

**École polytechnique de Louvain**

# **Mesure du niveau d'eau et de la vitesse de l'écoulement par imagerie en laboratoire et en rivière naturelle**

**Auteurs: Paul ASSELBERGHS, Brieuc PEETERS**

**Promoteur: Sandra SOARES FRAZAO**

**Lecteurs: Olivier CARLIER D'ODEIGNE, Ferdinand DE SCHOUTHEETE  
DE Tervarent, Charles Bielders**

**Année académique 2018–2019**

**Master [120] : ingénieur civil des constructions**





## Résumé

Depuis un certain temps, l'homme réalise la mesure du débit d'une rivière. Des résultats sont collectés, ces données statistiques nous permettent de connaître notre environnement et notamment de pouvoir dimensionner des ouvrages d'art : ponts, barrages... Cependant, les méthodes utilisées aujourd'hui ont un retard par rapport à la technologie disponible. Elles sont longues et onéreuses, c'est pourquoi les chercheurs ont pensé à mesurer les débits par photogrammétrie. Cette science consiste en la modélisation 3D d'objets (écoulements) à partir de photographies. Néanmoins, la communauté scientifique connaît des difficultés dues à la transparence et aux reflets de l'eau.

Notre but sera l'étude des écoulements permanents : niveau d'eau, débit par photogrammétrie dans un modèle réduit de cours d'eau et avec trois débits différents et ensuite cette étude sera réalisée sur cinq rivières réelles. Ce mémoire a pour but de compléter les techniques traditionnelles.

## **Abstract**

For some time now, man has been measuring the flow of rivers. Results are collected, and these statistical data allow us to know our environment, and in particular to be able to dimension engineering structures : bridges, dams... However, the methods used today lag behind the available technology. They are long and expensive, and this is why researchers thought about measuring flow rates by photogrammetry. This science consists of the 3D modeling of objects (flows) from photographs. Nevertheless, the scientific community is facing difficulties due to transparency and water reflections.

Our goal will be to study permanent flows, in exemple the water level and flow by photogrammetry, first in a reduced model of a river and with three different flows, and then in five real rivers. This study seeks to complement traditional techniques.



# Remerciements

*Avant de commencer, nous aimerions remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à l'élaboration de notre travail de fin d'étude et tout particulièrement :*

*Notre promotrice Sandra Soares-Frazão, pour ses conseils sur les pistes à privilégier.*

*Nos assistants Olivier Carlier d'Odeigne et Ferdinand de Schoutheete de Tervarent pour leur collaboration, leur implication et leur relecture.*

*À Mr. Sébastien François et à l'équipe du LEMSC (Laboratoire d'Essais mécaniques, Structures et génie civil) pour leur aide, le prêt de matériel et leurs conseils. Particulièrement à Samuel Laurent qui a su nous donner des conseils avisés.*

*Merci également au Service Public de Wallonie pour les renseignements et le temps qu'ils nous ont consacrés.*

*À Mr. Charles Bielders d'avoir accepté de faire partie de notre jury.*

*À nos familles et nos proches pour leur soutien moral et leur aide.*

*Paul Asselberghs  
Brieuc Peeters  
Louvain-la-neuve, Juin 2019*



# Introduction

Dans le contexte actuel de réchauffement climatique, les catastrophes naturelles se produisent de plus en plus fréquemment : inondations, sécheresses, tsunamis... Pour contrer ces phénomènes ou plutôt pour s'en protéger, l'homme est en constante étude de son environnement. L'hydraulique est une des sciences qui lui permet de comprendre les phénomènes naturels liés à l'écoulement des rivières. Aujourd'hui, nous disposons de plus en plus de technologies qui permettent la modélisation de ce qui nous entoure.

L'hydraulique est importante à plusieurs niveaux. Une connaissance des catastrophes liées à une rivière est un outil de comparaison, de plus, cela nous permet de disposer de données pour la navigation fluviale. La navigation est le transport le moins polluant en comparaison au trafic routier ou ferroviaire. Prédire sa faisabilité ou connaître les risques est donc primordial.<sup>1</sup>

La photogrammétrie est une science en développement permanent. Son application à l'hydraulique est très récente, elle a déjà prouvé son efficacité dans de nombreux domaines : médecine, archéologie, architecture, etc. Son grand avantage est sa rapidité et son faible coût. La technique de mesure par photogrammétrie étudiée dans ce travail est la Structure from Motion (SfM). Cette technique utilise des images, prises sous différents angles de vue, afin de reconstruire des géométries d'objets ou de surfaces en trois dimensions. Le matériel utilisé est rudimentaire : une caméra et des logiciels d'analyse (gratuit ou non), cela permet de rendre cette science accessible.<sup>2 3</sup> Dans notre étude, nous avons choisi d'utiliser le logiciel Agisoft-Photoscan.

L'étude en laboratoire est la première étape de ce travail qui nous permettra de valider les méthodes et ensuite de l'appliquer au réel. En laboratoire, nous pouvons contrôler tous les paramètres et nous concentrer sur l'étude : fiabilité, robustesse de la technique développée. Notre modèle réduit est une copie d'une partie de la rivière Cavaillon en Haïti. La taille et le relief sont donc connus (8.8m de longueur sur 1.2 m de largeur).

En laboratoire, nous disposons de l'équipement disponible pour notre étude. Nous pouvons contrôler tous les paramètres contrairement au cas réel. Sur le terrain, la prise de mesure est compliquée, elle dépend des conditions météorologiques, de la place

---

1. Entretien avec le SPW 20/03/2019

2. MAGAIL J. & al. ;APPLICATIONS DE LA PHOTOGRAMMÉTRIE À LA DOCUMENTATION DE L'ART RUPESTRE, DES CHANTIERS DE FOUILLES ET DU BÂTI; Missions du Musée d'Anthropologie préhistorique de Monaco; 2017

3. Information tiré du site : <https://www.studioflytechnologie.fr/photogrammetrie-drone-volumetrie-domaines-applications/>

---

disponible, etc. Donc, la qualité et la précision des résultats obtenus dépendent des nombreux paramètres qui interviennent dans le milieu.

L'étude sur le terrain constitue la seconde étape de ce travail. En effet, une fois que des résultats suffisants ont été obtenus en laboratoire, nous avons testé la méthode en rivière naturelle.

Notre travail s'inscrit dans la continuité des mémoires réalisés par [10][COUTINHO et JANSSENS, 2017], [11][DE SCHOUTHEETE et HUBERT, 2018] [2] sur l'étude de la hauteur d'eau et des écoulements permanents en laboratoire par photogrammétrie, [BIA et SOMERS, 2018] sur le principe de l'étude par PIV (Particle Image Velocimetry). L'étude présentée ici se base sur leurs résultats, le développement de nouvelles recherches et tire des conclusions sur la recherche du niveau d'eau. De plus, dans cette étude, nous appliquons la méthode de [2][BIA et SOMERS, 2018] dans le cadre d'un modèle réduit en laboratoire. L'analyse de l'ensemble de ces résultats, cette étude tente de déterminer le débit d'une rivière grâce à ces techniques d'imagerie .

La partie d'expérimentation sur le terrain s'inscrit également dans la continuité du mémoire de [20][HELLEBAUT, 2018] qui proposait une méthode afin de déterminer le niveau d'eau en rivière naturelle par des techniques d'imagerie. Tout comme en laboratoire, cette étude tente de pouvoir déterminer le débit par imagerie.

Notre mémoire est subdivisé en plusieurs parties indépendantes mais complémentaires. Pour commencer, nous avons l'état de l'art qui résume les précédentes études réalisées précédemment. Ensuite, le travail réalisé en laboratoire est présentée ainsi que l'analyse de leurs résultats. La partie suivante présentée porte sur le travail réalisé sur le terrain, en rivière naturelle. Et enfin, une conclusion ainsi que des pistes d'amélioration à mettre en oeuvre afin d'optimiser les méthodes utilisées seront présentées.

# Liste des abréviations

SfM	<i>Structure from Motion</i>
DEM	<i>Digital Elevation Model</i>
dGPS	<i>Differential Global Positioning System</i> ou GPS différentiel de type Leica 1200
GCPs	<i>Ground Control Points</i>
EMSC	Laboratoire Essais mécaniques, Structures et génie civil
LSPIV	<i>Large Scale Particule Image Velocimetry</i>
PIV	<i>Particle image Velocimetry</i>
MID	<i>Magnetic Induced Discharge</i>
MFPro	Courantomètre à induction magnétique
ROI	<i>Region Of Interest</i>
SPW	Service public de Wallonie : direction des cours d'eau non-navigables
SSIV	<i>Surface Structure Imaging Velocimetry</i>

# Table des matières

<b>Introduction</b>	<b>i</b>
<b>Liste des abréviations</b>	<b>ii</b>
<b>1 Etat de l'art</b>	<b>1</b>
1 La photogrammétrie et ses applications . . . . .	1
1.1 Photogrammétrie appliquée dans le domaine de l'hydraulique . . . . .	2
1.1.1 Bathymétrie . . . . .	2
1.1.2 Écoulement permanent . . . . .	3
1.1.3 Écoulement transitoire . . . . .	3
1.1.4 En rivière naturelle . . . . .	3
1.2 Conclusion . . . . .	4
2 Techniques de mesures de vitesse non-intrusives et lien entre vitesse de surface et vitesse moyenne . . . . .	4
2.1 Techniques de mesures de vitesse non-intrusives . . . . .	4
2.2 Lien entre vitesse de surface et vitesse moyenne . . . . .	5
2.2.1 Lien entre $\alpha$ et la morphologie de la rivière . . . . .	7
3 <i>Discharge</i> . . . . .	9
3.1 Description . . . . .	9
3.2 Utilisation . . . . .	9
3.2.1 Calibration . . . . .	10
3.2.2 Critères du site . . . . .	10
3.3 Efficacité de <i>Discharge</i> . . . . .	10
3.3.1 Matériel et méthode . . . . .	10
3.3.2 Résultats et discussion . . . . .	11
3.3.3 Conclusion . . . . .	13
4 Réalisations antérieures à l'UCL . . . . .	13
4.1 Dispositifs expérimentaux . . . . .	13
4.1.1 Le canal . . . . .	14
4.1.2 Matériel photographique . . . . .	16
4.1.3 Instruments de mesures en rivière naturelle . . . . .	16
4.2 Logiciels utilisés et démarche . . . . .	17
4.3 Résultats des travaux de fin d'étude 2017-2018 . . . . .	18
4.3.1 Modèle réduit . . . . .	18
4.3.2 Mesure de la bathymétrie et la pente . . . . .	19
4.3.3 Mesure de la surface libre . . . . .	19
4.3.4 Mesure du niveau d'eau en rivière naturelle . . . . .	19
4.3.5 Mesure des vitesses . . . . .	19

<b>2</b>	<b>Amélioration du dispositif expérimental en laboratoire</b>	<b>21</b>
1	Repère . . . . .	21
2	Bathymétrie . . . . .	22
2.1	Introduction . . . . .	22
2.2	Mesure de la bathymétrie par imagerie en laboratoire . . . . .	22
2.3	Mesure de la bathymétrie d'une section par le trusquin en laboratoire	22
3	Mesures du niveau d'eau . . . . .	22
4	Mesures de vitesse . . . . .	23
4.1	Mesures de vitesse avec le tube de Pitot . . . . .	23
4.1.1	Vérification de la précision du tube de Pitot . . . . .	23
4.2	Mesures de vitesses par <i>PIV</i> . . . . .	25
4.2.1	Dispositif de prises d'images . . . . .	25
4.2.2	Ensemencements . . . . .	25
4.2.3	Traitement des vidéos par PIVLab . . . . .	31
<b>3</b>	<b>Analyse des résultats en laboratoire</b>	<b>32</b>
1	Calcul de niveau d'eau . . . . .	32
2	Coefficients de vitesse & coefficients de débit . . . . .	33
2.1	Coefficients de vitesse . . . . .	33
2.2	Coefficients de débit . . . . .	36
3	Calcul de débit . . . . .	37
4	Conclusion . . . . .	39
<b>4</b>	<b>Amélioration du dispositif expérimental en rivière naturelle</b>	<b>40</b>
1	Bathymétrie . . . . .	40
1.1	Mesure de la bathymétrie au courantomètre . . . . .	40
1.2	Mesure de la bathymétrie au dGPS . . . . .	41
2	Mesures du niveau d'eau . . . . .	42
2.1	Modélisation photogrammétrique . . . . .	45
2.1.1	Placement des repères GCPs . . . . .	46
2.1.2	Acquisition de photos . . . . .	47
2.1.3	Utilisation du logiciel . . . . .	49
3	Mesures de vitesses . . . . .	50
3.1	Vérification du matériel de mesure disponible . . . . .	50
3.2	Différents types d'ensemencement . . . . .	51
3.2.1	Sans ensemencement . . . . .	51
3.2.2	Ensemencement avec des copeaux de bois . . . . .	54
3.3	Dispositifs de prises d'images . . . . .	56
3.4	Traitement des images : utilisation des vidéos et utilisation de PIVLab pour la LSPIV . . . . .	57
<b>5</b>	<b>Analyse des résultats en rivière naturelle</b>	<b>58</b>
1	Calcul du niveau d'eau . . . . .	58
2	Coefficients de débits . . . . .	60
3	Calcul de débit . . . . .	61
3.1	Calcul du débit de la Thyle . . . . .	62
3.2	Calcul du débit de l'Orne . . . . .	62
3.3	Calcul du débit de la Ligne . . . . .	62

3.4	Calcul du débit du Biran . . . . .	63
3.5	Calcul du débit de la Lasne . . . . .	63
3.6	Commentaires sur les résultats . . . . .	64
4	Comparaison avec l'application <i>Discharge</i> . . . . .	65
4.1	Luminosité, reflets et conditions climatiques . . . . .	66
4.2	Accessibilité du site et orientation de la prise de vue . . . . .	66
4.3	Sections simplifiées utilisées par <i>Discharge</i> et paramètre de rugosité . . . . .	67
4.4	Conclusion . . . . .	69
<b>6</b>	<b>Pistes d'amélioration</b>	<b>70</b>
	<b>Conclusion</b>	<b>72</b>
	<b>Bibliographie</b>	<b>77</b>
	<b>Appendice</b>	
<b>A</b>	<b>Descriptif des appareils de mesures</b>	<b>a</b>
A	GoPro® Hero 4 . . . . .	a
B	Courantomètre MFPro OTT® . . . . .	a
C	dGPS Leica® 1200 . . . . .	b
D	Trusquin . . . . .	c
<b>B</b>	<b>Utilisation de PIVLab</b>	<b>d</b>
A	Importation d'images . . . . .	d
B	Paramètres d'analyse . . . . .	e
B.1	Délimitation de la zone d'étude : <i>Region Of Interest</i> (ROI) . . . . .	e
B.2	<i>Image pre-processing &amp; PIV settings</i> . . . . .	f
C	Calibration . . . . .	g
D	<i>Vector Validation</i> . . . . .	h
E	Résultats . . . . .	i
<b>C</b>	<b>Utilisation de Agisoft Photoscan®</b>	<b>k</b>
<b>D</b>	<b>Mode d'emploi</b>	<b>n</b>
A	En laboratoire . . . . .	n
A.1	Détermination du niveau d'eau . . . . .	n
A.2	Détermination du coefficient de débit . . . . .	n
B	Mode opératoire en rivière . . . . .	o
<b>E</b>	<b>Vérification de la précision du courantomètre MFPro OTT®</b>	<b>q</b>
<b>F</b>	<b>Résultats des calculs de débits en laboratoire</b>	<b>r</b>
A	Avec coefficients de vitesse . . . . .	r
B	Avec coefficients de débit . . . . .	s
B.1	Coefficient de débit moyen par section . . . . .	s
B.2	Coefficient de débit imposé à 1.25 . . . . .	s
<b>G</b>	<b>Résultats des calculs d'aire et du niveau d'eau en rivière</b>	<b>t</b>

**H Checklist à vérifier sur le terrain**

**u**



# Chapitre 1

## Etat de l'art

### Introduction

Ce premier chapitre présente l'état de l'art ayant conduit à la réalisation de ce travail. Celui-ci portant sur l'étude de la mesure de niveau d'eau d'un cours d'eau et de vitesses par imagerie en laboratoire et en rivière naturelle, cet état de l'art est exposé dans plusieurs sections.

Tout d'abord, la photogrammétrie ainsi que ses applications seront présentées. Cette première partie s'inscrit dans la continuité des travaux de [11] [DE SCHOUTHEETE et HUBERT, 2018] ainsi que de [20] [HELLEBAUT, 2018] qui ont étudié la mesure de niveau d'eau par photogrammétrie respectivement en laboratoire et en rivière naturelle.

Ensuite, différentes techniques de mesures non-intrusives de vitesse ainsi que la corrélation entre la vitesse de surface et la vitesse moyenne seront présentés. Cette seconde section s'inscrit dans la continuité des travaux de [2] [BIA et SOMERS, 2018].

Par la suite, une section portant sur l'application *Discharge* sera présentée.

Et enfin, une section reprenant les réalisations antérieures à l'UCL sera présentée.

## 1 La photogrammétrie et ses applications

### Introduction

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

*"On regroupe sous le nom de photogrammétrie l'ensemble des techniques qui permettent de déterminer la forme, les dimensions et la position d'un objet (au sens le plus*

---

1. Définition extraite du dictionnaire Larousse® 2019

*large du terme) à partir de perspectives de cet objet enregistrées photographiquement."*<sup>2</sup>

La photogrammétrie consiste donc en l'utilisation de clichés qui permettent de reconstituer un modèle. Elle peut être utilisée dans plusieurs domaines d'application, notamment en hydraulique. Dans cette première partie de cet état de l'art, nous nous pencherons donc sur le domaine de l'hydraulique, que ce soit dans l'étude de la bathymétrie, dans les écoulements permanents et transitoires.

## 1.1 Photogrammétrie appliquée dans le domaine de l'hydraulique

[11] [DE SCHOUTHEETE et HUBERT] explique que l'utilisation de la photogrammétrie en hydraulique est en pleine expansion. Les résultats des différentes recherches étant encourageants, le développement de cette technologie est croissant. En effet, elle permet de modéliser et caractériser l'érosion, le transport de sédiments, etc. Cette technique permet également de mesurer le niveau d'eau dans le cas des écoulements.

### 1.1.1 Bathymétrie

[12][DIETRICH, 2016] remarque que pour des grands cours d'eau, il est possible de déterminer la bathymétrie à l'aide de sonars ou de profileurs à effet Doppler mais que ces méthodes sont inefficaces dans le cas des petits cours d'eau.

Cette étude traite de la photogrammétrie et la SfM<sup>3</sup> ainsi que des problèmes dûs à la réflexion et la réfraction de l'eau. Des essais sont réalisés sur une piscine et sur la White River (Vermont). Il conclue que ses résultats sont pertinents et fiables (0.02 % d'erreurs par rapport à la hauteur du vol pour la prise de photographies). Il précise également que la méthode ne fonctionne qu'avec des conditions idéales (eau claire, etc.).

[6][CARLIER D'ODEIGNE et al., 2017] sur [10][COUTINHO et JANSSENS, 2017] fait référence à une étude effectuée sur la mesure par photogrammétrie en modèle réduit d'une rivière. Le premier objectif était de mettre en place un dispositif pour modéliser la bathymétrie du modèle réduit et le second était de tester cette disposition dans la mesure de la surface libre d'écoulement permanent en essayant différentes manières. Nous allons appliquer sa méthode de mesure de la bathymétrie dans le cadre de notre étude ici.

[11] [DE SCHOUTHEETE et HUBERT, 2018] ont réalisé une étude de construction d'un modèle par photogrammétrie sur la rivière d'essais à l'UCL. Une comparaison des résultats obtenus par photogrammétrie a été effectuée par rapport à des mesures de référence réalisées au laser.

---

2. Définition extraite de l'Encyclopaedia Universalis 2019

3. Pour rappel, l'ensemble des abréviations de ce mémoire ont été reprises dans la liste des abréviations, présentée au début du travail.

### 1.1.2 Écoulement permanent

[14][FERREIRA et al., 2017] étudie une méthode photogrammétrique de mesure de la surface d'écoulements de fluides naturels. Il expérimente celle-ci en laboratoire mais il juge qu'elle peut-être applicable in situ. Il précise également qu'il est nécessaire d'ajouter une texture à l'eau afin d'obtenir des résultats corrects. Il réalise ses expériences selon 2 situations (avec ou sans végétation dans le fond) afin de pouvoir comparer ses différents résultats et de déterminer l'influence des paramètres.

[9][CHANDLER et al., 2008] étudie la mesure de la surface de l'eau par la «*close range photogrammetry*» (photogrammétrie rapprochée). Sa méthode consiste à densifier la texture de l'eau afin de mesurer la surface de l'eau en captant ses mouvements par plusieurs appareils photos numériques synchronisés.[9] [CHANDLER et al., 2008] juge que ses résultats sont concluants au vu de la précision de 3 [mm] obtenue. Cet article est intéressant dans le cadre de notre étude car pour conclure, il propose d'établir une méthode de calcul de débit en rivière en réunissant ses travaux avec la *Particle Image Velocimetry* (PIV).

[11][DE SCHOUTHEETE et HUBERT, 2018] étudie une technique de mesure par photogrammétrie du niveau d'eau d'un modèle réduit en laboratoire dans le cas d'un écoulement permanent. Ils utilisent notamment des appareils photos numériques de type "reflex" et des GoPro®. En ce qui concerne les écoulements permanents, ils obtiennent des résultats probants sans modifier la texture de l'eau.

### 1.1.3 Écoulement transitoire

[15][FRANZINI et al., 2016] propose différentes idées pour l'étude des écoulements transitoires en laboratoire. Par exemple, il propose d'utiliser un flash afin de pouvoir déterminer un point de synchronisation pour les caméras. Il propose également d'utiliser un plus grand nombre de caméras afin de modéliser l'ensemble du canal en une seule prise de vue.

[11][DE SCHOUTHEETE et HUBERT, 2018] étudie également la possibilité d'appliquer leur technique de mesure par photogrammétrie, sans traceurs, aux écoulements transitoires. Leurs résultats sont peu probants dans ce cas-ci. Ils relèvent également la difficulté de réussir à synchroniser la prise d'image et le temps de variation de débit. Ils ont essayé un système par traitement vidéo, cependant, le traitement des vidéos est compliqué et ne permet pas d'obtenir des résultats cohérents.

### 1.1.4 En rivière naturelle

[20][HELLEBAUT, 2018] expérimente la photogrammétrie dans le but de déterminer le niveau d'eau en rivière naturelle. Cette méthode permet de déterminer l'altitude de la surface de l'eau en étudiant l'évolution du DEM obtenu par les techniques d'imagerie ainsi que la forme de la bathymétrie obtenue par des relevés in situ par un dGPS.

## 1.2 Conclusion

Au fil du temps, la photogrammétrie est utilisée dans de plus en plus d'études. Les nouvelles technologies la rendent plus accessible, ce qui permet de multiplier ses utilisations, notamment dans le secteur de l'hydraulique.

La recherche de la mesure du niveau d'eau par photogrammétrie donne des résultats probants. Les résultats sont encourageants excepté dans le cas d'écoulement transitoire car il s'agit d'écoulements plus difficiles à caractériser.

Dans le cas des mesures de niveau d'eau, les chercheurs rencontrent encore des problèmes lorsqu'on parle de photogrammétrie à la surface de l'eau : la réflexion de l'eau, la réfraction, la gestion de la luminosité, etc. Diverses techniques sont suggérées afin de gérer ces différents problèmes, comme l'ajout d'une texture artificielle ou l'utilisation de la végétation. Dans le cas des écoulements transitoires, les plus grandes difficultés consistent à donner une texture à l'eau ainsi que de pouvoir synchroniser les images aux variations de débit et donc aux variations de la hauteur d'eau.

## 2 Techniques de mesures de vitesse non-intrusives et lien entre vitesse de surface et vitesse moyenne

### 2.1 Techniques de mesures de vitesse non-intrusives

[34][RION, 2017] expose différentes techniques de mesures de vitesse non-intrusives, parmi lesquelles nous pouvons citer le lidar et le radar Doppler, des mesures depuis l'espace et l'hydrométrie par analyse d'image. Nous nous intéresserons surtout à cette dernière méthode au vu du sujet de notre recherche.

Pour le cas de l'hydrométrie par analyse d'images, [34][RION, 2017] expose deux méthodes actuellement disponibles : la PTV (*Particle Tracking Velocimetry*) et la LSPIV (*Large Scale Particle Image Velocimetry*), qui est une adaptation de la PIV (*Particle Image Velocimetry*), mais utilisée sur de plus grandes surfaces.

La PTV consiste, toujours selon [34][RION, 2017], à identifier le déplacement de particules individuelles. La LSPIV, elle, consiste à "*suivre le déplacement, sur une séquence d'images pour laquelle le pas de temps est connu, de particules visibles*" (dites traceurs). Ces particules peuvent être présentes naturellement à la surface de l'eau (écume par exemple) ou peuvent être ajoutées par l'observateur (billes de frégolite, copeaux de bois, ...) dans le but de réaliser ces mesures.

Les résultats obtenus, par la méthode LSPIV, lors de l'étude de [2][BIA et SOMERS, 2018] sont encourageants dans le calcul de vitesse. Cependant, le principal défaut de cette méthode constitue en l'ensemencement, nécessaire à l'obtention de résultats.

## 2.2 Lien entre vitesse de surface et vitesse moyenne

[34][RION, 2017] ainsi que [2][BIA et SOMERS, 2018] expliquent que la distribution des vitesses le long d'une verticale est de type logarithmique dont le maximum se situe légèrement en-dessous de la surface libre (point M) comme l'illustre la figure ci-dessous.

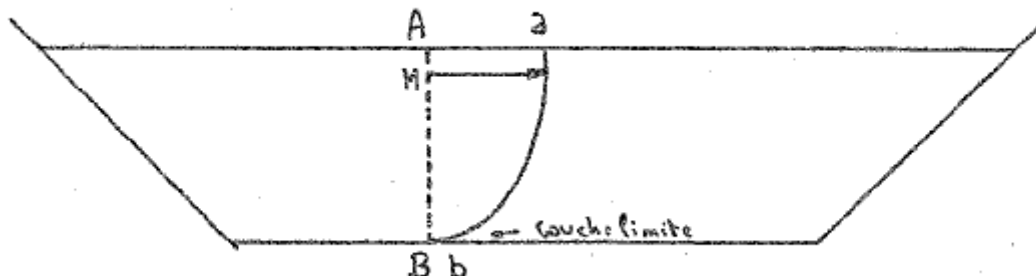


FIGURE 1.1 – Distribution des vitesses sur une verticale - [42][ZECH, 2008]

[2][BIA et SOMERS, 2018] expliquent également qu'il existe un index de vitesse liant la vitesse de surface d'une colonne d'eau à sa vitesse moyenne :

$$\alpha = \frac{\text{Vitesse moyenne sur une colonne d'eau}}{\text{Vitesse de surface de cette colonne d'eau}}$$

[18][HAUET et al., 2009] a étudié cet index de vitesse dans le cas de la méthode LSPIV. Il y est estimé des valeurs usuelles de  $\alpha$  de 0.85 ou 0.9 en fonction des cas. Cet index permet d'exploiter les résultats obtenus par LSPIV. En effet, la LSPIV ne permet d'obtenir que des résultats en surface. Obtenir la distribution de la vitesse ainsi que la vitesse moyenne le long d'une verticale par rapport à la vitesse de surface est donc essentiel au calcul du débit.

[26][LE COZ et al., 2012] expose une méthode de mesure de la distribution de vitesse selon une verticale. Il y est proposé de discréditer la verticale afin de déterminer au mieux le profil de vitesse le long de cette verticale. Une méthode expérimentale pour déterminer, in fine, la vitesse moyenne le long d'une verticale consiste à mesurer la vitesse à différents hauteurs définis sur cette verticale et de déterminer la vitesse moyenne sur base de ces résultats.

[22][Guide Technique : Fiabiliser les mesures de vitesse. Représentativité spatiale des mesures en continu de vitesse et incertitudes sur les mesures de débit.] nous donne un profil de vitesse logarithmique cependant, dans un canal étroit, la vitesse de surface diminue à nouveau. Cela s'appelle un "*dip-phenomenon*".

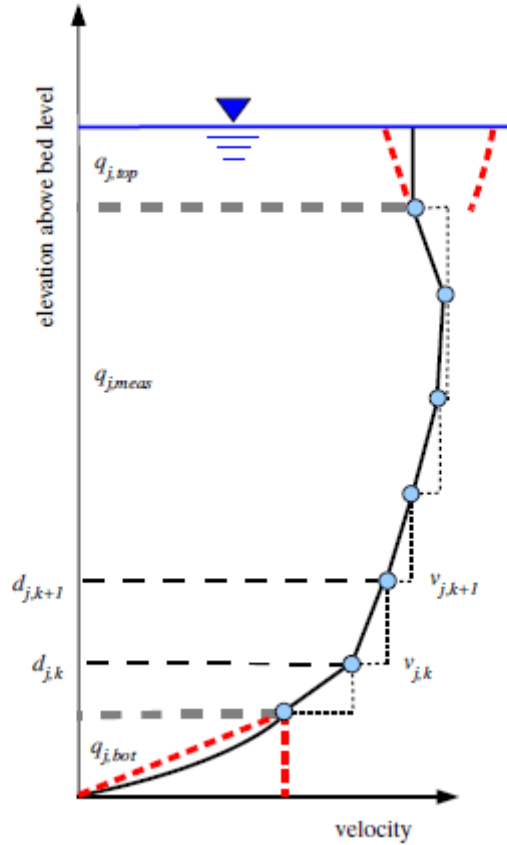


FIGURE 1.2 – Principe du calcul de la vitesse le long d’une verticale - [26][LE COZ et al., 2012]

[41][WELBER et al., 2016] étudie les mesures d’un écoulement par SVR (Surface Velocity Radar). Dans le cas de cette étude, il y est également fait mention de plusieurs méthodes pour déterminer le coefficient  $\alpha$  représentant le ratio entre la vitesse moyenne sur une colonne d’eau et la vitesse de surface sur cette colonne d’eau.

Une expression analytique de ce coefficient est également définie comme :

$$\alpha = \frac{D_i}{D_i - z_0} - \ln\left(\frac{D_i}{z_0}\right)^{-1}$$

où  $z_0$  exprime la longueur de rugosité et  $D_i$  la profondeur d’écoulement. Le développement plus complet de cette expression analytique est détaillé dans [41][WELBER et al., 2016].

[41][WELBER et al., 2016] a estimé ce coefficient ayant à sa disposition des relevés de vitesses et des relevés de vitesses de surface sur plusieurs verticales. La variation du coefficient  $\alpha$  local en fonction de la profondeur et de la rugosité est observée.

[41][WELBER et al., 2016] utilise par défaut  $\alpha = 0.85$  ce qui n’est pas absurde car l’écart inter-quartile est  $0.73 - 0.99$ . La variabilité est grande dans les canaux peu profonds et diminue rapidement pour des valeurs de rugosité relative inférieures à environ  $0.02 - 0.04$ . Dans les grandes rivières profondes,  $\alpha$  fluctue autour de la valeur

par défaut (0.85).

[41][WELBER et al., 2016] calcule également les valeurs globales par une moyenne spatiale pondérée de  $\alpha$  local. Globalement, les valeurs  $\alpha$  globales sont moins dispersées que leurs équivalents locaux (écart inter-quartile 0.77 – 0.91).

Les résultats proposés dans [41][WELBER et al., 2016] montrent que les estimations de débit obtenues avec  $\alpha$  par défaut ont un degré de précision inférieur à 10% si la rugosité relative est inférieure à environ 0,01. Les plus grandes erreurs sont observées à des rugosités relatives très faibles ( $<0.05$ ).

[41] [WELBER et al., 2016] ajoute que, dans un canal artificiel, où il est observé une faible rugosité, la valeur de  $\alpha$  au centre du canal égale 0.9 par contre, sur les bords, les valeurs de  $\alpha$  peuvent varier fortement. Ces variations sont la conséquence des courants de retour qui modifient le profil de vitesse logarithmique.  $\alpha$  peut être supérieur à l'unité.

Selon [18][Méthodes innovantes pour la mesure des débits fluviaux en continu : profileur Doppler fixe horizontal (H-aDcp) et analyse d'images (LSPIV)] le paramètre  $\alpha$  est influencé par les faibles débits : la dispersion s'agrandit.

[19][A. HAUET, T. MORLOT, L. DAUBAGNAN] ont étudié 3611 jaugeages sur 176 sites différents en France afin de déterminer une valeur plus précise pour le  $\alpha$  que la valeur théorique.

Il existe :

1. la loi logarithmique est bien suivie lorsque  $u/U^* = 1/k * \ln(z/Z_0)$  où  $k$  est une constante de von Karman (0.4),  $U^*$  est la vitesse de cisaillement,  $z$  est la distance depuis l'origine du profil vertical de vitesse.  $Z_0$  est le paramètre de rugosité,
2. la loi de puissance pour le profil de vitesse :  $u(z) = a * (z - z_0)^{1/m}$ . Ce sont 2 manières de calculer  $\alpha$  de manière théorique.

Pour chaque jaugeage, on normalise la vitesse par la profondeur. Un  $\alpha_{surface} > 1$  est le résultat de l'effet du vent. La vitesse de surface est diminuée.

### 2.2.1 Lien entre $\alpha$ et la morphologie de la rivière

**Evolution de  $\alpha$  avec la hauteur d'eau.** [19] [A. HAUET, T. MORLOT, L. DAUBAGNAN] expose également que la valeur d' $\alpha$  est supposé tendre vers 1 quand la hauteur d'eau augmente et que la rugosité diminue.  $\alpha_{power}$ ,  $\alpha_{log}$  et  $\alpha_{surface}$  montre la même évolution (augmentation) en fonction du rayon hydraulique  $R_h$ .

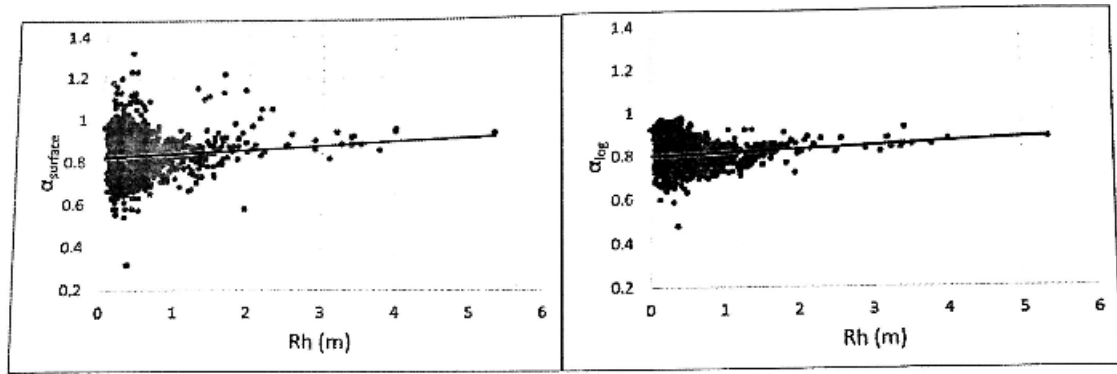


FIGURE 1.3 – Évolution de  $\alpha_{log}$  et  $\alpha_{surf}$  avec le rayon hydraulique  $R_h$  - [19][HAUET, MORLOT et DAUBAGNAN - 2018]

**Évolution de  $\alpha$  avec le rapport d'aspect.** Toujours selon [19] [A. HAUET, T. MORLOT, L. DAUBAGNAN], le lien entre  $\alpha$  et le rapport d'aspect  $\frac{B}{R_h}$  montre que  $\alpha_{log}$ ,  $\alpha_{surf}$  et  $\alpha_{power}$  diminue quand ce rapport augmente. Mais ce n'est pas vraiment prononcé.

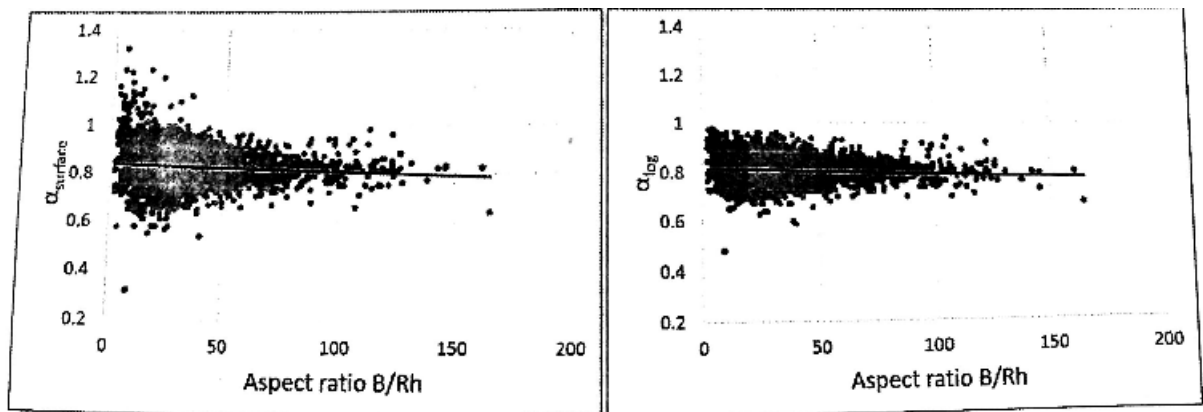


FIGURE 1.4 – Evolution de  $\alpha_{log}$  et  $\alpha_{surf}$  avec le rapport d'aspect  $B/R_h$  - [19][HAUET, MORLOT et DAUBAGNAN - 2018]

**Evolution de  $\alpha$  avec la rugosité du lit.** [19] [A. HAUET, T. MORLOT, L. DAUBAGNAN] écrit également que les mesures réalisées montrent que la rugosité du lit d'un canal en béton est de 0,9 donc un peu plus élevé que pour des canaux en sable.

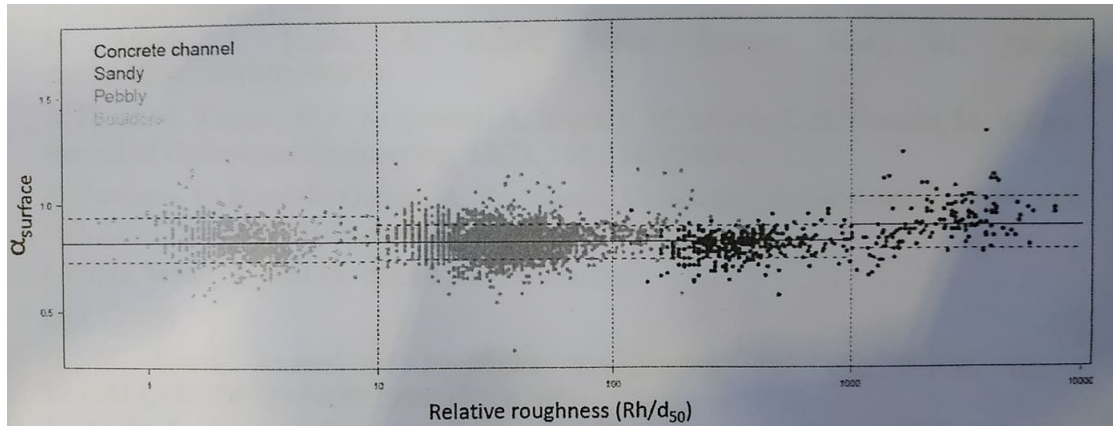


FIGURE 1.5 – Boxplot de  $\alpha$  pour chaque section selon la rugosité du lit ( $Rh/d_{50}$ ) - [19][HAUET, MORLOT et DAUBAGNAN - 2018]

Pour les plus grandes rugosités ( $1000 < Rh/d_{50} < 10000$ ), le  $\alpha$  est de 0.9. Mais le lien entre  $Rh/d_{50}$  n'est pas très clair, on peut seulement déterminer que pour un canal artificiel en béton on a un  $\alpha$  de 0.9 et pour les rivières naturelles la valeur de  $\alpha$  diminue à 0.8.

### 3 Discharge

#### 3.1 Description

*Discharge* mesure le niveau d'eau, la vitesse et le débit d'une rivière ou d'un canal en deux minutes. Voilà de quoi se vante l'application. Ce n'est pas une mince affirmation quand on sait que les techniques de mesures actuelles mettent au minimum une quinzaine de minutes et nécessitent une technologie coûteuse.

Nous avons testé cette application à plusieurs reprises lors de nos sorties sur terrain et comparé nos résultats. La prise en main est plus difficile que ce qui nous avait été communiqué. L'analyse ne fut possible qu'une fois sur trois et même impossible sur une rivière. Nous pensons que cela est dû à un angle de prise de vue trop élevé. Outre cela, les résultats sont édités en moins de 2 minutes, nous obtenons les informations qui sont ajoutées à la base de données que nous pouvons modifier (comme l'ajout d'une section complexe, etc.) via le site web.

#### 3.2 Utilisation

*Discharge* est une application pour calculer le débit d'une rivière de façon non-intrusive. La détection de la vitesse de surface est simplifiée grâce à une interface interactive et son calcul est automatisé. Ensuite les informations sont transmises à la base de données ainsi que quelques preuves-photo.[8]

### 3.2.1 Calibration

Pour calibrer la vidéo, 4 marqueurs doivent être placés : 2 sur chaque rive le plus près possible de la surface de l'eau. La distance entre les marqueurs installés sur le même versant est mesurée ainsi que la longueur oblique avec le marqueur opposé. Une ligne bleue apparaît que l'utilisateur doit faire concorder avec le niveau d'eau. Si le site possède une courbe de mesure, le débit calculé sera adapté à celle-ci. De plus, *Discharge* prend en compte la valeur de rugosité (kst pour valeur de Manning-Strickler) celle-ci varie de 25 quand c'est très rugueux, à 100 quand c'est très lisse.

### 3.2.2 Critères du site

Le choix du site va déterminer si *Discharge* fonctionnera. Aujourd'hui, l'application accepte seulement des sections simplifiées : rectangulaire, trapézoïdale, parabolique... Si nous voulons implémenter notre section réelle, nous devons l'encoder sur le site internet. A la surface de l'eau, il doit y avoir assez d'éléments visibles comme des vagues, des bulles ou d'autres petits éléments.

Lors de la prise d'image, les deux rives doivent être visibles ainsi que les 4 marqueurs. La ligne du niveau d'eau doit être vue sous un angle de 20 à 70° depuis la ligne d'horizon. Et bien évidemment, le smartphone ne doit pas être trop éloigné de la rivière.

Si le site possède une courbe de calibration, on peut utiliser seulement le niveau d'eau pour obtenir un débit. Cette option est surtout intéressante quand on a une vitesse de surface faible.

## 3.3 Efficacité de *Discharge*

*Discharge* utilise l'appareil photo et l'accéléromètre de votre smartphone. Cette technique de SSIV (Surface Structure Imaging Velocimetry) appliquée sur des canaux ou rivières, est semblable à l'approche LSPIV. [7][CARREL & al.,2019] a testé en laboratoire la fiabilité de ces mesures pour des débits variants de 20 à 120 L/s. Ils ont pris des mesures à 2 endroits différents : une première fois, en plaçant le smartphone sur un pied d'appareil photo et une seconde fois, en le tenant à la main. Cela a permis à l'étude de déterminer la perte de précision due aux mouvements parasites.

### 3.3.1 Matériel et méthode

Leurs expériences ont été réalisées dans le laboratoire d'hydraulique à l'ETH de Zurich en Suisse dans un canal trapézoïdale de 25m de long et dont le fond est recouvert de grains naturels de 4mm de diamètre. Le coefficient de Manning-Strickler a été évalué à 68 [ $m^{1/3}/s$ ].

Pour réaliser leurs mesures en écoulement permanent, ils se sont mis en aval du canal. Ensuite, la configuration du site a été faite avec la bathymétrie et les coordonnées des marqueurs. Elles auront le rôle d'adapter une image 2D à un espace 3D. Ces points ont été vérifiés par un appareil Disto S910 (Leica) qui mesure la distance par laser pour

donner une position selon les 3 coordonnées.

### 3.3.2 Résultats et discussion

Les lois puissance obtenue pour les 2 sites sont légèrement différentes reflétant la différence minime entre les 2 sections. Voici la formule de la loi de puissance :

$$Q = \alpha(h - \beta)^\gamma$$

avec  $Q$  = le débit [ $m^3/s$ ],  $h$  = la hauteur d'eau [ $m$ ] et  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ , les paramètres. Dans l'ensemble, les points calculés sont très proches de la hauteur d'eau réelle.

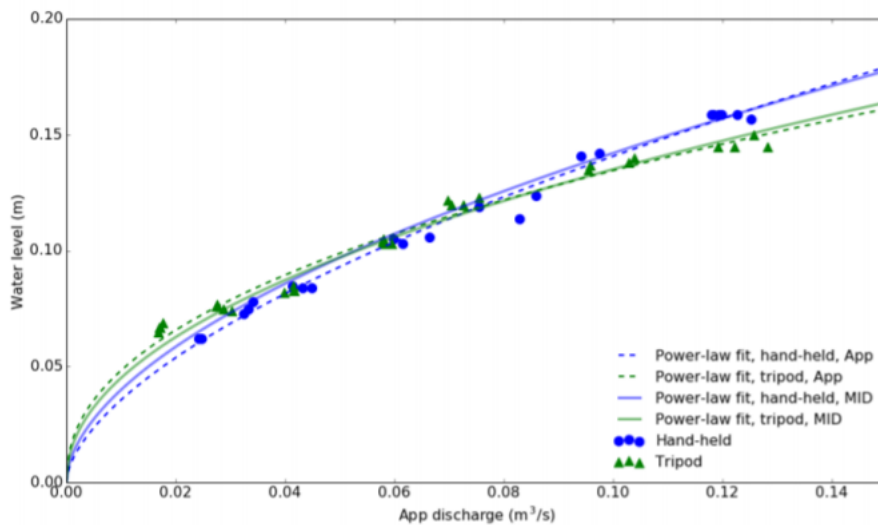


FIGURE 1.6 – Loi puissance obtenue avec *Discharge* ou par calcul standard (MID) [7][CARREL M. & al - 2019]

Dans la figure 1.7 on voit que les erreurs sont relativement faibles entre les débits calculés de manière traditionnelle et ceux donnés par l'application. L'erreur est plus petite que  $\pm 10[L/s]$ .

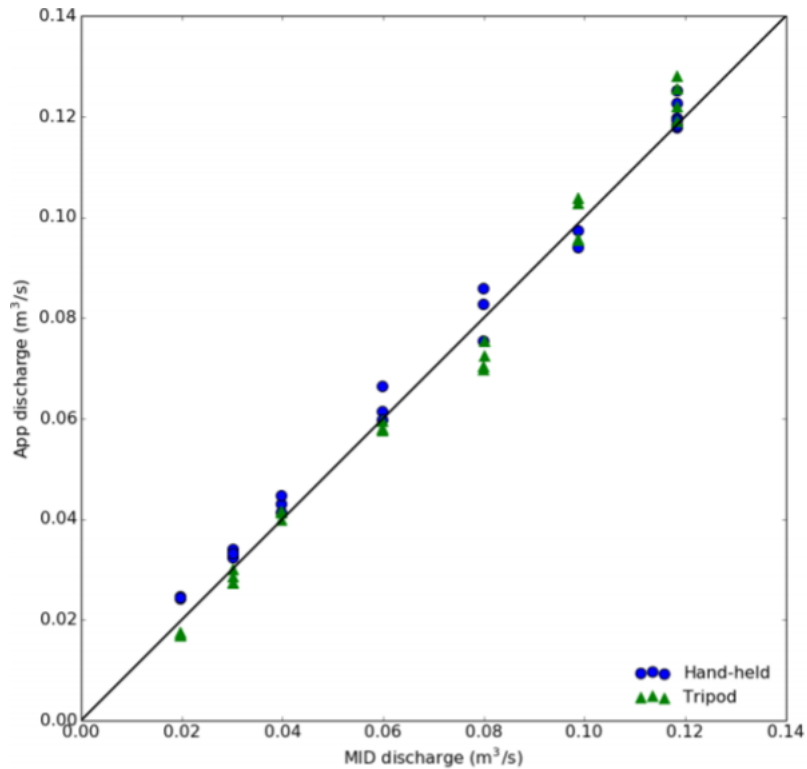


FIGURE 1.7 – Débit déterminé par *Discharge* en fonction du débit mesuré par MID [7][CARREL M. & al - 2019]

La figure 1.8 montre que 100% des mesures avec le trépied et 87% de celles avec le téléphone tenu à la main sont en dessous de  $\pm 15\%$  d'erreur. 82 (70)% des cas pour le trépied (pour le smartphone tenu à la main) sont en dessous de  $\pm 10\%$  d'erreur et enfin 54 (48)% des cas sont en dessous de 5% d'erreur. Les mesures prises à la main sont toujours moins précises, ce qui indique que même un faible mouvement de l'utilisateur peut perturber l'analyse.

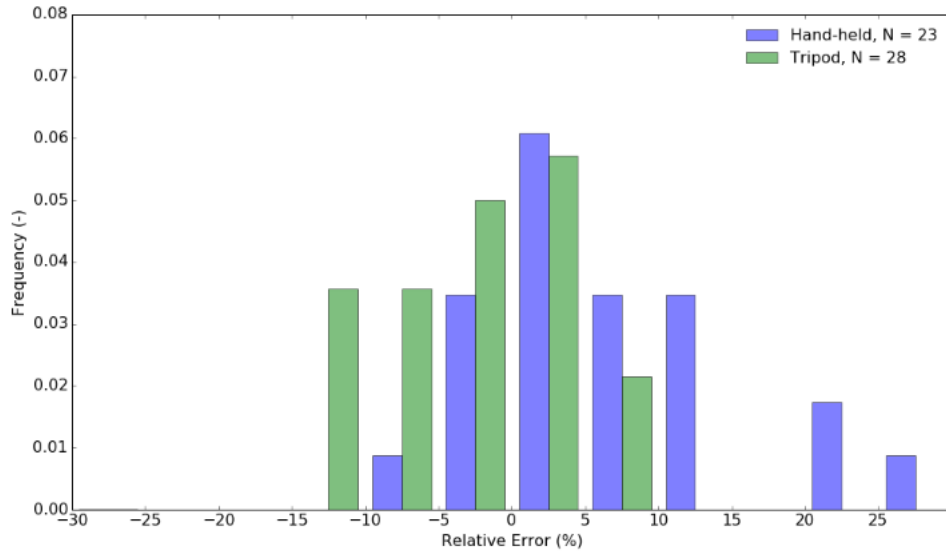


FIGURE 1.8 – Distribution de l’erreur relative des erreurs observées dans la figure [7][CARREL M. & al - 2019] 1.7

En résumé, 100% des mesures au trépied et 87% à la main ont une erreur en-dessous de  $\pm 15\%$ . Excepté pour les flux à 20 L/s, l’erreur est encore plus petite et descend à 10%.

### 3.3.3 Conclusion

Les résultats obtenus dans le canal trapézoïdal pour les débits variant de 20 à 120 L/s sont valides. *DischargeApp* donne une précision de  $\pm 10[L/s]$  pour toutes les vidéos prises. L’utilisation du pied d’appareil photo montre un accroissement de la précision. En exemple, 87% des résultats avec le smartphone tenu à la main montre une précision de  $\pm 15\%$  tandis que ceux du trépied donne une précision de 100%.

Pour conclure, *DischargeApp* peut fournir une manière attractive, peu chère et très rapide pour collecter des données hydrauliques. Dans les prochaines études, ils étudieront *DischargeApp* sur le terrain avec des lit de rivière non-constants, avec des débits plus grands 1 à 10  $[m^3/s]$  par exemple dans les égouts.

## 4 Réalisations antérieures à l’UCL

### 4.1 Dispositifs expérimentaux

Cette section explique l’ensemble des expériences réalisées à l’Université Catholique de Louvain-La-Neuve. Elle s’inscrit grandement dans la continuité des travaux réalisés en 2018 par [11][DE SCHOUTHEETE et HUBERT, 2018], en 2017 par [10][COUTINHO et JANSSENS, 2017] et en 2004 par [4][BOUSMAR et FRASELLE, 2004].

#### 4.1.1 Le canal

Le canal utilisé est celui réalisé par [10][COUTINHO et JANSSENS, 2017]. Celui-ci contient une rivière en son sein construite en béton. La distinction entre le mot « canal » et le mot « rivière » est importante. Le mot « canal » désigne la structure existante en acier. Les appellations « rivières » et « modèle réduit » sont synonymes et sont la reconstitution de la rivière en béton. La construction est traitée par [10][COUTINHO et JANSSENS, 2017] dans leur travail de fin d'étude « Mesure de surface libre d'écoulement en bathymétrie complexe par photogrammétrie ».

La pente du canal est ajustable. Différentes méthodes ont été élaborées afin de mesurer la pente et elles sont détaillées par [11][DE SCHOUTHEETE et HUBERT, 2018] dans leur travail de fin d'études « Mesure du niveau d'eau par photogrammétrie en laboratoire ». Le tracé du thalweg<sup>4</sup> le long de la rivière a été déterminé via trois techniques : la station totale, le laser Keyence et le modèle Agisoft-Photoscan. Quatre jeux de données ont été obtenus par [11] [DE SCHOUTHEETE et HUBERT, 2018], permettant ainsi d'avoir une certaine fiabilité sur la valeur de la pente. Une pente moyenne de 0.21% est déterminée.



FIGURE 1.9 – Photo prise depuis l'aval du canal

Ensuite, le canal dispose d'une vanne clapet qui peut modifier les conditions d'écoulement. [35][SERRE, 1953] a étudié les conséquences sur l'écoulement qu'avait la vanne. Si la vanne est relevée, l'eau monte et [11][DE SCHOUTHEETE et HUBERT, 2018] ont observé un écoulement avec une surface sans remous. Si la vanne clapet est complètement abaissée, un écoulement turbulent apparaît sur les dernières sections.

---

4. Pour rappel, le thalweg correspond à la ligne formée par les points ayant la plus basse altitude (de la rivière dans ce cas-ci)

**4.1.1.1 Structures mobiles** Deux structures mobiles sont mises à notre disposition : l'une a été utilisée pour prendre des photos par [11] [DE SCHOUTHEETE et HUBERT, 2018] qu'on nommera cage et l'autre supportant les instruments de mesure appelé automate de mesure.

La cage comprenant les éléments de mesures est montée sur des rails. Dans l'étude de [11] [DE SCHOUTHEETE et HUBERT, 2018], cette cage permet de photographier le modèle. Dans un premier temps, des draps noirs ont été fixés tout autour ainsi qu'une lumière de forte intensité pour éviter la surexposition et une luminosité trop diffuse.[25][MICHELETTI, CHANDLER et LANE, 2015] ont développé cette théorie. Cependant, dans la suite du travail de [DE SCHOUTHEETE et HUBERT, 2018], le spot et les draps noirs seront mis de côté. Dans le cadre de notre mémoire, nous n'utiliserons plus cette cage, compliquée et lourde à manipuler.

L'automate de mesure est la seconde cage (voir figure 1.10 qui est de petite taille sur lequel peuvent être fixés des instruments de mesure. Elle se déplace de manière automatisée dans 2 directions : transversalement et verticalement. On devra par contre la manipuler manuellement pour suivre le cours d'eau longitudinalement. Le trusquin et le laser Keyence y sont fixés dans le cadre du travail de [11] [DE SCHOUTHEETE et HUBERT, 2018]. Dans le cadre de notre étude, le trusquin uniquement ainsi que le tube de Pitot y seront fixés. Les rails, sur lesquels le chariot se déplace, ne sont pas rectilignes et nécessitent une correction. Cette méthode est amplement expliquée par [4][BOUSMAR et FRASELLE, 2004] et [10][COUTINHO et JANSSENS, 2017].



FIGURE 1.10 – Automate de mesure sur le canal

**4.1.1.2 La pompe à eau** Notre canal est en fait un circuit fermé et nous avons donc besoin d'une pompe pour maintenir un débit de 0 à 12L/s. Après l'ouverture de la vanne au débit désiré, il faut attendre avant que celui-ci ne se stabilise. Cependant, le débit de la pompe varie dans le temps (quelques dixièmes de litre par seconde). Cette variation a été remarquée par [4][BOUSMAR et FRASELLE, 2004] et [10][COUTINHO et JANSSENS, 2017].

#### 4.1.2 Matériel photographique

Le matériel photographique utilisé dans le cadre de ce mémoire s'est voulu simple et donc facilement accessible. Nous utilisons donc un seul et unique appareil photo de type GoPro® Hero4 pour les mesures de niveau d'eau et de vitesse en laboratoire et en rivière naturelle. L'avantage principal de cet appareil est sa petite taille et maniabilité ainsi que sa résistance à l'eau grâce au boîtier adapté.



FIGURE 1.11 – GoPro® utilisée dans ce mémoire

Les caractéristiques de cet appareil sont reprises dans l'annexe [A](#).

#### 4.1.3 Instruments de mesures en rivière naturelle

Dans le but de mesurer la vitesse de surface d'un écoulement en rivière naturelle et de vérifier l'exactitude des résultats, [2][BIA et SOMERS, 2018] utilisaient un courantomètre de type MFPro (voir figure [1.12a](#)). Cet instrument de mesure sera à nouveau utilisé dans cette étude et ses caractéristiques sont reprises dans l'annexe [A](#).



(a) Courantomètre utilisé dans ce mémoire



(b) dGPS Leica 1200 utilisé dans ce mémoire

FIGURE 1.12 – Instruments de mesure en rivière naturelle

Dans l'étude de la mesure du niveau d'eau et de l'altitude de la surface libre, [20][HELLEBAUT, 2018] utilisait également un dGPS de type Leica1200 (voir figure 1.12b). Cet instrument sera à nouveau utilisé dans cette étude. Ses caractéristiques sont reprises dans l'annexe A.

## 4.2 Logiciels utilisés et démarche

Le logiciel utilisé dans cette étude est le même que dans les études précédentes car il se traite bien à l'analyse des photographies. De plus, nos prédécesseurs ainsi que l'étude de [13][DUDKA, 2015] n'ont pas connu de problèmes majeurs. Nous avons donc utilisé le logiciel Agisoft-Photoscan<sup>®</sup>. Ce logiciel, développé en Russie depuis 2010, n'est pas open-source mais est apparu sur le marché il y a quelques années. Il possède une grande communauté à qui s'adresser afin d'échanger des informations et des aides utiles sur internet pour résoudre les problèmes. Nous avons choisi ce logiciel car l'UCL en possède déjà une licence et car il avait déjà été utilisé par [11] [DE SCHOUTHEETE et HUBERT, 2018] ainsi que [20] [HELLEBAUT, 2018]. Notre travail s'inscrivant notamment dans la continuité de leurs recherches, il était plus facile d'utiliser le même logiciel, qui permettra plus facilement la prise en main ainsi que l'adaptation de leurs méthodes. [Agisoft PhotoScan User Manual, Professional Edition, Version 1.4 2018] et [Agisoft PhotoScan Manuel de l'utilisateur, Professional Edition, Version 1.1 2015] sont les 2 manuels d'utilisation disponibles, l'un en anglais et l'autre en français. La version française est un peu moins récente que la version anglaise.

Dans cette étude, nous n'expliquerons pas comment Agisoft Photoscan<sup>®</sup> fait son cheminement et nous partirons du principe qu'il fonctionne correctement afin de l'utiliser pour nos expériences. Le logiciel nous permet d'obtenir des Modèles Numériques Elevation ou *Digital Elevation Models* en anglais (appelés DEMs) qui analysent la bathymétrie et détectent le niveau de l'eau. Le cheminement pour obtenir ces DEMs est décrit dans le travail de [10][COUTINHO et JANSSENS, 2017].

Un résumé de ces étapes se trouve ci-dessous :

1. La détection des marqueurs et leur géo-référencement.
2. L'alignement des photos permettant de créer des points de liaison (*sparse cloud*).
3. Création d'un nuage dense de points (*dense cloud*).
4. Création d'un maillage (*mesh*) ou modèle 3D.
5. Création d'un DEM. Les étapes 3 et 4 ne sont pas indispensables pour la construction d'un DEM. L'étape 3 est cependant fortement conseillée : sa pertinence est exposée dans l'étude de [10][COUTINHO et JANSSENS, 2017].

Pour la mesure des vitesses, nous utiliserons le logiciel utilisé par [2][BIA et SOMERS, 2018] ainsi que les compléments qu'ils ont développés. Il s'agit du logiciel PIVLab. Le fonctionnement de ce logiciel est décrit dans l'annexe B.

Comme expliqué par [2] [BIA et SOMERS, 2018], ce logiciel a été créé en 2010 par Willian Thielicke. Initialement conçu dans le but d'analyser l'aérodynamique du battement des ailes des oiseaux, ce programme s'est développé ces dernières années. Ces développements ont permis une utilisation pour des objectifs beaucoup plus variés, comme dans l'hydraulique par [2] [BIA et SOMERS, 2018].

### 4.3 Résultats des travaux de fin d'étude 2017-2018

Nous parlerons dans cette section des conclusions de [11][DE SCHOUTHEETE et HUBERT, 2018], de [10][COUTINHO et JANSSENS, 2017], de [2][BIA et SOMERS, 2018] ainsi que de [20][HELLEBAUT, 2018] qui nous serviront de base pour notre travail.

#### 4.3.1 Modèle réduit

Le canal que nous utilisons, a été construit en 1998 et au fil du temps, il a été amélioré afin d'ajouter des objets de mesure. [4][BOUSMAR et FRASELLE, 2004] ont écrit un manuel d'utilisation s'appelant "Canal à lit composé et programme hydrocap. Descriptif, mode d'emploi".

Le canal a été construit en béton et ses dimensions sont 10m de longueur et 1,2 m de largeur. Le béton a été choisi par [10] [COUTINHO et JANSSENS, 2017] pour le faire correspondre à la rugosité naturelle du terrain de la rivière de Cavaillon en Haïti. Avec le modèle réduit dans le canal la longueur n'est plus que de 8,8m et la largeur de 1,2m (berges et rivière). La profondeur de la rivière n'est pas réduite à la même échelle que ses autres dimensions, car on aurait eu une hauteur d'eau beaucoup trop faible.

### 4.3.2 Mesure de la bathymétrie et la pente

[10][COUTINHO et JANSSENS, 2017] ont pu étudier à l'aide de Agisoft-Photoscan® la bathymétrie et la pente du modèle. Ils ont également pris des mesures grâce au laser de Keyence. Ces mesures au laser ont été améliorées par [11][DE SCHOUTHEETE et HUBERT, 2018] afin d'obtenir une matrice de 4005 valeurs des points du repère. Une pente moyenne de 0.21% a été déterminée par [11] [DE SCHOUTHEETE et HUBERT, 2018].

### 4.3.3 Mesure de la surface libre

**4.3.3.1 Eau au repos.** [10] [COUTINHO et JANSSENS, 2017] ont étudié le modèle avec l'eau au repos afin de vérifier que le dispositif fonctionnait correctement. Il fallait notamment trouver une astuce pour que Agisoft® détecte le niveau d'eau. Leur solution a été de premièrement changer l'opacité de l'eau et la seconde de recouvrir celle-ci.

Ils ont expérimenté avec de l'eau claire, du colorant, de la boue, de la frigolite ou encore de la pliolite. L'eau claire ne convenait pas à l'expérience car ils obtenaient des erreurs proches de 70%. La meilleure option est la pliolite où l'erreur ne dépassait pas 1% pour le cas de l'eau.

**4.3.3.2 Eau en écoulement permanent.** L'étude des écoulements permanents a été faite par [11][DE SCHOUTHEETE et HUBERT, 2018] pour des débits de 8, 10 et 12[L/s] en les comparant aux valeurs mesurées par le trusquin.

Ils ont également défini le coefficient de Manning de la rivière ( $0,0275[\frac{s}{m^{1/3}}]$ ). Ensuite ils ont pu déterminer l'influence du débit sur la hauteur d'eau dans le canal.

Le but de leur modèle était de déterminer le niveau d'eau grâce à l'analyse de la différence entre un DEM de la bathymétrie et le DEM obtenu lors de l'expérience. L'étude de la hauteur d'eau en écoulement permanent réalisée, ils ont analysé les écoulements transitoires. Mais la difficulté de réaliser plusieurs fois la même expérience a conduit à des résultats peu concluants par manque de temps.

### 4.3.4 Mesure du niveau d'eau en rivière naturelle

[20][HELLEBAUT, 2018] utilise également la photogrammétrie, mais en rivière naturelle. Il a étudié une méthode afin de déterminer l'altitude de la surface libre en utilisant des photos et le logiciel Photoscan®. L'altitude est déterminée en obtenant les coordonnées GPS des repères via un dGPS. Pour pouvoir étudier le niveau d'eau, il faut également prendre des mesures de la section in situ afin d'obtenir l'altitude de ces points via le dGPS.

### 4.3.5 Mesure des vitesses

[2][BIA et SOMERS, 2018] ont réalisé un mémoire sur la mesure du champ de vitesse superficielle en rivière à partir d'un drone. Ils se sont familiarisés avec la PIV pour ensuite comprendre son application en milieu naturel (la LSPIV). L'amélioration, la

méthode de validation des vecteurs de vitesse a permis de régler les problèmes d'ensemencement non homogène des rivières. SNR weighted a donc été créé. Les photos étant prises par un drone, ils ont dû calculer l'erreur générée par les mouvements de celui-ci.

Une comparaison entre la LSPIV et un courantomètre de type MFPro<sup>®</sup> a été réalisée et les différences observées sont de l'ordre de 15%. Ils n'ont pas trouvé la cause de cette différence mais ils ont donné un facteur de correction de 0,83 qui réduit l'écart à 3%.

Un test sans ensemencement a prouvé que pour certaines rivières comportant des irrégularités (informations traitables) il n'était pas toujours nécessaire d'ensemencer p.

# Chapitre 2

## Amélioration du dispositif expérimental en laboratoire

### 1 Repère

L'origine du référentiel du canal est fixée en amont de la rivière sur la rive droite. Nous avons comme axes :

- l'axe X longitudinal : le sens positif se trouve dans le sens de l'écoulement
- l'axe Y transversal : les valeurs positives sont dirigées vers la rive gauche
- l'axe Z vertical : le sens positif se trouve vers le haut, tout le modèle réduit a donc des coordonnées Z négatives.

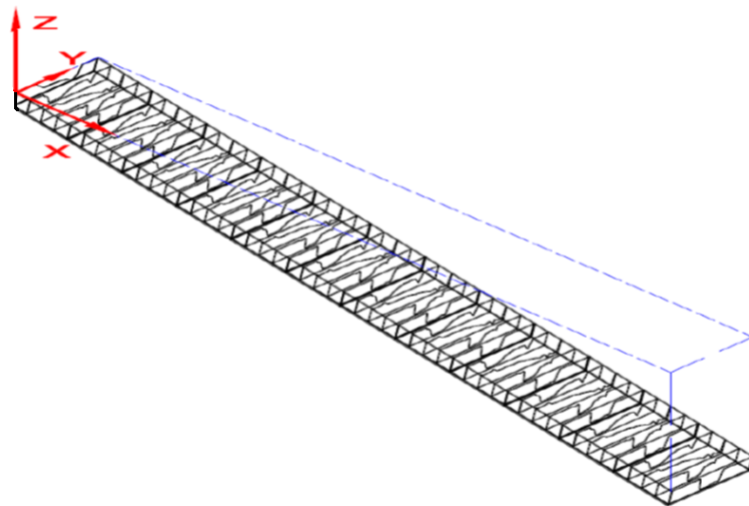


FIGURE 2.1 – Système d'axes

Le canal est constitué de 45 sections de 20cm d'intervalle.

## 2 Bathymétrie

### 2.1 Introduction

La bathymétrie est la mesure des profondeurs de l'eau et du relief qui permettra de définir, dans notre cas, la topographie de la rivière. Son exactitude est primordial car elle a un impact important sur le niveau d'eau. Ce chapitre aborde l'étude de la bathymétrie de la rivière d'essais en laboratoire selon deux méthodes : par imagerie, grâce au programme Agisoft-Photoscan<sup>®</sup> et par le trusquin, de même que leur comparaison.

### 2.2 Mesure de la bathymétrie par imagerie en laboratoire

Comme pour la mesure du niveau d'eau, la méthode utilisée dans cette étude en laboratoire est celle décrite par [11][DE SCHOUTHEETE et HUBERT, 2018] qui permet d'obtenir des résultats satisfaisants. Cette méthode permet d'obtenir un DEM de l'ensemble du canal qui sera utilisé dans le calcul de niveau d'eau.

La procédure à suivre est la suivante :

1. Veiller à ce que le canal soit bien sec afin d'éviter les reflets pouvant apparaître si le canal est encore humide.
2. Placer des repères : "cibles" détectables par le logiciel Agisoft-Photoscan<sup>®</sup> sur les deux berges sur toute la longueur du canal. Ces cibles sont au nombre de 66.
3. Déterminer les coordonnées de chaque cible dans notre repère de référence à l'aide du trusquin.
4. Prise de photos selon différents points de vue afin de couvrir l'ensemble du canal.
5. Traitement et analyse des photos dans le logiciel Agisoft-Photoscan<sup>®</sup> afin d'en extraire le DEM qui pourra être utilisé dans les routines Matlab de [11] [DE SCHOUTHEETE et HUBERT, 2018].

### 2.3 Mesure de la bathymétrie d'une section par le trusquin en laboratoire

La seconde méthode utilisée en laboratoire est la mesure de la bathymétrie d'une section à l'aide du trusquin. Elle consiste à mesurer les coordonnées, dans le repère de référence de plusieurs points de la section transversale étudiée. Lors de la mesure de la bathymétrie au trusquin, un intervalle horizontal de 1 cm a été appliqué afin d'obtenir une section transversale la plus précise possible.

Cette mesure de bathymétrie d'une section est définie comme mesure de référence de la section dans cette étude.

## 3 Mesures du niveau d'eau

La méthode utilisée pour mesurer le niveau d'eau dans cette étude en laboratoire est celle décrite par [11] [DE SCHOUTHEETE et HUBERT, 2018] qui permet d'obtenir

des résultats plus que satisfaisants.

La méthode de mesure du niveau d'eau en écoulement permanent est la suivante :

1. Mise en place d'un écoulement permanent dans le canal.
2. Placement des repères ("cibles") détectables par le logiciel Agisoft-Photoscan<sup>®</sup> sur les deux berges sur toute la longueur du canal. Ces cibles sont au nombre de 66.
3. Prise de mesure du niveau d'eau en différents points par le trusquin.
4. Prise de photos selon différents points de vue sur l'ensemble du canal.
5. Traitement des photos dans le logiciel Agisoft-Photoscan<sup>®</sup>.
6. Extraction du DEM afin de pouvoir le traiter dans la routine Matlab de [11] [DE SCHOUTHEETE et HUBERT, 2018].

Il est important également de posséder un DEM de la bathymétrie. Pour ce faire, il faut appliquer la méthode décrite ci-dessus lorsque le canal est à sec. Sur base de ce DEM de la bathymétrie ainsi que du DEM d'un écoulement permanent à un certain débit et du fichier du trusquin, nous pouvons utiliser la routine développée par [11] [DE SCHOUTHEETE et HUBERT, 2018].

Quelques modifications y ont été apportées, notamment pour calculer l'aire de la section ainsi que pour la partitionner. L'aire pourra être répartie avec les vitesses correspondantes dans le but de déterminer une méthode de calcul de débit, ce qui sera détaillé dans la section 1.

Cette méthode de calcul de niveau d'eau est détaillée plus largement dans [11] [DE SCHOUTHEETE et HUBERT, 2018].

## 4 Mesures de vitesse

### 4.1 Mesures de vitesse avec le tube de Pitot

Sur la rivière du laboratoire, fixé l'automate de mesure, un tube de Pitot est installé dans le but de calculer la vitesse de l'écoulement en différents points.

Des mesures de vitesse ont été effectuées sur différentes sections du canal, sur l'ensemble de ces sections. Sur ces sections, les mesures sont prises sur différentes verticales sur chaque section.

#### 4.1.1 Vérification de la précision du tube de Pitot

Avant d'effectuer des mesures sur toutes les sections, une vérification de la précision des mesures du tube de Pitot a été effectuée. Cela consiste à vérifier le débit calculé par une méthode de mesure de débit en 3 points par rapport au débit indiqué par la pompe du canal.

**4.1.1.1 Méthode de mesure de débit en 3 points** Afin de mesurer le débit par l'exploration du champ de vitesses, nous composons un maillage, dépendant des variations de profondeurs et de vitesses au sein de la section. Il faut éviter qu'une verticale ne représente plus de 10% du débit total.

Sur chaque verticale, les vitesses sont enregistrées respectivement à 20%, 60% et 80% de la profondeur (comme indiqué sur la figure 2.2). Sur base de ces 3 mesures, il est possible de déterminer la vitesse moyenne de la verticale par la formule suivante :

$$V_{moy} = \frac{1}{4}(V_{0.2} + 2.V_{0.6} + V_{0.8})$$

Avec  $V_{moy}$ ,  $V_{0.2}$ ,  $V_{0.6}$  et  $V_{0.8}$  respectivement les vitesses moyennes, à 20%, 60% et 80% de la profondeur exprimées en [m/s].

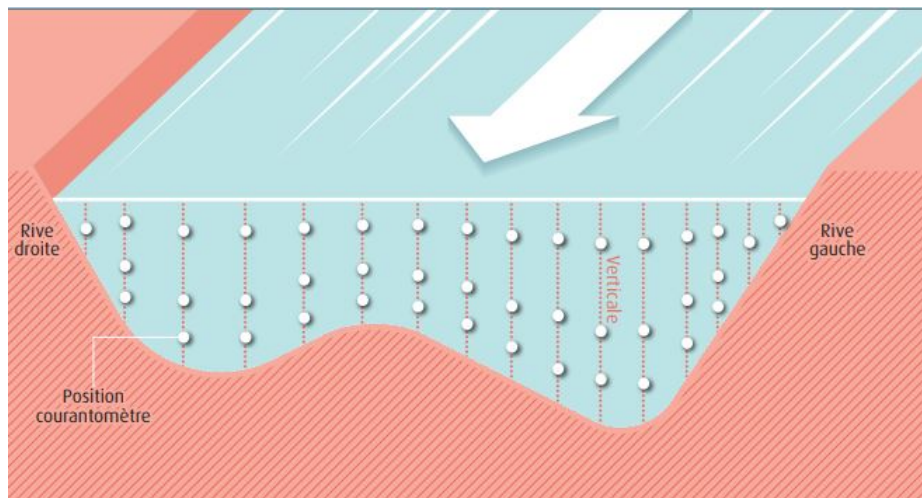


FIGURE 2.2 – Méthode 3 points - [17] Charte de la qualité de l'hydrométrie - Guide de bonnes pratiques

Les mesures effectuées sur chaque verticale sont appliquées sur une largeur à droite et à gauche de cette verticale. Plus l'écartement entre deux verticales est grand, plus cette zone d'application est grande et plus la précision du calcul du débit est moindre. Pour rappel, le débit  $Q$  est calculé de la manière suivante pour  $n$  verticales :

$$Q = \sum_{i=1}^n (V_{moy,i} \cdot A_{moy,i})$$

**4.1.1.2 Calcul du débit par la méthode 3 points sur la section 10 de la rivière d'essai en laboratoire**

	Débit méthode 3 points [l/s]	Débit réel à la pompe [l/s]	Erreur [%]
8 [l/s]	7.863	8.256	4.77
10 [l/s]	9.440	10.027	5.85
12 [l/s]	10.803	11.555	6.50

TABLE 2.1 – Vérification de la précision du tube de Pitot en laboratoire

L'erreur est calculée comme  $Erreur = |1 - \frac{Q_{3points}}{Q_{Pompe}}|$

Les résultats obtenus sont fiables, par la suite, grâce au tube de Pitot.

## 4.2 Mesures de vitesses par *PIV*

### 4.2.1 Dispositif de prises d'images

La prise de vidéo de la rivière (en laboratoire) est réalisée grâce à une GoPro® posée sur un pied de caméra. La cage noire n'a pas été utilisée car [11][DE SCHOUTHEETE et HUBERT, 2018] l'avait jugée inutile. Nous avons donc préféré positionner un spot produisant une lumière rasante afin d'éliminer tous les reflets. La suite consiste en la prise d'images avec ou sans ensemencement.



FIGURE 2.3 – Dispositif utilisé en laboratoire pour la PIV

### 4.2.2 Ensemencements

Différents types d'ensemencement ont été appliqués au canal, afin de déterminer la méthode produisant les résultats les plus optimaux. Ces ensemencements sont constitués de pliolite répandue dans le canal.

**4.2.2.1 Sans ensemencement** Premièrement, des vidéos afin de mesurer la vitesse de surface de l'écoulement ont été réalisées sans ensemencement. La plus grande difficulté pour obtenir des résultats probants, dans ce cas-ci, est la gestion de la luminosité du canal et la transparence de l'eau. En effet, comme nous pouvons observer sur la figure 2.4, qui est une photo prise lors de l'interpolation des vecteurs vitesses par PIVLab, la détection des vecteurs vitesses est aléatoire.

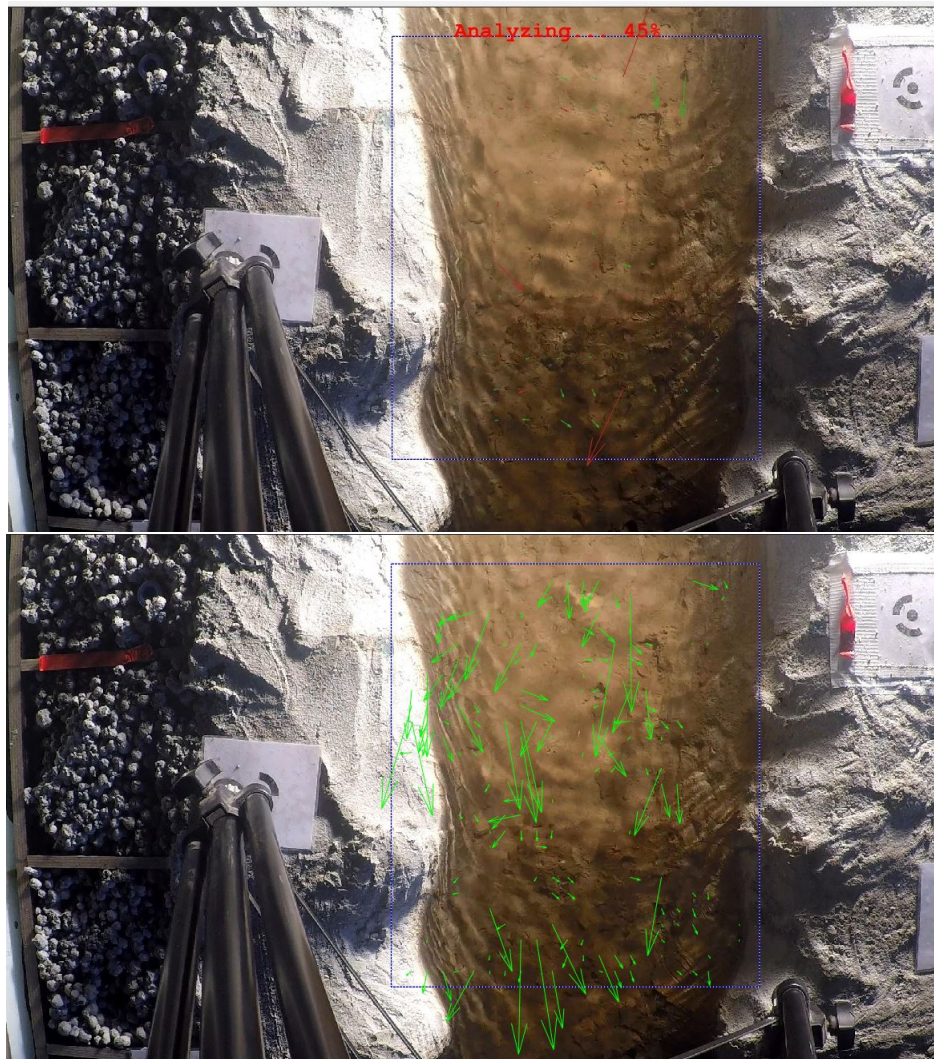


FIGURE 2.4 – Analyse PIV sans ensemencement

Sur la figure 2.4, nous pouvons observer la difficulté que le logiciel rencontre pour déterminer la vitesse de surface. Nous pouvons également observer sur la figure 2.5 la répartition des vecteurs vitesses moyens à la surface après le traitement des images. Il s'agit d'une photo de l'écoulement où sont représentés les vitesses moyennes de surface sur toute la durée de la prise d'images. La méthode de traitement d'images est décrite dans l'annexe B.

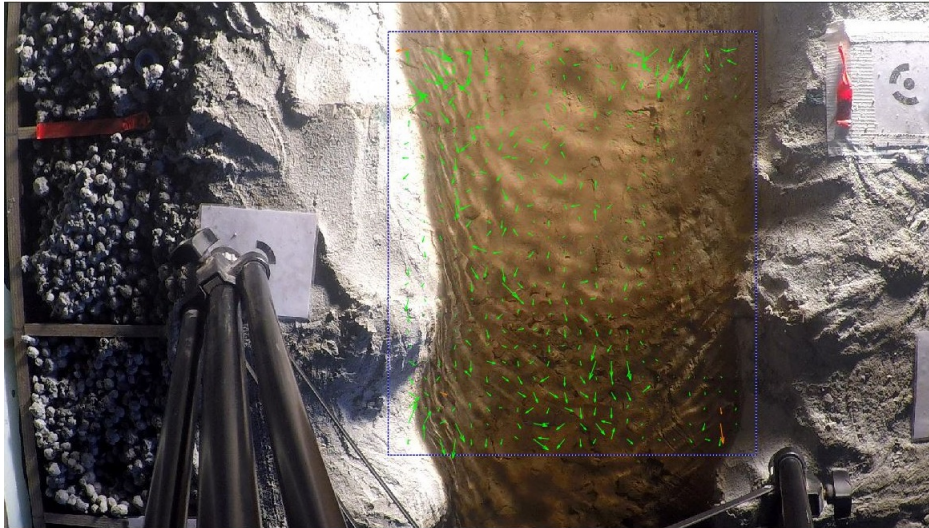


FIGURE 2.5 – Analyse PIV sans ensemencement - Vitesses de surface moyennes

Nous pouvons observer sur la figure 2.5 la faiblesse des vecteurs vitesses de surface. Sur la figure 2.6 ci-dessous, nous comparons la vitesse de surface réelle (vitesse mesurée à 0.5 [cm] de profondeur) mesurée par le tube de Pitot. Nous pouvons observer que sans ensemencement, les résultats PIV ne sont pas corrects, ni réellement exploitables pour les mesures de vitesse par imagerie en laboratoire.

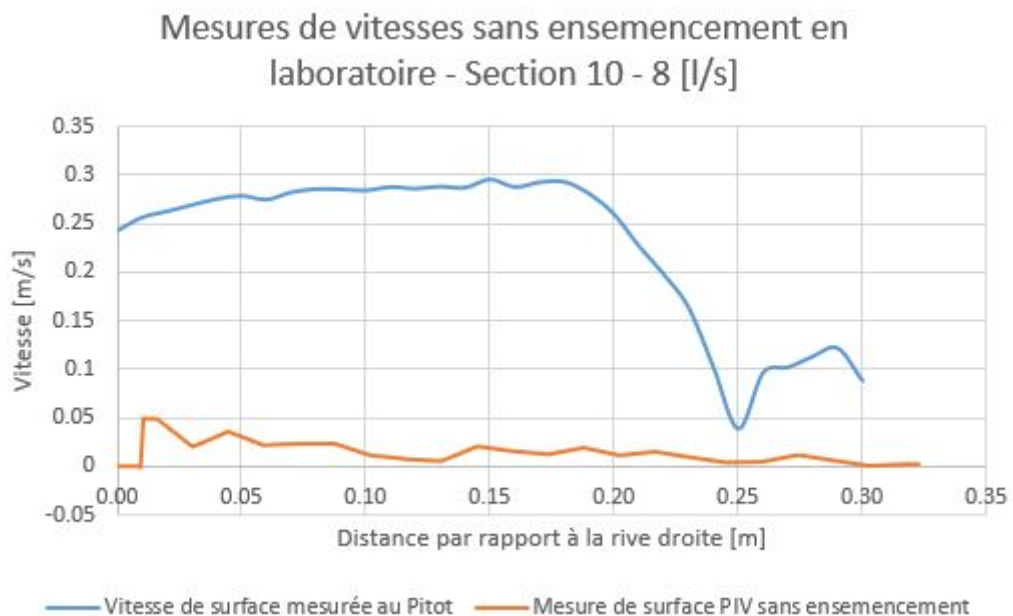


FIGURE 2.6 – Analyse PIV sans ensemencement - Comparaison vitesse de surface mesurée par PIV et par le tube de Pitot

**4.2.2.2 Ensemencement à saturation.** Ensuite, des vidéos avec un fort ensemencement ont été également réalisées, dans le but de lutter contre le problème de détection de la vitesse de surface par le logiciel PIVLab.

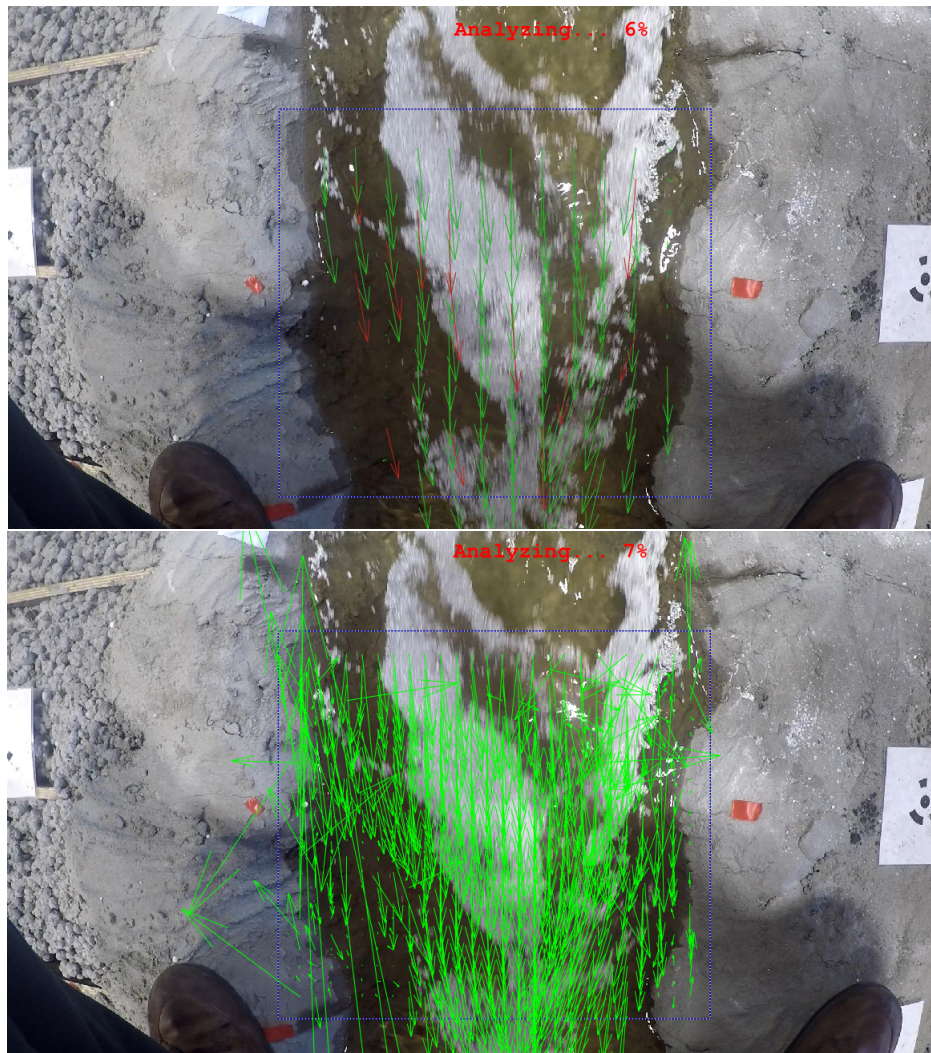


FIGURE 2.7 – Analyse PIV avec ensemencement à saturation

Comme nous pouvons le remarquer sur la figure 2.7, avec l'ensemencement à saturation, PIVLab peuvent déterminer des vitesses de surface. Sur la figure 2.8, nous pouvons observer que la vitesse de surface PIV et la vitesse de surface mesurée au tube de Pitot sont relativement proches. En effet, les écarts entre les vitesses sont de l'ordre de 20%.

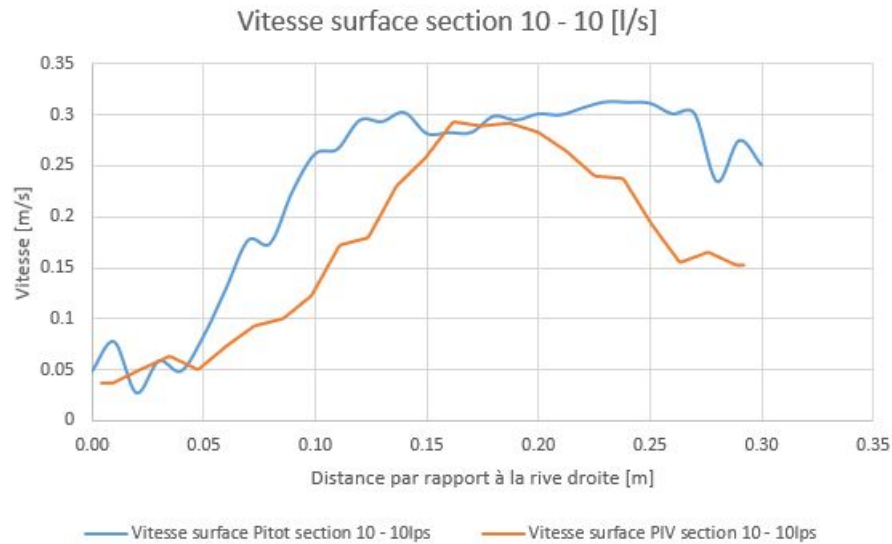


FIGURE 2.8 – Analyse PIV avec ensemencement à saturation - Comparaison vitesses de surface mesurées par PIV et par le tube de Pitot

Nous pouvons donc conclure que ce type d'ensemencement est exploitable pour calculer la vitesse et par la suite le débit. Cependant, cet ensemencement étant peu probable en rivière naturelle, cela limite l'exploitation de ces résultats et parfois même ne détecte pas bien les particules entre 2 *frames*<sup>1</sup> car l'ensemencement est réalisé à saturation. On observe donc une vitesse de surface plus faible.

**4.2.2.3 Ensemencement faible.** Et enfin, des vidéos avec un ensemencement plus faible et plus éparpillé ont été réalisées afin de simuler des conditions plus naturelles. En effet, cet ensemencement plus épars permet d'être fidèle à des copeaux, branches, etc. pouvant flotter en surface dans les rivières naturelles.

1. Pour le logiciel *PIVLab*, une *frame* est une paire de 2 images consécutives.

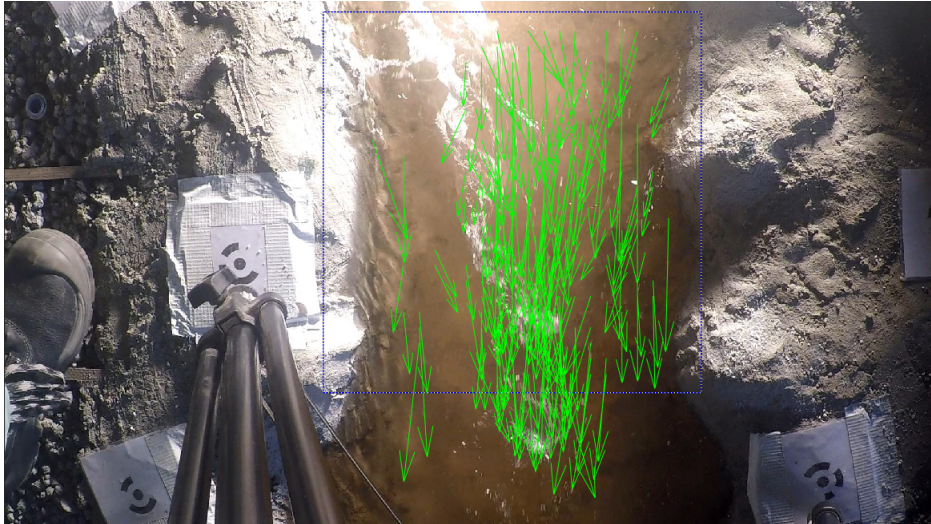


FIGURE 2.9 – Analyse PIV avec ensemencement faible

Cet ensemencement plus faible permet à PIVlab<sup>2</sup> de reconnaître plus facilement les différents copeaux et donc nous fournit une précision plus affinée.

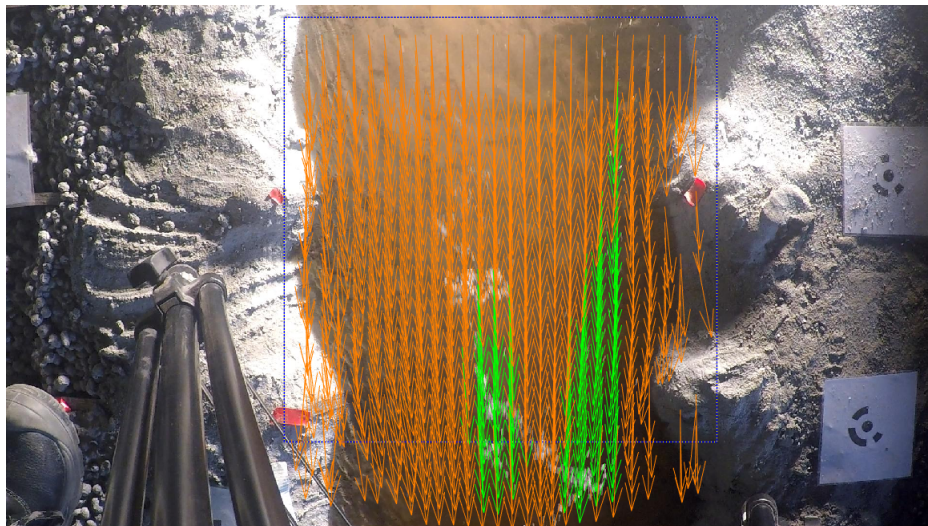


FIGURE 2.10 – Analyse PIV avec ensemencement faible - Vitesses de surface moyenne

En combinant l'ensemble des vitesses déterminées par PIVLab, nous pouvons observer que les vitesses de surface moyennes sont assez proches de la réalité. Nous pouvons observer sur la figure 2.11 que ce modèle permet d'obtenir une vitesse de surface par la méthode PIV assez proche de la vitesse de surface mesurée au tube de Pitot, avec une erreur moyenne de l'ordre de 15%. L'erreur est calculée comme  $Erreur = \left| 1 - \frac{V_{SurfacePIV}}{V_{SurfacePitot}} \right|$ .

2. Les vecteurs verts sont les vecteurs de vitesse calculés sur le dernier *frame* ; les vecteurs oranges représentent des interpolations sur base des autres *frames* de la vidéo

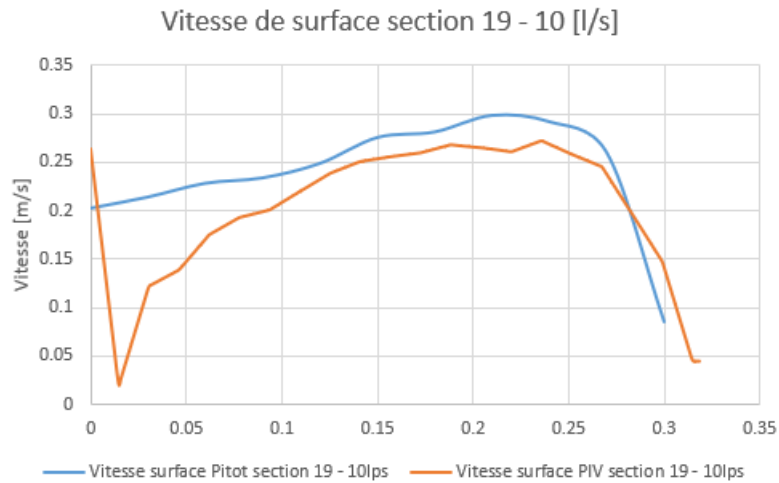


FIGURE 2.11 – Analyse PIV avec ensemencement faible - Comparaison de vitesses de surface mesurée par PIV et par le tube de Pitot

#### 4.2.3 Traitement des vidéos par PIVLab

Le procédé de traitement des vidéos par PIVLab est le même que celui décrit par [2] [BIA et SOMERS, 2018]. De cette manière, il est possible de traiter les résultats par les filtres développés dans leur mémoire. Un mode d'emploi est repris dans l'annexe B.

Ensuite, une fois que les vitesses de surface sont calculées, avec le calcul de l'aire de la section réalisé précédemment, il est possible de déterminer le débit. Ce calcul est possible à l'aide d'un coefficient de conversion qui sera décrit dans la section 3.2.

# Chapitre 3

## Analyse des résultats en laboratoire

Dans ce chapitre, nous analyserons les résultats des mesures obtenues en laboratoire, sur le canal d'essais. Nous commenterons les mesures de niveau d'eau selon la méthode, expliquée à la section 3, les méthodes permettant de convertir les vitesses de surface, expliquées à la section 4.2, en vitesses moyennes. Sur base de ces résultats, il sera donc possible de calculer et d'évaluer le débit.

### 1 Calcul de niveau d'eau

Comme indiqué dans la section 3, la méthode utilisée ici est la même que [11] [DE SCHOUTHEETE et HUBERT, 2018]. Nous n'avons donc pas réalisé une nouvelle étude de l'erreur, etc., vu que nous avons posé l'hypothèse que la méthode donnait des résultats pertinents si elle était appliquée dans les mêmes conditions. La routine Matlab développée par [11] [DE SCHOUTHEETE et HUBERT, 2018] a été utilisée telle quelle, seule une légère modification y a été apportée pour calculer l'aire de la section. Une vérification sera donc apportée entre le calcul de l'aire de la section par photogrammétrie<sup>1</sup> et le calcul de l'aire de la section au trusquin<sup>2</sup>.

L'étude en laboratoire s'est concentrée sur 3 sections du canal : section 10, 19 et 26. Nous allons donc comparer, pour chaque débit, l'aire de chaque section mesurée par imagerie et via l'interpolation des mesures de hauteur du trusquin.

- 
1. L'aire est calculé en comparant le DEM de la bathymétrie et celui des écoulements.
  2. La bathymétrie et le niveau d'eau sont calculés grâce au trusquin exclusivement.

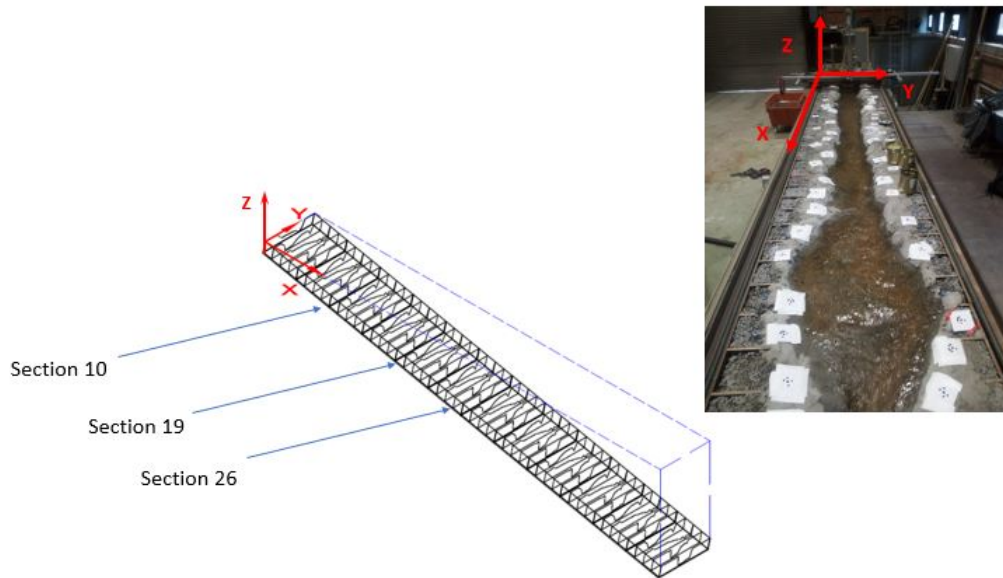


FIGURE 3.1 – Positions des sections étudiées en laboratoire

L'ensemble des résultats sont présentés dans le tableau 3.1. L'erreur est calculée selon la formule :

$$Erreur = \left(1 - \frac{Aire_{photogrammétrie}}{Aire_{trusquin}}\right) \cdot 100$$

		Section 10	Section 19	Section 26
8 [L/s]	Aire photogrammétrie [ $m^2$ ]	0.0290	0.0335	0.0285
	Aire trusquin [ $m^2$ ]	0.0280	0.0330	0.0280
	Erreur [%]	3.6	1.5	1.8
10 [L/s]	Aire photogrammétrie [ $m^2$ ]	0.0320	0.0337	0.0327
	Aire trusquin [ $m^2$ ]	0.0300	0.0340	0.0307
	Erreur [%]	6.7	0.9	6.5
12 [L/s]	Aire photogrammétrie [ $m^2$ ]	0.0340	0.0362	0.0352
	Aire trusquin [ $m^2$ ]	0.0370	0.0360	0.0330
	Erreur [%]	8.1	0.6	6.7

TABLE 3.1 – Mesures d'aires des sections par photogrammétrie en laboratoire

## 2 Coefficients de vitesse & coefficients de débit

Dans le but de déterminer le débit dans le canal par des techniques d'imagerie, la conversion de la vitesse de surface mesurée par PIV en vitesse moyenne était un défi important.

### 2.1 Coefficients de vitesse

Tout d'abord, l'étude s'est intéressée à définir des coefficients de vitesse pour les sections en laboratoire.

Le premier coefficient utilisé est le coefficient  $\alpha$  défini dans la partie état de l'art. Pour rappel, la définition de ce coefficient dans un écoulement est :

$$\alpha = \frac{Vitesse_{moyenne}}{Vitesse_{surface}}$$

Dans le cadre de l'étude en laboratoire, les valeurs de ce coefficient  $\alpha$  sont définies par les mesures au tube de Pitot sur la section étudiée. Ensuite, vu la forme parfois complexe des sections, plusieurs verticales seront évaluées (sur les sections en laboratoire tous les 1 à 3 [cm]). De plus, ces différentes verticales n'ayant pas la même profondeur, il est nécessaire de calculer une moyenne pondérée de ce coefficient pour le généraliser à la section.

De cette manière, on définit :

$$\alpha = \alpha_{pondéré} = \frac{\sum_{i=1}^{i=N} \alpha_i \cdot A_i}{\sum_{i=1}^{i=N} A_i}$$

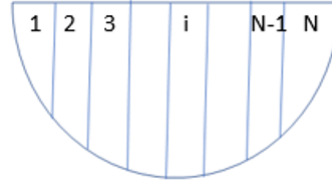


FIGURE 3.2 – Exemple de section type divisée en zones de N verticales

Pour chaque section étudiée (ici : sections 10, 19 et 26), des mesures à 3 débits différents sont réalisés (8 [L/s], 10 [L/s] et 12 [L/s]). Nous avons donc déterminé un coefficient  $\alpha$  moyen pour chaque section. Nous obtenons donc les résultats suivants :

	$\alpha$
Section 10	1.11
Section 19	1.13
Section 26	1.20

TABLE 3.2 – Coefficient  $\alpha$  pour les sections étudiées en laboratoire

Le second coefficient utilisé est la coefficient  $\beta$  défini par [2] [BIA et SOMERS, 2018] comme un coefficient de correction des mesures PIV. Dans le cadre de notre étude, ce coefficient a été défini comme :

$$\beta = \frac{Vitesse_{SurfacePIV}}{Vitesse_{SurfacePitot}}$$

De la même manière que dans le cas du coefficient  $\alpha$ , un coefficient global pondéré a été défini tel que :

$$\beta = \beta_{pondéré} = \frac{\sum_{i=1}^{i=N} \beta_i \cdot A_i}{\sum_{i=1}^{i=N} A_i}$$

Et de la même manière que précédemment, pour chaque section étudiée, nous obtenons les résultats suivants :

	$\beta$
Section 10	0.695
Section 19	0.997
Section 26	0.95

TABLE 3.3 – Coefficient  $\beta$  pour les sections étudiées en laboratoire

Ce dernier coefficient permet de montrer la qualité des mesures PIV sur les différentes sections.

Cependant, nous pouvons voir que pour le coefficient  $\alpha$ , les valeurs obtenues ne correspondent pas du tout aux valeurs définies par la littérature ( $\alpha = 0.8 - 0.9$ ).

Des premiers calculs de débit ont donc été réalisés sur base de ces coefficients en laboratoire. Nous avons pu calculé l'erreur qu'ils produisent :

$$Erreur = \left| \left( 1 - \frac{Débit_{imagerie}}{Débit_{pompe}} \right) \cdot 100 \right|$$

	Moyenne des erreurs [%]	Écart-type [%]
Section 10	17.10	2.67
Section 19	10.55	2.69
Section 26	24.39	32.06

TABLE 3.4 – Calculs des erreurs du calcul du débit avec les coefficients de vitesse

Vous trouverez la liste des résultats complets pour chaque section étudiée dans l'annexe F. L'ensemble de ces résultats est également explicité sur la figure 3.3 ci dessous.

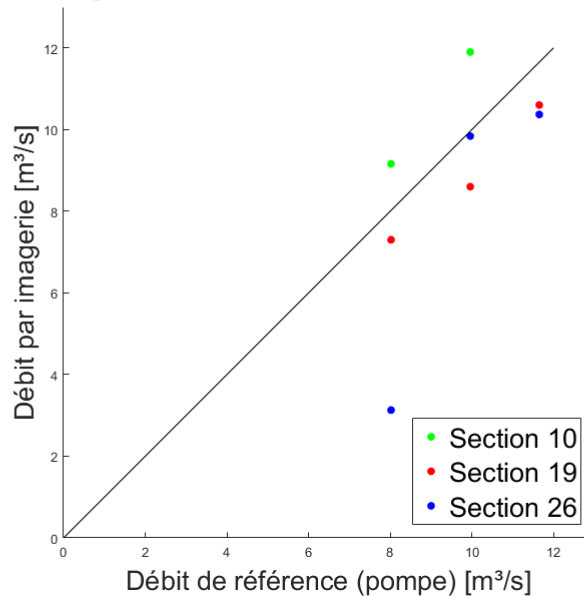
**Comparaison débits par imagerie avec coefficients de vitesse & débits mesurés à la pompe**

FIGURE 3.3 – Calculs de débit avec coefficients de vitesse en laboratoire

Cette méthode de calcul montre que les résultats finaux manquent de précision pour des mesures obtenues en laboratoire. Effectivement, par cette méthode, 67% des mesures présentent une erreur inférieure à  $\pm 15\%$  et seulement 11% des mesures présentent une erreur inférieure à  $\pm 5\%$ .

Cela est principalement dû à la combinaison des incertitudes des différentes méthodes. En effet, en plus de la perte de précision due au calcul de vitesse et aux coefficients de vitesse, s'ajoute une perte de précision à cause du calcul de l'aire de la section. Tous ces éléments combinés les uns aux autres conduisent à un manque de précision assez prononcé dans les résultats.

## 2.2 Coefficients de débit

Pour résoudre le problème relevé à la section 2.1, nous allons travailler avec un coefficient de débit qui permet de diminuer au maximum les imprécisions dues aux différentes méthodes qui sont combinées ici.

Le coefficient de débit met en rapport 2 débits : le débit de référence (ici, débit mesuré à la pompe) et le débit des vitesses de surface *PIV*.

Le débit *PIV* est défini, pour une section similaire à celle présentée à la figure 3.2 comme :

$$\text{Débit}_{\text{surfacePIV}} = \sum_{i=1}^{i=N} \text{Vitesse}_{\text{surfacePIV}_i} \cdot A_i$$

Le coefficient de débit est quant à lui défini comme :

$$Coefficient = \frac{Débit_{référence}}{Débit_{surfacePIV}}$$

Par exemple ici, pour la section 10 :

	$\frac{Débit_{référence}}{Débit_{surfacePIV}}$
Section 10 - 8L/s	1.259
Section 10 - 10L/s	1.204
Section 10 - 12L/s	1.263

TABLE 3.5 – Coefficient de débit pour la section 10 aux différents débits

Pour les différentes sections étudiées, nous prenons la moyenne obtenue des coefficients de débit pour les 8, 10 et 12 L/s.

	$\frac{Débit_{référence}}{Débit_{surfacePIV}}$
Section 10	1.242
Section 19	1.204
Section 26	1.42

TABLE 3.6 – Coefficient de débit pour les sections étudiées en laboratoire

### 3 Calcul de débit

Par la suite, deux situations ont été étudiées avec des coefficients de vitesses différents : d'une part, un coefficient moyen par section et d'autre part, un coefficient de débit imposé pour l'ensemble du canal. Des calculs de débit par ces 2 méthodes ont été réalisés.

Tout d'abord, les résultats avec des coefficients moyens par section ont été étudiés.

	Coefficient de débit	Moyenne des erreurs [%]	Écart-type [%]
Section 10	1.242	2.01	0.98
Section 19	1.204	3.69	2.58
Section 26	1.42	7.65	5.58

TABLE 3.7 – Calculs de débits avec les coefficients de débit moyen par section

Nous pouvons observer ici, que la précision est plus grande dans ce cas-ci contrairement au calcul de débit avec coefficients de vitesses réalisé précédemment. Effectivement, par cette méthode, 100% des mesures présentent une erreur inférieure à  $\pm 15\%$  et 67% des mesures présentent une erreur inférieure à  $\pm 5\%$ . L'ensemble des résultats est détaillé dans l'annexe F et est présenté également sur la figure 3.4 ci-dessous.

Comparaison débits par imagerie avec coefficient de débit moyen &amp; débits mesurés à la pompe

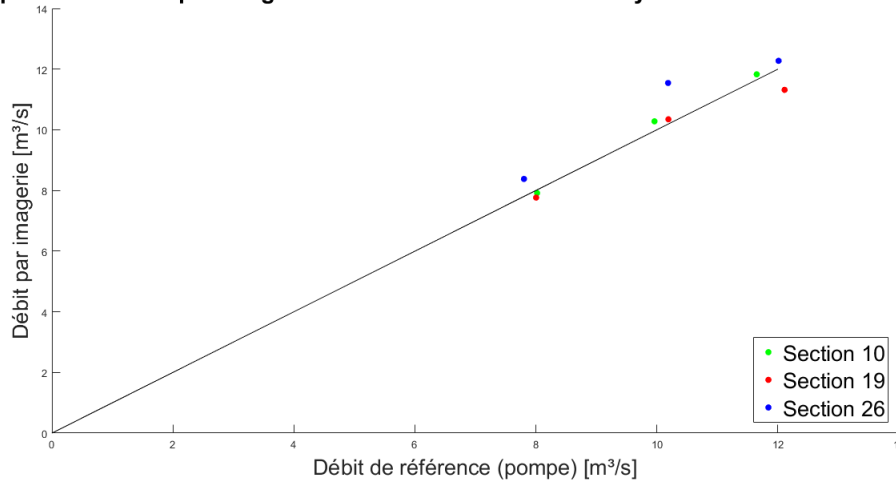


FIGURE 3.4 – Calculs de débit avec coefficient de débit moyen par section en laboratoire

Ensuite, dans le but d'uniformiser la méthode de mesure en laboratoire, des calculs de résultats avec un coefficient imposé à l'ensemble des sections ont été réalisés. La moyenne des coefficients des 3 sections étudiées donne un coefficient moyen de 1.289. Cependant, au vu de la forte disparité entre le coefficient de la section 26 et les coefficients des deux autres sections, le coefficient imposé a été fixé à 1.25.

Les résultats obtenus sont présentés ci-dessous.

	Coefficient de débit	Moyenne des erreurs [%]	Écart-type [%]
Section 10	1.25	2.24	1.54
Section 19	1.25	3.03	2.35
Section 26	1.25	2.44	2.70

TABLE 3.8 – Calculs de débit avec un coefficient de débit imposé à 1.25

Nous pouvons observer dans le tableau une moyenne des erreurs de l'ordre de 2 à 3 [%] et un écart-type réduit pour la section 26. De plus, 100% des résultats présentent une erreur inférieure à  $\pm 15\%$  et 78% des résultats ont une erreur inférieure à  $\pm 5\%$ . Les résultats complets sont également repris sur la figure 3.5 ci-dessous et sont détaillés dans l'annexe F.

Comparaison débits par imagerie avec coefficient de débit = 1.25 & débits mesurés à la pompe

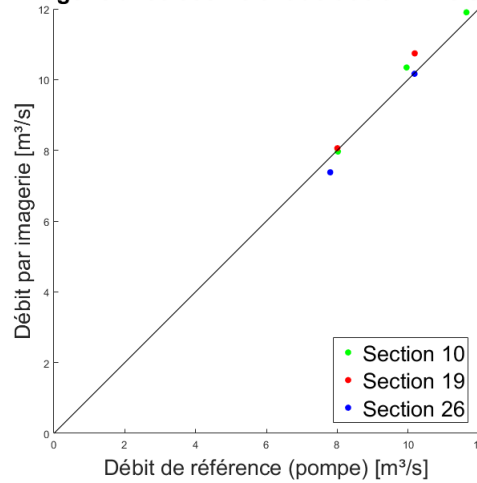


FIGURE 3.5 – Calculs de débit avec coefficient de débit imposé à 1.25 en laboratoire

## 4 Conclusion

Pour conclure cette partie d'expérimentations en laboratoire, nous pouvons affirmer que la méthode développée ici, ainsi que les coefficients utilisés, permettent d'obtenir une assez bonne précision. Cependant, les valeurs des coefficients de vitesse calculées, qui sont très différentes des valeurs présentées dans la littérature, nous permettent de conclure que cette étude de vitesse et de débit nous a conduit à atteindre les limites du modèle expérimental.

Pour la suite de cette étude, la méthode du calcul des coefficients de débit, développée en laboratoire, sera expérimentée en rivière naturelle.

# Chapitre 4

## Amélioration du dispositif expérimental en rivière naturelle

### 1 Bathymétrie

La mesure de la bathymétrie est effectuée principalement selon deux procédés différents : grâce au courantomètre de type MFPro et grâce au dGPS (Leica 1200).

#### 1.1 Mesure de la bathymétrie au courantomètre

La méthode du courantomètre dans le calcul de la bathymétrie consiste simplement à utiliser les données de profondeur mesurée par celui-ci afin de déterminer le profil de la bathymétrie de la section étudiée. La surface de l'eau étant considérée comme horizontale le long de la section, la forme de la section est déterminée assez facilement. Cette méthode nous permet d'obtenir assez facilement l'aire de la section, dans le but de vérifier nos calculs de niveau d'eau et d'exactitude de l'aire de la section étudiée.

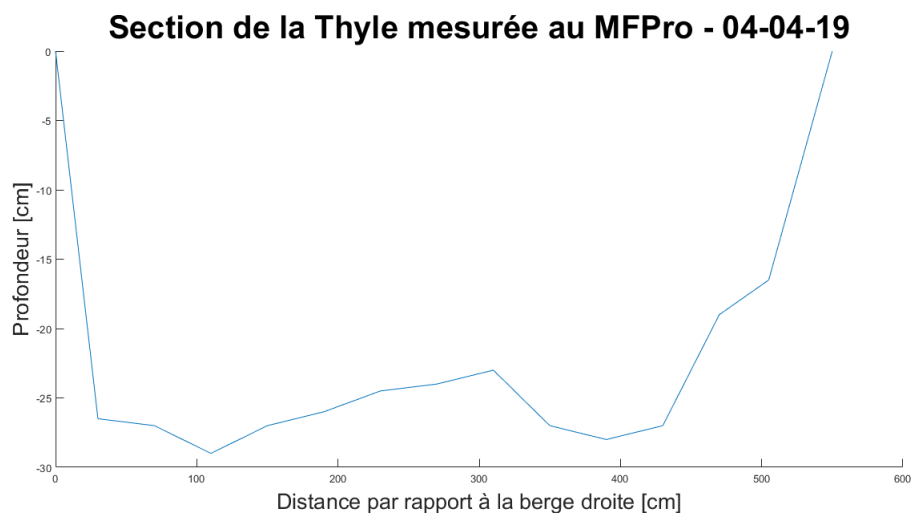


FIGURE 4.1 – Bathymétrie de la section étudiée sur la Thyle le 04 avril 2019

Cette méthode nous permet de calculer une bathymétrie précise au moment de la prise de mesure. Cependant, le principal désavantage de cette méthode est qu'une seule

mesure peut nous permettre de calculer la bathymétrie pour ce niveau d'eau ou des niveaux inférieurs. De plus, cela ne permet pas, à terme, de mettre en lien cette mesure avec les repères GCPs utilisés lors de la mesure du niveau d'eau (cf. section 2) vu que celle-ci ne peut se faire que pour une partie immergée. Cela rend cette méthode peu pratique si l'on veut généraliser la méthode de calcul de débit développée dans ce travail.

## 1.2 Mesure de la bathymétrie au dGPS

La méthode utilisant le dGPS dans le calcul de la bathymétrie consiste à mesurer, à l'aide du dGPS, les coordonnées de plusieurs points de la section étudiée. L'avantage principal de cette méthode est que, mise à part la possible érosion et les transports de sédiments au niveau de la section, l'altitude des différents points de la section ne varie pas.

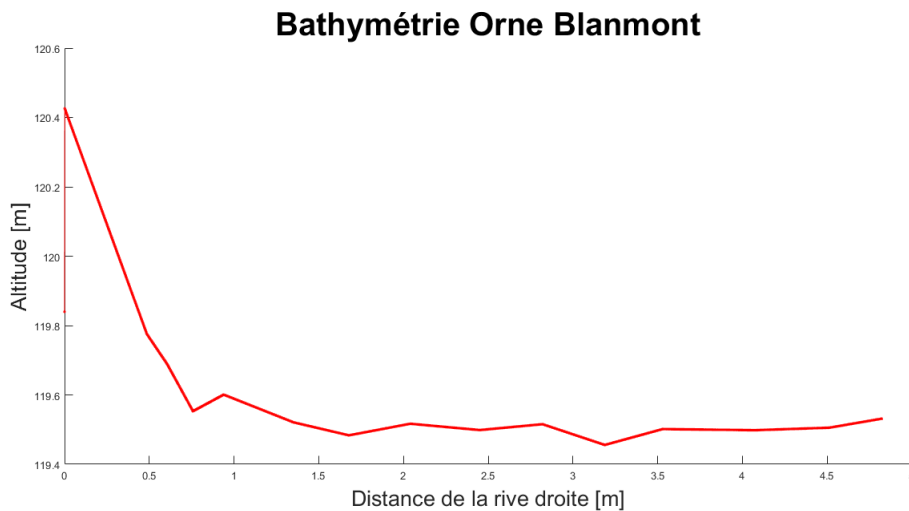


FIGURE 4.2 – Bathymétrie de la section étudiée sur l'Orne le 19 avril 2019

Cette méthode permet d'utiliser le même relevé de bathymétrie pour les prochaines fois. Cependant, le principal défaut de cette méthode est la précision de l'appareil. En effet, le dGPS permet d'obtenir les coordonnées des points de la section avec une précision de 0.01 à 0.04 [m]. Un autre défaut du dGPS est la difficulté de modéliser des berges brutes (un muret bétonné par exemple, comme l'absence de berge à droite sur la figure 4.2). Cela est dû à la difficulté d'exécuter une mesure au pied et en haut du mur, notamment pour des raisons d'accès (l'utilisateur doit sortir de la rivière pour aller prendre sa mesure en haut du mur, pas toujours accessible).

Cette méthode est compatible avec celle expliquée par [20] [HELLEBAUT, 2018] qui permet de déterminer l'altitude de la nappe d'eau. Nous définirons donc la bathymétrie mesurée au dGPS comme base.

## 2 Mesures du niveau d'eau

Pour la mesure du niveau d'eau en rivière naturelle, la méthode appliquée est une adaptation de celle développée par [20] [HELLEBAUT, 2018] dans son mémoire "*Mesure du niveau d'eau par photogrammétrie à partir d'un drone.*". Par souci de lisibilité, l'expression "*mémoire précédent*" dans cette section fera référence à son travail. En effet, la méthode utilisée aussi est la même que celle présentée dans ce mémoire, sauf pour la définition du repère local ainsi que la méthode de détermination du point de décrochage. Celle-ci a été testée sur différentes rivières. Plusieurs critères entrent en jeu dans le choix des sections étudiées. Ils ont mené au choix de la Thyle à Court-Saint-Etienne, de l'Orne à Blanmont, de la Ligne à Saint-Martin ainsi que de la Lasne à Rosières.



FIGURE 4.3 – Carte des rivières étudiées

Le premier critère est de choisir une rivière étant dotée d'une station limnimétrique. [20] [HELLEBAUT, 2018] a identifié ce critère comme essentiel à l'application de sa méthode. Cela permet de comparer les résultats obtenus avec le site [36] Aqualim de la Région wallonne qui collecte en temps réel les altitudes d'eau mesurées. En plus de la mesure de hauteur, il faut que le débit soit également disponible sur le site Aqualim. La Direction des Cours d'Eau non navigables dispose de 175 stations en Wallonie sur des cours d'eau "non-navigables". Ces rivières se caractérisent par un bassin hydrographique

d'au moins 5000 hectares, une largeur comprise entre 5 et 35 mètres ainsi qu'une vitesse d'écoulement, de moyenne à rapide (0,25 [m/s] à 1 [m/s]) (excepté en périodes de crues et d'étiages).<sup>1</sup>

Chaque station dispose d'une échelle limnimétrique. La mire de chaque station est géoréférencée en coordonnées Lambert72.<sup>2</sup> L'altitude de la mire est mesurée par rapport au niveau de la mer (niveau zéro). Il est donc simple de déterminer l'altitude de la surface de l'eau en faisant la somme de l'altitude de la mire ainsi que du résultat lu sur l'échelle limnimétrique. On suppose qu'une différence d'altitude de la surface de l'eau négligeable entre la section au droit de l'échelle limnimétrique et la section analysée (distantes de maximum 5 mètres). L'altitude de la mire de l'échelle limnimétrique est décrite dans le tableau suivant :

	Thyle	Orne	Ligne	Lasne
Mire d' l'échelle limnimétrique	65.53 [m]	119.57 [m]	114.317 [m]	44.06 [m]

TABLE 4.1 – Altitude de la mire de l'échelle limnimétrique des rivières

À ce stade de nos recherches, il est important de préciser que la recherche se concentre sur la recherche de l'aire de la section, ce qui est différent de la méthode développée par l'étude "*Mesure du niveau d'eau par photogrammétrie à partir d'un drone.*". En effet, son auteur recherchait l'altitude de la surface de l'eau par rapport au niveau de la mer. Par sa méthode, il est possible de calculer une mesure de l'altitude de la surface qui est aisément comparable avec l'altitude calculée à partir de l'échelle limnimétrique. En effet, dans ce cas-ci, comme développé dans le mémoire précédent, il n'est pas pertinent d'analyser et de comparer des profondeurs. Rien n'assure que la mire est au niveau du thalweg. Il est donc compliqué de déterminer la profondeur de la rivière uniquement à la lecture de l'échelle limnimétrique. De plus, le thalweg n'est pas fixe car le lit de la rivière est en mouvement permanent. Trouver l'aire de la section étudiée nécessite donc d'exécuter régulièrement un relevé de la bathymétrie. Ce relevé de la bathymétrie devra être effectué à l'aide d'un dGPS afin de pouvoir obtenir l'altitude de la bathymétrie.



FIGURE 4.4 – Échelle limnimétrique sur la Thyle à Court-Saint-Étienne

---

1. Entretien avec le SPW 20-03-19 & Informations générales du site [aqualim.environnement.wallonie.be](http://aqualim.environnement.wallonie.be)

2. Le système de coordonnées Lambert72 est l'ancien système de géoréférencement utilisé en Belgique

Le second critère porte sur les caractéristiques topographiques de la rivière (largeur et profondeur). [20] [HELLEBAUT, 2018] a également pris en compte ce critère dans le développement de sa méthode. Tout d'abord, elle ne doit pas être trop profonde de manière à nous permettre d'y récolter les données de manière sécurisée. Les relevés de la bathymétrie et les photos étant réalisés manuellement, il faut donc éviter de mouiller les appareils utilisés. Ensuite, les berges doivent être relativement dépourvues de toute végétation pour bénéficier d'une zone plus facilement analysable.



FIGURE 4.5 – Type de végétation acceptable - Ici le long de l'Orne à Blanmont

Le troisième critère concerne l'accès à la rivière il est fondamental de pouvoir y rentrer sans devoir enjamber une barrière de pont ou sauter d'une berge. Ce critère était le dernier critère identifié dans le mémoire précédent. De plus, une section étudiée située dans les alentours de Louvain-La-Neuve et aux alentours des autres sections sélectionnées est préférable afin de pouvoir s'y rendre plus facilement et de pouvoir prendre des mesures sur plusieurs rivières en une journée.

Le quatrième critère porte sur la présence d'un pont passant au-dessus de la rivière. Ce critère n'entrait pas en compte dans le choix de la section de [20] [HELLEBAUT, 2018]. En effet, ce critère tient compte de la méthode de mesure de vitesse qui nous permettra au final de déterminer le débit. Donc, pour la prise d'images dans le but de l'analyse LSPIV, il faut pouvoir prendre une vidéo permettant d'avoir une vue d'ensemble de la rivière. La présence d'un pont est donc un élément essentiel à l'application de notre méthode.

Tous ces critères sont respectés par les trois rivières choisies, qui présentent toutes des configurations différentes.

- La Thyle à Court-Saint-Étienne a une largeur de rivière d'environ 5 [m] et une profondeur moyenne d'une vingtaine de centimètres avec des débits de l'ordre de 0.3 à 0.5 [m<sup>3</sup>/s] lors de nos mesures.
- L'Orne à Blanmont a une largeur d'environ 4 [m] et une profondeur moyenne d'une quinzaine de centimètres avec des débits de l'ordre de 0.1 à 0.2 [m<sup>3</sup>/s] lors de nos mesures.
- La Ligne à Saint-Martin a une largeur d'environ 3 [m] et une profondeur moyenne d'une trentaine de centimètres avec des débits de l'ordre de 0.1 à 0.2 [m<sup>3</sup>/s] lors de nos mesures.

- La Lasne à Rosières a une largeur d'environ 6 [m] et une profondeur moyenne d'une quarantaine de centimètres avec un débit de l'ordre de 0.8 à 1 [m<sup>3</sup>/s] lors de nos mesures.



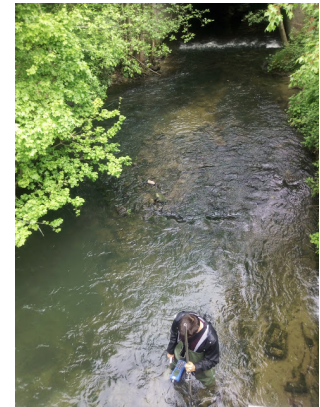
(a) La Thyle à Court-Saint-Étienne



(b) L'Orne à Blanmont



(c) La Ligne à Saint-Martin



(d) La Lasne à Rosières

FIGURE 4.6 – Les différentes rivières étudiées

## 2.1 Modélisation photogrammétrique

Cette section présente une description des étapes nécessaires à l'obtention des modèles à trois dimensions avec le logiciel de photogrammétrie. Elle présente la méthode de modélisation développée par [20] [HELLEBAUT, 2018] dans son mémoire "*Mesure du niveau d'eau par photogrammétrie à partir d'un drone.*", qui sera appelé également ici "mémoire précédent". Les adaptations que nous y avons apportées sont également présentées. Dans cette section, par soucis de lisibilité, comme dans le mémoire précédent, on appelle *modèle* le résultat en trois dimensions de la modélisation photogrammétrique sur Agisoft-Photoscan, à partir d'un jeu de photos. La précision des résultats dépend directement de la qualité des modèles construits.

Il est important de préciser que, comme l'a montré [20] [HELLEBAUT, 2018], seule une rive sera étudiée et modélisée par photogrammétrie. En effet, la construction d'un modèle comprenant les deux berges demande des photographies de bonne résolution où les 2 berges apparaissent simultanément. Ceci est difficilement réalisable car il est compliqué d'avoir un appareil photo ayant un angle de vue suffisamment large et

permettant d'obtenir des images de bonne qualité.

Afin de déterminer l'aire de la section dont on veut connaître le débit, il faut que l'on détermine le niveau d'eau par rapport à la bathymétrie déjà mesurée à la section 1. Pour ce faire, la démarche à suivre lors de la prise de mesures est décrite ci-dessous.

### 2.1.1 Placement des repères GCPs

Les *Ground Control Points* (GCPs), points géoréférencés, sont placés sur la zone à modéliser. Leur but est de perfectionner le géoréférencement et d'augmenter la précision géométrique du modèle en trois dimensions. Leur utilisation est indispensable pour pouvoir appliquer la méthode du mémoire précédent. Ils seront également utilisés comme repères de calibration dans les mesures de vitesses par LSPIV (cf. section 3). Ces points de référence sont des marqueurs codés 12 bit qui sont reconnaissables par le logiciel Agisoft-Photoscan. Ces marqueurs sont maintenus au sol grâce à une pique métallique de type piquet de tentes de camping (voir figure 4.7).



FIGURE 4.7 – GCPs sur la berge de la Thyle

Comme recommandé par le travail de "*Mesure du niveau d'eau par photogrammétrie à partir d'un drone.*", il est nécessaire de placer au minimum 5 GCPs dans l'analyse d'une berge. Nos berges ayant des dimensions inférieures (1.2 [m] de long sur 10 [m] de large), nous utiliserons donc seulement 5 GCPs par berge que nous modélisons. Chaque GCPs est géoréférencé grâce au dGPS Leica1200, dont la précision en 3D varie de 0.01 [m] à 0.04 [m] (le dGPS Leica1200 est détaillé dans l'annexe A). Le dGPS donne les coordonnées Lambert72 des points mesurés ainsi que leur altitude par rapport au niveau de la mer (niveau zéro).

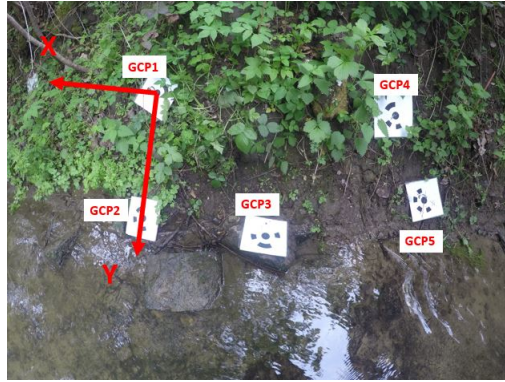


FIGURE 4.8 – GCPs sur la berge de la Thyle : disposition et repère local

Dans un souci de clarté dans les coordonnées, comme recommandé par le mémoire précédent, les GCPs sont utilisés également pour définir un nouveau repère local. Ce repère diffère légèrement de celui développé dans l'étude précédente et il est présenté à la figure 4.8. Les GCP1 et GCP2 sont disposés sur une droite perpendiculaire à la direction de l'écoulement et ils définissent la direction de l'axe des ordonnées (en travers de la rivière) et la direction de la section analysée (ces 2 points ont donc une abscisse  $x=0$ ).

Le GCP1 est défini comme origine du repère cartésien. L'axe des abscisses est défini par rapport à l'axe des ordonnées. Il est donc parallèle à la direction de l'écoulement. Cependant, la direction de l'axe des abscisses (axe  $x$ ) peut être dans la direction opposée au sens de l'écoulement section afin de respecter le sens des ordonnées et de l'altitude (cf. "règle de la main droite"). Cela dépend si la mesure est prise sur la berge droite ou gauche.

Les coordonnées des GCPs se calculent, dans le repère cartésien local choisi, en utilisant de simples lois géométriques (Pythagore, loi de cosinus). Les coordonnées dans les deux repères dans le cas du relevé du 19 avril sur la Thyle sont reprises dans le tableau 4.2.

Nom	Coordonnées Lambert72		Coordonnées cartésiennes		Altitude [m]
	Est [m]	Nord [m]	x [m]	y [m]	
GCP1	163832.081	146834.733	0	0	65.97
GCP2	163832.313	146834.74	0	0.232	65.70
GCP3	163832.582	146835.462	-0.713	0.522	65.75
GCP4	163831.6	146835.803	-1.55	0.512	66.05
GCP5	163831.21	146835.442	-1.55	0.862	65.70

TABLE 4.2 – Coordonnées des GCPs sur la Thyle le 19 avril

### 2.1.2 Acquisition de photos

Comme précisé également par [20] [HELLEBAUT, 2018], afin de modéliser la berge choisie, il faut fournir au logiciel PHOTOSCAN®, des photographies qui composent la matière première de la modélisation photogrammétrique. La qualité des photos (définition, éclairage,...) influence directement la qualité du modèle photogrammétrique en trois dimensions. La multiplicité des points de vue est également fondamentale pour

diminuer les angles morts selon [32] [Agisoft-Photoscan : Manuel d'utilisateur, 2015].

Le mémoire précédent précise également que pour la modélisation d'un point, il doit apparaître au moins sur trois photographies. Les photos sont prises manuellement, à partir d'un appareil photo, en veillant à multiplier les points de vue (photos rasantes, photos en plongée,...).

Il explique également que pour caractériser la zone d'intérêt, les photos doivent être prises à une distance correcte (2 à 3 mètres) pour avoir de nombreux pixels. Il précise que cela permet de bien prendre en compte les détails. À cette distance, un recouvrement élevé entre les photos est possible. Sur chaque photographie, il est nécessaire que 3 GCPs soient visibles au minimum ainsi qu'un pan d'eau. Cela permet de modéliser la surface d'eau aux abords de la berge. L'appareil photo utilisé est une GoPro® Hero4 en mode *Wide* pour la prise de photos des berges. Ses caractéristiques sont décrites dans l'annexe A.



FIGURE 4.9 – Extrait du jeu de photos sur la Lasne - 09 mai 2019

Quelques défauts ont cependant été relevés quant aux conditions de prises de photos. On notera donc, que pour éviter des problèmes à la modélisation, comme présenté à la figure ci-dessous, il faut faire attention à la luminosité afin d'éviter les reflets dans l'eau. Lorsque la luminosité est abondante, il faut également faire attention à notre ombre dans l'eau. De préférence, si possible, les résultats seront plus précis si la section étudiée est à l'ombre d'un pont, par exemple.



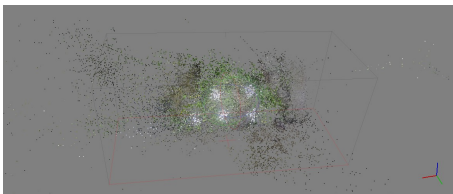
FIGURE 4.10 – Problèmes lors de l'acquisition des photos

### 2.1.3 Utilisation du logiciel

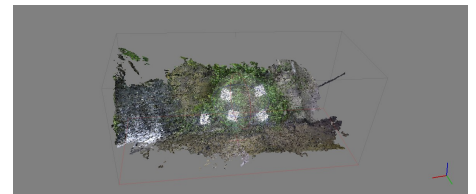
L'utilisation du logiciel est celle décrite par [20][HELLEBAUT, 2018]. Seuls les axes du repère local sont définis différemment, comme expliqué ci-dessus. Le mode d'emploi précis est présenté dans l'annexe C.

Un bref résumé de la méthode est présenté ci-dessous :

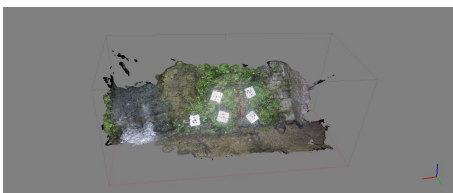
1. Importation des photos de la berge.
2. Alignement des photos (Construction du *sparse point cloud*, voir figure 4.11a).
3. Optimisation des positions de prises d'images (Construction d'un nuage de points géoréférencés).
4. Construction du *dense point cloud* (voir figure 4.11b).
5. Construction du *mesh* (maillage) et du modèle 3D (voir figure 4.11c).
6. Création du *Digital Elevation Model* (DEM) (voir figure 4.11d).



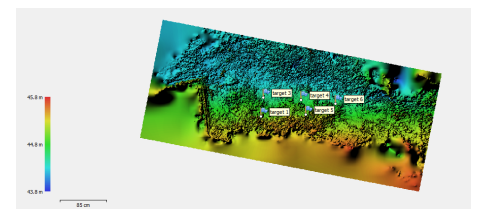
(a) *Sparse Dense Cloud* de la Lasne (25342 points)



(b) *Dense Point Cloud* de la Lasne (4670880 points)



(c) *Mesh* de la Lasne



(d) *DEM* de la Lasne

FIGURE 4.11 – Étapes de la modélisation photogrammétrique in situ : exemple de la Lasne

### 3 Mesures de vitesses

Dans cette section, nous détaillerons la méthode utilisée dans les mesures de vitesse de l'écoulement, toujours, pour à terme, pouvoir calculer le débit d'une rivière. La méthode utilisée dans le cadre de cette étude est largement similaire à celle développée par [2] [BIA et SOMERS, 2018] dans le cadre de leur mémoire.

#### 3.1 Vérification du matériel de mesure disponible

Dans le cadre de notre étude *in situ*, nous disposons d'un courantomètre de type MF-Pro de la marque OTT. Les caractéristiques de cet appareil sont décrites dans l'annexe A.

Une question a été posée quant à la précision et à la calibration de cet appareil de mesure. Plusieurs vérifications ont donc été menées sur les différentes rivières afin de juger de la fiabilité de notre MFPro.

Lors de chaque prise de mesure avec le MFPro de l'UCL, nous avons comparé le débit obtenu au débit affiché à l'heure de la mesure sur Aqualim<sup>3</sup>. Le tableau 4.3 reprend la synthèse des résultats de ces mesures. Un tableau reprenant l'ensemble de ces mesures est disponible dans l'annexe E. L'erreur est définie comme  $|1 - \frac{Q_{MFProUCL}}{Q_{Aqualim}}|$ .

	Moyenne des erreurs [%]	Écart-type [%]
Thyle	3.96	3.44
Ligne	3.42	3.48
Orne	50.9	3.98
Lasne	12.46	/

TABLE 4.3 – Résultats des comparaisons des débits mesurés par le MFPro de l'UCL et Aqualim

Excepté pour le cas de l'Orne, pour l'ensemble des mesures, la différence est acceptable et se situe dans les plages d'erreurs de l'appareil (voir annexe A).

Pour le cas de l'Orne, il s'agit de la station la plus récente (2011), donc pour laquelle le SPW dispose du moins de données par rapport aux autres rivières (par exemple, la station sur la Thyle à Court-Saint-Étienne a été mise en service en 1973). De plus, en expérimentant la méthode d'imagerie développée ici, la valeur du débit mesuré au MFPro est confirmée par rapport à la valeur d'Aqualim. Sur la figure 4.12, nous pouvons voir l'ensemble des mesures réalisées pour la vérification de cet appareil de mesure.

Pour la Lasne, deux comparaisons sont effectuées : l'une par rapport à Aqualim, l'autre par rapport au courantomètre MFPro du SPW ayant réalisé un jaugeage le même jour à cet endroit. La différence entre le débit du MFPro de l'UCL et du MFPro du SPW peut notamment s'expliquer par le fait que la jauge de hauteur du MFPro de l'UCL ne soit plus automatique. La hauteur des points est donc mesurée manuellement, ce qui peut entraîner une petite incertitude d'utilisation humaine.

3. voir site [aqualim.environnement.wallonie.be](http://aqualim.environnement.wallonie.be)

### Comparaison des débits MFPro UCL & débits Aqualim (+SPW)

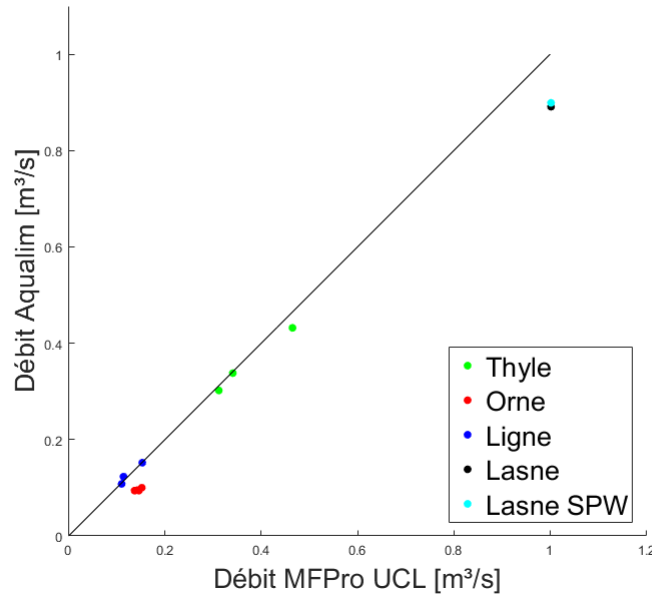


FIGURE 4.12 – Comparaison des mesures de débit du MFPro par rapport aux mesures du SPW

Il a donc été conclu que le courantomètre MFPro de l’UCL était fiable. Pour la suite de cette étude, la valeur de référence pour les mesures en rivière naturelle sera donc la valeur mesurée par le courantomètre MFPro de l’UCL.

## 3.2 Différents types d’ensemencement

En rivière naturelle, deux types de prise d’images ont été testés : prises de vidéos sans ensemencement, d’une part et prises de vidéos avec des copeaux de bois de 2 à 6 cm comme ensemencement. Ces différents types d’ensemencement ont été appliqués dans le but de déterminer la méthode pour laquelle les résultats étaient les plus optimaux.

### 3.2.1 Sans ensemencement

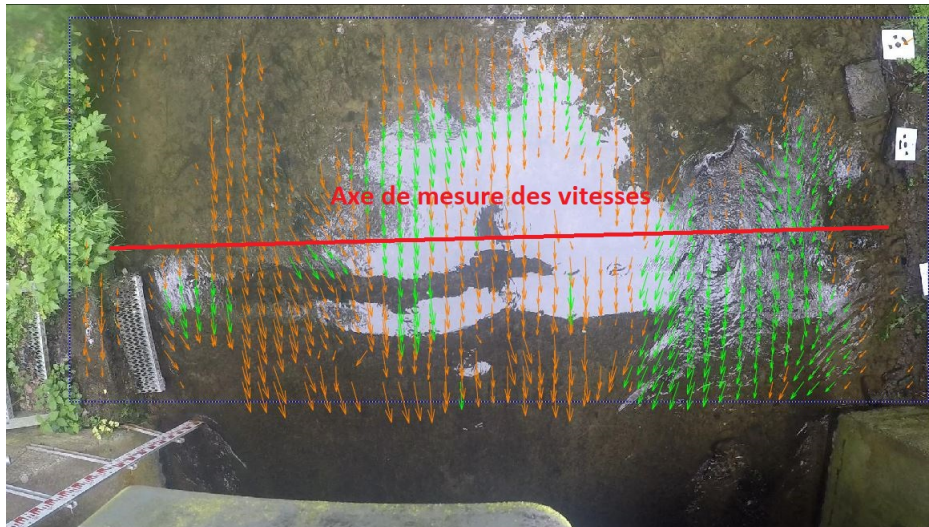
Tout d’abord, des vidéos afin de mesurer la vitesse de surface de l’écoulement ont été réalisées sans ensemencement. La plus grande difficulté à pouvoir obtenir des résultats probants dans ce cas-ci est la gestion de la luminosité autour de la rivière. En effet, comme nous pouvons observer sur la figure 4.13, qui est une photo prise lors de l’interpolation des vecteurs vitesse par PIVLab, la détection des vecteurs vitesse est aléatoire.



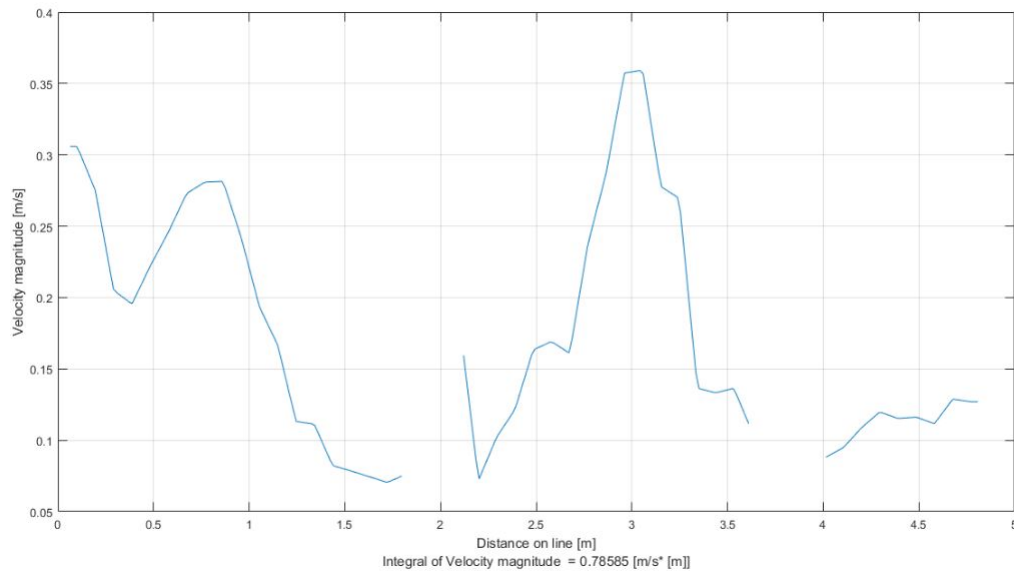
FIGURE 4.13 – Analyse LSPIV sans ensemencement sur la Ligne

Sur la figure 4.13, nous pouvons observer la difficulté que rencontre le logiciel à repérer la vitesse de l'écoulement à la surface de l'eau.

Ensuite, comme montré sur la figure 4.14 ci-dessous, nous pouvons voir l'effet néfaste des reflets de lumière sur la mesure des vitesses par LSPIV. En effet, sur la figure 4.14a, nous pouvons voir des reflets depuis le point de prise de vidéos. Ici, il s'agit de la prise de vidéo sur la Thyle à Court-Saint-Étienne le 23 avril 2019. Sur la figure 4.14b, nous pouvons remarquer que certaines parties de la section n'ont aucune vitesse. Sur l'ensemble de la vidéo, aucun vecteur de vitesse n'a été repéré sur certaines zones de la section.



(a) Effet des reflets dans l'analyse PIVLab - Vitesses moyennes LSPIV

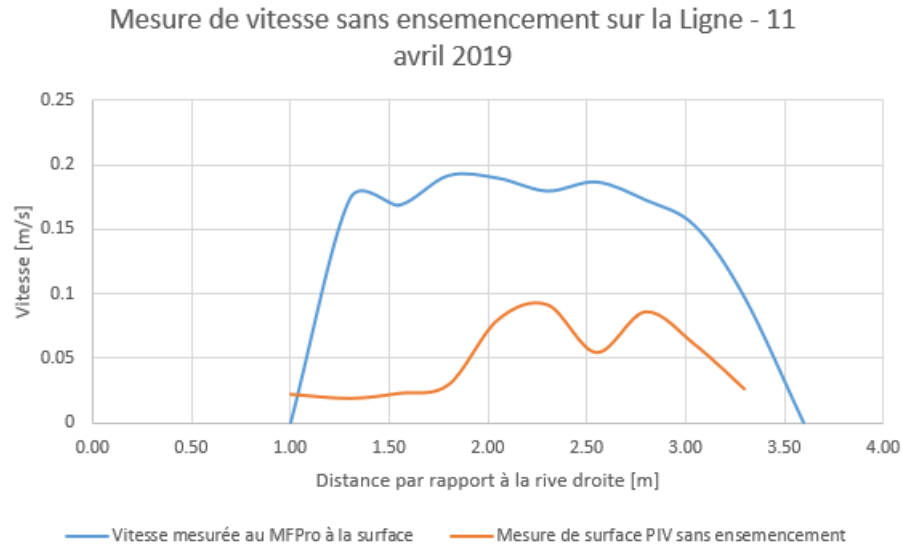


(b) Graphe des vitesses PIVLab avec reflets mesurées selon l'axe défini à la figure 4.14a

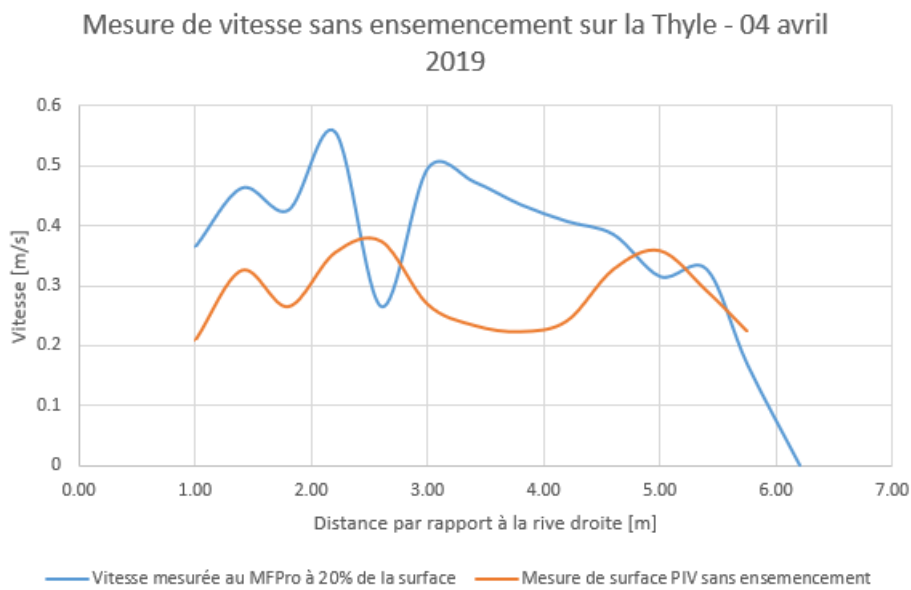
FIGURE 4.14 – Problème de reflets - Thyle 23-04-19

Nous pouvons également observer que les vitesses calculées sur la droite de la figure 4.13 sont pour la plupart opposées au sens de l'écoulement et donc incorrectes. Nous pouvons remarquer également que seul des vecteurs sont calculés dans la zone à l'ombre de la rivière, et donc que l'ensoleillement peut avoir un grand impact sur la qualité de l'analyse LSPIV (décrite dans l'annexe B).

L'exemple de la Ligne, une rivière où l'écoulement n'est pas turbulent, est un exemple de rivière où la méthode développée par [2] [BIA et SOMERS, 2018] trouve ses limites dans le calcul sans ensemencement.



(a) Comparaison des vitesses de surface mesurées par LSPIV et par le MFPro sur la Ligne 11-04-2019



(b) Comparaison vitesses de surface mesurées par LSPIV et par le MFPro sur la Thyle 04-04-19

FIGURE 4.15 – Analyse PIV sans ensemencement

Comme nous le montre la figure 4.15, les résultats peuvent varier fortement en fonction de la rivière, des conditions d'écoulement et de la luminosité. Les mesures de vitesse sans ensemencement ne peuvent donc pas être appliquées de manière fiable à l'ensemble de nos rivières.

### 3.2.2 Ensemencement avec des copeaux de bois

Ensuite, des vidéos afin de mesurer la vitesse de surface de l'écoulement ont été réalisées avec ensemencement. Des copeaux de bois (copeaux de pin) de 2 à 6 [cm] de

diamètre sont utilisés comme ensemencement. Un essai avec de la sciure de bois avait été réalisé sur le Biran à Wanlin, mais cette idée a été rapidement abandonnée puisque la sciure coulait et ne pouvait pas rester en surface contrairement aux copeaux. Cette solution permet de pouvoir répondre au problème de la luminosité de la rivière. En effet, comme nous pouvons observer sur la figure 4.16, une photo prise lors de l'interpolation des vecteurs vitesses par PIVLab, la détection des vecteurs vitesse est plus aisée.

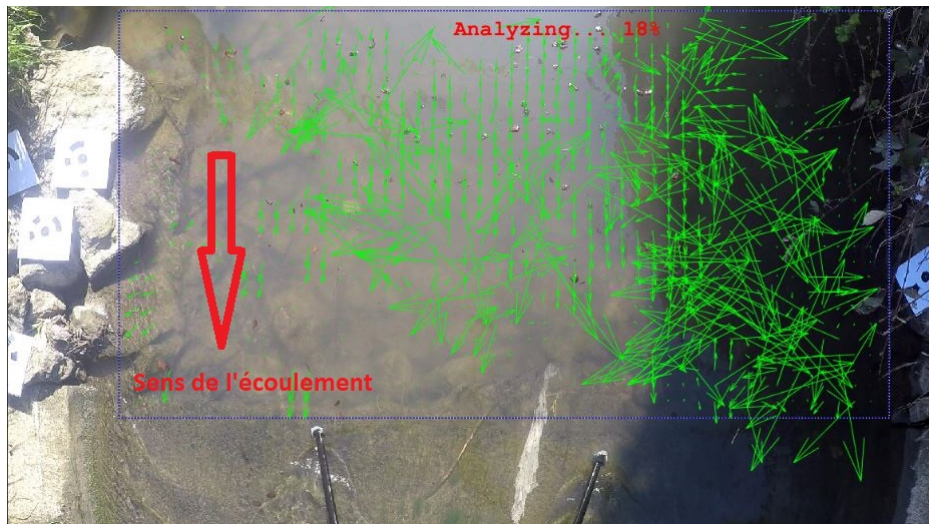
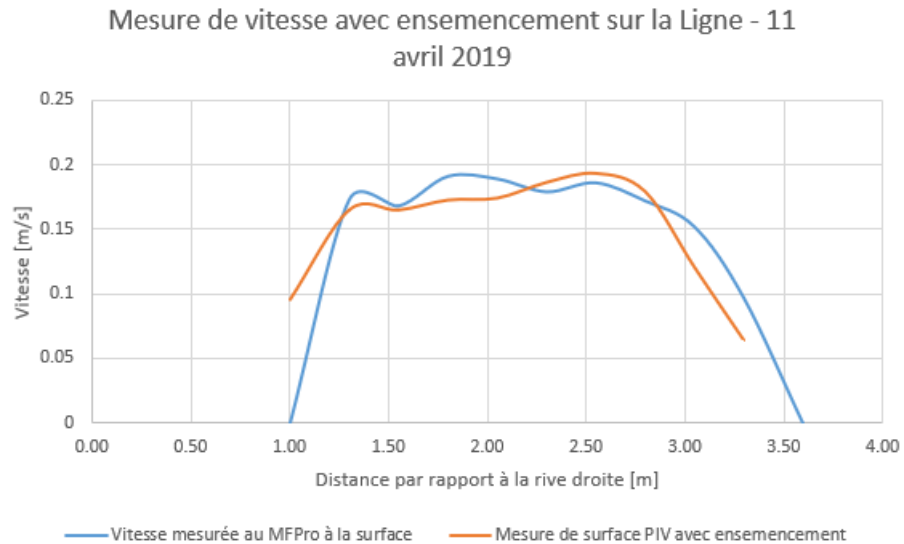
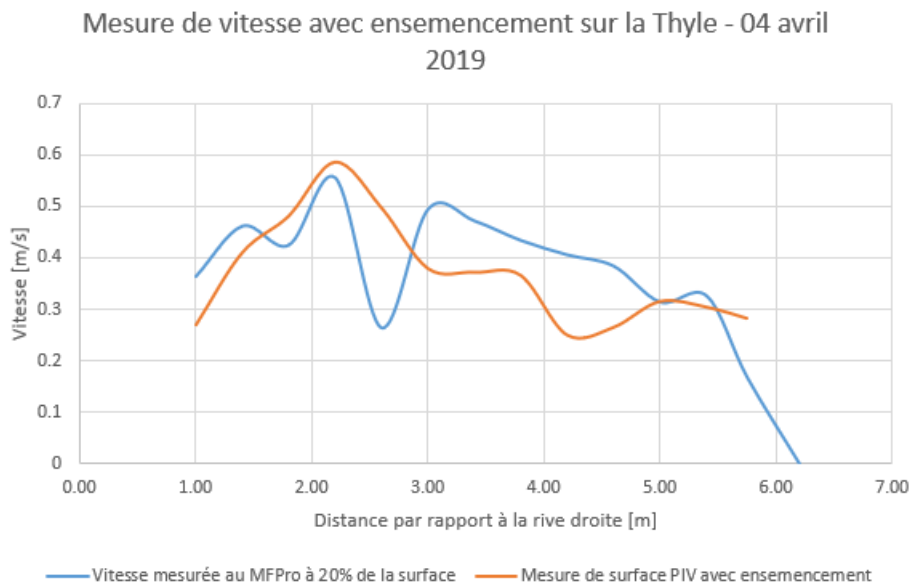


FIGURE 4.16 – Analyse LSPIV avec ensemencement sur la Ligne

De plus, nous pouvons également observer sur la figure 4.17 qu'avec ensemencement, les vitesses de surface calculées par LSPIV correspondent aux vitesses réelles mesurées au MFPro.



(a) Comparaison des vitesses de surface mesurées par LSPIV et par le MFPro sur la Ligne 11-04-2019



(b) Comparaison des vitesses de surface mesurées par LSPIV et par le MFPro sur la Thyle 04-04-19

FIGURE 4.17 – Analyse PIV avec ensemenement

### 3.3 Dispositifs de prises d'images

Les prises de vidéos des rivières se font grâce à une GoPro® fixée sur un pied de caméra à bras télescopique.



FIGURE 4.18 – Dispositif de prises d’images en rivière

### 3.4 Traitement des images : utilisation des vidéos et utilisation de PIVLab pour la LSPIV

Pour le traitement des vidéos, le procédé est le même qu’en laboratoire. Le traitement des vidéos par PIVLab est le même que celui décrit par [2] [BIA et SOMERS, 2018]. De cette manière, il est possible d’analyser les résultats par les filtres développés dans leur mémoire. Un mode d’emploi est repris dans l’annexe B.

Ensuite, une fois que les vitesses de surface sont calculées, l’aire de la section réalisée précédemment, il est possible de déterminer le débit. Ce calcul est réalisé à l’aide d’un coefficient de conversion qui sera décrit dans le chapitre 5.2.

# Chapitre 5

## Analyse des résultats en rivière naturelle

Dans ce chapitre, nous analyserons l'ensemble des résultats obtenus au cours de nos prises de mesure sur le terrain. Nous commenterons les mesures de niveau d'eau comme expliqué au chapitre 4.2, les méthodes permettant de convertir les vitesses de surface expliquées au chapitre 4.3.4 en vitesse moyenne. Sur base de ces résultats, il sera donc possible de déterminer le débit.

### 1 Calcul du niveau d'eau

La méthode utilisée ici a été détaillée dans le chapitre 4.2.

Dans un premier temps, afin de calculer l'aire de la section, il faut déterminer le niveau d'eau. Le principe, comme expliqué par [20] [HELLEBAUT, 2018], est d'observer où se situe le point de décrochage entre la berge modélisée par imagerie et la bathymétrie mesurée au dGPS (voir figure 5.1 ci-dessous).

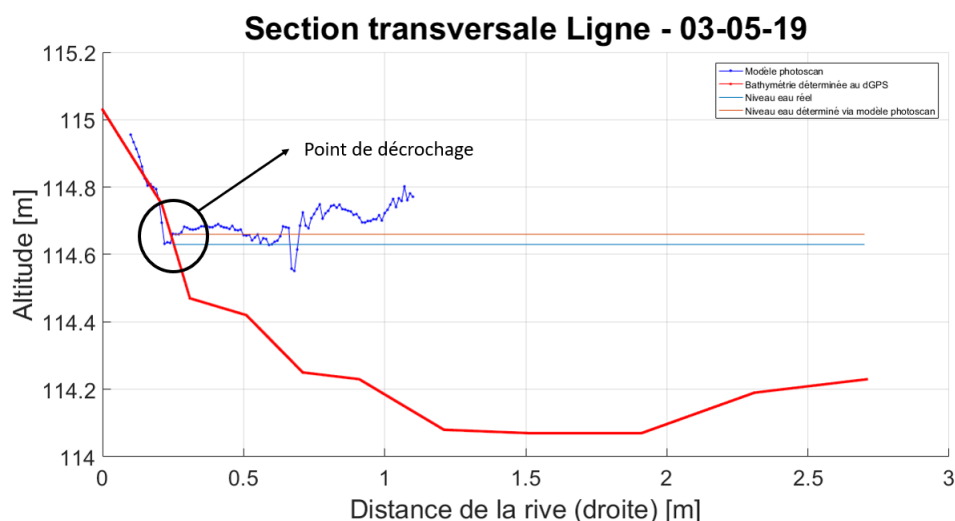


FIGURE 5.1 – Méthode de calcul du niveau d'eau en rivière

[20] [HELLEBAUT, 2018] a essayé de développer une méthode automatique pour repérer le niveau du point de décrochage. Celle-ci n'a pas été appliquée car nous n'avons pas suffisamment de mesures par site afin de l'utiliser. En effet, dans son mémoire Hellebaut [20] avait pu faire au moins 7 relevés au même endroit, ce qui n'a pas été le cas ici. La méthode de détermination du niveau d'eau par imagerie utilisée n'est donc pas automatisée et est soumise au point de vue de l'utilisateur.

Ensuite, afin de calculer l'aire de la section, la bathymétrie utilisée est celle déterminée au dGPS. Il est important de rappeler que la précision du dGPS est de l'ordre de 0.01 à 0.04 [m].

L'aire de section de référence utilisée est l'aire déterminée par le courantmètre MFPro<sup>®</sup>. Dans le tableau ci-dessous, la moyenne des erreurs des différentes rivières sont reprises. L'erreur est définie comme :

$$Erreur = \left| 1 - \frac{Aire_{Imagerie}}{Aire_{MFPro}} \right|$$

	Moyenne des erreurs [%]	Écart-type [%]
Thyle	9.20	8.83
Orne	11.06	8.37
Ligne	9.63	7.02

TABLE 5.1 – Erreurs par rivière sur le calcul d'aire

L'ensemble des mesures d'aire est repris sur la figure 5.2 ci-dessous. Tous les résultats sont détaillés dans l'annexe G.

**Comparaison de la surface sections par imagerie  
et de la surface des sections mesurées au MFPro**

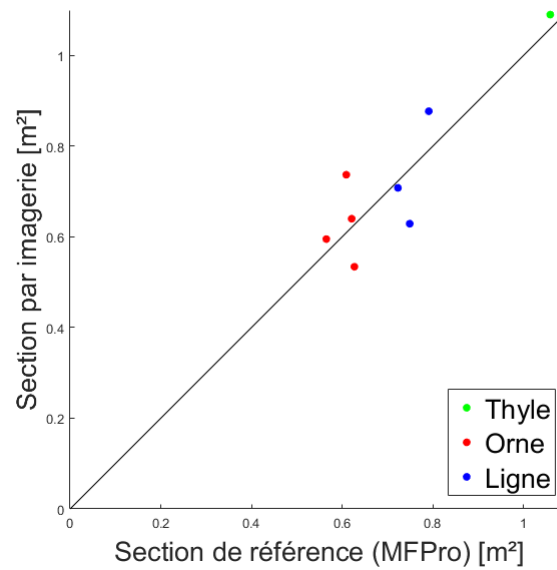


FIGURE 5.2 – Résultats des calculs d’aire des sections

On observe ici des résultats satisfaisants pour le calcul de l’aire des différentes sections étudiées. Cependant, dans le but de diminuer l’erreur dans le calcul du débit, nous utiliserons dans ce cas-ci les coefficients de débits, comme expliqué dans le chapitre 3.

## 2 Coefficients de débits

Dans le cas des rivières naturelles, afin de calculer le débit, nous allons utiliser un coefficient comme défini dans le chapitre 3.2.2.

Ce coefficient met en rapport 2 débits : le débit de référence (ici, débit mesuré par le MFPro<sup>®</sup> de l’UCL) et le débit des vitesses de surface *PIV*.

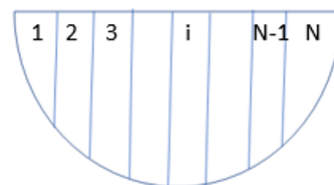


FIGURE 5.3 – Exemple de section type divisée en zones de N verticales

Le débit  $PIV$  est défini, pour une section similaire à celle présentée à la figure 5.3 comme :

$$Débit_{surfacePIV} = \sum_{i=1}^{i=N} Vitesse_{surfacePIV_i} \cdot A_i$$

Le coefficient de débit est quant à lui défini comme :

$$Coefficient = \frac{Débit_{référence}}{Débit_{surfacePIV}}$$

Ce coefficient de débit a donc été calculé pour chaque section étudiée. Pour les sections où plusieurs mesures ont été réalisées, le coefficient de débit utilisé est le coefficient moyen des mesures réalisées sur ce site. Nous obtenons donc :

	Coefficient de débit moyen	Écart-type	Nombre de mesures
Thyle	0.897	0.094	3
Orne	0.687	0.165	4
Ligne	0.868	0.160	3
Lasne	1.082	/	1
Biran	0.847	/	1

TABLE 5.2 – Calculs du coefficient de débit pour chaque section en rivière

Le coefficient moyen de l'ensemble de nos mesures est **0.876**.

Nous pouvons observer que ce coefficient de débit correspond, théoriquement, au coefficient de vitesse  $\alpha$  mettant en lien la vitesse moyenne d'un écoulement et la vitesse de surface. Il s'agirait ici donc du coefficient  $\alpha = \alpha_{moyen}$  défini dans le chapitre 3.2.1 qui serait redéfini comme :

$$\alpha = \frac{Vitesse_{moyenne}}{Vitesse_{Surface}}$$

où  $Vitesse_{Surface}$  est la vitesse mesurée par LSPIV.

L'avantage de ce coefficient de débit, par rapport à la simple utilisation du coefficient de vitesse, est, comme déjà expliqué plus haut, qu'il prend en compte également l'erreur commise dans le calcul de l'aire de la section par imagerie. Le coefficient de débit continuera donc à être utilisé ici. Cependant, le lien peut être fait quant à la valeur de ce coefficient et les valeurs de  $\alpha$  déterminés dans la littérature.

Nous pouvons donc remarquer que dans le cas de la rivière naturelle, ces coefficients sont, en moyenne, de l'ordre de 0.8 – 0.9, ce qui correspond aux valeurs définies pour le coefficient  $\alpha$  dans la littérature.

### 3 Calcul de débit

Dans cette section, les résultats du calcul de débit par imagerie pour les différentes rivières sont présentés.

L'erreur est définie par :

$$Erreur = \left| 1 - \frac{Q_{imagerie}}{Q_{reference}} \right|$$

où  $Q_{imagerie}$  est le débit obtenu par imagerie et  $Q_{reference}$  est le débit de référence, c'est-à-dire le débit mesuré au MFPro de l'UCL.

### 3.1 Calcul du débit de la Thyle

Dans le cas de la Thyle, le coefficient de débit utilisé est le coefficient moyen de la section, qui est 0.897.

Thyle	Coefficient de débit	Débit MFPro [m <sup>3</sup> /s]	Débit imagerie [m <sup>3</sup> /s]	Erreur [%]
04-04-19	0.897	0.465	0.428	8.1
23-04-19		0.312	0.353	13
06-05-19		0.341	0.332	2.6

TABLE 5.3 – Calculs du débit de la Thyle

### 3.2 Calcul du débit de l'Orne

Dans le cas de l'Orne, le coefficient de débit utilisé est le coefficient moyen de la section, qui est 0.687.

Orne	Coefficient de débit	Débit MFPro [m <sup>3</sup> /s]	Débit imagerie [m <sup>3</sup> /s]	Erreur [%]
11-04-19	0.687	0.152	0.107	29.3
19-04-19		0.137	0.164	19.7
03-05-19		0.146	0.164	12.3
07-05-19		0.143	0.112	21.7

TABLE 5.4 – Calculs du débit de l'Orne

Il est important de souligner que la mesure du 11 avril sur l'Orne n'a pas été réalisée sur une section perpendiculaire à l'écoulement, mais selon l'axe du pont passant au-dessus de la rivière dont la trajectoire est oblique à l'écoulement. Cette mesure n'a donc pas été prise en compte dans les calculs du coefficient de débit moyen et des statistiques sur les erreurs de la section par souci de cohérence.

### 3.3 Calcul du débit de la Ligne

Dans le cas de la Ligne, le coefficient de débit utilisé est le coefficient moyen de la section, qui est 0.868.

Ligne	Coefficient de débit	Débit MFPro [m <sup>3</sup> /s]	Débit imagerie [m <sup>3</sup> /s]	Erreur [%]
11-04-19	0.868	0.114	0.094	17.5
19-04-19		0.110	0.121	9.6
03-05-19		0.153	0.174	13.7

TABLE 5.5 – Calculs du débit de la Ligne

### 3.4 Calcul du débit du Biran

Dans le cas du Biran, une seule mesure de vitesse par LSPIV a été réalisée, ainsi qu'une mesure au MFPro. Dans ce cas-ci, la mesure de l'aire de la section étudiée est l'aire de la section mesurée par le MFPro. Ensuite, vu qu'une seule mesure a été réalisée, cela paraît sans intérêt d'utiliser le coefficient de débit mesuré ici uniquement, car cela ne donnerait pas d'indice sur la précision de la méthode.

Le coefficient utilisé, pour le calcul de débit par imagerie, sera donc le coefficient moyen de l'ensemble de nos mesures, c'est à dire, **0.876**.

Biran	Coefficient de débit	Débit MFPro [m <sup>3</sup> /s]	Débit imagerie [m <sup>3</sup> /s]	Erreur [%]
20-03-19	0.876	0.654	0.677	3.5

TABLE 5.6 – Calcul du débit du Biran

### 3.5 Calcul du débit de la Lasne

Dans le cas de la Lasne, une seule campagne de mesures a été réalisée, c'est à dire qu'une seule mesure de l'aire de la section par photogrammétrie ainsi qu'une seule mesure LSPIV ont été réalisées ainsi qu'une mesure au MFPro.

Comme pour le Biran (voir section 3.4), on utilise à nouveau le coefficient de débit moyen **0.876**.

Lasne	Coefficient de débit	Débit MFPro [m <sup>3</sup> /s]	Débit imagerie [m <sup>3</sup> /s]	Erreur [%]
09-05-19	0.876	1.002	0.811	19

TABLE 5.7 – Calcul du débit de la Lasne

Il est important de préciser qu'une mesure faite par le courantomètre du SPW a été réalisée le même jour et que le débit calculé par cet appareil était de 0.899[m<sup>3</sup>/s]. Le courantomètre de type MFPro également, il est logique de calculer également l'erreur de la méthode d'imagerie par rapport à cette référence.

Lasne	Coefficient de débit	Débit MFPro SPW [m <sup>3</sup> /s]	Débit imagerie [m <sup>3</sup> /s]	Erreur [%]
09-05-19	0.876	0.899	0.811	9.8

TABLE 5.8 – Calcul du débit de la Lasne - Référence SPW

La différence de débit entre les 2 appareils MFPro a été abordée plus tôt. Cependant, pour commenter ces résultats, la comparaison avec le débit du SPW est importante afin de pouvoir tirer des conclusions cohérentes.

### 3.6 Commentaires sur les résultats

Sur l'ensemble des rivières étudiées, l'observation des erreurs donne les résultats suivants :

	Moyenne des erreurs [%]	Écart-type [%]
Thyle	7.9	5.2
Orne	17.9	4.9
Ligne	13.6	4
Lasne	19	/
Lasne SPW	9.8	/
Biran	3.5	/

TABLE 5.9 – Erreurs sur le calcul des débits en rivière

Nous pouvons observer que dans ces résultats, l'Orne est la rivière apportant la plus grande erreur (mise à part pour la Lasne, mais deux références sont disponibles ici, celle du SPW sera privilégiée car il s'agit de techniciens spécialisés dans ce type de mesure par rapport à nous et également car notre jauge de hauteur est manuelle). Pour les autres rivières, les résultats sont parfois très précis (par exemple, sur la Thyle ou le Biran). La moyenne de toutes les erreurs est 12.8[%], avec un écart-type de 6.4[%]. Nous pouvons observer également que 92% des mesures présentent une erreur inférieure à  $\pm 20\%$ , ce qui est acceptable en rivière naturelle. De plus, 67% des mesures ont une erreur inférieure à  $\pm 15\%$  et près de la moitié (42%) présentent une erreur inférieure à  $\pm 10\%$ , ce qui est une précision tout à fait correcte en rivière naturelle, au vu de l'ensemble des paramètres pouvant influencer la précision des résultats.

Sur la figure 5.4 ci-dessous, ces résultats sont présentés en comparaison avec les débits de référence du MFPro de l'UCL.

#### Comparaison des débits par imagerie & débits mesurés au MFPro

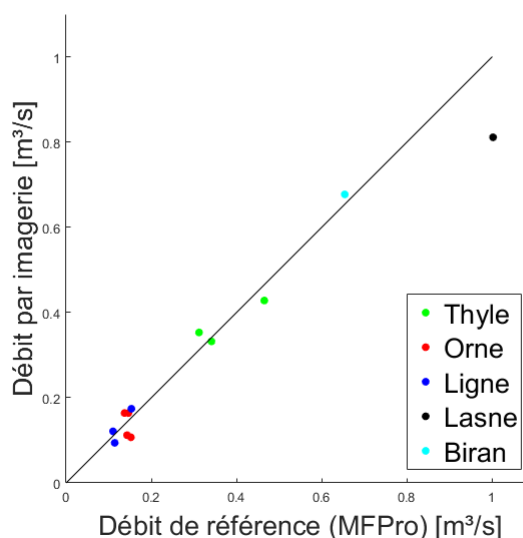


FIGURE 5.4 – Résultats des calculs de débits par imagerie

Pour conclure, le calcul de débits par notre méthode d'imagerie en rivière naturelle peut être considéré comme concluant au vu de l'erreur moyenne obtenue. En effet, au vu des conditions du terrain et des conditions climatiques parfois variées entre les différentes mesures, cela peut expliquer l'erreur.

De plus, notre référence est obtenue avec un appareil de mesure utilisant une méthode de calcul de débit simplifiée (méthode 3 ou 5 points), ce qui peut apporter une certaine incertitude. Cette incertitude est justement le sujet d'un TFE réalisé par Antoine Fourquet avec Mme Soares-Frazaio comme promotrice, en parallèle à la réalisation de ce mémoire.

## 4 Comparaison avec l'application *Discharge*

Dans le cadre de ce travail, une comparaison avec l'application *Discharge* a également été effectuée. En effet, cette application, comme expliqué dans le chapitre 1.3, propose de mesurer le débit d'une rivière à l'aide de son smartphone. Cette section vise à présenter et à commenter les résultats obtenus ainsi qu'à apporter des précisions quant aux conditions d'utilisation.

Tout d'abord, il est utile de préciser que des tentatives de mesure ont été faites sur la Ligne (une fois), sur la Thyle (deux fois), sur l'Orne (trois fois) et sur la Lasne (une fois). Cependant, l'application a réussi à calculer le débit seulement sur la Ligne (une fois), sur la Thyle (une fois) et sur la Lasne (une fois).

Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau 5.10 ci-dessous :

	Débit MFPro UCL [m <sup>3</sup> /s]	Débit imagerie [m <sup>3</sup> /s]	Débit <i>Discharge</i> [m <sup>3</sup> /s]	Erreur [%]
Thyle 06-05-19	0.341	0.332	0.170	50.2
Ligne 19-04-19	0.110	0.121	0.082	26.2
Lasne 09-05-19	1.002	0.811	1.020	1.8

TABLE 5.10 – Résultats des calculs de débits avec *Discharge*

L'erreur est définie par :

$$Erreur = \left| 1 - \frac{Q_{Discharge}}{Q_{reference}} \right|$$

où  $Q_{Discharge}$  est le débit obtenu par l'application *Discharge* et  $Q_{reference}$  est le débit de référence, c'est-à-dire le débit mesuré au MFPro de l'UCL.

Comme on peut l'observer dans le tableau 5.10 ci-dessus, les résultats sont très contrastés et ne suivent pas une même tendance. Ces différentes mesures et tentatives de mesures dépendent donc fortement des conditions de prises de mesures. Trois éléments importants dans les conditions d'utilisation ont donc été identifiés.

1. Luminosité, reflets et conditions climatiques

2. Accessibilité du site et orientation de la prise de vue
3. Section simplifiée utilisée par *Discharge* et paramètre de rugosité

#### 4.1 Luminosité, reflets et conditions climatiques

L'importance de l'influence de la luminosité et des reflets a été observée lors de la mesure sur la Thyle.

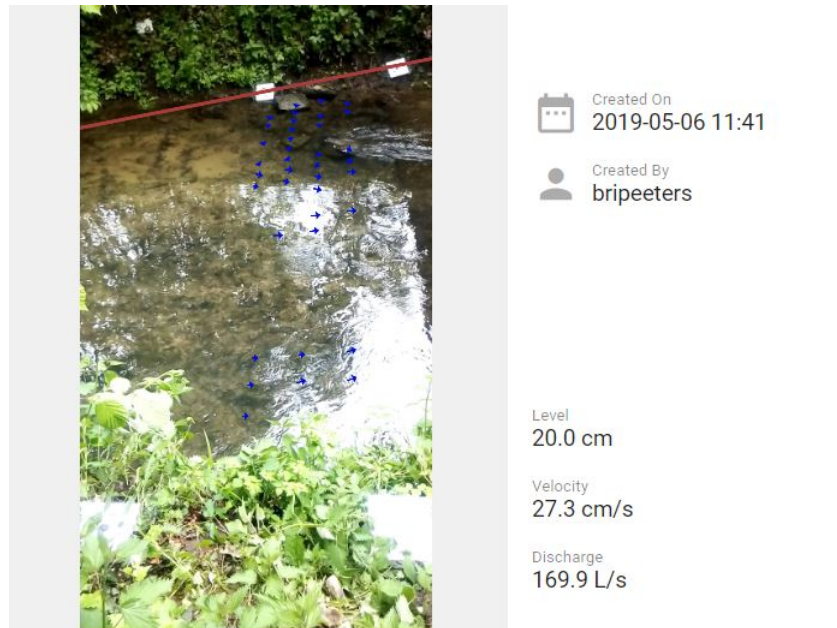


FIGURE 5.5 – *Discharge* - Reflets sur la Thyle

Comme le montre la figure 5.5, la présence d'une luminosité assez forte lors de la prise d'images avec l'application *Discharge* rend impossible la détection d'une vitesse sur l'ensemble de la section par l'application. Cela explique donc la sous-estimation du débit lors de son utilisation.

#### 4.2 Accessibilité du site et orientation de la prise de vue

L'accessibilité au site afin de pouvoir prendre une bonne prise de vue a son importance. En effet, après vérification, il s'agit de l'explication la plus vraisemblable en l'absence de résultats lors du premier essai sur la Thyle ainsi que sur l'Orne. En effet, [8] le manuel de *Discharge*, précise que la position de prise de vue ne doit pas être d'une hauteur trop élevée à la surface de l'eau notamment.

Le problème rencontré sur l'Orne est que les berges sont retenues par des murs de pierre. Il n'était donc pas possible de prendre une vidéo dans les conditions demandées par *Discharge*.

### 4.3 Sections simplifiées utilisées par *Discharge* et paramètre de rugosité

Dans notre utilisation de *Discharge*, nous définissons la section sur site. Cependant, en utilisant uniquement un smartphone, il est impossible de définir une section complexe. Les sections utilisées sont donc des sections simplifiées, ce qui peut apporter une certaine inexactitude. Une imprécision supplémentaire peut être apportée par l'estimation du paramètre de rugosité. Dans le cadre de cette étude, la section simplifiée utilisée était, pour chaque rivière, un trapèze.

En effet, dans le cas de la Ligne, l'erreur est limitée vu que l'endroit de prise de vidéo par *Discharge* est bétonné en forme de trapèze (voir figure 5.6). Il s'agit donc d'une section simplifiée. Le calcul du débit doit donc y être plus précis. Cependant, l'erreur peut varier en fonction de l'estimation du paramètre de rugosité (voir [8] *Manuel Discharge*).

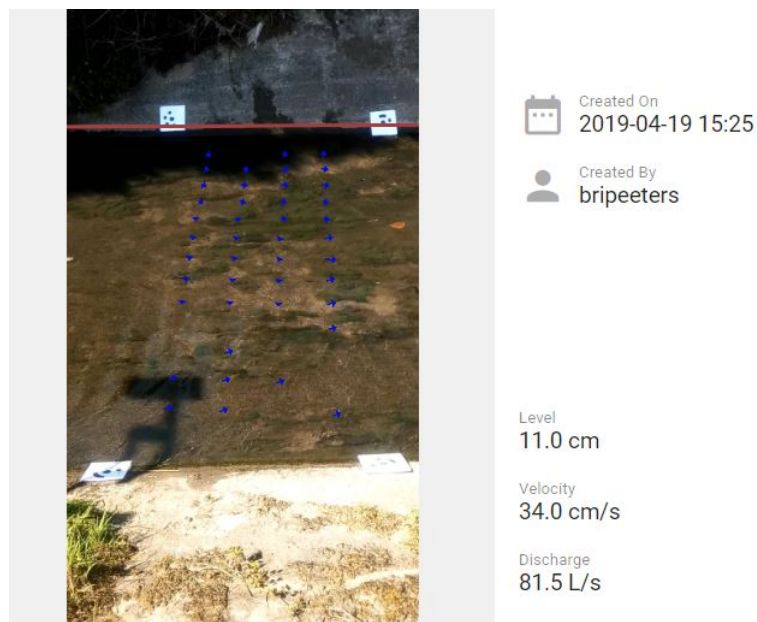


FIGURE 5.6 – *Discharge* - Ligne

Cependant, la simplification de la section peut apporter des doutes quant à la fiabilité d'une mesure. En effet, dans le cas de la Lasne, l'erreur n'est que de 1.8[%]. Cependant, comme le montre la figure 5.7 ci-dessous, la bathymétrie n'est pas du tout simple et la répartition calculée par *Discharge* des vitesses et des profondeurs n'est pas exacte.

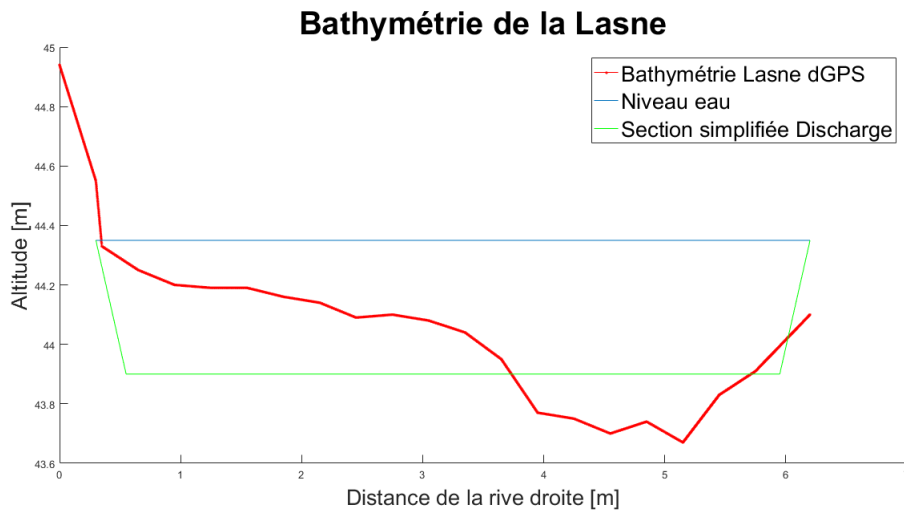


FIGURE 5.7 – *Discharge* - Bathymétrie de la Lasne

Lors de l'utilisation de *Discharge* sur cette section de la Lasne, il est possible d'observer la répartition des vecteurs vitesse tels que présentés sur la figure 5.8. D'une part, on observe, tout d'abord, que l'application détermine des vitesses plus faibles à proximité de la rive droite (en premier plan sur la figure 5.8), ce qui correspond à la partie de la section la moins profonde. Ces résultats sont conformes à la réalité. Il est cependant important de noter la présence de reflets lors de la prise d'images par l'application sur cette partie de la section, ce qui peut être source de perte de précision.

D'autre part, on observe que *Discharge* détermine des vitesses plus élevées dans la partie la plus profonde (à l'arrière plan sur la figure 5.8 et à zone à proximité de la rive gauche sur la figure 5.7), ce qui est également conforme à la réalité. On notera aussi que cette partie n'est que faiblement impactée par des reflets, ce qui peut rendre plus précise la mesure de cette partie de la rivière.

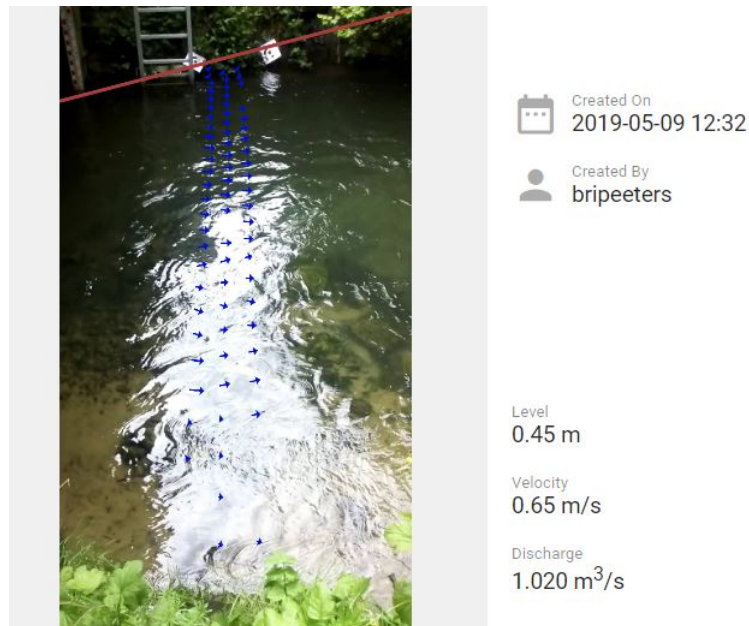


FIGURE 5.8 – *Discharge* - Lasne : bathymétrie complexe

L'estimation de la section simplifiée peut donc avoir une grande influence. En effet, ici, la hauteur moyenne a été fixée à 45 [cm] de manière assez arbitraire sur site en fonction des profondeurs observées. Par après, en traitant les données, il a été observé que cette hauteur était plus de l'ordre de 40 [cm]. La vidéo a été à nouveau traitée et le débit obtenu par *Discharge* est de 0.935 [m<sup>3</sup>/s], ce qui nous donne une erreur de 7 [%]. Cela montre donc l'influence que peut avoir la section simplifiée dans le cas de sections relativement complexes.

#### 4.4 Conclusion

Nous concluons donc que l'application *Discharge* est un bon outil pour avoir une estimation du débit sous certaines conditions. Il faudrait donc que la section soit bien connue et ait déjà été étudiée auparavant et que les conditions d'accès et climatiques soient propices à la prise d'images.

Selon l'utilisation que nous avons pu en faire, *Discharge* semble une solution relativement facile mais moins précise que la méthode par imagerie développée ici. De plus, elle donnera des résultats assez approximatifs pour quelqu'un possédant seulement un smartphone, un mètre et une paire de bottes. Néanmoins, cette application est un outil très facile et elle doit se développer afin de rendre l'hydraulique accessible au plus grand nombre.

# Chapitre 6

## Pistes d'amélioration

Un travail de fin d'études est, par définition, le fruit d'un travail appliqué et continu tout au long, dans notre cas, d'un quadrimestre. Il est également le point d'orgue mais également le point final de ces cinq dernières années d'apprentissage et d'ouverture au monde du travail. Il s'agit aussi du travail le plus important que nous avons eu l'occasion de réaliser depuis notre entrée à l'université. Pour des étudiants de dernière année, la richesse de ce travail réside dans le cadre où celui-ci évolue. Un cadre relativement libre où nous avons pu fixer nos objectifs, apprendre de nos erreurs, prendre le temps de réfléchir, d'analyser nos idées et de définir nos méthodes et surtout de profiter des nombreux questionnements pour nous guider vers le résultat présenté aujourd'hui.

Ce mémoire, dont la durée est limitée, s'inscrit dans un cadre de recherche plus global. En effet, il s'inscrit dans la suite de plusieurs autres mémoires et il servira peut être de base pour des prochaines recherches. Ce chapitre reprend donc les pistes que nous aurions aimées poursuivre, ou que nous jugeons intéressantes à développer dans la continuité de cette étude.

- Comme constater dans le chapitre 4, l'utilisation des GCPs est actuellement nécessaire. Il serait intéressant de s'affranchir de leur utilisation en utilisant des repères naturels sur les sections étudiées (pierres, tronc, etc.).
- Obtenir pour une section, en rivière, plus de mesures de débit par imagerie afin d'établir une courbe de tarage mettant en relation l'altitude de la nappe d'eau et le débit calculé par imagerie. Et à terme, comparer cette courbe avec les données du SPW du site *Aqualim*.
- Obtenir un procédé où, sur base de positions d'un nombre déterminé de caméras chacune ayant une position fixe, il serait possible d'obtenir toutes les images nécessaires au calcul du débit. Cela permettrait donc de développer des stations de mesure par imagerie.
- Essayer de déterminer la quantité minimale d'ensemencement nécessaire ou les conditions de remous, etc. afin de ne plus avoir besoin d'ensemencement dans le calcul de vitesse.

- 
- Élaborer des relations qui optimiseraient la gestion de la luminosité par PIVLab afin de limiter les effets néfastes des reflets.
  - Développer une routine (*Matlab* par exemple) permettant de calculer le débit. Il s'agit donc de regrouper les outils des différentes méthodes en un seul outil (par exemple, avec comme entrées : les résultats de l'analyse PIVLab, le fichier de bathymétrie et le DEM de la berge).
  - En laboratoire, une analyse plus poussée du coefficient de débit, sur l'ensemble des sections, pourrait être intéressante afin de confirmer les limites du modèle réduit constatées ici.
  - Il pourrait être intéressant d'appliquer notre méthode, en laboratoire et en rivière naturelle, dans le cas des écoulements transitoires afin de pouvoir simuler au mieux les crues, etc.
  - Développer la méthode de mesure de débit en rivière pour permettre de l'utiliser avec un drone.

# Conclusion

Face aux changements climatiques et aux besoins de plus en plus grands de disposer de données hydrométriques, il apparaît que les appareils de jaugeage traditionnels ne répondent plus tout à fait aux demandes actuelles. En effet, au vu de leur caractère intrusif, de leurs coûts ainsi que de l'impossibilité de les utiliser lors d'évènements exceptionnels (crues par exemple), ces méthodes seront probablement remplacées à l'avenir par des méthodes non-intrusives, comme la LSPIV ou la mesure de hauteur par photogrammétrie. Dans le domaine de l'hydraulique, ces méthodes se développent de manière assez importante ces dernières années grâce aux diverses avancées technologiques dont elles peuvent bénéficier.

L'objectif de ce mémoire consiste à déterminer par imagerie le débit d'une rivière, en laboratoire et en milieu naturel. Le mode opératoire consiste en :

- Pour le calcul du niveau d'eau et de l'aire de la section :
  1. Acquisition d'images avec un appareil photos
  2. Traitement et analyse des images
  3. Modélisation avec le programme Agisoft-Photoscan®
  4. Création d'un fichier exploitable (DEM)
  5. Analyse du DEM avec le modèle numérique correspondant
- Pour le calcul de la vitesse et du débit :
  1. Prise de vidéos de l'écoulement avec un appareil photos (avec ou sans ensemencement, dépendant des conditions)
  2. Traitement des vidéos (avec PIVLab).
  3. Calcul du coefficient de débit et calcul du débit

Dans un premier temps, nous avons donc parcouru la technique d'analyse PIV et l'utilisation de la photogrammétrie afin de calculer le niveau d'eau en laboratoire (méthode de [11] [DE SCHOUTHEETE et HUBERT, 2018]). Ensuite, nous avons pu, par une analyse approfondie des profils de vitesses, mettre en commun ces mesures afin de déterminer le débit en laboratoire en écoulement permanent. Par cette méthode, le débit a pu être calculé avec une erreur moyenne inférieure à 5%.

Par la suite, nous avons voulu expérimenter cette méthode en rivière naturelle et ce dans la suite des travaux réalisés par [2] [BIA et SOMERS, 2018] et de [20] [HELLEBAUT, 2018]. Sur le terrain, grâce à notre méthode, les débits ont été calculés sur cinq rivières différentes avec une erreur moyenne de l'ordre 12% et un écart-type de l'ordre de 6%. Ces résultats sont donc encourageants quant à la précision de la méthode

---

et à sa robustesse. Afin de vérifier la fiabilité de notre outil de mesure de référence en rivière (le courantomètre MFPro), des comparaisons avec le SPW ont également été réalisées. Nous pouvons donc conclure que cette méthode de mesure du débit par imagerie fonctionne. Cependant son niveau de précision pourrait encore être amélioré.

Ce travail a pu également mettre en évidence la difficulté de mise en oeuvre sur certaines rivières. C'est le principal défaut de cette méthode : différents paramètres influencent la qualité de la prise de mesure, comme l'accès, la luminosité, les remous, la profondeur, etc.

Le développement de la technologie n'a été utilisée dans le domaine de l'hydraulique que récemment. Pourtant, avec l'avancée des techniques d'imagerie, cette technologie offre un énorme potentiel pour l'étude des rivières.

La méthode développée ici permet d'obtenir les données nécessaires au calcul du débit en quelques secondes alors qu'un jaugeage traditionnel précis peut prendre jusqu'à cinq minutes par mètre de rivière jaugée<sup>1</sup>. Le principal avantage de cette méthode est le gain de temps car elle permettra de mesurer des débits des rivières en crue et ainsi obtenir des mesures régulièrement, de manière systématique.

Ces résultats sont très encourageants. Continuer à développer cette méthode et la combiner à des outils informatiques performants permettrait de la rendre plus accessible et plus automatisée. La mesure de débit par imagerie pourra dans le futur donner des résultats plus précis. A terme, elle pourrait prédire et mesurer certains phénomènes ou catastrophes naturelles.

---

1. Information fournie par le SPW lors du jaugeage de la Lasne, 09-05-2019

# Table des figures

1.1	Distribution des vitesses sur une verticale - [42][ZECH, 2008] . . . . .	5
1.2	Principe du calcul de la vitesse le long d'une verticale - [26][LE COZ et al., 2012] . . . . .	6
1.3	Évolution de $\alpha_{log}$ et $\alpha_{surf}$ avec le rayon hydraulique $R_h$ - [19][HAUET, MORLOT et DAUBAGNAN - 2018] . . . . .	8
1.4	Evolution de $\alpha_{log}$ et $\alpha_{surf}$ avec le rapport d'aspect B/Rh - [19][HAUET, MORLOT et DAUBAGNAN - 2018] . . . . .	8
1.5	Boxplot de $\alpha$ pour chaque section selon la rugosité du lit (Rh/d50) - [19][HAUET, MORLOT et DAUBAGNAN - 2018] . . . . .	9
1.6	Loi puissance obtenue avec <i>Discharge</i> ou par calcul standard (MID) [7][CARREL M. & al - 2019] . . . . .	11
1.7	Débit déterminé par <i>Discharge</i> en fonction du débit mesuré par MID [7][CARREL M. & al - 2019] . . . . .	12
1.8	Distribution de l'erreur relative des erreurs observées dans la figure [7][CARREL M. & al - 2019] 1.7 . . . . .	13
1.9	Photo prise depuis l'aval du canal . . . . .	14
1.10	Automate de mesure sur le canal . . . . .	15
1.11	GoPro <sup>®</sup> utilisée dans ce mémoire . . . . .	16
1.12	Instruments de mesure en rivière naturelle . . . . .	17
2.1	Système d'axes . . . . .	21
2.2	Méthode 3 points - [17] Charte de la qualité de l'hydrométrie - Guide de bonnes pratiques . . . . .	24
2.3	Dispositif utilisé en laboratoire pour la PIV . . . . .	25
2.4	Analyse PIV sans ensemencement . . . . .	26
2.5	Analyse PIV sans ensemencement - Vitesses de surface moyennes . . . . .	27
2.6	Analyse PIV sans ensemencement - Comparaison vitesse de surface mesurée par PIV et par le tube de Pitot . . . . .	27
2.7	Analyse PIV avec ensemencement à saturation . . . . .	28
2.8	Analyse PIV avec ensemencement à saturation - Comparaison vitesses de surface mesurées par PIV et par le tube de Pitot . . . . .	29
2.9	Analyse PIV avec ensemencement faible . . . . .	30
2.10	Analyse PIV avec ensemencement faible - Vitesses de surface moyenne . . . . .	30
2.11	Analyse PIV avec ensemencement faible - Comparaison de vitesses de surface mesurée par PIV et par le tube de Pitot . . . . .	31
3.1	Positions des sections étudiées en laboratoire . . . . .	33
3.2	Exemple de section type divisée en zones de N verticales . . . . .	34

3.3	Calculs de débit avec coefficients de vitesse en laboratoire . . . . .	36
3.4	Calculs de débit avec coefficient de débit moyen par section en laboratoire	38
3.5	Calculs de débit avec coefficient de débit imposé à 1.25 en laboratoire .	39
4.1	Bathymétrie de la section étudiée sur la Thyle le 04 avril 2019 . . . . .	40
4.2	Bathymétrie de la section étudiée sur l’Orne le 19 avril 2019 . . . . .	41
4.3	Carte des rivières étudiées . . . . .	42
4.4	Échelle limnimétrique sur la Thyle à Court-Saint-Étienne . . . . .	43
4.5	Type de végétation acceptable - Ici le long de l’Orne à Blanmont . . . . .	44
4.6	Les différentes rivières étudiées . . . . .	45
4.7	GCPs sur la berge de la Thyle . . . . .	46
4.8	GCPs sur la berge de la Thyle : disposition et repère local . . . . .	47
4.9	Extrait du jeu de photos sur la Lasne - 09 mai 2019 . . . . .	48
4.10	Problèmes lors de l’acquisition des photos . . . . .	49
4.11	Étapes de la modélisation photogrammétrique in situ : exemple de la Lasne	49
4.12	Comparaison des mesures de débit du MFPPro par rapport aux mesures du SPW . . . . .	51
4.13	Analyse LSPIV sans ensemencement sur la Ligne . . . . .	52
4.14	Problème de reflets - Thyle 23-04-19 . . . . .	53
4.15	Analyse PIV sans ensemencement . . . . .	54
4.16	Analyse LSPIV avec ensemencement sur la Ligne . . . . .	55
4.17	Analyse PIV avec ensemencement . . . . .	56
4.18	Dispositif de prises d’images en rivière . . . . .	57
5.1	Méthode de calcul du niveau d’eau en rivière . . . . .	59
5.2	Résultats des calculs d’aire des sections . . . . .	60
5.3	Exemple de section type divisée en zones de N verticales . . . . .	60
5.4	Résultats des calculs de débits par imagerie . . . . .	64
5.5	<i>Discharge</i> - Reflets sur la Thyle . . . . .	66
5.6	<i>Discharge</i> - Ligne . . . . .	67
5.7	<i>Discharge</i> - Bathymétrie de la Lasne . . . . .	68
5.8	<i>Discharge</i> - Lasne : bathymétrie complexe . . . . .	69
A.1	GoPro® Hero4 . . . . .	a
A.2	MFPPro OTT® . . . . .	b
A.3	dGPS Leica® 1200 . . . . .	c
B.1	PIVlab : menu d’importation d’images . . . . .	d
B.2	PIVlab : menu d’importation d’images . . . . .	e
B.3	PIVlab : <i>Analyse settings</i> . . . . .	f
B.4	PIVlab : <i>Calibration</i> . . . . .	g
B.5	PIVlab : <i>Vector Validation</i> . Figure du dessus : résultats bruts. - Figure du milieu : résultats après la première validation. - Figure du bas : résultats après validation de vecteur et interpolation des vecteurs manquants. . .	h
B.6	PIVlab : <i>Extraction</i> . Graphique de la <i>Velocity magnitude</i> de la ligne mauve horizontale. . . . .	j
C.1	Étapes de la modélisation photogrammétrique in situ : exemple de la Lasne	l

# Liste des tableaux

2.1	Vérification de la précision du tube de Pitot en laboratoire . . . . .	24
3.1	Mesures d'aires des sections par photogrammétrie en laboratoire . . . . .	33
3.2	Coefficient $\alpha$ pour les sections étudiées en laboratoire . . . . .	34
3.3	Coefficient $\beta$ pour les sections étudiées en laboratoire . . . . .	35
3.4	Calculs des erreurs du calcul du débit avec les coefficients de vitesse . . . . .	35
3.5	Coefficient de débit pour la section 10 aux différents débits . . . . .	37
3.6	Coefficient de débit pour les sections étudiées en laboratoire . . . . .	37
3.7	Calculs de débits avec les coefficients de débit moyen par section . . . . .	37
3.8	Calculs de débit avec un coefficient de débit imposé à 1.25 . . . . .	38
4.1	Altitude de la mire de l'échelle limnimétrique des rivières . . . . .	43
4.2	Coordonnées des GCPs sur la Thyle le 19 avril . . . . .	47
4.3	Résultats des comparaisons des débits mesurés par le MFPro de l'UCL et Aqualim . . . . .	50
5.1	Erreurs par rivière sur le calcul d'aire . . . . .	59
5.2	Calculs du coefficient de débit pour chaque section en rivière . . . . .	61
5.3	Calculs du débit de la Thyle . . . . .	62
5.4	Calculs du débit de l'Orne . . . . .	62
5.5	Calculs du débit de la Ligne . . . . .	62
5.6	Calcul du débit du Biran . . . . .	63
5.7	Calcul du débit de la Lasne . . . . .	63
5.8	Calcul du débit de la Lasne - Référence SPW . . . . .	63
5.9	Erreurs sur le calcul des débits en rivière . . . . .	64
5.10	Résultats des calculs de débits avec <i>Discharge</i> . . . . .	65
A.1	Caractéristiques du trusquin . . . . .	c
E.1	Résultats des comparaisons des débits mesurés par le MFPro <sup>®</sup> de l'UCL et Aqualim . . . . .	q
F.1	Résultats des mesures en laboratoire par imagerie avec coefficients de vitesse . . . . .	r
F.2	Résultats des mesures en laboratoire par imagerie avec coefficients de débit moyens . . . . .	s
F.3	Résultats des mesures en laboratoire par imagerie avec coefficient de débit imposé à 1.25 . . . . .	s
G.1	Résultats des mesures de niveau d'eau et des calculs d'aire en rivière . . . . .	t

# Bibliographie

- [1] ALMEIDA T. G. & AL. : Estimating river bathymetry from surface velocity observations using variational inverse modeling. *Journal of atmospheric and oceanic technology*, pages 21–34, 2018.
- [2] BIA TRISTAN et SOMERS HAROLD : *Mesure du champ de vitesses superficielles en rivière à partir d'un drone*. Mém. de Master. Université Catholique de Louvain, 2018.
- [3] BIRGAND F. & AL. : Mesure des débits à l'aide de débitmètres ultrasoniques doppler. cas des petits cours d'eau ruraux. *Ingénieries - E A T, IRSTEA*, pages 23–38, 2005.
- [4] BOUSMAR D. et FRASELLE G. : *Canal à lit composé et programme hydrocap. descriptif, mode d'emploi*. Mém. de Master. Université Catholique de Louvain, 2004.
- [5] CARBONELL M. : Photogrammétrie [en ligne]. Récupéré sur Encyclopaedia Universalis :<http://www.universalis-edu.com/encyclopedie/photogrammetrie/>, 2019.
- [6] CARLIER D'ODEIGNE OLIVIER, FRANZINI FABIAN, COUTINHO GUILHERME, JANSSENS NILS et SOARES-FRAZAO SANDRA : Measurement of the free-surface elevation for flows in complex topography using photogrammetry. *SimHydro 2017*, 2017.
- [7] CARREL M., DETERT M., PEÑA-HARO S. et LUETHI B. : Evaluation of the dischargeapp : a smartphone application for discharge measurements. *HydroSen-Soft, International Symposium and Exhibition on Hydro-Environment Sensors and Software*, pages 41–49, 2019.
- [8] CARREL M. : *Discharge : user manual*. 2017.
- [9] CHANDLER J. H. & AL. : Measuring a dynamic and flooding river surface by close range digital photogrammetry. *International Society for Photogrammetry and remote Sensing*, pages 211–216, 2008.
- [10] COUTINHO J. H. et JANSSENS N. : *Mesure de la surface libre d'écoulement en bathymétrie complexe par photogrammétrie*. Mém. de Master. Université Catholique de Louvain, 2017.
- [11] DE SCHOUTHEETE FERDINAND et HUBERT THIBAUT : *Mesure du niveau d'eau par photogrammétrie en laboratoire*. Mém. de Master. Université Catholique de Louvain, 2018.
- [12] DIETRICH J. : Bathymetric structure-from-motion : extracting shallow stream bathymetry from multi-view stereo photogrammetry. *Earth Surface processes and Landforms*, pages 355–364, 2016.

- [13] DUDKA T. : *Photogrammétrie et Modélisation 3D à partir d'images drone au sein de TPLM-3D*. Mém. de Master. Strasbourg : INSA, 2015.
- [14] FERREIRA E. & AL. : Automated extraction of free surface topography using sfm-mvs photogrammetry. *Flow Measurement and Instrumentation.*, pages 243–249, 2018.
- [15] FRANZINI F. & AL. : Measurement of the free-surface elevation in a steady flow in complex topography using photogrammetry. 2016.
- [16] FRANZINI F. et SOARES-FRAZAO S. : Efficiency and accuracy of lateralized hll, hlls and augmented roe's scheme with energy balance for river flows in irregular channels. *Applied Mathematical Modelling.*, 2016.
- [17] GROUPE DOPPLER HYDROMÉTRIE : Charte qualité de l'hydrométrie - guide de bonnes pratiques. *Ministère de l'environnement, de l'énergie et de la mer - Direction générale de la prévention des risques - Service des risques naturels et hydrauliques - Service central d'hydrométéorologie et d'appui à la prévision des inondations*, pages 26–46, 2017.
- [18] HAUET A., LE COZ J., DRAMAIS G., CARRÉ C. et LEGRAS D. & AL. : Méthodes innovantes pour la mesure des débits fluviaux en continu : profileur doppler fixe horizontal (hadcp) et analyse d'images (lspiv). *La Houille Blanche - Revue internationale de l'eau*, pages 123–131, 2009.
- [19] HAUET A., MORLOT T. et DAUBAGNAN L. : Velocity profile and depth-averaged to surface velocity in natural streams : A review over a large sample of rivers. *River Flow 2018*, pages 1–8, 2018.
- [20] HELLEBAUT FRANÇOIS-XAVIER : *Mesure du niveau d'eau par photogrammétrie à partir d'un drone*. Mém. de Master. Université Catholique de Louvain, 2018.
- [21] HUAYONG C. & AL. : Investigation of vertical velocity distribution in debris flows by piv measurement. *Geomatics Natural Hazards and Risk*, 8:1631–1642, 2017.
- [22] LARRATE FRÉDÉRIQUE, JOANNIS CLAUDE, MIGNOT EMMANUEL, RIVIERE NICOLAS et LIPEME KOUYI GISLAIN : Guide technique : fiabiliser les mesures de vitesse - représentativité spatiale des mesures en continu de vitesse et incertitudes sur les mesures de débit. *IFSTTAR - Institut Français des Sciences et Technologies des Transports, de l'Aménagement et des Réseaux.*, 2016.
- [23] LEJOT J. & AL. : Very high spatial resolution imagery for channel bathymetry and topography from an unmanned mapping controlled platform. *Earth Surface Processes and Landforms*, pages 1723–1725, 2007.
- [24] LANE S. N. : The measurement of river channel morphology using digital photogrammetry. *Photogrammetric record*, pages 937–961, 2000.
- [25] MICHELETTI N., CHANDLER J. et LANE S. N. : Structure from motion (sfm) photogrammetry. 2015.
- [26] LE COZ J. & AL. : Uncertainty in open-channel discharges measured with the velocity-area method. *Flow Measurement and Instrumentation*, pages 18–29, 2012.
- [27] LE COZ J. & AL. : Erratum to "uncertainty in open-channel discharges measured with the velocity-area method [flow meas. instrum. 26 (2012) 18-29]". *Flow Measurement*, pages 193–194, 2015.
- [28] Mathworks. Récupéré sur :<https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/ginput.html>, 2019.

- [29] MURILLO J. et GARCIA-NAVARTO P. : Accurate numerical modeling of 1d flow in channels with arbitrary shape. application of the energy balanced property. *Journal of Computational Physics*, pages 222–248, 2014.
- [30] NGUYEN L. S., SCHAELEI B., SAGE D., KAYAL S., JEANBOURQUIN D., BARRY D.A. et ROSSI L. : Vision-based system for the control and measurement of wastewater flow rate in sewer systems. *Water Science & Technologie*, pages 2281–2289, 2009.
- [31] PEIPE J. et STEPHANI M. : Performance evaluation of a 5 megapixel digital metric camera for use in architectural photogrammetry. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XXXIV Part 5/W12.
- [32] Professional Edition. (Versions 1.1 (2015)) : Agisoft photoscan manuel de l'utilisateur. Récupéré sur : [https://www.agisoft.com/pdf/manuals\\_other/pscan\\_pro\\_fr\\_1\\_1.pdf](https://www.agisoft.com/pdf/manuals_other/pscan_pro_fr_1_1.pdf).
- [33] Professional Edition. (Versions 1.4 (2018)) : Agisoft photoscan user manual. Récupéré sur : [https://www.agisoft.com/pdf/photoscan-pro\\_1\\_4\\_en.pdf](https://www.agisoft.com/pdf/photoscan-pro_1_4_en.pdf).
- [34] RION G. : *Vitesse moyenne d'un écoulement à surface libre à partir de mesures des vitesses de surface par une méthode LSPIV*. Mém. de Master. Université Catholique de Louvain, 2017.
- [35] SERRE F. : Contribution à l'étude des écoulements permanents et variables dans les canaux (conclusion). *La Houille Blanche*, pages 830–872, 1953.
- [36] SPW. (2017) : Aqualim. Récupéré sur : <http://aqualim.environnement.wallonie.be/GeneralPages.do?method=displayStaticPage&page=introduction&time=2019-05-17%2011:21:09.63#>.
- [37] TERMINI D. et DI LEONARDO A. : Efficiency of a digital particle image velocimetry (dpiv) - method for monitoring the surface velocity of hyper-concentrated flows. *Geosciences*, 2018.
- [38] THEULE J. I. & AL. : Exploiting lspiv to assess debris-flow velocities in the field. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, pages 1–13, 2018.
- [39] THOLLET & AL. : Mesure de débit en rivière par station radar hauteur/vitesse selon la méthode de la vitesse témoin. *La Houille Blanche - Revue internationale de l'eau, EDP Sciences*, pages 9–15, 2017.
- [40] VILLENEUVE A. & AL. : Influence of slight differences in environmental conditions (light, hydrodynamics) on the structure and function of periphyton. *Aquatic Sciences, Research Across Boundaries*, pages 33–44, 2009.
- [41] WELBER M. & AL. : Field assessment of noncontact stream gauging using portable surface velocity radars (svr). *Water Resources Research*, pages 1108–1126, 2016.
- [42] ZECH Y. : *Hydraulique fluviale - Anciens syllabus*. Université Catholique de Louvain, 2008.
- [43] ZECH Y., SOARAS FRAZAO S. et FENT I. : Dam-break flow experiments over mobile bed velocity profile. *Journal of Hydraulic Research.*, 2018.

# Annexes

# Annexe A

## Descriptif des appareils de mesures

### A GoPro® Hero 4

Les vidéos et les photos ont toutes été prises grâce à la GoPro® que ça soit en laboratoire ou en rivière. Nous avons essayé le plus possible de rester dans le mode *narrow* ou *medium* afin de diminuer les distorsions dûes au grand angle.

Son utilisation a été limitée à des vidéos en 1080 pixels et des photos prises avec 12 Mpx afin de pouvoir traiter les résultats sans que ce traitement ne prenne plusieurs jours.



FIGURE A.1 – GoPro® Hero4

### B Courantomètre MFPro OTT®

Le courantomètre à induction magnétique OTT® MF pro est destiné aux mesures de débit de 0 à 6 [m<sup>3</sup>/s]. Il convient parfaitement à des vitesses d'écoulement réduites ou un taux élevé de particules en suspension.

Sa précision est de  $\pm 2\%$  de la valeur calculée, pour les vitesses de 0 à 3m/s l'erreur est de  $\pm 0,015$  [m/s] et cette imprécision ne diminue pas sur les débits de 3 à 5 [m/s] mais le pourcentage d'erreur diminue donc mathématiquement parlant. <sup>1</sup>



FIGURE A.2 – MFPro OTT®

## C dGPS Leica® 1200

La prise des coordonnées des marqueurs ainsi que la bathymétrie a été réalisée par le dGPS Leica® 1200 (voir figure A.3). Celui-ci obtient les coordonnées des points calculés dans le système de coordonnées Lambert72 qui est le système de géoréférence en Belgique.

Le dGPS Leica® 1200 est connecté au réseau WALCORS qui offre une correction RTK afin d'augmenter la précision de l'ordre du centimètre. Les erreurs lors de prise de mesure variaient fortement à cause de la végétation. Nous nous sommes fiés aux coordonnées GPS seulement quand nous étions dans la gamme du 0,01 à 0,04 [m]. <sup>2</sup>

---

1. Informations issues du site <https://www.ott.com/fr-fr/produits/le-debit-deau-70/ott-mf-pro-177/>

2. Informations du site : [https://w3.leica-geosystems.com/downloads123/zz/gps/general/brochures/GPS1200\\_brochure\\_fr.pdf](https://w3.leica-geosystems.com/downloads123/zz/gps/general/brochures/GPS1200_brochure_fr.pdf)



FIGURE A.3 – dGPS Leica® 1200

## D Trusquin

Le trusquin est un appareil de mesure utilisé pour relever les niveaux d'eau sans perturber l'écoulement. Dans un premier temps, il faut calibrer le trusquin et définir le point du niveau zéro. La précision de l'appareil atteint  $\pm 0,003$  mm. Le modèle du trusquin de la marque Mitutoyo® a les caractéristiques suivantes :

Capacité	0-200 mm
Précision	$\pm 0,003$ mm

TABLE A.1 – Caractéristiques du trusquin

# Annexe B

## Utilisation de PIVLab

Cette annexe sera un résumé de ce qu'ont déjà réalisé [2] [BIA & SOMERS - 2018] pour l'utilisation de PIVlab. PIVlab est un logiciel opensource. La version 1.43 que nous avons utilisée, est celle de 2018.

De nombreuses aides sont disponibles sur internet pour comprendre et utiliser le logiciel, notamment un tutoriel, un forum, des vidéos.

### A Importation d'images

Après le partitionnement des vidéos en images, la première étape sur PIVlab est d'importer celles que l'on souhaite analyser.

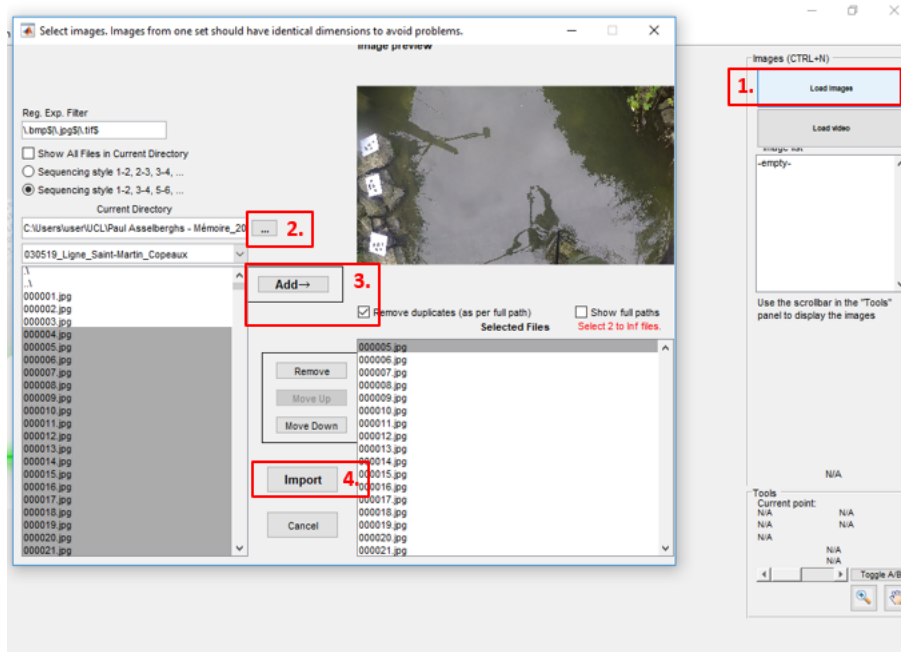


FIGURE B.1 – PIVlab : menu d'importation d'images

En suivant les numéros de 1 à 4, vous pouvez facilement sélectionner les fichiers à importer, les ajouter et les importer pour l'analyse.

## B Paramètres d'analyse

### B.1 Délimitation de la zone d'étude : *Region Of Interest* (ROI)

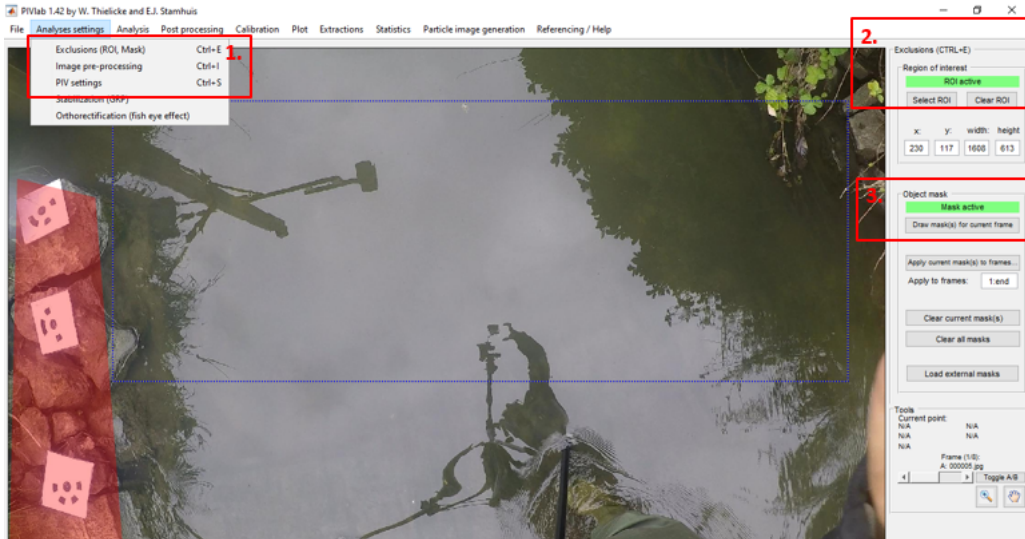


FIGURE B.2 – PIVlab : menu d'importation d'images

Sur cet onglet, on délimite la zone à analyser (la ROI) ou on exclut les zones qu'on ne souhaite pas conserver (on place un *mask*). Si on applique un *mask* on doit l'appliquer à toutes les images grâce à "*Apply to all frames*". L'utilité de cette étape est d'éliminer les éléments qui perturberaient l'analyse tel que des branches, rochers, etc.

## B.2 Image pre-processing & PIV settings

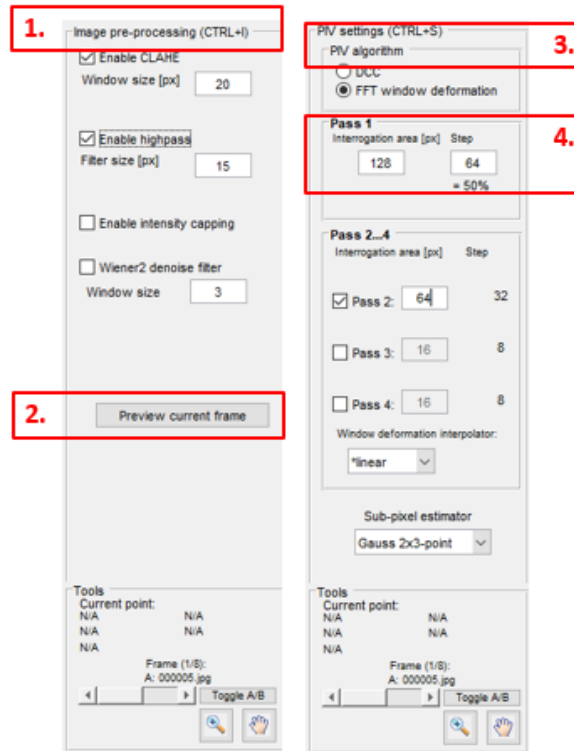


FIGURE B.3 – PIVlab : *Analyse settings*

Dans la figure B.3, le menu de gauche est celui du menu *Analyse settings* → *Image pre-processing*. Les filtres désirés peuvent être visualisés afin de juger de leur efficacité. Selon la luminosité, le contraste des traceurs, etc, un filtre ne sera pas aussi utile que dans telle ou telle autre situation. Dans la figure de droite (*Analyse settings* → *PIV settings*) on nous propose de choisir l'algorithme d'analyse et la taille en pixels des aires d'interrogation.

## C Calibration

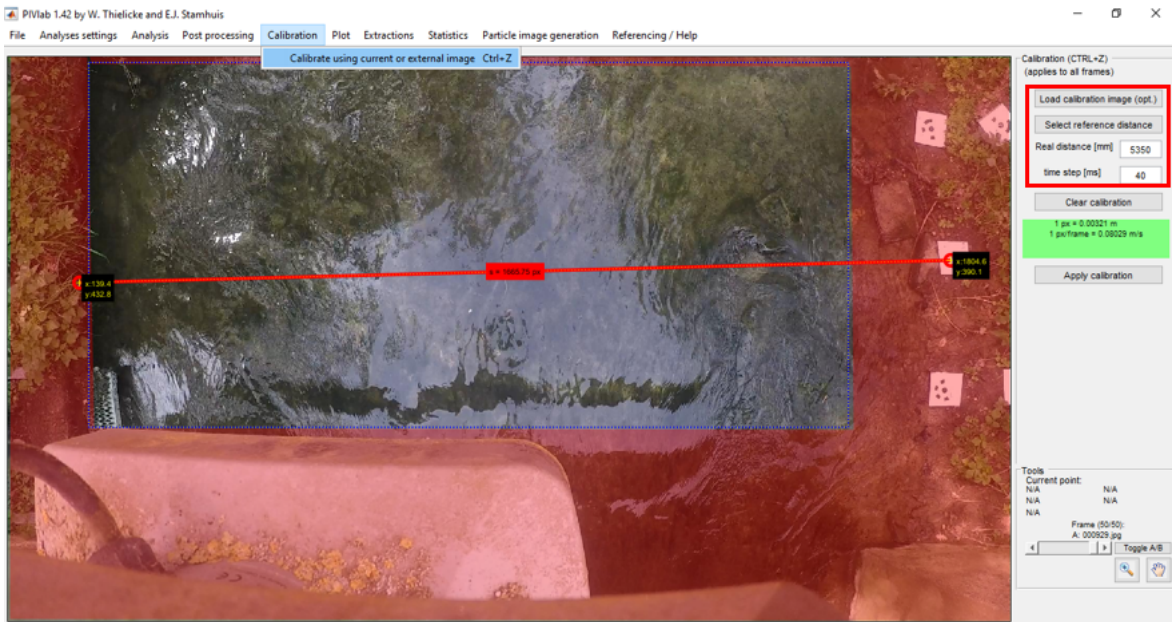


FIGURE B.4 – PIVlab : *Calibration*

La calibration est cruciale car elle transforme une distance en pixel en distance métrique. On l'effectue soit en téléchargeant une image de calibration soit en donnant une distance entre 2 points de référence. Le programme fera le ratio entre le nombre de mètre (en millimètre) par pixel. Afin de finaliser la calibration, il faudra indiquer le pas de temps entre 2 images successives. Dans notre cas, ce pas de temps était de 25 *fps* (*frame per second*) et donc 40 ms. Cette information va permettre de calculer la vitesse (en m/s) équivalente à un déplacement sur l'image d'un pixel par images successives.

## D Vector Validation

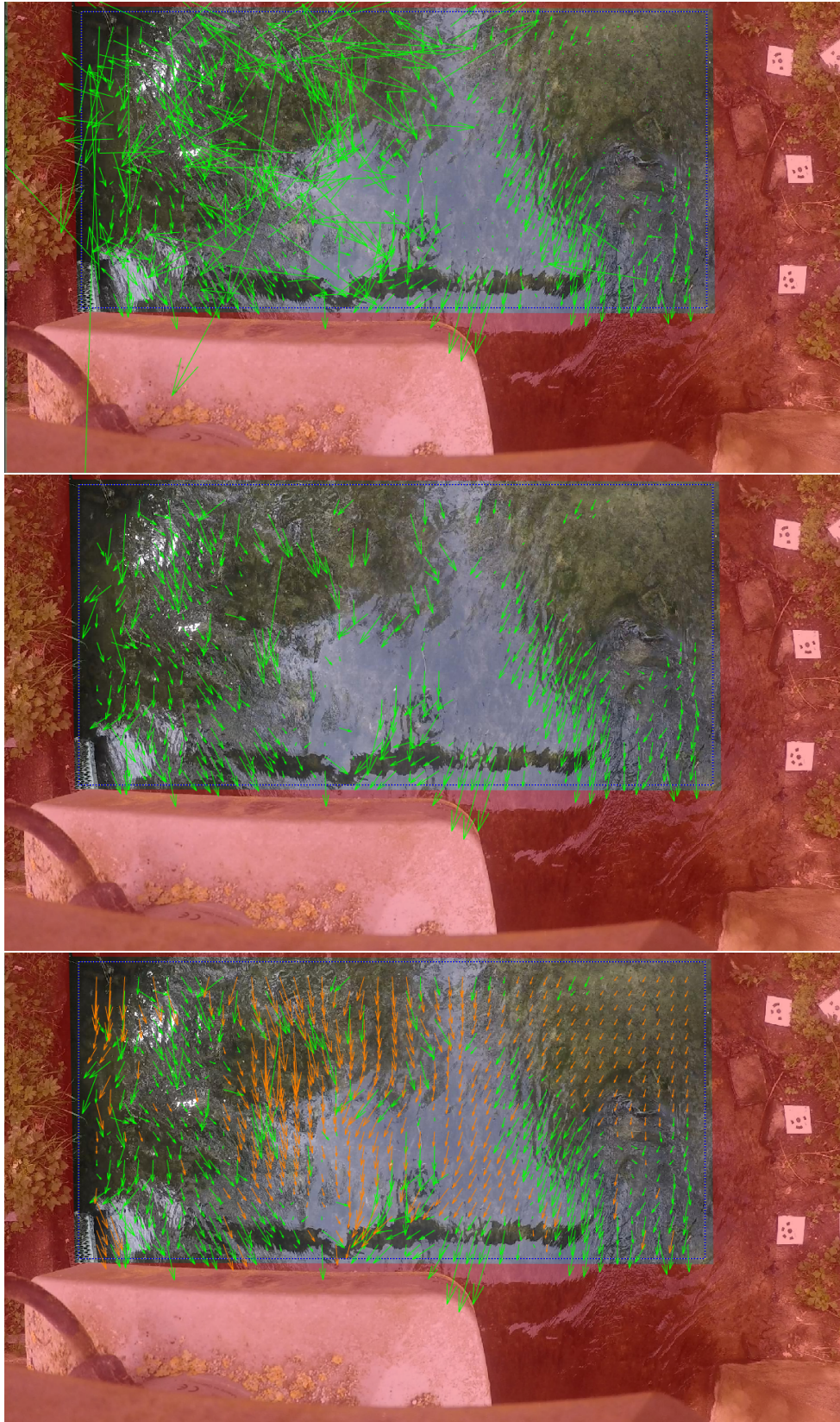


FIGURE B.5 – PIVlab : *Vector Validation*. Figure du dessus : résultats bruts. - Figure du milieu : résultats après la première validation. - Figure du bas : résultats après validation de vecteur et interpolation des vecteurs manquants.

La *Vector Validation* comporte quatre méthodes distinctes qui peuvent être appliquées en même temps ou non.

La première consiste à sélectionner la zone de vitesse (pour les 2 directions) sur un nuage de points des vitesses. On choisit instinctivement la zone où la concentration est la plus forte et qui ne présente pas d'incohérence. Pour réaliser cette étape, on sélectionne "*display all frames*" qui affiche sur un graphe tous les vecteurs de vitesse en fonction de leurs amplitudes de vitesses verticale et horizontale.

Le second filtre supprime les vecteurs dont les composantes verticale et horizontale sont trop éloignées de leur moyenne. Dans un premier temps, il calcule la moyenne  $\mu$  et l'écart-type  $\sigma$  pour chaque composante.  $n$  est choisi et les vecteurs dont une des composantes est plus grand ou plus petit que  $\mu \pm n * \sigma$  sont supprimés.

Le troisième filtre supprime les vecteurs dont l'amplitude est trop éloignée de la médiane des amplitudes des vecteurs avoisinants.

Le dernier filtre sert à rejeter manuellement certains vecteurs. Cette technique est évidemment plus laborieuse.

## E Résultats

Le calcul de la moyenne des vecteurs (*Plot* → *Derive parameters/ modify data* → *Calculate mean vectors*) crée un nouveau frame. Ensuite dans *Extractions* → *parameters from poly-line*, on trace une ligne, un cercle ou une poly-ligne afin d'extraire les paramètres suivants :

- Vorticité  $1/frame$
- Vitesse (amplitude)  $px/frame$
- Composantes u  $px/frame$
- Composantes v  $px/frame$
- Vitesses tangentes  $px/frame$
- Divergence  $1/frame$

*Plot data* affiche les résultats. *Save results as ASCII chart* exporte ceux-ci en fichier *.txt*. Les points 1 à 4 de la figure B.6 permettent d'accéder aux résultats, de dessiner la ligne (ou poly-ligne) souhaitée, d'afficher ceux-ci sur un graphe et de les extraire en fichier *.txt*. Toutes ces étapes sont aussi disponibles non pas pour une ligne mais pour une zone délimitée (*Extractions* → *parameters from area*).

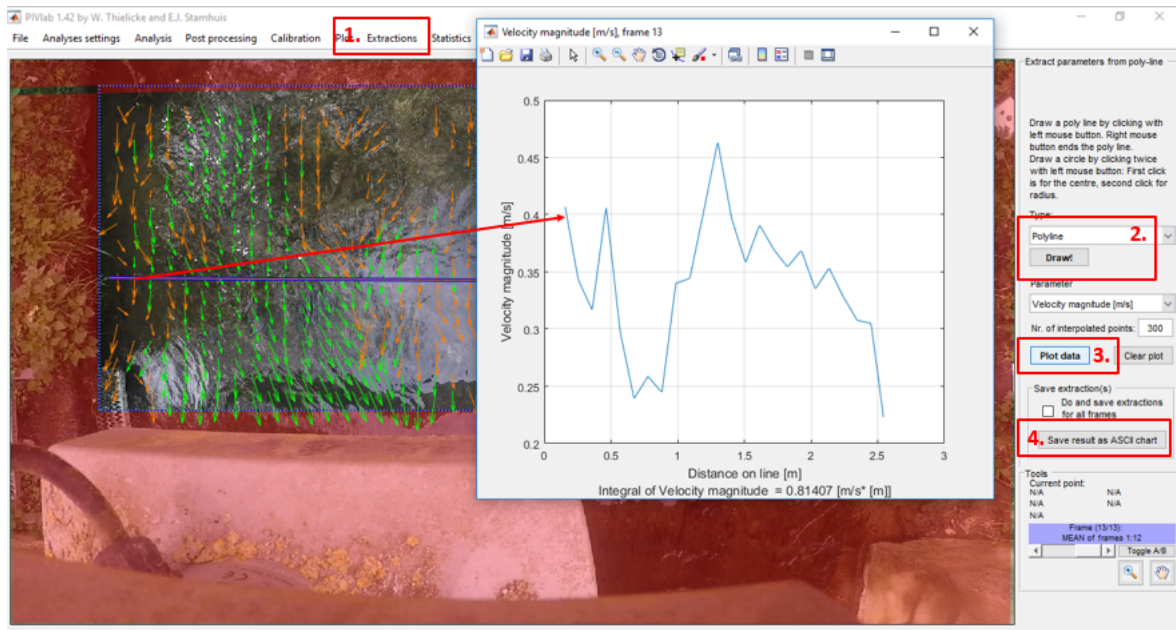


FIGURE B.6 – PIVlab : *Extraction*. Graphique de la *Velocity magnitude* de la ligne mauve horizontale.

# Annexe C

## Utilisation de Agisoft Photoscan<sup>®</sup>

Cette section présente les manipulations nécessaires à la construction d'un modèle en trois dimensions (et de son *Digital Elevation Model*, exploitable sur MATLAB). [32] [Agisoft-Photoscan : Manuel d'utilisateur] donne des conseils à propos des étapes à suivre. Cette méthode a été développée par [20] [HELLEBAUT, 2018]. La démarche à suivre est présentée ci-dessous :

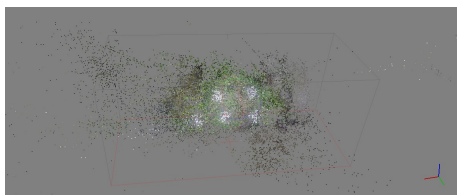
1. Importation des photos de la berge dans le logiciel de photogrammétrie PHOTOSCAN. Dans le but de réduire le temps de calcul des étapes 2 et 4, l'application de masques délimitant la *zone étudiée* est possible.
2. Alignement des photos. Lors de l'étape d'alignement des photos, le logiciel trouve des *feature points* correspondant à un pixel ou à un détail d'une image susceptible d'être reconnu sur d'autres images. Cela permet au logiciel de relier les différentes photos les unes aux autres. Ces *feature points* composent un premier nuage de points appelé *sparse point cloud* comme montré à la figure C.1a ci-dessous. Cette étape permet de déterminer les différents points de vue à partir duquel les photos sont prises.
3. Optimisation des positions de prises d'images. Après l'alignement, les GCPs sont repérés et enregistrés dans le repère cartésien défini à la figure 4.8. Un nouvel alignement est lancé et le résultat est maintenant un nuage de points *géoréférencés* à partir des cinq GCPs. Chacun des points du modèle se voit attribuer des coordonnées cartésiennes (x, y, z) par le logiciel.
4. Construction du *dense point cloud*. Les positions de l'appareil photo permettent au logiciel de déterminer ainsi que de comparer les zones couvertes par chaque photographie. Une comparaison est effectuée entre les pixels des zones communes. Un nouveau nuage de points (100 à 1000 fois plus dense que le *sparse point cloud*) est obtenu.
5. Construction du *mesh* (maillage en français). Le maillage relie l'ensemble des points du *dense point cloud*. Cela permet d'obtenir un modèle en trois dimensions continu qui peut être recouvert de texture pour un rendu continu, comme montré à la figure C.1c.
6. Création du *Digital Elevation Model* (DEM). Le DEM (voir figure C.1d) est généré à partir du *dense point cloud*. Il montre la topographie de la zone étudiée. Un code couleur permet de montrer l'altitude de chaque point, qui représente le relief du modèle. Ce DEM est exporté dans le but de pouvoir être traité sur MATLAB.

Comme expliqué par [20] [HELLEBAUT, 2018], nous disposons maintenant de tous les éléments pour comprendre la raison pour laquelle seule une des deux berges est modélisée.

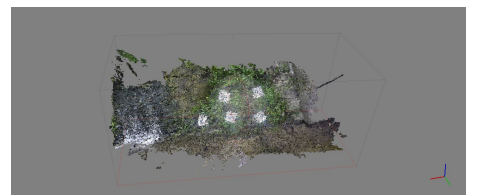
En effet, comme l'eau est en partie transparente et qu'elle est en mouvement constant, le logiciel présente des difficultés pour repérer des *features points* sur les photos au niveau de la surface de l'eau. De plus, la prise de photos en hauteur (depuis un pont par exemple) ne permet pas d'obtenir une résolution suffisante au niveau des berges. Dès lors, il est impossible pour le logiciel de construire un modèle complet de la rivière qui demande des prises d'images où seule la surface de l'eau est visible. Dans ces circonstances, il n'est pas possible pour le logiciel de faire "le lien" entre les deux berges. Cependant, nous constatons sur le résultat (voir figure C.1), que l'eau est en partie modélisée autour de la berge. Cette modélisation partielle de l'eau est indispensable au fonctionnement de la méthode de calcul de l'altitude de la nappe d'eau (et par la suite, du calcul de l'aire de la section).

Pour terminer, il faut exporter le DEM du modèle trois dimensions dans un format lisible par MATLAB. Cela permet, par la suite, d'analyser ce DEM via l'algorithme MATLAB. Il faut spécifier deux choses lors de l'exportation du DEM :

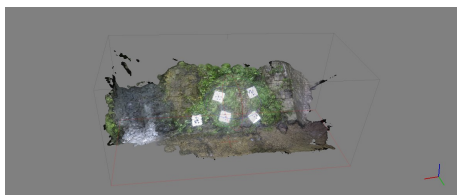
- Les limites d'abscisses et d'ordonnées du DEM exporté. Dans le cadre de ce mémoire, les limites vont de -2 [m] à 1 [m] ou de -1 [m] à 2 [m], en fonction des rivières, en abscisses et en ordonnées.
- La largeur et la longueur de chaque pixel. Le choix posé pour rendre plus facile l'analyse future est un carré de 0.001 [m] de côté. Le DEM exporté est donc défini tous les mm en x et en y.



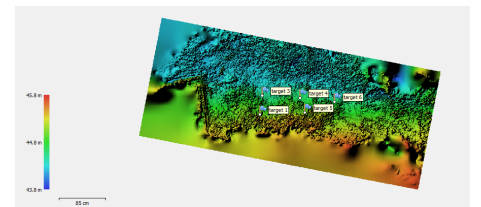
(a) *Sparse Dense Cloud* de la Lasne (25342 points)



(b) *Dense Point Cloud* de la Lasne (4670880 points)



(c) *Mesh* de la Lasne



(d) *DEM* de la Lasne

FIGURE C.1 – Étapes de la modélisation photogrammétrique in situ : exemple de la Lasne

Afin de pouvoir valider la méthode de calcul de l'aire de la section, 10 calculs de la section par photogrammétrie ont été réalisés sur 4 rivières différentes.

- Sur la Thyse, des résultats ont été obtenus le 23 avril et le 06 mai 2019.

- 
- Sur l’Orne, des résultats ont été obtenus le 11 et 19 avril ainsi que le 03 et 07 mai 2019.
  - Sur la Ligne, des résultats ont été obtenus le 11 et 19 avril ainsi que le 03 mai 2019.
  - Sur la Lasne, un résultat a été obtenu le 09 mai.

# Annexe D

## Mode d'emploi

Dans cette annexe, nous expliquerons les protocoles suivis en laboratoire et en rivière. Ces étapes nous les avons suivies tout au long de notre mémoire pour reproduire les mêmes gestes et être certains de ne rien oublier. Pour d'autres utilisateurs qui veulent suivre la même démarche, cela peut les guider. Évidemment, ce n'est pas le seul moyen d'obtenir des données LSPIV. Pour rappel, nous utilisons une GoPro® Hero4 et un OTT® pour la rivière ou d'un tube de Pitot pour le laboratoire. Vous pourrez trouver une liste du matériel à utiliser en annexe [H](#).

### A En laboratoire

#### A.1 Détermination du niveau d'eau

Les étapes 1 à 4 sont des manipulations à faire sur le canal tandis que les suivantes traitent de l'analyse à faire.

1. Déterminez le débit à la pompe.
2. Placez les repères détectables par Agisoft-Photoscan®.
3. Prenez le niveau d'eau en différents points au trusquin.
4. Prenez des photos sous différents angles du canal.
5. Traitez les photos dans le logiciel Photoscan®
6. Introduisez les résultats dans le code Matlab pour obtenir un modèle 3D.

#### A.2 Détermination du coefficient de débit

1. Déterminez le débit à la pompe.
2. Choisissez la section et créez son maillage, c'est à dire toutes les positions que prendra le tube de Pitot pour calculer le débit. Il faut donc connaître la profondeur de chaque verticale, la largeur et la hauteur d'eau.
3. Mise en place du tube de Pitot. On doit purger afin d'éviter toute bulle d'air qui déréglerait tout.
4. Mesures automatiques du tube de Pitot en suivant le maillage.
5. Filmez l'écoulement avec la GoPro sous une lumière rasante et un ensemencement à la pliolite.

6. Analysez les vidéos.
  - (a) Séquençage des vidéos en images.
  - (b) Mise en route de PIVlab. Dans le menu *Analyses settings*, désignez la ROI (*Region Of Interest*) que le programme analysera.
  - (c) Lancez l'analyse.
  - (d) Calibrez l'image.
  - (e) Validez les vecteurs dans le menu *Vector Validation*.
  - (f) Calculez la moyenne en suivant le menu *Plot* → *Derive parameters/modify data*.
  - (g) Finalement, exportez les résultats dans un fichier *.txt* en cliquant sur le menu *Extractions* qui prendra les données d'une zone ou une ligne tracée sur la zone analysée.

## B Mode opératoire en rivière

Les étapes de 1 à 8 détaillent les phases à suivre et les suivantes traitent de l'analyse.

1. Après avoir choisi la rivière sur Aqualim pour avoir une comparaison, choisissez la perpendiculaire que vous étudierez en plaçant le mètre ruban.
2. Placez au minimum 5 marqueurs sur une berge dont 2 perpendiculairement à la rivière et prenez leurs coordonnées GPS.
3. Prenez la bathymétrie grâce au GPS.
4. Calculer le débit via le MFpro<sup>®</sup> en définissant au minimum 10 verticales sur la section pour avoir moins de 10% du débit par verticale.
5. Filmez l'écoulement sans et puis avec ensemencement. Attention à bien vérifier les paramètres de la GoPro<sup>®</sup> qui doivent être en 1080 pixels et 25 images par seconde. Il faut également avoir toute la section sur le film pour pouvoir calibrer par la suite. Dans le cas avec ensemencement, les traceurs sont des copeaux de bois car ils sont écologiques, ils flottent et sont de couleur claire et de petite taille.
6. Pour la partie détermination du niveau d'eau nous prendrons une multitude de photos de la berge aux 5 marqueurs sous différents points de vue afin de reconstituer un modèle 3D par la suite grâce à Photoscan<sup>®</sup>.
7. Remplacez 4 marqueurs le plus proche de la surface de l'eau, 2 sur chacune des berges. Calculez la distance entre ceux situés sur la même rive et la distance avec le marqueur opposé obliquement. Rentrez ces valeurs dans l'application Discharge.
8. Prendre un film grâce à votre smartphone et suivre les instructions de l'application pour positionner la hauteur d'eau et obtenir un débit.
9. Une fois que tout est terminé, vous pourrez passer à l'analyse des mesures.
  - (a) Premièrement, on séquence les vidéos en images et on les importe dans PIVlab.
  - (b) Dans le menu *Analyses settings*, désignez la ROI (*Region Of Interest*) que le programme analysera.
  - (c) Lancez l'analyse.

- (d) Calibrez l'image.
- (e) Validez les vecteurs dans le menu *Vector Validation*.
- (f) Calculez la moyenne en suivant le menu *Plot* → *Derive parameters/modify data*.
- (g) Finalement, exportez les résultats dans un fichier *.txt* en cliquant sur le menu *Extractions* qui prendra les données d'une zone ou une ligne tracée sur la zone analysée.

Voilà qui termine le mode d'emploi. Il ne faut pas hésiter à modifier ce processus selon ses besoins pour un quelconque utilisateur futur. Il faut également garder en mémoire les constantes améliorations apportées à PIVlab par sa communauté.

# Annexe E

## Vérification de la précision du courantomètre MFPro OTT®

L'erreur est définie comme :

$$Erreur = \left| 1 - \frac{Q_{MFPro}}{Q_{Aqualim}} \right|$$

	Débit MFPro® UCL [m³/s]	Débit Aqualim [m³/s]	Erreur [%]
Thyle 04/04/19	0.465	0.432	7.68
Thyle 23/04/19	0.312	0.302	3.31
Thyle 06/05/19	0.341	0.338	0.88
Ligne 11/04/19	0.114	0.123	7.33
Ligne 19/04/19	0.110	0.108	2.27
Ligne 03/05/19	0.153	0.152	0.66
Orne 11/04/19	0.152	0.100	52.00
Orne 19/04/19	0.137	0.094	45.74
Orne 03/05/19	0.146	0.094	55.31
Orne 07/05/19	0.143	0.095	50.52
Lasne 09/05/19	1.002	0.891	12.45

TABLE E.1 – Résultats des comparaisons des débits mesurés par le MFPro® de l'UCL et Aqualim

# Annexe F

## Résultats des calculs de débits en laboratoire

L'erreur est définie comme :

$$Erreur = \left| 1 - \frac{Q_{Imagerie}}{Q_{Reference}} \right|$$

### A Avec coefficients de vitesse

	Débit de référence (pompe) [m <sup>3</sup> /s]	Débit par imagerie avec coefficients de vitesse [m <sup>3</sup> /s]	Erreur [%]
Section 10 - 8 [l/s]	8.02	9.16	14.21
Section 10 - 10 [l/s]	9.96	11.9	19.48
Section 10 - 12 [l/s]	11.65	13.7	17.60
Section 19 - 8 [l/s]	8.02	7.3	8.98
Section 19 - 10 [l/s]	9.96	8.6	13.65
Section 19 - 12 [l/s]	11.65	10.6	9.01
Section 26 - 8 [l/s]	8.02	3.13	60.97
Section 26 - 10 [l/s]	9.96	9.84	1.20
Section 26 - 12 [l/s]	11.65	10.37	10.99

TABLE F.1 – Résultats des mesures en laboratoire par imagerie avec coefficients de vitesse

## B Avec coefficients de débit

### B.1 Coefficient de débit moyen par section

	Coefficient moyen	Débit de référence (pompe) [m <sup>3</sup> /s] [m <sup>3</sup> /s]	Débit par imagerie avec coefficients de débit moyens [m <sup>3</sup> /s]	Erreur [%]
Section 10 - 8 [l/s]	1.242	8.02	7.916	1.32
Section 10 - 10 [l/s]	1.242	9.96	10.278	3.14
Section 10 - 12 [l/s]	1.242	11.65	11.828	1.58
Section 19 - 8 [l/s]	1.204	8.004	7.765	2.99
Section 19 - 10 [l/s]	1.204	10.19	10.347	1.54
Section 19 - 12 [l/s]	1.204	12.11	11.317	6.55
Section 26 - 8 [l/s]	1.420	7.803	8.38	7.39
Section 26 - 10 [l/s]	1.420	10.184	11.543	13.34
Section 26 - 12 [l/s]	1.420	12.011	12.275	2.20

TABLE F.2 – Résultats des mesures en laboratoire par imagerie avec coefficients de débit moyens

### B.2 Coefficient de débit imposé à 1.25

	Coefficient moyen	Débit de référence (pompe) [m <sup>3</sup> /s] [m <sup>3</sup> /s]	Débit par imagerie avec coefficient de débit = 1.25 [m <sup>3</sup> /s]	Erreur [%]
Section 10 - 8 [l/s]	1.25	8.02	7.965	0.71
Section 10 - 10 [l/s]	1.25	9.96	10.342	3.78
Section 10 - 12 [l/s]	1.25	11.65	11.902	2.22
Section 19 - 8 [l/s]	1.25	8.004	8.060	0.70
Section 19 - 10 [l/s]	1.25	10.19	10.740	5.40
Section 19 - 12 [l/s]	1.25	12.11	11.747	3.00
Section 26 - 8 [l/s]	1.25	7.803	7.379	5.43
Section 26 - 10 [l/s]	1.25	10.184	10.164	0.2
Section 26 - 12 [l/s]	1.25	12.011	11.809	1.68

TABLE F.3 – Résultats des mesures en laboratoire par imagerie avec coefficient de débit imposé à 1.25

# Annexe G

## Résultats des calculs d'aire et du niveau d'eau en rivière

Cette annexe présente les altitudes de la surface libre en rivière, déterminées par l'échelle limnimétrique et par imagerie ainsi que les mesures d'aire des sections, par le MFPro et par imagerie. L'erreur présentée ici porte sur les surfaces et est définie comme :

$$Erreur = \left| 1 - \frac{Aire_{imagerie}}{Aire_{MFPro}} \right|$$

	Altitude réelle [m]	Altitude par imagerie [m]	Aire section MFPro [m <sup>2</sup> ]	Aire section par imagerie [m <sup>2</sup> ]	Erreur [%]
Thyle 23-04-19	65.68	65.69	1.059	1.090	2.96
Thyle 06-05-19	65.69	65.67	1.095	0.926	15.44
Orne 11-04-19	119.70	119.65	0.627	0.534	14.8
Orne 19-04-19	119.69	119.66	0.565	0.595	5.3
Orne 03-05-19	119.69	119.70	0.609	0.737	21.1
Orne 07-05-19	119.70	119.70	0.621	0.640	3.1
Ligne 11-04-19	114.62	114.59	0.749	0.629	16.0
Ligne 19-04-19	114.61	114.62	0.723	0.708	2.1
Ligne 03-05-19	114.63	114.66	0.791	0.877	10.8

TABLE G.1 – Résultats des mesures de niveau d'eau et des calculs d'aire en rivière

# Annexe H

## Checklist à vérifier sur le terrain

### Mesures en rivière – Fiche mémo

#### *Préparation*

Emportez :

- GRP's et piquets de tente
- Copeaux de bois
- GoPro avec carte SD
- Bottes grenouilles
- Décamètre
- Mètre
- Trépied à bras télescopique
- dGPS Leica 1200
- MFpro
- Tournevis plat
- Jeu de clés
- Smartphone avec Discharge

#### *Sur site*

Vérifiez :

- Position des GRPs et lever des points au dGPS
- Mesures entre les différents GRPs et de la largeur de la rivière à la surface de l'eau

#### *Camera*

Contrôlez :

- Vidéo en 1080pixels et 25 images par seconde
- Photo en *medium* ou *large*
- 12Mp

#### *Prise de vue*

S'assurez :

- Vidéo contient les deux rives et une référence pour la calibration.
- Eviter les zones d'ombres et de reflets.
- Stabilité de la vidéo.
- Visibilité de toute la zone pas de gêne.
- Ensemencement uniforme et éloigner de la zone d'étude pour qu'ils s'adaptent à la vitesse de l'écoulement.
- Angle de vue perpendiculaire à l'écoulement.





UNIVERSITÉ CATHOLIQUE DE LOUVAIN  
École polytechnique de Louvain

Rue Archimède, 1 bte L6.11.01, 1348 Louvain-la-Neuve, Belgique | [www.uclouvain.be/epl](http://www.uclouvain.be/epl)