

Mesure du niveau d'eau par photogrammétrie à partir d'un drone

Mémoire présenté par
François-Xavier HELLEBAUT

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

Promotrice
Sandra SOARES-FRAZÃO

Assistant
Olivier CARLIER

Lecteurs
Didier BOUSMAR, Sébastien GAILLIEZ

Année académique 2017-2018

Remerciements

Avant de rentrer dans le vif du sujet, je souhaiterais remercier tout une série de personnes qui ont rendu l'élaboration de ce mémoire possible.

Tout d'abord, je remercie vivement ma promotrice, le Pr. Sandra Soares-Frazão de m'avoir donné l'occasion de faire ce travail de fin d'études mais également pour sa disponibilité qui a permis un suivi régulier de l'avancement du travail tout au long de l'année.

Je tiens à remercier chaleureusement Olivier Carlier pour sa disponibilité sans limites concernant toutes les interrogations survenues durant la recherche. Merci pour tous les bons conseils qui ont été un réel moteur dans la réalisation de ce mémoire.

Je voudrais également remercier Didier Bousmar et Nicolas Feltz de faire partie du jury. Merci également au Service Public de Wallonie pour tous les renseignements nécessaires au choix de la rivière.

Un grand merci au hall technique de la faculté de bioingénierie et tout particulièrement à Sébastien François pour le prêt du dGPS Leica et pour le temps passé à extraire toutes les données sans lesquelles ce travail de fin d'étude n'aurait jamais abouti.

Merci au laboratoire de Génie Civil et plus particulièrement à Samuel Laurent pour la mise à disposition de l'appareil photo Pentax K20D qui a servi à la prise de photos grandes qualités.

Enfin, merci à mes proches pour leurs conseils et leur soutien tout au long de la rédaction du mémoire et particulièrement, merci à Harold Somers d'avoir pris le temps de m'accompagner en rivière afin de réaliser les photos avec son drone.



Résumé

Depuis son apparition à la fin du 19^e siècle, la photogrammétrie est historiquement liée à l'étude de la topographie de terrain. Avec les nombreuses avancées technologiques des outils qui permettent sa mise en œuvre, de nombreux domaines scientifiques s'emparent de cette technologie. Elle est ainsi utilisée pour des domaines pointus tels que la médecine ou l'archéologie. L'hydraulique fluviale utilise également ces techniques photogrammétriques et peut déjà se targuer de nombreux résultats concluants. Son application in situ fait ses premiers pas. Une application qui mériterait d'être étudiée plus en profondeur est la mesure du niveau d'eau de ces rivières naturelles. Combiner la photogrammétrie avec l'utilisation d'un drone pourrait permettre des mesures rapides, efficaces, peu onéreuses et surtout non-intrusives, ce qui fait défaut aux techniques utilisées actuellement.

C'est dans cet idéal que s'inscrit la recherche menée tout au long de l'année et qui est expliquée en détail dans ce mémoire, réalisée à l'Université Catholique de Louvain. Une méthode de mesure du niveau d'eau est développée sur une rivière test. Tous les aspects de la modélisation et de l'analyse des données sont traités ainsi que les problèmes liés au terrain. La méthode ainsi développée est ensuite testée sur une autre rivière afin de mieux comprendre ses forces et ses faiblesses. Les résultats sont très satisfaisants et prometteurs ; une erreur avoisinant les 5 à 10% est constatée par rapport à la profondeur réelle de l'eau. Ce mémoire soulève également les défauts de la méthode avec des pistes d'amélioration afin de les résoudre lors de recherches futures.

Abstract

The three-dimensional modelling offered by photogrammetric techniques is historically related to the study of terrain topography. Many scientific fields benefit from this technology thanks to the many technological improvements of the tools necessary to its implementation. For example, it is used in specialised areas such as medicine and archaeology. The field of fluvial hydraulics also uses these photogrammetric techniques and has already shown numerous conclusive results. These techniques are starting to be used in situ. One particular application deserves to be further addressed : the measurement of the water levels in natural rivers. Combining photogrammetry and the use of drones could allow fast, efficient and cheap measurements. More importantly, it would be non-intrusive, which constitutes a considerable advantage compared with the methods currently applied.

This ideal is at the core of the research conducted throughout the year at the Université catholique de Louvain and thoroughly described in this paper. A method of water levels measurement is first developed with a test river. All the aspects of modelling and data analysis are covered, as well as the problems related to the terrain. This method is then tried with another river in order to better assess its strengths and weaknesses. The results are satisfactory and promising, and the measurements of water levels show an error of around 5 to 10%. This master's thesis also tackles the shortcomings of the method and offers suggestions for possible future improvements.

Table des matières

Introduction	1
1 Etat de l'art	3
1.1 La photogrammétrie	3
1.1.1 Historique	3
1.1.2 Domaines d'application	5
1.1.3 Logiciels de photogrammétrie	7
1.2 Expérience en laboratoire	8
1.2.1 Le modèle réduit	8
1.2.2 Acquisition des données	9
1.2.3 Analyse des données	9
2 Elaboration d'une méthode de détection du niveau d'eau	13
2.1 Algorithme pour l'analyse des MNEs	13
2.2 Choix de la rivière	16
2.3 Modélisation photogrammétrique	18
2.3.1 Mise en place des GCPs	18
2.3.2 Acquisition de photos	20
2.3.3 Utilisation du logiciel	21
2.4 Relevés bathymétriques sur le Train	22
2.5 Analyse des données in situ	24
2.6 Résultats	27
2.6.1 Résultats généraux	28
2.6.2 Discussion sur les paramètres	30
2.6.3 Critiques	31

3 Test de la méthode	33
3.1 Choix de la rivière	33
3.2 Mise en place des GCPs	34
3.3 Relevé bathymétrique sur la Dyle	35
3.4 Expérience avec l'appareil photo	36
3.4.1 Elaboration du modèle trois dimensions	36
3.4.2 Résultats	38
3.5 Expérience avec le drone	39
3.5.1 Elaboration du modèle trois dimensions	39
3.5.2 Résultats	40
3.6 Critiques	41
Conclusion	43
Bibliographies	45
Table des figures	46
Annexes	48
A Appareil de mesure	49
A.1 Le GPS	49
A.2 L'appareil photo	49
A.3 Le drone	50
B Les différents modèles	51
C Résultats de sections en laboratoire défectueuses	55
D Influence des seuils sur les résultats	59

Introduction

Depuis plus de 150 ans, la photogrammétrie a montré son utilité dans de nombreux domaines. Traditionnellement utilisée en topographie, elle est aujourd'hui utile dans des secteurs pointus comme, par exemple, la médecine et l'archéologie. Elle s'est perfectionnée au fil des avancées technologiques d'outils qui permettent sa mise en œuvre.

La photogrammétrie trouve également des applications dans le domaine de l'hydraulique fluviale. En effet, modéliser numériquement une rivière réelle en trois dimensions offre des perspectives d'analyse très intéressantes. Cela peut notamment servir pour différentes simulations d'écoulement permanent ou transitoire ou encore pour des simulations d'événements extrêmes.

Que ce soit pour la mesure du niveau d'eau ou pour la mesure de sa vitesse, la récolte des données en rivière n'est pas une tâche aisée et nécessite l'emploi d'outils complexes, coûteux, encombrants et difficilement mobilisables qui complexifie l'acquisition de données précises et fiables. De plus, cela empêche une mise en œuvre réactive en fonction des événements météorologiques qui sont encore assez imprévisibles.

Très récemment, l'évolution technologique des drones et la miniaturisation des appareils photographiques permettent de prendre des photos aériennes de qualité en un rien de temps en couvrant une large zone qui peut être très éloignée de l'utilisateur. Plus besoin de monter dans un avion pour prendre des clichés en hauteur, la photogrammétrie aérienne se démocratise et est à la portée de tous.

Les événements hydrauliques extrêmes en rivière sont difficilement analysables à cause de la dégradation et la dangerosité de l'accès ou encore du fait de leur courte durée. Il paraît, dès lors, intéressant de pouvoir se rendre rapidement et facilement dans les zones sujettes aux inondations et aux crues exceptionnelles. En dehors de ces événements sporadiques, il paraît aussi intéressant de simplifier et de rendre moins coûteuse l'analyse des cours d'eau au quotidien.

Grâce aux drones, l'accès par voie aérienne semble donc être une solution sécurisée et rapide. La photogrammétrie combinée avec ce nouvel outil ultra flexible offre une solution peu onéreuse et très facilement mise en œuvre. Elle offre également une méthode non-intrusive particulièrement intéressante dans le cas des rivières naturelles. C'est précisément dans cet idéal que le présent mémoire trouve son inspiration.

Pour cela, la recherche est divisée selon trois grandes étapes qui ont guidé le travail tout au long de l'année.

Premièrement, l'analyse du modèle réduit d'une rivière, mis en écoulement permanent en laboratoire, est effectuée. Un algorithme capable de traiter les données obtenues est implémenté sur MATLAB . Il donne des mesures fiables du niveau d'eau à partir des données mises à disposition.

Deuxièmement, une méthode rigoureuse d'acquisition de données est élaborée sur une rivière réelle qui sert de terrain d'étude de base. Les photos sont prises à partir d'un appareil photographique et plusieurs modèles dans diverses conditions (éclairage, végétation,...) sont analysés afin de fournir une

méthode robuste. L'algorithme implémenté est adapté pour traiter les données in situ.

Pour finir, la méthode élaborée est scrupuleusement appliquée sur une nouvelle rivière par un utilisateur qui ne connaît, à priori, rien de la rivière analysée. Les modèles sont générés à partir de photos prises d'un drone piloté depuis la berge et d'un appareil photo. Les résultats des deux modélisations sont analysés, comparés et critiqués.

Ce travail de fin d'études n'a nullement la prétention de présenter un produit fini et opérationnel. Bien que les résultats obtenus soient satisfaisants et encourageants, la méthode gagnerait à être testée sur un panel de rivières plus large et plus varié.

Chapitre 1

Etat de l'art

Ce chapitre a pour but de :

- Dresser un rapide historique de la photogrammétrie.
- Citer et expliquer ses domaines d'application ayant un rapport de près ou de loin avec le sujet du travail de fin d'études.
- Décrire brièvement le logiciel de photogrammétrie choisi.
- Expliquer les résultats finaux du travail de fin d'études précédent qui servent comme point de commencement de la recherche.

1.1 La photogrammétrie

Bon nombre d'auteurs proposent une définition de la photogrammétrie. Pour n'en citer que deux ;

"La photogrammétrie permet de définir avec précision la forme, la dimension et la position d'objets dans l'espace à partir de photographies" [KRAUS et WALDHÄUSL, 1998].

"La photogrammétrie englobe toutes les méthodes de mesure et d'interprétation d'image afin de déterminer la forme et l'emplacement d'un objet à partir d'une ou plusieurs images de cet objet" [LUHMANN et al., 2014].

Le principe général de la photogrammétrie consiste à reconstituer un objet (un terrain, une statue, un bâtiment...) sous forme de modèle en trois dimensions à partir de photographies en deux dimensions.

1.1.1 Historique

Les prémices de ce qu'on appelle aujourd'hui la photogrammétrie apparurent en 1849, peu après l'invention de la photographie, quand un officier français, Aimé Laussedat, eu l'idée d'utiliser des photographies pour observer et mesurer la façade de l'Hôtel des Invalides à Paris [KASSER, 2015].

Les auteurs s'accordent sur quatre phases de développement majeures [LUHMANN et al., 2014], [KASSER, 2015] :

Les prémices de la photogrammétrie (1849-1900)

Les applications principales de la photogrammétrie dans ses débuts étaient surtout architecturales, dans la mesure de façade. Les premières applications étaient surtout liées à la “close-range photogrammetry” (c.-à-d. photogrammétrie pour des objets proches de l'objectif). Vers la fin du 19^e siècle, l'utilisation de la photogrammétrie pour la cartographie fait ses premiers pas.

La photogrammétrie analogique(1900-1950)

L'apparition des appareils permettant des mesures stéréométriques (qui reconstituent une vision en trois dimensions à partir d'une paire d'images) révolutionne le monde de la photogrammétrie. L'analyse numérique alors prédominante devient trop lente et laisse la place aux méthodes analogiques, plus rapides. Les méthodes analogiques sont peu flexibles au niveau des paramètres d'entrée et de la forme des résultats. Sa précision est limitée par les propriétés physiques qui conditionnent les appareils de mesure.

La photogrammétrie est utilisée maintenant principalement sur des applications cartographiques et topographiques. Le développement de l'aviation encourage cette tendance et les applications militaires deviennent le moteur de la photogrammétrie naissante.

La photogrammétrie analytique(1950-1990)

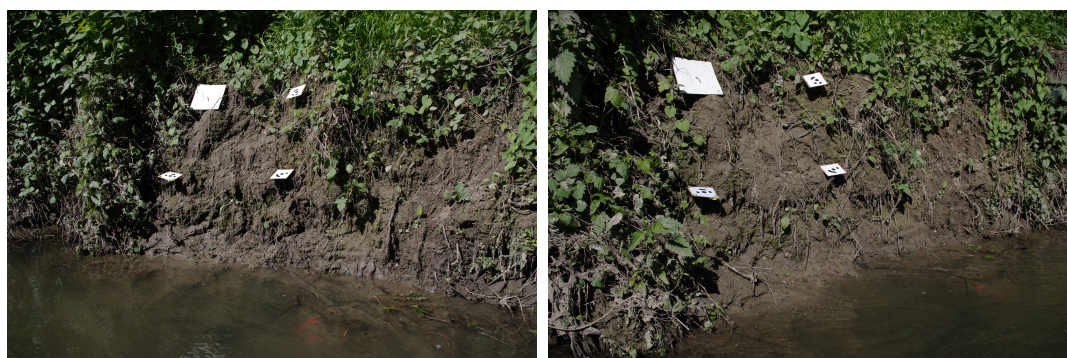
Avec l'apparition des ordinateurs digitaux et électroniques qui permettent des résolutions de calculs très rapides, on assiste au retour des méthodes analytiques et numériques. Elles ont l'avantage d'être très flexibles et de n'être limitées que par les modèles mathématiques sur lesquels elles se basent (principalement la triangulation). Ces méthodes permettent surtout une précision accrue, une détection des outliers. Elles permettent également de pouvoir appliquer des tests statistiques à la fois sur les mesures et sur les résultats.

La photogrammétrie digitale (1990-...)

Depuis la fin des années 80, l'utilisation et l'avancée technologique des appareils photos digitaux ne cessent de croître. Le développement d'ordinateurs toujours plus puissants permet le traitement d'images numériques pour la reconnaissance automatique et la mesure des particularités sur les images. La photogrammétrie digitale continue d'évoluer au fil de ces avancées technologiques. De plus, des logiciels informatiques de plus en plus automatisés la rendent accessible à tous.

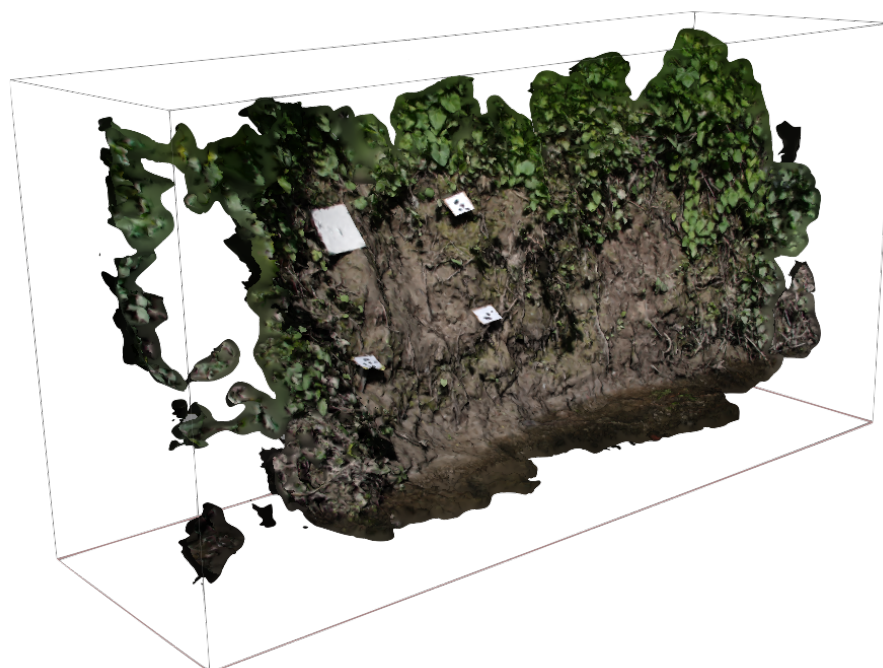
Depuis une dizaine d'années, l'apparition du smartphone permet à n'importe qui de générer des photos numériques exploitables, de bonne qualité et de les rendre accessibles à tout le monde en quelques secondes. Encore plus récemment, l'apparition et l'évolution de drones domestiques, ouvrent de nouvelles possibilités d'application pour la photogrammétrie. Toutes ces technologies nouvelles, accessibles maintenant au grand public, permettent de démocratiser la photogrammétrie aérienne qui devient accessible à tous, en témoigne ce travail de fin d'études.

Dans la littérature, la photogrammétrie digitale est également appelée : “*Structure from Motion*” (SfM). La SfM est en fait un ensemble de techniques permettant de placer et positionner, dans l'espace, des images numériques. Elles se basent sur des algorithmes mis en place par [S. N. LANE, T. D. JAMES et CROWELL, 2000]. Le terme “SfM” est utilisé dans la suite. Un exemple de son utilisation dans le cadre de ce mémoire est montré à la figure 1.1. Deux images en deux dimensions sont extraites d'un jeu de trente-deux photos qui a permis la modélisation trois dimensions d'une berge.



(a) Image 2D.

(b) Image 2D.



(c) Modèle 3D.

FIGURE 1.1 – Utilisation de la SfM : modélisation d'une berge.

1.1.2 Domaines d'application

Les applications de la photogrammétrie sont diverses et variées. Sa principale application est, traditionnellement, la topographie et la cartographie de terrain. Cependant, on retrouve également la photogrammétrie dans des domaines nécessitant des détails plus précis tels que l'archéologie, la médecine, le cinéma ,ect. Certains domaines d'application, en lien plus ou moins proche avec le sujet de ce mémoire, méritent d'être détaillés.

Mesure de la topographie

[S. N. LANE, T. D. JAMES et CROWELL, 2000] se concentrent sur l'application automatisée de la photogrammétrie à une surface naturelle complexe (Glen Affric, Ecosse), d'intérêt pour les géomorphologues. Les résultats sont jugés par rapport à l'exactitude de la pente du terrain obtenue qui est un paramètre crucial pour les géomorphologues. Ils mettent l'accent sur l'influence de la végétation et de la résolution

des photos sur les résultats. Ils concluent que la qualité de la surface du modèle analysé est gouvernée par le choix des paramètres photographiques (calibration de l'appareil photo, distance entre l'objectif et l'objet étudié, point de contrôle au sol).

[MICHELETTI, CHANDLER et Stuart N. LANE, 2015] proposent une méthode générale et des conseils d'application pour l'utilisation de la SfM (logiciel, points de vue, texture...). Ils conseillent aussi un minimum de 5 "*Ground Control Points*" (GCP)¹. Comme exemple, ils réalisent l'étude topographique d'une berge (grains de différentes tailles dans une matrice de sable grossier) de 10 [m] de long et de 1,2 [m] de haut. Ils comparent l'utilisation d'un Nikon D7000 et d'un smartphone avec lesquels ils obtiennent une erreur de (respectivement) 0.0044 [m] et 0.0148 [m]. Une précision millimétrique peut être obtenue en utilisant la SfM dans les deux cas.

La combinaison des drones et de la SfM offre une méthode rapide, efficace et peu onéreuse pour la surveillance et l'analyse d'environnements naturels. [CLAPUYT, VANACKER et VAN OOST, 2016] enquêtent sur la fiabilité de la reproductibilité des expériences, sur un même terrain d'étude, menées avec un drone équipé d'un reflex. La longueur focale et la disposition des GCPs au sol varient d'une expérience à l'autre. Ils montrent ainsi que la précision relative des modèles engendrés est de l'ordre du centimètre. [M. R. JAMES et al., 2017] utilisent un drone pour étudier l'érosion d'un ravin (Taroudant, Maroc) et un glissement de terrain (Super-Sauze, France). Ils montrent comment la qualité des modèles peut être améliorée en passant par une étude plus rigoureuse des algorithmes de la SfM. Ils proposent une méthode qui permet aux géomorphologues d'identifier les sources d'erreur et d'optimiser le placement et la quantité des GCPs au sol.

Dynamique des paysages

[FOX et NUTTALL, 1997] étudient l'évolution des glaciers de l'archipel norvégien Svalbard. Ils examinent la façon dont la photogrammétrie peut être utile à la glaciologie. Les problèmes rencontrés lors de l'application de la photogrammétrie en terrain arctique sont étudiés. Une méthode destinée à l'amélioration de ces problèmes est décrite. Les résultats obtenus sont présentés et discutés.

[MILLER, QUINE et HADLEY, 2000] décrivent l'utilisation de la SfM aérienne pour mesurer les caractéristiques spatiales de la canopée des forêts. De telles mesures servent à prédire l'ampleur et la progression de dégâts abiotiques et les potentiels dégâts dus aux tempêtes. Ils montrent que la modélisation par SfM de la canopée peut fournir des détails précis quant à la variation spatiale des éléments de la surface. Une forêt test de 7 [km²] est étudiée au fil des événements météorologiques.

[DIEFENBACH et al., 2012] décrivent l'application de la SfM pour l'étude de l'éruption volcanique d'un dôme de lave entre 2004 et 2008 sur le volcan Mount St. Helens (USA). Des photos aériennes sont prises depuis un hélicoptère en utilisant un Reflex mono-objectif. Douze modèles séquentiels, générés par un logiciel commercial, sont étudiés (volume, vitesse d'extrusion,...) et comparés avec d'autres modèles obtenus par des méthodes bien établies. Une erreur de 5% pour l'estimation des volumes est constatée.

[GONÇALVES et HENRIQUES, 2015] utilisent la SfM pour recenser et contrôler l'évolution des dunes de sable et des plages. Les photos sont prises à partir d'un drone équipé d'un appareil photo bon marché. Les modèles générés, par un logiciel hautement automatisé, sont analysés afin de prédire l'évolution des côtes qui souffrent de dégradations naturelles et humaines. Deux plages portugaises sont étudiées avec une précision verticale allant de 0,035 [m] à 0,05 [m] qui est du même ordre que la résolution de l'image au niveau du sol.

1. Les GCPs sont des points de repère placés au sol et introduits manuellement dans le logiciel par l'utilisateur. Une explication plus détaillée sera développée à la section 2.3.1

Hydraulique

[BUTLER et al., 2002] décrivent l'utilisation de la "*close range photogrammetry*" pour analyser et mesurer les changements de géométrie du lit d'une rivière composé de gravier. Des *Modèles Numériques d'Elevation* (MNE)² de hautes résolutions sont obtenus mais doivent être corrigés, la réfraction ayant lieu à l'interface entre l'air et l'eau. Ils proposent un algorithme afin de rétablir la colinéarité. Celui-ci est appliqué après l'obtention du MNE ce qui permet l'utilisation de n'importe quels logiciels de photogrammétrie en amont. Les résultats montrent qu'il est possible d'extraire la bathymétrie submergée d'une rivière ce qui est très encourageant pour les hydrauliciens.

Lorsque le débit d'une rivière est anormalement élevé, les appareils de mesure du niveau d'eau deviennent obsolètes. [Stuart N. LANE et al., 2003] analysent la faisabilité de mesurer le niveau de l'eau atteint lors d'un événement hydrologique extrême, en utilisant la SfM. La technique consiste à trouver le niveau de la ligne de débris déposées par l'événement lorsque celui-ci est terminé. La précision est de l'ordre de 0,15 [m].

[LEJOT et al., 2007] étudient la bathymétrie, et la géométrie des bancs de gravier, de l'Ain et du Drôme (France). Les photos utiles à l'analyse photogrammétrique sont prises à partir d'un objet volant téléguidé, à basse altitude. Les nouveaux challenges dûs à cette nouvelle technologie sont discutés (stabilité de la plateforme, recouvrement des photos,...). La fiabilité des résultats est présentée. La précision verticale des points varient entre 0,02 [m] et 0,40 [m].

[HAN et ENDRENY, 2014] développent une méthode, basée sur la "*close range photogrammetry*", pour mesurer la surface d'une rivière avec une précision verticale et horizontale de l'ordre du dixième de millimètre. Leur étude se concentre sur une rivière en écoulement, modélisée en laboratoire. De la poudre de cire est utilisée afin de rendre la surface de l'eau opaque. La précision du MNE généré dépend de la densité de la poudre de cire, la précision des GCPs, les conditions d'éclairage et les spécificités des appareils photos utilisés.

[FRANZINI, SOARES-FRAZAO et CAPART, 2016] travaillent sur un sujet similaire en utilisant la photogrammétrie afin de déterminer le niveau de la surface libre d'un modèle réduit de la rivière Dahan (Taiwan). La méthode nécessite l'ajout de colorant bleu afin de rendre l'eau plus opaque. Elle a le double avantage de ne pas être intrusive et de pouvoir récolter des données sur une surface importante. Les résultats obtenus sur les zones les plus profondes montrent une bonne concordance avec la réalité et une bonne reproductibilité alors que les zones moins profondes donnent des résultats erronés. Des pistes d'amélioration sont également discutées.

1.1.3 Logiciels de photogrammétrie

Les logiciels de photogrammétrie présents sur le marché sont nombreux et divers. Le choix d'un logiciel par rapport à un autre dépend du type de photogrammétrie étudié (*close range photogrammetry*, aérienne, satellitaire, etc.), du système d'exploitation recommandé pour son utilisation, de son prix, de la facilité de prise en main et de la transparence de ses algorithmes.

Le logiciel de photogrammétrie utilisé dans le cadre de ce mémoire est la version professionnelle du logiciel PHOTOSCAN proposé, depuis 2010, par le développeur russe Agisoft LLC³. Celui-ci est idéal pour la photogrammétrie aérienne et peut-être utilisé sous LINUX, WINDOWS ou OS X. L'utilisation de l'interface est très facile et le logiciel est hautement automatisé. Malheureusement, comme beaucoup de logiciels professionnels, il est difficile d'obtenir des informations quant aux algorithmes qui y sont implémentés. Il est dès lors utilisé comme une boîte noire par l'utilisateur. Ceci engendre régulièrement

2. Les MNE sont des représentations de la topographie d'une zone terrestre réalisés numériquement par ordinateur.

3. [Agisoft PhotoScan Professional 2018]

des problèmes pour l'interprétation des erreurs commises. [FRANZINI, SOARES-FRAZAO et CAPART, 2016], [GONÇALVES et HENRIQUES, 2015], [M. R. JAMES et al., 2017] font usage du logiciel PhotoScan dans leur recherche décrite dans la section 1.1.2.

1.2 Mesure de la surface libre d'écoulement en laboratoire par photogrammétrie

Cette section a pour objectif d'introduire ce travail de fin d'études en tant que prolongation et application, in situ, du mémoire de [COUTINHO et JANSSENS, 2017]. Seuls les grandes étapes et les résultats finaux d'intérêt sont explicités afin de mieux comprendre le point de départ de la recherche du niveau d'eau par photogrammétrie à partir d'un drone.

[COUTINHO et JANSSENS, 2017] présentent un dispositif expérimental, en laboratoire, pour la mesure du niveau de la surface libre d'écoulement d'un modèle réduit à l'aide de la photogrammétrie. Alors que [FRANZINI, SOARES-FRAZAO et CAPART, 2016] et [HAN et ENDRENY, 2014] utilisent d'emblée des artefacts afin de rendre l'eau opaque, [COUTINHO et JANSSENS, 2017] analysent différentes textures de l'eau pour leurs expériences. Ainsi, des expériences avec de la piolite, de la frigolite, de la boue et de l'eau claire sont menées. Cependant, pour des raisons écologiques et pratiques évidentes, il est impossible d'utiliser de la frigolite, de la piolite ou de la boue en rivière naturelle. Cette section développe donc, uniquement, les expériences menées avec de l'eau claire.

1.2.1 Le modèle réduit

Pour les besoins de leur recherche, [COUTINHO et JANSSENS, 2017] fabriquent un modèle réduit d'une rivière naturelle (voir figure 1.2(b)). Il est assemblé sur un canal préexistant construit par [BOUSMAR et FRASELLE, 2004] dans le cadre d'un travail de fin d'étude antérieur. Celui-ci a une longueur utile de 10 [m] et une largeur de 1,2 [m].

Le modèle réduit représente le plus fidèlement possible la topologie de la rivière Cavaillon, située en Haïti. Le département de Génie Civil de l'UCL connaît bien cette rivière grâce à de nombreuses collaborations avec l'Université d'Etat d'Haïti. Quarante-cinq sections transversales miniatures de la rivière sont réalisées, dans des cadres en bois, à partir de modèles disponibles. Ces sections servent de base pour la réalisation du modèle réduit (voir figure 1.2(a)). L'appellation *section* (ou *section transversale*) va être utilisé tout au long du mémoire. Une section est une coupe transversale d'une rivière, réalisée perpendiculairement à la direction de l'écoulement de l'eau. Afin de ne pas abîmer le canal préexistant, des coffrages en bois adaptés à ses dimensions sont assemblés. Après y avoir fixé les sections (voir figure 1.2(a)), un béton léger est coulé. Une fine couche de finition en ciment est ajoutée par dessus.



FIGURE 1.2 – Modèle réduit en laboratoire.

1.2.2 Acquisition des données

Les photos du modèle réduit utiles à sa modélisation photogrammétrique, sont prises à partir de GoPro Hero 3 et de GoPro Hero 4 silver fixées sur un chariot rendu opaque, roulant le long du canal. Les GoPro couvrent plusieurs angles de vue et sont situées à une distance de 0,30 [m] au dessus du modèle réduit. Leur emplacement sur le chariot est modélisée à la figure 1.3.

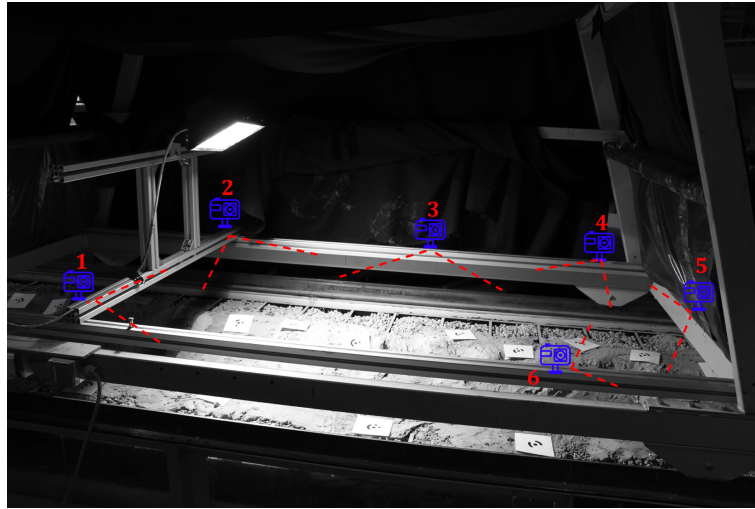


FIGURE 1.3 – Modèle réduit : chariot et disposition des GoPro.

Les photos sont ensuite traitées par le logiciel de photogrammétrie PHOTOSCAN. L'utilisation du logiciel en laboratoire n'est pas expliquée dans ce mémoire. Cependant, elle est similaire à son utilisation in situ qui est détaillée par la suite. Une fois le modèle trois dimensions créé, un *Modèle Numérique d'Elevation* (MNE) est généré et exporté dans un format exploitable par MATLAB. Ce MNE décrit la position de chaque point du modèle dans le repère défini à la figure 1.2(c), repris dans une matrice Z définie par l'équation 1.1.

Soient,

- z_{ij} , la hauteur du point à la position (i,j).
- m , la largeur du canal.
- n , la longueur du canal.

Alors,

$$Z = [z_{ij}]_{\substack{1 \leq i \leq m \\ 1 \leq j \leq n}} \quad (1.1)$$

1.2.3 Analyse des données

Les données analysées dans cette section sont reprises d'une expérience réalisée avec de l'eau claire et un débit de 6 l/s. Deux MNEs sont générés :

Soient,

- Le MNE_{EC} réalisé avec de l'eau claire (l'indice EC désigne l'eau claire utilisée) dont les données sont reprises dans la matrice Z_{EC} .

- Un MNE réalisé *sans* l'eau dont les données sont reprises dans la matrice Z_{Bathy} . Ce MNE modélise la bathymétrie.

Nous pouvons dès lors calculer,

$$Z_{\text{Diff}} = Z_{\text{EC}} - Z_{\text{Bathy}} \quad (1.2)$$

Où, Z_{Diff} est la matrice d'un nouveau MNE $_{\text{Diff}}$ qui représente la différence entre le MNE $_{\text{EC}}$ et la bathymétrie. Le MNE $_{\text{Diff}}$ est idéal pour visualiser si le logiciel détecte l'eau claire. En effet, si l'eau est bel et bien modélisée, une différence de hauteur entre le MNE $_{\text{EC}}$ et la bathymétrie est détectée. Nous pouvons constater sur la représentation du MNE $_{\text{Diff}}$ à la figure 1.4 qu'une nette différence est bel et bien détectée sur le lit de la rivière.

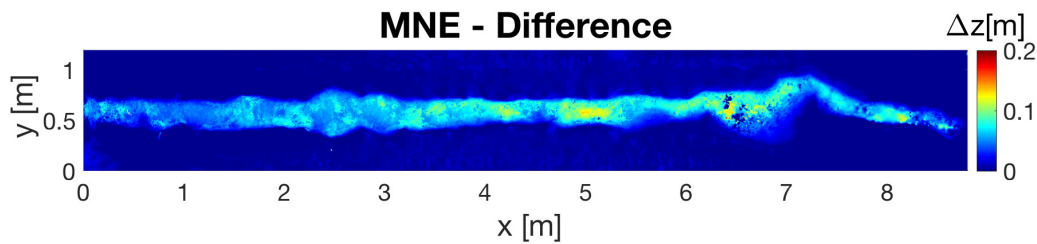
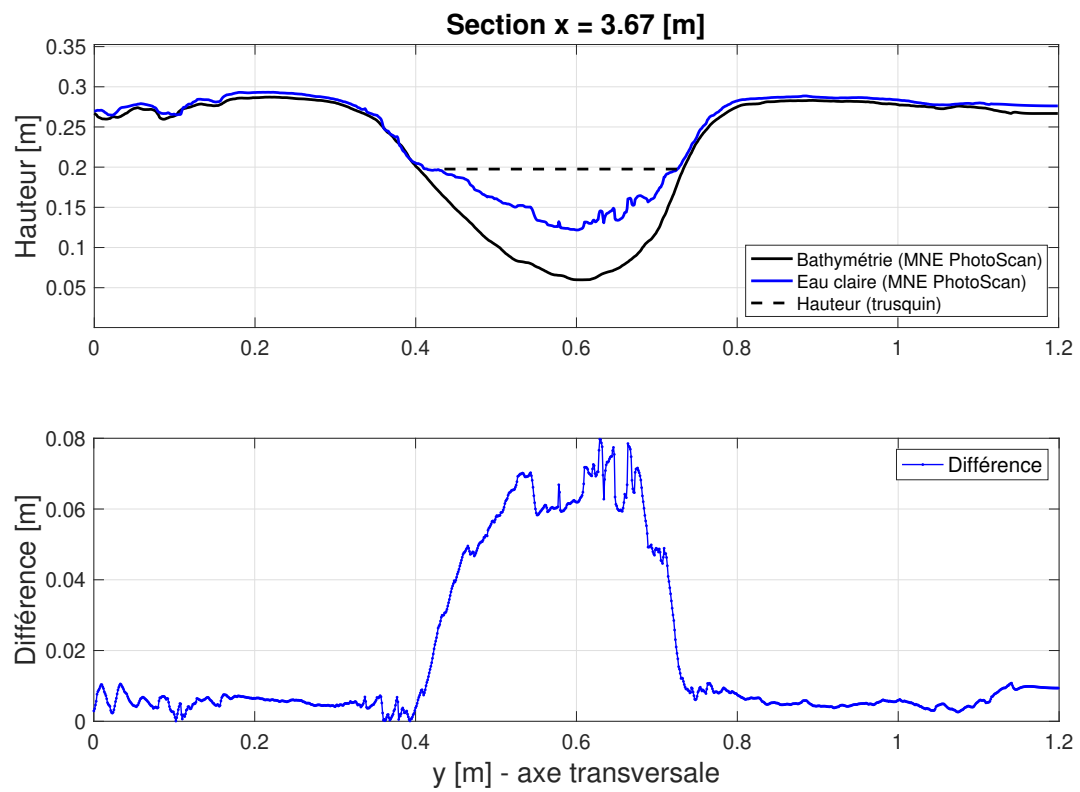


FIGURE 1.4 – Modèle réduit en écoulement permanent : MNE pour un débit de 6 [l/s].

Afin de pouvoir comparer les données du MNE $_{\text{EC}}$ avec des valeurs de référence, quarante-et-une sections, espacées de 0,20 [m] le long du canal (voir figure 1.2(c)), sont analysées. Pour chaque section, la hauteur d'eau est mesurée à l'aide d'un trusquin. Cette mesure représente la hauteur d'eau dans toute la section, la surface étant supposée horizontale.

Dès lors, une vérification quant à l'exactitude de la modélisation de la surface de l'eau peut s'effectuer. Pour cela, il faut comparer les sections du MNE $_{\text{EC}}$ choisies avec la mesure du trusquin. Un exemple de cette vérification est présentée à la figure 1.5 qui montre deux graphes relatifs à la section en $x = 3,67$ [m]. Le premier graphe compare la section du MNE $_{\text{EC}}$ ($\{z_{\text{EC},ij}\}_{1 \leq i \leq m}$) avec la section de la bathymétrie correspondante et la mesure de la hauteur d'eau au trusquin ($\{z_{\text{Diff},ij}\}_{1 \leq i \leq m}$). Le second graphe montre la différence de hauteur entre le MNE $_{\text{EC}}$ et la bathymétrie ($\{z_{\text{Diff},ij}\}_{1 \leq i \leq m}$).

En comparant la mesure du trusquin avec la surface du MNE $_{\text{EC}}$, nous pouvons constater que la surface de l'eau n'est pas fidèlement représentée par PHOTOSCAN. Cela est dû à la transparence de l'eau qui ne permet pas de modéliser la surface de manière optimale. Cependant, un "décrochage" entre la bathymétrie et le MNE $_{\text{EC}}$ semble avoir lieu sur chaque berge. Cette constatation est prometteuse car ces "décrochages" correspondent à l'endroit où la ligne d'eau intercepte la bathymétrie (voir figure 1.5). Trouver la hauteur de ces deux *points de décrochement* permettrait donc de trouver la hauteur d'eau. Cette piste est le point de départ du présent mémoire.

FIGURE 1.5 – Modèle réduit en écoulement permanent : section en $x = 3,67$ [m].

Chapitre 2

Elaboration d'une méthode de détection du niveau d'eau

Ce chapitre constitue la majeure partie du travail de fin d'études. Il a pour but d'expliquer l'élaboration d'une méthode, pour la mesure du niveau d'eau par photogrammétrie, qui requiert une série d'étapes décrites dans la suite.

Premièrement, l'analyse établie sur les données en laboratoire est approfondie. Un algorithme, implémenté sur MATLAB, est développé afin de pouvoir détecter les *points de décrochements* introduits à la section 1.2.

Deuxièmement, le choix du terrain d'étude et les différents aspects de la modélisation photogrammétrique in situ sont expliqués. Plusieurs modèles trois dimensions du terrain d'étude sont présentés. Leurs caractéristiques et les données exploitables sont décrits afin de mieux comprendre leurs futures analyses.

Troisièmement, la *mesure de la bathymétrie* étant une condition nécessaire à l'élaboration et au bon fonctionnement de la méthode, sa réalisation ainsi que les problèmes de terrain qui y sont liés sont expliqués.

Enfin, l'algorithme implémenté sur MATLAB pour la détection des points de décrochement est adapté aux données in situ. Les résultats engendrés sont présentés, discutés et critiqués.

2.1 Algorithme pour l'analyse des MNEs

Cette section est dédiée à l'approfondissement de la recherche menée en laboratoire, par [COUTINHO et JANSSENS, 2017]. Le point final de leur travail, qui est le point de départ de ce mémoire, est décrit à la section 1.2. Pour simplifier les écritures, nous désignerons par "MNE_{EC}", le Modèle Numérique d'Elevation du modèle photogrammétrique réalisé avec de l'eau claire (voir section 1.2). L'approfondissement réalisé dans ce mémoire consiste à expliciter l'algorithme développé et implémenté sur MATLAB. Cet algorithme a pour objectif de trouver la hauteur d'eau du MNE_{EC}.

En théorie, le MNE_{EC} et la bathymétrie devraient se confondre sur les berges. Une fois que l'eau est détectée le MNE_{EC} diffère de la bathymétrie. Les deux points (un sur la rive gauche, l'autre sur la rive droite) où ce phénomène apparaît sont appelés "*points de décrochement*". L'objectif de l'algorithme est donc de trouver la hauteur de ces deux points de décrochement.

En pratique, le MNE_{EC} et la bathymétrie diffèrent également au niveau de la berge. Cette imprécision est due, soit à une mauvaise utilisation du logiciel, soit à des photos de mauvaise qualité. La discussion

concernant l'acquisition des données en laboratoire n'est pas le sujet de ce mémoire. L'algorithme analyse le comportement des différences de hauteur, entre le MNE_{EC} et la bathymétrie, sur chaque section étudiée. Il doit tenir compte des erreurs sur la berge afin de ne pas détecter une de ces erreurs comme point de décrochement. Le principe de l'algorithme est le suivant :

Soient,

- *Count*, un seuil représentant un nombre de points.
- *Difference*, un seuil représentant une différence de hauteur, en mètre.

Alors, le point de décrochement sur la partie gauche (resp. droite) du graphe est détecté lorsque :

1. La *dérivée est positive* (resp. *négative*) sur *Count* points consécutifs (p.ex. *Count* = 5), en parcourant le graphe de la différence de gauche à droite (resp. de droite à gauche).
2. La *différence est supérieure* au seuil *Difference* (p.ex. *Difference* = 0,02 [m]) sur *Count* points consécutifs, en parcourant le graphe de la différence de gauche à droite (resp. de droite à gauche).

La première condition permet de capter le point à partir duquel la différence croît à mesure que la surface de l'eau se décroche de la bathymétrie. La seconde condition permet d'éviter les erreurs sur les berges (voir figure 2.1).

Pour aider l'algorithme à fonctionner de manière optimale, le graphe de la différence est "lissée" à l'aide d'une moyenne courante¹. Cela permet d'avoir un graphe représentant un comportement général de la différence entre le MNE_{EC} et la bathymétrie. Comme nous pouvons le constater, l'algorithme dépend de certains seuils, optimisés de manière empirique. Ces seuils devront évidemment être adaptés pour l'algorithme utilisé pour traiter les données in situ.

De manière générale, l'algorithme fonctionne très bien sur le MNE_{EC} généré en laboratoire. Sur la figure 2.1 est représentée une section pour laquelle l'algorithme permet de trouver les deux points de décrochement de manière optimale. La mesure de la hauteur de référence réalisée au trusquin se confond avec la moyenne de la hauteur des deux points de décrochement qui est prise comme hauteur d'eau. Les seuils utilisés sont *Count* = 5 et *Difference* = 0,02 [m].

L'algorithme est testé sur quarante-et-une sections, espacées de 0,20[m] le long du canal. La figure 2.2 compare les résultats pour la hauteur de l'eau déterminée par l'algorithme avec la valeur du trusquin pour chacune des sections. L'écart absolu entre la hauteur d'eau déterminée et la hauteur de référence est également représentée. Tous ces résultats sont obtenus pour les seuils :

- *Count* = 5.
- *Difference* = 0,02 [m].

Cette combinaison de seuils est optimale et est déterminée empiriquement. Quoi qu'il en soit, ils devront être adaptés au terrain. Les seuils "in situ" font l'objet d'une analyse plus poussée dans la suite du mémoire.

1. Une moyenne courante est une méthode qui donne comme valeur à un point du graphe, la moyenne des valeurs des points qui l'entourent d'une certaine distance à définir.

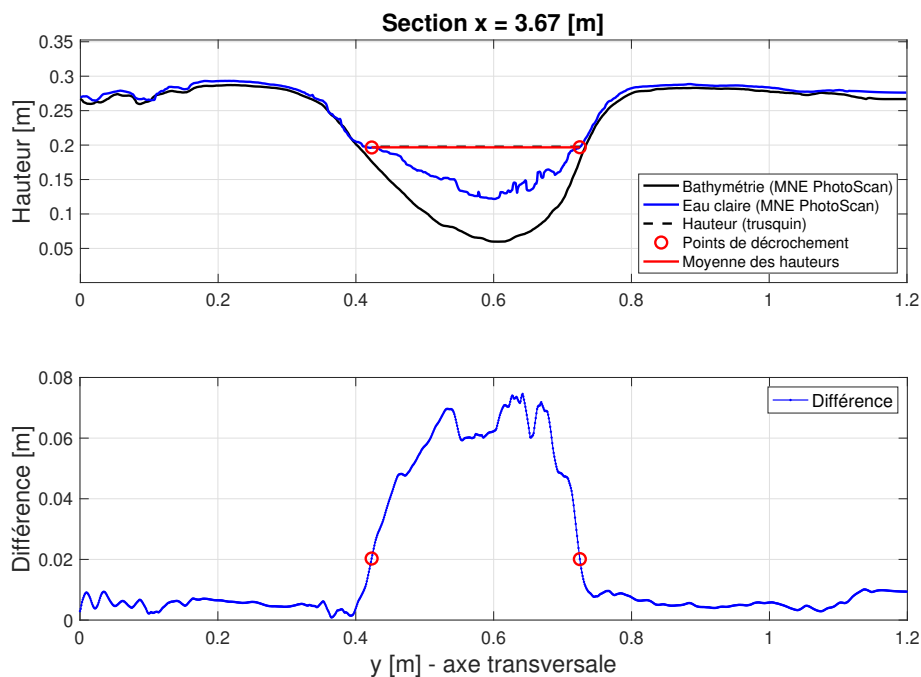


FIGURE 2.1 – Fonctionnement de l'algorithme : section transversale en $x = 3,67$ [m].

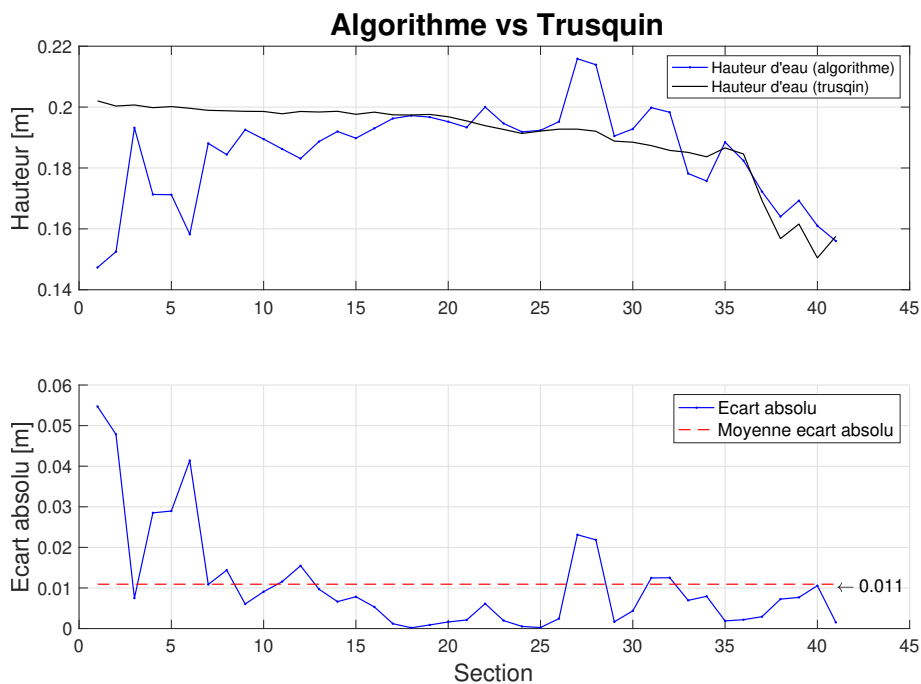


FIGURE 2.2 – Hauteur d'eau et écart absolu pour les 41 sections étudiées.

La moyenne de l'écart absolu est de $0,011$ [m], ce qui représente une erreur de 5% par rapport aux hauteurs mesurées au trusquin. Les mauvais résultats des premières sections ne sont pas dus à un mauvais fonctionnement de l'algorithme mais au MNE_{EC} qui est mal réalisé. En effet, nous pouvons constater sur la figure 2.3 que la hauteur d'eau déterminée ne correspond pas à la mesure du trusquin. L'algorithme détecte bien les points de décrochement qui ne représentent simplement pas la réalité. Les autres sections qui posent problèmes sont présentées dans l'annexe C. [DE SCHOUTHEETE ET HUBERT, 2018] effectuent dans leur mémoire une amélioration du MNE_{EC} et parviennent, avec le même algorithme, à des erreurs inférieures à 5%.

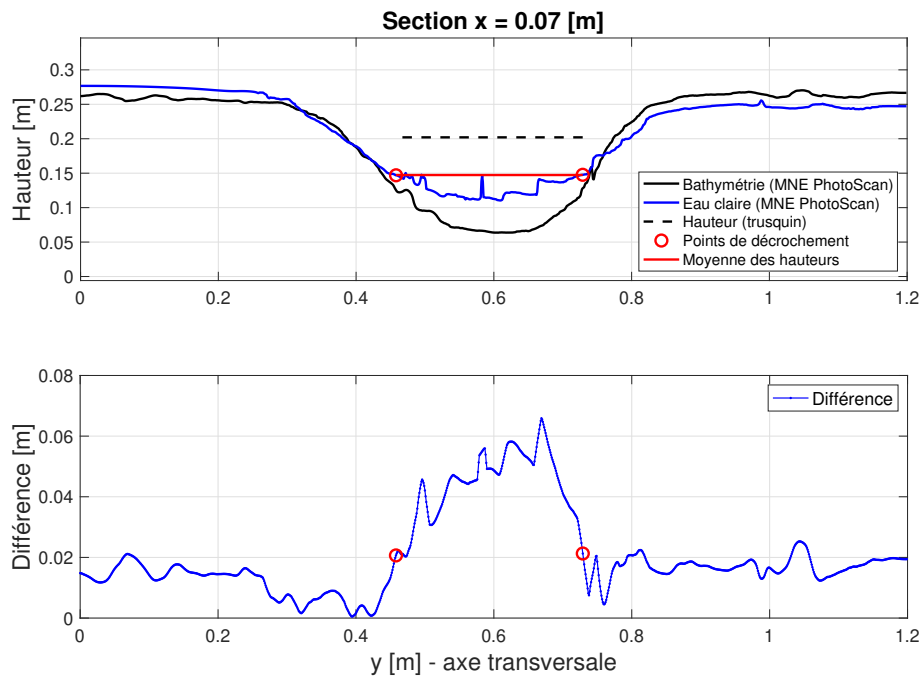


FIGURE 2.3 – Fonctionnement de l'algorithme : section transversale en $x = 0,07$ [m].

2.2 Choix de la rivière

La méthode est élaborée sur une rivière test. Plusieurs critères de sélection entrent en jeu dans le choix du terrain d'étude. Ces différents critères ont mené la décision sur le Train à Archennes (Belgique) qui est un affluent de la Dyle.

Le premier critère est de trouver une rivière munie d'une *station limnimétrique* afin de pouvoir comparer les résultats obtenus avec des altitudes d'eau mesurées, supposées exactes. La Direction des Cours d'Eau non navigables propose 175 stations en Wallonie sur des rivières qui se caractérisent par un bassin hydrographique d'au moins 5000 hectares, une largeur comprise entre 5 et 35 mètres et une vitesse d'écoulement, en période normale, de moyenne à rapide (0,25 [m/s] à 1 [m/s])².

Chaque station possède une échelle limnimétrique dont la *mire est géoréférencée* dans le système de coordonnées Lambert72³. L'altitude de la mire est fournie par rapport au niveau zéro de la mer. Il est donc aisé de trouver l'altitude de la surface de l'eau en additionnant le résultat lu sur l'échelle limnimétrique et l'altitude de la mire. On suppose une différence d'altitude de la surface de l'eau négligeable entre la section au droit de l'échelle limnimétrique et la section analysée (distances de 5 mètres). L'altitude de la mire de l'échelle limnimétrique de la station d'Archennes (voir figure 2.4) est de 39,02 [m].

Il est important à ce stade du mémoire de préciser que la recherche se concentre sur *l'altitude de la surface de l'eau* par rapport au niveau zéro de la mer. L'altitude calculée par la méthode est très facilement comparable avec l'altitude déduite de l'échelle limnimétrique. En effet, analyser et comparer des profondeurs n'est pas rigoureux. Rien ne garantit que la mire est au niveau du thalweg, il est donc difficile de trouver la profondeur de l'eau au niveau de l'échelle limnimétrique. De plus, le thalweg n'est pas fixe, le lit de la rivière étant en mouvement constant. Trouver la profondeur de l'eau nécessiterait d'exécuter la bathymétrie à chaque prise de photos, ce qui n'est pas envisageable. Une estimation de la profondeur sera seulement utilisée pour relativiser l'erreur commise sur les résultats.

2. Aqualim 2011.

3. Le système de coordonnées Lambert72 et l'ancien système de géoréférencement utilisé en Belgique.



FIGURE 2.4 – Station d’Archennes sur le Train : échelle limnimétrique.

Le second critère concerne les *caractéristiques topographiques* de la rivière (largeur et profondeur). Premièrement, elle ne doit pas être trop profonde afin de pouvoir y récolter les données en toute sécurité. Les relevés bathymétriques et les photos sont réalisés manuellement, il faut donc veiller à ne pas mouiller les appareils utilisés. Deuxièmement, les berges doivent être dégagées de toute végétation afin d’avoir une zone facilement analysable pour le début de la recherche.

Le troisième critère est l’*accès à la rivière*. Il faut évidemment pouvoir s’y enfoncer sans devoir sauter d’un pont ou d’une berge. De plus, un terrain d’étude situé aux alentours de Louvain-La-Neuve est préférable afin de pouvoir s’y rendre plusieurs fois par semaine si nécessaire.

Tous ces critères sont respectés par le Train à Archennes illustré à la figure 2.5. Les différentes caractéristiques de cette rivière sont :

- L’altitude de la mire est de 39,02 [m].
- La profondeur de l’eau pendant les relevés bathymétriques et les prises de photo est d’environ 0,50 [m].
- La largeur de la rivière est d’environ 6,50 [m].



FIGURE 2.5 – Le Train à Archennes.

2.3 Modélisation photogrammétrique

Cette section a pour objectif de décrire les étapes nécessaires à l'obtention des modèles trois dimensions avec le logiciel de photogrammétrie. On désigne par *modèle* le résultat trois dimensions de la modélisation photogrammétrique, à partir d'un jeu de photos, sur PHOTOSCAN. Le bon fonctionnement du reste de la méthode dépend directement de la qualité des modèles générés.

Avant tout, il est important de préciser que seule la *rive droite est modélisée*. En effet, construire un modèle complet avec les deux berges nécessite des photos sur lesquelles elles apparaissent simultanément. Cela est difficilement réalisable car l'appareil photo ne permet pas un angle de champ suffisant. Cette précision est justifiée dans la suite du mémoire.

2.3.1 Mise en place des GCPs

Les *Ground Control Points* (GCPs) sont des points de référence géoréférencés et placés sur la zone à modéliser. Ils sont utilisés afin d'optimiser le géoréférencement et la précision géométrique du modèle trois dimensions⁴. Deux types de GCPs sont utilisés. Le premier type est un marqueur codé 12 bit qui est reconnu automatiquement par le logiciel (voir figure 2.6(a)). Celui-ci est monté sur un socle en métal. Le deuxième est une simple planche en bois, percée en son centre, et maintenue au sol par une sardine (voir figure 2.6(b)).

4. *Tutorial (Beginner level) : Orthomosaic and DEM Generation with Agisoft PhotoScan Pro 1.3 (with Ground Control Points)* 2018.

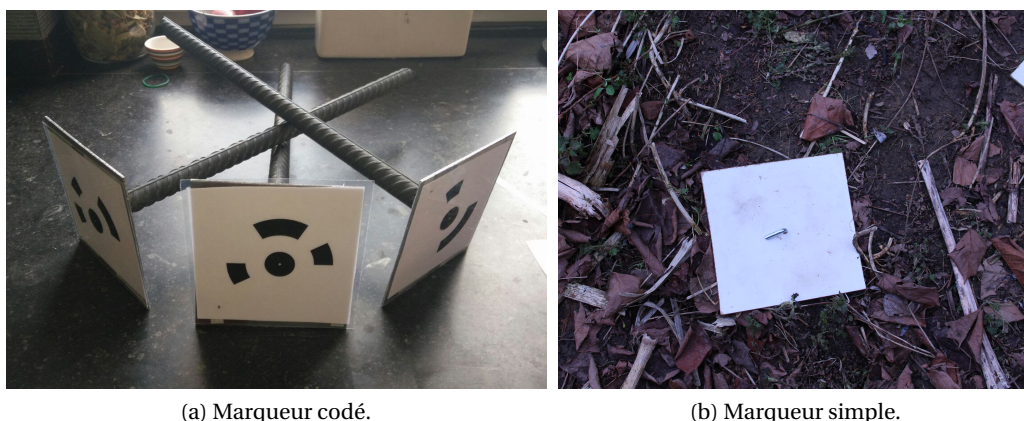


FIGURE 2.6 – Deux type de GCPs utilisés sur le Train à Archennes.

[MICHELETTI, CHANDLER et Stuart N. LANE, 2015] recommandent l'utilisation d'au moins cinq GCPs dans l'analyse d'une berge de 1,2 [m] de long sur 10 [m] de large. La partie de la berge analysée sur le Train est plus petite. Les expériences montrent que la précision des modèles ne varie plus au delà de quatre GCPs. Cependant, quinze GCPs sont placés de manière aléatoire sur la zone à modéliser. Cela offre un choix quant aux GCPs retenus pour être encodés dans le logiciel. Chacun des GCPs est géoréférencé à l'aide d'un dGPS Leica1200+, dont la précision en trois dimensions varie entre 0,01 [m] et 0,04 [m] (le dGPS Leica1200+ est détaillé à l'annexe A.1). Le dGPS fournit les coordonnées Lambert72 des points mesurés. Il fournit également l'altitude par rapport au niveau zéro de la mer.



FIGURE 2.7 – GCPs sur le Train : disposition et repère local.

Afin de mieux s'y retrouver dans les coordonnées, les GCPs sont également utilisés dans le cadre de ce mémoire afin de définir les axes d'un nouveau repère local. Ce nouveau repère est présenté à la figure 2.7. Les GCP1 et GCP4 sont placés sur une droite perpendiculaire à la direction de l'écoulement de sorte à définir la direction de l'axe des abscisses (en travers de la rivière) et la direction de la section analysée. L'axe des ordonnées est défini par rapport à l'axe des abscisses en prenant le GCP1 comme origine du repère cartésien. L'axe des ordonnées est donc parallèle à la direction de l'écoulement et le sens choisi est opposé au sens de l'écoulement. Les coordonnées des GCPs, dans le repère cartésien défini, se fait

par l'utilisation de simples lois géométriques (Pythagore, loi de cosinus). Les coordonnées dans les deux repères sont reprises dans le tableau 2.1.

TABLE 2.1 – Coordonnées des GCPs sur le Train.

Nom	Coordonnées Lambert72		Coordonnées cartésiennes		Altitude [m]
	Est [m]	Nord [m]	x [m]	y [m]	
GCP1	172.062,21	159.932,75	0,00	0,00	40,00
GCP2	172.062,72	159.932,74	0,00	0,52	40,03
GCP3	172.062,76	159.932,33	0,41	0,57	39,86
GCP4	172.062,28	159.932,34	0,42	0,09	39,80

2.3.2 Acquisition de photos

Pour modéliser la berge choisie, le logiciel PHOTOSCAN a besoin de photographies qui constituent la matière première de la modélisation photogrammétrique. La qualité du modèle trois dimensions généré dépend directement de la qualité des photos (définition, éclairage,...). La diversité des points de vue est également d'ordre primordial afin de minimiser les angles morts⁵. De plus, [MICHELETTI, CHANDLER et Stuart N. LANE, 2015] constatent que pour qu'un point soit modélisé, il faut qu'il apparaisse sur au moins trois photographies et il va de soit qu'un point qui n'est pas présent sur une seule photo ne peut pas être modélisé.

Les photos sont prises manuellement, à partir d'un appareil photo, en faisant le tour de la berge et en prenant soin de diversifier les points de vue (photos rasantes, photos en plongée,...). Des photos prises à une distance raisonnable (2 à 3 mètres) permettent d'avoir assez de pixels sur la zone d'intérêt afin de bien prendre en compte les détails. Cette distance permet également un recouvrement très important entre les photos. Sur chaque photo apparaissent au minimum 3 GCPs et un pan d'eau afin de pouvoir modéliser la surface aux abords de la berge. L'appareil photo utilisé est un PENTAX K20D. Ses caractéristiques sont décrites dans l'annexe A.2. A titre d'exemple, un échantillon de photos utilisées pour l'obtention d'un modèle de la berge sans végétation (12 mars 2018) est montré à la figure 2.8.



FIGURE 2.8 – Extrait du jeu de photos du 12 mars 2018.

5. Agisoft PhotoScan User Manual 2018.

2.3.3 Utilisation du logiciel

Cette section décrit les manipulations nécessaires à l'obtention d'un modèle trois dimensions et de son *Modèle Numérique d'Élévation* (MNE), exploitable sur MATLAB. Agisoft donne des conseils quant aux étapes à suivre⁶. Celles-ci sont adaptées aux besoins du projet. La démarche suivie est la suivante :

1. Importation des photos de la berge dans le logiciel de photogrammétrie PHOTOSCAN. Des masques délimitant la *zone étudiée* sont appliqués sur chaque photo. Cela permet de réduire le temps de calcul des étapes 2. et 4.
2. Alignement des photos. A ce stade, le logiciel trouve les *feature points* qui correspondent à un pixel ou à un détail de l'image susceptible d'être reconnu sur d'autres images afin de les relier les unes aux autres. Ils composent un premier nuage de points appelé *sparse point cloud* comme montré à la figure 2.9(a). Cette étape permet d'estimer les différentes positions de l'appareil photo d'où les photos sont prises.
3. Optimisation des positions de l'appareil photo. A la suite de l'alignement, les GCPs sont repérés et encodés dans le repère cartésien défini à la figure 2.7. La procédure d'alignement est relancée et le résultat est *un nuage de points géoréférencés* auquel sont ajoutés les quatre GCPs. Le logiciel attribue des coordonnées cartésiennes (x,y,z) à chacun des points du modèle.
4. Construction du *dense point cloud*. Le logiciel utilise les positions de l'appareil photo afin de comparer les zones recouvertes par chaque photographie. Les pixels des zones communes sont comparés entre eux. Le résultat est un nuage de points, comme montré à la figure 2.9(b), 100 à 1000 fois plus dense que le *sparse point cloud*.
5. Construction du *maillage*. Le maillage relie tous les points du dense point cloud afin d'obtenir un modèle en trois dimensions continu. Celui-ci peut-être recouvert de texture pour un rendu continu, comme montré à la figure 2.9(c).
6. Création du *modèle numérique d'élévation*. Le MNE (voir figure 2.9(d)) est généré à partir du dense point cloud. Celui-ci représente la topographie de la zone étudiée. Un code couleur en fonction de l'altitude de chaque point représente le relief du modèle. C'est ce MNE qui est exporté afin d'être analysé sur MATLAB.

Nous avons maintenant toutes les notions pour mieux comprendre pourquoi seule une des deux berges est modélisée. En effet, l'eau étant partiellement transparente et en mouvement constant, il est difficile pour le logiciel de repérer des *features points* sur les photos au niveau de la surface de l'eau. Il est dès lors impossible de réaliser un modèle complet de la rivière qui nécessite des passages où seule la surface de l'eau est présente. Dans ces conditions, le logiciel est incapable de faire "le lien" entre les deux berges. Cependant, nous pouvons constater, sur le résultat des différentes étapes (voir figure 2.9), que l'eau est partiellement modélisée aux abords de la berge. La modélisation de l'eau est nécessaire au fonctionnement de la méthode.

6. *Tutorial (Beginner level) : Orthomosaic and DEM Generation with Agisoft PhotoScan Pro 1.3 (with Ground Control Points)* 2018.

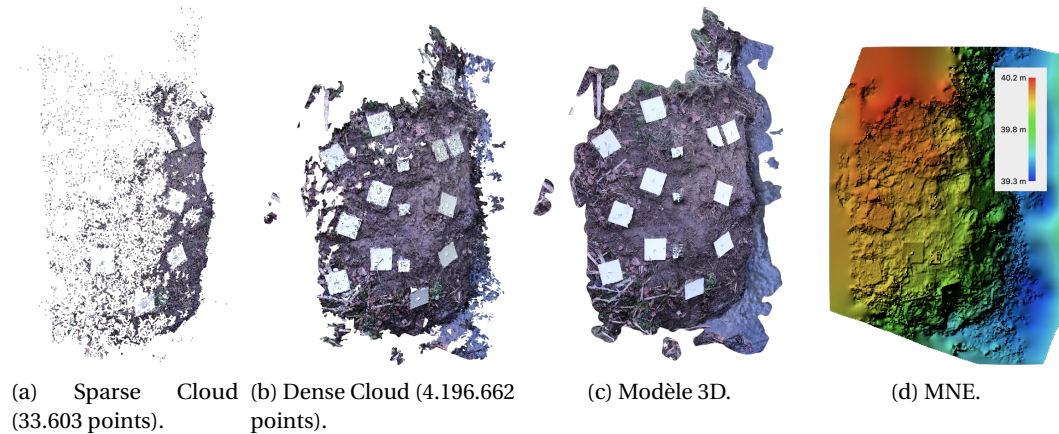


FIGURE 2.9 – Etapes de la modélisation photogrammétrique in situ : exemple du Train.

Pour finir, le MNE du modèle trois dimensions est exporté dans un format lisible par MATLAB afin de poursuivre le reste de la méthode et de procéder à l'analyse de ce MNE par l'algorithme. L'utilisateur doit spécifier deux choses :

- Les limites d'abscisses et d'ordonnées du MNE exporté. Dans le cadre de ce mémoire, au vu de la dimension de la zone étudiée, les limites vont de -1 [m] à 2 [m] en abscisses et en ordonnées.
- La largeur et la longueur de chaque pixel. Le choix posé afin de faciliter l'analyse ultérieure est un carré de $0,001$ [m] de côté. Le MNE exporté est donc défini tous les mm en x et en y.

Afin d'assurer la reproductibilité de la méthode, quatre modèles sont réalisés à des périodes différentes : deux modèles sans végétation (12 et 30 mars 2018), un modèle avec une faible végétation (6 avril 2018) et un dernier modèle avec une végétation moyenne (17 avril 2018). Tous les modèles trois dimensions sont détaillés dans l'annexe B.

2.4 Relevés bathymétriques sur le Train

L'algorithme développé dans la section 2.1 se base sur la différence entre le MNE et la bathymétrie. Connaître la bathymétrie de la zone étudiée est donc une condition nécessaire au bon fonctionnement de la méthode. Une technique de mesure couramment utilisée en Belgique est le sonar acoustique multifaisceau ou monofaisceau⁷. Malheureusement, le SPW ne dispose d'aucun relevé bathymétrique pour le Train dans sa base de données. L'UCL ne possède pas de matériel dédié spécifiquement à la mesure de la bathymétrie des cours d'eau. Une technique pour la mesure de la bathymétrie a donc dû être développée.

La bathymétrie est réalisée à l'aide d'un dGPS Leica1200+ (annexe A.1) et d'une corde échelonnée (tous les $0,05$ [m] sur la berge et alentour, tous les $0,20$ [m] dans la rivière) comme illustré à la figure 2.10. Accomplir une bathymétrie complète (sur toute la longueur de la zone étudiée) est fastidieux et inutile. Seule une section de la bathymétrie de la rivière est donc exécutée. Le point de départ de la section bathymétrique est en $(0,0)$. Celle-ci est, par définition de la section, perpendiculaire à la direction de l'écoulement et suit donc l'axe des abscisses du repère cartésien défini à la section 2.3.1. Deux relevés bathymétriques différents pour cette section sont effectués le 12 mars et le 23 avril 2018.

7. *Les voies hydrauliques, les voies du développement durable* p. d.



FIGURE 2.10 – Acquisition d’une section bathymétrique sur le Train.

Deux relevés bathymétriques d’une même section ne donneront jamais le même résultat car la bathymétrie est variable en fonction du temps et des événements météorologiques. De plus, elle est réalisée manuellement et le dGPS Leica présente une erreur en trois dimensions aléatoire de 0,01 [m] à 0,04 [m]. La méthode doit donc être assez solide pour ne pas dépendre de comment ni de quand la bathymétrie est réalisée. A la figure 2.11 on peut constater que les deux sections bathymétriques ne sont pas exactement les mêmes bien que très semblables. Ceci est dû aux raisons citées ci-dessus. Pour pouvoir comparer l’altitude des MNE et de la bathymétrie, une approximation linéaire est effectuée entre chaque point de mesure de la bathymétrie. Celle-ci est par la suite discrétisée afin d’obtenir son altitude tous les mm le long de la section (comme les MNE générés). Pour rappel, seule la rive droite est analysée.

La première bathymétrie est réalisée en même temps que le premier modèle sans végétation (12 mars 2018). La figure 2.12 compare la section étudiée du MNE avec la même section bathymétrique. Pour rappel, une section est une coupe transversale de la rivière, réalisée perpendiculairement à la direction de l’écoulement de l’eau, en regardant, ici, la rivière “face courant”.

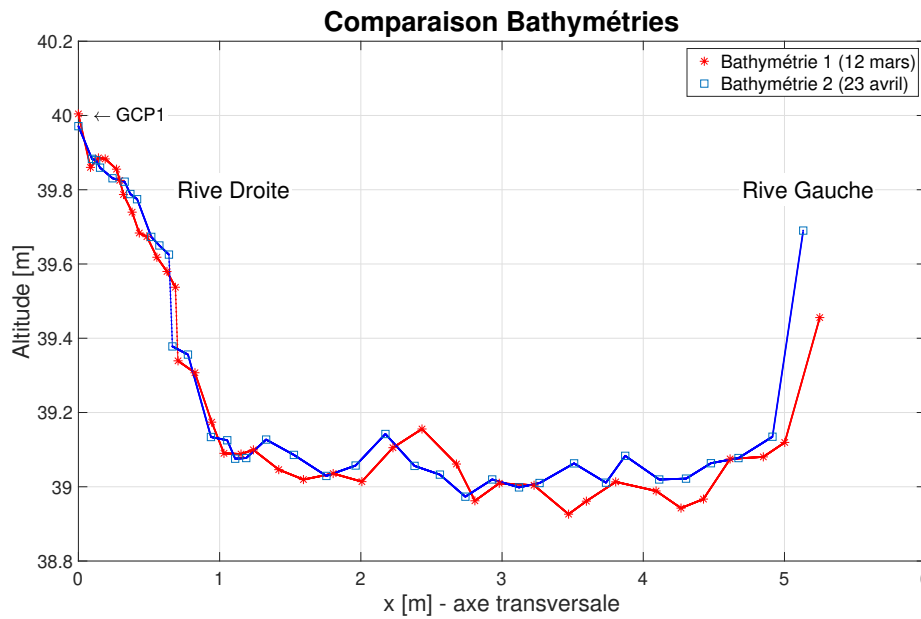


FIGURE 2.11 – Section bathymétriques sur le Train.

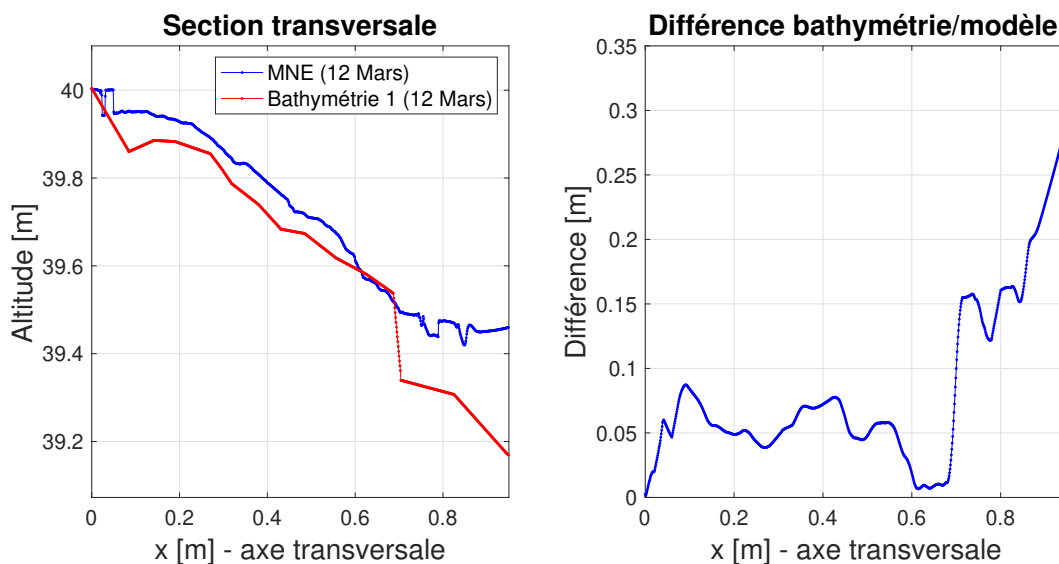


FIGURE 2.12 – Comparaison entre MNE et bathymétrie le 12 mars 2018.

On constate immédiatement que le MNE est plus élevé que la bathymétrie. Cela est certainement dû à l'enfoncement de la tige du dGPS Leica1200+ dans le sol boueux lors de la mesure alors que PHOTOSCAN mesure, lui, la surface. On constate également qu'à partir de 0,7 [m] le MNE se détache nettement de la bathymétrie ce qui correspond au point où l'eau est présente.

2.5 Analyse des données in situ

Cette section est dédiée à l'adaptation de l'algorithme, développé à la section 2.1, aux données des MNEs in situ. Les principes de l'algorithme pour la détection des points de décrochement in situ sont globalement les mêmes que ceux étudiés et appliqués en laboratoire.

Cependant, sur le Train à Archennes, on ne se concentre que sur la berge de droite. On ne détecte

donc plus qu'*un seul point de décrochement*. Une petite adaptation en découle : la recherche de ce point de décrochement se fait en parcourant le graphe de la différence, entre la MNE et la bathymétrie (voir figure 2.12), de gauche à droite et de droite à gauche mais, cette fois-ci, sur *une seule berge*.

De plus, un autre changement dans le fonctionnement de l'algorithme est à relever. L'utilisateur doit maintenant intervenir afin de lui donner un coup de pouce. Il doit estimer une abscisse probable pour le point de décrochement (via la variable *Target*) et un intervalle dans lequel il faut chercher le point de décrochement (via la variable *Fenetre*), autour de l'abscisse estimé.

Une distinction est faite dans ce mémoire entre le terme "*variable*" qui désigne un paramètre nécessitant une approximation quantitatif in situ introduit par l'utilisateur et le terme "*seuil*" qui désigne un paramètre faisant l'objet d'une analyse plus poussée et qui est conseillé à l'utilisateur. L'algorithme de détection nécessite l'introduction de deux nouveaux seuils en plus du seuil *Count* et *Difference* déjà introduits dans la section 2.1 :

Soient,

- *Derivee*, un seuil représentant une dérivée prise par rapport à deux points consécutifs.
- *Difference* et *DiffUp*, des seuils représentant une différence d'altitude, en mètre.
- *Count*, un seuil représentant un nombre de points.
- *Target*, une variable pour estimer l'abscisse probable du point décrochement, en mètre.
- *Fenetre*, une variable pour estimer l'intervalle dans lequel le point de décrochement est recherché, en mètre.
- *Hvege*, une variable pour estimer la hauteur de la végétation, en mètre.
- *PercVege*, une variable pour estimer le pourcentage de la berge recouverte par la végétation.

Alors, le point de décrochement de gauche à droite est détecté, sur le graphe de la différence (voir figure 2.12), quand trois conditions sont respectées sur *Count* points consécutifs (p.ex. *Count* = 2) :

1. La dérivée est supérieure au seuil *Derivee* (p.ex. *Derivee* = 3).
2. La différence absolue est supérieure au seuil *Difference*.
3. L'altitude du MNE est supérieure à l'altitude de la bathymétrie.

Le point de décrochement de droite à gauche est détecté quand trois conditions sont respectées sur *Count* points consécutifs :

1. La dérivée est supérieure au seuil *Derivee* (p.ex. *Derivee* = 3).
2. La différence absolue est inférieure au seuil *DiffUp* (p.ex. *DiffUp* = 0,15 [m]).
3. L'altitude du MNE est supérieure à l'altitude de la bathymétrie.

Le seuil *Difference* peut d'ores et déjà être défini. En effet, afin d'éviter de détecter le point de décrochement sur la berge, il est bon d'y estimer l'erreur commise. Comme précisé à la section 2.3 et 2.4, l'altitude du MNE et l'altitude de la bathymétrie sont définies tous les mm le long de la section. Il est donc possible de mesurer l'erreur relative, commise sur l'altitude, entre le MNE et la bathymétrie tous les mm (voir equation 2.1). Le seuil *Difference* est égal à la moyenne de ces erreurs sur la berge (voir equation 2.3). La longueur de la berge est définie par l'utilisateur à travers les variables *Target* et *Fenetre*.

Soient,

- e_i , l'erreur absolue d'altitude à la position i (le long de la section $y = 0$).
- $h_{PS,i}$, l'altitude du MNE à la position i le long (le long de la section $y = 0$).
- $h_{Bathy,i}$, l'altitude de la bathymétrie à la position i (le long de la section $y = 0$).

- L_{berge} , la longueur de la berge mesurée en nombre de points (ou de manière équivalente en mm puisque chaque pixel fait 1 [mm] de côté).
- t la valeur de la variable Target, en mètre.
- f la valeur de la variable Fenetre, en mètre.

$$e_i = |h_{\text{PS},i} - h_{\text{Bathy},i}| \quad [\text{m}] \quad (2.1)$$

Et,

$$L_{\text{berge}} = \left(t - \frac{f}{2} \right) \cdot 1000 \quad \left[\text{m} \cdot \frac{\text{\#points}}{\text{m}} \right] \quad (2.2)$$

Donc,

$$\text{Difference} = \frac{1}{L_{\text{berge}}} \cdot \sum_{i=1}^{L_{\text{berge}}} e_i \quad [\text{m}] \quad (2.3)$$

Les autres seuils sont déterminés empiriquement et font l'objet d'une étude plus approfondie dans la section 2.6.2. Une fois le point de décrochement détecté, l'algorithme renvoie comme altitude de l'eau, la moyenne de l'altitude sur les 50[mm] (50 points) suivant le point de décrochement détecté. Cette moyenne est ensuite corrigée en enlevant l'erreur estimée (le seuil Difference).

Soit

h_{eau} , l'altitude de l'eau de la section étudiée par rapport au niveau 0 de la mer, en mètre.

$$h_{\text{eau}} = \frac{1}{50} \cdot \sum_{i=1}^{50} h_{\text{PS},i} - \text{Difference} \quad [\text{m}] \quad (2.4)$$

Dans le cas où le modèle est recouvert entièrement ou partiellement de végétation, le seuil Difference doit être adapté. En effet, la présence de végétation ne doit pas être comptée comme une erreur supplémentaire et ne doit donc pas augmenter l'erreur moyenne commise sur la berge. Le seuil Difference, développé dans l'équation 2.3, devient :

$$\text{Différence} = \frac{1}{L_{\text{berge}}} \sum_{i=1}^{L_{\text{berge}}} e_i - \text{PercVege} \cdot \text{Hvege} \quad [\text{m}] \quad (2.5)$$

Un exemple du bon fonctionnement de l'algorithme sur un MNE sans végétation (12 mars) est donné à la figure 2.13. Il est testé de droite à gauche et de gauche à droite pour les 2 bathymétries. Cela donne donc 4 mesures différentes pour une seule combinaison de variable Target et Fenetre. Les paramètres utilisés sont les suivant :

- Target = 0,65 [m].
- Fenêtre = 0,4 [m].
- Count = 2.
- Dérivée = 3.
- DiffUp = 0,15 [m].

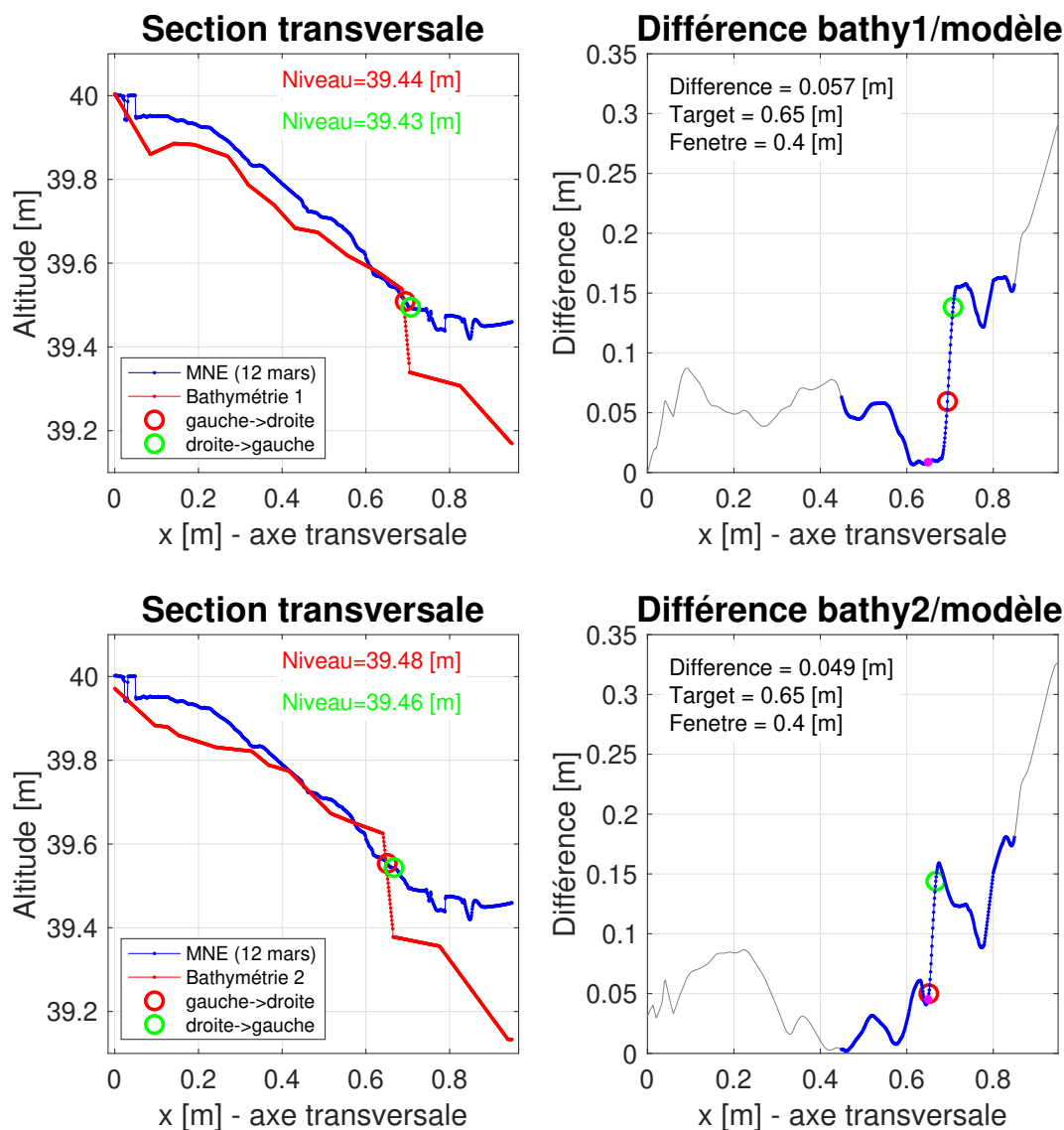


FIGURE 2.13 – Exemple du fonctionnement de l’algorithme : détection de l’altitude de la surface de l’eau.

Il faut cependant préciser que, dans l’exemple de la figure 2.13, l’abscisse de décrochement (Target) est estimée en connaissant le résultat. Il est évident que la méthode ne doit pas uniquement fonctionner en connaissant au préalable l’abscisse de décrochement. La section 2.6 présente les résultats de manière plus générale en testant l’algorithme sur plusieurs combinaisons de Target et de Fenetre.

2.6 Résultats

Cette section a pour but de présenter les résultats fournis par l’algorithme sur chaque type de modèle (sans végétation, faible végétation, végétation moyenne). Le panel de valeurs pour les variables Target et Fenetre utilisé est explicité pour chaque type de modèle. Celui-ci varie d’un modèle à l’autre en fonction de sa qualité au niveau du point de décrochement (voir annexe B). Il est, en effet, nécessaire de vérifier si l’algorithme fonctionne même si l’estimation de ces variables n’est pas exacte.

La profondeur d’eau de la rivière est estimée à 0,50 [m] pour tous les modèles. Le but étant d’avoir une méthode robuste, digne de confiance, et non des résultats au mm près, des résultats avoisinant les 10% (0,05 [m]) d’erreur, par rapport à l’estimation de la profondeur, semblent honorables compte tenu

des erreurs liées aux appareils de mesure.

2.6.1 Résultats généraux

Les seuils utilisés pour tous les résultats présentés dans cette section sont les suivants :

- Count = 2.
- Derivee = 3.
- DiffUp = 0,15 [m].

Modèles sans végétation (12 et 30 mars 2018)

L'abscisse maximale des MNEs des modèles sans végétation est de 0,95 [m], le long de la section à partir de l'origine. Au delà, le logiciel PHOTOSCAN ne détecte plus l'eau et l'altitude des points est tout à fait incohérente. Le panel de valeurs utilisé pour les variables Target et Fenetre en vu de l'obtention des résultats est le suivant :

- Target = [0,65 : 0,05 : 0,75] [m] (c.-à-d. de 0,65 [m] à 0,75 [m] par pas de 0,05 [m]).
- Fenetre = [0,1 : 0,05 : 0,4] [m] (c.-à-d. de 0,1 [m] à 0,4 [m] par pas de 0,05 [m]).

Il y a donc 21 combinaisons différentes de Target et Fenetre disponibles. Chacune des combinaisons est testée sur les deux MNEs, pour chacune des deux bathymétries. Il y a donc un total de 84 résultats pour la recherche de gauche à droite et 84 résultats pour la recherche de droite à gauche qui sont montrés, sous forme de boxplot, à la figure 2.14.

L'altitude relevée sur l'échelle limnimétrique le 12 mars 2018 (resp. 30 mars 2018) sur le Train est de 39,42 [m] (resp. 39,43 [m]). Nous pouvons constater à la figure 2.14 que 75% des résultats sont compris dans un intervalle de 0,03 [m] autour de la valeur réelle. Ce qui indique que l'algorithme trouve à chaque fois, à 0,03 [m] près, la même valeur pour l'altitude. L'erreur maximale est d'environ 0,06 [m] pour la recherche de gauche à droite et d'environ 0,05 [m] pour la recherche de droite à gauche. La profondeur d'eau est d'environ 0,50 [m]. Cela donne donc une *erreur maximale* d'environ 10%. Les résultats pour les MNEs sans végétation sont très satisfaisants.

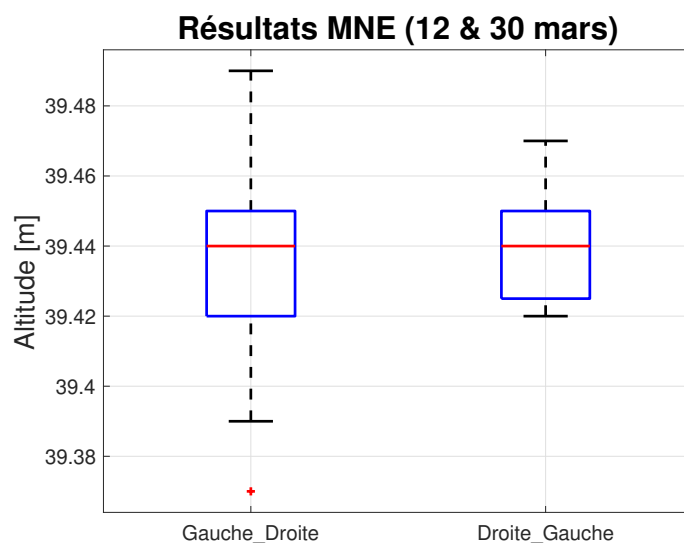


FIGURE 2.14 – Résultats généraux des MNEs sans végétation.

Modèle à faible végétation (6 avril 2018)

L'abscisse maximale du modèle à faible végétation est de 0,95 [m], le long de la section à partir de l'origine. Le même panel de variables que pour les modèles sans végétation est utilisé. Il y a donc 21 combinaisons différentes de Target et Fenetre disponibles. Chacune des combinaisons est testée sur le MNE, pour chacune des deux bathymétries. Cela fait donc un total de 42 résultats pour la recherche de gauche à droite et 42 résultats pour la recherche de droite à gauche qui sont montrés, sous forme de boxplot, à la figure 2.15. La variable Hvege est estimée à 0,1 [m] et la variable Percvege à 0,1.

L'altitude relevée sur l'échelle limnimétrique le 6 avril 2018 est de 39,44 [m]. Nous pouvons constater à la figure 2.15 que la quasi totalité (mise à part deux outliers, discutés dans la suite) des résultats sont compris dans un intervalle de 0,03 [m] aux alentours de la valeur réelle. Ce qui indique que l'algorithme trouve à chaque fois, à 0,03 [m] près, la même valeur pour l'altitude. L'erreur maximale est d'environ 0,02 [m] pour la recherche de gauche à droite et pour la recherche de droite à gauche. La profondeur d'eau est d'environ 0,50 [m]. Cela donne donc une erreur maximale d'environ 3%. Les résultats pour ce modèle sont également très satisfaisant.

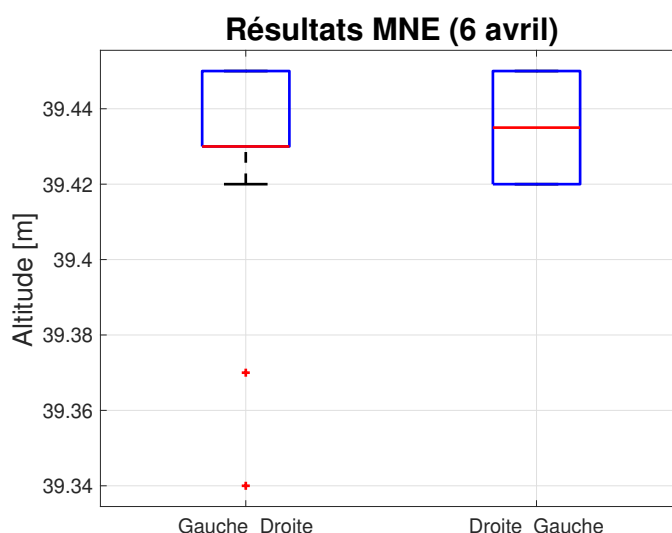


FIGURE 2.15 – Résultats généraux du MNE, avec une faible végétation.

Modèle à moyenne végétation (17 avril 2018)

La qualité du modèle (voir annexe B) donne une modélisation correcte entre 0,20 [m] et 0,75 [m], le long de la section à partir de l'origine. Au delà, PHOTOSCAN ne détecte plus l'eau et l'altitude des points est tout à fait incohérente. Le panel de valeurs utilisé pour les variables Target et Fenetre en vue de l'obtention des résultats est le suivant :

- Target = [0,65 : 0,05 : 0,70] [m].
- Fenetre = [0,05 : 0,05 : 0,1] [m].

Il y a donc 4 combinaisons différentes de Target et Fenetre disponibles. Chacune des combinaisons est testée sur le MNE pour chacune des deux bathymétries. Cela fait donc un total de 8 résultats pour la recherche de gauche à droite et 8 résultats pour la recherche de droite à gauche qui sont montrés, sous forme de boxplot, à la figure 2.16. La variable Hvege est estimée à 0,1 [m] et la variable Percvege à 0,3.

L'altitude relevée sur l'échelle limnimétrique le 17 avril 2018 est de 39,44 [m]. Nous pouvons constater à la figure 2.16 que la quasi totalité (mise à part deux outliers, discuté dans la suite) des résultats sont

compris dans un intervalle de 0,04 [m] juste au-dessus de la valeur réelle. L'erreur maximale est de 0,04 [m] pour la recherche de gauche à droite et pour la recherche de droite à gauche. La profondeur d'eau est de 0,50 [m]. Cela donne donc une erreur maximale d'environ 5%. Les résultats pour ce modèle sont également satisfaisants. Cependant, la qualité de la modélisation ne permet pas l'obtention de suffisamment de résultats qui sont donc à prendre avec précaution.

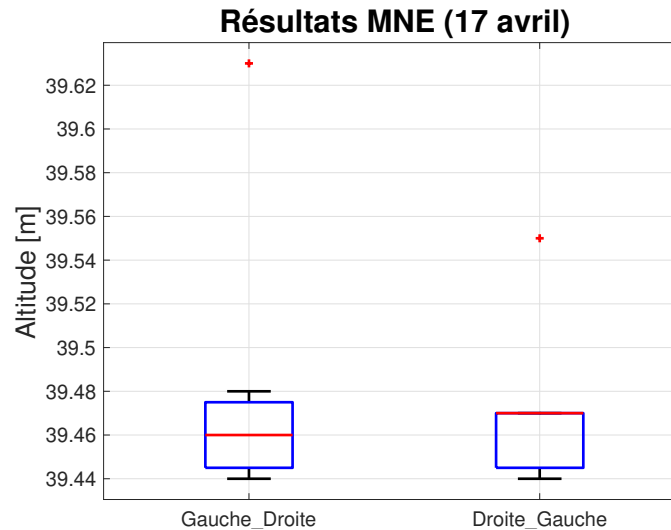


FIGURE 2.16 – Résultats généraux du MNE, avec une moyenne végétation.

2.6.2 Discussion sur les paramètres

Deux types de paramètres sont utilisés lors du développement de l'algorithme à la section 2.5 :

- Les seuils *Count*, *Derivee* et *DiffUp*. Ceux-ci font l'objet de cette section afin de conseiller des seuils optimaux à l'utilisateur. Le seuil *Difference* a déjà été discuté à la section 2.5.
- Les variables *Target*, *Fenetre*, *Hvege* et *PercVege* d'estimation spatiale que l'utilisateur doit estimer.

Analyse des seuils

L'analyse des seuils se fait en comparant les résultats de chaque MNE pour des combinaisons de seuils *Count* et *Derivee* différentes. Le seuil *DiffUp*, quant à lui, n'intervient que dans la détection de droite à gauche (voir section 2.5) et est analysé séparément. Tous les boxplot reprenant les résultats, nécessaires à l'analyse des seuils sont exposés dans l'annexe D. Le tableau 2.2 résume l'analyse de tous les résultats de chaque modèle. Une combinaison des seuils *Count* et *Derivee* est acceptable si l'erreur maximale des résultats est inférieure ou égale à 10% (0,05 [m]).

TABLE 2.2 – Récapitulatif des combinaisons de seuil

Seuil		Derivee		
		1	2	3
Count	1	12 mars	12 mars	12 mars
		30 mars	30 mars	30 mars
		6 avril	6 avril	6 avril
		17 avril	17 avril	17 avril
	2	12 mars	12 mars	12 mars
		30 mars	30 mars	30 mars
		6 avril	6 avril	6 avril
		17 avril	17 avril	17 avril
	3	12 mars	12 mars	12 mars
30 mars		30 mars	30 mars	
6 avril		6 avril	6 avril	
17 avril		17 avril	17 avril	

De l'analyse reprise dans le tableau 2.2, nous pouvons choisir les 3 combinaisons de seuil Count et Derivee mises en évidence en vert dans le tableau. Des seuils plus élevés n'améliorent pas, voire détériorent les résultats. Celle retenue pour l'analyse des résultats de la section précédente est la combinaison Count = 2 et Derivee = 3. Les seuils DiffUp compris entre 0,07 [m] et 0,24 [m] n'ont pas une grande influence sur les résultats. Un seuil de 0,15 [m], par exemple, satisfait tous les modèles.

Cependant quelques remarques et constatations sont à ajouter :

1. Pour les modèles sans végétation (12 et 30 mars 2018), la valeur des seuils n'a pas une grande influence (voir annexe D).
2. Plus il y a de végétation plus les seuils semblent prendre de l'importance. Pour rappel, le modèle du 6 avril 2018 présente une faible végétation et le modèle du 17 avril présente une végétation moyenne.
3. Le seuil Count semble influencer les résultats moins radicalement que le seuil Derivee.

Discussion sur les variables

L'utilisateur est invité à estimer l'abscisse probable de décrochement et une fenêtre de recherche. L'objectif n'est pas de trouver l'abscisse sans la méthode mais simplement de l'estimer en un coup d'œil pour aider l'algorithme. Nous avons constaté à la section 2.6 qu'une imprécision sur l'estimation n'influait pas le résultat (plusieurs panels de variables sont analysés). Les estimations peuvent se faire par des mesures grossières in situ, en observant une photo, un graphe, etc. De la même manière, l'utilisateur doit également estimer la hauteur moyenne et le pourcentage d'occupation de la végétation de la section d'intérêt.

2.6.3 Critiques

Les résultats sont très encourageants. L'abscisse de décrochement semble être détecté correctement dans toutes les situations proposées en faisant varier les variables Target et Fenetre (à l'exception de quelques outliers). Par contre, l'algorithme se base sur la détection d'un décrochage entre le modèle trois dimensions et la bathymétrie. Cela nécessite donc une séparation brusque de la ligne d'eau et de

la bathymétrie. Cette brusque séparation pourrait poser problème pour les berges à pente douce où le décrochement se fait progressivement.

Cependant, l'algorithme semble fonctionner de manière plus efficace en parcourant le graphe de droite à gauche que de gauche à droite. En effet, l'algorithme a davantage l'occasion de se tromper quand le graphe est parcouru de gauche à droite. Sur la berge, beaucoup d'erreurs dues à l'imprécision relative entre les MNEs et bathymétrie font obstacle. Ce phénomène est accentué en présence de forte végétation.

De plus, en analysant les boxplot des résultats généraux de la section 2.6, nous pouvons constater que des outliers subsistent. Ce problème est vite pallié par la recherche dans les deux sens. En effet, si le résultat de gauche à droite diffère trop du résultat de droite à gauche, un graphe tel que montré à la figure 2.17 peut être mis à la disposition de l'utilisateur qui juge alors de l'exactitude de chacun des résultats proposés.

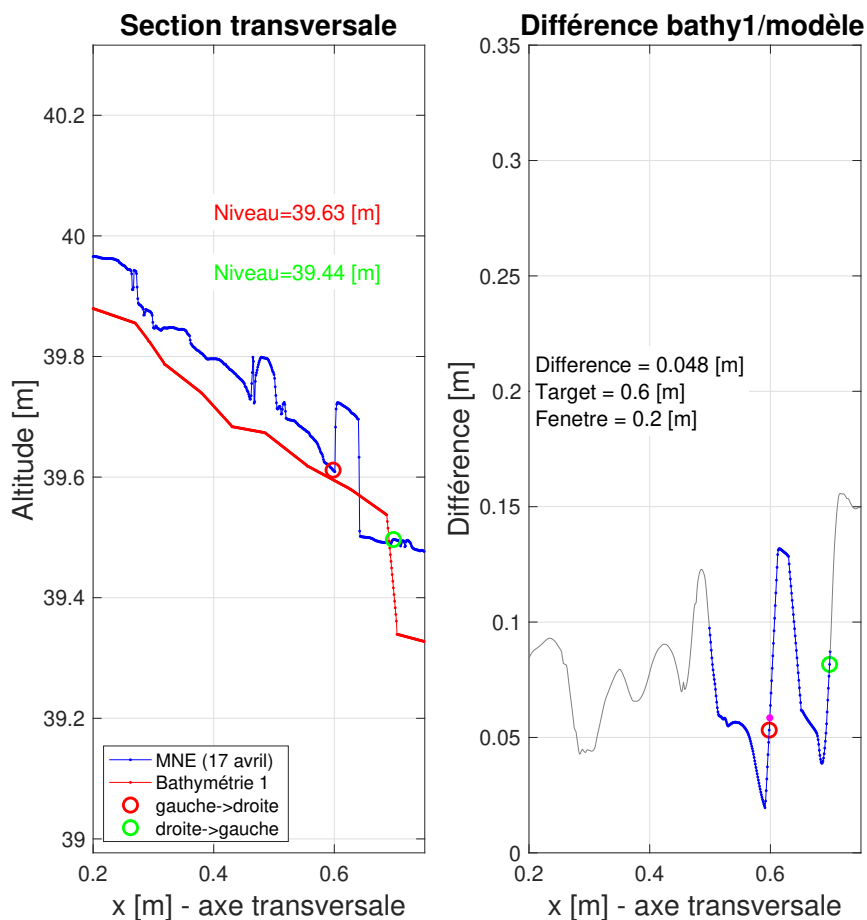


FIGURE 2.17 – Détection de l'altitude de la surface de l'eau le 17 avril 2018.

Chapitre 3

Test de la méthode

Ce chapitre a pour but de tester la méthode développée dans le chapitre 2, sur une nouvelle rivière, en se mettant à la place d'un utilisateur qui ne connaît pas les résultats attendus. Deux jeux de photos différents sont analysés; l'un pris avec un appareil photo, l'autre avec un drone.

3.1 Choix de la rivière

Les critères de sélection pour le choix de la rivière sont globalement les mêmes que ceux décrits dans la section 2.2 pour le Train à Archennes. Seule une contrainte de dégagement des berges s'ajoute afin de pouvoir faire voler le drone, au dessus de la rivière, sans risque de heurt vu la présence d'arbres. Le choix s'est porté sur la Dyle à Florival dont une photo aérienne est présentée à la figure 3.1.



FIGURE 3.1 – La Dyle à Florival

Cette rivière est plus grande en terme de dimensions (largeur et profondeur) que le Train à Archennes. La berge analysée est beaucoup plus escarpée, elle présente une pente plus importante que la berge du Train. Cela entraîne des difficultés quant aux relevés bathymétriques. La berge choisie est, cette fois-ci,

sur la *rive gauche* de la rivière. Les différentes caractéristiques de cette rivière sont ¹ :

- L'altitude de la mire de l'échelle limnimétrique est de 31,68 [m].
- La profondeur de l'eau pendant les relevés bathymétriques et la prise des deux jeux de photos est d'environ 1,4 [m].
- La largeur de la rivière est de 11 [m].
- Le débit moyen annuel est de 3,92 m³/s.

3.2 Mise en place des GCPs

Les GCPs utilisés sont du même type que ceux utilisés sur le Train à Archennes (voir section 2.3.1). Au vu des constatations faites sur le nombre de GCPs utiles sur le Train, seulement 4 GCPs sont géoréférencés sur la berge de la Dyle.

Les GCPs sont également utilisés afin de définir les axes du repère cartésien. Cela permet de définir un nouveau système de coordonnées local pour les points du MNE, plus facilement utilisable que le système de coordonnées Lambert72. Les axes sont orientés de la même manière que sur le Train. Les GCP1 et GCP2 sont placés sur une droite perpendiculaire à la direction de l'écoulement de sorte à définir la direction de l'axe des abscisses (en travers de la rivière) et la direction de la section analysée. L'axe des ordonnées est défini par rapport à l'axe des abscisses en prenant le GCP1 comme origine du repère cartésien. L'axe des ordonnées est donc parallèle à la direction de l'écoulement et le sens choisi est opposé au sens de l'écoulement. Le système d'axe sur la Dyle est représenté à la figure 3.2. Chaque GCP est géoréférencé à l'aide du dGPS Leica1200+. Les coordonnées des GCPs dans le repère cartésien et dans le repère du Lambert72 sont repris dans le tableau 3.1.

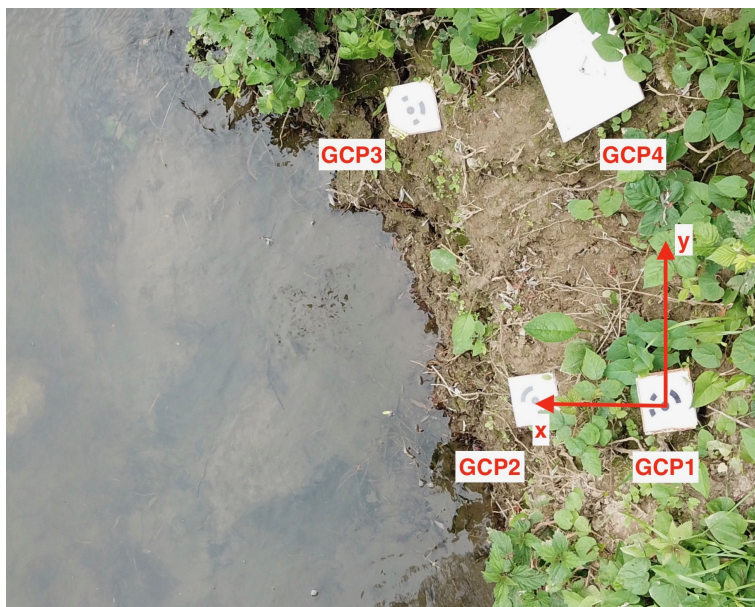


FIGURE 3.2 – Placement des GCPs et système d'axes sur la Dyle à Florival.

1. Aqualim 2011.

TABLE 3.1 – Coordonnée des GCPs sur la Dyle.

Nom	Coordonnées Lambert72		Coordonnées cartésienne		Altitude [m]
	Est [m]	Nord [m]	x [m]	y [m]	
GCP1	169.638,69	161.039,30	0,00	0,00	32,89
GCP2	169.638,86	161.039,29	0,16	0,00	32,44
GCP3	169.639,03	161.038,62	0,35	0,67	32,39
GCP4	169.638,74	161.038,66	0,06	0,64	32,85

3.3 Relevé bathymétrique sur la Dyle

La bathymétrie est relevée le 7 mai 2018 en même temps que le jeu de photos réalisé avec l'appareil photo. Celle-ci a été réalisée avec le dGPS Leica à l'aide d'une corde échelonnée tous les 0,05 [m] aux alentours du point de décrochement et tous les 0,20 [m] pour le reste de la rivière. Cependant, les difficultés liées au terrain étudié sont plus importantes que sur le Train à Archennes. Les berges sont très escarpées, il est donc difficile de prendre un relevé bathymétrique dans des conditions correctes. De plus, la rivière est plus profonde que sur le Train. La bathymétrie n'a pas pu être effectuée sur toute la largeur.

De nouveau, seule la section en $y = 0$ est analysée. Attention, il est à noter que la section n'est plus présentée "face courant" mais "dos au courant". La bathymétrie est effectuée perpendiculairement à la direction de l'écoulement, à partir de l'ordonnée à l'origine du repère (0,0), le long de l'axe des abscisses. Une fois les données récoltées, la bathymétrie est discrétisée tous les mm afin de pouvoir être comparée aux MNEs. La section bathymétrique est présentée à la figure 3.3 et est comparée à la section du MNE réalisé à partir des données de l'appareil photo à la figure 3.4.

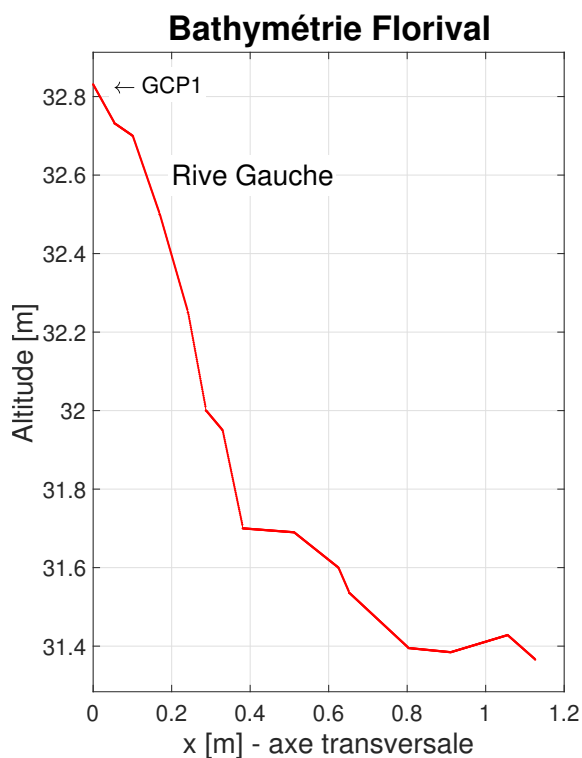


FIGURE 3.3 – Bathymétrie à Florival le 7 mai 2018.

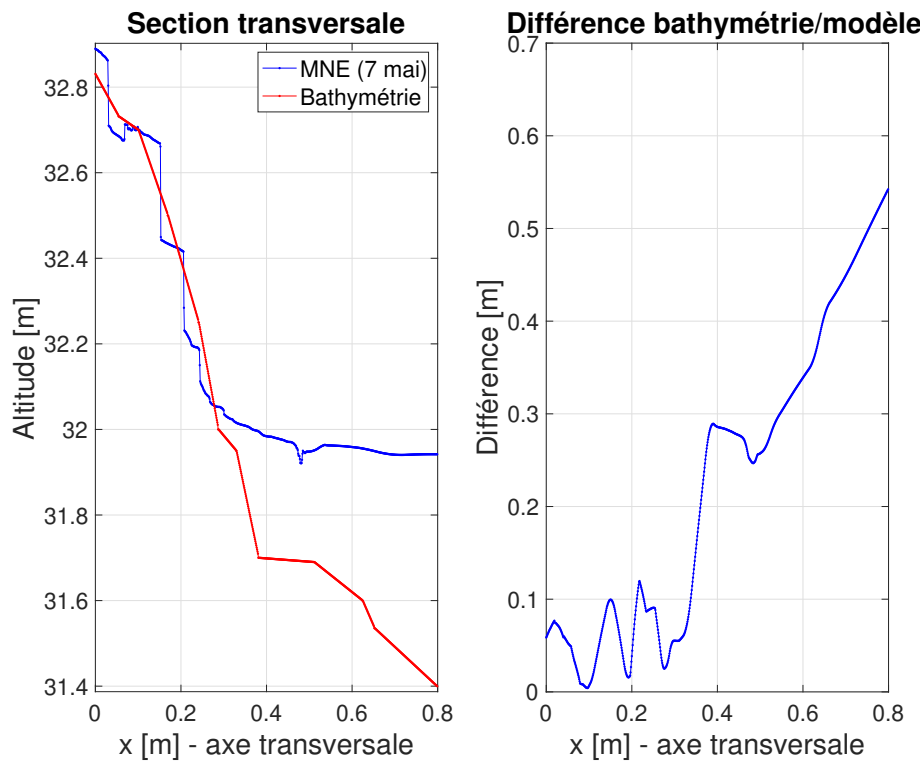


FIGURE 3.4 – Comparaison entre le modèle photo et la bathymétrie à Florival le 7 mai 2018.

Le MNE et la bathymétrie adoptent des comportements quelque peu différents. En effet, le MNE a un profil en forme de palier sur la berge là où la bathymétrie perd de l'altitude de manière quasi constante. Il ne faut pas oublier que le MNE tient compte de la végétation là où la bathymétrie en fait fi. Il suffit donc d'une petite plante sur une pente abrupte pour qu'un tel palier apparaisse. Cela est également dû au fait de l'imprécision de la bathymétrie qui de base, rappelons le, est mesurée ponctuellement. Cependant, nous pouvons de nouveau constater un décrochement entre le MNE et la bathymétrie à partir d'un certain abscisse de décrochement (environ $x = 0,3$ [m]).

3.4 Expérience avec l'appareil photo

Cette section a pour but de décrire l'élaboration du modèle trois dimensions généré à partir des photos prises avec l'appareil photo et d'expliquer les résultats qui en découlent.

3.4.1 Elaboration du modèle trois dimensions

Acquisition des photos

Les conseils pour prise des photos sont exactement les mêmes que ceux décrits à la section 2.3.2. Trente-deux photos sont réalisées et introduites dans le logiciel de photogrammétrie PHOTOSCAN pour générer le modèle trois dimensions. Celles-ci sont prises de la même manière que sur le Train à Archennes (section 2.3.2) c'est-à-dire en faisant le tour de la berge à une distance d'environ 2 ou 3 mètres, en variant les points de vue un maximum et en s'efforçant d'avoir un minimum de trois GCPs sur chacune des photos.

Utilisation du logiciel

Les étapes nécessaires à l'obtention du modèle trois dimensions sont exactement les mêmes que celles décrites dans la section 2.3.3. Le modèle trois dimensions est montré et détaillé dans l'annexe B.5. Le MNE du modèle est exporté dans un format lisible par MATLAB afin de poursuivre le reste de la méthode et de procéder à l'analyse des données par l'algorithme. L'utilisateur doit spécifier deux choses :

- Les limites d'abscisses et d'ordonnées du modèle exporté. Les limites choisies sont $(-1, 2)$ en abscisse et en ordonnée.
- La largeur et la longueur de chaque pixel. Le choix posé afin de faciliter l'analyse ultérieure est un carré de 1 mm de côté.

Analyse du MNE

L'algorithme pour la détection des points de décrochement est exactement le même que celui développé et utilisé sur le Train à Archennes (voir section 2.5). Les seuils utilisés sont ceux conseillés par l'analyse menée sur les seuils de la section 2.6.2. Un exemple du bon fonctionnement de la méthode est montré à la figure 3.5. Les paramètres utilisés pour l'obtention de ce résultat sont :

- $\text{Count} = 2$.
- $\text{Derivee} = 2$.
- $\text{DiffUp} = 0,15$ [m].
- $\text{Target} = 0,3$ [m].
- $\text{Fenetre} = 0,15$ [m].
- $H_{\text{Vege}} = 0,1$ [m] et $\text{Perc}_{\text{Vege}} = 0,1$.

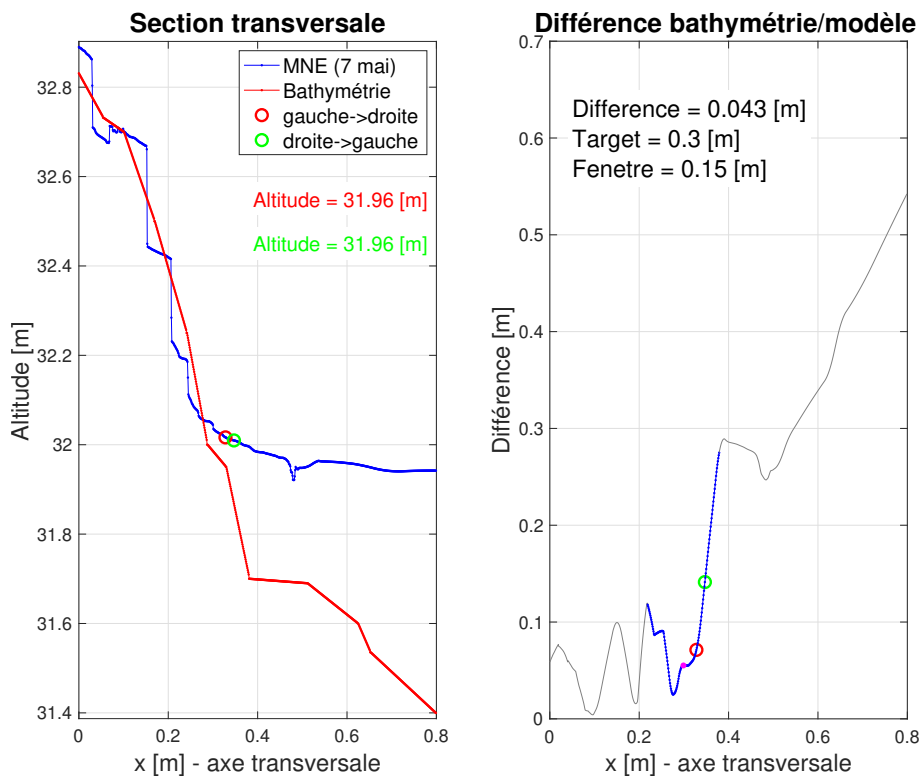


FIGURE 3.5 – Détection de l'altitude de la surface de l'eau : MNE "photo", le 7 mai 2018.

3.4.2 Résultats

Les seuils utilisés pour les résultats présentés sous forme de boxplot dans cette section sont les suivants :

- Count = 2.
- Derivee = 2.
- DiffUp = 0,15 [m].
- $H_{Vege} = 0,1$ [m] et $Per_{cVege} = 0,1$.

L'abscisse maximale du MNE, le long de la section à partir de l'origine, est de 0,8 [m]. Au-delà, PHOTOSCAN ne détecte plus bien l'eau et l'altitude des points est tout à fait incohérente. Le panel de valeurs utilisé pour les variables Target et Fenetre en vu de l'obtention des résultats est le suivant :

- Target = [0,25 : 0,05 : 0,4] [m].
- Fenetre = [0,1 : 0,05 : 0,3] [m].

Il y a donc 20 combinaisons différentes de Target et Fenetre disponibles pour la détection de gauche à droite et 20 combinaisons différentes pour la détection de droite à gauche. Les résultats obtenus sont montrés sous forme de boxplot à la figure 3.6.

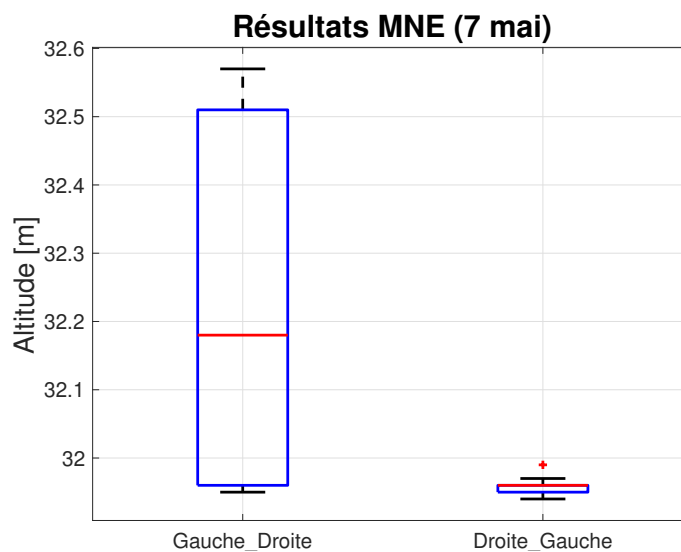


FIGURE 3.6 – Résultats généraux du MNE “photo” : le 7 mai 2018.

L'altitude de la surface de l'eau relevée sur l'échelle limnimétrique le 7 mai 2018 est de 31,96 [m]. La profondeur de l'eau est estimée à 1,4 [m]. L'erreur maximale est assez élevée pour la recherche de gauche à droite (0,50 [m] soit 35%). L'erreur maximale de droite à gauche, quant à elle est d'environ 0,05 [m] ce qui est un bon résultat qui donne une erreur maximale d'environ 3%. L'erreur de droite à gauche est la même que celle constatée sur le Train.

L'algorithme fonctionne de manière nettement moins efficace en parcourant le graphe de gauche à droite que de droite à gauche. L'algorithme a, en effet, plus d'occasions de commettre une erreur sur la berge. Cela est dû à une différence trop importante entre l'altitude du MNE et l'altitude de la bathymétrie sur la berge.

3.5 Expérience avec le drone

3.5.1 Elaboration du modèle trois dimensions

Acquisition des photos

Les conseils pour la réalisation du jeu de photographie sont exactement les mêmes que ceux décrits à la section 2.3.2. Vingt-sept photos sont réalisées et introduites dans le logiciel de photogrammétrie PHOTOSCAN pour générer le modèle trois dimensions. Toutes les photographies utilisées pour ce modèle sont réalisées à partir d'un mavic pro de la marque DJI (voir annexe A.3). Les prises de vue sont globalement les mêmes que celles effectuées avec un appareil photo. La distance entre la berge et l'objectif est cependant accrue de 1 [m] ou 2 [m] et est, en moyenne, égale à 4 [m]. La proportion de photos aériennes/rasantes est également augmentée. En effet, il est assez difficile de manipuler le drone à la surface de l'eau et il faut veiller à ne pas le faire plonger dans l'eau. Par contre, le drone s'est révélé idéal pour prendre des photos aériennes de qualité. De nouveau les photos sont prises de façon à prendre en compte un minimum de 3 GCPs sur chacune des photos.

Utilisation du logiciel

Les étapes nécessaires à l'obtention du modèle sont exactement les mêmes que celles décrites dans la section 2.3.3. Le modèle trois dimensions est montré et détaillé dans l'annexe B.6. Le Modèle numérique d'élévation (MNE) est exporté dans un format lisible par MATLAB afin de poursuivre le reste de la méthode et de procéder à l'analyse des données du MNE par l'algorithme. Les limites d'abscisses et d'ordonnées ainsi que la définition des pixels sont les mêmes que celles du MNE réalisé à partir des données de l'appareil photo.

Analyse du MNE

L'algorithme pour la détection de points de décrochement est exactement le même que celui développé et utilisé sur le Train à Archennes (voir section 2.5). Les seuils utilisés sont ceux conseillés par l'analyse de l'influence des seuils de la section 2.6.2. Un exemple du bon fonctionnement de la méthode est montré à la figure 3.5. Les paramètres utilisés pour l'obtention de ce résultat sont :

- Count = 2.
- Derivee = 2.
- DiffUp = 0,15 [m].
- Target = 0,35 [m].
- Fenetre = 0,20 [m].
- $H_{\text{Vege}} = 0,1$ [m] et $\text{Perc}_{\text{Vege}} = 0,2$.

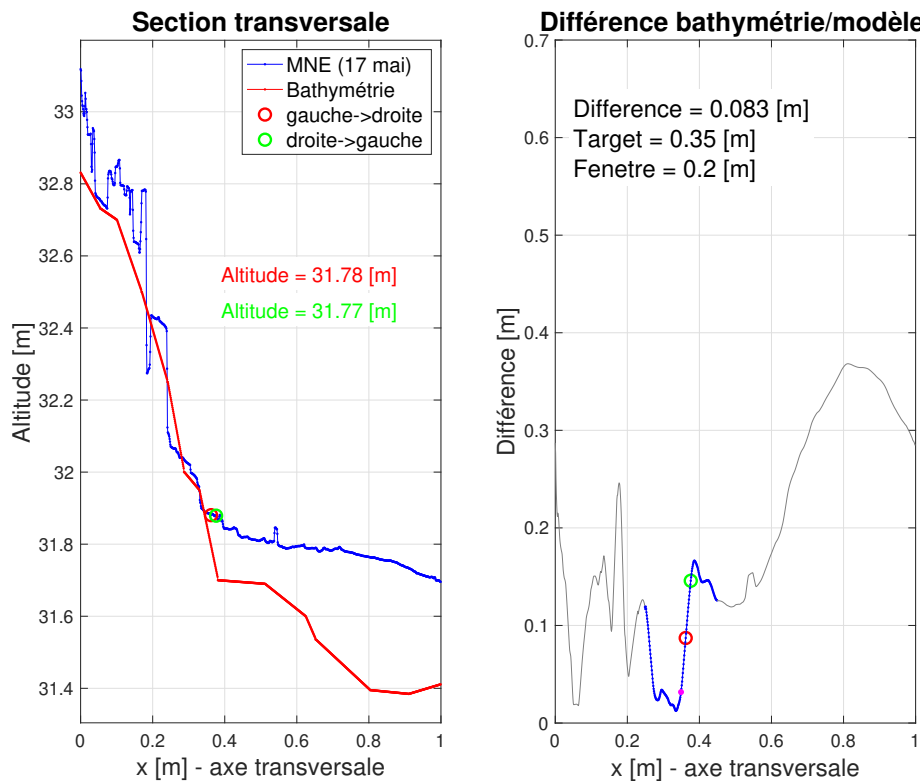


FIGURE 3.7 – Détection de l'altitude de la surface de l'eau : MNE “drone”, le 17 mai 2018.

La première constatation que l'on peut faire est que le MNE, au début de la berge, est très imprécis. Cela est dû à une apparition de végétation qui recouvre partiellement le début de la berge. On peut également constater que l'altitude du MNE, au niveau de l'eau (à partir de $x = 0,4$ [m]) diminue petit à petit. Il est difficile d'expliquer ce comportement, cela est certainement dû à la transparence de l'eau dans les premiers centimètres de la surface.

3.5.2 Résultats

Les seuils utilisés pour tous les résultats présentés dans cette section sont les suivants :

- Count = 2.
- Derivee = 2.
- DiffUp = 0,15 [m].
- $H_{Vege} = 0,1$ [m] et $PerC_{Vege} = 0,2$.

L'abscisse maximale du MNE le long de la section à partir de l'origine est de 1,09 [m]. Au delà PHOTOSCAN ne détecte plus bien l'eau et l'altitude des points est tout à fait incohérente. Le panel de valeurs utilisé pour les variables en vue de l'obtention des résultats est le suivant :

- Target = [0,25 : 0,05 : 0,50] [m].
- Fenetre = [0,1 : 0,05 : 0,3] [m].

Il y a donc 30 combinaisons différentes de Target et Fenetre disponibles pour la détection de gauche à droite et 30 combinaisons différentes pour la détection de droite à gauche. Les résultats obtenus sont montrés sous forme de boxplot à la figure 3.8.

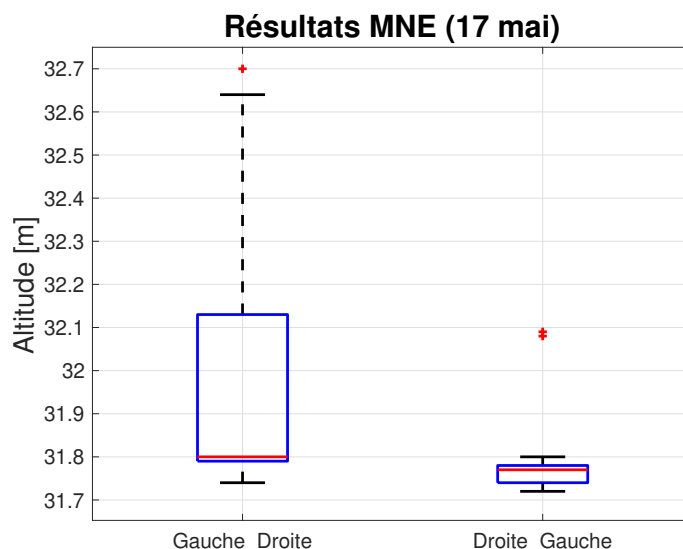


FIGURE 3.8 – Résultats généraux du MNE “drone” : le 17 mai 2018.

L'altitude relevée sur l'échelle limnimétrique le 17 mai 2018 est de 31,96 [m]. Pour la détection de gauche à droite, la quasi totalité des valeurs sont comprises entre 31,7 [m] et 32,65 [m] ce qui donne un intervalle d'altitude d'eau bien au delà des espérances. Cela est dû à la trop à une différence trop importante entre l'altitude du MNE et l'altitude de la bathymétrie sur la berge. La détection de droite à gauche est comprise, quant à elle, dans un intervalle de 0,1 [m] mais situé 0,2 [m] trop bas. L'algorithme fonctionne puisqu'il détecte des points de décrochement d'altitude similaire. L'erreur importante du résultat final est due à la qualité du modèle qui ne repère pas bien l'altitude de l'eau et la situe 0,2 [m] plus bas. Aucune explication logique n'expliquent la raison pour laquelle l'altitude du MNE est trop basse bien que cela soit probablement dû à la transparence de l'eau.

3.6 Critiques

Comme sur le Train à Archennes, l'appareil photo donne des bons résultats en utilisant l'algorithme de droite à gauche. L'altitude de l'eau est détectée de manière fiable dans un intervalle de 0,05 [m] qui représente une erreur de moins de 5%. De nouveau, un graphe tel que montré à la figure 3.9 peut être mis à la disposition de l'utilisateur afin de choisir l'altitude la plus plausible qui semble ici s'imposer.

Les résultats obtenus avec le drone sont moins concluants. L'algorithme utilisé de droite à gauche trouve des résultats dans un intervalle de 0,1 [m] mais il sont situés 0,2 [m] plus bas que la valeur réelle ce qui laisse présager que l'algorithme fonctionne mais sur un MNE situé trop bas. Il est difficile d'exploiter un tel modèle. Une analyse plus poussée sur ce phénomène mérite d'être effectuée. Malheureusement, le logiciel de PHOTOSCAN est utilisé comme une boîte noire. Il est dès lors difficile de trouver les causes de cet erreur. L'algorithme utilisé de gauche à droite ne donne aucun résultat à cause de l'erreur relative trop importante entre l'altitude de la bathymétrie et du MNE.

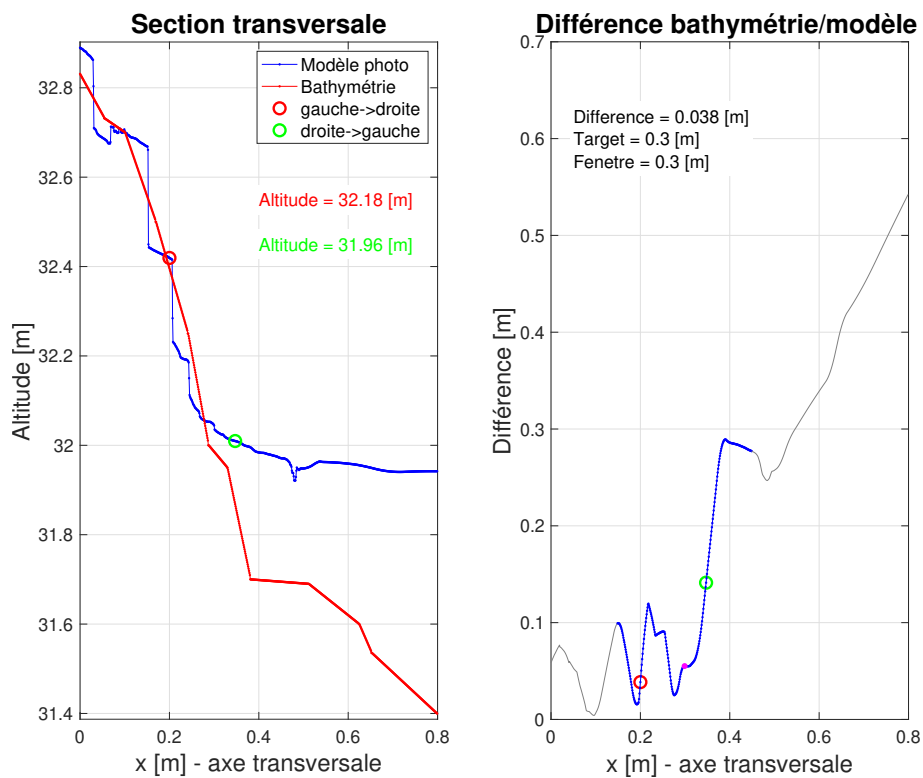


FIGURE 3.9 – Détection de l’altitude de la surface de l’eau : choix de l’utilisateur.

Conclusion

Résumé et critiques

La photogrammétrie est un outil prometteur dans la modélisation des rivières naturelles. Son utilisation est l'objet de ce présent mémoire qui élabore une méthodologie destinée à mesurer l'altitude de la surface de l'eau d'une rivière grâce à la photogrammétrie.

Un algorithme permettant de déterminer la hauteur d'eau d'une rivière miniaturisée en laboratoire est élaboré. Les résultats sont concluants. L'erreur moyenne commise sur la profondeur de l'eau, le long du modèle réduit, est comprise entre 5 et 10%. Les quelques résultats litigieux sont surtout dus à une mauvaise modélisation trois dimensions et non pas à un mauvais fonctionnement de l'algorithme implémenté. Par contre, l'algorithme se base sur la détection d'un décrochage entre le modèle trois dimensions et la bathymétrie. Cela nécessite donc une séparation brusque de la ligne d'eau et de la bathymétrie. Cette brusque séparation pose problème pour les berges à pente douce où le décrochement se fait progressivement.

Ensuite, une méthode rigoureuse est mise en place afin de trouver l'altitude du niveau d'eau d'une rivière test. Premièrement, des *ground control points* sont placés au sol afin de géoréférencer les modèles trois dimensions et de définir le système de coordonnées local. Deuxièmement, la bathymétrie est réalisée à l'aide d'un dGPS Leica. Troisièmement, la rivière est modélisée en trois dimensions à partir de photos traitées par le logiciel de photogrammétrie choisi. Pour finir, l'algorithme élaboré en laboratoire est adapté aux données in situ. La méthode fonctionne bien puisque tous les résultats (exceptés quelques outliers) présentent une erreur de moins de 10% pour tous les types de terrain testés. L'algorithme utilise certains paramètres approximatifs par l'utilisateur. Une erreur de l'approximation de l'ordre du mètre conduit à un dysfonctionnement de l'algorithme certain.

Pour finir, la méthode est testée sur une deuxième rivière. Les étapes élaborées sur la rivière test sont scrupuleusement reproduites. Les photos nécessaires à l'élaboration des modèles en trois dimensions sont prises depuis un appareil photo et depuis un drone. Les résultats révèlent une faiblesse de l'algorithme. Si la bathymétrie est mal réalisée, l'utilisateur doit systématiquement intervenir pour choisir l'altitude correcte parmi deux choix. Mis à part cette intervention, l'algorithme fonctionne globalement bien pour les photos de l'appareil photos. Les résultats liés au drone sont, quant à eux, de qualité moyenne. Dans les deux cas, les erreurs commises sont dues à une bathymétrie ou à un modèle trois dimensions imprécis. L'algorithme respecte son mode de fonctionnement qui n'est pas forcément adapté à ces imprécisions.

Pistes d'amélioration

La plupart des erreurs sont liées à l'imprécision de la bathymétrie et ce, spécialement sur la Dyle à Florival dont la berge analysée est très abrupte. Réaliser les relevés bathymétriques à la main avec un outil encombrant n'est pas une tâche aisée. Deux bonnes pistes d'amélioration seraient :

- Soit de réaliser la bathymétrie d'une autre manière. La photogrammétrie pourrait tout à fait être utilisée à cet effet. La bathymétrie peut être réalisée en période de sécheresse du cours d'eau. Ou alors, si la transparence de l'eau le permet, la bathymétrie peut être réalisée en présence d'eau, sous certaines conditions, comme introduit par [BUTLER et al., 2002].
- Soit sans mesurer la bathymétrie en se concentrant uniquement sur une section du MNE ce qui peut être rendu possible avec une adaptation de l'algorithme. Par exemple, on peut constater que le MNE est plus raide sur la berge que sur l'eau qui est censé donner un graphe horizontal (la surface de l'eau étant horizontale). La figure 3.10 montre deux exemples où l'on peut constater un brusque changement de pente moyenne entre la berge et l'eau au niveau du point de décrochement (31,96 [m]). L'altitude de l'eau est, ici, correctement détectée là où le brusque changement de pente a lieu. L'implémentation rigoureuse d'un algorithme se concentrant sur cette analyse pourrait être prometteuse.

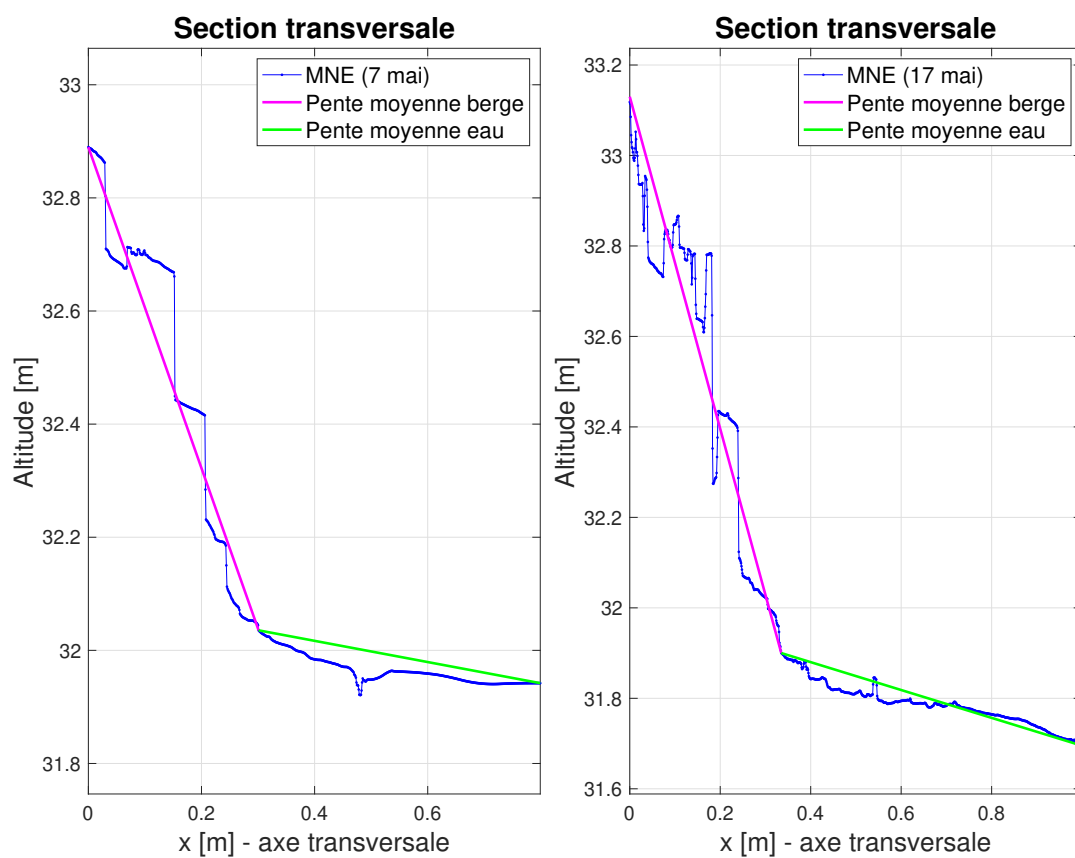


FIGURE 3.10 – Changement de pente : MNE des modèles PHOTOSCAN réalisés avec l'appareil photo et avec le drone.

Bibliographie

- Agisoft PhotoScan Professional* (2018). Version 1.4.0 build 5650 (64bit). URL : <http://www.agisoft.com/downloads/installer/>.
- Agisoft PhotoScan User Manual* (2018). Agisoft LLC.
- Aqualim* (2011). URL : <http://aqualim.environnement.wallonie.be/>.
- BOUSMAR, D. et G. FRASELLE (2004). « Canal à lit composé et programme hydrocap. descriptif, mode d'emploi ». Mém. de mast. Louvain-La-Neuve : Ecole Polytechnique de Louvain.
- BUTLER, Justin et al. (avr. 2002). « Through-Water Close Range Digital Photogrammetry in Flume and Field Environments ». In : *The photogrammetric record*. T. 17. Wiley, p. 419-439.
- CLAPUYT, Francois, Veerle VANACKER et Kristof VAN OOST (mai 2016). « Reproducibility of UAV-based earth topography reconstructions based on Structure-from-Motion algorithms ». In : *Geomorphology*. T. 260. Elsevier, p. 4-15.
- COUTINHO, G. et N. JANSSENS (2017). « Mesure de la surface libre d'écoulement en bathymétrie complexe par photogrammétrie ». Mém. de mast. Louvain-La-Neuve : Ecole Polytechnique de Louvain.
- DE SCHOUTHEETE, Ferdinand et Thibault HUBERT (2018). « Mesure du niveau d'eau par photogrammétrie en laboratoire ». Mém. de mast. Louvain-La-Neuve : Ecole Polytechnique de Louvain.
- DIEFENBACH, Angela K. et al. (mar. 2012). « Rapid, low-cost photogrammetry to monitor volcanic eruptions : an example from Mount St. Helens, Washington, USA ». In : *Bulletin of Volcanology*. T. 74. Springer-Verlag, p. 579-587.
- FOX, A. J. et A. M. NUTTALL (1997). « Photogrammetry as A Research Tool for Glaciology ». In : *The photogrammetric record*. T. 15. Wiley Blackwell, p. 725-737.
- FRANZINI, Fabian, Sandra SOARES-FRAZAO et Hervé CAPART (juil. 2016). « Measurement of the free-surface elevation in a steady flow in complex topography using photogrammetry ». In : *River Flow 2016 : Proceedings of the International Conference on Fluvial Hydraulics*. International Conference on Fluvial Hydraulics, River Flow 2016. St-Louis (USA), p. 581-587.
- GONÇALVES, J. A. et R. HENRIQUES (juin 2015). « UAV photogrammetry for topographic monitoring of coastal areas ». In : *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. T. 104. ELSEVIER, p. 101-111.
- HAN, Bangshuai et Theodore A. ENDRENY (fév. 2014). « River Surface Water Topography Mapping at Sub-Millimeter Resolution and Precision With Close Range Photogrammetry : Laboratory Scale Application ». In : *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 7, p. 602-608.
- JAMES, M. R. et al. (mar. 2017). « Optimising UAV topographic surveys processed with structure-from-motion : Ground control quality, quantity and bundle adjustment ». In : *Geomorphology*. T. 280. Elsevier, p. 51-66.

- KASSER, M. (2015). « Photogrammétrie ». In : *Techniques de l'ingénieur Géomatique*.
- KRAUS, Karl et Peter WALDHÄUSL (1998). *Manuel de photogrammétrie*. Hermès - Lavoisier.
- LANE, S. N., T. D. JAMES et M. D. CROWELL (avr. 2000). « Application of Digital Photogrammetry to Complex Topography for Geomorphological Research ». In : *The photogrammetric record*. T. 16. Wiley Blackwell, p. 793-821.
- LANE, Stuart N. et al. (2003). « Photogrammetric and laser altimetric reconstruction of water levels for extreme flood event analysis ». In : *The photogrammetric record*. T. 18. Wiley Blackwell, p. 293-307.
- LEJOT, J. et al. (oct. 2007). « Very high spatial resolution imagery for channel bathymetry and topography from an unmanned mapping controlled platform ». In : *Earth Surface Processes and Landforms*. T. 32. Wiley, p. 1705-1725.
- Les voies hydrauliques, les voies du développement durable* (p. d.). URL : <http://voies-hydrauliques.wallonie.be/>.
- LUHMANN, Thomas et al. (2014). *Close-Range Photogrammetry and 3D Imaging*. 2nd. De Gruyter.
- MICHELETTI, Natan, Jim H. CHANDLER et Stuart N. LANE (2015). « Structure from motion (SfM) photogrammetry ». In : *Geomorphological Techniques (Online Edition)*. T. 280. London : British Society for Geomorphology, p. 51-66.
- MILLER, David R., Christopher P. QUINE et Warwick HADLEY (sept. 2000). « An investigation of the potential of digital photogrammetry to provide measurements of forest characteristics and abiotic damage ». In : *Forest Ecology and Management*. T. 135. ELSEVIER, p. 279-288.
- Portail WALCORS* (p. d.). URL : <http://gnss.wallonie.be/walcors/reseau-walcors.html>.
- Tutorial (Beginner level) : Orthomosaic and DEM Generation with Agisoft PhotoScan Pro 1.3 (with Ground Control Points)* (2018). Agisoft LLC.

Table des figures

1.1	Utilisation de la SfM : modélisation d'une berge.	5
1.2	Modèle réduit en laboratoire.	8
1.3	Modèle réduit : chariot et disposition des GoPro.	9
1.4	Modèle réduit en écoulement permanent : MNE pour un débit de 6 [l/s].	10
1.5	Modèle réduit en écoulement permanent : section en $x = 3,67$ [m].	11
2.1	Fonctionnement de l'algorithme : section transversale en $x = 3,67$ [m].	15
2.2	Hauteur d'eau et écart absolu pour les 41 sections étudiées.	15
2.3	Fonctionnement de l'algorithme : section transversale en $x = 0,07$ [m].	16
2.4	Station d'Archennes sur le Train : échelle limnimétrique.	17
2.5	Le Train à Archennes.	18
2.6	Deux type de GCPs utilisés sur le Train à Archennes.	19
2.7	GCPs sur le Train : disposition et repère local.	19
2.8	Extrait du jeu de photos du 12 mars 2018.	20
2.9	Etapes de la modélisation photogrammétrique in situ : exemple du Train.	22
2.10	Acquisition d'une section bathymétrique sur le Train.	23
2.11	Section bathymétriques sur le Train.	24
2.12	Comparaison entre MNE et bathymétrie le 12 mars 2018.	24
2.13	Exemple du fonctionnement de l'algorithme : détection de l'altitude de la surface de l'eau.	27
2.14	Résultats généraux des MNEs sans végétation.	28
2.15	Résultats généraux du MNE, avec une faible végétation.	29
2.16	Résultats généraux du MNE, avec une moyenne végétation.	30
2.17	Détection de l'altitude de la surface de l'eau le 17 avril 2018.	32
3.1	La Dyle à Florival	33
3.2	Placement des GCPs et système d'axes sur la Dyle à Florival.	34
3.3	Bathymétrie à Florival le 7 mai 2018.	35
3.4	Comparaison entre le modèle photo et la bathymétrie à Florival le 7 mai 2018.	36
3.5	Détection de l'altitude de la surface de l'eau : MNE "photo", le 7 mai 2018.	37
3.6	Résultats généraux du MNE "photo" : le 7 mai 2018.	38

3.7	Détection de l'altitude de la surface de l'eau : MNE "drone", le 17 mai 2018.	40
3.8	Résultats généraux du MNE "drone" : le 17 mai 2018.	41
3.9	Détection de l'altitude de la surface de l'eau : choix de l'utilisateur.	42
3.10	Changement de pente : MNE des modèles PHOTOSCAN réalisés avec l'appareil photo et avec le drone.	44
A.1	GPS Leica1200+	49
A.2	PentaxK20D	50
A.3	DJI mavic Pro.	50
B.1	Modèle 3D du Tain : le 12 mars 2018.	51
B.2	Modèle 3D du Tain : le 30 mars 2018.	52
B.3	Modèle 3D du Tain : le 6 avril 2018.	52
B.4	Modèle 3D du Tain : le 17 avril 2018.	53
B.5	Modèle 3D de la Dyle : le 7 mai 2018.	53
B.6	Modèle 3D de la Dyle : le 17 mai 2018.	54
C.1	Algorithme en laboratoire : section transversale en $x = [m]$	55
C.2	Algorithme en laboratoire : section transversale en $x = [m]$	56
C.3	Algorithme en laboratoire : section transversale en $x = [m]$	56
C.4	Algorithme en laboratoire : section transversale en $x = [m]$	57
C.5	Algorithme en laboratoire : section transversale en $x = [m]$	57
C.6	Algorithme en laboratoire : section transversale en $x = [m]$	58
D.1	Influence des seuils Count et Derivee : le 12 mars 2018, sans végétation.	59
D.2	Influence du seuil DiffUp : le 12 mars 2018, sans végétation.	60
D.3	Influence des seuils Count et Derivee : le 30 mars 2018, sans végétation.	60
D.4	Influence du seuil DiffUp : le 30 mars 2018, sans végétation.	61
D.5	Influence des seuils Count et Derivee : le 6 avril 2018, faible végétation.	61
D.6	Influence du seuil DiffUp : le 6 avril 2018, faible végétation.	62
D.7	Influence des seuils Count et Derivee : le 17 avril 2018, végétation moyenne.	62
D.8	Influence du seuil DiffUp : le 17 avril 2018, végétation moyenne.	63

Annexe A

Appareil de mesure

A.1 Le GPS

Toutes les données nécessitant l'utilisation d'un dGPSs sont effectuées avec un dGPS Leica1200+ (voir figure A.1). Celui-ci a permis le géoréférencement des GCPs et l'élaboration de la bathymétrie. Il donne les coordonnées du point dans le système de coordonnées Lambert72 qui est le système de géoréférencement en Belgique.

Le dGPS Leica1200+ utilisé est connecté au réseau WALCORS qui offre un service de correction RTK permettant un positionnement centimétrique¹. Les erreurs mesurées lors des expériences nécessaires pour ce mémoire varient entre 0,01 et 0,04 [m].



FIGURE A.1 – GPS Leica1200+

A.2 L'appareil photo

L'appareil photo utilisé lors des diverses expériences est un PENTAX K20D (voir figure A.2) 14,6 Mp avec une longueur focale de 18 mm pour le modèle du 7 mai, 34 mm pour le modèle du 30 mars et 30,63 mm pour les autres modèles. Les photos prises depuis le PENTAX K20D sont ensuite traitées avec le

1. *Portail WALCORS* p. d.

logiciel PHOTOSCAN sans aucun retouchement.



FIGURE A.2 – PentaxK20D

A.3 Le drone

Le drone utilisé est un DJI mavic pro (voir figure A.3) équipé d'un appareil photo 12,35 Mp avec une longueur focale de 35 mm. L'appareil de photographie est stabilisé mécaniquement via une nacelle 3 axes qui permet une excellente stabilité lors de la prise des photos.



FIGURE A.3 – DJI mavic Pro.

Annexe B

Les différents modèles

Le 12 mars 2018

Premier modèle réalisé a Archennes représenté à la figure B.1. On remarque que le modèle est libre de toute végétation. La surface de l'eau est modélisée aux abords de la berge. L'altitude de l'eau de référence, par rapport au niveau 0 de la mer, mesuré par l'échelle limnimétrique au jour du 12 mars 2018, est de 39,42 [m].

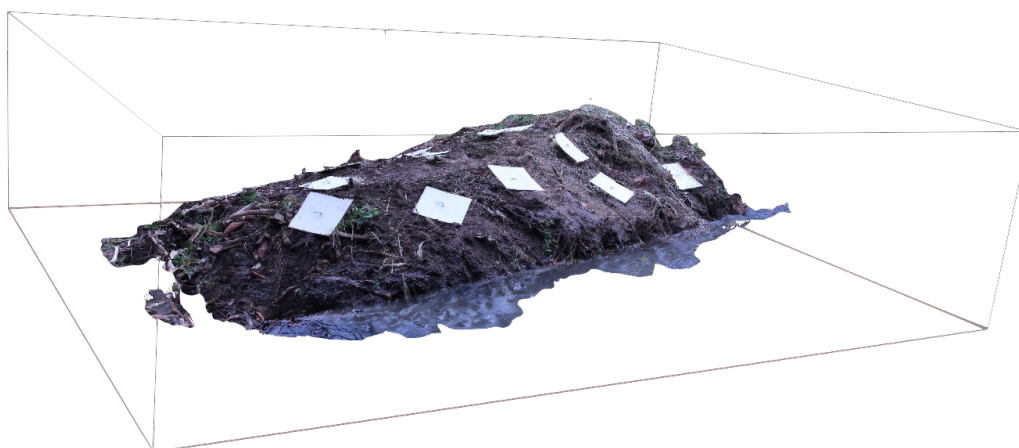


FIGURE B.1 – Modèle 3D du Tain : le 12 mars 2018.

Le 30 mars 2018

Second modèle réalisé a Archennes représenté à la figure B.2. On remarque que le modèle est libre de toute végétation. La surface de l'eau est plus faiblement modélisée aux abords de la berge. L'altitude de l'eau de référence, par rapport au niveau 0 de la mer, mesuré par l'échelle limnimétrique au jour du 30 mars 2018, est de 39,43 [m].

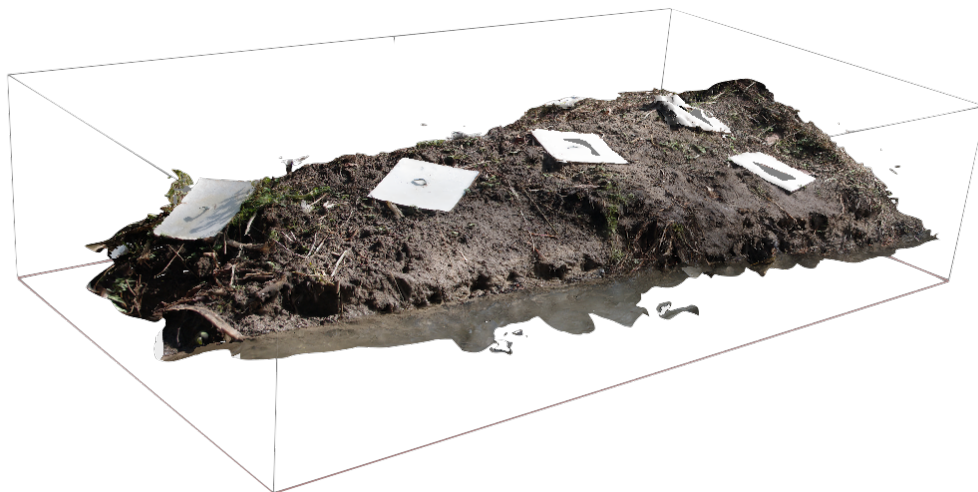


FIGURE B.2 – Modèle 3D du Tain : le 30 mars 2018.

Le 6 avril 2018

Troisième modèle réalisé à Archennes représenté à la figure B.3. On peut constater ici un léger recouvrement de végétation. La surface de l'eau est modélisée aux abords de la berge. L'altitude de l'eau de référence, par rapport au niveau 0 de la mer, mesuré par l'échelle limnimétrique au jour du 6 avril 2018 est de 39,44 [m].

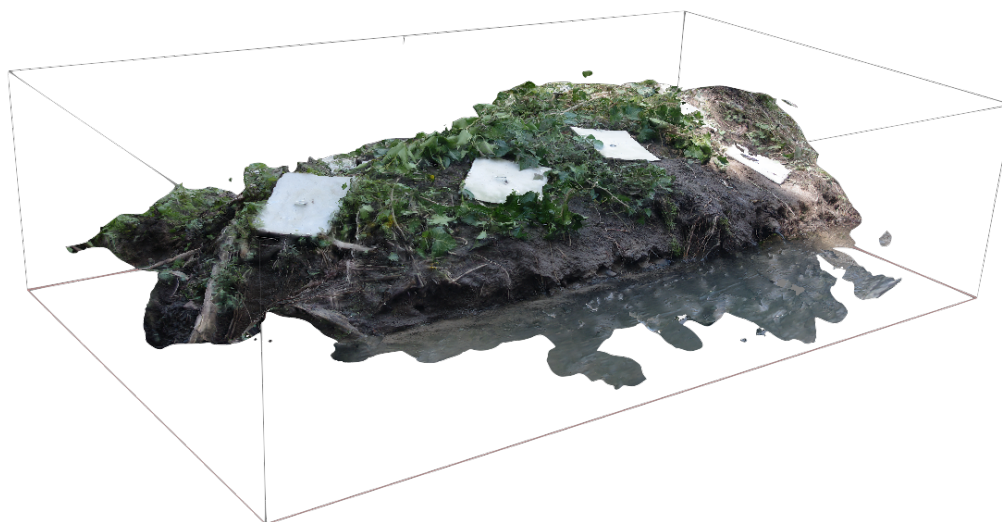


FIGURE B.3 – Modèle 3D du Tain : le 6 avril 2018.

Le 17 avril 2018

Quatrième modèle réalisé à Archennes représenté à la figure B.4. On peut constater ici un recouvrement de végétation plus important. La surface de l'eau est faiblement modélisée aux abords de la berge. L'altitude de l'eau de référence, par rapport au niveau 0 de la mer, mesuré par l'échelle limnimétrique au jour du 17 avril 2018, est de 39,44 [m].

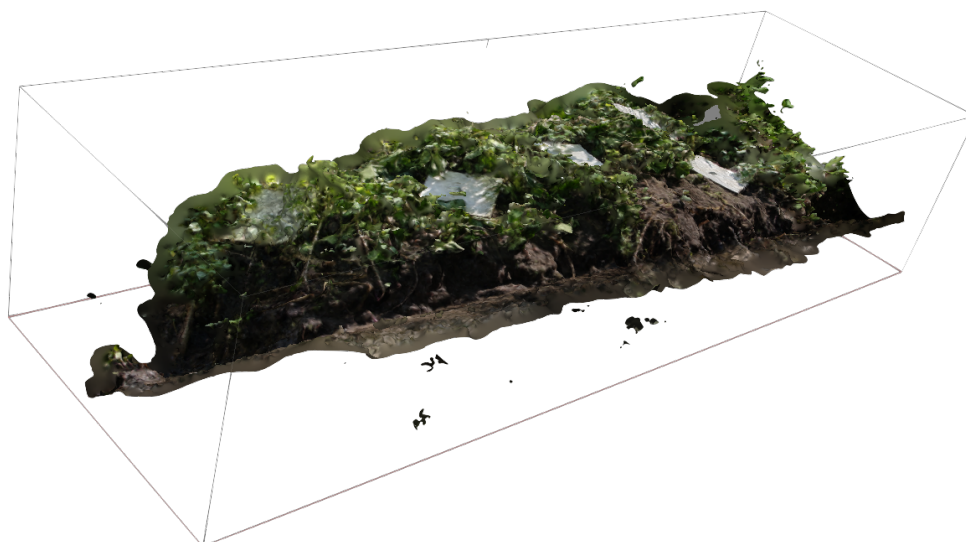


FIGURE B.4 – Modèle 3D du Tain : le 17 avril 2018.

Le 7 mai 2018

Modèle réalisé sur base du jeu de photos réalisées avec l'appareil photo et représenté à la figure B.5. On peut constater ici une absence de végétation sur la zone étudiée. Le modèle au niveau de l'eau est de qualité mitigée. L'altitude de l'eau de référence, par rapport au niveau 0 de la mer, mesuré par l'échelle limnimétrique au jour du 7 mai 2018, est de 31,96 [m].

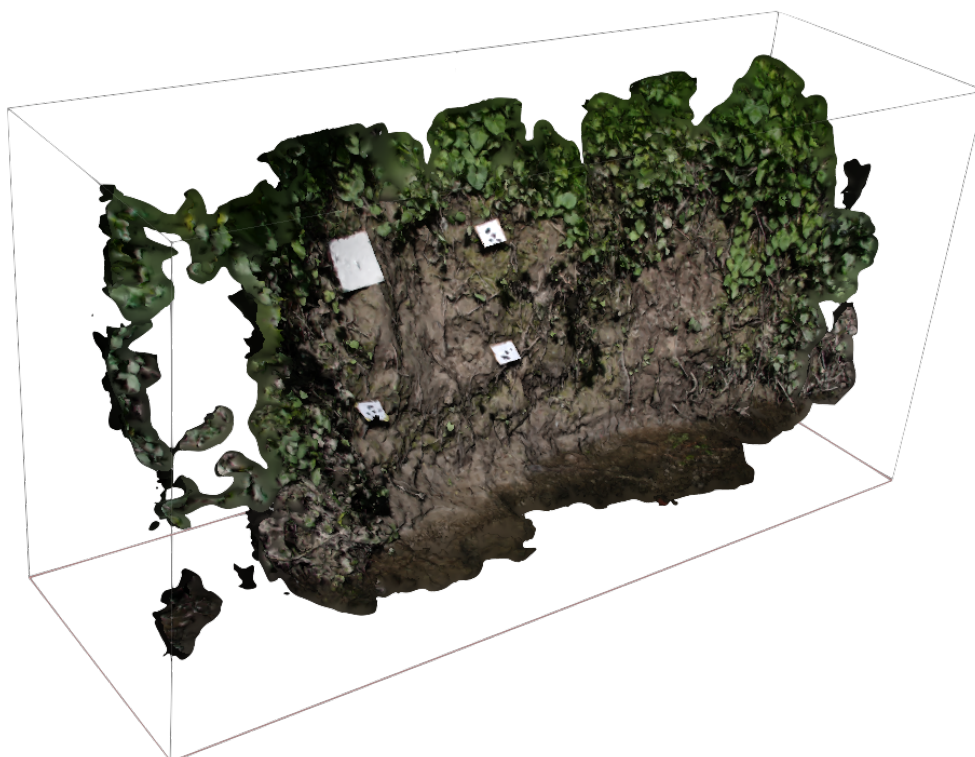


FIGURE B.5 – Modèle 3D de la Dyle : le 7 mai 2018.

Le 17 mai 2018

A la figure ?? est représenté le modèle réalisé sur base du jeu de photos prises avec le drone. On peut constater ici une absence de végétation sur la zone étudiée. La qualité du modèle au niveau de l'eau est de très bonne qualité. L'eau est représentée sur toute la largeur de la zone étudiée. L'altitude de l'eau de référence, par rapport au niveau 0 de la mer, mesuré par l'échelle limnimétrique au jour du 17 mai 2018, est de 31,96 m.

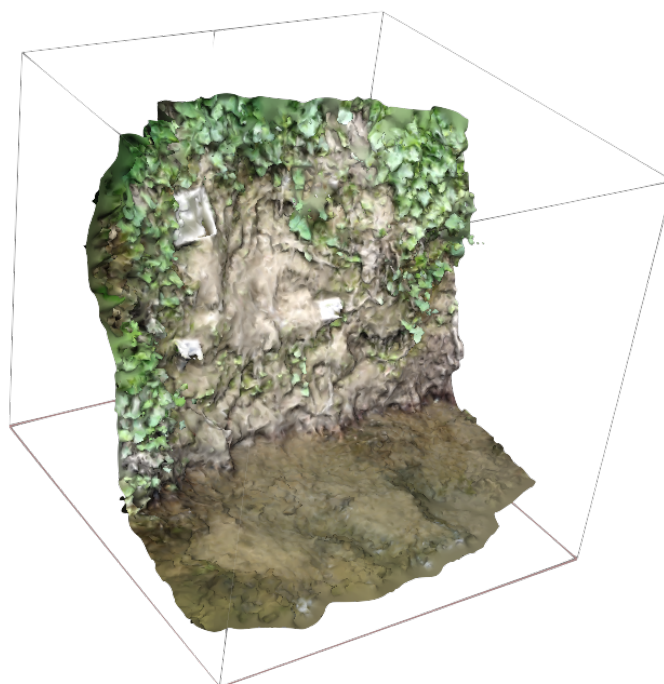


FIGURE B.6 – Modèle 3D de la Dyle : le 17 mai 2018.

Annexe C

Résultats de sections en laboratoire défectueuses

Section 1

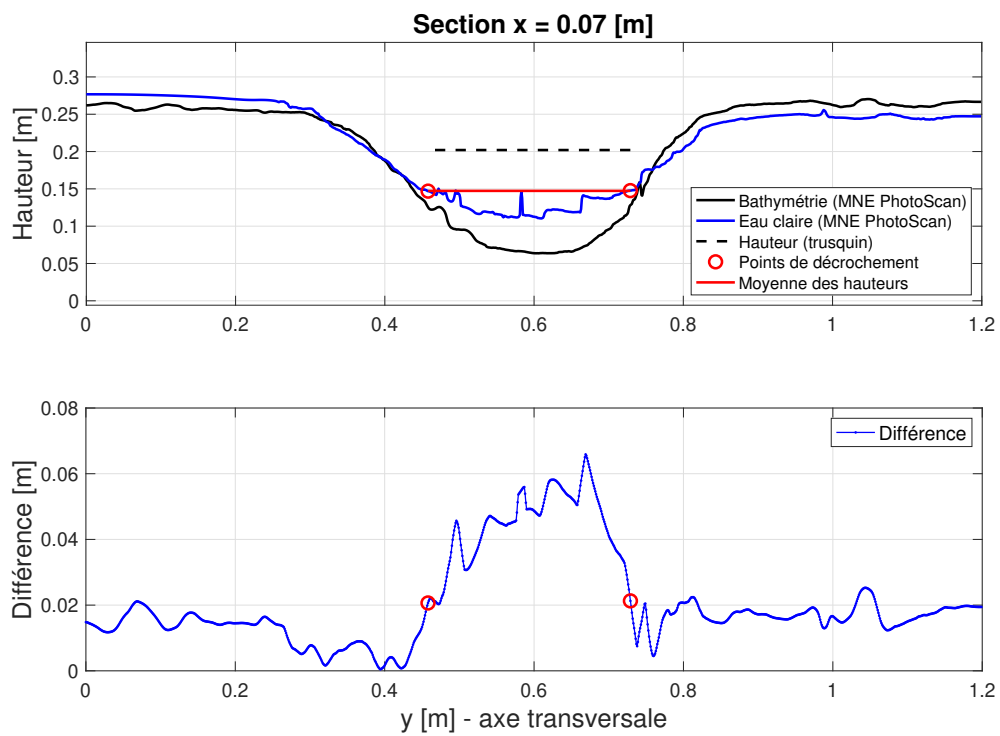


FIGURE C.1 – Algorithme en laboratoire : section transversale en $x = [m]$.

Section 2

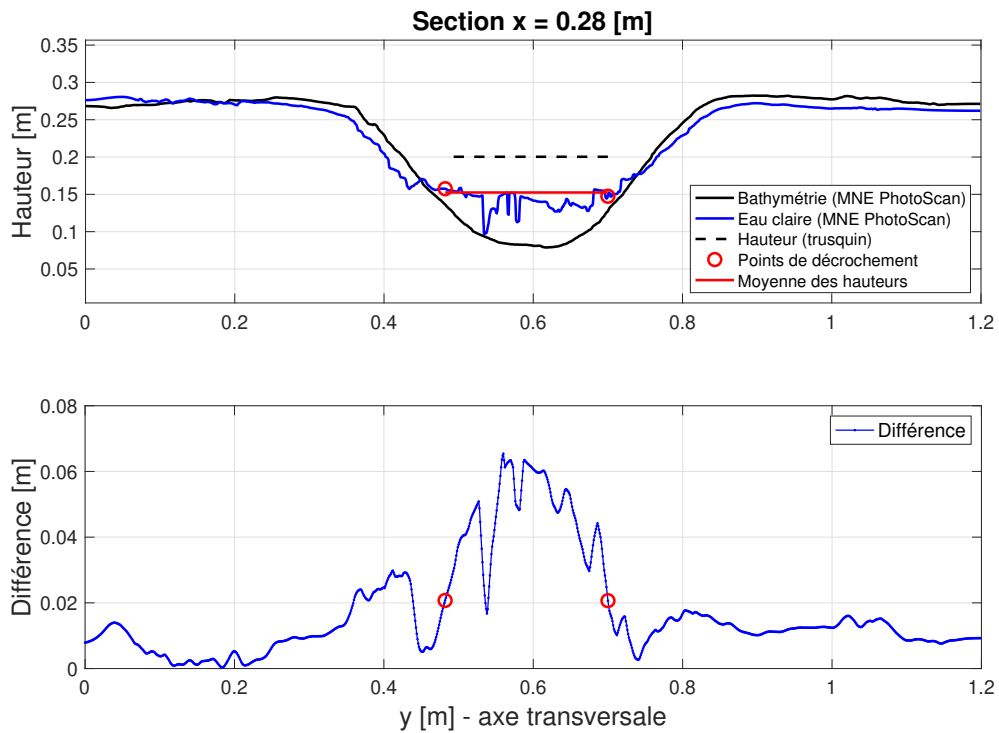


FIGURE C.2 – Algorithme en laboratoire : section transversale en $x = [m]$.

Section 3

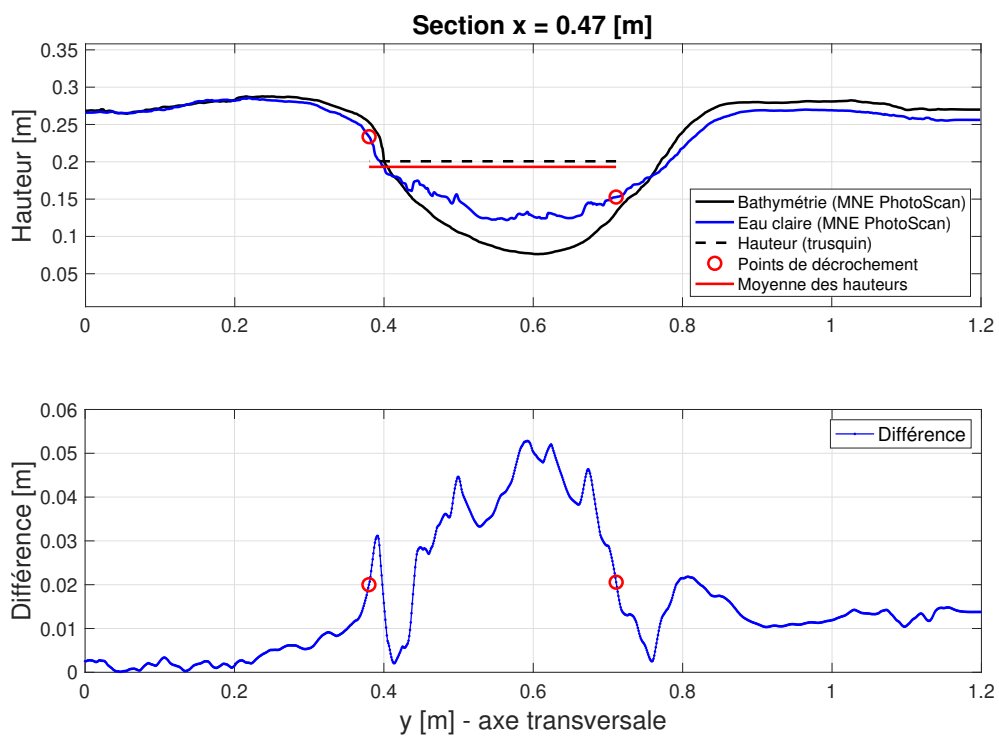


FIGURE C.3 – Algorithme en laboratoire : section transversale en $x = [m]$.

Section 4

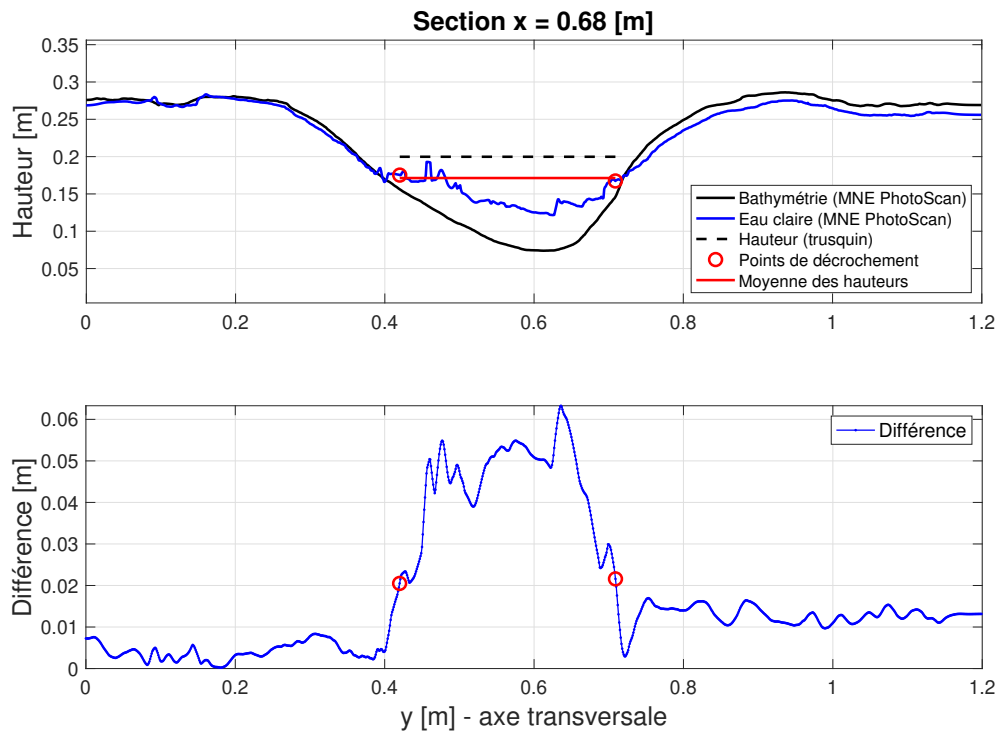


FIGURE C.4 – Algorithme en laboratoire : section transversale en $x = [m]$.

Section 5

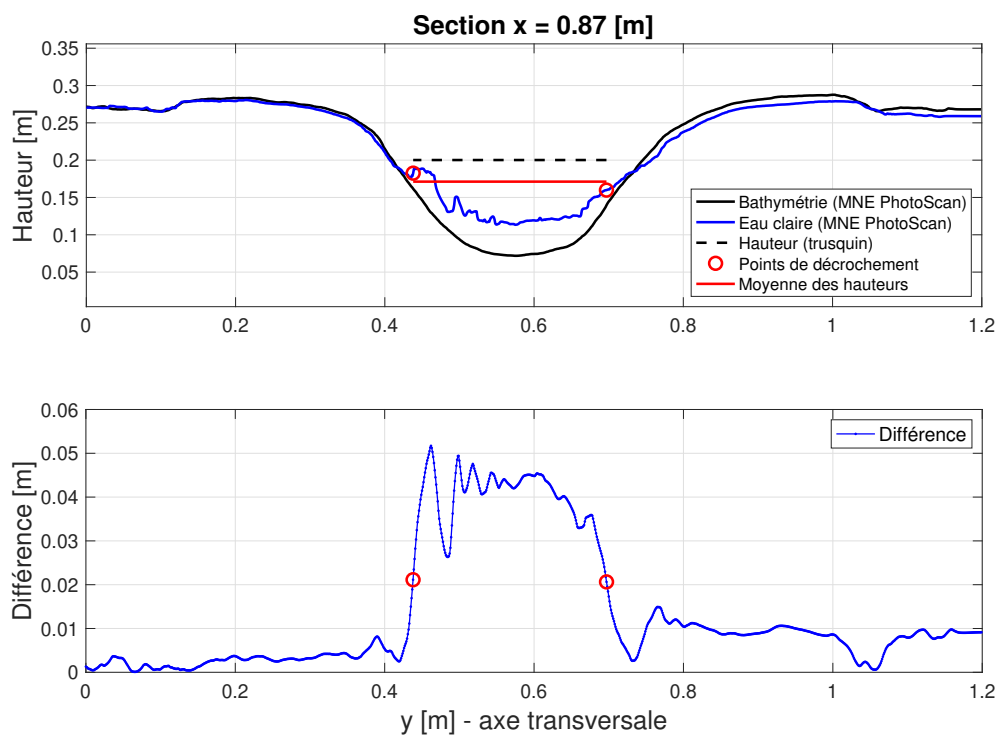


FIGURE C.5 – Algorithme en laboratoire : section transversale en $x = [m]$.

Section 6

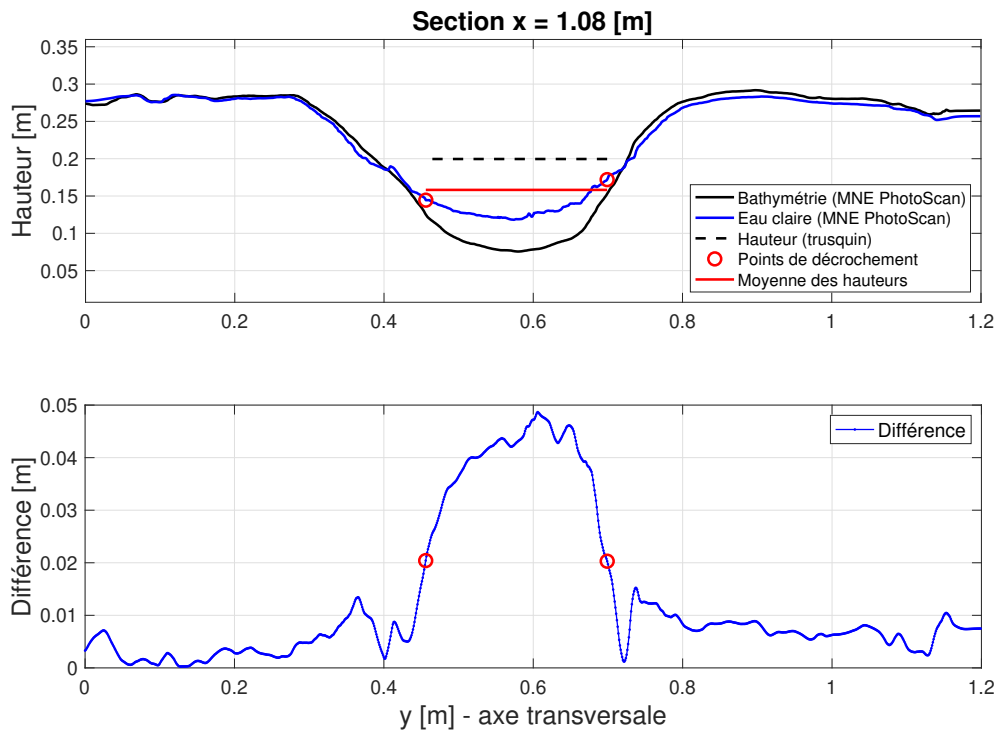


FIGURE C.6 – Algorithme en laboratoire : section transversale en $x = [m]$.

Annexe D

Influence des seuils sur les résultats

L'analyse des combinaisons de seuil Count (SC) et Derivee (SD) se fait avec un seuil DiffUp = 0,15 [m] (SDU). L'analyse du seuil DiffUp se fait avec un seuil Count = 2 et un seuil Derivee = 3.

Seuils pour le modèle du 12 mars 2018

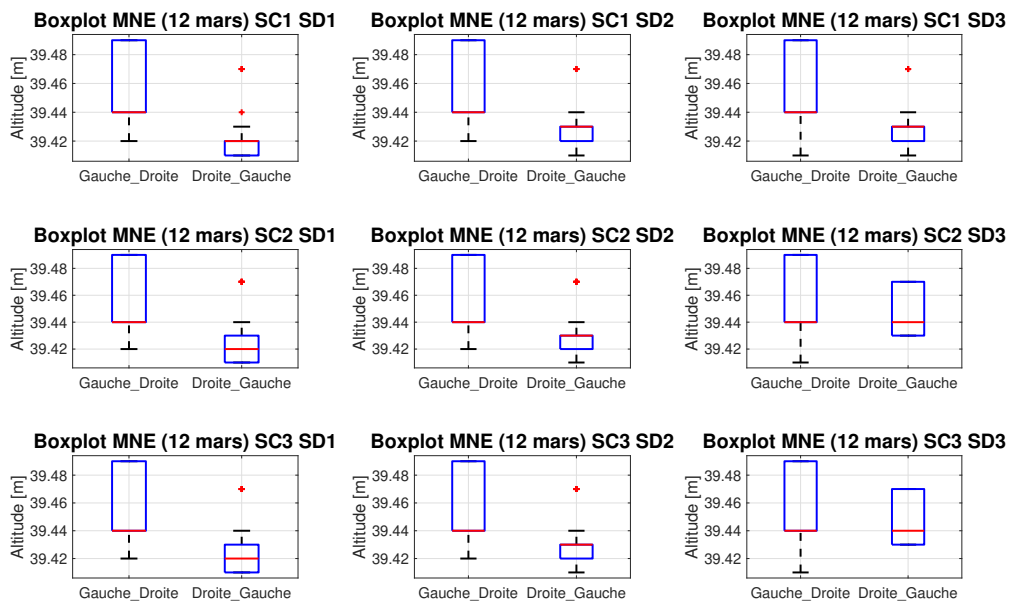


FIGURE D.1 – Influence des seuils Count et Derivee : le 12 mars 2018, sans végétation.

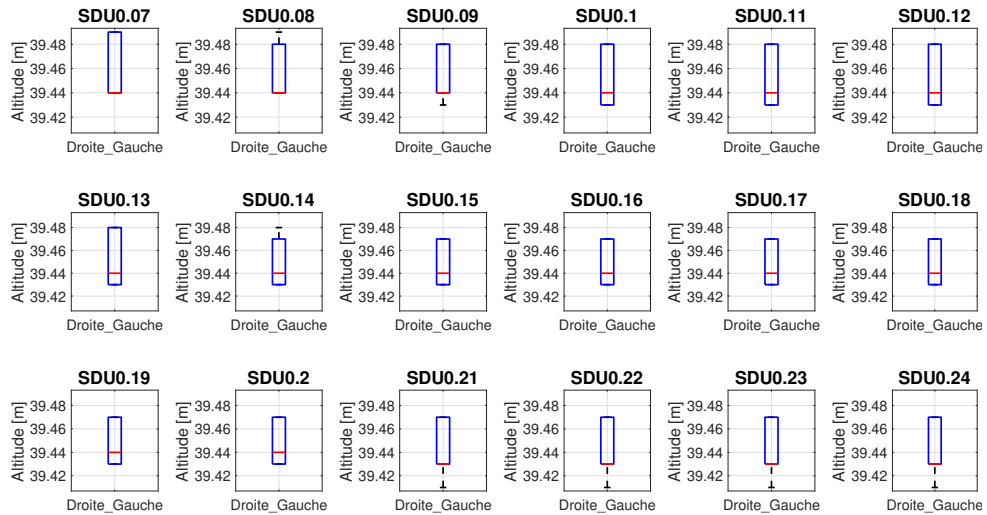


FIGURE D.2 – Influence du seuil DiffUp : le 12 mars 2018, sans végétation.

Seuils pour le modèle du 30 mars 2018

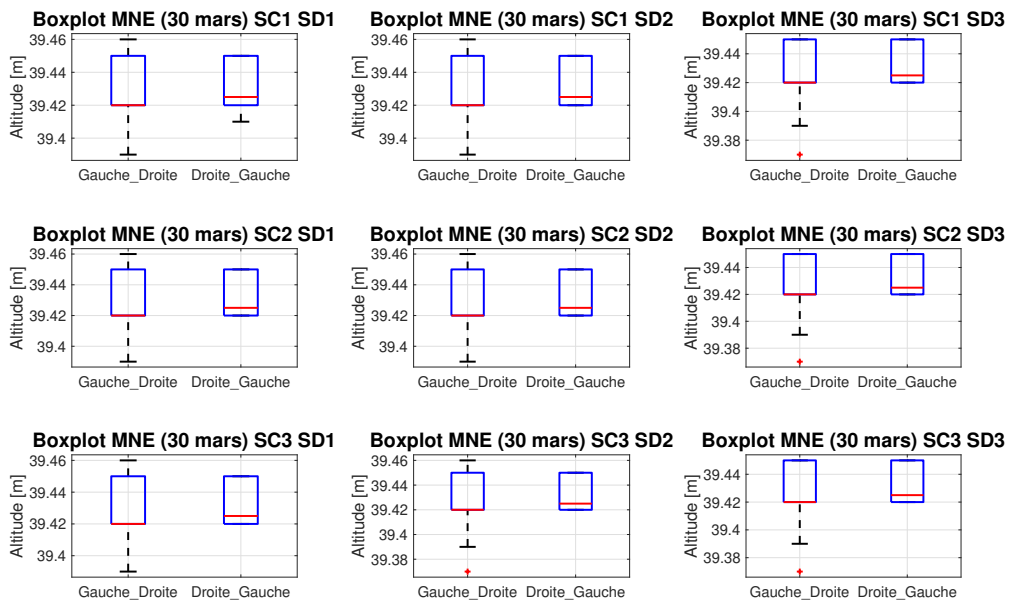


FIGURE D.3 – Influence des seuils Count et Derivee : le 30 mars 2018, sans végétation.

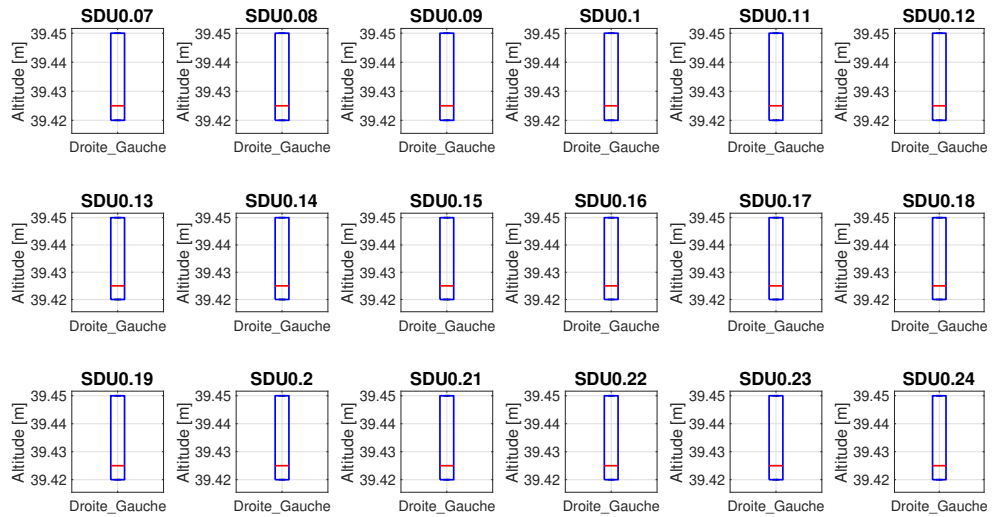


FIGURE D.4 – Influence du seuil DiffUp : le 30 mars 2018, sans végétation.

Seuils pour le modèle du 6 avril 2018

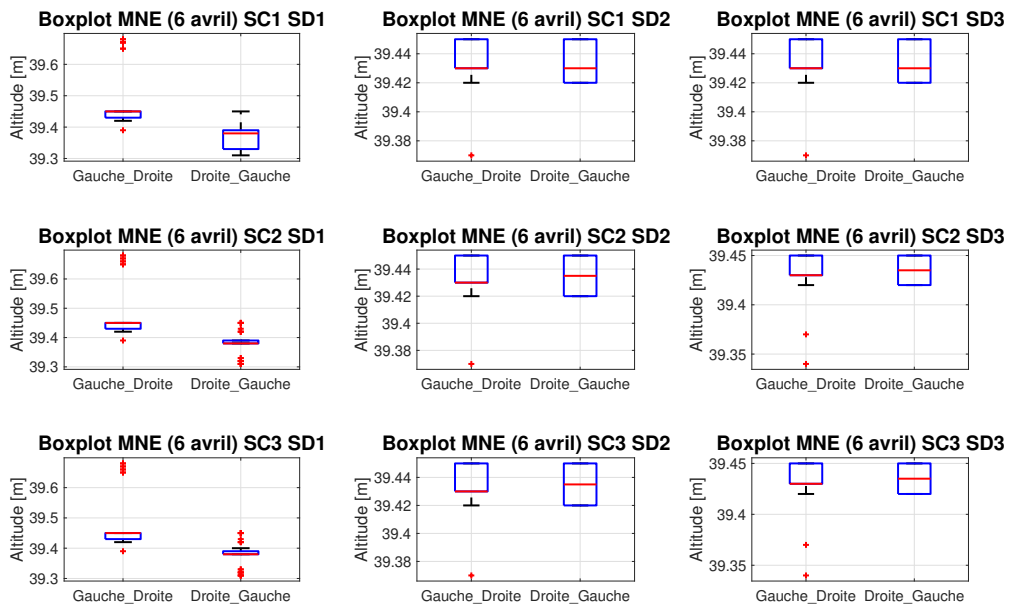


FIGURE D.5 – Influence des seuils Count et Derivee : le 6 avril 2018, faible végétation.

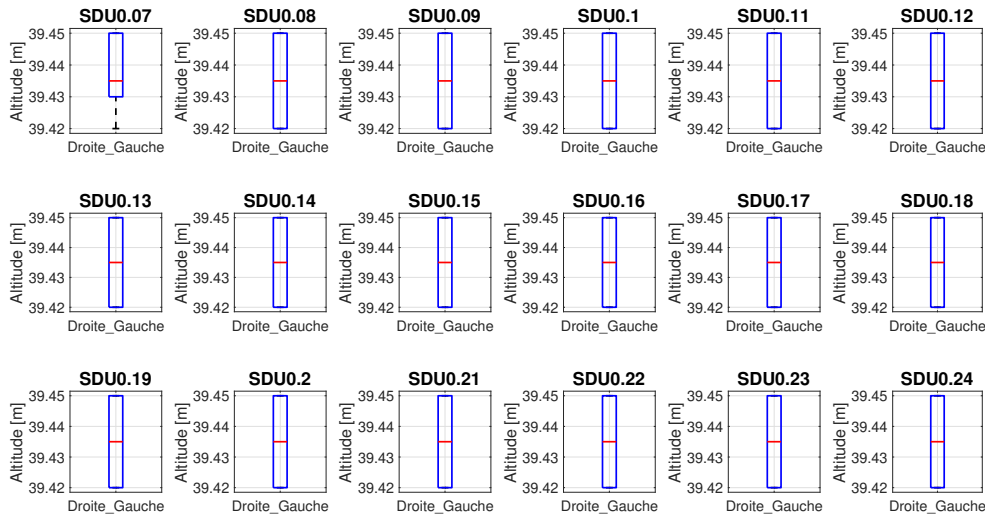


FIGURE D.6 – Influence du seuil DiffUp : le 6 avril 2018, faible végétation.

Seuils pour le modèle du 17 avril 2018

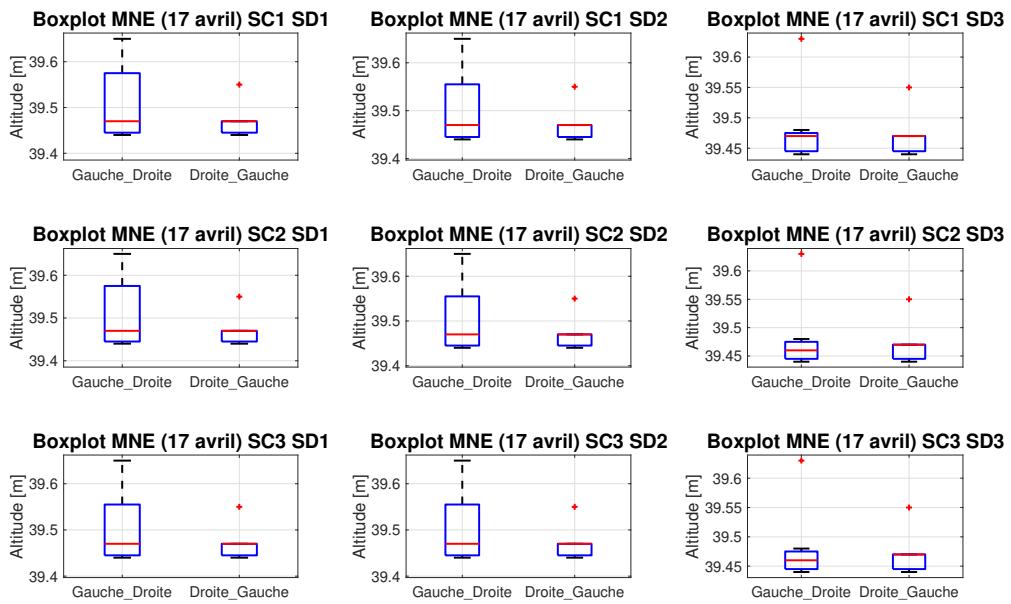


FIGURE D.7 – Influence des seuils Count et Derive : le 17 avril 2018, végétation moyenne.

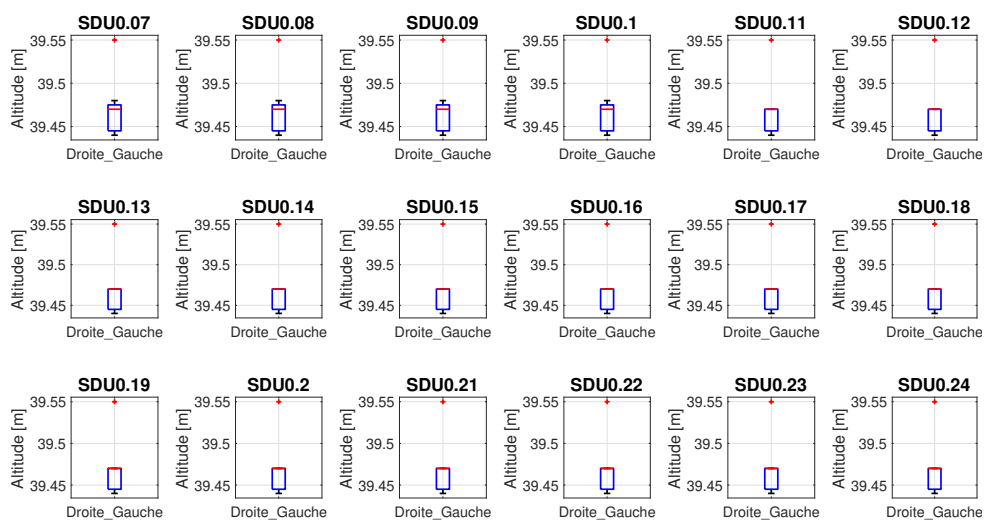


FIGURE D.8 – Influence du seuil DiffUp : le 17 avril 2018, végétation moyenne.

