur cet intervalle (voir figure [5.12]).

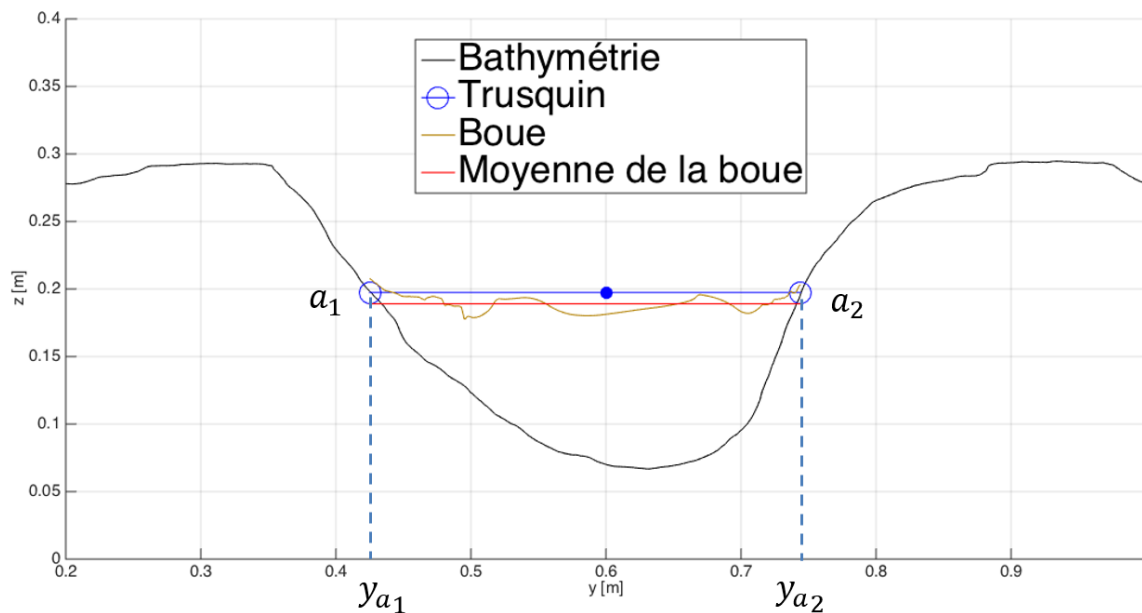
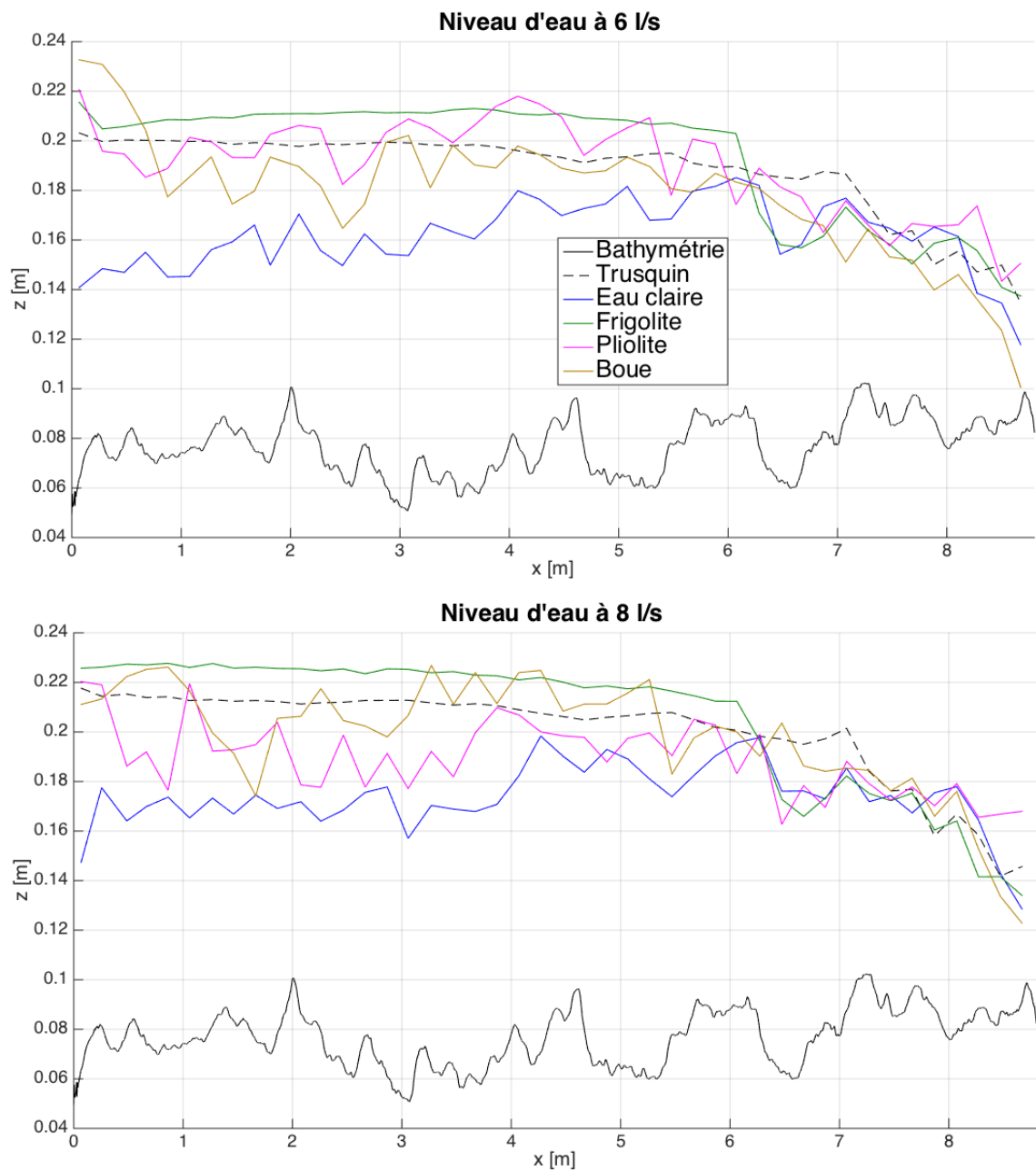


FIGURE 5.12 – Illustration de la Méthode 1

Le défaut de cette méthode est que l'on ne peut faire les moyennes que sur les sections où l'on connaît déjà le niveau d'eau à l'aide du trusquin. Un des objectifs principaux de ce travail est de mesurer le niveau de la surface libre par photogrammétrie sans une instrumentation supplémentaire. Il est donc dommage de seulement pouvoir faire une moyenne du niveau d'eau pour les sections où l'on connaît déjà ce niveau précisément avec le trusquin.

Cette méthode a été utilisée pour les 44 sections mesurées au trusquin. La figure [5.13] montre les deux vues longitudinales (une pour chaque débit) qui en résulte. Il est aussi possible d'obtenir une moyenne des erreurs absolues entre le niveau calculé avec cette méthode et celui mesuré au trusquin pour les 44 sections. Cette moyenne est mise à disposition dans le tableau [5.3].

On observe que les modèles sont loin d'être parfaits. Ces figures et tableaux ne font que confirmer toutes les remarques faites auparavant. L'eau claire, la boue et la pliolite ont des niveaux d'eau qui fluctuent trop transversalement, ce qui ne représente évidemment pas la réalité. La moyenne qui résulte de ces fluctuations est donc trop haute ou trop basse. De plus, les photos de la boue ont été prises à partir de $x = 0,5$ [m] environ, pour avoir de la place pour faire le mélange eau/terre. Il en résulte que le niveau de la boue est faussé au début du canal, problème clairement visible pour l'expérience à $6 \left[\frac{l}{s}\right]$. La vue longitudinale de la frigidite résume bien cette méthode : une approche utopique et pleine de défauts. Le niveau d'eau ne fluctue pas trop sur les six premiers mètres mais il est trop élevé. Après la grille, le niveau chute et rejoint l'imperfection du reste.

FIGURE 5.13 – Vues longitudinales du niveau de la surface libre pour $Q_1 = 6 \left[\frac{l}{s}\right]$ et $Q_2 = 8 \left[\frac{l}{s}\right]$

Méthode utilisée	$ \bar{e}_{Q_1} [cm]$	$ \bar{e}_{Q_2} [cm]$
Eau claire	2,87	2,86
Frigolite	1,07	0,95
Pliolite	0,87	1,85
Boue	1,26	0,77

TABLE 5.3 – Tableau montrant les moyennes des erreurs absolues de chaque méthode pour $Q_1 = 6 \left[\frac{l}{s}\right]$ et $Q_2 = 8 \left[\frac{l}{s}\right]$

- **2° Méthode :**

Le principe est de trouver la position du point b_1 sur la rive droite et du point b_2 sur la rive gauche où les modèles divergent de la bathymétrie en supposant que ces endroits correspondent à l'interception entre le niveau de l'eau et les rives. Dès qu'une différence entre le modèle et la bathymétrie dépasse un certain seuil (par exemple, un centimètre), on note la coordonnée transversale y_b et le niveau z_b du modèle y correspondant. Le procédé est appliqué depuis l'extrémité de la rive gauche et de la droite. Le niveau est alors obtenu en faisant la moyenne entre le niveau z_{b_1} et z_{b_2} du modèle en y_{b_1} et en y_{b_2} . La méthode est illustrée dans la figure [5.14].

L'avantage de cette méthode est qu'elle est indépendante d'une mesure externe, contrairement à la première méthode. Par contre, elle suppose que sur les rives, les modèles sont très précis et proches de la bathymétrie. Le seuil de différence est à régler en fonction de la précision des modèles. L'annexe E.2 illustre une section où la méthode ne fonctionne pas. Malheureusement, un trop grand nombre de sections des modèles ont des défauts sur leurs rives et la méthode n'est donc pas applicable sur l'entièreté du canal.

- **3° Méthode :**

La troisième méthode est similaire à la seconde. La seule différence est qu'au lieu de faire la moyenne entre le niveau du modèle en y_{b_1} et en y_{b_2} , le niveau est obtenu en faisant la moyenne sur tous les points du modèle compris dans l'intervalle $[y_{b_1}; y_{b_2}]$. La figure [5.14] expose également cette méthode.

Cette méthode est confrontée au même problème que la méthode précédente.

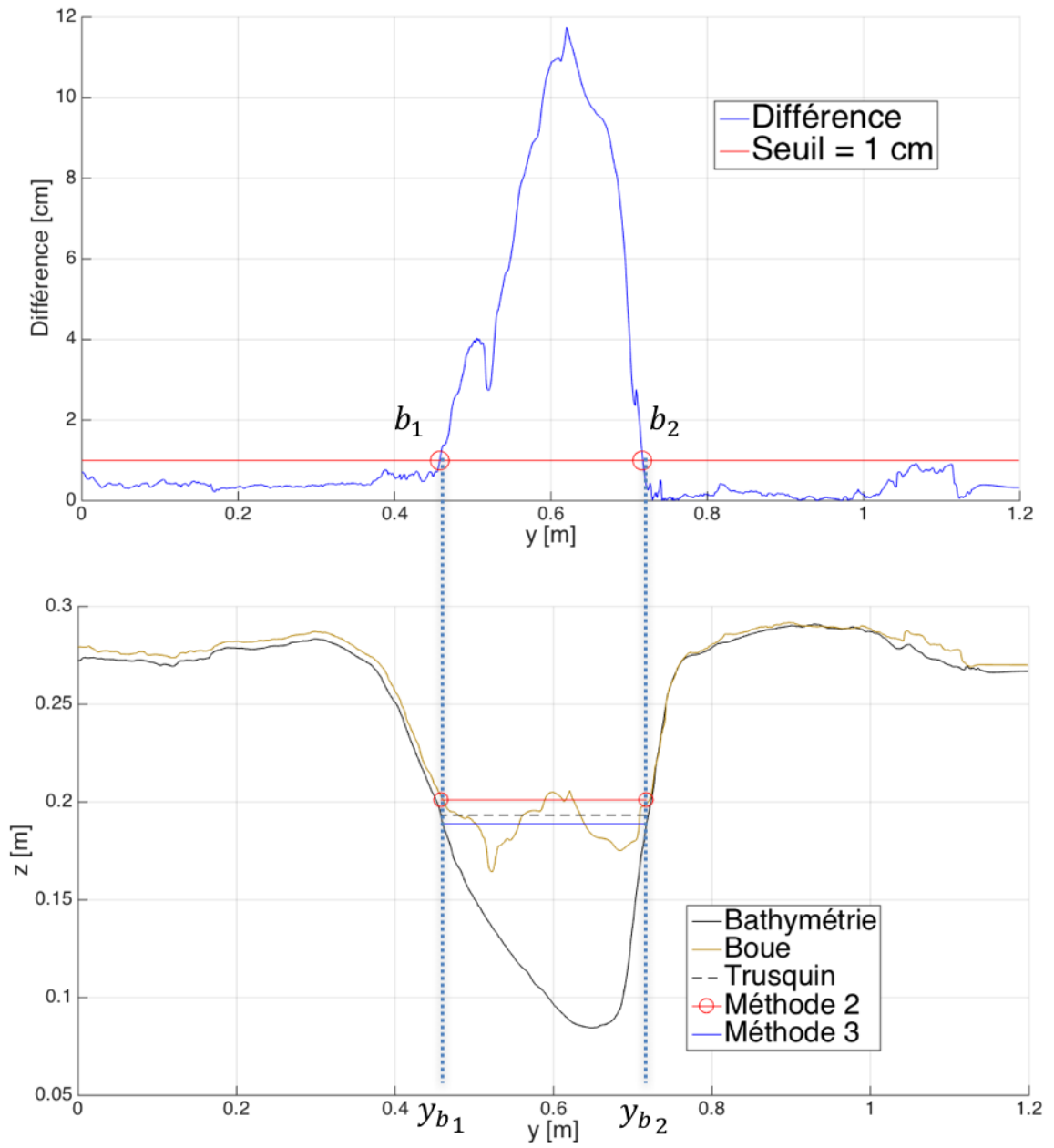


FIGURE 5.14 – Illustration de la Méthode 2 et 3

5.2.4 Source d'erreurs

Avec l'ajout de l'eau dans le canal, de nouvelles sources d'erreurs supplémentaires s'additionnent à celles déjà présentées à la section 4.5 :

- **Variation de l'alimentation du canal**

Les variations de l'alimentation du canal ont une influence de l'ordre du millimètre sur le niveau de la surface libre (voir section 5.2.2).

- **Précision des mesures du trusquin**

La précision des mesures au trusquin sont également de l'ordre du millimètre (voir annexe B.3).

- **Les fuites sur les côtés du modèle réduit**

Une faible partie de l'écoulement ne passe pas dans le modèle réduit de la rivière. En effet, certaines fuites sont présentes à l'amont du canal et de l'eau s'écoule entre les parois du canal préexistant et le modèle réduit. Cette quantité d'eau n'a jamais été quantifiée mais elle est minime par rapport au débit dans la rivière. Ces fuites influencent de toute façon seulement les résultats du modèle numérique de la section 5.2.2.

Recherches futures

Ce travail n'est, en aucun cas, une finalité et diverses pistes mériteraient d'être explorées dans des recherches futures. Le dispositif mis en place peut être perfectionné, augmentant ainsi la qualité et la reproductibilité des expériences. Les méthodes présentées dans ce travail sont à améliorer et il serait intéressant de les étendre au travail sur le terrain. De nouvelles méthodes sont à expérimenter en laboratoire concernant la mesure de la surface libre en écoulement permanent et le procédé devra être repensé afin de permettre la mesure de la surface libre d'écoulements transitoires.

Dispositif

Tout d'abord, la précision de modèles créés avec un logiciel spécialisé dans la photogrammétrie dite "close-range" (par exemple, PhotoModeler) pourrait être comparée avec celle obtenue dans ce travail avec le logiciel Agisoft Photoscan.

Au niveau du dispositif d'acquisition d'images, il serait intéressant de faire des tests comparatifs pour connaître l'influence des paramètres comme la luminosité, le nombre et l'angle de points de vue, la distance par rapport au canal à laquelle placer les caméras et même le recouvrement par rapport à la précision des modèles. Mais aussi une étude précise sur la différence de précision d'un appareil photo à un autre.

Certaines fonctions du logiciel Agisoft Photoscan n'ont pas été creusées en profondeur comme la création d'un modèle numérique de terrain à partir du maillage ou bien l'encodage des coordonnées de la position des caméras.

Autres textures

D'un point de vue des textures, plusieurs ont déjà été expérimentées dans ce travail mais aucune n'a permis d'obtenir précisément la surface libre quand l'eau est mise en mouvement. Deux pistes semblent ouvertes :

- Continuer à chercher d'autres textures qui conviendraient mieux aux exigences de la photogrammétrie (aucun reflet, scène statique, texture opaque, etc.).
- Développer des méthodes pour détecter à quels endroits sur les rives le modèle diffère de celui de la bathymétrie afin d'estimer le niveau d'eau.

Procédé d'acquisition

Un autre procédé plus coûteux avait été envisagé au début de ce travail pour être certain d'avoir une scène statique. L'idée était d'avoir un nombre suffisant de caméras synchronisées entre elles pour

couvrir l'entièreté du canal. Les images sont alors capturées exactement au même moment et le logiciel n'a donc plus de problème pour détecter des zones communes vu que les images sont du même instant. La technique de saupoudrer la surface libre avec de la pliolite obtiendrait des résultats tels que ceux obtenus dans l'eau au repos.

Une location de caméras Go Pro pourrait être envisagée dans le futur en ayant préalablement étudié le nombre de caméras nécessaires pour couvrir le canal ainsi que la précision de la synchronisation entre celles-ci (car un décalage de 0.5 seconde pourrait déjà changer complètement l'aspect de la scène). Pour diminuer le nombre de caméras nécessaires, le canal pourrait être traité en plusieurs parties qui seraient jointes ultérieurement sur le logiciel de photogrammétrie.

Le grand avantage de ce procédé est qu'il permettrait de traiter également les écoulements transitoires.

Changement de la bathymétrie du canal

Une fois la technique maîtrisée, il serait intéressant d'en chercher ses limites en modifiant l'écoulement. Par exemple, il est possible de changer facilement la pente du canal à l'aide des vérins hydrauliques situés à l'amont sous les appuis du canal. Une autre façon pourrait être de créer de nouveaux modules (comme expliqué dans le chapitre 2) et de les intercaler dans le modèle déjà existant. Des études sur l'influence de sédiments sur la surface libre pourraient également être envisagées.

Élargir la technique sur le terrain

Enfin, élargir la technique à des cas sur le terrain prendrait son sens. En effet, dans ce travail, la technique est présentée dans le cadre expérimental. D'autres problématiques qui n'existaient pas dans ce travail comme la végétation ou la protection de l'écosystème devront être prises en compte dans cette étude.

Conclusion

Ce travail présente un dispositif expérimental pour la mesure du niveau de la surface libre d'écoulement en bathymétrie complexe à l'aide de la photogrammétrie. L'application de la photogrammétrie dans le domaine de l'hydraulique est actuellement au cœur de nombreuses recherches. En effet, la transparence de l'eau et son caractère dynamique rendent les modèles photogrammétriques inexploitable. Différentes techniques/méthodes sont expérimentées dans ce travail pour trouver une solution face à ce problème car la photogrammétrie est vue comme un moyen efficace et bon marché pour l'acquisition de données à grande et petite échelle.

La conception du modèle réduit d'une rivière fut une étape préliminaire non négligeable dont on espère que son aspect modulable sera utilisé pour des travaux de recherches futurs.

Le dispositif mis en place permet de générer des modèles numériques d'élévation (MNE) à partir de six angles de vue différents, d'obtenir la bathymétrie avec une précision de l'ordre de quelques millimètres et de comparer les résultats obtenus avec des textures différentes.

Dans un premier temps, les tests effectués avec de l'eau au repos ont permis de mettre en évidence les avantages et inconvénients de différentes textures ajoutées à l'eau pour améliorer la qualité des modèles photogrammétriques pour, ensuite, les appliquer à des écoulements permanents.

Lorsque l'eau est mise en mouvement, de nouvelles difficultés sont apparues et les textures utilisées pour les essais au repos ont dû être adaptées. Par manque de résultats obtenus avec ces textures, une méthode permettant de détecter le niveau d'eau en comparant la bathymétrie avec les modèles sous eau au niveau des rives a été expérimentée.

La technique de photogrammétrie exposée dans ce travail ne permet pas de mesurer avec exactitude le niveau de la surface libre d'un écoulement permanent mais elle apporte des premiers éléments de réponses qui devront être perfectionnés et développés dans des recherches futures.

Bibliographie

- AGISOFT, L. (2016a). Agisoft photoscan python reference : Professional edition.
- AGISOFT, L. (2016b). Agisoft photoscan user manual : Professional edition.
- BELIN, M. W., CAMBIER, J. L., NABORS, J. R. et RATLIFF, C. D. (1995). Par corneal topography system (par cts) : the clinical application of close-range photogrammetry. *Optometry & Vision Science*, 72(11):828–837.
- BERTIN, S. et FRIEDRICH, H. (2013). Measurement of gravel-bed topography : Evaluation study applying statistical roughness analysis. *Journal of Hydraulic Engineering*, 140(3):269–279.
- BOUSMAR, D. et FRASELLE, Q. (2004). Canal à lit composé et programme hydrocap. descriptif, mode d’emploi. *Université Catholique de Louvain, École Polytechnique de Louvain, Louvain-la-Neuve*.
- BURTCH, R. (2004). History of photogrammetry. *Notes of the Center for Photogrammetric Training*.
- BUTLER, J., LANE, S., CHANDLER, J. et PORFIRI, E. (2002). Through-water close range digital photogrammetry in flume and field environments. *The Photogrammetric Record*, 17(99):419–439.
- CHONG, A. K. et CROFT, H. G. (2009). A photogrammetric application in virtual sport training. *The Photogrammetric Record*, 24(125):51–65.
- DEPIEREUX, L. et GODTS, S. (2015-2016). Écoulement en canal à lit composé : mesure du transport de sédiments fins vers les plaines d’inondations. *Master Thesis, Université catholique de Louvain*.
- DI STEFANO, C., FERRO, V., PALMERI, V. et PAMPALONE, V. (2017). Measuring rill erosion using structure from motion : A plot experiment. *CATENA*, 156:383–392.
- DRAP, P., SEINTURIER, J., SCARADOZZI, D., GAMBOGI, P., LONG, L. et GAUCH, F. (2007). Photogrammetry for virtual exploration of underwater archeological sites. *In Proceedings of the 21st international symposium, CIPA*, page 1e6.
- FERREIRA, E., CHANDLER, J., WACKROW, R. et SHIONO, K. (2017). Automated extraction of free surface topography using sfm-mvs photogrammetry. *Flow Measurement and Instrumentation*, 54:243–249.
- FONSTAD, M. A., DIETRICH, J. T., COURVILLE, B. C., JENSEN, J. L. et CARBONNEAU, P. E. (2013). Topographic structure from motion : a new development in photogrammetric measurement. *Earth Surface Processes and Landforms*, 38(4):421–430.
- FRANZINI, F., SOARES, S. et CAPART, H. (2016). Measurement of the free-surface elevation in a steady flow in complex topography using photogrammetry. *In River Flow 2016*, pages 581–587. CRC Press.
- FRANZINI, F. et SOARES-FRAZÃO, S. (2016). Efficiency and accuracy of lateralized hll, hlls and augmented roe’s scheme with energy balance for river flows in irregular channels. *Applied Mathematical Modelling*, 40(17):7427–7446.
- GOSH, S. (1981). History of photogrammetry. *Laval University, Canada*.

- GUIDI, G., RUSSO, M., ERCOLI, S., REMONDINO, F., RIZZI, A. et MENNA, F. (2009). A multi-resolution methodology for the 3d modeling of large and complex archeological areas. *International Journal of Architectural Computing*, 7(1):39–55.
- HAN, B. et ENDRENY, T. A. (2014). River surface water topography mapping at sub-millimeter resolution and precision with close range photogrammetry : Laboratory scale application. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 7(2):602–608.
- JAMES, M. R. et ROBSON, S. (2014). Mitigating systematic error in topographic models derived from uav and ground-based image networks. *Earth Surface Processes and Landforms*, 39(10):1413–1420.
- JAVERNICK, L., BRASINGTON, J. et CARUSO, B. (2014). Modeling the topography of shallow braided rivers using structure-from-motion photogrammetry. *Geomorphology*, 213:166–182.
- KNYAZ, V., ZHELTOV, S. Y. *et al.* (2008). Photogrammetric techniques for dentistry analysis, planning and visualisation. In *ISPRS congress Beijing*, volume 37.
- LANE, S., CHANDLER, J. et PORFIRI, K. (2001). Monitoring river channel and flume surfaces with digital photogrammetry. *Journal of Hydraulic Engineering*, 127(10):871–877.
- LANE, S., JAMES, T. et CROWELL, M. (2000). Application of digital photogrammetry to complex topography for geomorphological research. *The Photogrammetric Record*, 16(95):793–821.
- LERMA, J. L., NAVARRO, S., CABRELLES, M. et VILLAVERDE, V. (2010). Terrestrial laser scanning and close range photogrammetry for 3d archaeological documentation : the upper palaeolithic cave of parpalló as a case study. *Journal of Archaeological Science*, 37(3):499–507.
- MACQ, J.-F. (2015-2016). Mesures topographiques par photogrammétrie à partir d’un drone : application à la rivière cavaillon en haïti. *Master thesis, Université catholique de Louvain*.
- MATTHEWS, N. A. (2008). *Aerial and close-range photogrammetric technology : providing resource documentation, interpretation, and preservation*.
- MICHELETTI, N., CHANDLER, J. H. et LANE, S. N. (2015a). Investigating the geomorphological potential of freely available and accessible structure-from-motion photogrammetry using a smartphone. *Earth Surface Processes and Landforms*, 40(4):473–486.
- MICHELETTI, N., CHANDLER, J. H. et LANE, S. N. (2015b). Structure from motion (sfm) photogrammetry.
- MITCHELL, H. et NEWTON, I. (2002). Medical photogrammetric measurement : overview and prospects. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 56(5):286–294.
- MURILLO, J. et GARCÍA-NAVARRO, P. (2014). Accurate numerical modeling of 1d flow in channels with arbitrary shape. application of the energy balanced property. *Journal of Computational Physics*, 260:222–248.
- PROSDOCIMI, M., BURGUET, M., DI PRIMA, S., SOFIA, G., TEROL, E., COMINO, J. R., CERDÀ, A. et TAROLLI, P. (2017). Rainfall simulation and structure-from-motion photogrammetry for the analysis of soil water erosion in mediterranean vineyards. *Science of the Total Environment*, 574:204–215.
- SCHENK, T. (2005). Introduction to photogrammetry. *The Ohio State University, Columbus*.
- WESTOBY, M., BRASINGTON, J., GLASSER, N., HAMBREY, M. et REYNOLDS, J. (2012). ‘structure-from-motion’ photogrammetry : A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*, 179:300–314.
- WOODGET, A., CARBONNEAU, P., VISSER, F. et MADDOCK, I. (2015). Quantifying submerged fluvial topography using hyperspatial resolution uas imagery and structure from motion photogrammetry. *Earth Surface Processes and Landforms*, 40(1):47–64.

Table des figures

2.1	Canal préexistant	10
2.2	Dessin d'une section	10
2.3	Vue 3D de la rivière (49 sections espacées de 20 cm)	11
2.4	Découpage des sections avec une scie sauteuse	12
2.5	Représentation 3D d'un module	12
2.6	(a) Exemple d'un module de coffrage avec armatures longitudinales (b) Détail de l'armature longitudinale avec la douille de levage et son étrier	13
2.7	Pose du béton	14
2.8	Levage d'un bloc	15
2.9	Modèle final	16
3.1	(a) Points de liaison (b) Nuage de points (c) Maillage (d) MNE	19
3.2	(a) Exemple d'un marqueur 12 bit avec une cible de 10 [mm] (b) Marqueur fixé sur les rives du modèle réduit	19
3.3	(a) Création du masque sur Photoscan (b) Masque brut (c) Création du nuage de points dans le masque	20
3.4	Système d'axes	21
3.5	(a) Chariot de prise de vue (b) Chambre noire	22
3.6	(a) Modèle avec courbure (b) Modèle plane	24
3.7	Disposition des caméras	25
3.8	Vue 2D : Disposition des caméras	25
3.9	Recouvrement frontal avec l'avancement et la couverture au sol	26
3.10	Variation de trois débits ($Q = 3, 6 \text{ et } 8 \left[\frac{L}{s}\right]$) pendant trois minutes	27
4.1	Bathymétrie d'une section du canal obtenue avec le laser Keyence en $x = 3,07 \text{ [m]}$	29
4.2	Vue 3D de la bathymétrie du canal obtenu avec la sonde Keyence (1320 points)	30
4.3	Coupes transversales de la bathymétrie mettant en évidence la précision des modèles	31
4.4	Bathymétrie totale du canal avec les deux méthodes et leur différence ($Z_{Points\ de\ liaison} - Z_{Nuage\ de\ points}$)	32
4.5	Box plots de l'erreur par section pour les deux méthodes	33
4.6	Histogrammes de l'erreur pour les deux méthodes	34
4.7	Représentation du thalweg du modèle Photoscan et du laser Keyence	36
4.8	Régression linéaire des profils en long obtenue avec le modèle Photoscan et le laser Keyence	37
5.1	Illustration des différentes textures expérimentées : (a) Vide (b) Eau claire (c) Colorant (d) Boue (e) Frigolite (f) Pliolite	41

5.2	MNE du bac avec de l'eau claire, du colorant, de la boue, de la frigolite et de la pliolute pour une hauteur d'eau de 4,5 [cm] et 9 [cm]	42
5.3	Coupes transversales des bacs avec les différentes textures (en haut : h = 4,5 [cm] et en bas : h = 9 [cm])	43
5.4	En rouge, la surface utilisée pour le calcul de la moyenne du niveau de la surface libre	44
5.5	Mesures au trusquin de la surface libre pour les débits Q_1 et Q_2	46
5.6	Niveau d'eau obtenu avec différents Manning : en haut, $Q_1 = 6 \left[\frac{L}{s}\right]$ et en bas, $Q_2 = 8 \left[\frac{L}{s}\right]$	47
5.7	Différence du niveau d'eau sur toute la longueur du canal pour une diminution du débit de $0.15 \left[\frac{L}{s}\right]$ à partir des débits Q_1 et Q_2	48
5.8	Illustration des différentes textures dans le modèle réduit (a) Eau claire (b) Frigolite (c) Pliolute (d) Boue	50
5.9	Détection de points par Photoscan pour chaque texture (a) Eau claire (b) Frigolite (c) Pliolute (d) Boue	50
5.10	MNE de la hauteur de la surface libre sur tout le canal pour $Q_2 = 8 \left[\frac{L}{s}\right]$	52
5.11	Coupes transversales en $x = 2,3$ [m] et $x = 5,1$ [m] pour $Q_1 = 6 \left[\frac{L}{s}\right]$ et $Q_2 = 8 \left[\frac{L}{s}\right]$. . .	53
5.12	Illustration de la Méthode 1	54
5.13	Vues longitudinales du niveau de la surface libre pour $Q_1 = 6 \left[\frac{L}{s}\right]$ et $Q_2 = 8 \left[\frac{L}{s}\right]$	55
5.14	Illustration de la Méthode 2 et 3	57
A.1	Vue d'ensemble des sections déposées sur le sol après réorganisation	67
A.2	Illustration de la couche de finition	68
A.3	Rail de part et d'autre du canal	68
B.1	Station totale	69
B.2	(a) Vue sur l'ensemble de l'automate (b) Sonde Laser Keyence	70
B.3	Trusquin	70
B.4	Calcul de la pente du canal préexistant	71
B.5	Matrice de correction où chaque ligne correspond à une position en x [m] et chaque colonne à une position en y [mm]	71
C.1	Vue 3D de la bathymétrie du canal obtenu avec les points de liaison et le nuage de points	73
C.2	Illustration de la discrétisation plus grossière du laser par rapport à celle des modèles Photoscan	74
D.1	Modèle de volumes finis représentant l'écoulement	75
E.1	MNE du niveau de la surface libre sur tout le canal pour $Q_1 = 6 \left[\frac{L}{s}\right]$	77
E.2	Exemple d'une section où les méthodes 2 et 3 font défaut	78
F.1	Exemple d'un script Python	79

Annexe A

Illustrations du modèle réduit d'une rivière à bathymétrie complexe

A.1 Construction du modèle réduit

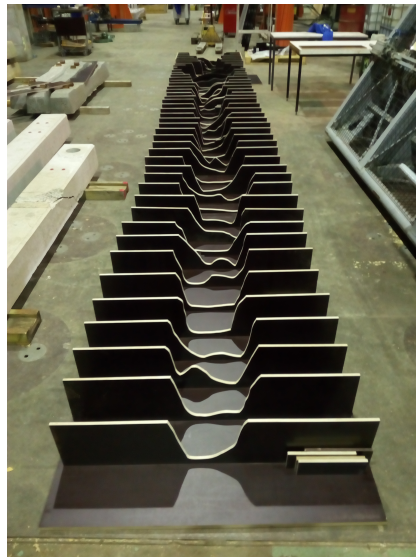


FIGURE A.1 – Vue d'ensemble des sections déposées sur le sol après réorganisation



FIGURE A.2 – Illustration de la couche de finition

A.2 Modèle réduit

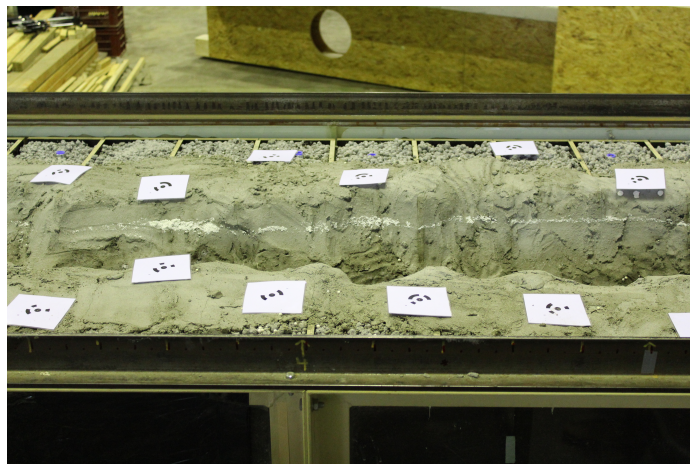


FIGURE A.3 – Rail de part et d'autre du canal

Annexe B

Instrumentation

B.1 Station totale topographique

La station totale est un appareil qui mesure les angles horizontaux et verticaux entre deux cibles, ainsi que la distance entre ces cibles. Un prisme réflecteur tétraédrique est placé à l'endroit que l'on désire mesurer. Cet appareil permet donc d'obtenir les coordonnées des points de référence (voir figure [B.1]).



FIGURE B.1 – Station totale avec un prisme ainsi que son support ¹

La station totale n'est pas la méthode idéale pour faire des mesures de topographie dans un modèle réduit. En effet, maintenir le prisme bien droit sur le modèle est une tâche assez compliquée. Ceci crée donc des erreurs de quelques millimètres qui, à l'échelle de ce travail, ne sont pas négligeables.

B.2 Laser Keyence

Le laser Keyence [LK-2000] permet de calculer la distance entre un obstacle et l'endroit où il émet son faisceau. Dans l'obtention de résultats de comparaison avec les modèles Photoscan, le laser Keyence est un outil efficace dont ses résultats sont présentés dans le chapitre sur la bathymétrie. Il est important de calibrer le système à une référence avant de commencer les mesures.

1. Image tirée du lien suivant : <http://www.btpmeasure.com/content/la-station-robotis%C3%A9e-leica-ts-12>

Pour calibrer ce système, le laser est amenée sur le point de référence numéro 1 dont ses coordonnées dans le référentiel présenté à la section 3.2 sont connues. Les coordonnées de l'automate en x, y et z sont notées. Connaissant les coordonnées de ce point dans les deux systèmes d'axes, un changement de repère est appliqué pour passer de l'un à l'autre.



(a)



(b)

FIGURE B.2 – (a) Vue sur l'ensemble de l'automate (b) Sonde Laser Keyence

B.3 Trusquin

Afin de mesurer le niveau de la surface libre sans perturber l'écoulement, une pointe de trusquin a été fixée sur l'automate. Le principe est d'approcher le plus possible la pointe de la surface de l'eau, jusqu'à formation d'un ménisque, en ayant initialement calibré le système à une référence comme lors de l'utilisation du laser. La précision de ce dispositif est de l'ordre du millimètre car le contrôle de la formation d'un ménisque de la pointe au contact avec l'eau se fait avec les yeux.



FIGURE B.3 – Trusquin

B.4 Calcul de la pente du canal préexistant

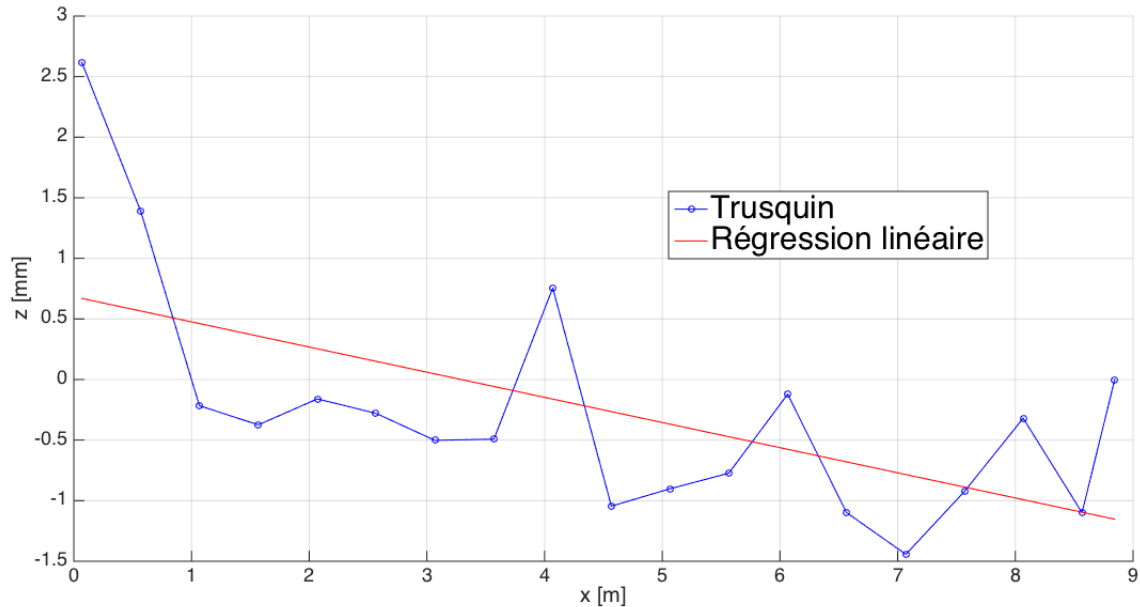


FIGURE B.4 – Calcul de la pente du canal préexistant

0	0	100	200	300	403	600	803	1000	1100	1200
0,08	-10,057	-10,057	-10,138	-10,141	-10,122	-10,199	-10,417	-10,857	-11,023	-11,023
0,50	-8,538	-8,538	-8,650	-8,640	-8,622	-8,724	-8,952	-9,350	-9,487	-9,487
1,00	-6,797	-6,797	-6,822	-6,850	-6,784	-6,830	-7,000	-7,391	-7,567	-7,567
1,50	-5,653	-5,653	-5,775	-5,848	-5,889	-6,101	-6,435	-6,977	-7,208	-7,208
1,99	-5,276	-5,276	-5,425	-5,504	-5,531	-5,765	-6,082	-6,675	-6,858	-6,858
2,00	-5,358	-5,358	-5,462	-5,533	-5,577	-5,806	-6,135	-6,680	-6,957	-6,957
2,50	-4,768	-4,768	-4,899	-5,025	-5,087	-5,384	-5,771	-6,361	-6,630	-6,630
3,00	-4,779	-4,779	-4,839	-4,937	-4,901	-5,084	-5,359	-5,814	-6,058	-6,058
3,49	-4,774	-4,774	-4,843	-4,923	-4,905	-5,068	-5,337	-5,808	-6,017	-6,017
3,98	-4,358	-4,358	-4,503	-4,565	-4,599	-4,860	-5,204	-5,728	-5,960	-5,960
4,00	-4,384	-4,384	-4,533	-4,599	-4,640	-4,853	-5,205	-5,759	-5,988	-5,988
4,51	-3,816	-3,816	-3,947	-4,038	-4,092	-4,317	-4,637	-5,148	-5,375	-5,375
5,00	-2,978	-2,978	-3,187	-3,300	-3,395	-3,724	-4,159	-4,789	-5,102	-5,102
5,50	-2,893	-2,893	-3,028	-3,168	-3,200	-3,504	-3,914	-4,518	-4,757	-4,757
5,99	-3,045	-3,045	-3,164	-3,255	-3,311	-3,549	-3,915	-4,456	-4,694	-4,694
6,01	-3,046	-3,046	-3,141	-3,247	-3,260	-3,526	-3,873	-4,427	-4,618	-4,618
6,50	-1,864	-1,864	-1,922	-1,987	-2,002	-2,168	-2,484	-2,928	-3,127	-3,127
7,00	-0,704	-0,704	-0,783	-0,857	-0,914	-1,140	-1,474	-2,009	-2,210	-2,210
7,50	0,074	0,074	-0,086	-0,184	-0,367	-0,742	-1,225	-1,926	-2,237	-2,237
7,97	0,095	0,095	-0,072	-0,239	-0,340	-0,712	-1,232	-1,943	-2,267	-2,267
8,01	0,135	0,135	0,004	-0,184	-0,282	-0,667	-1,187	-1,805	-2,203	-2,203
8,50	0,494	0,494	0,323	0,186	0,113	-0,242	-0,672	-1,325	-1,609	-1,609
9,01	0,626	0,626	0,527	0,565	0,428	0,213	-0,089	-0,655	-0,867	-0,867
9,51	0,369	0,369	0,400	0,389	0,420	0,364	0,173	-0,220	-0,402	-0,402
9,98	-0,152	-0,152	-0,098	-0,064	-0,022	0,000	-0,132	-0,469	-0,597	-0,597

FIGURE B.5 – Matrice de correction où chaque ligne correspond à une position en x [m] et chaque colonne à une position en y [mm]

Annexe C

Bathymétrie

C.1 Modèles Photoscan

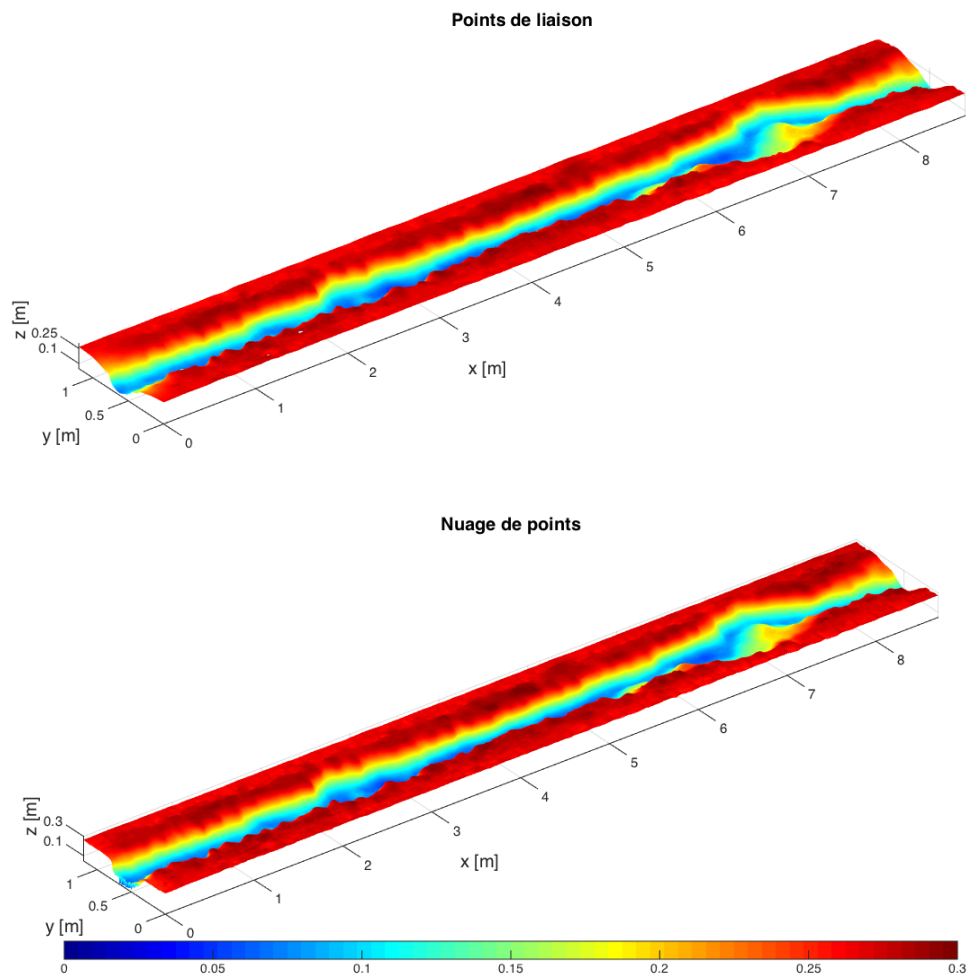


FIGURE C.1 – Vue 3D de la bathymétrie du canal obtenu avec les points de liaison et le nuage de points

C.2 Différence entre thalweg laser et thalweg Photoscan

La figure [C.2] illustre la différence entre les thalwegs obtenus avec le laser et le modèle Photoscan dû à une discrétisation plus grossière pour les mesures du laser (3 [cm] pour le laser et 1[mm] pour le modèle Photoscan). On observe bien que le laser ne mesure pas le point le plus bas de cette section.

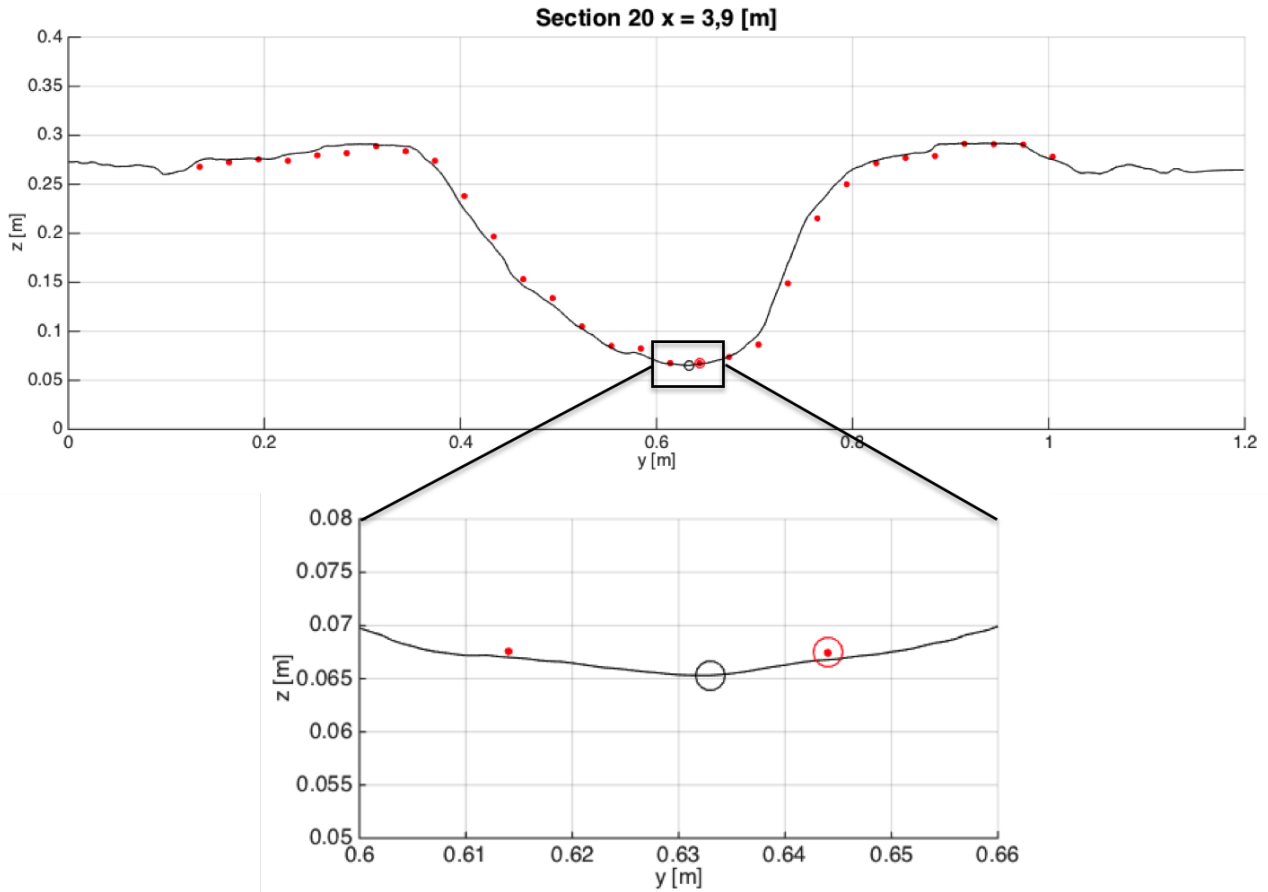


FIGURE C.2 – Illustration de la discrétisation plus grossière du laser par rapport à celle des modèles Photoscan

Annexe D

Description du modèle numérique

"Augmented Roe's Scheme with energy balance", comme plusieurs autres modèles numériques simulant des écoulements 1D, se base sur les équations de Saint-Venant (conservation de la masse et quantité de mouvement). Le système d'équation s'écrit comme suit :

$$\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \frac{\partial \mathbf{F}}{\partial x} = \mathbf{S} \quad (\text{D.1})$$

avec,

$$\begin{aligned} \mathbf{U} &= (A, Q)^T, \text{ le vecteur des variables conservées} \\ \mathbf{Q} &= (Q, Q^2/A + gI_1)^T, \text{ le vecteur des flux} \\ \mathbf{S} &= (0, g(I_2 + A(S_0 - S_f)))^T, \text{ les termes source} \end{aligned}$$

A représente la section mouillée, Q le débit, I_1 la poussée de la pression hydrostatique, I_2 la pression latérale due au changement de largeur du canal, S_0 la pente du lit et S_f prend en compte les frottements. C'est dans ce dernier terme qu'intervient le coefficient de Manning.

Le système d'équation D.1 peut être discrétisé en utilisant un modèle de volumes finis du premier ordre. La situation est illustrée dans la figure D.1.

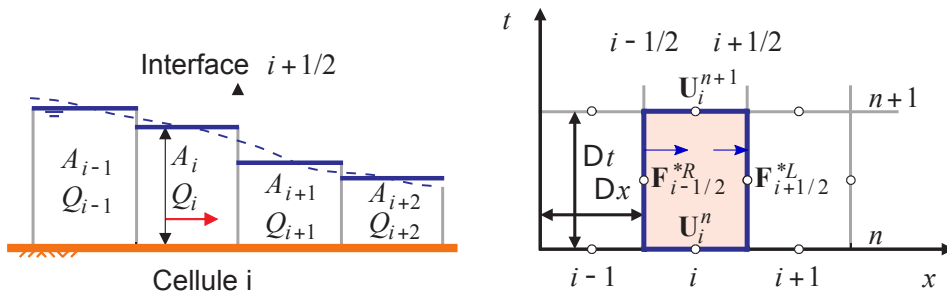


FIGURE D.1 – Modèle de volumes finis représentant l'écoulement

Le problème est divisé en cellules de longueur Δx , elles-mêmes délimitées par des interfaces. La cellule i considérée sera délimitée par les interfaces $i - 1/2$ et $i + 1/2$. Le temps est représenté par

l'exposant n , qui après un temps Δt passe à du $n + 1$. La formule à résoudre est la suivante :

$$\mathbf{U}_i^{n+1} = \mathbf{U}_i^n + \frac{\Delta t}{\Delta x} (F_{i-1/2}^{*R} - F_{i+1/2}^{*L})$$

Les termes sources sont inclus dans les calculs des flux. Ces derniers sont calculés à partir des célérités, des "wave strengths", des "eigenvectors" et des "stationary source terms". Dans ce projet la situation cherchée est à un temps t où la hauteur d'eau est stable vu que l'écoulement est permanent. En résolvant l'équation, A et Q sont connus dans chaque cellule ce qui nous donne la hauteur d'eau dans chaque cellule.

Annexe E

Résultats supplémentaires

E.1 Modèle Numérique d'Élévation

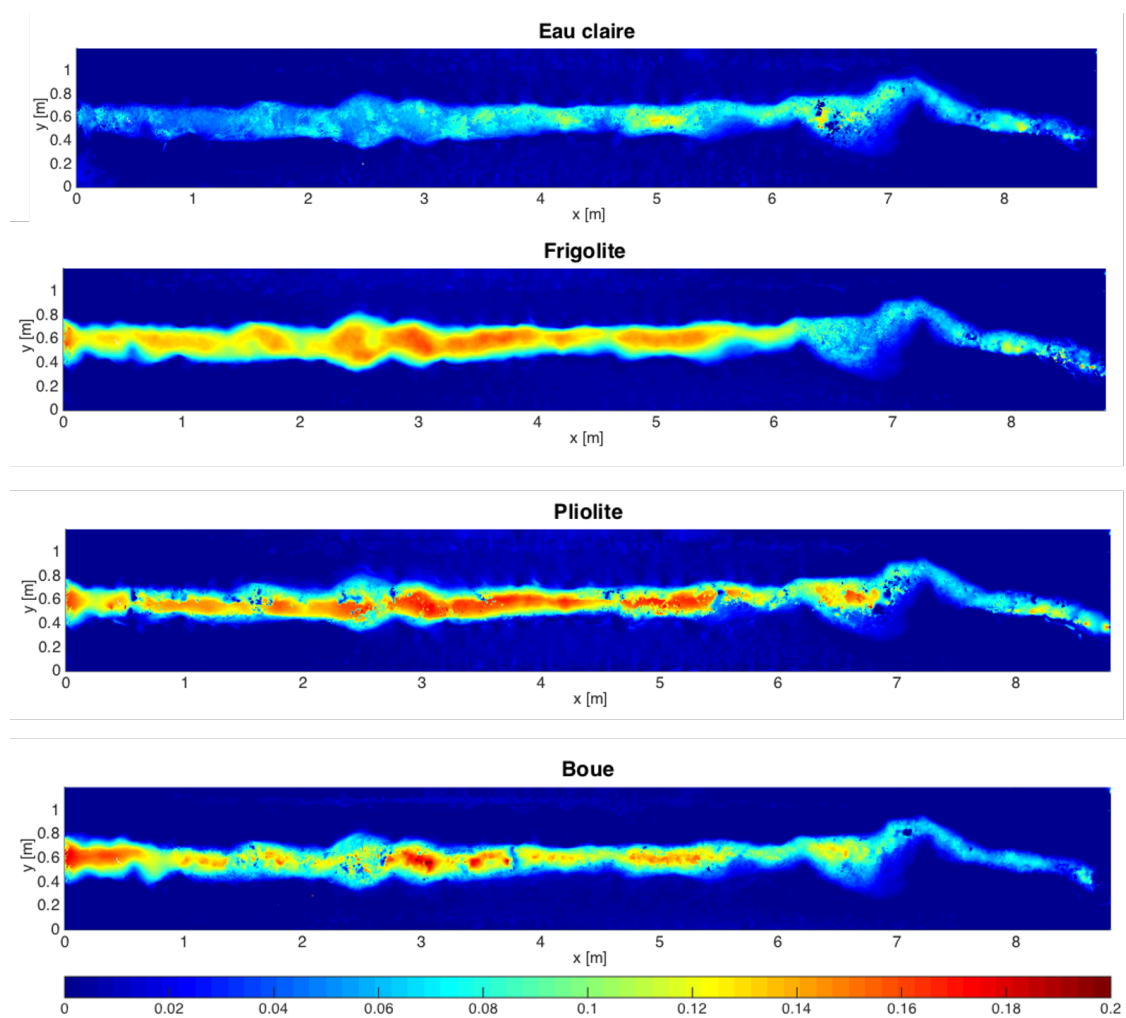


FIGURE E.1 – MNE du niveau de la surface libre sur tout le canal pour $Q_1 = 6 \left[\frac{l}{s} \right]$

E.2 Illustration de la Méthode 2

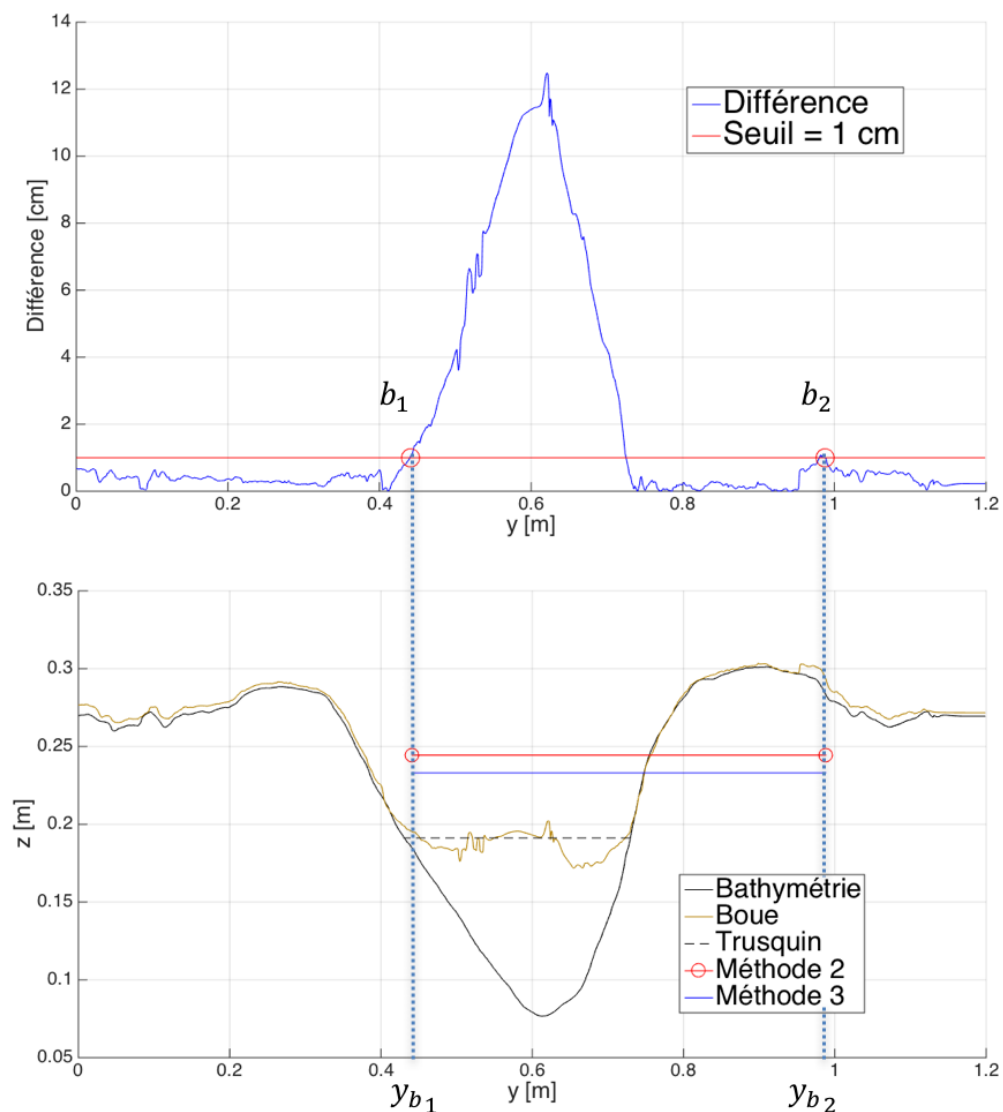


FIGURE E.2 – Exemple d’une section où les méthodes 2 et 3 font défaut

Lorsque le modèle ne concorde pas bien avec la bathymétrie sur les rives alors les résultats de la méthode 2 et 3 sont faussés. Une manière d’éviter ce problème est d’ajuster le seuil en fonction de la précision des modèles. La figure [E.2] illustre bien ce problème.

Annexe F

Logiciel Agisoft Photoscan

Script Python

```
import PhotoScan
import os
import glob
import math
# Ouverture du projet Photoscan
doc = PhotoScan.app.document
doc.open("C:/Users/nijjanssens/Test.psx")
chunk = doc.chunk

# Aligner, détecter les marqueurs et charger les points de référence
for chunk in doc.chunks:

    chunk.matchPhotos(accuracy=PhotoScan.HighAccuracy, preselection=PhotoScan.GenericPreselection, filter_mask=True)
    chunk.alignCameras()
    chunk.buildPoints()

    chunk.detectMarkers(tolerance=70)

    chunk.loadReference("C:/Users/nijjanssens/Reference-1.txt", "csv", "nxyz", "\tab", True, 0)
    chunk.updateTransform()

    chunk.optimizeCameras(fit_f=True, fit_cxcy=True, fit_b1=True, fit_b2=True, fit_k1k2k3=True,
        fit_p1p2=True, fit_k4=True, fit_p3=False, fit_p4=False)
    chunk.matchPhotos(accuracy=PhotoScan.HighAccuracy, preselection=PhotoScan.GenericPreselection, filter_mask=True)
    chunk.alignCameras()
    chunk.buildPoints()
# Création du nuage de points, du maillage et du MNE.
# Exporter le MNE dans un dossier
for chunk in doc.chunks:

    chunk.buildDenseCloud(quality=PhotoScan.MediumQuality)
    chunk.buildModel(surface=PhotoScan.Arbitrary, interpolation=PhotoScan.EnabledInterpolation)
    chunk.buildDem(source=PhotoScan.DenseCloudData, interpolation=PhotoScan.EnabledInterpolation,
        region = (0,-1.2,9,0)) folder1 = "D:/TFE Nils Guilherme/tif/Cloud/"
    tifname1 = folder1+"Cloud%s.tif" %(chunk.label)
    chunk.exportDem(tifname1,format='tif', region = (0,-1.2,9,0), dx = 0.001, dy = 0.001,
        nodata = float('nan'), write_kml = False, write_world = False)
```

FIGURE F.1 – Exemple d'un script Python

Annexe G

Guide pour les futurs étudiants

Étapes pour obtenir un modèle MNE du canal

1. Brancher la pompe et régler l'ouverture de la vanne située à l'amont en fonction du débit souhaité (attendre que le débit se stabilise, 3-4 minutes).
2. Synchroniser les cameras Go Pro, les régler sur leur mode "time lapse" (avec un fréquence de 1[Hz]) et les fixer sur le chariot mobile en fonction des points de vue choisis.
3. Activer les caméras et déplacer le chariot le long du canal à la vitesse calculée en fonction du recouvrement désiré.
4. Effectuer autant de passages que de modèles Photoscan souhaités.
5. Vérifier entre chaque passage le débit et l'ajuster en fonction.
6. Extraire les photos, effacer les photos inutiles, floues ou en doublon.
7. Charger les photos sur le logiciel Photoscan et les trier en fonction de leur point de vue.
8. Créer un masque pour chaque point de vue et l'importer à toutes les photos de ce point de vue.
9. Lancer le run du script Python préalablement préparé en fonction des résultats voulus.
10. Une fois que le logiciel a fini de tourner, créer un MNE en encodant la région souhaitée et le nombre de pixels par cm^2 .
11. Exporter le MNE au format Tiff et le traiter avec Matlab.

