

École polytechnique de Louvain

Mesures de débits en rivière à partir d'un drone : Validation de méthodes basées sur la LSPIV à partir de mesures sur le terrain

Auteurs: **Loïc LEBON, Emmanuel WILLEMART**

Promotrice: **Sandra SOARES FRAZAO**

Lecteurs: **Robin MEURICE, Olivier CARLIER D'ODEIGNE, Charles BIELDERS**

Année académique 2020–2021

Master [120] : ingénieur civil des constructions

Abstract

For a very long time, the Man has been trying to determine the discharge of rivers, whether for the protection of property and people by forecasting floods, for the management of this essential resource, for the sizing and maintenance of hydraulic structures or even for navigation.

There are many ways to determine this discharge. They sometimes takes a long time to set up and they also may be expensive or risky for staff. In addition, the technics currently used do not capture the full technological potential available today. Several researchers had the idea of associating the use of drones with the Large Particle Image Velocity (LSPIV). The theoretical bases have already been developed, but very few field studies have been carried out at the moment.

The aim of this thesis is therefore to determine both the height of the water and the speed of the flow in a natural river in order to obtain the discharge. All using a drone equipped with a camera to avoid coming into contact with it. Four rivers with different characteristics have been studied in order to assess the effectiveness of the methods used, and to enrich a database developed by former students at UCLouvain.

Résumé

Depuis très longtemps l'Homme, tente de déterminer le débit des rivières que ce soit pour la protection des biens et des personnes par la prévision des crues, pour la gestion de cette ressource indispensable, pour le dimensionnement et l'entretien des ouvrages hydrauliques ou encore pour la navigation.

De nombreuses façons de déterminer ce débit existent. Elles sont parfois longues à mettre en place, coûteuses ou risquées pour le personnel. De plus, les techniques utilisées actuellement ne saisissent pas le plein potentiel technologique disponible de nos jours. Plusieurs chercheurs ont ainsi eu l'idée d'associer l'utilisation de drones à la *Large Particle Image Velocity* (LSPIV). Les bases théoriques ont déjà été développées, mais à l'heure actuelle, très peu d'études sur le terrain ont été réalisées.

Le but de ce mémoire est donc de déterminer à la fois la hauteur d'eau et la vitesse de l'écoulement en rivière naturelle afin d'en obtenir le débit. Le tout en utilisant un drone muni d'une caméra afin d'éviter d'entrer en contact avec la rivière. Quatre rivières aux caractéristiques différentes ont été étudiées en vue d'évaluer l'efficacité des méthodes utilisées et d'enrichir une base de données développée par d'anciens étudiants à l'UCLouvain.

Remerciements

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

Notre promotrice, la Professeure Sandra Soares-Frazão, dont nous tenons à lui exprimer notre gratitude vis-à-vis de sa disponibilité, sa bienveillance, ainsi que pour ses conseils avisés qui ont permis d'orienter notre raisonnement tout au long de l'élaboration de ce travail.

Le service publique de Wallonie pour nous avoir autorisé à effectuer des mesures dans les différentes rivières. Merci également à Nicolas Feltz de nous avoir prêté le matériel nécessaire pour relever des vitesses en rivière, et d'avoir pris de son temps pour nous avoir aiguillé dans le choix des rivières à étudier et répondre à nos questions.

Sébastien François, technicien en sciences environnementales à l'UCLouvain, que nous avons dérangé à plusieurs reprises pour le prêt de matériel utile pour nos mesures. Mais également pour le temps passé à extraire les données de la station LEICA GPS.

Mr. Charles Bielders et Mr. Olivier Carlier d'Odeigne d'avoir accepté de faire partie de notre jury.

Robin Meurice d'avoir également accepté de faire partie de notre jury mais aussi pour sa relecture partielle et ses conseils qui nous ont aiguillé directement sur le bon chemin.

François Willemart pour le prêt du drone et ses conseils de pilotages.

Olivier Perdaens, Aurélie Willemart et Adeline Goffin pour la mise à disposition de leurs véhicules qui nous ont permis de nous déplacer lors des différentes campagnes de mesures.

Enfin, nous ne pourrions conclure sans remercier du fond du coeur nos familles et nos proches, pour leurs conseils et leur soutien tout au long de ce mémoire et de ces merveilleuses années d'études passées à l'université. Un remerciement particulier revient aussi à Corinne Pelousse et son amie Martine Hoyas pour leurs nombreuses heures de relecture qui nous ont même permis d'en apprendre plus sur les mystères de la langue française.

À vous tous, merci !

Loïc et Emmanuel

Introduction

Les inondations comptent parmi les catastrophes naturelles les plus fréquentes. Près d'1,47 milliard de personnes, soit 19% de la population mondiale, sont directement exposées à des inondations supérieures à 15 centimètres [32]. Les inondations représentent un risque mondial, aucun des 189 pays examinés n'est épargné. Environ 2,2 milliards de personnes vivent d'ailleurs dans des zones exposées à une crue centennale, soit 29% de la population mondiale. Cet évènement a une probabilité de survenir d'1% en un an, de 10% en 10 ans, ou de 68% de connaître un tel évènement sur une vie en moyenne [32]. L'importance de surveiller les débits afin d'en savoir un maximum sur ces crues, devient donc indispensable pour s'en protéger.

Dans nos régions, si les inondations causent déjà de gros dégâts et parfois des souffrances énormes, dans les pays moins favorisés, où les dispositifs de protection et les réseaux d'évacuations des eaux sont moins développés, les conséquences peuvent être immenses. Des villes peuvent se retrouver complètement coupées du monde, sans plus aucun accès routier, sans eau ni électricité, et ce, pendant un long moment parfois, avant que tout ne soit rétabli. C'est d'ailleurs ce qui est encore arrivé en France début octobre 2020, une tempête surnommée Alex a frappé le pays, provoquant d'importantes précipitations au sud dans les Alpes maritimes. Des crues dévastatrices ont touché la vallée de la Vésubie, privant plus de 10 000 foyers d'électricité [17]. Des villages entiers étaient inaccessibles lors de l'intervention des secours et coupés de tous réseaux téléphoniques. Le bilan avoisine une dizaine de morts et le coût total des dégâts s'élève, lui, à plus d'un milliard d'euros [6].

Les cours d'eau sont aujourd'hui envisagés à la fois comme des contraintes mais également comme des ressources, et plus largement comme des composantes à part entière de l'environnement des sociétés. Pour l'homme, l'importance de connaître son environnement pour prédire l'évolution des cours d'eau qui l'entourent à l'aide des débits est donc primordiale, non seulement pour une meilleure maîtrise des crues afin d'en diminuer les conséquences mais aussi pour l'alimentation en eau, l'agriculture, la navigation, les ouvrages d'art et la production d'énergie.

Si l'eau a alimenté les réflexions des hommes depuis l'Antiquité, ce n'est que depuis une centaine d'années que l'hydrologie est considérée comme une discipline scientifique indépendante. Elle se situe d'ailleurs aujourd'hui au point de convergence d'une multitude d'autres sciences techniques. Il est impossible de la comprendre sans connaître non seulement des disciplines qualifiées de "fondamentales" telles que la physique, la chimie, les mathématiques et la biologie mais aussi d'autres, tout aussi essentiels, telles que la géographie, la géologie et la météorologie [43].

A l'échelle de la Terre, ce sont près de 36 000 km³ d'eau [36] qui transitent chaque année par les fleuves. Mais ces quantités peuvent être très inégalement réparties, tant d'un continent à l'autre, que pour une même rivière d'une année à l'autre ou au sein d'une même année. Cette irrégularité ne peut être approchée qu'en mesurant en permanence les débits de ces rivières [36]. Connaître l'évolution des débits au cours du temps permet notamment de prévoir la récurrence des crues pour conceptualiser des ouvrages afin de s'en protéger par la suite.

Pour mesurer ces débits, les techniques conventionnelles ont permis de récolter une multitude de données jusqu'à aujourd'hui. Mais dans certains cas extrêmes, le caractère fugace des épisodes, les difficultés d'accès (routes inondées), la difficulté du déploiement de matériel et les conditions de sécurité (violence des écoulements) ne permettent pas aux équipes d'intervenir autant que nécessaire. Il y a donc un grand manque de connaissance sur les débits en période de crue. Ceux-ci sont souvent extrapolés et un bon nombre d'imprécisions persiste.

C'est pourquoi, depuis plusieurs années déjà, Sandra Soares Frazão, professeure et chercheuse à l'Université Catholique de Louvain au sein de l'IMMC, l'Institut de Mécanique, des Matériaux et du Génie Civil, fait appel à des étudiants pour développer une technique permettant de mesurer des débits en rivière naturelle de manière non-intrusive.

Grâce aux nouvelles technologies, dans le domaine de traitement d'images vidéos, il existe un moyen de déterminer des vitesses de surface en utilisant le déplacement de corps solides transportés à la surface de l'eau (feuilles, brindilles, copeaux de bois, etc.) ainsi que les turbulences de l'écoulement.

Cette technique découle de la Particle Image Velocimetry (PIV) qui est exploitée dans les laboratoires. Exportée aux rivières, cette technique prend ensuite le nom de Large-Scale PIV (LSPIV). Le principe se base sur le *tracking* à l'aide d'une analyse statistique de ces corps solides entre deux images successives dont l'intervalle de temps qui les sépare est connu. Il faut savoir que ces vitesses de surface ne sont pas représentatives de l'écoulement au sein de la section. Par conséquent, un coefficient de vitesse, appelé coefficient α , est appliqué à ces vitesses pour obtenir des vitesses moyennes en profondeur. Enfin pour déterminer le débit, il faut également connaître la bathymétrie de la section étudiée et la hauteur d'eau pour obtenir l'aire mouillée. La photogrammétrie a permis dans d'anciens travaux, tels que celui d'Hellebaut [29], d'obtenir des résultats encourageants pour déterminer la hauteur d'eau. Pour la bathymétrie, les résultats étaient moins concluants avec cette méthode.

Dans ce rapport, nous avons étudié deux autres méthodes qui seront présentées pour déterminer la hauteur d'eau et nous supposons une bathymétrie connue, mesurée de manière intrusive pour se concentrer sur la précision de la LSPIV. En ayant connaissance de cette aire mouillée, il suffit de la multiplier par la vitesse moyenne calculée pour en déduire le débit. Cette méthodologie est appelée « *méthode de l'UCLouvain* » par NICOLAS BREELS et STÉPHAN MARNEFFE depuis l'année dernière [51], et il en sera ainsi dans cet ouvrage également.

Ce travail s'inscrit dans la continuité des mémoires réalisés par HELLEBAUT (2018) sur la détection du niveau d'eau à partir de modèles 3D [29], BIA T. et SOMERS H. (2018) sur l'étude de la PIV et le développement de la LSPIV [25], et celui de ASSELBERGHS P. et PEETERS B. (2019) sur la mesure du niveau d'eau et de la vitesse de l'écoulement en rivière naturelle [8]. Mais également plus récemment ceux de RENARD S. (2020) sur le développement d'une application pour mesurer des débits en rivière [49], et BREELS N. et MARNEFFE S. (2020) sur la comparaison entre logiciels photogrammétriques et sur des méthodes de détection de surface de l'eau sur des modèles 3D [51]. Suite aux mesures Covid prises l'année dernière, NICOLAS BREELS et STÉPHAN MARNEFFE n'ont pas pu se rendre sur le terrain pour prendre leurs mesures comme prévu et ont donc dû adapter leurs objectifs.

C'est dans ce cadre que nous poursuivons ce qu'ils n'ont pas pu réaliser l'année passée en allant nous-mêmes sur le terrain pour vérifier l'efficacité de la LSPIV avec un drone sur plusieurs rivières naturelles. Tout cela, en comparant deux programmes différents, et en complétant la base de données qu'ils ont réalisée cette année-là également. Ces mesures se font depuis quelques années en collaboration avec le Service Public de Wallonie. Grâce à leurs stations limnimétriques qui relèvent le débit en temps réel, nous avons pu réaliser une comparaison avec nos résultats pour quantifier la précision de la méthode de l'UCLouvain. De plus, nous devions essayer d'utiliser d'autres méthodes pour déterminer la hauteur du niveau d'eau plutôt que de recourir à la photogrammétrie, qui a déjà donné des résultats encourageants mais qui est une méthode lourde et très lente à exécuter. Enfin, par la même occasion nous avons essayé de déterminer un coefficient α reliant la vitesse de surface et la vitesse moyenne pour chaque station étudiée.

Ce mémoire est divisé en deux parties importantes.

La première est l'état de l'art, reprenant les explications théoriques nécessaires à la compréhension des techniques utilisées et les études précédentes réalisées à leurs sujets. Elle est divisée en 4 chapitres organisés selon un ordre logique jusqu'à l'obtention d'un débit à l'aide de la LSPIV. Passant par l'explication pour obtenir une aire mouillée, les vitesses de surfaces par PIV puis par LSPIV, mais également un coefficient de vitesse pour finir par l'acquisition d'un débit.

La seconde partie de ce mémoire reprend toutes les réalisations qui ont été menées. Elle se compose de 5 chapitres, qui suivent la même logique que dans la première partie. Ici, la méthode UCLouvain adaptée au drone est expliquée, suivie de l'analyse de plusieurs méthodes sur l'obtention sans contact de la hauteur d'eau. Ensuite, une étude sur le coefficient de vitesse est présentée et les données obtenues par LSPIV sont analysées. Enfin pour terminer, des pistes d'améliorations sont exposées afin d'optimiser les méthodes utilisées dans de futures recherches.

Ces deux parties sont ensuite clôturées par une conclusion, faisant le point sur l'avancement qu'a pu apporter les recherches réalisées durant ce mémoire.

Table des matières

Introduction	i
I ÉTAT DE L'ART	1
1 Détermination de l'aire mouillée	3
1. La bathymétrie	3
1.1. Le sonar	3
1.2. Le LiDAR	3
1.3. Méthode spectrale	4
1.4. La photogrammétrie	5
1.5. Conclusion	6
2. Hauteur d'eau	6
2.1. Méthodes directes	6
2.2. Méthodes indirectes	7
2.3. Conclusion	9
2 Mesure de vitesses par analyse d'images : la technique PIV	11
1. Définition et origine	11
2. Méthodologie	12
2.1. Ensemencement et illumination	13
2.2. Prise d'images	14
2.3. Prétraitement	14
2.4. Analyse des images	15
2.5. Calibration	18
2.6. Post-traitement	19
3. Logiciels disponibles	20
3 Application aux rivières : la LSPIV	21
1. Définition et méthodologie	21
2. Distinctions entre PIV et LSPIV	22
2.1. Angle de prise d'images	23
2.2. Résolution	24
2.3. Illumination	24
2.4. Ensemencement	24
3. Logiciels disponibles	25
3.1. Fudaa-LSPIV	25
3.2. PIVlab	25
3.3. Discharge	25

4	Détermination du débit	27
1.	Méthodes de calculs classiques d'un débit	27
1.1.	La "Mean Section method"	27
1.2.	La "Mid Section method"	28
2.	Les méthodes non-intrusives	29
2.1.	Le radar	29
2.2.	Le traitement d'images vidéos	29
3.	Relation entre la vitesse de surface et la vitesse moyenne	30
3.1.	Distribution verticale des vitesses dans une rivière	30
3.2.	L'index de vitesse α	32

II REALISATIONS 37

5	Méthode de l'UCLouvain : mesure de débit à partir d'un drone	39
1.	Description des stations étudiées	39
1.1.	Présentation des stations	40
1.2.	Conclusion	43
2.	Description des étapes de mesures	44
2.1.	Étape 1 - Mesures sur le terrain	44
2.2.	Étape 2 - Calcul des vitesses	46
2.3.	Étape 3 - Détermination de l'aire mouillée	47
2.4.	Étape 4 - Calcul du débit	47
6	Analyses des méthodes de détermination de la hauteur d'eau	49
1.	Méthode photogrammétrique	49
2.	Méthode <i>Hauteur-Angle</i>	52
2.1.	Mise en pratique	52
3.	Méthode <i>Longueur-Pixel</i>	58
3.1.	Données nécessaires	58
3.2.	Principe	59
3.3.	Mise en pratique	59
4.	Sources d'erreurs des méthodes " <i>Hauteur-Angle</i> " et " <i>Longueur-Pixel</i> "	59
4.1.	Erreurs sur l'altitude du drone	60
4.2.	Erreurs pour la méthode " <i>Hauteur-Angle</i> "	61
4.3.	Erreurs pour la méthode " <i>Longueur-Pixel</i> "	67
4.4.	Erreurs sur la hauteur d'eau	67
5.	Étude théorique de l'influence de la largeur d'eau sur la hauteur d'eau	68
5.1.	Profil bathymétrique rectangulaire	69
5.2.	Profil bathymétrique trapézoïdal	70
5.3.	Profil bathymétrique quelconque	72
6.	Comparaison des résultats entre les différentes méthodes de détermination de la hauteur d'eau	73
6.1.	Station de Suzeril	73
6.2.	Station de Noirhat	74
6.3.	Station de Rosières	75
6.4.	Station de Limelette	76
6.5.	Conclusion	78

7	Étude sur le coefficient de vitesse α	81
8	Analyse LSPIV	85
1.	Facteurs influençant l'analyse LSPIV	85
1.1.	Conditions climatiques	85
1.2.	L'ensemencement	88
1.3.	Paramètres de prise d'images	91
1.4.	Aire de recherche et aire d'interrogation	95
2.	Résultats de vitesses	97
2.1.	Hypothèses	97
2.2.	Analyses	99
2.3.	Conclusion	101
3.	Résultats de débits	102
3.1.	Résultats hybrides	102
3.2.	Résultats totalement non-intrusifs	105
4.	L'application " <i>Discharge</i> "	107
4.1.	Résultats	108
4.2.	Comparaison des résultats	110
4.3.	Conclusion	113
9	Pistes d'améliorations	115
1.	La hauteur d'eau	115
2.	Les vitesses	116
3.	Le débit	116
	Conclusion	119
	Bibliographie	121
A	ANNEXES	127
1.	PIVlab (v.2.40) : manuel d'utilisation	127
1.1.	Étape 1 : importer des images ou une vidéo	127
1.2.	Étape 2 : configurer les paramètres d'analyse	128
1.3.	Étape 3 : calibration	130
1.4.	Étape 4 : validations des vecteurs	131
1.5.	Étape 5 : calcul d'une vitesse moyenne	132
1.6.	Étape 6 : résultats et extraction	133
2.	Fudaa-LSPIV (v 1.7.3): manuel d'utilisation	135
2.1.	Étape 1: importer des images ou une vidéo	135
2.2.	Étape 2: stabiliser la vidéo	136
2.3.	Étape 3: orthorectification	137
2.4.	Étape 4: analyse LSPIV	138
2.5.	Étape 5: post-traitement	140
2.6.	Étape 6: calcul du débit	141
2.7.	Étape 7: exportation des données	142
3.	Base de données	144
3.1.	Structure de la base de données	144
3.2.	Récapitulatif des stations/sections étudiées	145

3.3.	Classeur Excel d'une station/section spécifique	146
4.	Code MATLAB : détermination d'un débit avec le logiciel PIVlab	151

Partie I

ÉTAT DE L'ART

Chapitre 1

Détermination de l'aire mouillée

Afin de pouvoir déterminer des débits en rivière à l'aide d'un drone, il faut tout d'abord mesurer l'aire de la section à travers laquelle l'eau s'écoule. Celle-ci s'appelle "aire mouillée" et peut être calculée grâce à la bathymétrie et à la hauteur d'eau d'une rivière. Ce chapitre va dès lors s'intéresser aux différents procédés qui permettent d'obtenir ces deux éléments primordiaux.

1. La bathymétrie

La bathymétrie est la science de la mesure par sondages des profondeurs et du relief sous-marin pour en déterminer sa topographie [45]. Cette technique est aussi adaptée pour les rivières.

Il existe de nombreuses techniques et instruments pour déterminer la bathymétrie; ceux-ci sont plus ou moins coûteux et plus ou moins simples à mettre en place. Le but de ce travail étant d'être non-intrusif, le matériel utile aux méthodes présentées ci-dessous doit pouvoir être monté sur un drone.

1.1. Le sonar

Le sonar permet via un signal sonore de détecter le relief et les obstacles se trouvant dans l'eau. Celui-ci est utilisé depuis de nombreuses années en mer afin de connaître le relief des fonds marins. Afin de pouvoir fonctionner, le sonar doit être immergé. Équipé sur un drone, celui-ci doit donc pouvoir se poser sur l'eau à l'aide de flotteurs. Par conséquent, il n'est pas conseillé d'utiliser cette technique dans le cas de rivière avec une vitesse de surface trop importante.

Une campagne de mesure a été réalisée sur les voies navigables en région wallonne afin de se rendre compte de l'efficacité de cette technique. Comme l'explique DIERICKX[12] dans son travail, de nombreuses adaptations ont dû être réalisées afin que ce type d'instrument soit efficace pour le relevé bathymétrique de rivières.

1.2. Le LiDAR

Abréviation de "*Light Detection And Ranging*", le LiDAR mesure, via un signal lumineux, la distance qui le sépare d'un certain obstacle. Tout comme le sonar, le LiDAR est utilisé depuis de nombreuses années dans la cartographie marine et principalement côtière. Une des conditions de fonctionnement primordiales est que l'objet à mesurer doit être visible

à l'œil nu. Autrement dit, le LiDAR ne peut pas fonctionner en eaux troubles ou trop profondes dans lesquelles il n'est pas possible de distinguer le fond.

Afin de pouvoir être utilisé en rivière, plusieurs modifications ont été mises en place sur cet instrument. LAGUE [10] détaille dans un article l'avènement du LiDAR topo-bathymétrique ayant la particularité d'être adapté spécifiquement pour les rivières. La principale amélioration qui a été apportée est l'augmentation de la précision des mesures. La Figure 1.1 illustre le fonctionnement du LiDAR topo-bathymétrique.

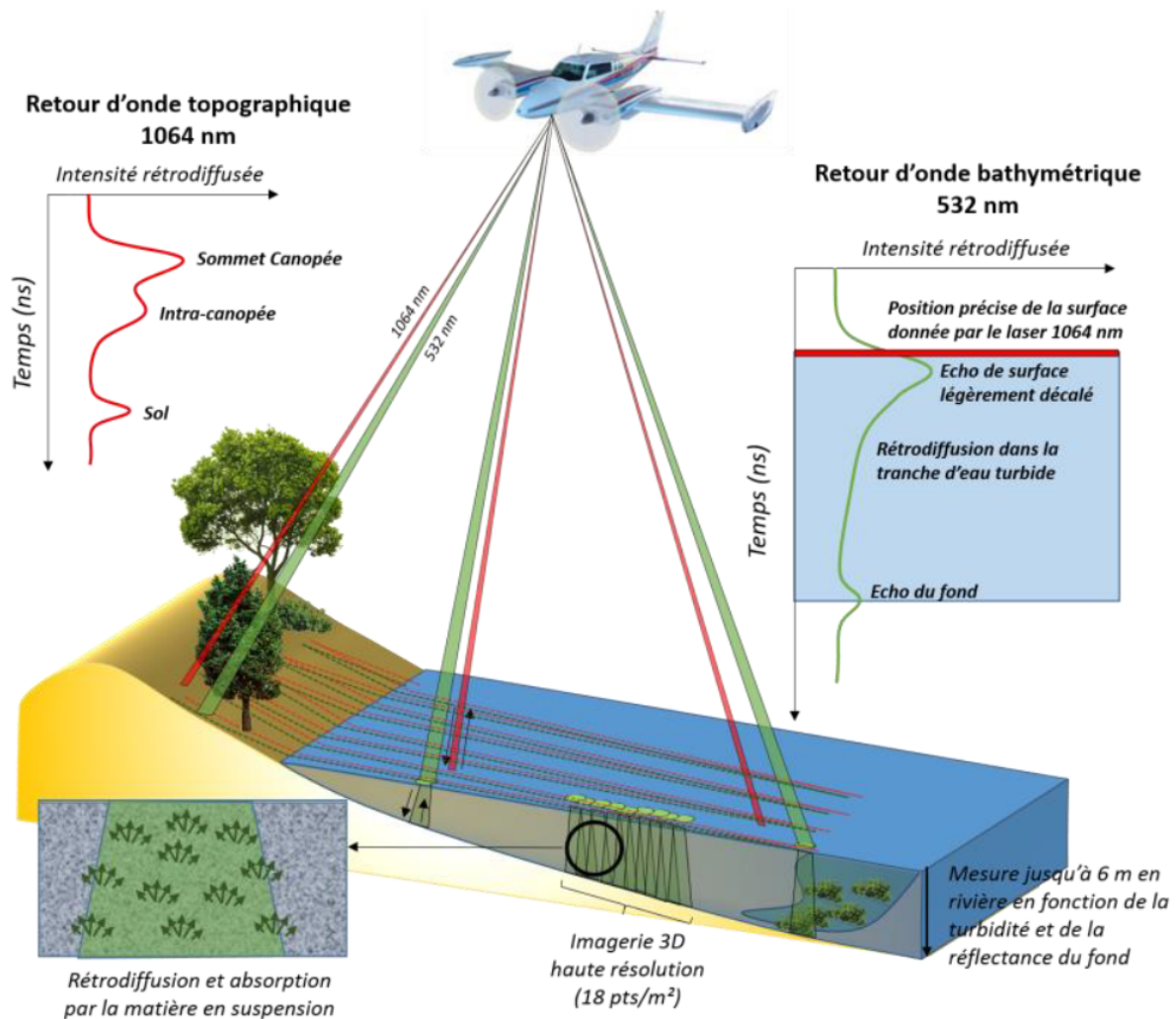


Figure 1.1 – Fonctionnement du LiDAR topo-bathymétrique [10].

1.3. Méthode spectrale

La méthode spectrale utilise la différence d'absorption de la lumière visible suivant la profondeur de l'eau. Venant une nouvelle fois de l'analyse des fonds marins et des côtes, elle ne dispose pas encore d'adaptation à proprement parler pour les rivières.

Le principal frein à son développement pour les cours d'eau est sa sensibilité aux reflets et aux différences de luminosité. De plus, ROSSI, MAMMI et PRANZINI[35] montrent que la précision est loin d'être satisfaisante (voir Figure 1.2) pour des relevés bathymétriques en rivières. La précision en rivière de la bathymétrie doit être de l'ordre d'au moins du centième de mètre pour être exploitable.

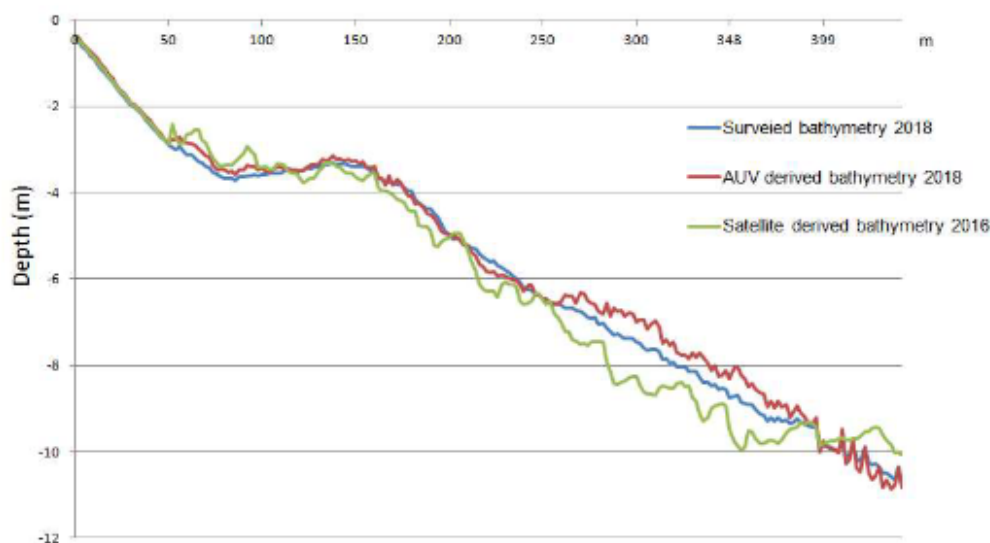


Figure 1.2 – La courbe bleue représente la bathymétrie exacte et la courbe verte est une approximation par méthode spectrale par satellite [35].

1.4. La photogrammétrie

La photogrammétrie peut se définir 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 (Larousse 2021 [37]).

La photogrammétrie permet donc de construire un modèle en 3 dimensions à partir de différents clichés photographiques. Elle a été considérée ici car elle a fait l'objet de nombreux travaux de fin d'études à l'UCLouvain et a montré des résultats très satisfaisants.

DIETRICH (2016) [13] constate que pour de petits cours d'eau, les sonars ne permettent pas l'obtention d'une bathymétrie correcte comme dans les grands cours d'eau. Utiliser une nouvelle méthode pour la déterminer comme la photogrammétrie pourrait donc être intéressante.

C'est grâce au développement de la SfM (*Structure from Motion*), une technique qui a amélioré considérablement le domaine de la photogrammétrie, que Dietrich a pu mener récemment une étude pour déterminer la bathymétrie. La SfM consiste à analyser des photos prises sous différents angles en vue de déterminer les points de similitudes entre celles-ci et ainsi reproduire un modèle 3D de l'objet (voir Figure 1.3).

DIETRICH, par son étude menée à l'aide de la photogrammétrie SfM sur la détermination de la bathymétrie, a pu conclure que ses résultats étaient concluants avec une précision de 0.02% par rapport à la hauteur du vol de la prise d'images. Ces essais ont été réalisés sur une piscine et sur la *White River* au États-Unis. Il fait remarquer que sa méthodologie ne fonctionne que si les conditions sont idéales (eaux claires, luminosité suffisante, etc.). Les problèmes de réflexion et de réfraction avec l'eau limitent donc fortement cette méthode pour déterminer la bathymétrie.

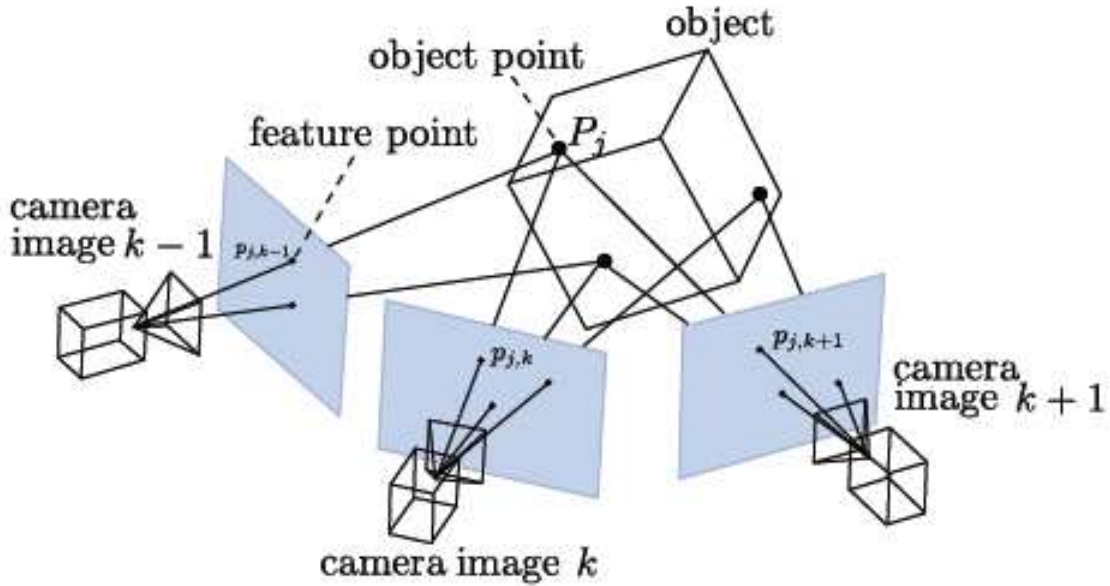


Figure 1.3 – Principe de la technique SfM [62].

1.5. Conclusion

Relever la bathymétrie avec des méthodes non-intrusives s'avère assez complexe et nécessite du matériel parfois coûteux. De plus, certains instruments et méthodes ne sont pas encore totalement adaptés pour les rivières.

C'est pourquoi la bathymétrie a été mesurée, de manière intrusive avec une station Leica TPS 1200, bien que des solutions existent.

2. Hauteur d'eau

Certaines méthodes pour obtenir la hauteur d'eau sont les mêmes que pour obtenir la bathymétrie. Une différence sera faite entre les méthodes qui permettent de trouver la hauteur d'eau de façon directe ou indirecte. Comme dans le cas de la mesure de la bathymétrie, seules les méthodes pouvant être non-intrusives seront introduites ci-dessous.

2.1. Méthodes directes

Les méthodes directes, comme leurs noms l'indiquent, permettent de trouver directement la hauteur d'eau.

Le sonar et le LiDAR

De la même façon que pour déterminer la bathymétrie, le sonar et le LiDAR permettent également de déterminer la hauteur d'eau. Une calibration devra toutefois être faite pour le sonar. En effet, celui-ci se trouvant sous l'eau, il faudra connaître la profondeur à laquelle il est immergé.

Capteurs radars et à ultrasons

Les instruments utilisant des capteurs radars et des capteurs à ultrasons ont un mode de fonctionnement similaire. Ils sont orientés vers la surface étudiée, dans ce cas le plan d'eau, et émettent un signal qui se reflète sur cette même surface. Les appareils calculent ensuite le temps entre l'émission et la réception de chaque signal pour déterminer la distance et donc la profondeur d'eau.

Comme l'explique TISCHLER [56] dans son article, la différence entre les deux systèmes vient du fait que la technologie à ultrasons utilise des ondes sonores tandis que la technologie radar utilise des micro-ondes. Cette dernière a l'avantage d'avoir des résultats qui ne dépendent ni de la température, ni de la pression de l'environnement.

Ces technologies donnent la distance entre l'émetteur/récepteur et le plan d'eau (voir Figure 1.4). Pour déterminer la hauteur d'eau, il faudra connaître la distance qui sépare l'émetteur/récepteur et le fond de la rivière.

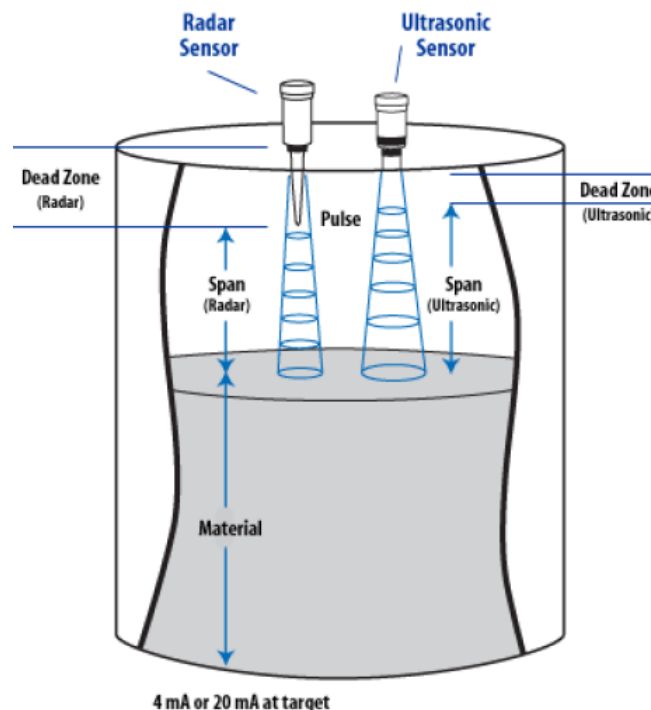


Figure 1.4 – Principe de fonctionnement des capteurs radars et ultrasoniques pour la mesure du niveau d'eau [31].

2.2. Méthodes indirectes

Comme leurs noms l'indiquent, les méthodes indirectes ne permettent pas de trouver directement la hauteur d'eau.

Méthode photogrammétrique

En utilisant la photogrammétrie, il est également possible de déterminer le niveau d'eau d'une rivière sans contact. Cette méthode a d'ailleurs déjà fait l'objet de plusieurs études à l'UCLouvain.

FRANCOIS-XAVIER HELLEBAUT [29] s'est notamment intéressé à l'application de la photogrammétrie pour la mesure du niveau d'eau à partir d'un drone. Il a notamment implémenté un algorithme sur MATLAB permettant de localiser un point de décrochage entre la bathymétrie et le modèle numérique obtenu sur un logiciel de photogrammétrie (Agisoft-PhotoScan). En effet, le logiciel de photogrammétrie détecte généralement la surface de l'eau et la modélise numériquement. En plaçant la bathymétrie dans le plan correspondant sur le modèle numérique, il est possible de voir ces points de divergence, comme sur le modèle réduit testé par HELLEBAUT[29] représenté sur la Figure 1.5.

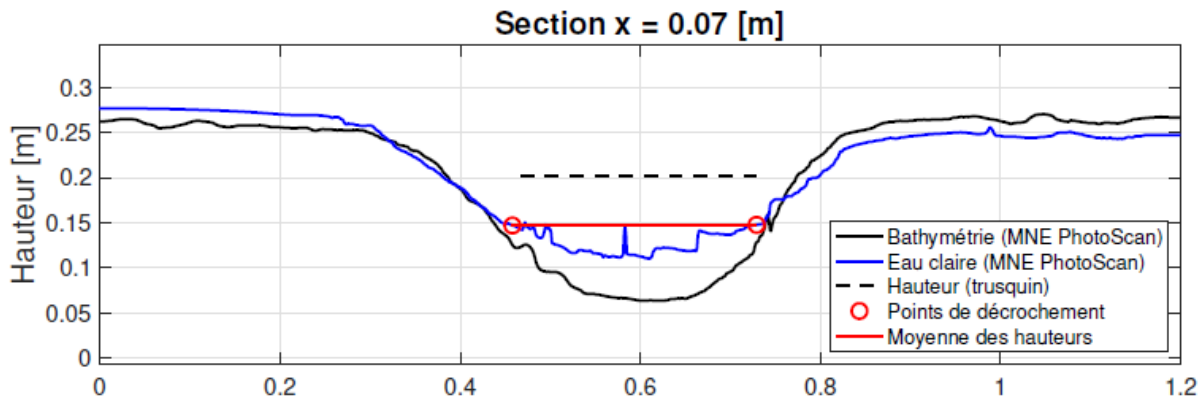


Figure 1.5 – Exemple de la méthode développée par Hellebaut sur un modèle réduit [29].

Cette méthode a prouvé son efficacité en montrant des résultats prometteurs, avec une erreur moyenne sur modèle réduit entre 5 et 10%.

Cependant, dans la suite de ce travail, d'autres méthodes seront testées afin de remplacer la photogrammétrie. D'une part, elle n'est pas totalement non-intrusive car elle nécessite la connaissance de la bathymétrie, et d'autre part l'analyse photogrammétrique, d'un point de vue du temps, reste lourde à réaliser.

Méthode *Hauteur-Angle*

Cette méthode a été introduite dans le TFE de SIMON RENARD[49] mais n'a pas encore été testée. Les bases de cette méthode ont cependant déjà été posées.

Principe :

L'idée de cette méthode est de trouver la largeur L de la rivière à l'aide de plusieurs clichés à des altitudes différentes et de relations trigonométriques. Une fois que la largeur de la rivière est trouvée, il suffit de la replacer sur la bathymétrie pour trouver la hauteur d'eau.

Le drone peut être positionné de deux façons différentes. Soit il se situe parfaitement au milieu par rapport à la rivière (voir Figure 1.6), soit il a un décalage ΔX par rapport au centre de celle-ci.

En réalité, il est très complexe d'établir si le drone est correctement centré par rapport à la rivière. La plupart du temps, le drone se situe donc dans le deuxième cas.

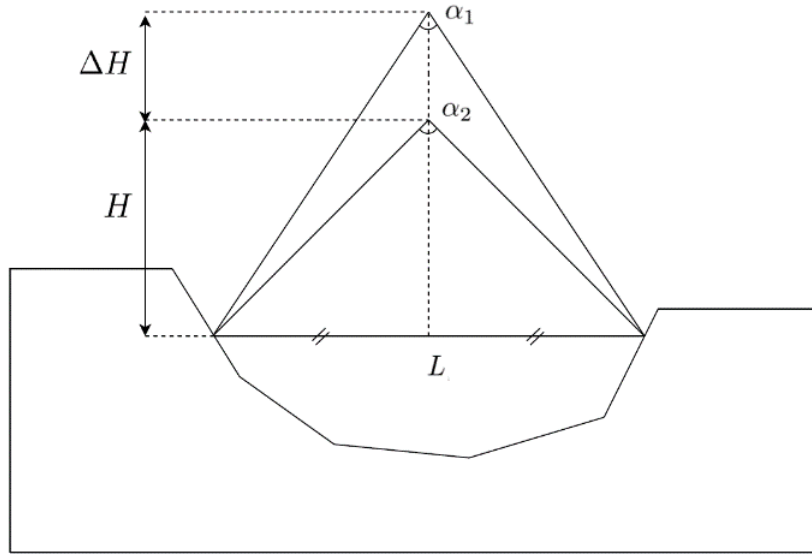


Figure 1.6 – Méthode Hauteur-Angle [49].

Le système à résoudre pour obtenir la largeur L , dans le cas où le drone est centré, est

$$\alpha_i = FOV \frac{\#PIX_{L,i}}{\#PIX_{Img}} \quad (1.1)$$

$$\tan\left(\frac{\alpha_1}{2}\right) = \frac{L/2}{H + \Delta H} \quad (1.2)$$

$$\tan\left(\frac{\alpha_2}{2}\right) = \frac{L/2}{H} \quad (1.3)$$

où:

- FOV , l'angle du champ de vision de la caméra en degrés;
- $\#PIX_{L,i}$, la largeur L en pixels pour l'image i ;
- $\#PIX_{Img}$, la largeur de l'image en pixels;
- H , l'altitude de la photo 2;
- $H + \Delta H$, l'altitude de la photo 1.

Cette méthode sera expliquée plus en détail dans le chapitre 6 de la partie réalisation, avant d'y être expérimentée.

2.3. Conclusion

Les méthodes nécessitant un sonar, un LiDAR, un capteur radar ou encore un capteur à ultrasons mériteraient d'être expérimentées et testées. Cependant, pour des raisons principalement de coût ou d'accessibilité à ce matériel, cela ne sera pas réalisé dans le cadre de ce travail.

En revanche la méthode "*Hauteur-Angle*" correspond très bien aux critères de faisabilité et sera donc expérimentée sur des rivières naturelles.

Chapitre 2

Mesure de vitesses par analyse d'images : la technique PIV

Actuellement, il existe plusieurs techniques de mesures de vitesses par analyse d'image. Dans ce travail, nous nous sommes concentrés sur la *Particle Image Velocimetry* (PIV) qui est étudiée depuis quelques années en laboratoire à l'UCLouvain dans différents travaux, notamment celui de BIA et SOMERS (2018) [25]. La possibilité d'extension de la technique PIV vers la *Large Scale Particle Image Velocimetry* pouvant être utilisée à plus grande échelle, a également poussé vers une étude approfondie de cette technique plutôt qu'une autre.

Dans ce chapitre, le fonctionnement détaillé de la technique PIV sera présenté après une courte définition de celle-ci suivie de son histoire qui a poussé son développement à l'époque. Ce chapitre se clôturera par la présentation de plusieurs logiciels qui utilisent la PIV.

1. Définition et origine

La *Particle Image Velocimetry* est une technique de mesure optique qui permet de calculer un champ de vitesse d'un écoulement en deux dimensions. Le principe de base de cette technique est de trouver et de calculer la vitesse de déplacement de particules entre deux images prises à des moments différents. Cette technique n'est pas à confondre avec une méthode similaire appelée *Particle Tracking Velocimetry* (PTV) où le déplacement de chaque particule est suivi. L'analyse PIV utilise plutôt une approche statistique pour trouver le déplacement le plus probable d'un groupe de particules. Pour mieux visualiser la différence, ces deux méthodes sont représentées sur la Figure 2.1.

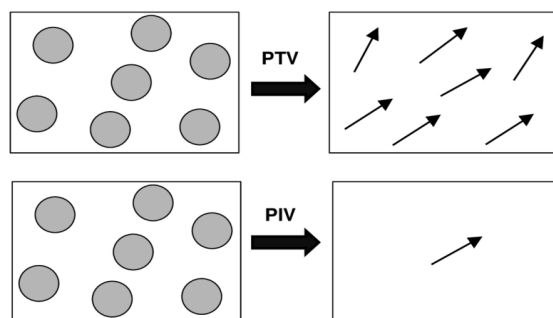


Figure 2.1 – Comparaison schématique entre la résolution spatiale PIV et PTV [64].

En termes de PTV, le déplacement des particules individuelles est activé alors qu'en PIV, le déplacement moyen des particules dans une petite région de l'image est mesuré.

Au niveau de son origine, on retrouve en 1984 pour la première fois le terme "*Particle Image Velocimetry*" dans la littérature (ADRIAN, 1984) [2]. C'est RONALD J. ADRIAN, professeur de génie mécanique et aérospatial, qui étudie et approfondit le développement de la PIV pendant plus d'une vingtaine d'années en sortant d'autres ouvrages, notamment une bibliographie de la PIV (ADRIAN, 1991) [1], ou une de ses dernières publications retraçant ses recherches et ses résultats de 1984 à 2004 (ADRIAN, 2005) [3]. D'autres ouvrages sur l'étude de la PIV ayant été écrit durant cette période sont importants à mentionner : l'excellente compilation d'articles de GRANT (1994) [23] et également un très bon livre sur la PIV de RAFFEL et *al.* (1998) [48].

Bien évidemment, il est fort probable que la forme la plus rudimentaire de la PIV remonte à bien plus loin dans l'histoire, jusqu'à ce qu'une personne possédant le concept de vitesse ait regardé de petits débris se déplacer à la surface d'un ruisseau. Néanmoins, la PIV dans sa forme moderne signifie la mesure quantitative représente des vecteurs de vitesse des fluides en un très grand nombre de points simultanément. Sa réalisation est donc complexe et relativement récente car elle nécessite des technologies évoluées pour la prise d'images (amélioration de la résolution d'images, caméras numériques, augmentation de la fréquence d'acquisition des images) et en informatique (calculs plus rapides, disposition d'une mémoire suffisante). Ces technologies ont donc permis par la suite d'étudier des écoulements de plus en plus complexes [26].

2. Méthodologie

Comme dit précédemment, le principe de base de la PIV est de détecter et quantifier le déplacement de traceurs entre deux images successives. Pour déterminer ce déplacement de manière vectorielle, la méthode se décompose en 6 étapes distinctes :

- **L'ensemencement** par l'ajout de traceurs dans le fluide et l'**illumination** adéquate de ceux-ci.
- **La prise d'images** à l'aide d'une caméra ou d'un appareil photo.
- **Le prétraitement** qui passe par le choix d'une zone d'intérêt et de la zone d'exclusion, l'application de filtres et le choix des dimensions de la zone de recherche et d'interrogation.
- **L'analyse des images** pour déterminer un champ de vecteurs vitesses en utilisant la corrélation croisée.
- **La calibration**, permettant d'obtenir une relation entre les pixels et l'unité métrique afin d'avoir des vecteurs exprimés en m/s .
- **Le post-traitement** pour supprimer des vecteurs non-pertinents et les remplacer.

Une 7ème étape peut être ajoutée s'il y a plus de 2 images analysées. On réalise une moyenne des champs de vecteurs pour ainsi avoir un résultat plus stable et surtout plus précis. Dans le cas où l'ensemencement n'est pas homogène, apportant des vecteurs

incohérents, effectuer une moyenne permet donc d'obtenir un champ vectoriel final stabilisé. Une fois toutes ces étapes réalisées, on obtient un champ de vecteurs vitesses permettant de quantifier l'écoulement du fluide. Pour mieux visualiser, un exemple de résultat d'une analyse PIV est représenté sur la Figure 2.2.

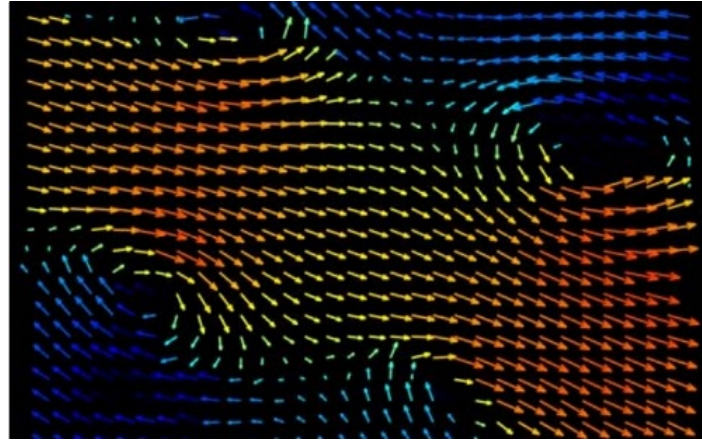


Figure 2.2 – Exemple de résultats d'une analyse PIV sur un vortex [39].

2.1. Ensemencement et illumination

L'ensemencement du fluide est la première étape à réaliser avant tout enregistrement. L'ensemencement est l'insertion de particules visibles qui vont permettre d'être suivies plus tard par des algorithmes et ainsi quantifier le déplacement du fluide. Sans ces particules, le fluide possède une surface généralement homogène difficilement détectable pour l'analyse PIV. Certains cas sans traceurs montrent tout de même des résultats satisfaisants lorsque l'écoulement présente des turbulences qui sont donc composées de motifs qui peuvent être suivis.

Pour avoir un bon ensemencement, il faut optimiser les 4 conditions suivantes :

- Tout d'abord, il faut que la **répartition** des traceurs soit homogène dans l'écoulement. Plus il y aura de particules dans le fluide, meilleure sera la transmission de l'information. Néanmoins, il faut veiller à ne pas avoir trop de traceurs sinon les particules ne seront pas assez bien distinguées par les logiciels d'analyse PIV.
- La **taille** des particules est également importante. Des particules de petites tailles sont préférées pour assurer un bon suivi du flux alors que l'augmentation de la taille réduit la transmission d'information si elles sont trop grandes. La forme aussi influence la qualité de l'analyse. Une forme sphérique est souvent privilégiée car elle réduit la traînée sur ces particules.
- Il y a aussi la **densité** des particules qui influence les résultats. Celle-ci doit être la plus proche de celle de l'eau pour assurer une bonne capacité des particules à suivre le fluide sans perturber l'écoulement.
- Enfin, il faut porter attention au **contraste** entre la couleur des particules et celle du fluide. Il doit être assez important pour que les particules se démarquent indéniablement du fluide.

Le type de particules utilisés comme ensemencement dépend évidemment du milieu étudié. Seront utilisées pour un liquide : des billes en polystyrène, des gouttes d'huile, ou encore de la poudre de pliolite qui possède la caractéristique d'avoir la même densité que l'eau. Pour un gaz, l'utilisation de fumée ou de fines gouttelettes d'huile est souvent conseillée. De même, la taille et la nature des particules varient en fonction de l'échantillon à analyser. Des copeaux de bois non-traités, de l'ordre du centimètre, seront utilisés dans une rivière naturelle, tandis que des billes en polystyrène de l'ordre du millimètre seront exploitées en laboratoire. Les caractéristiques des particules dépendent donc fortement de l'expérience réalisée.

Une bonne illumination de ces particules est également cruciale avant la prise d'images. L'illumination doit être homogène sans être trop intense pour éviter tout reflet sur les particules. La plupart du temps, l'utilisation d'un laser est préconisée. En alignant un jeu de lentilles sur le faisceau, celui-ci se disperse de manière homogène dans l'écoulement à étudier (voir Figure 2.3).

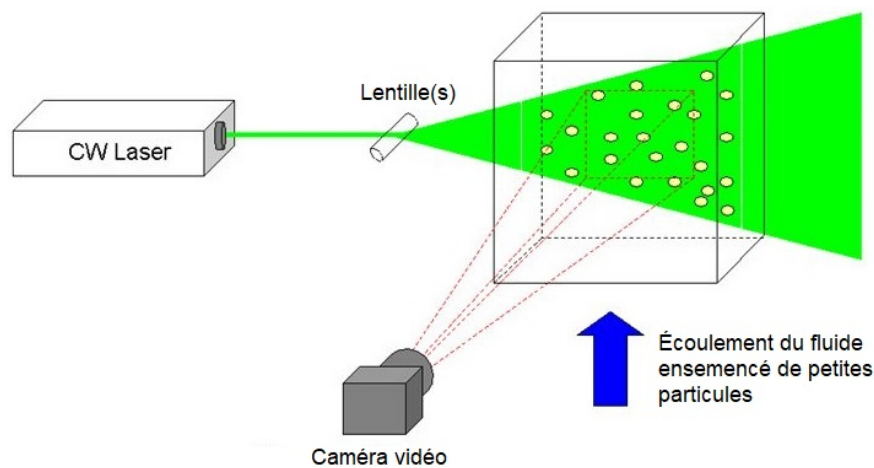


Figure 2.3 – Illustration de la technique de prise d'images avant analyse [21].

2.2. Prise d'images

La prise des images peut ensuite se faire. Elle est réalisée le plus souvent à l'aide d'une caméra vidéo. Effectivement, grâce à cette vidéo composée de plusieurs images, l'opérateur pourra facilement déduire le temps séparant les images en connaissant le nombre d'images prises par seconde par la caméra. La caméra est posée de préférence sur un support fixe pour éviter de devoir stabiliser la vidéo avant l'analyse.

2.3. Prétraitement

Une fois que les images ont été récoltées, l'étape suivante est le prétraitement de ces images, celui-ci se décompose en 4 parties :

- Premièrement, il est conseillé de choisir la **zone d'intérêt** où l'on souhaite déterminer les vecteurs vitesses. Cela permet de réaliser une analyse plus rapide et éviter des calculs inutiles.

- Une fois cette zone d'intérêt délimitée, on peut y placer des **masques** si certaines parties dans la zone d'intérêt ne doivent pas être calculées non plus. À nouveau cette étape permet une analyse plus rapide.
- Ensuite, pour pouvoir réaliser une analyse PIV en obtenant les meilleurs résultats possibles, il est important de bien distinguer les particules ensemencées du fluide. Une fois que les images de l'écoulement sont prises, il est possible d'accentuer la visibilité des traceurs par l'application de **filtres**. Ceux-ci ont plusieurs utilités comme augmenter le contraste entre particules et fluide mais aussi réduire voire supprimer les réflexions lumineuses et le bruit d'image qu'il pourrait exister. Différents filtres existent pour améliorer la détection des traceurs, mais il n'existe aucune convention sur la manière de les choisir. En effet, comme à chaque expérience les conditions de luminosité, le milieu ou les particules choisies changent, différents filtres doivent être appliqués. Pour pouvoir choisir de manière optimale ces filtres selon les conditions d'enregistrement, il faut comprendre leur fonctionnement mathématique. Pour plus de détails sur les filtres existants et leur manière de fonctionner, BIA et SOMERS (Chap.2 p.12-16) [25] expliquent en détails les filtres qui sont implémentés dans le logiciel *PIVlab* que nous avons également utilisé dans notre travail.
- Enfin, le dernier paramètre que l'on peut modifier en prétraitement est le dimensionnement d'une **aire d'interrogation (AI)** et d'une **aire de recherche (AR)**. Ces deux paramètres sont expliqués plus en détails dans le point suivant "Analyse des images".

2.4. Analyse des images

Le principe de l'analyse consiste à calculer statistiquement le déplacement de particules visibles sur deux images prises avec un intervalle de temps dt . Ce principe est illustré sur la Figure 2.4. À gauche de celle-ci, on retrouve l'image 1 prise au temps t , et à droite l'image 2 prise au temps $t+dt$.

La méthode d'analyse statistique la plus utilisée en PIV est la corrélation croisée (ou DDC pour *Direct Cross Correlation*). Avant d'expliquer le fonctionnement de cette méthode en détail, il faut d'abord introduire la définition de 3 paramètres indispensables :

1. En PIV, pour calculer le déplacement le plus probable d'un groupe de particules, une grille est appliquée sur l'image. Cette grille est **la grille d'interrogation** qui est illustrée sur l'image 1 de la Figure 2.4. C'est sur chacun de ces noeuds qu'un vecteur déplacement sera calculé.
2. Ensuite, il y a l'**aire d'interrogation (AI)** centrée sur ces noeuds, comme représentée en trait plein sur la Figure 2.4. Chaque AI contient un groupe de particules spécifique définissant une surface qui va être retrouvée sur la deuxième image. Cela suppose que le déplacement au sein de l'AI est uniforme et limite la taille de cette zone d'interrogation. Elle ne peut pas être trop grande auquel cas il y aura une perte d'information sur l'écoulement. D'autre part, celle-ci ne doit pas être trop petite non plus, sinon il y a un risque que l'AI ne contienne pas de particules du tout.
3. Enfin le troisième paramètre est l'**aire de recherche (AR)**, définie autour de la position d'origine de l'AI. Elle permet de limiter la processus de recherche à une petite zone, accélérant ainsi l'analyse. Les dimensions des deux aires sont donc liées,

et l'AI ne pourra jamais être plus grande que l'AR. Pour être plus précis, si la taille de l'AI est $N \times N$ pixels et celle de l'AR est $M \times M$ pixels, alors le déplacement des particules entre les deux images ne peut dépasser $(N - M)/2$. Ainsi, la taille des AI et AR variera en fonction de la vitesse de l'écoulement, le dt entre deux images ainsi que la concentration de particules dans le fluide. L'AR est représentée en traits pointillés sur la Figure 2.4.

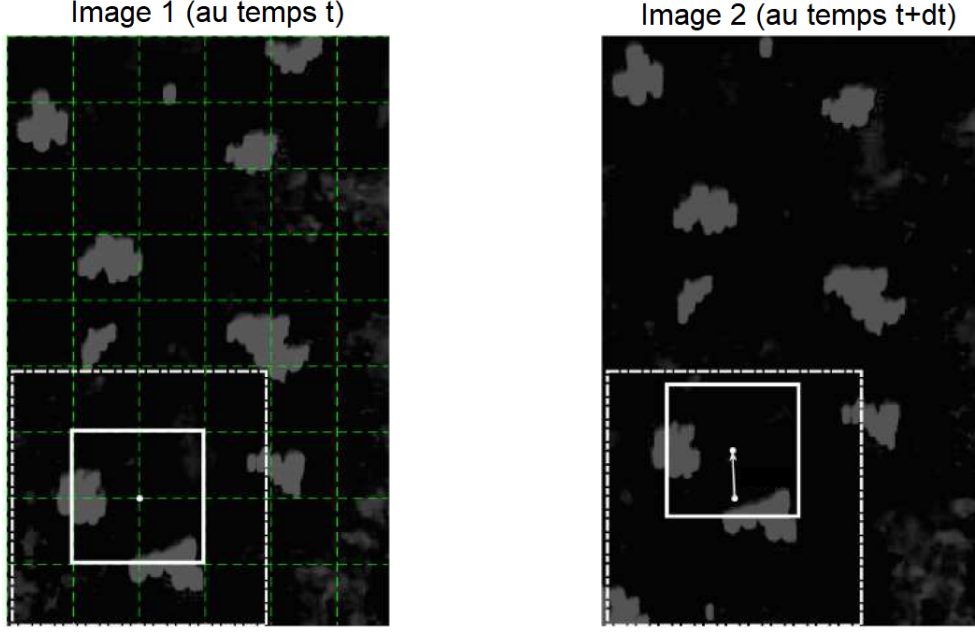


Figure 2.4 – Deux images prises avec un dt de décalage pour illustrer la méthode d'analyse statistique par DCC. On y retrouve en vert la **grille d'interrogation**, en trait plein l'**aire d'interrogation** et l'**aire de recherche** en trait pointillé. La flèche représente le déplacement identifié par PIV [25].

La corrélation croisée (DCC) sera utilisée pour récupérer la nouvelle position de l'aire d'interrogation (AI) de l'image 1 dans l'aire de recherche (AR) de l'image 2. Mathématiquement, la DCC consiste à calculer une corrélation entre l'aire d'interrogation sur l'image 1 que l'on va représenter par une matrice de pixels A , et toutes les autres AIs de mêmes dimensions qui peuvent être comprises dans l'aire de recherche de l'image 2. Cette série d'AIs sera représentée par une série de matrices $B_{i,j}$. Celle ayant le plus grand coefficient de corrélation sera choisie et un vecteur vitesse sera calculé comme illustré sur la Figure 2.4. La matrice de corrélation reprenant tout ces coefficients est calculée grâce à la formule

$$R_{ab} = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M [(A_{i,j} - \bar{A}) * (B_{i,j} - \bar{B})]}{[\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M (A_{i,j} - \bar{A})^2 * \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M (B_{i,j} - \bar{B})^2]^{\frac{1}{2}}} \quad (2.1)$$

où M définit la taille des aires d'interrogation et $\bar{A}$ et $\bar{B}$ sont les moyennes des matrices A et B .

Afin de mieux comprendre comment cette matrice de corrélation est construite, une représentation schématique est proposée sur la Figure 2.5. Cette matrice de corrélation est calculée entre l'AI d'une première image et tous les emplacements possibles de cette

AI dans la AR d'une seconde image. Chaque valeur représente le coefficient de corrélation pour toute position possible de l'AI dans l'AR.

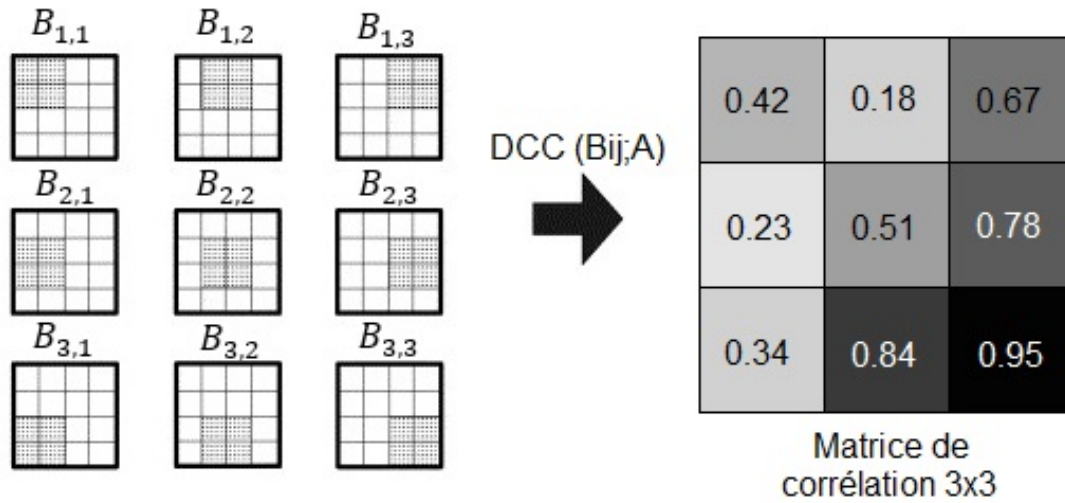


Figure 2.5 – Matrice de corrélation R de dimension 3×3 calculée à partir de la matrice d'aire d'interrogation de dimension 2×2 . L'aire de recherche est de dimension 4×4 . La fonction $DCC(B_{i,j}; A)$ applique la corrélation croisée sur l'ensemble des AIs afin d'obtenir tout les coefficients formant la matrice de corrélation.

La matrice de corrélation calculée sera carrée et aura pour dimension $N-M+1$. Graphiquement, la corrélation présentera un pic à l'emplacement le plus probable où l'AI de la première image se retrouve dans l'AR de la seconde (voir Figure 2.6). Quant au déplacement, il est calculé en prenant la distance entre le centre de l'AI de la première image et le centre de l'AI possédant ce pic de corrélation qui correspond au maximum de la matrice de corrélation. Ensuite, la vitesse est trouvée en divisant ce déplacement par le δt entre les deux images.

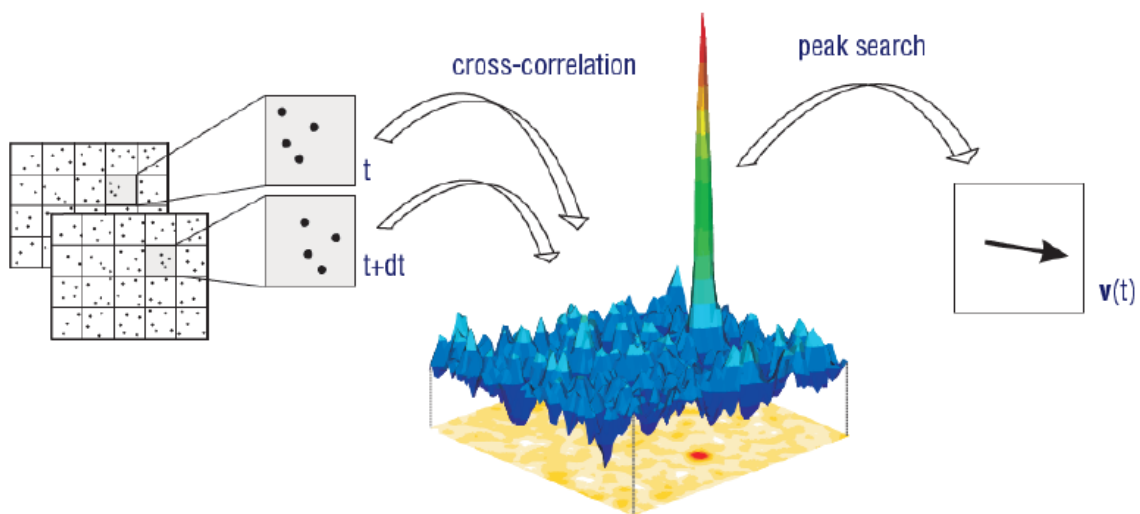


Figure 2.6 – Représentation graphique d'une matrice de corrélation [61].

Au fil des années, de nombreuses améliorations ont été apportées à cette technique d'analyse statistique notamment en appliquant la transformée de Fourier rapide (ou FFT

pour Fast Fourier Transform) qui détermine la matrice de corrélation dans le domaine fréquentiel et ainsi améliorer fortement le temps de calcul [5].

Ou bien encore en utilisant la *Multi-pass PIV*, qui réduit progressivement la taille de l'AI en utilisant le résultat précédent afin d'ajuster la position de l'AI dans la nouvelle analyse, ce qui augmentera la précision du résultat [55].

Une dernière amélioration, qui mérite d'être citée dans ce travail, est l'interpolation sub pixel [26]. Le résultat obtenu à partir du pic de corrélation est d'une précision de l'ordre du pixel. Il arrive dans certains cas que la résolution pixel par mètre soit trop petite, et qu'une plus grande précision soit nécessaire. Une manière d'y parvenir est d'estimer un nouveau pic de corrélation à l'intérieur du pixel en rattachant une fonction parabolique sur les valeurs de corrélation autour de la position du maximum de corrélation trouvé précédemment (voir Figure 2.7). Cette méthode permet d'obtenir une précision de l'ordre de 0.2 pixel [16].

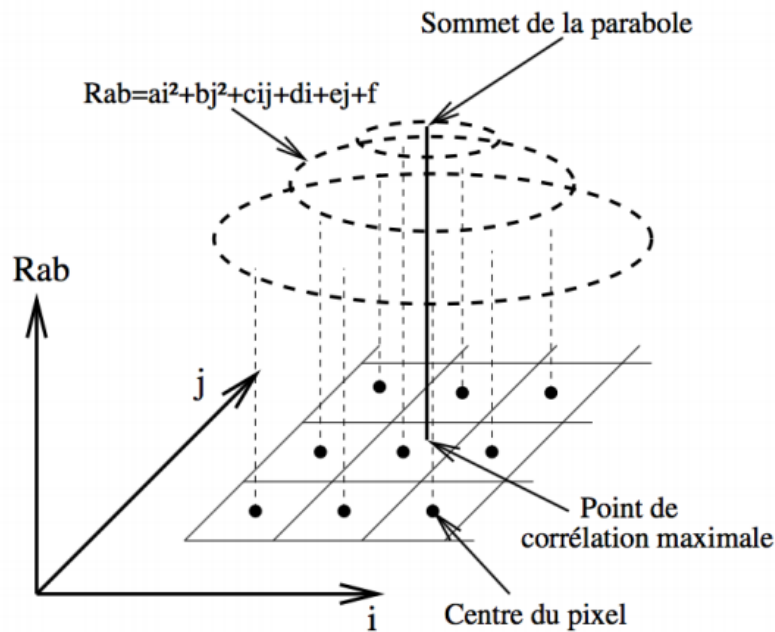


Figure 2.7 – Utilisation d'une fonction parabolique sur les valeurs de corrélation aux alentours de la position du maximum de corrélation [26].

Il existe également d'autres techniques PIV pour déterminer les vecteurs vitesses dans un fluide, comme la *Minimum Quadratic Difference* développée par GUY et MERZIRCH en 1996 [24]. Elle utilise une différence quadratique plutôt qu'un coefficient de corrélation. Cette technique a la particularité d'être plus sensible aux détails qui se trouvent dans l'AI, mais moins sensible à de forts gradients globaux.

2.5. Calibration

Une fois l'analyse d'images réalisée, le champ de vitesse obtenu s'exprime en pixel/seconde. Il est donc nécessaire de convertir ces vitesses dans le système métrique afin de pouvoir utiliser ces données par la suite.

En connaissant les différents paramètres implicites de la caméra utilisée tel que l'angle

d'ouverture de l'objectif, ou explicite comme l'inclinaison et la position de celle-ci par rapport au plan 2D de l'écoulement, il est possible de corriger les problèmes visuels liés aux images comme les effets de perspective ou la distorsion. Pour éviter au maximum ces problèmes, la caméra sera placée de façon à ce que son axe optique soit le plus perpendiculaire au plan de l'écoulement à analyser.

Après correction, la transition de pixel à l'unité métrique se fait en connaissant la dimension préalablement mesurée d'un objet se trouvant également sur les images de l'écoulement. Une distance métrique est alors associée à un pixel et transforme l'unité des vecteurs vitesses en mètre/seconde.

2.6. Post-traitement

Le champ de vitesses obtenu à la fin de l'analyse peut présenter des vecteurs incohérents. La Figure 2.8 montre un exemple de vecteurs vitesses (a) sans et (b) avec validation. Ces erreurs arrivent dans les zones avec un manque d'ensemencement, ou bien par des traceurs non repérés sur la seconde image. Il est facile de détecter ces zones visuellement puisque les vecteurs y diffèrent par leur amplitude ou leur direction différente des vecteurs avoisinants. Afin d'améliorer les résultats, ces vecteurs sont supprimés et remplacés par des vecteurs interpolés.

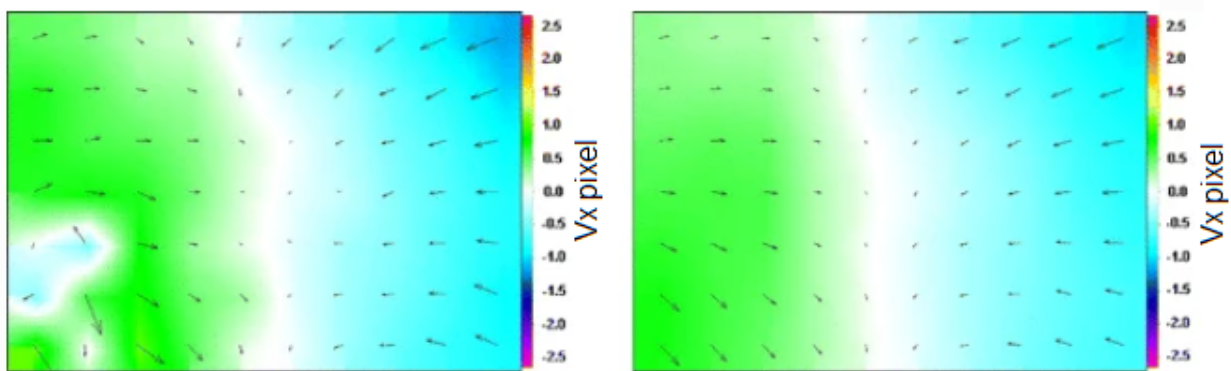


Figure 2.8 – Importance de la validation des vecteurs après analyse [60].

Pour détecter ces vecteurs presque automatiquement, plusieurs techniques ont été développées [54]. Les trois méthodes le plus souvent utilisées, seules ou conjointes, sont les suivantes :

- Les composantes verticales et horizontales des vecteurs vitesses sont placées sur deux axes différents, et les valeurs de ces vecteurs sont ensuite replacées sur ce graphique. Un nuage formé par une forte concentration de points apparaîtra. Les points, se trouvant aux alentours, sont donc des vecteurs ayant des valeurs anormales et pourront être supprimés.
- Il est également possible de supprimer les vecteurs dont les composantes verticales et horizontales sont trop éloignées de la moyenne. La technique consiste à calculer une moyenne μ et l'écart-type σ pour chaque composante. Un nombre n est choisi manuellement pour que les vecteurs, dont une de leurs composantes est plus grande ou plus petite que $\mu \pm n * \sigma$, soient supprimés. L'hypothèse d'un écoulement uniforme est donc nécessaire avant d'appliquer cet algorithme de suppression. Dans le cas d'un écoulement irrégulier, il est donc déconseillé d'utiliser cette méthode.

- Une troisième façon de supprimer ces vecteurs est de comparer l'amplitude d'un vecteur avec celles de vecteurs voisins. Si celle-ci est trop éloignée de la médiane de leurs amplitudes, le vecteur sera supprimé. Pour pouvoir utiliser cette méthode, il faut avoir un écoulement continu, ne présentant pas d'accumulation de vecteurs incohérents.

Après avoir supprimé ces vecteurs, il est intéressant de les remplacer pour conserver la continuité du champ. Cela peut être effectué en effectuant une interpolation, plusieurs méthodes existent d'ailleurs à cette fin [54]. Une interpolation par splines 2D a prouvé son efficacité lorsque la proportion de vecteurs manquants est inférieure à 5%. Néanmoins, une seconde méthode, utilisée dans la plupart des logiciels, propose de meilleurs résultats lorsque la proportion de vecteurs manquants sont supérieurs à 10%. Cette interpolation utilise le "*Boundary value solver*" qui résout un système d'équations différentielles partielles sur tout le champ de vecteurs.

3. Logiciels disponibles

De nos jours, de nombreux logiciels utilisant la PIV pour déterminer un champ de vitesses dans un écoulement existent. Certains sont développés par des entreprises, d'autres par des particuliers intéressés par la technique ou des chercheurs. Il est pratiquement impossible de les citer tellement il en existe aujourd'hui. Les logiciels les plus connus et les plus accessibles se retrouvent dans la liste suivante :

- **PIVlab** [53] est une application gratuite, implémentée sur MATLAB. Ce programme a été créé en 2010 par William Thielicke, un biologiste allemand et docteur en biomimétique et en dynamique des fluides. Dans un premier temps, ce logiciel a été créé pour étudier l'aérodynamique du battement d'ailes des oiseaux, mais aujourd'hui le domaine de ses applications s'est élargi.
- Un autre logiciel non-commercial est **OpenPIV**. Développé en Python, c'est un programme open source qui permet de comprendre son fonctionnement en détail et de l'améliorer pour certaines utilisations spécifiques. [4]
- Enfin, il y a **PIVview** [22] qui est probablement le seul logiciel PIV disponible pour tous les principaux systèmes d'exploitation. Ce logiciel est également accessible gratuitement. Il a été développé par la société PIVTEC GmbH en Allemagne.

Parmi ces logiciels, celui qui a été étudié dans ce mémoire est *PIVlab*. Facile d'utilisation, c'est également un projet très bien suivi par son développeur. Le logiciel est assez connu à l'UCLouvain au sein de l'Institute of Mechanics, Materials, and Civil Engineering (IMMC) puisqu'il est étudié depuis plusieurs années par des mémorants [25][51][49]. Un manuel pour l'utilisation d'une des dernières versions se trouve en annexe A.1.

Chapitre 3

Application aux rivières : la LSPIV

Dans ce chapitre, une courte définition de la LSPIV sera énoncée ainsi que les différentes étapes à suivre pour la mettre en place. Ensuite, les différences importantes entre PIV et LSPIV seront citées. Ce chapitre sera clôturé par une présentation de différents logiciels qui utilisent la LSPIV.

1. Définition et méthodologie

La *Large Scale Particle Image Velocimetry* ou LPSIV est simplement l'application de la PIV à plus grande échelle. Si la PIV est une technique utilisée en laboratoire sur des petits modèles, la LSPIV détermine des champs de vitesses de surface couvrant des zones d'écoulement allant jusqu'à des centaines de mètres carrés [42] et plus encore avec l'évolution de l'imagerie. La toute première fois que la PIV a été modifiée pour être appliquée en milieu naturel, c'était en 1998 par FUJITA, MUSTE, et KRUGER [19]. Depuis, plusieurs recherches ont été réalisées sur la LSPIV notamment celle de HAUET et al [26] sur la mesure de débit par LSPIV en période de crue pour améliorer des courbes de tarage en régime.

Le mode d'utilisation de la LSPIV est donc très proche de la PIV, mais nécessite quelques ajustements supplémentaires dans la méthodologie à appliquer :

1. **Préparation du terrain** par la pose de balises GRPs ("*Ground Reference Points*") et prise des références géographiques pour chacune d'entre elles.
2. **Mise en place de la caméra** sur un trépied ou sur un bras télescopique et installation sur une berge ou sur un pont. Il est également possible d'utiliser un drone ou une caméra embarquée sur un hélicoptère.
3. **Ensemencement** avec des traceurs adéquats.
4. **Prise d'images** à l'aide de la caméra utilisée.
5. **Stabilisation** des images si nécessaire.
6. Une correction géométrique des images afin d'éviter les effets de distorsion et de perspective, appelée **orthorectification**.
7. **Prétraitement** par l'application de masques et de filtres pour améliorer les résultats de l'analyse.

8. Obtention du champ de vecteurs vitesses par **analyse PIV**.
9. **Calibration** permettant de convertir des pixels en unité métrique.
10. **Post-traitement** des résultats par validation des vecteurs.
11. Calcul de la **moyenne** des champs de vecteurs afin qu'ils soient plus précis.

La rapidité d'utilisation de la LSPIV en rivière par rapport aux techniques de jaugeage traditionnelles permet de gagner du temps et de réaliser des mesures jusque là impossible à relever, notamment lors des crues où des courants importants qui pourraient mettre en danger les opérateurs. C'est pour ces raisons que la LSPIV est une technique de mesure qui s'avère intéressante. Son prix abordable et son caractère non-intrusif sont également deux points forts.

2. Distinctions entre PIV et LSPIV

Comme expliqué dans la définition précédente, la différence principale entre LSPIV et PIV est **la taille** de la surface d'étude. Mais ce n'est pas la seule distinction. La PIV pouvant être utilisée dans des laboratoires, les conditions de prise d'images sont facilement contrôlées et fixées. En revanche, la LSPIV étant utilisée en milieu naturel, il faut adapter ces conditions en fonction de la zone étudiée. Trois autres différences majeures peuvent donc être citées [26] :

- Un éclairage artificiel étant indispensable dans le cas de la PIV, **l'illumination** est entièrement contrôlée. Pour la LSPIV, la source lumineuse en milieu naturel dépend des conditions climatiques et de la position du soleil durant la journée. Parfois, l'utilisation de lumière artificielle sera indispensable.
- **L'angle de la caméra** par rapport au plan de l'écoulement est toujours perpendiculaire pour la PIV. En LSPIV, en revanche, l'inclinaison de la caméra peut varier afin de couvrir toute la zone à étudier. Les effets de perspective devront alors être préalablement corrigés avant l'analyse. Un autre moyen de couvrir la zone étudiée est de prendre de la hauteur à partir d'un pont ou d'une caméra embarquée sur un drone par exemple. Un autre problème entre alors en jeu: la résolution d'images. Celle-ci diminue lorsqu'on s'éloigne de l'écoulement. Pour être plus précis, un pixel couvrira une plus grande surface sur l'image et l'analyse PIV fournira des résultats parfois incomplets et/ou erronés.
- Il faut également prêter attention à **l'ensemencement**. Les traceurs qui le constituent auront une taille bien plus grande pour la LSPIV. De plus, les traceurs étant difficilement récupérables en milieu naturel, il faut veiller à l'impact de leur composition sur l'environnement.

Ces différences entre les deux techniques apportent donc de nouveaux défis auxquels il faut pouvoir faire face. Aujourd'hui, diverses solutions existent pour contrecarrer ces problèmes notamment grâce aux avancées technologiques.

2.1. Angle de prise d'images

En milieu naturel, à cause d'une végétation dense ou de berges trop raides, il est parfois difficile de bien positionner la caméra pour couvrir l'entièreté de la zone à étudier. Une inclinaison de celle-ci sera donc nécessaire dans certains cas, et l'axe de prise de vue ne sera plus perpendiculaire à l'écoulement. L'angle d'inclinaison provoquera alors des problèmes de perspective plus ou moins importants. Lorsque la caméra est placée sur une des deux rives, les vitesses proches de la caméra seront sous-estimées car les traceurs parcoureront moins de pixels par rapport à ceux près de l'autre rive qui eux, auront des vitesses plutôt surestimées.

Une correction de cette perspective importante est possible grâce à une rectification géométrique des images appelée orthorectification (présentée sur la Figure 3.1). Cela consiste à déformer l'image de base en connaissant au minimum 4 coordonnées géographiques (en plaçant préalablement des balises GRP) pour obtenir une image du cours d'eau dans le plan de l'écoulement, comme si elle avait été prise perpendiculairement à ce plan. Il existe l'orthorectification 2D où l'on place uniquement des balises GRP dans le plan de l'écoulement. Cependant, comme on place généralement ces balises sur les berges, il est parfois difficile de les positionner sur un même plan, et il faut donc notifier une 3ème coordonnée par balise qui désigne l'altitude. Il faudra au moins 6 balises pour réaliser l'orthorectification 3D contrairement à 4 en deux dimensions.

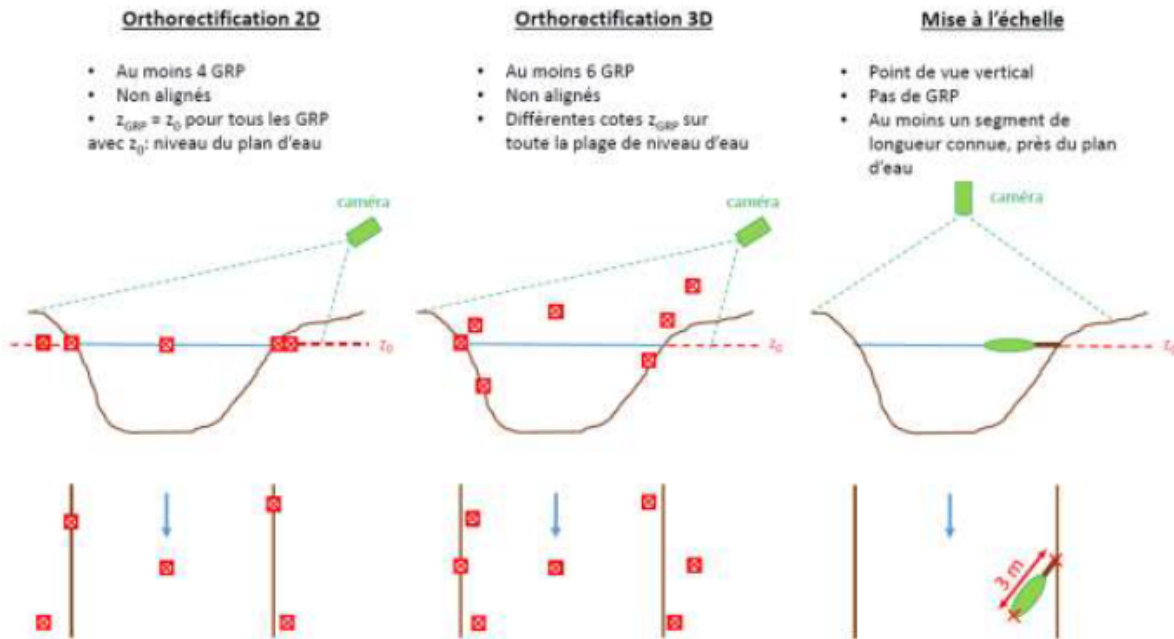


Figure 3.1 – Orthorectification 2D (a) et 3D (b) comparées à une caméra perpendiculaire au plan de l'écoulement (c) [33].

Il est bien évidemment possible de se passer de l'orthorectification si les images récoltées sont perpendiculaires au plan de l'écoulement. C'est d'ailleurs facilement réalisable en plaçant une caméra sur un drone ou encore sur le bord d'un pont à proximité. Néanmoins, dans cette deuxième situation les piles de ponts peuvent influencer l'écoulement par leur présence et ce n'est pas ce qui est recherché en utilisant la LSPIV.

2.2. Résolution

Étant donné qu'en LSPIV la zone étudiée est beaucoup plus grande qu'un simple échantillon analysé en laboratoire, la résolution de la caméra devient significative. Plus la largeur du cours d'eau étudié est grande, plus il faudra prendre de l'altitude avec la caméra donc plus la résolution devra être importante.

La méthode d'analyse PIV étant de l'ordre du pixel, il faut absolument que le déplacement des traceurs entre deux images soit plus grand que la taille d'un pixel. Si ce n'est pas le cas, l'analyse PIV ne détectera aucun déplacement et sortira des vecteurs vitesses nuls. L'avancée dans le domaine de la vidéo numérique permet, de nos jours, de filmer avec des appareils possédant de grandes résolutions comme la 4K disponible sur certains drones.

2.3. Illumination

En milieu naturel, l'illumination est rythmée par la position du soleil et les conditions météorologiques locales. Il se peut que pendant une même prise d'images, la luminosité change considérablement à cause d'un simple nuage. L'analyse PIV peut facilement être perturbée en ne reconnaissant plus les traceurs d'une image à l'autre puisque leur nuance a changé.

Le même cas de figure se produit lorsqu'il y a des zones d'ombre sur l'écoulement. Le système de tracking détecte facilement les traceurs dans les zones d'ombre lorsqu'ils ont un bon contraste avec la rivière, mais le problème se trouve d'avantage à la frontière entre l'ombre et la zone éclairée naturellement, où la luminosité change brutalement d'intensité.

Néanmoins, le problème auquel il faut rester attentif, est surtout l'impact des reflets provoqués par le soleil en fonction de son inclinaison, et celle de la caméra. Lors de l'analyse, on retrouvera des zones de pixels complètement saturées, impossible à discerner les uns des autres car ils auront tous la valeur maximale de nuances de gris.

2.4. Ensemencement

Avoir un bon ensemencement est essentiel pour réaliser une analyse LSPIV. L'ensemencement naturel des rivières est habituellement insuffisant. Même si lors de crues importantes, les débris emportés en surface peuvent faire office de traceurs, il est rare que cela suffise. Les figures de turbulences présentes dans l'écoulement peuvent aussi jouer un rôle dans la détection de la surface de l'eau, mais aucune étude n'a réellement prouvé leur efficacité.

Ajouter artificiellement des traceurs dans le cours d'eau est donc la solution la plus adéquate. Cependant, il faut identifier de bons traceurs qui possèdent les caractéristiques de ne pas interférer significativement avec l'écoulement, d'être produits en quantité suffisante, et surtout d'avoir une bonne flottabilité et un bon contraste par rapport à la surface de l'eau. Dans leur étude de 2014, afin d'optimiser la méthode LSPIV, DETER et WEIBRECHT [11] ont conclu que des copeaux de bois font d'excellents traceurs.

Assurer une bonne homogénéité des traceurs sur toute la largeur d'un écoulement est aussi un challenge. Une rivière trop large ou trop profonde ajoute une difficulté pour mettre en oeuvre l'ensemencement avec une bonne uniformité. Des systèmes ingénieux sont parfois utilisés comme dispositif de déploiement tel que l'utilisation d'une tyrolienne

afin de répartir les traceurs par exemple [26].

Le manque de traceurs dans certaines zones provoque une sous-estimation importante des vecteurs vitesses puisqu'en faisant une moyenne du champ de vitesses, les vecteurs nuls vont la faire baisser. Environ trois traceurs par AI seraient nécessaires pour assurer une bonne détermination des vitesses, cette précision augmente considérablement à partir de cinq traceurs par AI [63]. Il faut par ailleurs se méfier d'une trop forte concentration de traceurs qui pourrait saturer l'AI rendant ainsi les différents traceurs indiscernables entre eux [40].

3. Logiciels disponibles

A ce jour, il n'existe qu'un seul logiciel spécialisé dans l'application de la méthode LSPIV, celui-ci est le logiciel *Fudaa-LSPIV*. Hormis ce programme, aucun autre logiciel aussi spécialisé dans la méthode n'a été développé.

Pour pouvoir comparer son efficacité, le logiciel *PIVlab* a été utilisé de manière adaptée afin de sortir un champ de vecteurs vitesses pour ensuite calculer les débits à partir d'un code MATLAB que nous avons implémenté.

Enfin, *Discharge*, une application disponible sur Android, a également été développée.

3.1. Fudaa-LSPIV

Afin de pouvoir rendre la technique LSPIV accessible à toute personne intéressée (chercheurs ou professionnels) et ainsi apporter potentiellement des pistes d'amélioration, EDF et Istrea ont financé le développement de *Fudaa-LSPIV* exécuté par la société DeltaCAD depuis l'été 2010 en France.

Le logiciel est donc entièrement gratuit et libre. Il se compose d'une interface graphique codée en *Java* qui appelle des exécutables *Fortran* ce qui permet de couvrir toute les étapes de la LSPIV, en passant par l'orthorectification des images, le calcul de vitesses LSPIV, le calcul d'une moyenne et le calcul de débit en important les coordonnées de la bathymétrie de la rivière. Ce logiciel fonctionne sur les systèmes d'exploitation *Windows* et *Linux* uniquement.

Plus d'informations sur son utilisation sont disponibles dans le mode d'emploi qui se trouve en annexe A.2..

3.2. PIVlab

Le second programme également utilisé dans ce mémoire pour la LSPIV est *PIVlab*. Application gratuite développée sur MATLAB, elle a facilement été adaptée à la LSPIV en implémentant un code servant d'extension pour déterminer les débits. Ce code est également implémenté sur MATLAB, reprenant en entrée le champ de vecteurs vitesses calculé par *PIVlab*, la bathymétrie et la hauteur d'eau. Voir annexe A.4. pour plus de détails concernant ce code et l'annexe A.1. pour le manuel complet d'utilisation adapté à la LSPIV.

3.3. Discharge

Finalement, *Discharge* est une application développée sur le système d'exploitation mobile Android. Cette application est un outil de mesure de débit optique non-intrusif, adapté aux

cours d'eau naturels, aux sillons d'irrigation et aux canaux. L'application est entièrement intégrée à la plate-forme Web «discharge.ch». Elle permet de déterminer le débit avec le niveau d'eau et la bathymétrie considérée comme connue. Le débit est calculé soit via la courbe de tarage (courbe liant le niveau d'eau et le débit pour une rivière donnée), soit via la vitesse de surface mesurée par l'application. Tous les calculs sont effectués directement sur un smartphone, de sorte que l'application puisse fonctionner en mode hors ligne également [14].

Chapitre 4

Détermination du débit

Il existe de nombreuses façon de déterminer un débit de même que de multiples instruments. Dans un premier temps la "*Mean Section method*" et la "*Mid Section method*" seront détaillées car il s'agit de la façon la plus basique de calculer un débit à partir de vitesses relevées directement dans le cours d'eau et de la bathymétrie.

Par la suite, dans la continuité de ce qui a été fait jusqu'ici, ce chapitre traite des moyens qui existent actuellement pour obtenir un débit de manière non-intrusive.

1. Méthodes de calculs classiques d'un débit

Les méthodes présentées dans cette section montrent comment il est possible d'obtenir un débit à partir des vitesses de l'écoulement et de la bathymétrie.

1.1. La "*Mean Section method*"

Lors de cette méthode, le débit est obtenu en discrétisant la section en un certain nombre de "colonnes", comme sur la Figure 4.1. Chaque colonne est délimitée par deux verticales adjacentes sur lesquelles les mesures ont été effectuées.

Le débit qui passe par cette colonne est donné par

$$Q_p = \frac{\bar{v}_1 + \bar{v}_2}{2} \frac{d_1 + d_2}{2} b \quad [m^3/s] \quad (4.1)$$

où $\bar{v}_i$ et d_i sont la vitesse moyenne et la hauteur de la vecticale i .

b est la distance horizontale qui sépare les deux verticales.

Pour la verticale qui correspond à la berge, la formule va être différente pour tenir compte de la forme parabolique de la vitesse moyenne dans la direction horizontale vers la berge, le débit dans la colonne située à l'extrémité est par

$$Q_p = \frac{2}{3} \bar{v}_1 \frac{d_0 + d_1}{2} b \quad [m^3/s] \quad (4.2)$$

où $\bar{v}_1$ et d_1 sont la vitesse moyenne et la hauteur de la verticale la plus proche de la berge. d_0 est la hauteur d'eau mesurée à la berge.

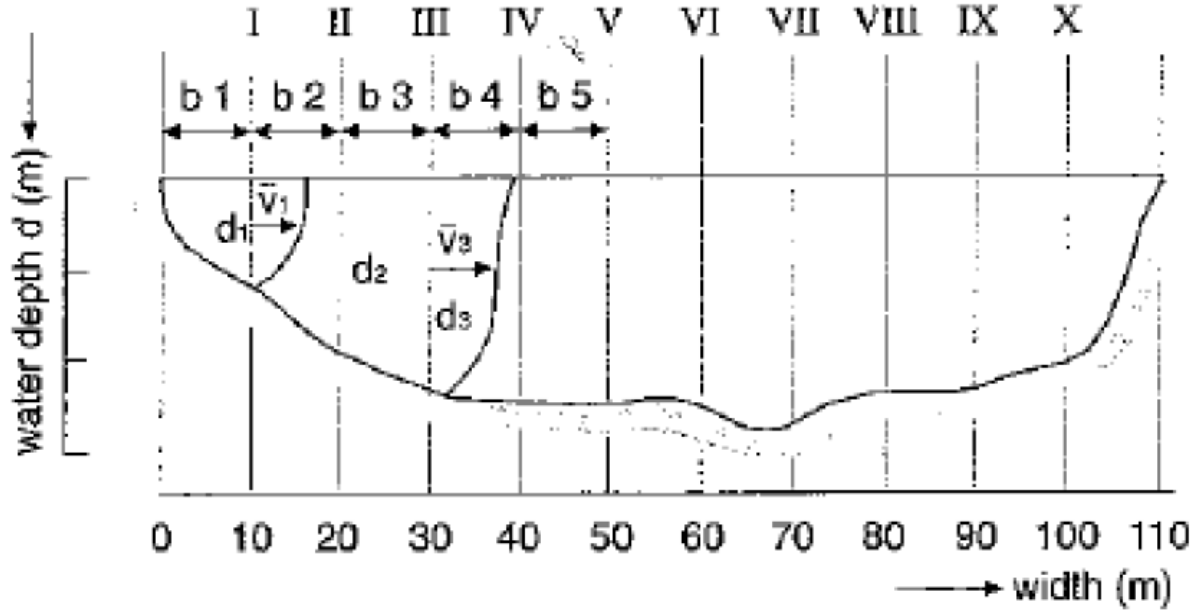


Figure 4.1 – Section transversale décomposée en plusieurs sections distinctes [7].

Le débit total de la rivière est obtenu en additionnant les débits des n colonnes :

$$Q_{tot} = \sum_{i=0}^n Q_{pi}. \quad (4.3)$$

1.2. La "Mid Section method"

Cette méthode consiste à prendre des sections dont leur largeur est égale à la moitié de la distance entre la verticale considérée à sa gauche et la moitié de la distance avec l'autre verticale à sa droite.

Les autres données comme la hauteur d'eau et la vitesse moyenne sont celles se trouvant sur la verticale considérée. On peut ainsi calculer le débit qui passe par chaque section (pour la verticale II sur la Figure 4.1)

$$Q_2 = \frac{(b_2 + b_3)}{2} \bar{v}_2 h_2 \quad (4.4)$$

avec :

- b_2 = distance entre la verticale I et II;
- b_3 = distance entre la verticale II et III.

Ensuite, le débit total de la rivière est obtenu en additionnant les débits autour de chaque verticale :

$$Q_{tot} = \sum_{i=0}^n Q_i \quad (4.5)$$

2. Les méthodes non-intrusives

Par définition les méthodes non-intrusives ne rentrent pas en contact avec l'eau.

2.1. Le radar

Ces instruments permettent d'obtenir les vitesses de surface de l'écoulement. Celles-ci sont enregistrées grâce aux réflexions de signaux radar présents dans les ondes de surface (voir Figure 4.2). Grâce à l'effet Doppler, il est alors possible de calculer les vitesses en observant le décalage de fréquence de l'onde à l'émission et à la réception. Ce radar permet aussi de mesurer la hauteur d'eau dans la rivière. Il ne reste alors plus qu'à connaître la bathymétrie de la rivière pour obtenir le débit.

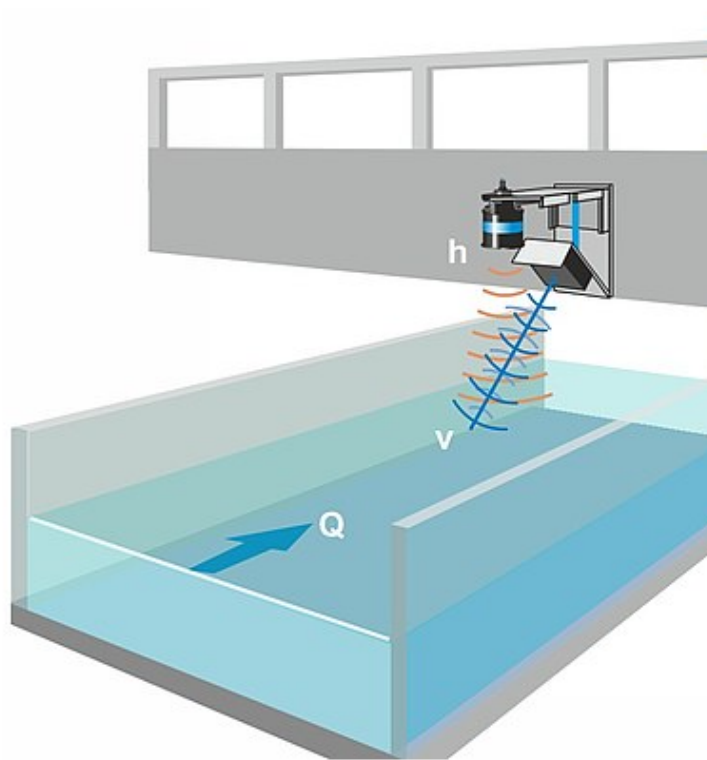


Figure 4.2 – Illustration du fonctionnement du radar [44].

2.2. Le traitement d'images vidéos

Cette méthode applique directement le principe de la LSPIV pour calculer les vitesses de surface. Différentes méthodes peuvent ensuite être utilisées pour déterminer l'aire mouillée comme présentées précédemment.

De nos jours, le développement de la qualité des caméras et des drones ont permis le déploiement de cette méthode. Du fait de ses débuts, des études doivent encore être menées afin de rendre la LSPIV plus précise et de connaître avec précision les différents facteurs qui l'influencent.

Ce type de mesure a l'avantage de pouvoir être déployé dans des endroits difficiles d'accès, lors de crue ou pour des rivières avec des courants importants. De plus, le matériel nécessaire est compact et rapide à déployer.

3. Relation entre la vitesse de surface et la vitesse moyenne

Que ce soit pour les radars ou pour le traitement d'images vidéos, le calcul du débit nécessite de connaître la vitesse moyenne de l'écoulement et non pas la vitesse de surface calculée par la LSPIV. Pour mieux comprendre la relation entre ces deux vitesses, il est indispensable de connaître le profil de vitesse d'un écoulement au sein d'une rivière.

3.1. Distribution verticale des vitesses dans une rivière

Tout d'abord, il faut savoir que la distribution des vitesses n'est pas uniforme sur toute la hauteur d'eau. Le profil de vitesse suit une loi logarithmique dans une rivière. De manière théorique, l'équation générale de cette loi est [18]

$$\frac{u(z)}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln(A\chi \frac{z}{k_s}) \quad (4.6)$$

avec $u(z)$ la vitesse locale, u_* la vitesse de cisaillement, κ représente la constante de von Karman ($\kappa \approx 0.4$), A est défini tel que $\frac{1}{\kappa} * \ln(A) = 8.50$, χ est un paramètre qui dépend de la rugosité du lit ($0.4 < \chi < 1.4$), k_s dépend du diamètre des grains composants le lit, et enfin z représente la distance depuis l'origine du profil de vitesse verticale.

Afin de faciliter le calcul, le profil de vitesse peut être exprimé suivant la loi des puissances [27] en remplaçant le terme $\frac{A\chi}{k_s}$ par z_0 :

$$u(z) = a(z - z_0)^{\frac{1}{m}} \quad (4.7)$$

avec a un coefficient et $\frac{1}{m}$ l'indice de la loi des puissances.

Un profil de vitesse est représenté graphiquement sur la Figure 4.3 ci-dessous. Le profil de vitesse suit bien la loi logarithmique excepté à une profondeur proche du lit de la rivière. À cet endroit, l'écoulement est en réalité laminaire et le profil de vitesse suit donc une loi linéaire [18].

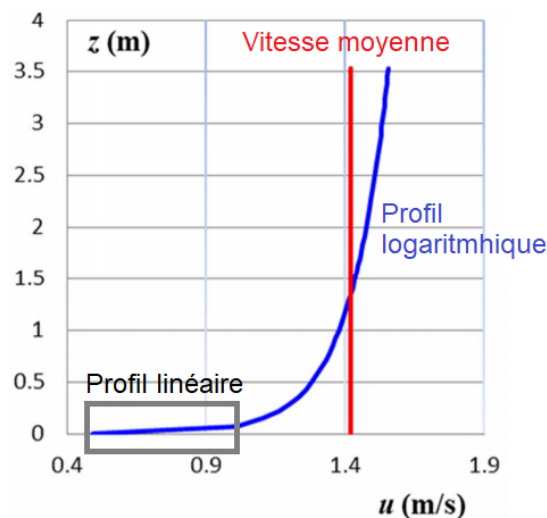


Figure 4.3 – Exemple de distribution verticale des vitesses dans une rivière - (image modifiée de [18]).

Expérimentalement, le profil de vitesse ne suit pas toujours cette loi logarithmique. En fonction de la végétation, du vent, de la profondeur, de la largeur de la rivière, de sa morphologie ou encore de la rugosité du lit, l'écoulement peut être plus ou moins perturbé, et le profil de vitesse se retrouve donc modifié par rapport à la théorie. Plusieurs recherches ont été menées afin de proposer un profil de vitesse dans certaines situations caractéristiques :

- Un premier profil de vitesse a été proposé en 2016 par LARRARTE et *al.* [38] pour des canaux étroits. Lorsque le rapport entre la largeur de la rivière et la hauteur d'eau est inférieur à 5, il se produit un phénomène appelé "*dip phenomenon*" (voir Figure 4.4). Cette figure montre que la vitesse de surface (U_{sl} ici) n'est pas égale à la vitesse maximale U_{max} du profil de vitesse

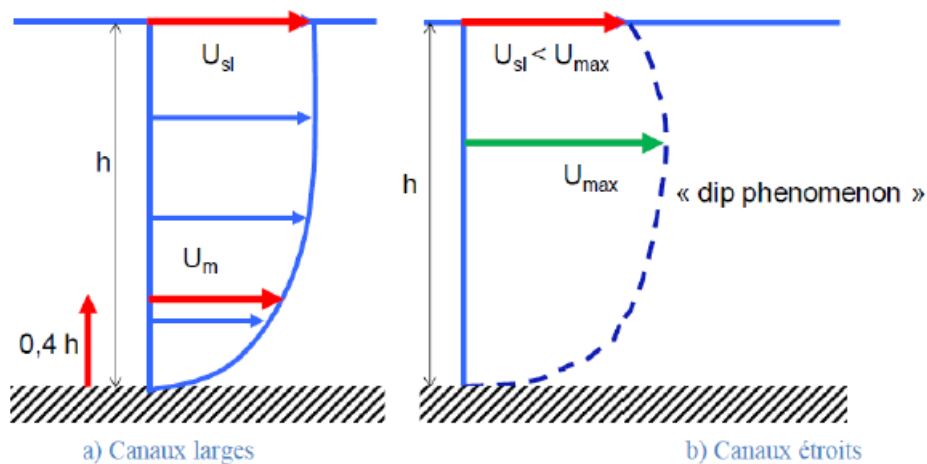


Figure 4.4 – Représentation du "*dip phenomenon*" [38].

- Le second profil de vitesse spécifié par STEPHAN et GUTKNECHT en 2002 [50], s'applique lors de la présence de végétation sur le lit de la rivière (voir Figure 4.5). Cette distribution de vitesse est décrite par la relation [51]

$$u(z) = \frac{u_*}{\kappa} \ln\left(\frac{z - h_{p,m}}{h_{p,m}}\right) + u_* B_r \quad (4.8)$$

où $h_{p,m}$ représente la hauteur moyenne de cette végétation.

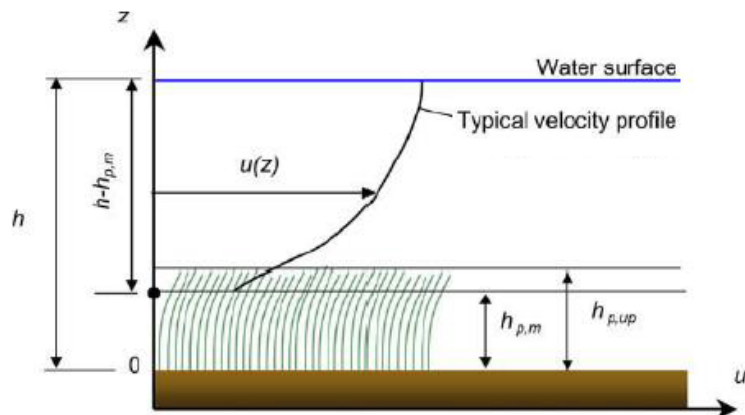


Figure 4.5 – Représentation du profil de vitesse en présence de végétation sur le lit d'une rivière [51].

De multiples facteurs peuvent donc perturber le profil de vitesse verticale au sein d'un écoulement ce qui rend compte de la difficulté initiale de trouver une relation entre vitesse de surface et vitesse moyenne. Il est donc indispensable de bien connaître ce profil de vitesse avant de pouvoir établir une telle relation.

3.2. L'index de vitesse α

De nombreuses études ont été menées afin d'estimer la vitesse moyenne à l'aide d'un index de vitesse en ne connaissant qu'une seule et unique vitesse, la vitesse de surface [9] [19]. Cette index de vitesse α est défini de la façon suivante :

$$\alpha = \frac{\text{Vitesse moyenne sur la colonne d'eau}}{\text{Vitesse de surface de cette colonne d'eau}} \quad (4.9)$$

En déterminant ce coefficient de vitesse α , la vitesse moyenne peut être déduite. Cette vitesse est indispensable pour déterminer un débit dans une rivière. Grâce à cette relation, les méthodes sans contact (radars, LSPIV) ont pu être développées pour mesurer des débits.

Ce coefficient peut être déterminé de manière théorique ou expérimentale. Il peut également être calculé localement pour chaque colonne d'eau, dont la somme de celles-ci représente la section, ou bien de manière globale pour la section complète. De nombreuses études ont été réalisées afin de déterminer au mieux ce coefficient α .

En 2009, HAUET et *al.* [28] ont étudié ce coefficient de vitesse pour la LSPIV. Il y est estimé des valeurs usuelles de 0.85 ou 0.9 en fonction des cas.

Une autre étude, réalisée par WERBER et *al.* [59], s'est intéressée aux mesures d'un écoulement par "Surface Velocity Radar". Ils ont pu ainsi utiliser différentes méthodes pour déterminer le coefficient α sur plusieurs sites. Ils en ont déduit l'expression analytique suivante pour ce coefficient en partant de la loi logarithmique du profil de vitesse :

$$\alpha = \frac{D_i}{D_i - z_0} - \ln \left[\left(\frac{D_i}{z_0} \right) \right]^{-1} \quad (4.10)$$

avec D_i la profondeur de l'écoulement et z_0 la longueur de rugosité.

En partant de cette relation, WERBER et *al.* [59] ont estimé théoriquement le coefficient α qu'ils ont pu comparer avec plusieurs relevés de ce coefficient obtenus sur le terrain. Ils en ont déduit, comme le montre déjà la relation établie précédemment, que ce coefficient était influencé localement par la **rugosité** du lit et la **hauteur d'eau**.

Les résultats de cette étude sont représentés sur la Figure 4.6. Sur le premier graphique (A), l'augmentation de la rugosité relative locale augmente la dispersion des coefficients α . Cette rugosité relative est calculée comme le rapport entre la taille médiane des grains d50 (supposée constante sur la section transversale) et la profondeur locale du canal D_i . Inversement, sur le second graphique (B), l'augmentation de la profondeur réduit cette dispersion.

La variabilité est importante dans les canaux peu profonds, et chute rapidement pour des valeurs de rugosité relative inférieures d'environ 0,02 à 0,04. Dans les grands fleuves profonds, α oscille autour de la valeur par défaut (0,85) [59].

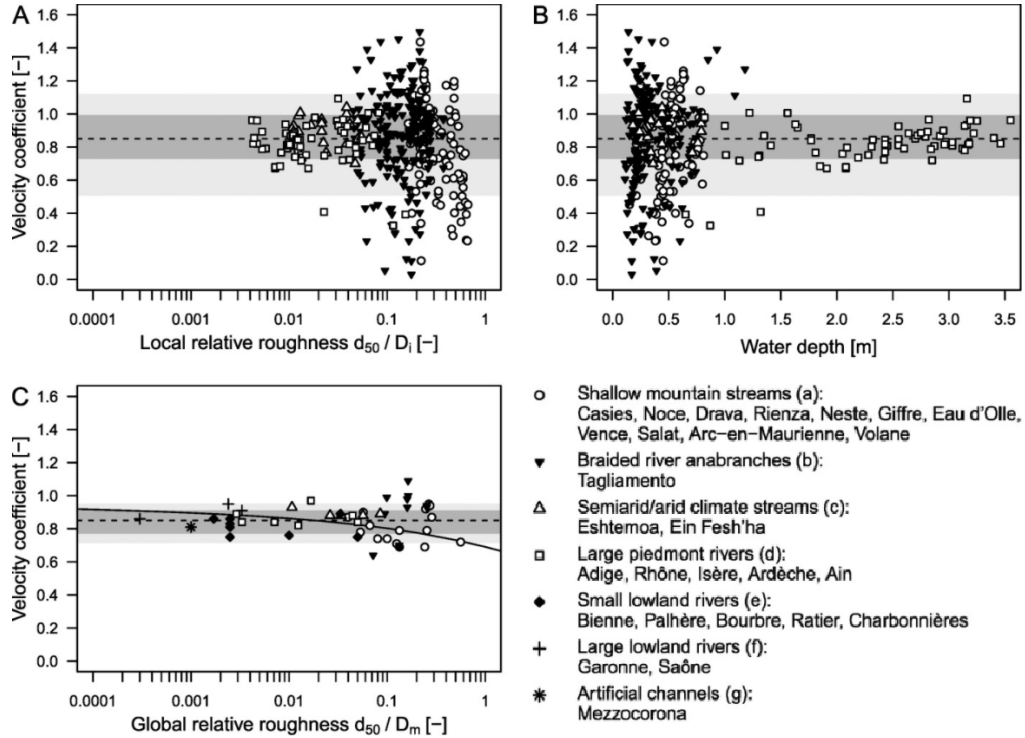


Figure 4.6 – Variation du coefficient de vitesse locale avec la rugosité relative (A), la profondeur d'eau locale (B) et la variation du coefficient de vitesse globale avec la rugosité relative (C). La ligne pointillée représente la valeur par défaut du coefficient de vitesse (0,85). La ligne continue représente le coefficient de vitesse théorique calculé à l'aide de la relation 4.10. L'intervalle interquartile est ombré en gris foncé; la plage du 10e au 90e centile est ombrée en gris clair [59].

WERBER *et al.* ont également calculé des valeurs globales du coefficient. Ces valeurs ont été obtenues en tant que moyenne spatiale pondérée de α local. Il s'avère que dans l'ensemble, les valeurs globales de α sont moins dispersées que leurs homologues locaux, avec un intervalle interquartile de 0.77 à 0.91 (voir Figure 4.6-(C)).

Une autre étude en laboratoire portant sur la rugosité du lit a également été réalisée par POLATEL en 2005 [47]. Il constate, comme le montre la Figure 4.7, que le coefficient α réagit aux changements spatiaux du fond du canal étudié. Les valeurs de ce coefficient varient d'ailleurs entre 0.789 à 0.928.

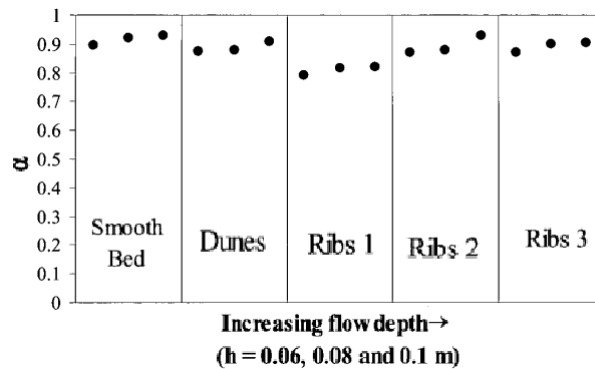


Figure 4.7 – Variation de l'index de vitesse en fonction du type de fond pour une hauteur $h=0.06$ m, 0.08 m et 0.1 m [47].

En 2018, HAUET et *al.* [27] ont mené une étude sur un large échantillonnage réalisé avec un courantomètre, reprenant 3611 jaugeages sur 176 sites différents d'EDF (Électricité de France). Tous ces relevés couvrent un large échantillon de rivières, des petits ruisseaux de montagne aux grandes rivières de plaine, faisant varier fortement le débit, la largeur d'eau (B), le rayon hydraulique (Rh) et le rapport d'aspect ($\frac{B}{Rh}$).

Ces mesures ont été analysées pour calculer la valeur du coefficient α avec trois méthodes différentes, à savoir la loi logarithmique, la loi des puissances et la mesure de la vitesse de surface.

Le tableau 4.1 ci-dessous reprend les résultats obtenus par HAUET et *al.* :

	Min	Max	Mean	Q5	Q95
α_{log}	0.48	1	0.81	0.73	0.9
α_{power}	0.36	0.99	0.79	0.67	0.91
$\alpha_{surface}$	0.32	2.3	0.83	0.71	0.95

Tableau 4.1 – Plage de valeurs obtenues par les trois méthodes : logarithmique, puissance et surface [27].

Des valeurs similaires sont obtenues pour les trois méthodes avec des valeurs moyennes de 0.81 pour α_{log} , 0.79 pour α_{power} et 0.83 pour $\alpha_{surface}$. Ces valeurs sont en cohérence avec la valeur généralement utilisée de 0.85. De plus, 90% de ces valeurs sont comprises dans l'intervalle 0.67-0.95, ce qui prouve que la dispersion du coefficient de vitesse est limitée.

D'autres conclusions ont pu être obtenues en présentant ces données sur différents graphiques :

- Pour évaluer la dépendance du coefficient α par rapport à la hauteur d'eau, deux graphiques présentant l'évolution de $\alpha_{surface}$ et α_{log} avec le rayon hydraulique Rh ont été représentés par HAUET et *al.* [27] (voir Figure 4.8). Une tendance linéaire est trouvée, les coefficients de vitesse α augmentent lorsque Rh augmente également. Pour de **faibles profondeurs ($0m < Rh < 1m$)** α est proche de **0.8** et augmente jusqu'à **0.9 pour de grandes profondeurs ($Rh=5m$)**. Il est à noter que la majorité des rivières sont étroites, c'est pourquoi les valeurs moyennes de α sont légèrement inférieures à la valeur de 0.85 habituellement utilisée.

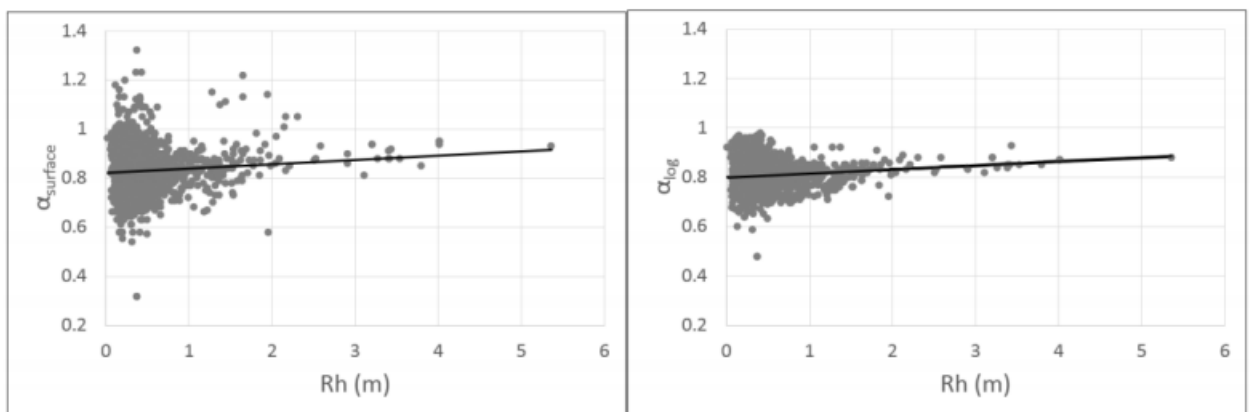


Figure 4.8 – Évolution de $\alpha_{surface}$ (a) et α_{log} (b) avec le rayon hydraulique Rh [27].

- Un autre graphique intéressant est celui de $\alpha_{surface}$ et α_{log} en fonction du ratio aspect ($\frac{B}{Rh}$), représenté sur la Figure 4.9. Dans ce cas-ci, les deux α diminuent légèrement mais toujours linéairement lorsque ($\frac{B}{Rh}$) augmente.

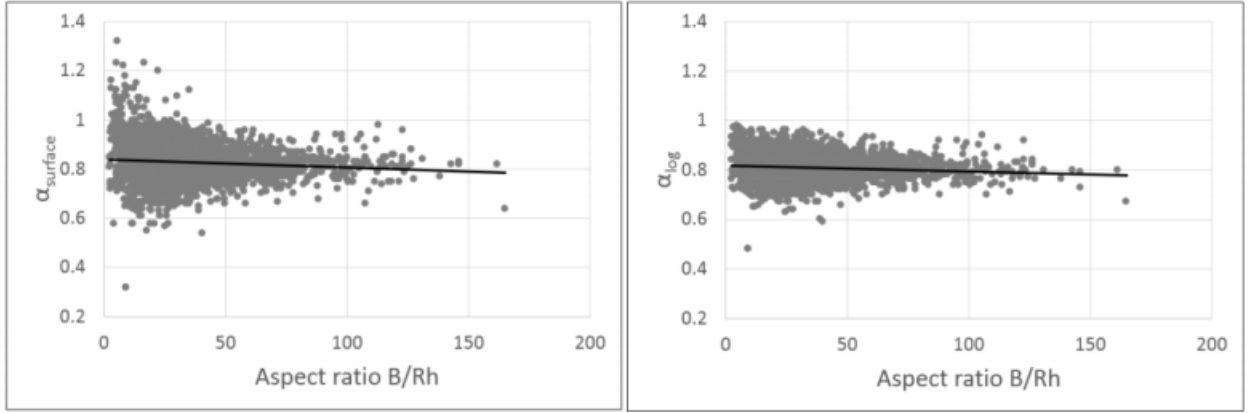


Figure 4.9 – Évolution de $\alpha_{surface}$ (a) et α_{log} (b) avec le ratio aspect $\frac{B}{Rh}$ [27].

Pour finir, un classement des 3611 jaugeages étudiés a été réalisé par HAUET *et al.* [27] selon 4 catégories qui dépendent de la rugosité du lit. Ce classement a été fait selon la granulométrie médiane d_{50} de 0.001m (canal en béton), 0.01m (rivière de sable), 0.1m (rivière de galets) et 1m (rivière rocheuse).

Ils ont ensuite représenté graphiquement les valeurs du coefficient $\alpha_{surface}$ en fonction de la rugosité relative ($\frac{Rh}{d_{50}}$) affiché sur la Figure 4.10 ci-dessous.

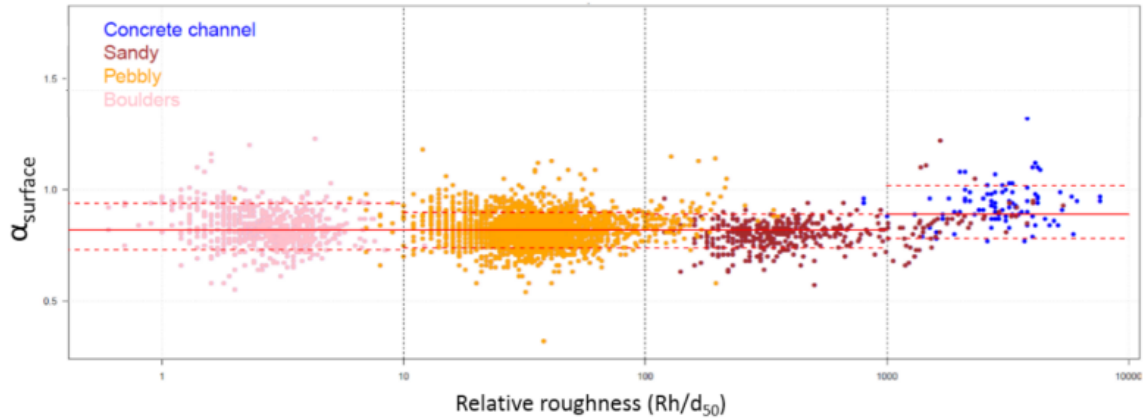


Figure 4.10 – Boxplot de α pour chaque section selon la rugosité du lit ($\frac{Rh}{d_{50}}$) [27].

La relation entre $\alpha_{surface}$ et $\frac{Rh}{d_{50}}$ n'étant pas très explicite. HAUET *et al.* [27] en ont conclu que la valeur moyenne d' α prend une valeur de **0.8 pour les rivières naturelles** et une valeur un peu plus grande de **0.9 pour un canal en béton**.

Partie II

REALISATIONS

Chapitre 5

Méthode de l'UCLouvain : mesure de débit à partir d'un drone

Dans ce chapitre, les quatre sections de rivières qui ont été étudiées tout au long de ce travail seront tout d'abord présentées. Ensuite la méthodologie présente ce qu'il a été utilisé pour réaliser notre étude sur le terrain. Cette méthodologie appelée méthode de L'UCLouvain, détaillée par NICOLAS BREELS et STÉPHAN MARNEFFE en 2020 [51], a été adaptée ici à l'utilisation d'un drone.

1. Description des stations étudiées

Pour réaliser ces mesures, quatre sections, à chaque fois associées à une station Aqualim, ont été choisies autour de Louvain-la-Neuve. Pour mieux visualiser leur emplacement, leur situation géographique est représentée sur la Figure 5.1 ci-dessous.

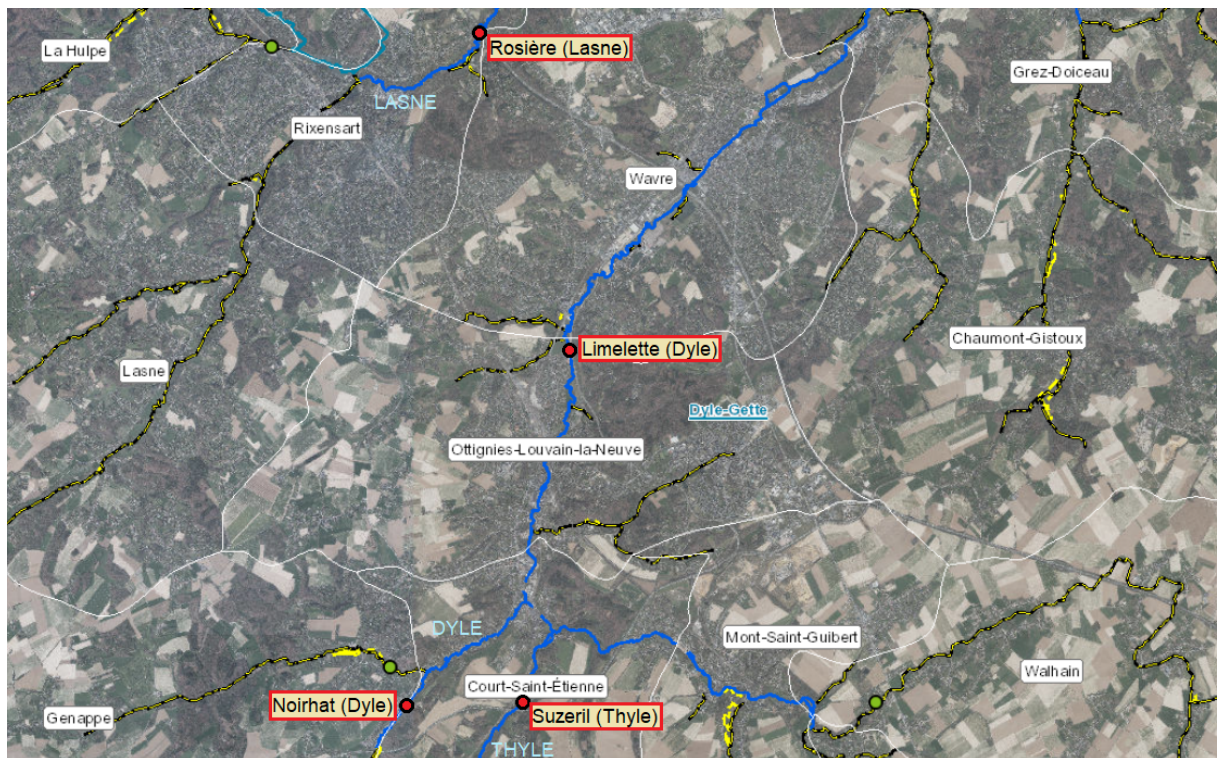


Figure 5.1 – Situation géographique des stations étudiées [58].

Ces stations se trouvent sur 3 rivières naturelles différentes : la Dyle, la Lasne et la Thyle. Près de ces 4 stations, des mesures de vitesses ont été relevées chaque semaine sur une même section pour pouvoir disposer d'un maximum de mesures, et compléter la base de données.

Ces différentes stations n'ont pas été sélectionnées au hasard, elles devaient répondre à une liste de critères : un niveau d'eau généralement peu élevé permettant un accès à pied, une rivière dégagée de végétation trop importante pour pouvoir faire voler un drone, ou encore une morphologie du lit peu changeante au cours du temps. Tous ces critères étaient à respecter pour mener à bien différentes études. Il fallait également veiller à s'écarter d'un pont comme recommandé par NICOLAS et STÉPHAN dans leur mémoire [51], afin d'éviter toute perturbation dans l'écoulement.

Les 4 stations sont présentées plus en détails dans le point suivant.

1.1. Présentation des stations

Limelette:

La station de Limelette est située sur la Dyle en zone pré-urbaine. Elle est en partie aménagée en rive gauche. Cet aménagement permet la stabilisation des berges avec des gabions (blocs de pierre entourés d'un grillage). La rive droite est, quant à elle, constituée d'un sol limoneux avec un drainage naturel limité [57]. Cela signifie que l'érosion de cette berge peut être rapide en cas de fortes pluies. Il y a cependant une végétation abondante qui limite fortement cette érosion grâce au développement de leurs racines.

Le lit de la rivière est en grande partie rocheux avec des sédiments plus fins, comme du sable. Du fait de son lit rocheux, la bathymétrie de la station ne varie pas beaucoup au fil du temps comme le montre la Figure 5.2.

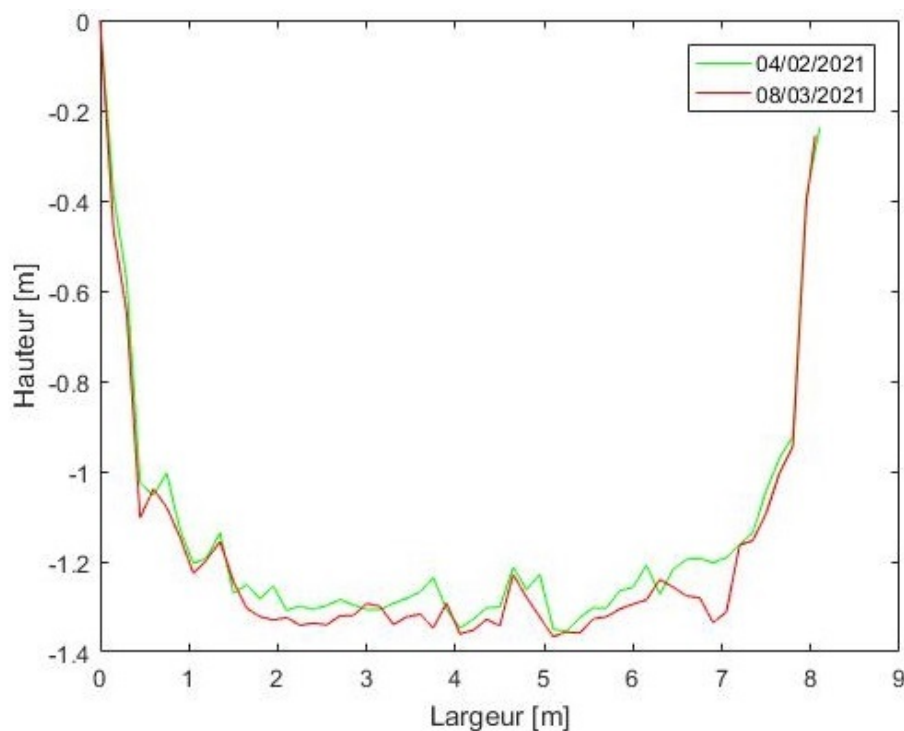


Figure 5.2 – Bathymétries de la station de Limelette.

Cette section de rivière est relativement polluée : il est possible de trouver notamment des bâches ou encore des pneus. Des tuyaux d'arrivées d'eaux se trouvent également en amont de la section. Ces tuyaux ne donnent aucun débit la plupart du temps mais peuvent, de manière inopinée, apporter un débit significatif dans la Dyle même en cas de temps sec. Il faut donc faire attention durant les mesures que ces arrivées d'eaux ne soient pas significatives par rapport au débit qui s'écoule habituellement.

Au cours des campagnes de mesures, la hauteur d'eau variait entre 45 [cm] et 60 [cm]. La hauteur d'eau est en général très stable, mise à part lors de fortes précipitations, où elle peut vite monter au-dessus d'un mètre.

Rosières:

La station de Rosières est située sur la Lasne dans une prairie. Les berges sont laissées dans leur état naturel. Elles sont constituées d'un sol limoneux avec un drainage naturel très limité [57]. Comme dans le cas de la station de Limelette, ce type de sol permet l'érosion des berges, et se trouvant dans une prairie, il y a peu de racines pour limiter cette érosion.

La rivière à cet endroit présente un lit vaseux avec des sédiments assez fins. De ce fait la bathymétrie a tendance à évoluer beaucoup plus dans le temps (voir Figure 5.3).

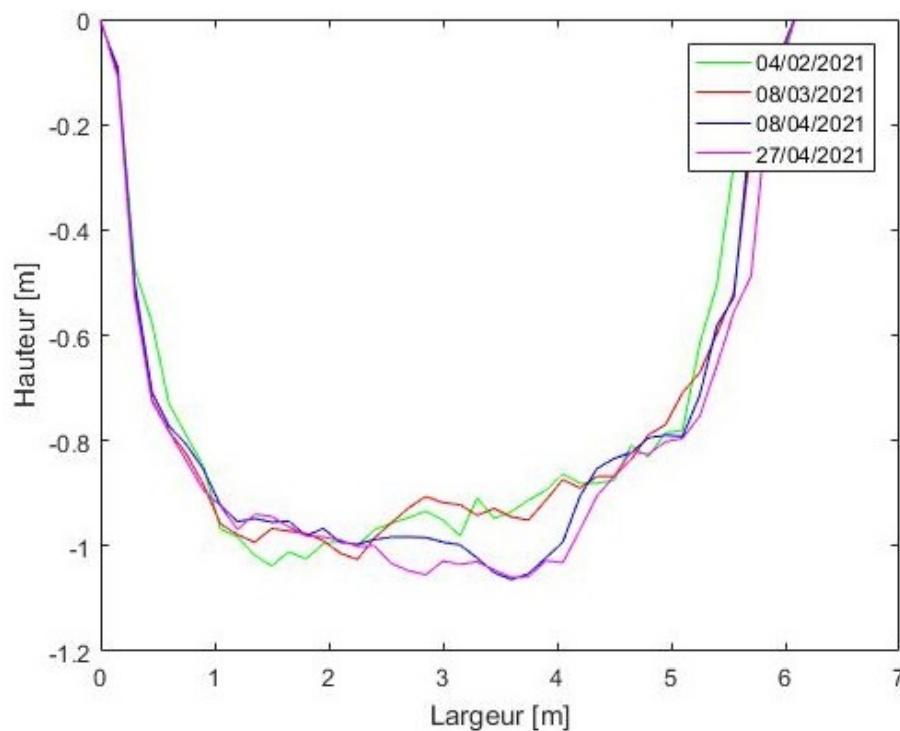


Figure 5.3 – Bathymétries de la station de Rosières.

L'endroit exact de prise de mesures se trouvant dans un léger méandre, en présence d'un débit plus important, le lit près de la rive gauche aura tendance à se creuser. Si ce débit est moins important, le lit aura tendance à se rééquilibrer sur toute la largeur de la rivière.

La hauteur d'eau, au cours des campagnes de mesures, varie entre 50 [cm] et 70 [cm]. Cette variation de hauteur d'eau dépend à la fois du débit de la rivière mais aussi de l'évolution de la bathymétrie modifiant l'altitude des points et donc le niveau d'eau.

Noirhat:

La station de Noirhat se trouve en zone pré-urbaine. Elle est également située sur la Dyle, mais plus en amont par rapport à Limelette.

La partie de la rivière où se trouve la section étudiée, est un mélange entre un canal en béton et une rivière naturelle. La rive gauche est d'ailleurs couverte de béton sur lequel se trouve des sédiments qui ont été déposés lors de différentes crues. La rive droite est composée d'un sol limoneux à faible drainage [57]. Cette configuration de berge et le type de végétation qui s'y est développée sont les mêmes que dans le cas de la berge en rive droite pour la station de Limelette.

Le lit de la rivière, quant à lui, est principalement composé de roches de petites tailles. De ce fait, la bathymétrie, évolue peu au cours du temps normalement. Mais comme le montre la Figure 5.4, celle-ci subit tout de même un léger changement morphologique à certains endroits. Cela est dû notamment à de fortes crues durant cet hiver, dont la différence de débit était suffisamment importante pour déplacer les roches constituant le lit. Le fond relativement plat s'explique par le fait que les mesures ont été prises sur une portion rectiligne de la rivière qui a l'air d'avoir été canalisée il y a de plusieurs années.

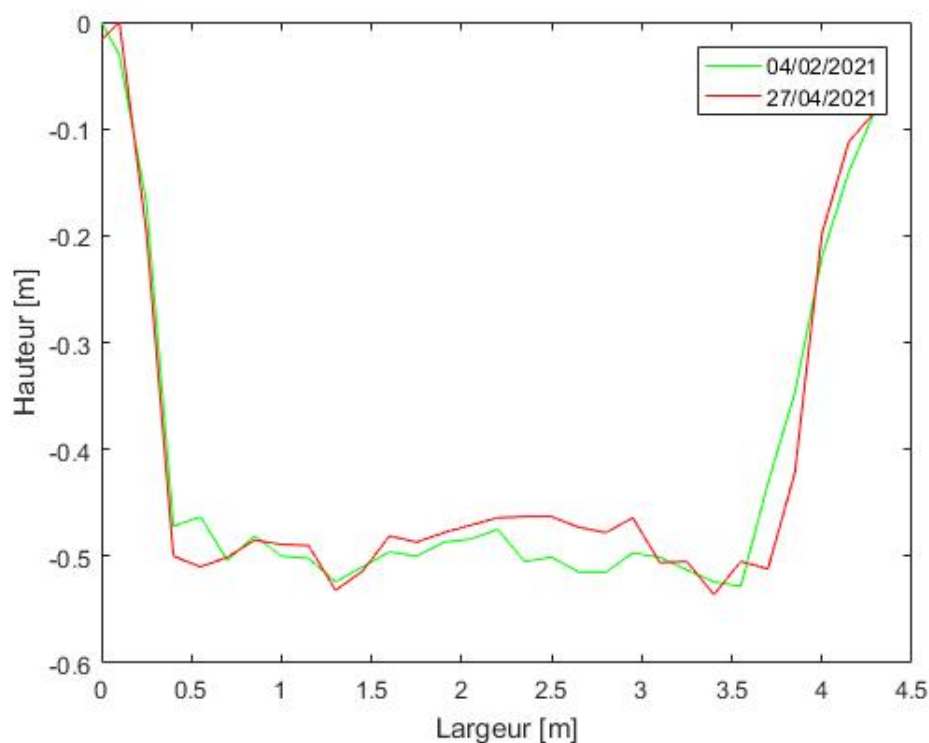


Figure 5.4 – Bathymétries de la station de Noirhat.

Le niveau d'eau n'a pas beaucoup varié au cours des campagnes de mesures pour cette station, avec une variation entre 15 [cm] et 20 [cm]. Les débits mesurés pour cette section n'étaient d'ailleurs pas très élevés en général, avec une moyenne aux alentours de $0.23[\text{m}^3/\text{s}]$.

Suzeril:

Cette section de rivière est laissée dans son milieu naturel et ne comporte pas d'aménagement. La rive gauche est composée de rochers de plusieurs dizaines de centimètres. La rive droite a, quant à elle, le même type de sol et le même genre de végétation que pour les stations de Noirhat et Limelette.

La section étudiée se trouve dans un méandre et le lit de la rivière sera donc plus creusé en partie gauche (voir Figure 5.5).

La hauteur d'eau pour cette station était comprise entre 35 [cm] et 45 [cm].

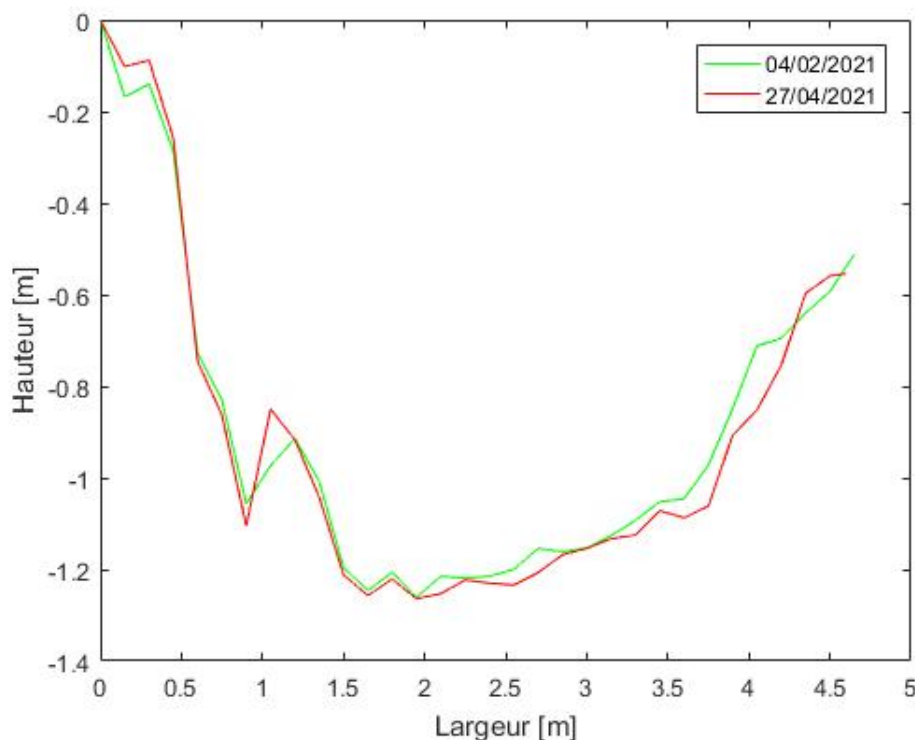


Figure 5.5 – Bathymétries de la station de Suzeril.

1.2. Conclusion

Parmi ces quatre sections de rivières étudiées, il est possible de distinguer deux groupes. Deux d'entre-elles (Noirhat et Suzeril) ont un niveau d'eau moins élevé, entre 15 et 45cm d'eau, et les deux autres (Limelette et Rosières) ont un niveau un peu plus important, entre 45 et 70cm d'eau lors de nos prises de mesures.

Au niveau de la rugosité du lit, trois sections ont une rugosité importante dont le lit est plus ou moins rocailleux, et une section (Rosières), quant à elle, a plutôt un lit moins rugueux composé de sédiments très fins.

2. Description des étapes de mesures

Dans cette partie, les démarches à suivre, de la mesure sur le terrain à l'obtention d'un débit par LSPIV, sont expliquées. Pour parvenir à l'acquisition des débits, quatre grandes étapes sont nécessaires. Celles-ci sont détaillées dans un ordre chronologique ci-dessous.

2.1. Étape 1 - Mesures sur le terrain

Pour réaliser au mieux nos campagnes de mesures sur le terrain, nous disposons du matériel suivant :

- Un vélocimètre (Flo-Mate Marsh-McBirney) avec perches graduées (matériel prêté par le Service Public de Wallonie)
- Un drone DJI Mavic Air
- Une station Leica TPS et une station Leica GPS (prêtées par le département Génie Rural (GERU))
- Un mètre ruban de 20m
- Des copeaux de bois (de couleur claire de préférence)
- Des balises GRP (*Ground Referencing Point*) utilisées pour l'orthorectification des images (disponibles dans un bureau au VINCI)
- Des balises GCP (*Ground Control Point*) pour l'utilisation de la photogrammétrie (disponibles au VINCI également)
- Deux waders (prêtés par le GERU)
- Deux plots de couleur vive pour repérer la bathymétrie
- Fiches pour relever les vitesses (voir annexe 5)

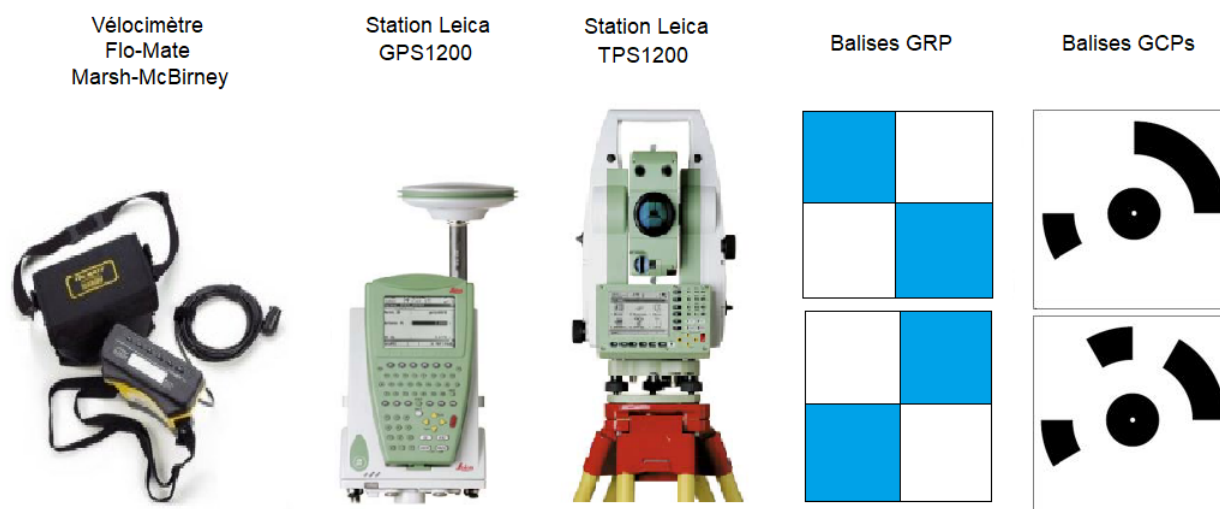


Figure 5.6 – Matériel utilisé pour la prise de mesures sur le terrain.

Tout d’abord, il faut commencer par réaliser le relevé de la bathymétrie. Pour ce faire, l’utilisation de la station Leica TPS1200 a été préconisée. Elle est 4 fois plus précise que le GPS1200, avec une erreur de précision de l’ordre de 5mm seulement. Cependant, elle est beaucoup plus compliquée à utiliser pour des opérateurs non avertis. La bathymétrie a été relevée avec un mètre ruban tous les 15 centimètres, lors de la toute première prise de mesures (voir Figure 5.7). Ensuite, elle a été remesurée à nouveau, uniquement lors du passage de crues.



Figure 5.7 – Mesure de la bathymétrie en rivière à l’aide de la station Leica TPS1200 et d’un mètre ruban (Rosières).

Pour connaître l’endroit sur la rivière où les relevés bathymétriques ont été réalisés, deux armatures en acier ont été plantées sur chacune des rives. Les coordonnées Lambert de ces deux points ont également été récoltées, à l’aide du GPS1200 Leica. Celles-ci serviront pour de futurs étudiants qui reprendront la suite de ces recherches, mais également pour nous, au cas où les armatures viendraient à être retirées par autrui.

Ensuite, la deuxième chose à faire est de mesurer les vitesses le long de chacune de ces bathymétries pour pouvoir déterminer leur débit respectif. À l’aide du vélocimètre et d’un mètre ruban, les vitesses sont mesurées tous les 30 centimètres à 1, 2 ou 3 points différents sur une verticale en fonction du niveau d’eau mesuré avec la perche graduée. Conjointement, la largeur de la ligne d’eau est également mesurée grâce à une perche munie d’un niveau.

Il faut noter que l’utilisation d’un vélocimètre est préférée à un courantmètre MFPro utilisé dans d’anciens travaux à l’UCLouvain. NICOLAS et STÉPHAN recommandaient dans leur mémoire [51] d’utiliser un vélocimètre car ils émettaient des doutes sur la précision du courantmètre qu’ils exploitaient lors de leurs prises de mesures. Il est vrai qu’en comparant les erreurs par rapport au débit récolté sur le site Aqualim du SPW (Service

Public de Wallonie) pour la Lasne, celles-ci sont beaucoup plus petites pour le vélocimètre (voir Tableau 5.1).

Moyenne des erreurs de Asselberghs et Peeters	Erreur lors de l'unique campagne de Breels et Marneffe	Moyenne des erreurs mesurées par notre vélocimètre
12,46%	15,16%	3,8%

Tableau 5.1 – Comparaison des erreurs entre MFPro et vélocimètre sur la Lasne.

L'erreur est calculée à l'aide de la formule

$$Erreur = |1 - \frac{Q_{Vélocimètre/MFPro}}{Q_{Aqualim}}| * 100[\%] \quad (5.1)$$

avec $Q_{Vélocimètre/MFPro}$ le débit obtenu à l'aide du vélocimètre ou du courantmètre MFPro, et $Q_{Aqualim}$ le débit de référence récolté sur le site d'Aqualim [58].

Après la mesure de vitesse pour déterminer le débit de manière intrusive, il faut récolter les données nécessaires pour déterminer le débit avec la LSPIV. Pour réaliser l'orthorectification des images par la suite, 4 balises GRP sont placées sur chaque rive de part et d'autre de la bathymétrie et le plus près possible de l'eau. Ensuite, la distance entre chaque balise est mesurée pour pouvoir les replacer dans un repère de coordonnées locales. Si c'est impossible de les positionner proches de l'eau, comme c'est le cas à Limelette par exemple, il est nécessaire d'utiliser la station Leica GPS1200, pour récolter les coordonnées des 4 balises en X, Y, Z cette fois-ci.

Enfin, une courte séquence vidéo est récoltée à l'aide d'un drone. Ce drone est positionné au milieu de la rivière à une altitude suffisante pour voir correctement la bathymétrie et les 4 balises. Lors de cette prise de vidéo, des copeaux de bois sont également lancés. Ceux-ci servent de traceurs pour mieux détecter la vitesse de surface de l'eau dans les logiciels PIV. Ils doivent être lancés de manière à être bien dispersés sur toute la largeur du cours d'eau. Pour ce faire, les copeaux sont d'abord lancés près des bords (vitesse moindre) et ensuite au milieu de la rivière. Il ne faut également pas les lancer trop loin en amont pour garder une belle dispersion transversale lors du passage de ceux-ci sur la bathymétrie, mais ni trop près non plus pour ne pas perturber l'écoulement.

Avec le drone, par la même occasion, 2 clichés sont pris à deux altitudes différentes sur une même verticale afin de déterminer la hauteur d'eau par la méthode "*Hauteur-Angle*".

2.2. Étape 2 - Calcul des vitesses

Pour déterminer les vitesses en surface à partir des séquences vidéos de quelques secondes, les logiciels *PIVlab* et *Fudaa-LSPIV* ont été utilisés. Les séquences vidéos analysées sont coupées pour ne garder que les images où il y a le plus de traceurs qui passent aux endroits où les bathymétries ont été mesurées.

Une fois les vitesses déterminées sur chaque image, une moyenne de ces vitesses est réalisée afin d'obtenir une distribution de vecteurs vitesses moyens en surface. Ce sont

ces vitesses qui seront comparées aux vitesses mesurées avec le vélocimètre à 20% de la hauteur d'eau sous la surface.

2.3. Étape 3 - Détermination de l'aire mouillée

Pour déterminer le débit à partir des vitesses trouvées, il est nécessaire de connaître la section d'aire mouillée. La bathymétrie étant connue, il faut déterminer la hauteur d'eau. Pour ce faire, 3 méthodes différentes sont utilisées :

- La méthode "*Hauteur-Angle*"
- La méthode "*Longueur-Pixel*"
- La méthode par photogrammétrie élaborée par Hellebaut (utilisée une seule fois dans ce mémoire)

Ces 3 méthodes sont expliquées en détails dans le chapitre 6. Pour évaluer la précision de ces méthodes, les hauteurs obtenues sont directement comparées avec la hauteur d'eau moyenne, mesurées à la main lors de nos prises de mesures.

2.4. Étape 4 - Calcul du débit

La dernière étape consiste à déterminer le débit. Pour cela il faut connaître les vitesses moyennes de chaque verticale le long de la bathymétrie à partir des vitesses en surface. Un coefficient de vitesse α leur est donc appliqué. Ce coefficient peut prendre plusieurs valeurs. Soit une valeur par défaut de 0.85 lui est assimilée, puisque celui-ci est généralement compris entre 0.8 et 0.9, ou bien cette valeur est directement déterminée à partir des mesures de vitesses récoltées par le vélocimètre.

La *Mid Section method* [7] est ensuite utilisée dans un code MATLAB (Voir annexe A.4.) pour obtenir le débit avec *PIVlab*. *Fudaa-LSPIV*, lui, calcule directement le débit en rentrant la bathymétrie et la hauteur d'eau dans le logiciel même. Les deux débits obtenus sont ensuite comparés avec celui de la station Aqualim appropriée, mais également avec celui calculé à partir des vitesses récoltées par le vélocimètre.

Chapitre 6

Analyses des méthodes de détermination de la hauteur d'eau

Il existe différentes méthodes pour déterminer la hauteur d'eau d'une rivière. Les méthodes utilisées se différencient par leur rapidité d'exécution, leur précision ou encore le matériel nécessaire. Ce chapitre présente les méthodes qui ont été utilisées dans cette étude.

1. Méthode photogrammétrique

Cette méthode a été développée en 2018 par un ancien mémorant, FRANÇOIS-XAVIER HELLEBAUT [29]. Celle-ci a été testée dans ce mémoire, mais n'a pas fait l'objet d'une étude plus poussée puisque nous nous sommes concentrés sur le développement de méthodes plus rapides et plus faciles à mettre en oeuvre.

La station choisie pour tester la méthode est celle située à Rosières. Elle est constituée d'une berge sans trop de végétation mis à part de l'herbe, pour faciliter la modélisation. Il a fallu disposer plusieurs balises GCPs sur l'une des deux berges. Une fois disposées, la station Leica GPS1200 a été utilisée pour récolter les coordonnées Lambert de chacune d'entre elles.

Par la suite, la prise de photos a pu être réalisée. Les différentes photos peuvent être prises à partir d'un drone ou manuellement avec un appareil photo, en essayant au maximum de diversifier les prises de vue en se plaçant à différents endroits autour de la berge. Les photos sont également prises à une distance raisonnable, pas trop près pour qu'un maximum de balises ainsi que la surface de l'eau soient visibles sur les photos, mais pas trop éloignées non plus afin d'avoir le plus de détails possibles. La modélisation 3D dépend directement de la résolution de l'appareil photo utilisé.

Au niveau du nombre de clichés à réaliser, il en faut un maximum pour ne pas avoir des zones sans point dans le modèle numérique. Dans notre cas, 10 clichés ont été pris pour effectuer la modélisation. MICHELETTI *et al.* [41] ont observé qu'il fallait qu'un point soit présent sur au moins trois clichés différents pour pouvoir être modélisé.

L'étape d'après consiste à utiliser un logiciel de photogrammétrie pour modéliser la berge. Dans ce mémoire, le logiciel AGISOFT-PHOTOSCAN a été utilisé pour obtenir le modèle 3D à partir de plusieurs clichés, comme le montre la Figure 6.1. Pour pouvoir utiliser la méthode d'Hellebaut, il faut vérifier que l'eau soit modélisée, comme c'est le cas partiellement ici.

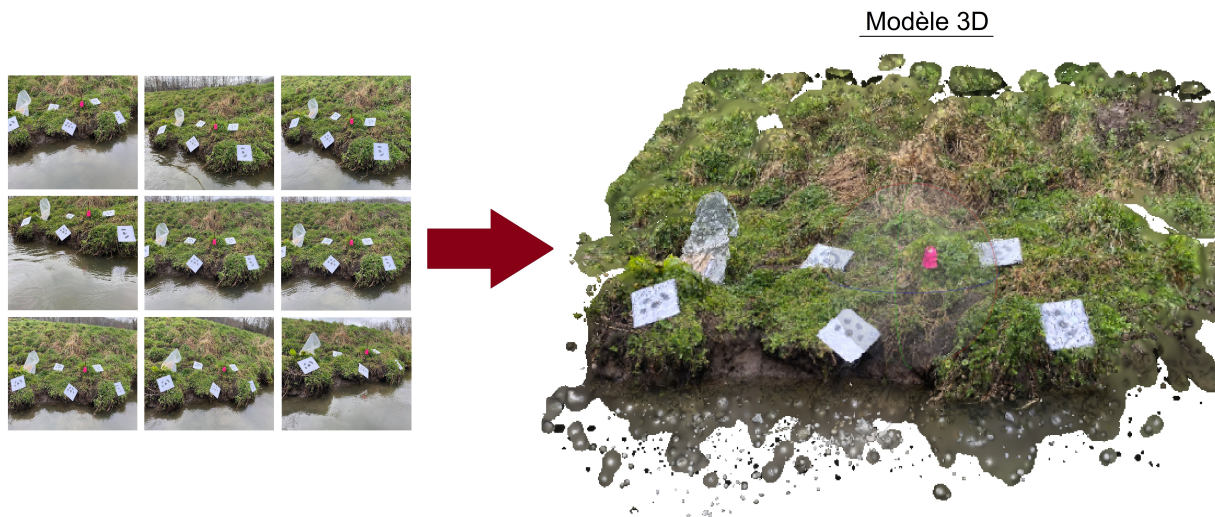


Figure 6.1 – Modélisation d’une berge à partir de plusieurs clichés sur le logiciel AGISOFT-PHOTOSCAN. Les carrés blanc représentent les bornes GCP’s et le plot rose est un des points extrême de la bathymétrie.

Avec l’obtention du modèle 3D, il est possible de déterminer un Modèle Numérique d’Elévation (MNE). Celui-ci permet d’avoir la topographie de la berge avec un code couleur représentant les différentes altitudes, comme présenté sur la Figure 6.2 ci-dessous.

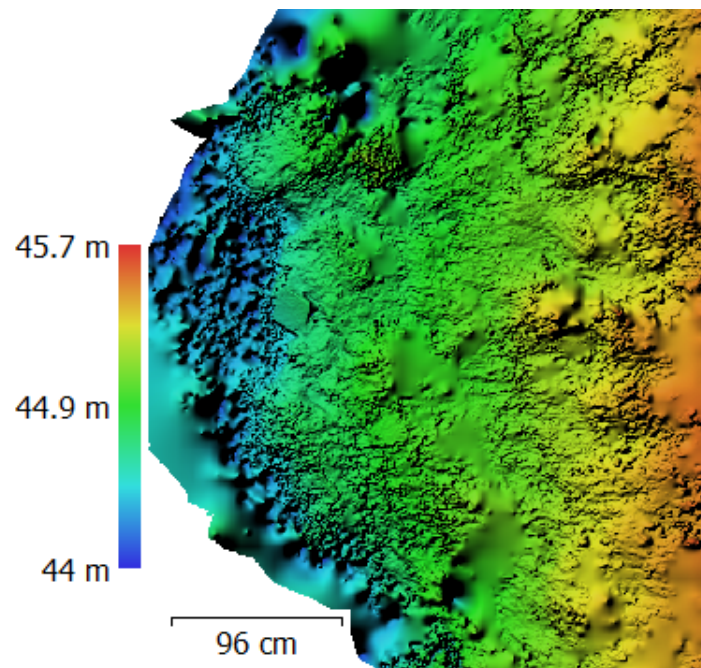


Figure 6.2 – Modèle Numérique d’Elévation de la berge

C’est ce MNE qui peut être exporté et utilisé dans le code MATLAB implémenté par Hellebaut. En trouvant le plan sur le MNE dans lequel la bathymétrie a été mesurée, il est possible de superposer les deux courbes sur un graphique (voir Figure 6.3). Sur ce graphe, un point de divergence peut être constaté entre le MNE et la bathymétrie. C’est à cet endroit précis que la surface de l’eau se situe.

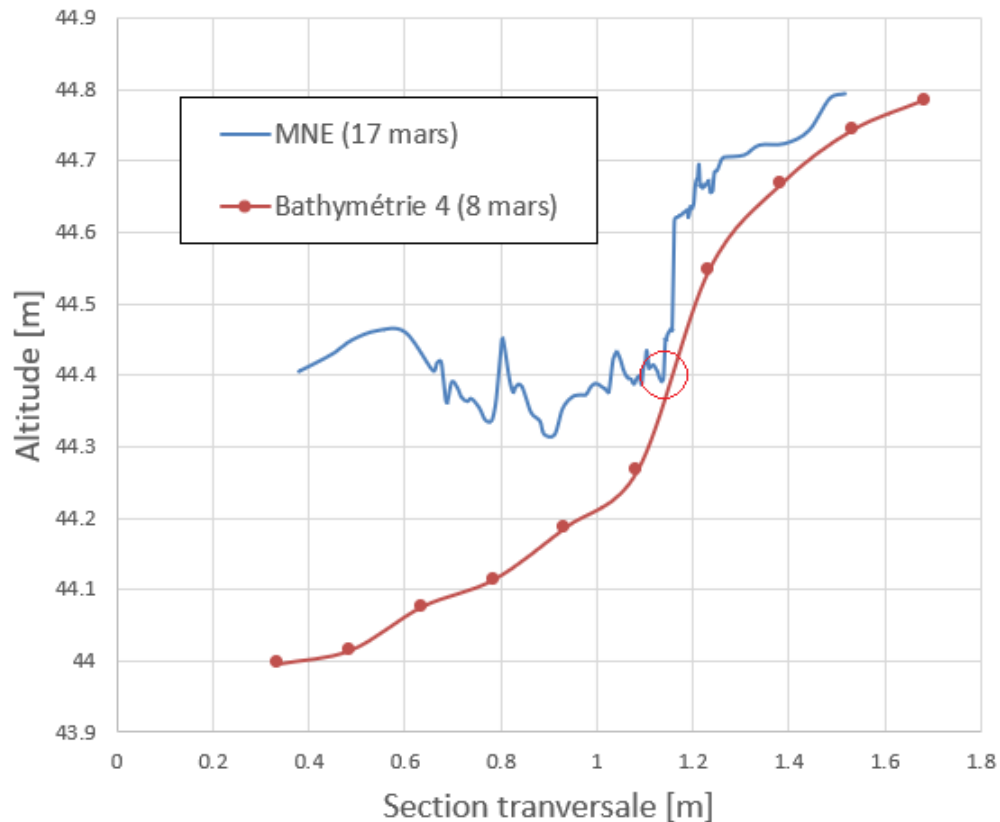


Figure 6.3 – Comparaison entre le MNE et la bathymétrie, le 17 mars 2021 à Rosières. Le rond rouge représente le point de divergence.

À l'aide de l'altitude du fond de l'eau correspondant au point le plus bas de la bathymétrie, situé ici à 43.759m, il est possible d'obtenir la hauteur d'eau. En effet, la différence d'altitude entre ce point et le point de décrochage donne la hauteur d'eau. La courbe bleue se trouve légèrement au-dessus de la bathymétrie mesurée probablement à cause de la présence de l'herbe, également modélisée par le logiciel de photogrammétrie. Or, la bathymétrie, mesurée à l'aide de la station Leica TPS1200, se trouve au niveau de la terre, voire un peu plus bas suite à l'utilisation d'une perche pointue.

Le niveau d'eau déterminé par cette méthode s'élève à 0.639m. L'erreur obtenue est de 4.8% en comparant avec le niveau d'eau mesuré à la main qui, lui, s'élève à 0.671m. Cela représente une différence de 3.2 centimètres. La méthode d'Hellebaut estime la hauteur d'eau avec une erreur sous les 5% ce qui est relativement minime, pour cet essai en tout cas. N'ayant pas expérimenté plus d'une fois cette méthode, il n'est pas possible de conclure quelque chose sur son efficacité. Plusieurs autres travaux ont été menés pour tester cette méthode, comme celui d'ASSELBERGHS et PETEERS [8], qui ont obtenu une moyenne d'erreurs de 10% sur l'aire de la section de 3 sites différents, en mesurant le niveau d'eau par photogrammétrie.

Une piste d'amélioration pour la méthode d'Hellebaut serait de réaliser le modèle de la seconde berge, afin de déterminer une deuxième fois la hauteur d'eau pour réduire l'erreur, et en calculant ensuite une moyenne de ces deux valeurs. Le problème est que cette méthode, déjà très lourde, prendrait deux fois plus de temps à être utilisée.

2. Méthode *Hauteur-Angle*

Un résumé du principe de fonctionnement de cette méthode a déjà été fait dans la partie "État de l'art" de ce mémoire. Comme cette méthode n'a pas encore été expérimentée, cette section s'attarde sur sa mise en oeuvre et sur les difficultés rencontrées.

2.1. Mise en pratique

La mise en pratique est comparable dans la cas où le drone est centré par rapport à la ligne d'eau de la section de rivière étudiée, et dans le cas du drone décentré. La différence vient principalement de la complexité des équations à résoudre. La mise en pratique est donc uniquement détaillée avec précision pour le cas du drone centré.

Cas du drone centré :

L'idée première de cette méthode est donc de déterminer la largeur d'eau à partir de deux clichés à des altitudes différentes. Ensuite, cette largeur est replacée sur la bathymétrie afin d'obtenir le niveau d'eau.

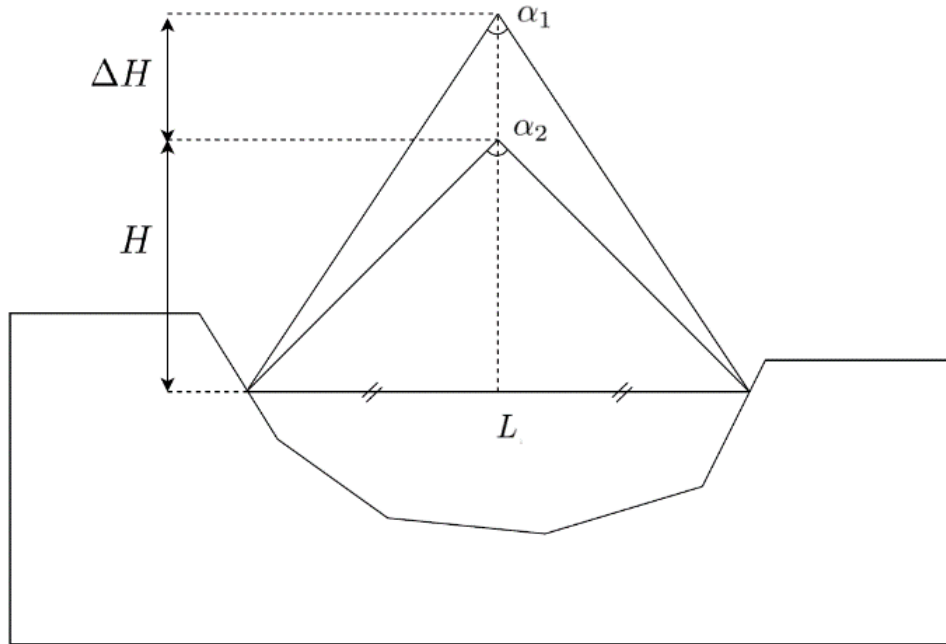


Figure 6.4 – Configuration pour le drone centré [49].

Pour pouvoir connaître la largeur de la ligne d'eau, il est nécessaire de résoudre les équations suivantes, déterminées à partir de la Figure 6.4 ci-dessus :

$$\alpha_i = FOV \frac{\#PIX_{L,i}}{\#PIX_{Img}} \quad (6.1)$$

$$\tan\left(\frac{\alpha_1}{2}\right) = \frac{L/2}{H + \Delta H} \quad (6.2)$$

$$\tan\left(\frac{\alpha_2}{2}\right) = \frac{L/2}{H} \quad (6.3)$$

avec :

- FOV , l'angle du champ de vision de la caméra en degrés;
- $\#PIX_{L,i}$, la largeur L en pixels pour l'image i ;
- $\#PIX_{Img}$, la largeur de l'image en pixels;
- H , l'altitude de la photo 2 et $H + \Delta H$, l'altitude de la photo 1.

Dans un premier temps, il faut trouver la différence d'altitude entre les deux images. Pour cela, il y a deux possibilités. Soit se fier à l'altitude donnée directement par le drone, soit calculer cette altitude à l'aide d'une autre méthode.

Dans le cas de ce travail, le drone utilisé est un drone DJI MAVIC AIR [15]. Celui-ci permet de connaître l'altitude à laquelle il se trouve par rapport à son point de décollage. L'altitude est donnée avec une précision de 10 [cm]. Dans certains cas, la précision n'est pas aussi bonne. Par exemple, lorsqu'il y a trop de végétation, des branches d'arbres au-dessus du drone ou encore lorsqu'il y a des perturbations liées aux lignes électriques. C'est pourquoi un algorithme a été développé. Celui-ci permet de trouver l'altitude à laquelle se trouve le drone sans avoir recours à l'altimètre embarqué [30]. Les données nécessaires pour cet algorithme sont les suivantes :

- Deux photos prises à l'aide d'un drone au-dessus de la rivière, à des altitudes différentes et sur le même axe. Ces deux photos doivent contenir les deux rives.
- La résolution de l'image en pixels.
- Le FOV de la caméra (angle de vision) en degrés.
- Une longueur connue au sol et repérable sur les photos. De préférence la largeur totale de la bathymétrie.

À l'aide de ces données, il faut ensuite suivre une série d'étapes afin de résoudre cet algorithme. Les étapes citées ci-dessous se font à la fois à l'aide d'un code MATLAB et du logiciel *Fudaa-LSPIV* :

1. Importation de deux images à des altitudes différentes dans *Fudaa-LSPIV*.
2. Prise des coordonnées en pixels des limites de la bathymétrie en rive droite et en rive gauche (cercles rouges sur la Figure 6.5).



Figure 6.5 – (a) Image à l'altitude H . (b) Image à l'altitude $H + \Delta H$.

3. Calcul du $FOV_x[^\circ/\text{pxl}]$ et du $FOV_y[^\circ/\text{pxl}]$ si l'image n'est pas carrée. La plupart du temps, l'image est rectangulaire et donc le FOV en degrés/pixels n'est pas le même dans la direction x et dans la direction y . Le FOV en degrés de la caméra est connu puisqu'il dépend du modèle de celle-ci. Pour avoir le FOV_x et le FOV_y , il suffit de diviser respectivement le $FOV[^\circ]$ par la largeur ou la longueur de l'image. Cela donne pour une résolution d'image 4056x3054 et un FOV de 85 degrés :

$$\begin{cases} FOV_x = \frac{FOV[^\circ]}{\#PIX_{ImgX}} = \frac{85}{4056}[^\circ/\text{pxl}] \\ FOV_y = \frac{FOV[^\circ]}{\#PIX_{ImgY}} = \frac{85}{3054}[^\circ/\text{pxl}] \end{cases} \quad (6.4)$$

avec $\#PIX_{ImgX}$ et $\#PIX_{ImgY}$, le nombre de pixels dans la direction x ou y de l'image.

4. Grâce aux coordonnées prises au point 2, il est possible de calculer la longueur en pixels de l'élément dont la longueur en mètres est connue dans la direction x et dans la direction y .

$$\begin{cases} L_x[\text{pxl}] = X_{rive\ gauche}[\text{pxl}] - X_{rive\ droite}[\text{pxl}] \\ L_y[\text{pxl}] = Y_{rive\ gauche}[\text{pxl}] - Y_{rive\ droite}[\text{pxl}] \end{cases} \quad (6.5)$$

avec :

- $L_{x(y)}$, la longueur en pixels de l'élément connu dans la direction x (y);
- $X(Y)_{rive\ gauche\ (droite)}$ la coordonnée dans la direction x (y) de l'élément connu sur la rive gauche (droite) en pixels.

5. Calcul des angles α en degrés via la formule :

$$\alpha[^\circ] = \sqrt{(L_x[\text{pxl}] * FOV_x[^\circ/\text{pxl}])^2 + (L_y[\text{pxl}] * FOV_y[^\circ/\text{pxl}])^2} \quad (6.6)$$

6. Calcul de l'altitude des photos :

$$H[m] = \frac{\text{Longueur connue } [m]}{2 \tan(\frac{\alpha}{2})} \quad (6.7)$$

Une fois que les altitudes des deux photos sont trouvées, la différence d'altitude (ΔH) entre celles-ci est connue.

La suite de la mise en pratique est très semblable à ce qui a été fait précédemment pour déterminer l'altitude. La différence est que maintenant nous connaissons l'altitude et que nous cherchons la largeur de la ligne d'eau.

1. Importation de deux images à des altitudes différentes dans *Fudaa-LSPIV*.
2. Prise des coordonnées en pixels des limites de la ligne d'eau en rive droite et en rive gauche (voir Figure 6.6). Pour avoir une vision plus précise d'où s'arrête la ligne d'eau, les photos "zoom" de la rive gauche et de la rive droite sont utilisées (voir Figure 6.7).



Figure 6.6 – (a) Image à l'altitude H . (b) Image à l'altitude $H+\Delta H$.



Figure 6.7 – (a) Zoom sur la rive gauche. (b) Zoom sur la rive droite.

3. Calcul des valeurs de α_1 et α_2 :

$$\alpha_i[^\circ] = FOV \sqrt{\left(\frac{X_{i_{\text{rive gauche}}} - X_{i_{\text{rive droite}}}}{\#PIX_{ImgX}} \right)^2 + \left(\frac{Y_{i_{\text{rive gauche}}} - Y_{i_{\text{rive droite}}}}{\#PIX_{ImgY}} \right)^2} \quad (6.8)$$

avec $X(Y)_{i_{\text{rive gauche}} (droite)}$ la coordonnée dans la direction x (y) du point de bathymétrie extrême en rive gauche (droite) en pixels.

4. Calcul de la largeur de la ligne d'eau en résolvant le système composé des équations 6.2 et 6.3.

Finalement, une fois que la largeur de la ligne d'eau est connue, cette valeur est encodée dans un code de calcul MATLAB.

Celui-ci prend en arguments à la fois la largeur de la ligne d'eau déterminée ci-dessus et la bathymétrie de la section étudiée. Il trace tout d'abord la largeur de la ligne d'eau horizontalement en partant du point le plus haut de la partie gauche de la bathymétrie (itération 1). Il fait ensuite descendre cette largeur le long de la bathymétrie sur la rive gauche (itération k) jusqu'au moment où celle-ci intercepte la bathymétrie à droite (itération n). A ce moment, le code s'arrête et donne la hauteur d'eau de la section pour l'itération n . Ces propos sont illustrés sur la Figure 6.8.

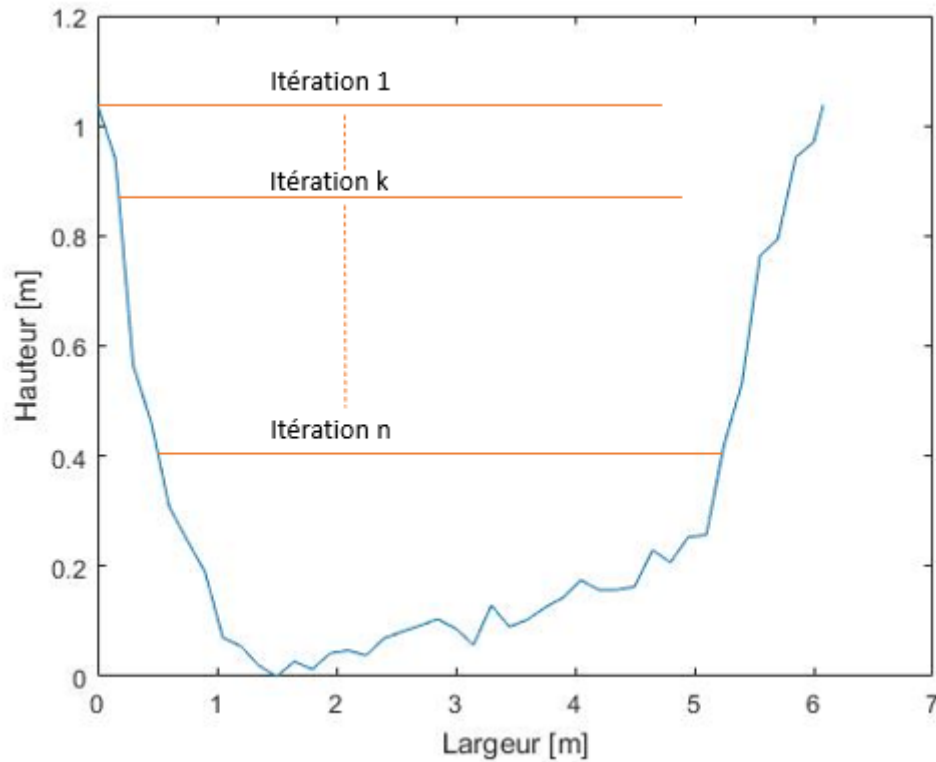


Figure 6.8 – Illustration du fonctionnement de la transposition de la largeur de la ligne d'eau sur la bathymétrie.

Cas du drone décentré :

En pratique, il sera relativement compliqué de centrer le drone parfaitement. Le drone sera donc décentré de ΔX par rapport au centre de la rivière (voir Figure 6.9).

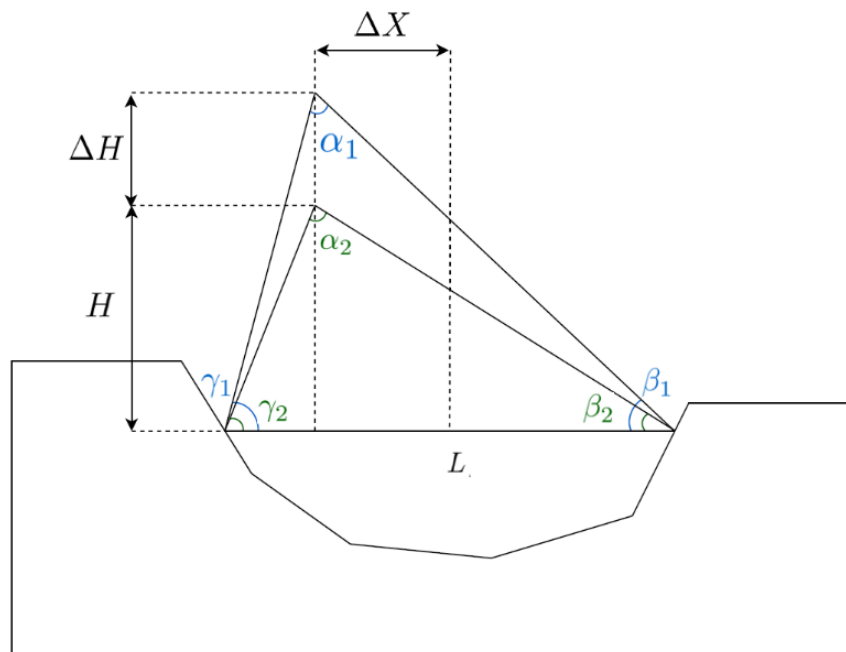


Figure 6.9 – Configuration pour le drone décentré [49].

La démarche pour obtenir la hauteur d'eau est la même que dans le cas du drone centré excepté le système d'équation à résoudre. Celui-ci devient :

$$\begin{cases} \tan(\gamma_1) = \frac{H+\Delta H}{\frac{L}{2}-\Delta X} & \tan(\gamma_2) = \frac{H}{\frac{L}{2}-\Delta X} \\ \tan(\beta_1) = \frac{H+\Delta H}{\frac{L}{2}+\Delta X} & \tan(\beta_2) = \frac{H}{\frac{L}{2}+\Delta X} \\ \alpha_1 + \gamma_1 + \beta_1 = \pi & \alpha_2 + \gamma_2 + \beta_2 = \pi \end{cases} \quad (6.9)$$

Pour résoudre ce système en plus du ΔH , le ΔX sera nécessaire.

Un certain paradoxe apparaît. Le ΔX est nécessaire pour résoudre le système, or ce ΔX en mètre n'est pas connu. Si celui-ci était connu, il suffirait de placer le drone correctement pour que $\Delta X=0$.

Le ΔX est, en toute logique, proportionnellement le même pour l'image 1 et l'image 2 puisque les photos ont été prises sur la même verticale.

Le système d'équation ci-dessus est transformé pour y faire apparaître $\frac{\Delta X}{L}$. Étant donné qu'il y a deux images, $\frac{\Delta X}{L}$ est exprimé de cette façon :

$$\frac{\Delta X}{L} \frac{[m]}{[m]} = \frac{\Delta X_{pix1}}{L_{pix1}} \frac{[pxl]}{[pxl]} = \frac{\Delta X_{pix2}}{L_{pix2}} \frac{[pxl]}{[pxl]} \quad (6.10)$$

Avec L_{pixi} la largeur en pixel de la ligne d'eau sur l'image i.

En réalité le rapport ne sera pas exactement le même dans les deux cas et la valeur moyenne sera alors prise. Autrement dit :

$$\frac{\Delta X}{L} = \text{Moyenne} \left(\frac{\Delta X_{pix1}}{L_{pix1}}; \frac{\Delta X_{pix2}}{L_{pix2}} \right) \quad (6.11)$$

Par convention, le ΔX en pixel est positif si le drone est décentré à gauche par rapport à la prise d'image.

Détermination du ΔX en pixel

Comme explicité ci-dessus, le ΔX en mètre n'est pas connu directement et il faut avoir recours à une analyse d'image pour l'obtenir. En réalité la valeur finale recherchée est $\frac{\Delta X}{L}$ (Voir Equation 6.10).

Les étapes ci-dessous utilisent à la fois MATLAB et *Fudaa-LSPIV*. Les deux premières étapes sont similaires aux deux premières étapes de la méthode avec le drone centré : l'étape d'importation d'images et celle de prises des coordonnées en pixels de la ligne d'eau. L'étape 3 est donc directement abordée.

3. Comparaison entre la résolution de l'image en pixels et le positionnement de la rivière sur l'image, via les coordonnées relevées au point 2. Si la distance en pixels qui sépare le point de ligne d'eau à gauche et le bord gauche de l'image est la même que la distance, toujours en pixels, qui sépare le point de la ligne d'eau à droite et le bord droit de l'image alors $\Delta X = 0$. À l'inverse, le cas du drone décentré sera considéré. Comme la largeur de la ligne d'eau mesurée n'est pas parfaitement alignée avec le bord inférieur de l'image, considéré comme l'axe de coordonnées x , ΔXY

sera plutôt utilisé à la place de ΔX . Ces propos sont illustrés sur la Figure 6.10 et via les équations

$$\begin{cases} Dist_{droite}[pxl] = \sqrt{(\#PIX_{ImgX} - Xpix_{droite})^2 + (\#PIX_{ImgY} - Ypix_{droite})^2} \\ Dist_{gauche}[pxl] = \sqrt{(Xpix_{gauche})^2 + (Ypix_{gauche})^2} \end{cases} \quad (6.12)$$

$$\Delta XY[pxl] = Dist_{droite} - Dist_{gauche} \quad (6.13)$$

avec :

- $\#PIX_{ImgX}$ la dimension en pixels de l'image dans la direction x ;
- $Xpix_{droite}$ la coordonnée en pixels dans la direction x de la ligne d'eau à droite de l'image.



Figure 6.10 – Distance entre le bord de l'image et la ligne d'eau.

3. Méthode *Longueur-Pixel*

Cette méthode est assez intuitive, rapide à mettre en oeuvre et ne demande pas plus de calcul que pour la méthode "*Hauteur-Angle*". C'est pour cette raison que l'idée nous est venue de la développer.

3.1. Données nécessaires

Les données nécessaires sont décrites dans le liste ci-dessous :

- Les deux photos prises pour la méthode "*Hauteur-Angle*".
- Une longueur connue au sol et repérable sur les photos.
- La résolution de l'image en pixels.

3.2. Principe

Le principe est très semblable à celui de la méthode "*Hauteur-Angle*". La largeur de la ligne d'eau est recherchée pour pouvoir la replacer sur la bathymétrie et de cette façon obtenir la hauteur d'eau. Bien que cette méthode demande moins de moyens et de temps d'exécution que la méthode précédente, les résultats sont également moins concluants.

3.3. Mise en pratique

En connaissant une dimension en mètres sur l'image, il est possible d'avoir une relation "pixel-mètre" pour cette image. De cette façon, on mesure la largeur de la ligne d'eau en pixels et connaissant cette relation, la dimension en mètres peut être trouvée assez facilement. Dans ce cas il n'y pas de question à se poser sur le fait que le drone soit centré ou décentré.

Comme deux photos sont prises pour la méthode "*Hauteur-Angle*", le calcul de largeur de la ligne d'eau est également fait à l'aide de deux images pour la méthode "*Longueur-Pixel*". Une fois que cette largeur d'eau est connue, la hauteur d'eau pour les deux images est trouvée via le code de calcul MATLAB, remplaçant cette largeur sur la bathymétrie. Ensuite, la moyenne est faite entre ces deux hauteurs d'eau pour obtenir la hauteur d'eau finale. La Figure 6.11 illustre la relation "pixel-mètre" obtenue via le logiciel *Fudaa-LSPIV*.

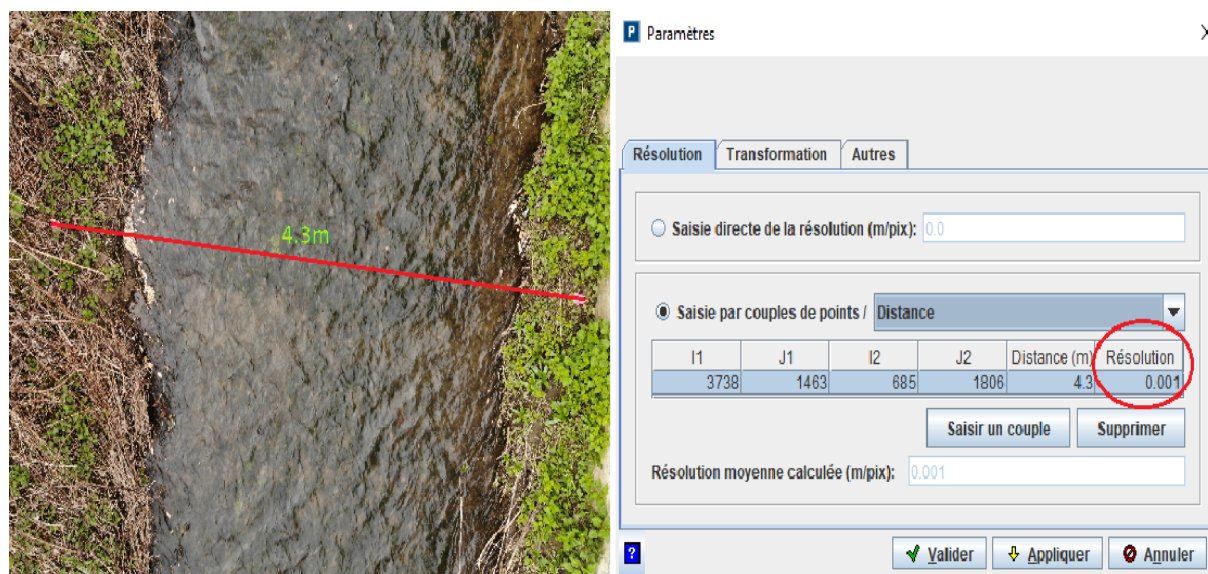


Figure 6.11 – (a) La ligne rouge représente la longueur connue de 4.3[m]. (b) La relation mètre-pixel obtenue grâce à *Fudaa LSPIV* pour cet exemple est entourée en rouge.

4. Sources d'erreurs des méthodes "*Hauteur-Angle*" et "*Longueur-Pixel*"

De nombreuses sources d'erreurs interviennent dans le calcul de la largeur de la ligne d'eau et de la hauteur d'eau. Ce point s'intéresse uniquement aux erreurs qui peuvent intervenir dans le calcul de la largeur de la ligne d'eau.

Deux grandes étapes peuvent engendrer des erreurs : la détermination de l'altitude du drone et la détermination de la largeur de la ligne d'eau à proprement parler.

4.1. Erreurs sur l'altitude du drone

Pour minimiser les erreurs, il faut que différents éléments soient réunis.

- L'objet dont on connaît la dimension doit être un objet 2D. Dans ce cas d'étude, "l'objet" est une distance entre deux éléments donc il est bien plat.
- Il doit y avoir un contraste avec l'environnement. Des plots roses ont été utilisés pour délimiter la distance connue et contraster avec les couleurs du terrain naturel.
- L'objet doit avoir une couleur mate pour être facilement identifiable même avec les rayons du soleil. Les plots sont peints avec une couleur rose mat.
- Avoir l'objet le plus grand possible tout en faisant attention qu'il reste entièrement dans l'image. La photo à l'altitude H (voir Figure 6.6) est prise le plus bas possible afin que les deux plots roses restent toujours sur l'image.

Une des difficultés rencontrées pour déterminer correctement l'altitude du drone, est lorsqu'il faut identifier les plots roses sur l'image à l'altitude $H + \Delta H$ (voir Figure 6.6). En effet comme cette image est prise à une altitude beaucoup plus haute, il est moins évident de déterminer avec précision ces éléments.

Une solution est de zoomer sur l'image ce qu'il est possible de faire dans le logiciel *Fudaa-LSPIV*. Un autre problème apparaît alors. S'il est nécessaire de zoomer de manière importante pour identifier les éléments (voir Figure 6.12), il se peut que les pixels de l'image commencent à être visibles. De cette manière, il ne sera parfois plus possible d'identifier les objets précisément. Une façon de résoudre ce problème en partie est d'utiliser une image de très haute qualité et donc avec plus de pixels.



Figure 6.12 – (a) Image sans zoom. (b) Image avec zoom.

Comme le drone utilisé possède un altimètre, il est possible de comparer les résultats avec ceux donnés directement par l'altimètre du drone, cependant celui-ci arrondi au dixième de mètre. Le graphe de la Figure 6.13 permet de visualiser les erreurs de ΔH pour la station de Limelette. Pour rappel le ΔH est la différence d'altitude entre la photo une et la photo deux.

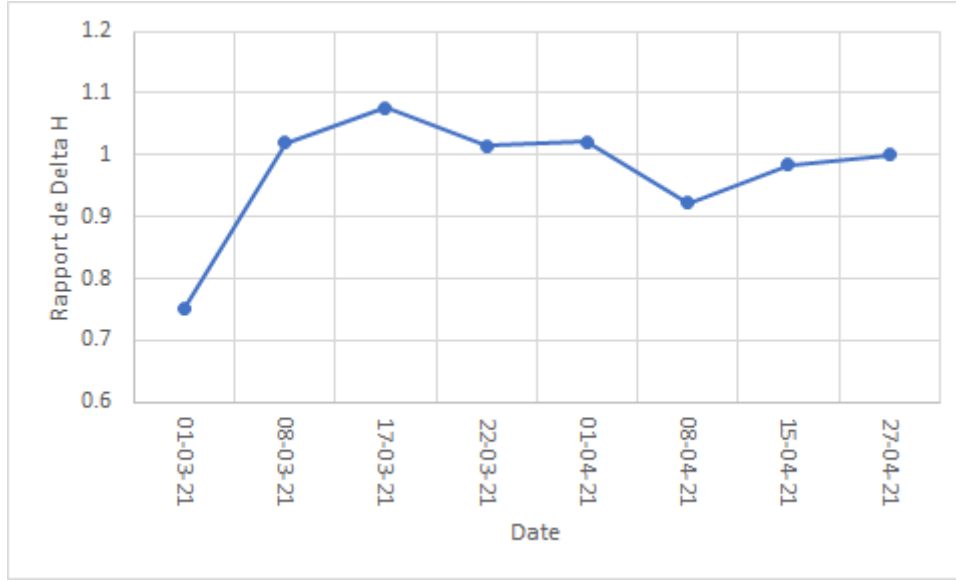


Figure 6.13 – Rapport des ΔH pour la station de Limelette.

Si le rapport des ΔH est supérieur à 1, alors la méthode surestime l'altitude et inversement si le rapport est inférieur, la méthode sous-estime l'altitude.

La Figure 6.13 montre que la méthode pour déterminer l'altitude du drone fonctionne bien puisque le rapport reste proche de 1, excepté le 1er mars 2021.

4.2. Erreurs pour la méthode "*Hauteur-Angle*"

Comme expliqué plus haut, cette méthode demande des mesures différentes qui apportent chacune leur lot d'erreurs. SIMON RENARD [49] exprime l'erreur possible sur la largeur de cette façon :

$$\frac{\delta L}{|L|} = \sqrt{\frac{1}{H^2}(\delta H)^2 + \frac{1}{4[\sin(\frac{\alpha}{2})\cos(\frac{\alpha}{2})]^2}(\delta \alpha)^2 + 2\frac{1}{H\cos(\frac{\alpha}{2})\sin(\frac{\alpha}{2})}\delta H\delta \alpha} \quad (6.14)$$

Pour limiter l'erreur il faudrait une valeur de H la plus élevée possible. Cependant avec une altitude H élevée, l'angle α sera faible ce qui n'est pas favorable. Un autre élément plus pratique qui rentre en compte est le fait que lorsque l'altitude est trop élevée, il n'est plus possible d'identifier avec précision l'objet dont on connaît la taille au sol. Dans certains cas, l'altitude maximale peut être imposée par le site de mesures. Soit parce que le drone a une barrière physique telle que les branches d'un arbre ou bien une barrière législative.

Problème de verticalité

Comme le drone ne reste pas parfaitement sur la même verticale entre les deux photos, cela peut conduire à des erreurs. Il est relativement compliqué d'empêcher que le drone ne bouge. Plus le drone sera de bonne qualité et plus il sera facile de limiter cette erreur. En effet, un drone assez haut de gamme peut corriger en temps réel sa position, contrecarrer les rafales de vent et grâce à une caméra sur 3 axes, limiter au maximum le mouvement de l'image. Le vent est, pour ce genre de données, le principal problème car même si le drone peut limiter fortement ces effets, ce n'est jamais parfait.

La Figure 6.14 montre le cas où il y a très peu de vent et où le drone a réussi à se stabiliser correctement. Dans ce cas, la ligne des deux images reliant les deux plots roses se superpose parfaitement (voir Figure 6.15).

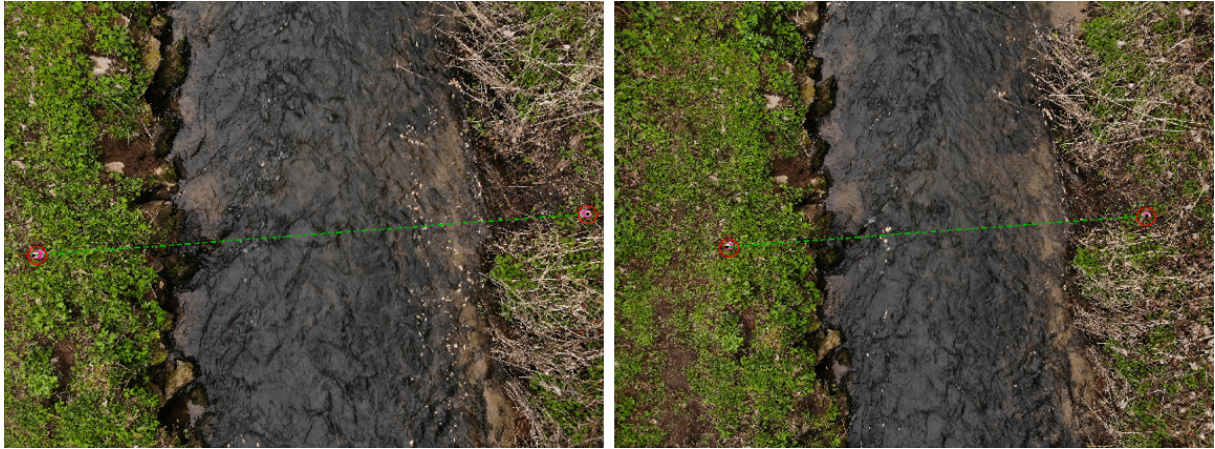


Figure 6.14 – (a) Photo à l'altitude H . (b) Photo à l'altitude $H+\Delta H$.

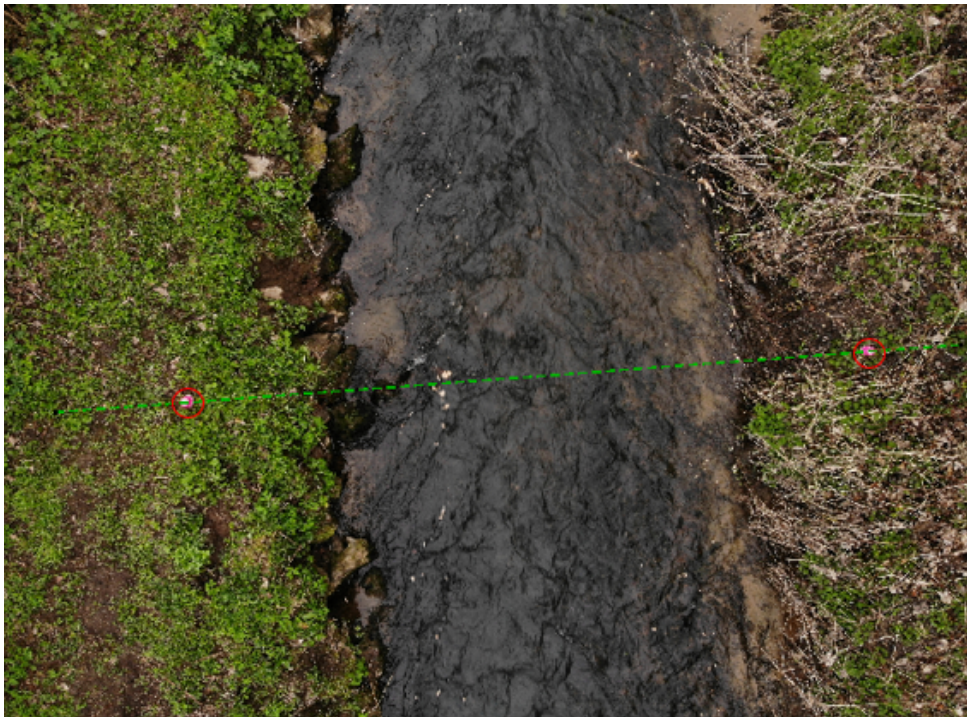


Figure 6.15 – Superposition de la ligne verte de la photo à l'altitude H sur la photo à l'altitude $H+\Delta H$.

Au contraire, la Figure 6.17, quant à elle, montre que lorsqu'il y a un peu plus de vent la ligne verte ne se superpose plus parfaitement. Néanmoins, le décalage reste faible.



Figure 6.16 – (a) Photo à l'altitude H . (b) Photo à l'altitude $H + \Delta H$.

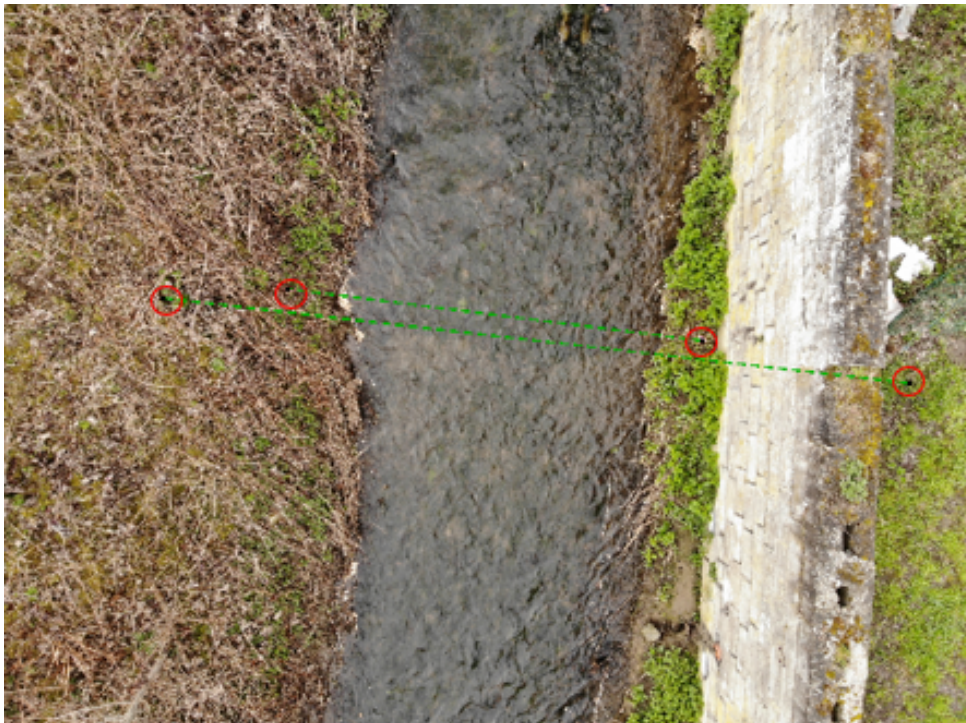


Figure 6.17 – Superposition de la ligne verte de la photo à l'altitude H sur la photo à l'altitude $H + \Delta H$.

Problème de positionnement de la ligne d'eau

Dans ce cas, deux types d'erreurs peuvent être identifiées : les erreurs dues à l'utilisateur et les erreurs dues à la morphologie de la rivière.

Les erreurs dues à l'utilisateur viennent de la difficulté à identifier correctement où s'arrête la ligne d'eau. Pour résoudre en partie ce problème, des photos zoomées des berges de la rivière ont été prises comme le montre la Figure 6.7. Cependant, ce ne sera jamais parfait. Il est donc conseillé, que la personne qui réalise les analyses de largeur de ligne d'eau soit la même, que la personne qui prend les mesures. De cette façon, il pourra plus facilement apprécier où s'arrête la ligne d'eau.

Quant aux erreurs dues à la morphologie de la rivière, il y en a deux principales : la végétation et l'érosion.

La végétation basse, comme les ronces ou les herbes hautes, peut recouvrir en partie la ligne d'eau. La Figure 6.18 montre que lorsqu'il y a de la végétation, la zone en rouge peut-être difficile à discerner. De ce fait, la limite entre la berge et l'eau est plus compliquée à établir.

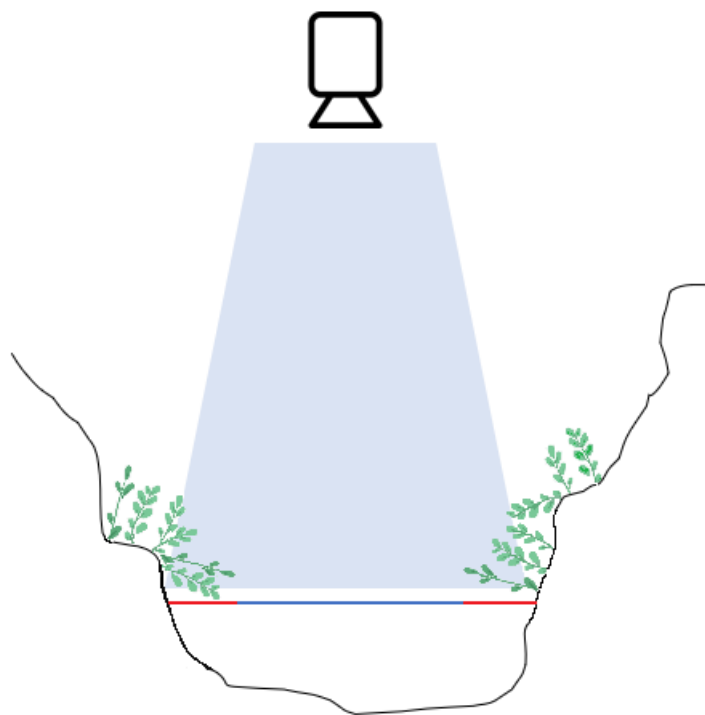


Figure 6.18 – Végétation au-dessus de l'eau.

Pour résoudre ce problème, un endroit où la végétation n'obstrue pas la vision sera préféré. Si ce n'est pas possible, la végétation devra être en partie coupée. Dans le premier cas, si les données sont récoltées en hiver, il est possible d'obtenir ces conditions pour tout type de berge. En revanche, pour les autres périodes de l'année, si les berges ne sont pas rocheuses, il y a très peu de chance qu'il n'y ait pas de végétation. Si celle-ci doit être coupée, il se pose alors la question de l'accessibilité des berges.

Dans le cas de l'érosion, le problème est plus complexe. Dans certaines rivières où les berges s'érodent facilement et où l'angle de frottement interne du sol est assez élevé, comme c'est le cas pour l'argile, il se peut que de petites cavités se creusent au niveau de la ligne d'eau ce qui empêche de voir sur les images, où elle s'arrête réellement. L'utilisateur trouvera alors une largeur de ligne d'eau plus faible qu'elle n'est en réalité. Sur la Figure 6.19 les zones rouges ne sont visuellement pas atteignables avec la caméra du drone.

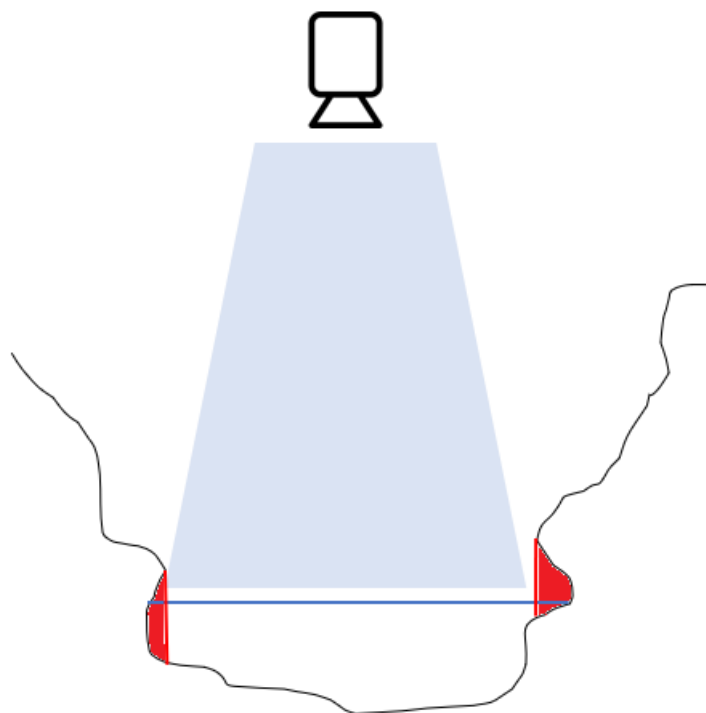


Figure 6.19 – Érosion des berges.

Pour qu'il y ait la formation de ces petites cavités dans les berges, il faut que la vitesse de l'eau soit suffisamment élevée et que le niveau d'eau reste stable. Ce qui n'est pas le cas de beaucoup de rivières naturelles.

Cependant, l'érosion sous toutes ses formes, est un phénomène inévitable et il y a d'ailleurs des périodes de l'année durant lesquelles ce phénomène a plus de chance de se produire. Notamment, dans nos régions, où nous avons un régime hydrologique pluvial. C'est-à-dire que le débit maximum sera atteint en hiver en milieu totalement naturel.

Cette nuance est importante car certaines rivières que nous avons étudiées comme Limelette ou Noirhat sont en partie régularisées et se trouvent en zone urbaine ou pré-urbaine. Dans ce cas, le débit maximum sera le plus souvent atteint en été pendant un orage. Il sera la plupart du temps assez bref et emportera ainsi parfois presque la totalité des berges, n'ayant pas le temps de former de cavités.

Nature des granulats	Dimension mm	Force tractrice critique (N/m ²)
Sable quartzeux ordinaire	0.2 ... 0.4	1.8 ... 2.0
	0.4 ... 1	2.5 ... 3.0
	2	4.0
Graviers quartzeux arrondis	5 ... 15	12.5
Sol argileux		10
Graviers grossiers		48
Galets calcaires plats	Ép.10 ... 20	56
	Lg 40 ... 60	

Figure 6.20 – Seuils d'érosion selon le critère de Schoklitsch[18].

Le tableau présenté sur la Figure 6.20 permet de se rendre compte que des cavités auront plus facilement tendance à se creuser dans les berges limoneuses-argileuses. Ce type de sol ne nécessite pas une force tractrice ni un angle de frottement interne trop importants pour être érodé.

En conclusion pour éviter ce phénomène, il faut éviter les berges limoneuses-argileuses ou bien réaliser des mesures lorsque le niveau d'eau est soit plus bas, soit plus élevé que ces cavités.

Problème de détermination du ΔX

Comme précisé plus haut dans le point décrivant la façon d'obtenir le ΔX , il est nécessaire d'avoir les coordonnées des extrémités de la ligne d'eau. Or, de nombreuses sources d'erreurs sont possibles lors de la mesure de celles-ci.

Le but de la détermination de ce ΔX est d'augmenter la précision de la méthode "*Hauteur-Angle*". Cette recherche d'augmentation de précision sera donc entachée d'erreurs qui finalement limiteront cette précision.

Problème avec l'angle α_1 et α_2 dans le cas du drone décentré

La méthode considérant le drone décentré doit en théorie fournir de meilleurs résultats que la méthode où le drone est considéré comme centré.

Cependant dans le système d'équation 6.9 du drone décentré, les angles α_1 et α_2 sont les mêmes que ceux considérés dans les équations 6.2 et 6.3 pour le cas du drone centré. Cette approximation permet d'obtenir un système de 6 équations à 6 inconnues plutôt qu'un système de 6 équations à 8 inconnues insolubles. Autrement dit, ces angles ne sont pas totalement corrects dans le cas de la méthode du drone décentré. Ceci conduit à des résultats moins bons que dans le cas du drone centré.

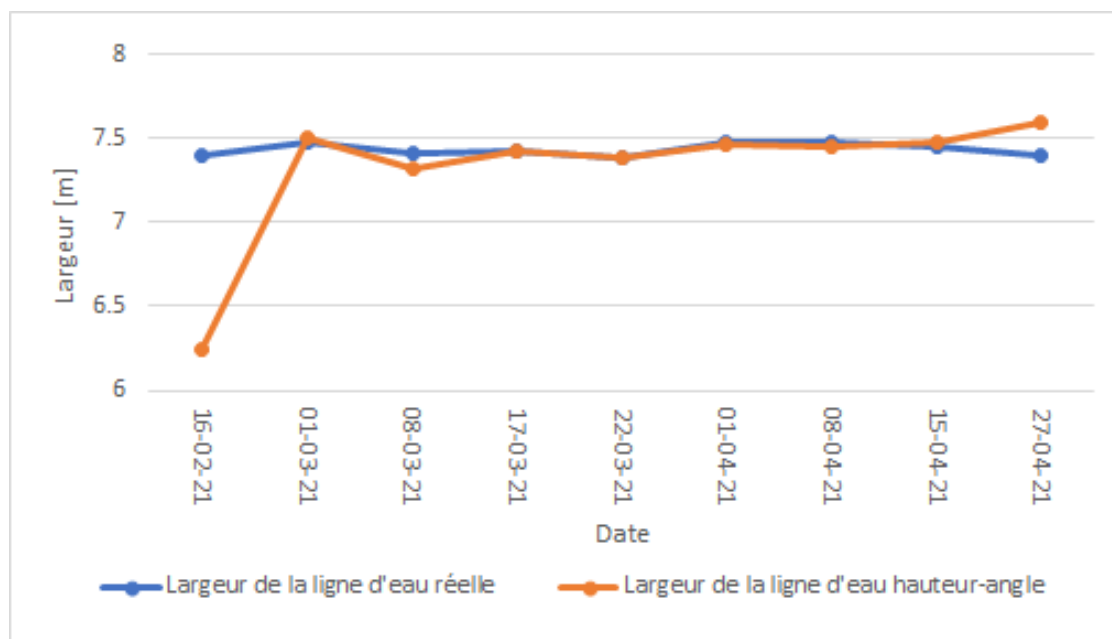


Figure 6.21 – Comparaison des largeurs de lignes d'eau sans considérer de ΔX (Limelette).

Le calcul de largeur de ligne d'eau a été fait en considérant le ΔX pour la station de Limelette le 27 avril 2021. Le résultat donne une largeur de 5.9[m]. La différence entre cette valeur et la valeur réelle est de 1.5[m].

Or, comme il est montré sur la Figure 6.21, toujours pour la station de Limelette, lorsque le ΔX n'est pas considéré, l'erreur n'excède pas 1.16[m] et est en moyenne de 0.17[m].

Au vu de ces résultats peu concluants, le ΔX ne sera pas pris en compte dans la suite de ce travail et le drone sera considéré comme étant centré.

4.3. Erreurs pour la méthode "*Longueur-Pixel*"

Dans le cas de cette méthode, les problèmes rencontrés sont des problèmes de positionnement de la ligne d'eau comme détaillés pour la méthode "*Hauteur-Angle*" et des problèmes liés à la dimension de l'objet connu.

Problème de dimension de l'objet connu

Un dernier problème qu'il est possible de rencontrer vient de l'élément dont la dimension est connue et qui est à la base de tous les calculs de la méthode "*Longueur-Pixel*" présentée plus haut. Pour les stations étudiées dans ce travail, cet "objet" ne se situe pas au niveau de la surface de l'eau mais, suivant les stations, entre quelques centimètres et quelques dizaines de centimètres au-dessus. Cela engendrera donc une erreur dans la détermination de la relation "mètre/pixel" à la surface de l'eau. Or, cette relation est très sensible à la variation de la longueur de l'objet connu. Cette erreur sera proportionnellement moins importante plus la photo est prise à haute altitude.

4.4. Erreurs sur la hauteur d'eau

Même si la largeur de la ligne d'eau a été déterminée de manière exacte, il est possible d'avoir une hauteur d'eau qui, elle, ne l'est pas.

Comme expliqué à la section 2. de ce chapitre, la hauteur d'eau est obtenue en transposant la largeur de la ligne d'eau sur la bathymétrie mesurée.

Lorsque la bathymétrie est mesurée, les points connus sont mesurés tous les 15 [cm]. Une interpolation linéaire est ensuite effectuée entre ces points pour avoir une bathymétrie continue. En réalité la bathymétrie n'évolue pas linéairement entre les différents points mesurés.

La Figure 6.22 permet de visualiser ce problème pour une hauteur d'eau de 0.7[m].

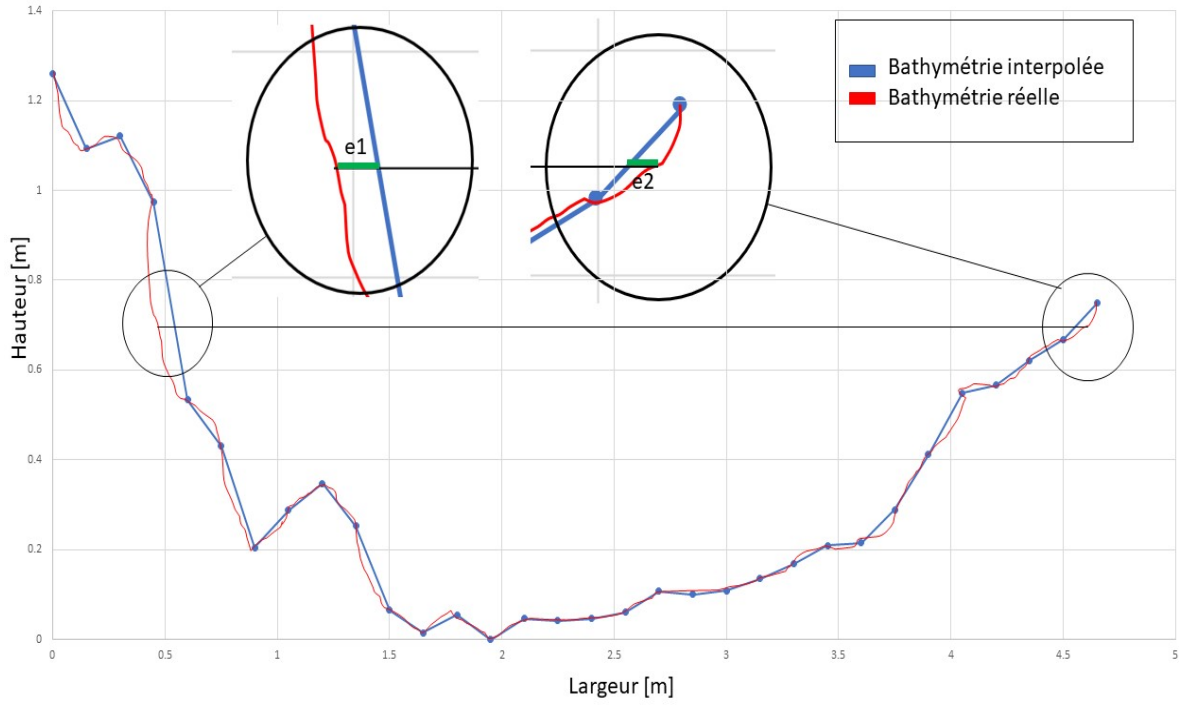


Figure 6.22 – Exemple d’erreurs pour l’interpolation de la bathymétrie : e_1 représente l’erreur entre la bathymétrie exacte et la bathymétrie interpolée sur la rive gauche et e_2 représente cette même erreur pour la rive droite.

La largeur réelle de la rivière L_R peut être définie de cette façon :

$$L_R = L_I + e_1 + e_2 \quad (6.15)$$

avec :

- L_I , la largeur de la rivière dans le cas d’une interpolation linéaire entre les points de bathymétrie pour une hauteur d’eau de 0.7[m] ;
- e_1 et e_2 les erreurs de largeur en rive gauche et en rive droite entre la bathymétrie réelle et la bathymétrie interpolée.

Dans l’exemple de la Figure 6.22, si la largeur réelle de la ligne d’eau est trouvée, la hauteur d’eau sera donc surestimée.

5. Étude théorique de l’influence de la largeur d’eau sur la hauteur d’eau

Cette section, s’attarde sur l’influence que peut avoir la largeur de la ligne d’eau sur la hauteur d’eau de la rivière. En effet, pour les méthodes "*Hauteur-Angle*" et "*Longueur-Pixel*", il est primordial de déterminer avec la plus grande précision possible, la largeur de la ligne d’eau. Le lien sera fait entre les sections réellement étudiées et des modèles plus théoriques.

5.1. Profil bathymétrique rectangulaire

Pour un profil bathymétrique rectangulaire, il n'est pas possible de déterminer la hauteur d'eau grâce à la largeur de la ligne d'eau. Comme le montre la Figure 6.23 pour un canal parfaitement rectangulaire, si une largeur de ligne d'eau de 3.5[m] est détectée à l'aide des méthodes "*Hauteur-Angle*" ou "*Longueur-Pixel*", on trouvera une infinité de hauteurs d'eau.

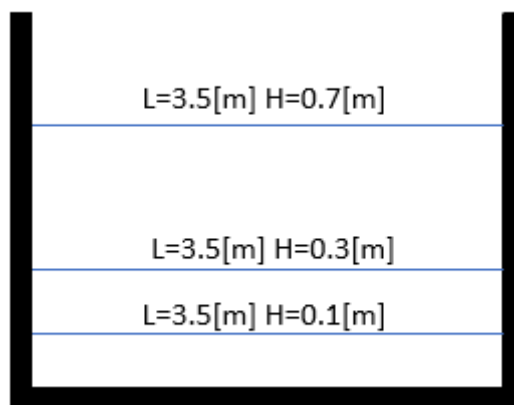


Figure 6.23 – Canal rectangulaire.

Dans les sections de rivière étudiées, la station de Limelette présente des berges très raides et s'approche donc d'un canal rectangulaire.

Comme le montre la Figure 6.24, une erreur de 1% sur la largeur de la ligne d'eau entraîne une erreur importante sur la hauteur d'eau.

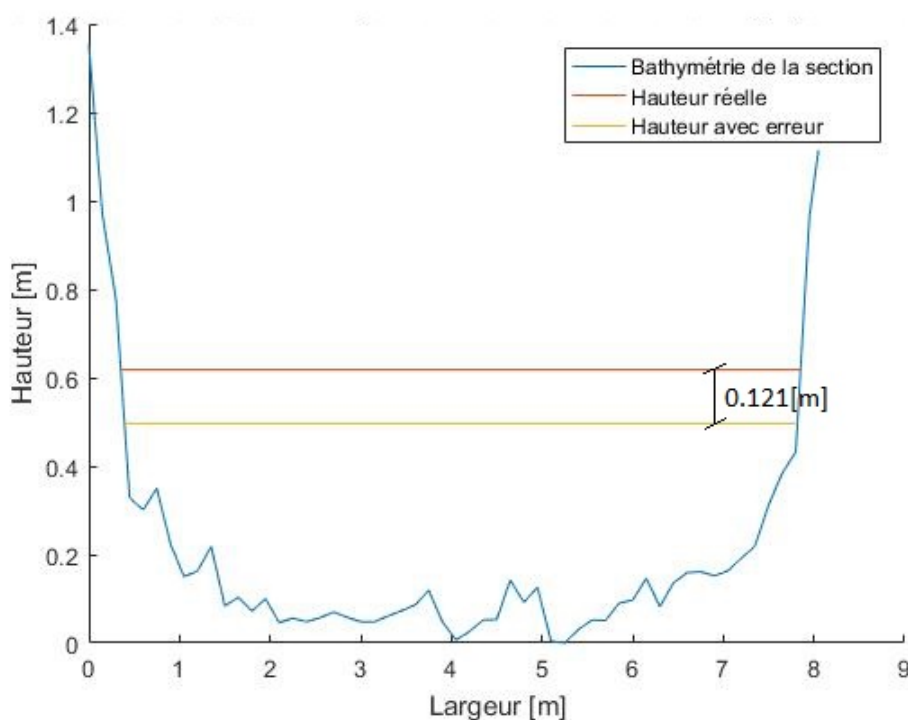


Figure 6.24 – Erreur de hauteur d'eau pour la station de Limelette.

Cette erreur est toutefois à nuancer. Bien qu'une erreur de 1% puisse paraître minime, plus la largeur de la rivière est importante et plus cette erreur tendra à être faible. Par exemple pour la station de Limelette, la largeur varie entre 7 [m] et 8 [m]. Une erreur de 1% signifie donc 7 à 8 [cm] d'erreur ce qui en réalité peut être évité facilement.

Fort heureusement dans la nature, les berges ne sont que très rarement aussi abruptes. De fait, les berges de la Dyle à la station de Limelette ont été en partie aménagées pour empêcher une trop forte érosion en cas de crue et donc limiter l'emprise du lit de la rivière sur les terrains aux alentours.

5.2. Profil bathymétrique trapézoïdal

Dans le cas d'un profil bathymétrique trapézoïdal, plus la pente des berges sera faible et moins l'erreur sur la largeur de la ligne d'eau aura d'influence sur la hauteur d'eau.

Une étude purement théorique, illustrée via les Figures 6.25 et 6.26, simule l'évolution de l'erreur en fonction de la pente des berges. Cette erreur de hauteur d'eau correspond pour chaque figure à une erreur de 1% dans la détermination de la largeur de la ligne d'eau.

Sur la Figure 6.26 (b), la pente des berges est très importante et se rapproche fortement d'un profil rectangulaire. On peut par ailleurs assimiler la station de Limelette à ce dernier modèle.

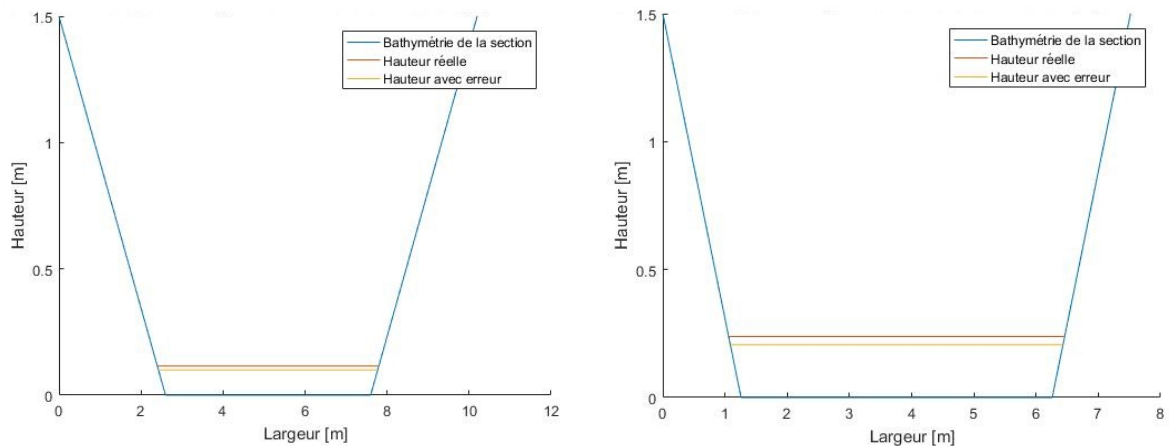


Figure 6.25 – (a) Erreur de 0.016[m] pour une pente des berges de 30[°]. (b) Erreur de 0.032[m] pour une pente des berges de 50[°].

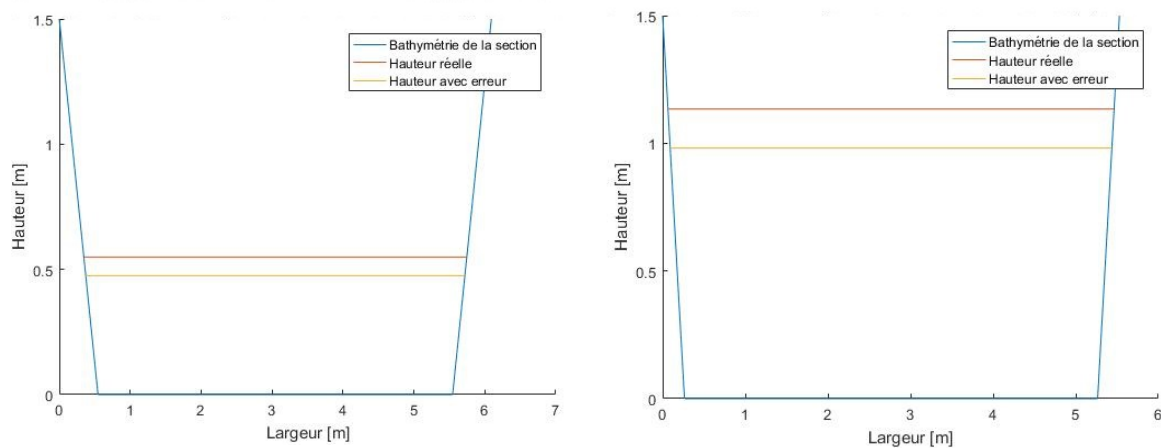


Figure 6.26 – (a) Erreur de 0.074 [m] pour une pente des berges de 70° . (b) Erreur de 0.153 [m] pour une pente des berges de 80° .

Pour la station de Noirhat, dont la bathymétrie et l'erreur de hauteur d'eau est représentée sur la Figure 6.27, se rapproche quant à elle de la Figure 6.25 (a) au vu de l'erreur minime de 0,015[m].

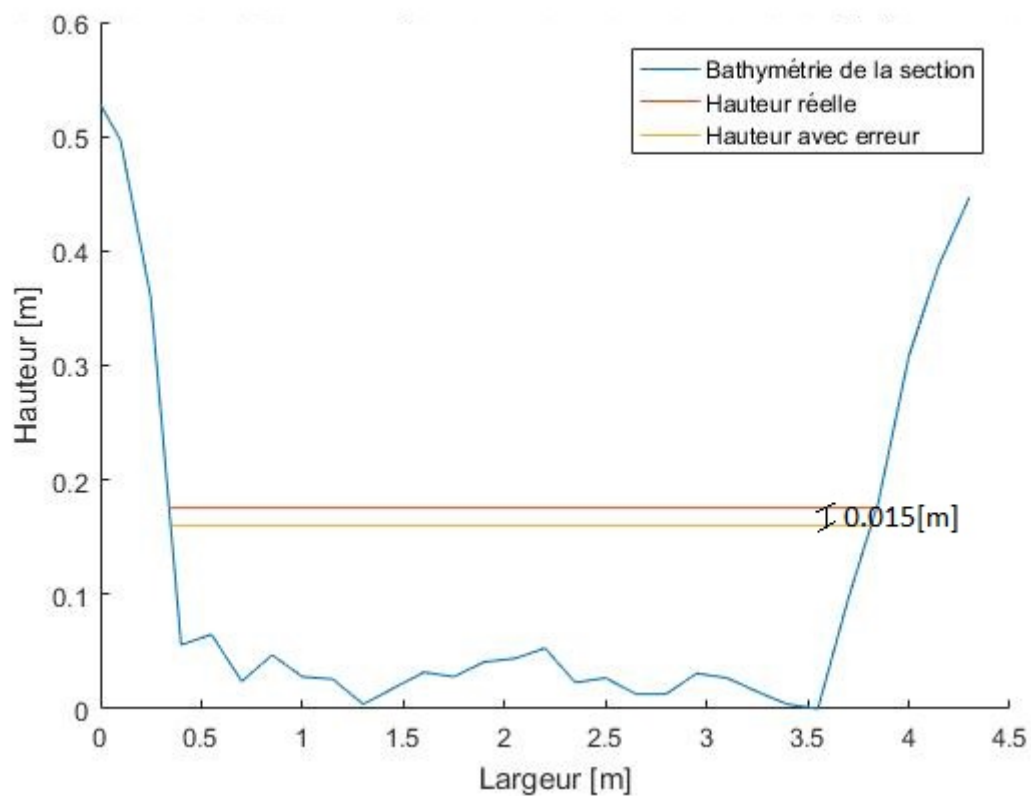


Figure 6.27 – Erreur de hauteur d'eau pour la station de Noirhat.

Tous ces résultats sont à nuancer. En effet, il faut savoir que durant les mesures, la hauteur d'eau était d'environ 20 [cm] pour Noirhat et d'environ 50 [cm] pour Limelette. Autrement dit, la même erreur de hauteur d'eau pour les deux stations aura proportionnellement plus d'impact sur le débit de la station de Noirhat que sur celui de Limelette.

5.3. Profil bathymétrique quelconque

Contrairement aux stations de Limelette et de Noirhat, les sections des stations de Rosières et de Suzeril sont beaucoup plus variables et leurs berges ne peuvent pas être approximées par de simples droites. L'erreur sur la largeur de la ligne d'eau dépendra donc beaucoup plus du niveau d'eau qui sera mesuré. À nouveau les Figures 6.28 et 6.29 permettent de visualiser l'erreur sur la hauteur d'eau qu'occasionne une erreur de 1% dans la détermination de la largeur de la ligne d'eau.

Cette différence d'erreur est proportionnellement plus importante dans le cas de la station de Rosières.

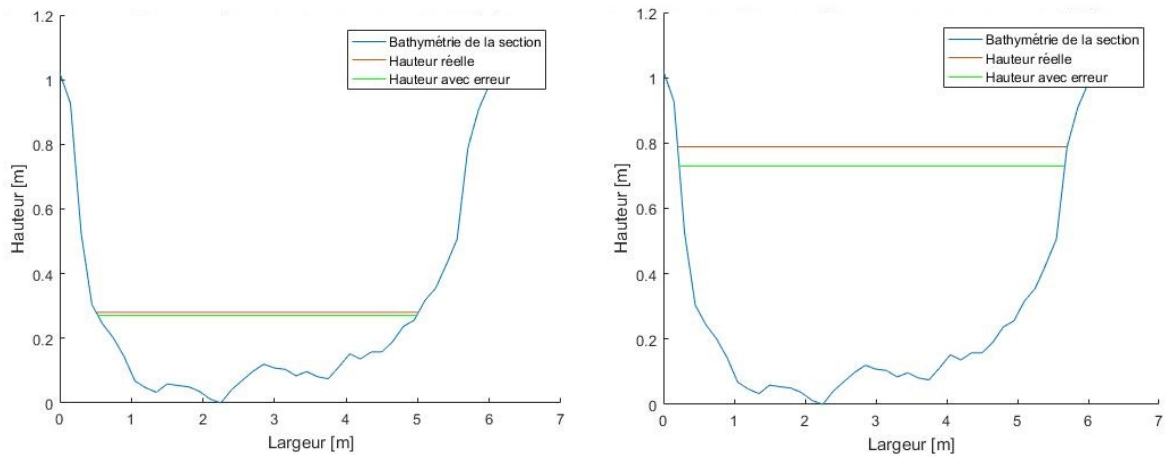


Figure 6.28 – **Station de Rosières** : (a) Erreur de 0.009[m] pour une faible profondeur d'eau. (b) Erreur de 0.06[m] pour une grande profondeur d'eau.

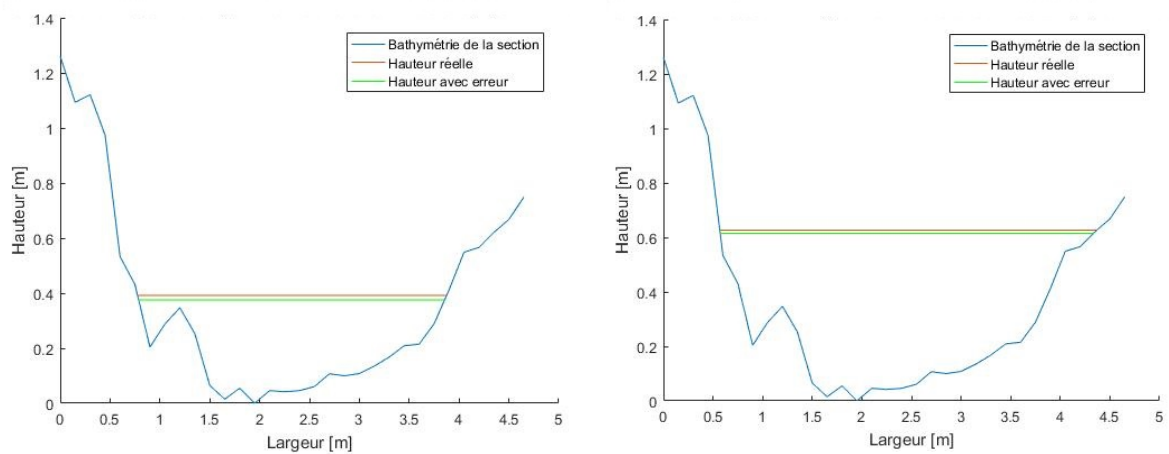


Figure 6.29 – **Station de Suzeril** : (a) Erreur de 0.016[m] pour une faible profondeur d'eau. (b) Erreur de 0.011[m] pour une grande profondeur d'eau.

6. Comparaison des résultats entre les différentes méthodes de détermination de la hauteur d'eau

Les résultats, qui ont été obtenus pour les différentes stations de mesures, sont présentés dans cette section. Un rapprochement est également effectué avec les problèmes qui ont été rencontrés ci-avant.

Certaines stations présentent des problèmes semblables. Le problème de la végétation est par exemple présent pour toutes les stations. Pour résoudre ce problème, la végétation a été coupée au-dessus de la ligne de bathymétrie mesurée.

Le vent est quant à lui plus présent pour la station de Rosières car elle se trouve éloignée de tout relief qui pourrait limiter l'effet de celui-ci. Les trois autres stations sont aussi soumises au vent mais dans une moindre mesure.

6.1. Station de Suzeril

La station de Suzeril présente une barrière physique qui limite les plages d'altitude du drone. Celui-ci ne peut pas voler à plus de 4.5[m] au-dessus du niveau de la rivière car des branches d'arbre l'en empêchent. De ce fait, le ΔH ne peut pas être très élevé. Le drone a également plus de mal à rester sur la même verticale dû à la présence de branches d'arbres toutes proches. Il aura tendance, via ses capteurs, à vouloir éviter ces obstacles.

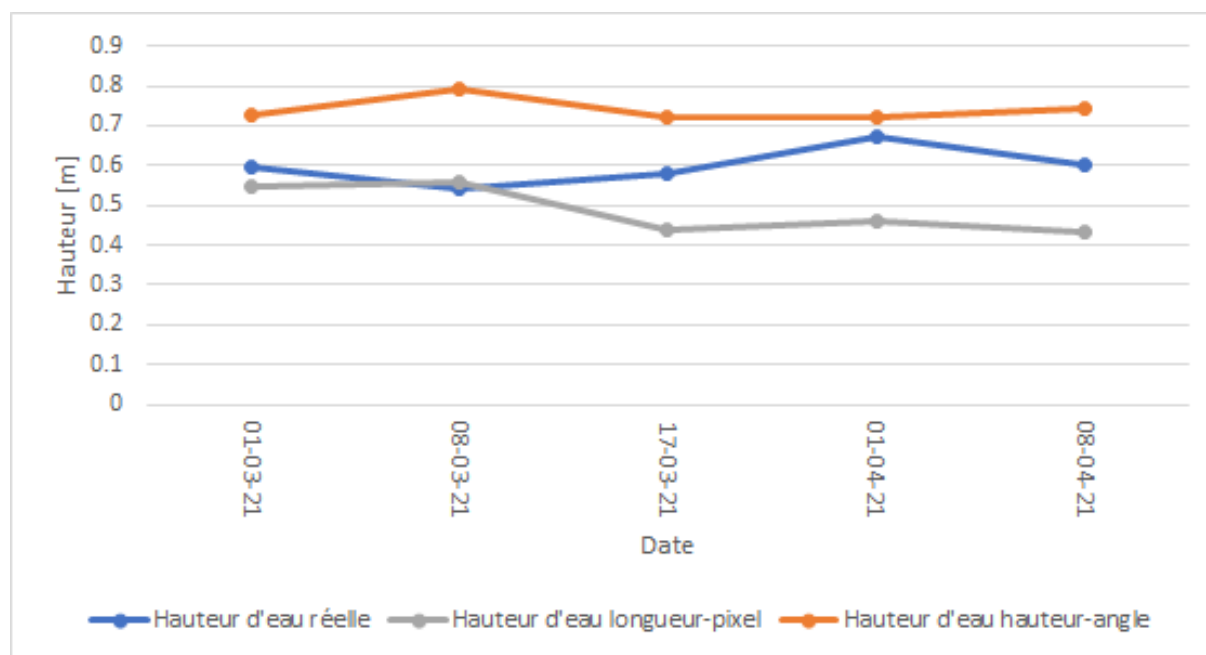


Figure 6.30 – Comparaison des hauteurs d'eau pour la station de Suzeril.

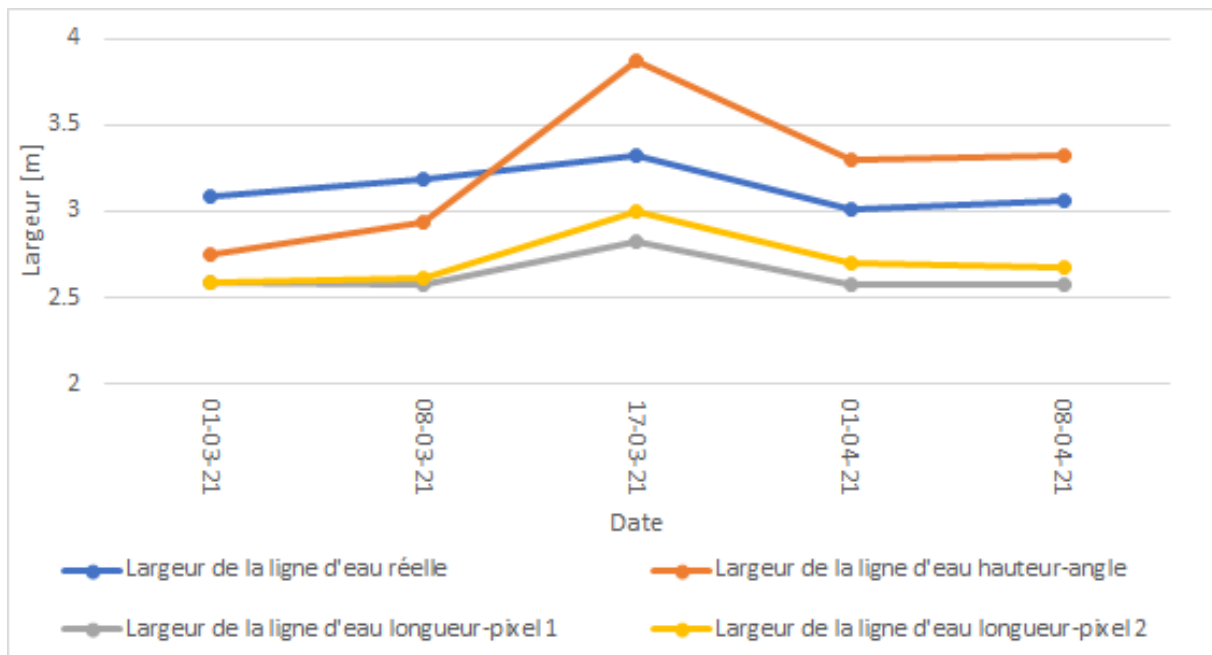


Figure 6.31 – Comparaison des largeurs de lignes d'eau pour la station de Suzeril.

6.2. Station de Noirhat

Sur la berge gauche de la station de Noirhat, la présence d'un mur en béton d'une hauteur de 2.80m, empêche le drone de s'approcher de la berge. Il est donc impossible de prendre une photo plus précise de cette berge, tout en gardant la caméra du drone orientée vers le bas. Encore une fois ces capteurs détectent le mur et l'en gardent éloigné pour éviter la collision.

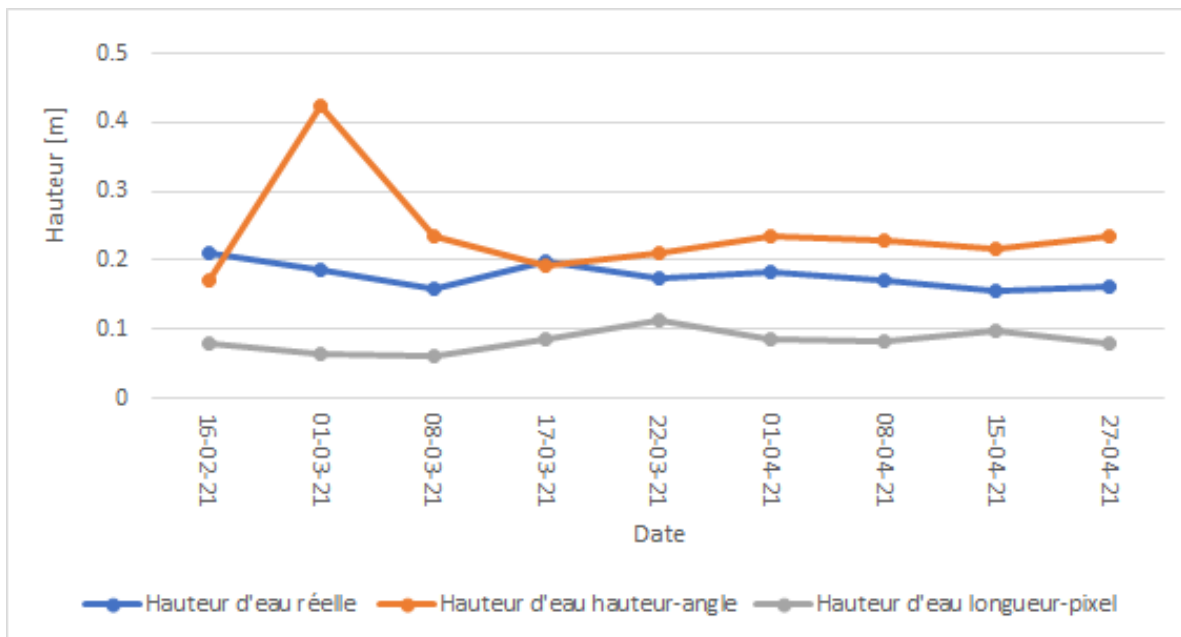


Figure 6.32 – Comparaison des hauteurs d'eau pour la station de Noirhat.

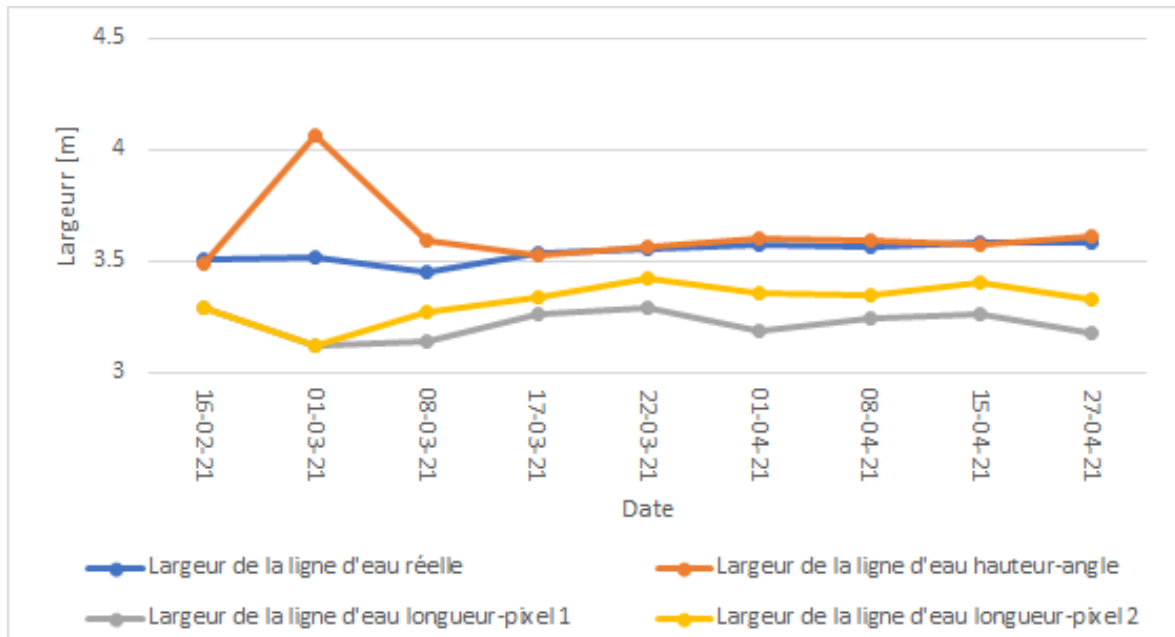


Figure 6.33 – Comparaison des largeurs de lignes d’eau pour la station de Noirhat.

Malgré l’absence de photo zoomée de la rive gauche, les résultats de la Figure 6.33 sont très bons. Puisque l’utilisateur traitant les données était également le même que celui prenant les mesures sur le terrain, l’erreur a pu tout de même être diminuée. De ce fait, celui-ci a eu plus de facilités à identifier l’endroit où la ligne d’eau s’arrêtait.

Quant à l’écart présenté le 1er mars 2021, il s’agit ici d’une erreur de l’utilisateur.

6.3. Station de Rosières

La station de Rosières présente toutes les conditions pour que des cavités puissent se creuser dans ses berges. En effet, comme celles-ci sont composées d’argile, elles ont tendance à s’éroder sans pour autant s’effondrer, comme ce serait le cas pour des berges sablo-limoneuses qui possèdent un angle de cohésion plus faible. Pour certaines hauteurs d’eau, il n’est alors pas possible de voir la totalité de la largeur de la ligne d’eau sur les images prises par le drone.

Ce paramètre ne se ressent pas dans les résultats de la Figure 6.35 puisque les hauteurs d’eau présentent lors des relevés, étaient relativement propices. De plus, comme pour la station de Noirhat l’utilisateur qui traitait les données était le même que celui qui prenait les mesures sur le terrain. Il pouvait donc repérer la présence de cavités et de cette façon aviser lors de l’analyse des images aériennes.

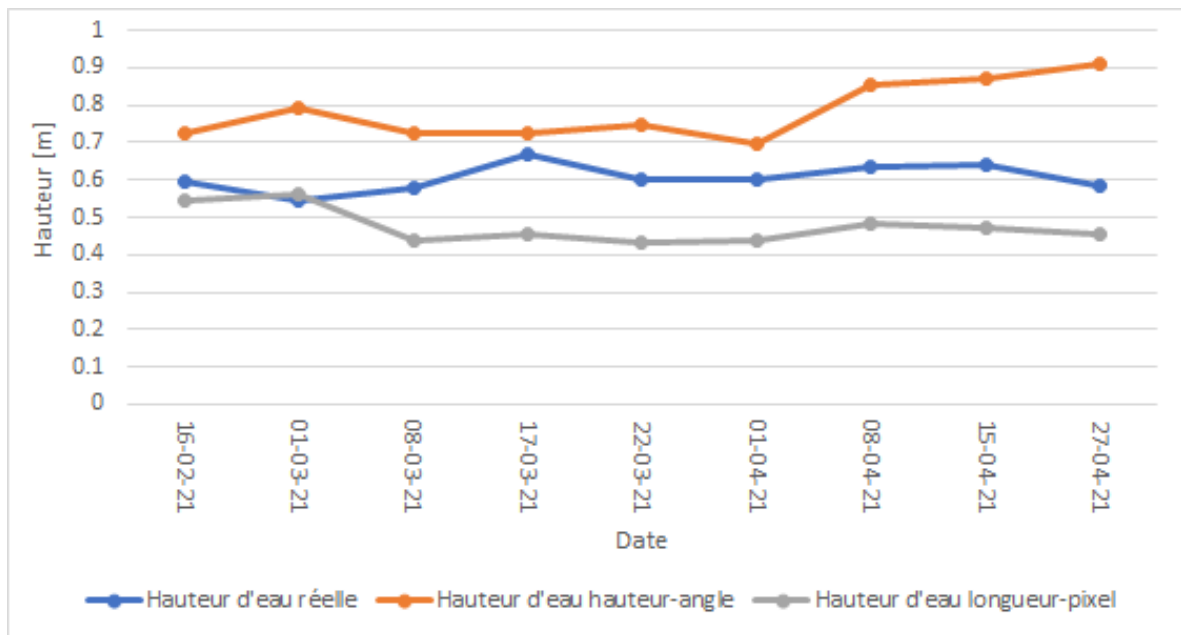


Figure 6.34 – Comparaison des hauteurs d’eau pour la station de Rosières.

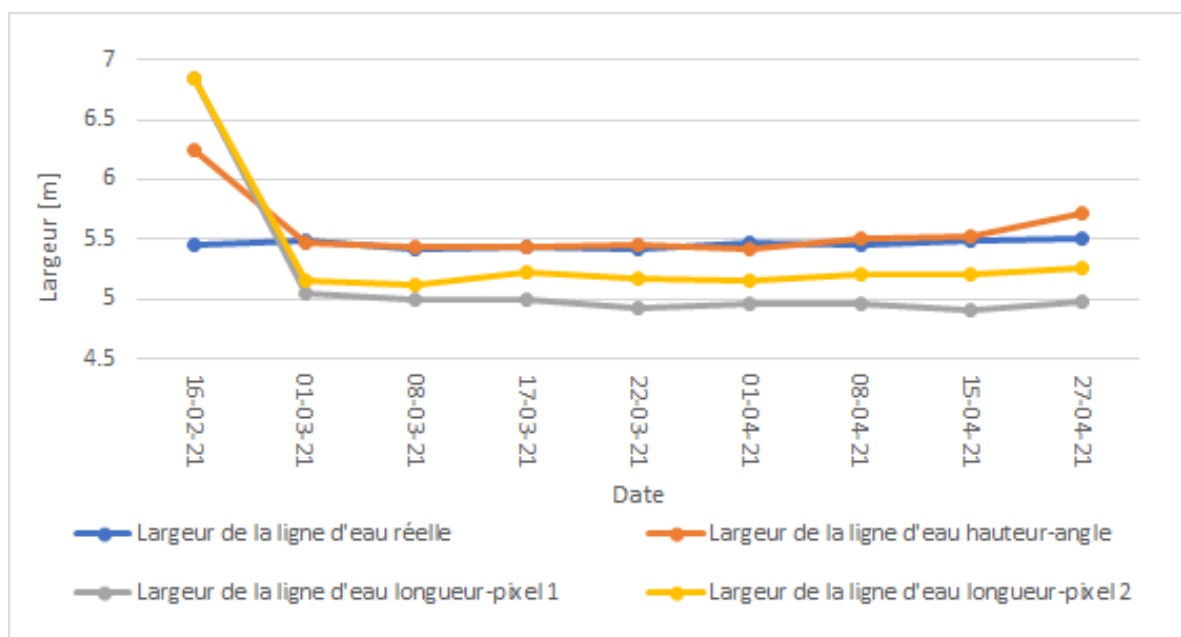


Figure 6.35 – Comparaison des largeurs de lignes d’eau pour la station de Rosières.

À nouveau, les moins bons résultats se retrouvent le 16 février 2021 à cause d’une mauvaise prise d’images.

6.4. Station de Limelette

Des cavités se creusent également dans une des deux berges de cette station. L’autre berge étant composée de gabions, il n’y a pas d’érosion de ce côté. Cependant, les gabions permettent à l’eau de passer en partie dans cette berge. Un débit passe donc au travers sans que celui-ci ne puisse être mesuré. Néanmoins, ce débit étant très faible, il peut être négligé.

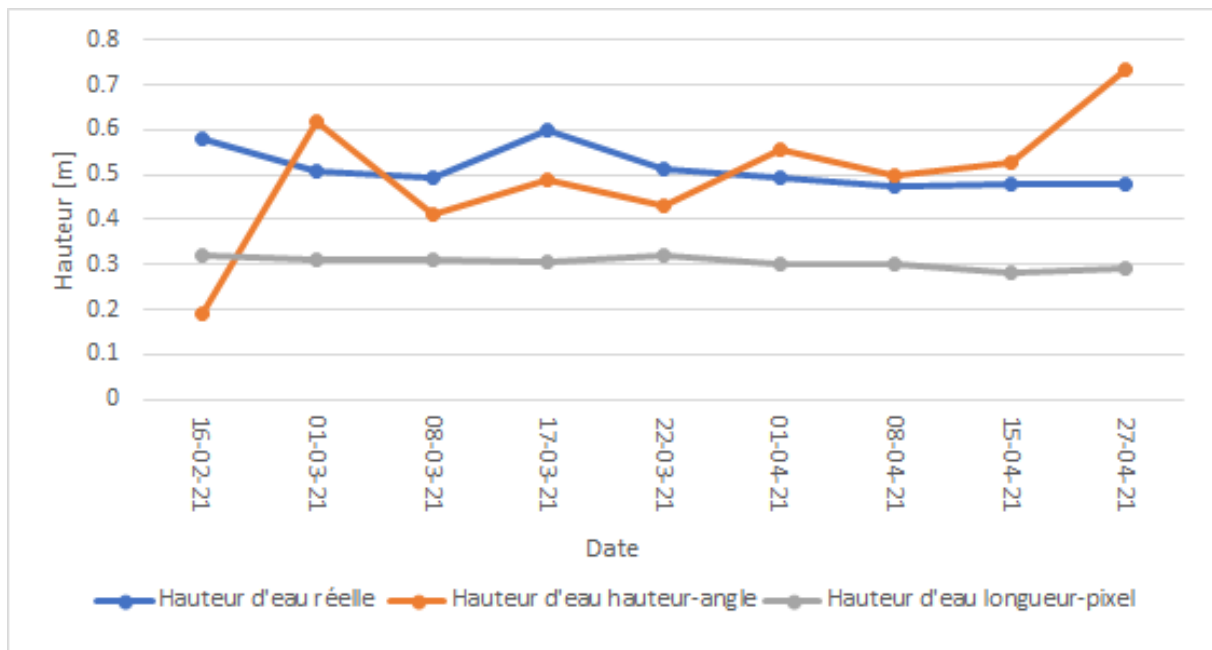


Figure 6.36 – Comparaison des hauteurs d'eau pour la station de Limelette.

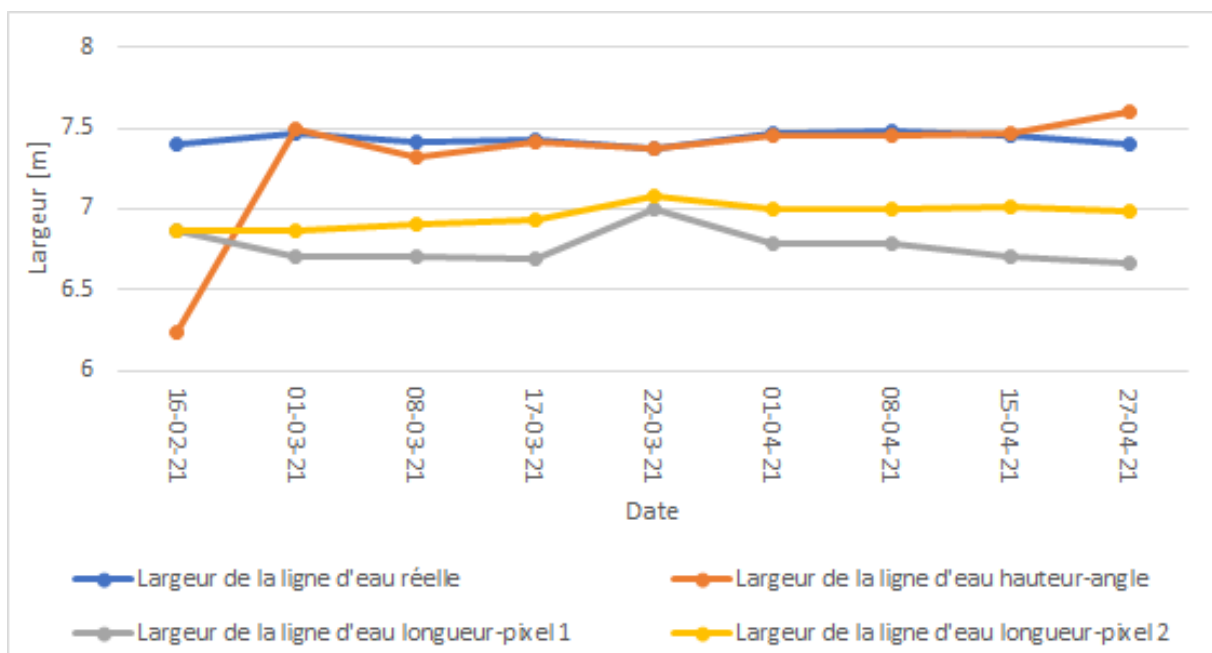


Figure 6.37 – Comparaison des largeurs de lignes d'eau pour la station de Limelette.

Comme dans le cas de la station de Noirhat, l'écart présenté le 16 février 2021 est dû à une erreur de l'utilisateur.

Dans le cas de la méthode "*Hauteur-angle*", pour le 27 avril 2021, l'erreur de largeur de la ligne d'eau est faible (voir Figure 6.37) et pourtant cela engendre une importante erreur de hauteur d'eau (voir Figure 6.36). Ceci est tout à fait en accord avec ce qui a été montré en théorie au Point 5..

Les autres résultats sont tout à fait acceptables.

6.5. Conclusion

Pour avoir une idée plus précise de la qualité des résultats, les Tableaux 6.1 et 6.2 présentent la moyenne de ces erreurs pour chaque station. Les erreurs sont définies comme

$$Erreur = \left| 1 - \frac{L_I}{L_R} \right| * 100[\%] \quad (6.16)$$

$$Erreur = \left| 1 - \frac{H_I}{H_R} \right| * 100[\%] \quad (6.17)$$

avec :

- L_I et H_I , la largeur et la hauteur déterminées par les méthodes d'analyse d'images : "Hauteur-angle" et "Longueur Pixel";
- L_R et H_R , la largeur et la hauteur réelles.

Une moyenne de ces erreurs est ensuite calculée. Pour faire cette moyenne, les *outliers* ont été supprimées. Il s'agit des données du 16 février 2021 pour la station de Rosières et Limelette, et du 1er mars 2021 pour la station de Noirhat.

Station	Erreur moyenne [%] méthode "Hauteur-angle"	Erreur moyenne [%] méthode "Longueur-pixel".
Limelette	19.30	39.60
Suzeril	38.56	35.05
Noirhat	29.19	50.61
Rosières	30.55	23.34

Tableau 6.1 – Erreurs sur le calcul des hauteurs d'eau

Au niveau de la hauteur d'eau les résultats ne sont pas satisfaisants. Lorsque la largeur de ligne d'eau est exacte, l'erreur vient principalement d'un problème de transposition de la largeur de la ligne d'eau sur la bathymétrie comme expliqué au Point 4.4.. Comme il a été montré au Point 5., les erreurs de largeur de ligne d'eau se répercutent de manière accentuée sur la hauteur d'eau.

Station	Erreur moyenne [%] méthode "Hauteur-angle"	Erreur moyenne [%] méthode "Longueur-pixel 1"	Erreur moyenne [%] méthode "Longueur-pixel 2".
Limelette	0.66	9.14	6.23
Suzeril	10.59	16.03	13.24
Noirhat	0.99	8.78	5.57
Rosières	0.98	9.51	5.56

Tableau 6.2 – Erreurs sur le calcul des largeurs d'eau

De manière générale, la méthode "Hauteur-Angle" présente d'excellents résultats pour déterminer la largeur de la rivière. Une exception est faite pour la station de Suzeril. Pour cette station quelque soit la méthode utilisée, les résultats ne sont pas aussi bons que pour

les trois autres stations. Aucune explication claire ne peut être donnée mais des pistes d'erreurs sont données au point 6.1.. Les résultats de la méthode "*Longueur-Pixel*", quant à eux, restent corrects. Pour cette méthode, la largeur obtenue est plus proche de la réalité lorsque la photo est prise à plus haute altitude ("Largeur de la ligne d'eau longueur-pixel 2" dans la légende). Cela confirme ce qui a été dit au Point 4.3. : l'erreur sur la relation "mètre/pixel" est proportionnellement moins importante lorsque la photo est prise à plus haute altitude.

Chapitre 7

Étude sur le coefficient de vitesse α

Une étude sur le coefficient de vitesse α a été menée au cours de ce mémoire. Connaître la relation entre la vitesse de surface et la vitesse moyenne d'une même colonne d'eau est indispensable pour la détermination d'un débit à l'aide de la LSPIV.

De nombreuses études ont démontré que ce coefficient était influencé par deux facteurs importants : la hauteur d'eau et la rugosité du lit [27][47][59]. La valeur moyenne de celui-ci varie donc entre 0.8 pour des rivières à faible hauteur d'eau et une rugosité importante et 0.9 pour des rivières avec une grande profondeur et une rugosité minime, proche d'un canal en béton.

Cet index de vitesse a été étudié pour les quatre différentes stations. Elles ont des hauteurs d'eau moyennes qui diffèrent entre elles, allant de 0.2m à 0.7m. La rugosité varie également entre les stations, surtout à Rosières où le lit est plutôt composé de sédiments fins et argileux. Pour rappel, comme montré dans la section 3.2. du chapitre 4, cet index de vitesse est calculé de la façon suivante :

$$\alpha = \frac{\text{Vitesse moyenne sur la colonne d'eau}}{\text{Vitesse de surface de cette colonne d'eau}} \quad (7.1)$$

En mesurant, avec le vélocimètre, la vitesse à la surface, et en déterminant la vitesse moyenne sur la même verticale, il est possible de déterminer un coefficient de vitesse local pour chaque colonne d'eau, dont la somme de celles-ci représente la section transversale (voir Figure 7.1).

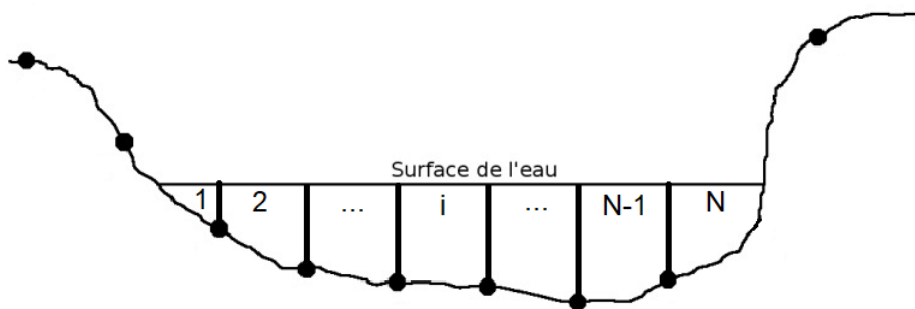


Figure 7.1 – Schéma d'une section transversale divisée à l'aide de N colonnes d'eau.

Un coefficient global pour l'ensemble de la section peut ensuite être calculé. Pour y parvenir, il existe plusieurs façons de le déterminer :

- Soit une moyenne arithmétique est calculée avec l'ensemble des coefficients α calculés précédemment :

$$\alpha_{arithmétique} = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i}{n} \quad (7.2)$$

avec α_i les coefficients de vitesse calculés pour chaque verticale et n le nombre de discrétisations de la surface représentant la section transversale.

- Soit une moyenne pondérée est calculée, en tenant compte de la surface de chaque colonne d'eau :

$$\alpha_{pondéré} = \frac{\sum_{i=1}^n \alpha_i A_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (7.3)$$

avec A_i l'aire des différentes surfaces dont la somme équivaut à la section transversale.

Pour la suite de ce mémoire, la moyenne pondérée des coefficients de vitesse locaux a été considérée (équation 7.3). Puisque dans une section se trouvant en rivière naturelle, les verticales qui la discrétisent n'ont pas toutes la même hauteur. Il est donc plus précis de pondérer ce coefficient par l'aire des différentes sections.

Présentation des résultats

Un des objectifs de ce mémoire était de déterminer un coefficient de vitesse pour chaque station étudiée. La rugosité est considérée constante pour une station donnée puisque les mesures sont relevées exactement sur la même section. De plus, le déplacement des sédiments n'est pas significatif pour changer considérablement cette rugosité le temps de l'étude.

Comme l'ont déduit Welber et *al.* [59], le deuxième facteur pouvant influencer fortement le coefficient de vitesse est la hauteur d'eau. La recherche d'une relation entre la hauteur d'eau et le coefficient de vitesse s'est donc imposée. Pour chaque campagne de mesures, la hauteur d'eau diffère et un coefficient de vitesse global est déterminé. Cette relation est représentée sur le graphique de la Figure 7.2, en faisant bien la différence entre les stations puisque la rugosité n'est pas équivalente.

Sur ce graphique, il est possible de constater plusieurs choses :

- Le manque de différence de hauteur d'eau ne permet pas de trouver une relation claire pour ces stations. Il y a une légère tendance d'augmentation du coefficient α avec la hauteur d'eau pour la station de Limelette ou Suzeril. En revanche, pour la station de Noirhat ou celle de Rosières, cette relation semble rester constante.
- Pour la station de Rosières, les coefficients de vitesses sont plus élevés et globalement proches de 0.9. Cela s'explique par son lit argileux composé de sédiments très fins avec une rugosité moins importante que les autres stations. Cette valeur est comparable à celle du coefficient de vitesse d'un canal en béton, déterminée dans l'étude de Hauet et *al.* [27].

- Dans cette même étude, les rivières moins profondes avaient des coefficients de vitesses plus petits et environnant la valeur de 0.8. Cette tendance est également constatée avec deux stations à plus faible profondeur que les deux autres. Leur valeur globale est un peu plus faible que la valeur de 0.8 mais reste tout de même assez proche.

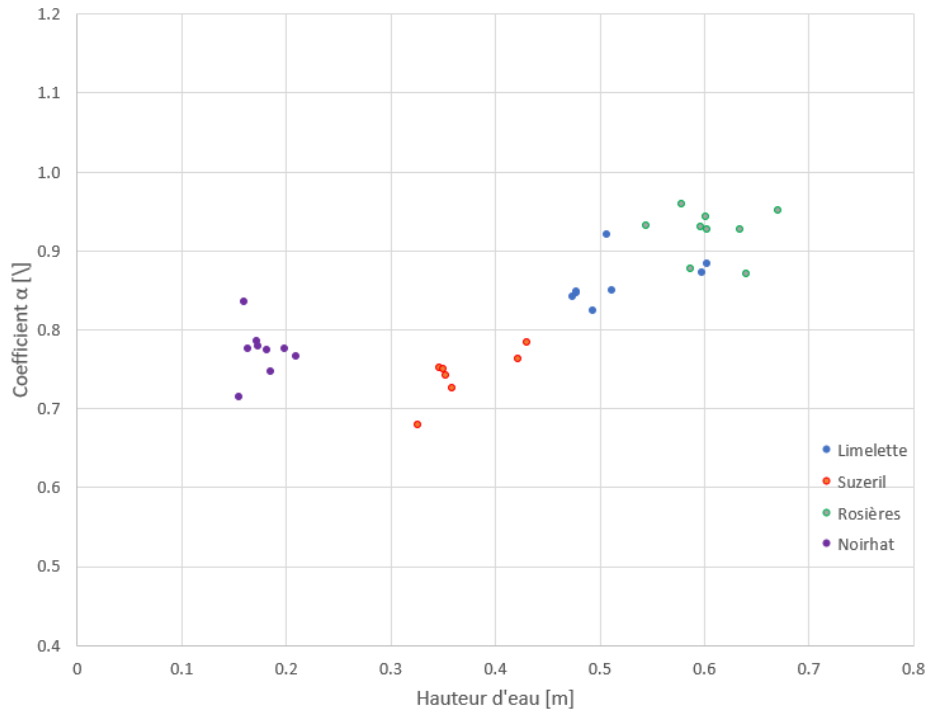


Figure 7.2 – Évolution du coefficient de vitesse α par station avec la hauteur d'eau.

Aucune relation nette ne peut donc être tirée de ce graphique par manque de données notamment et ce, pour toutes les stations. Sans une relation claire, il n'est pas possible d'obtenir un coefficient de vitesse α pour une hauteur d'eau mesurée.

Afin de pouvoir utiliser la méthode LSPIV pour déterminer des débits corrects, il est indispensable d'appliquer un coefficient acceptable aux vitesses de surface. Un coefficient moyen a donc été calculé pour chaque station (voir le tableau 7.1) puisque la hauteur d'eau ne varie pas significativement entre les différentes mesures.

Station	Coefficient α moyen [V]
Rosières	0.924
Limelette	0.861
Suzeril	0.742
Noirhat	0.773

Tableau 7.1 – Coefficient de vitesse moyen pour chaque station.

C'est ce coefficient qui sera appliqué dans la méthode totalement non-intrusive par LSPIV. Celui-ci est bien plus précis qu'un coefficient par défaut de 0.85.

Chapitre 8

Analyse LSPIV

1. Facteurs influençant l'analyse LSPIV

Différents facteurs influencent à la fois la qualité de la vidéo prise par le drone mais aussi la qualité de l'analyse qui est effectuée par la suite. Parmi ceux-ci, se trouvent les conditions climatiques, l'ensemencement, les paramètres de prise d'images, et l'aire de recherche et d'interrogation dans l'analyse LSPIV. Tous ces facteurs, sont détaillés dans la section, ci-après.

1.1. Conditions climatiques

Durant les différentes sessions de prise de mesures, 3 facteurs climatiques ont été repérés comme influençant les résultats de manière significative :

- Le vent
- La luminosité
- Les précipitations

Le vent

Trois soucis distincts sont constatés à cause du vent :

Premièrement, le drone aura plus de mal à garder sa position horizontale en cas de vent trop important. En principe, les logiciels utilisés pour l'analyse LSPIV arrivent à stabiliser correctement les images en se fiant aux berges qui sont des éléments fixes. En revanche, si les berges sont couvertes de végétation et en cas de vent trop important, cette végétation bougera également, ce qui fausse la stabilisation.

Le deuxième problème lié au vent est sa capacité de faire bouger le drone verticalement. Lors de la même séquence vidéo, il est alors possible que les images soient plus ou moins proches de l'eau. Durant les campagnes de mesures, cet effet est resté très faible mais est à garder en tête car les 2 logiciels utilisés gèrent assez mal la différence de zoom entre les différentes images qui composent la vidéo.

Enfin, le vent peut avoir pour effet de modifier la vitesse de l'eau en surface, en créant des vaguelettes. Comme l'analyse LSPIV fonctionne avec les vitesses de surface, lorsque ce phénomène se produit, il est impossible de réaliser une analyse LSPIV correcte.

La luminosité

Pour obtenir une vidéo avec une netteté suffisante, l'intensité de la lumière reçue par la caméra doit être gérée intelligemment. Pour cela, la caméra du drone peut être équipée de différents filtres sur son objectif. Dans le cas de cette étude, des filtres PolarPro ND4/ND8/ND16 [46] ont été montés. Ces filtres permettent de réduire les reflets, notamment sur l'eau, tout en améliorant la couleur et le contraste.



Figure 8.1 – À gauche sans filtre, à droite avec filtre ND4 [20].

Toute la difficulté réside dans le choix d'un bon filtre suivant la luminosité du moment. Les Figures 8.2 et 8.3 ci-dessous permettent d'illustrer les problèmes qu'il est possible de rencontrer.



Figure 8.2 – Station de Noirhat avec un filtre ND4 et un fort ensoleillement

Sur la Figure 8.2 le capteur est saturé ce qui empêche le logiciel LSPIV de discerner correctement les traceurs entre eux.

À l'inverse, il est possible, si un filtre ND8 ou ND16 est installé alors qu'il n'y a pas assez de lumière, que certaines zones, ne soient pratiquement plus visibles sur les images. Ce jeu de filtres est notamment très important dans le cas de station où les berges font de l'ombre sur le plan d'eau comme c'est le cas sur la Figure 8.3.



Figure 8.3 – Zones d'ombres présentes près des berges (Rosières).

Les précipitations

Avec le drone utilisé pour cette étude, il n'était pas possible de voler en cas de fortes pluies. Même si le drone le permettait, il ne serait pas conseillé de voler en cas de précipitations. D'une part, s'il pleut, les gouttes d'eau créent des ondes lorsqu'elles touchent le plan d'eau ce qui perturbe localement la vitesse de surface. D'autre part, s'il neige, les flocons peuvent être assimilés à des traceurs comme cela a été le cas lors de la campagne de mesure du 10 février 2021 illustrée sur la Figure 8.4.



Figure 8.4 – Chute de neige perturbant l'analyse LSPIV (Limelette).

1.2. L'ensemencement

Concernant l'ensemencement, deux grands facteurs influencent de manière significative les résultats de l'analyse LSPIV.

- La nécessité d'un ensemencement
- La distribution homogène des traceurs.

La nécessité d'un ensemencement

L'ensemencement, dans certains cas, est primordial pour calculer les vitesses de surface. Comme le montre la courbe grise sur la Figure 8.5. Sans ensemencement, les résultats sont très peu concluants.

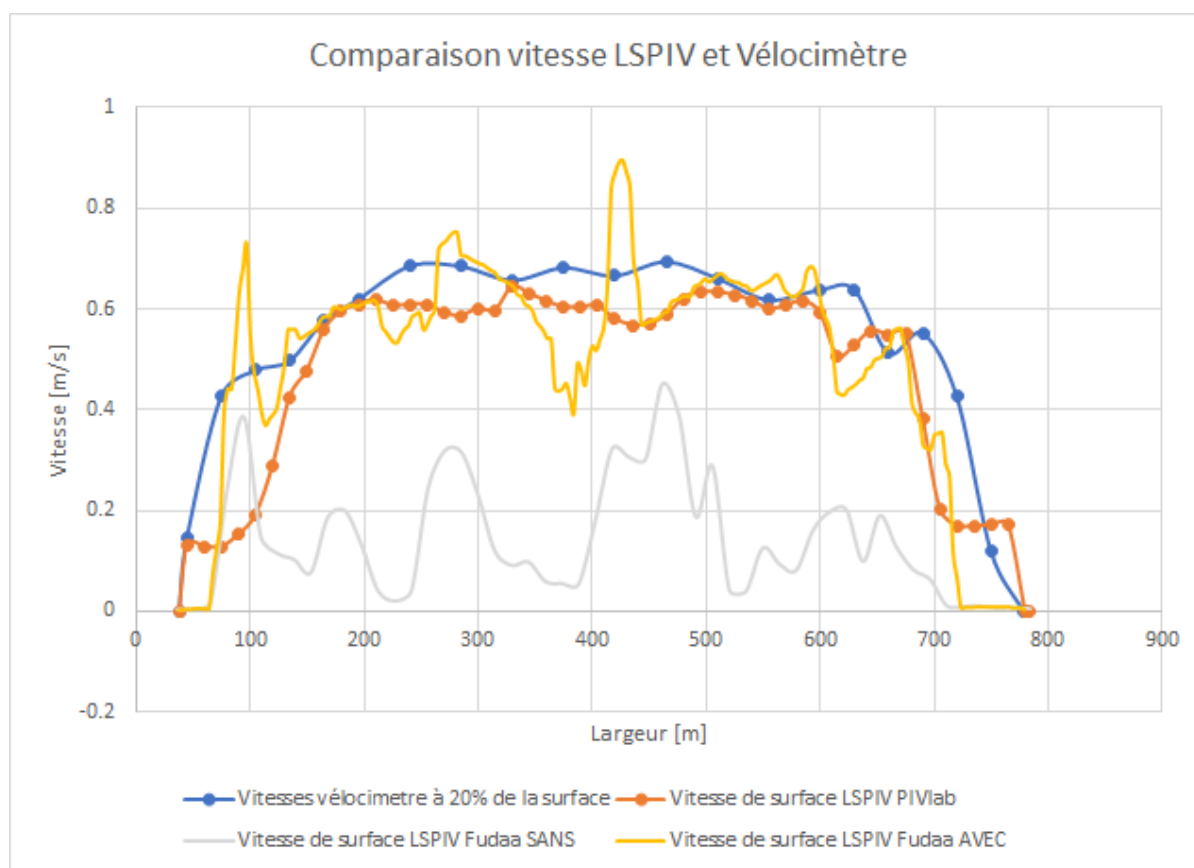


Figure 8.5 – Profil de vitesse pour la station de Limelette le 27 avril 2021.

Pour certaines rivières, il peut s'avérer compliqué de déterminer si l'analyse LSPIV nécessitera un ensemencement, au moment de prendre la vidéo.

Pour les stations de Noirhat ou de Suzeril, au regard des nombreuses formes de surface qu'illustrent la Figure 8.6, il est assez évident qu'il est possible de se passer de traceurs et d'obtenir des résultats corrects (voir Figure 8.7).



Figure 8.6 – Formes de surface pour la station de Noirhat le 15 avril 2021.

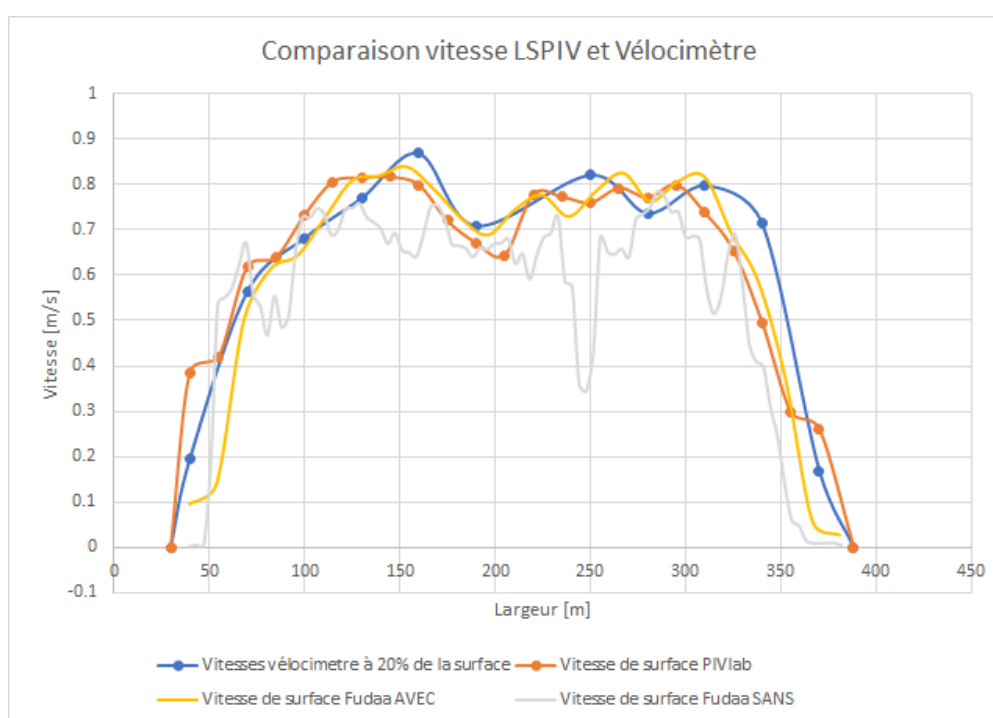
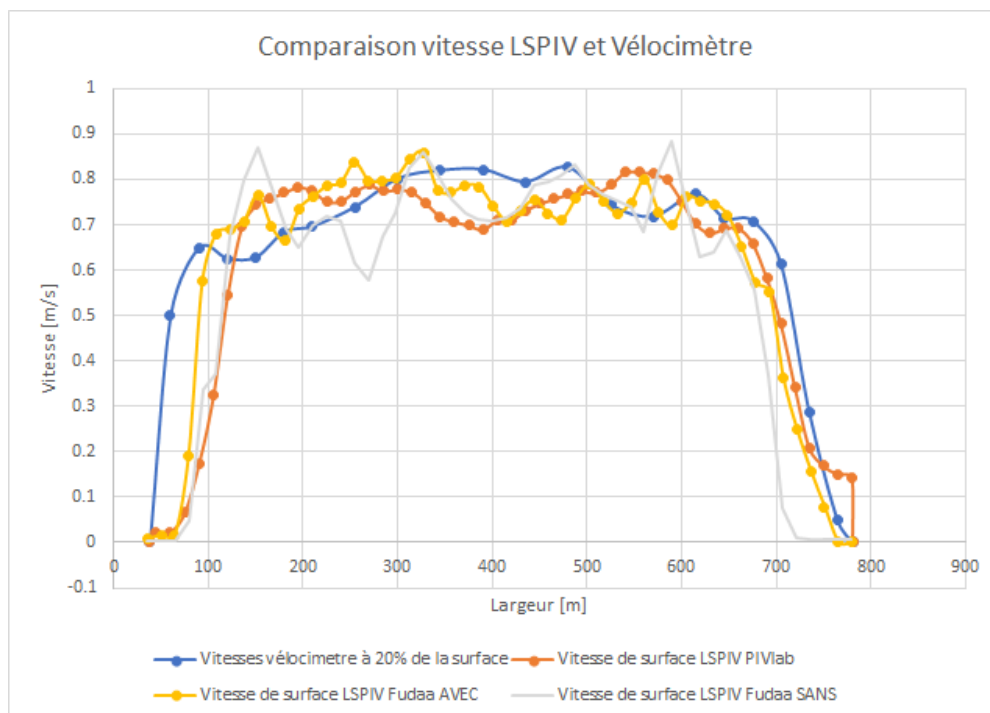


Figure 8.7 – Profil de vitesse pour la station de Noirhat le 15 avril 2021.

En revanche, dans le cas des stations de Rosières et de Limelette, il n'est pas certain que l'analyse LSPIV fonctionnera sans traceur.

L'exemple de la Figure 8.8 montre de bons résultats pour une analyse sans traceur de la station de Limelette. Or, la Figure 8.5 illustre le contraire.



La distribution de l'ensemencement

Lorsque l'ensemencement est indispensable, il est bien souvent compliqué de répartir celui-ci uniformément sur toute la largeur de la rivière. Si la section étudiée se trouve dans un méandre, les copeaux auront tendance à se déporter vers l'extérieur du méandre, comme c'est le cas pour la station de Rosières (voir Figure 8.9).



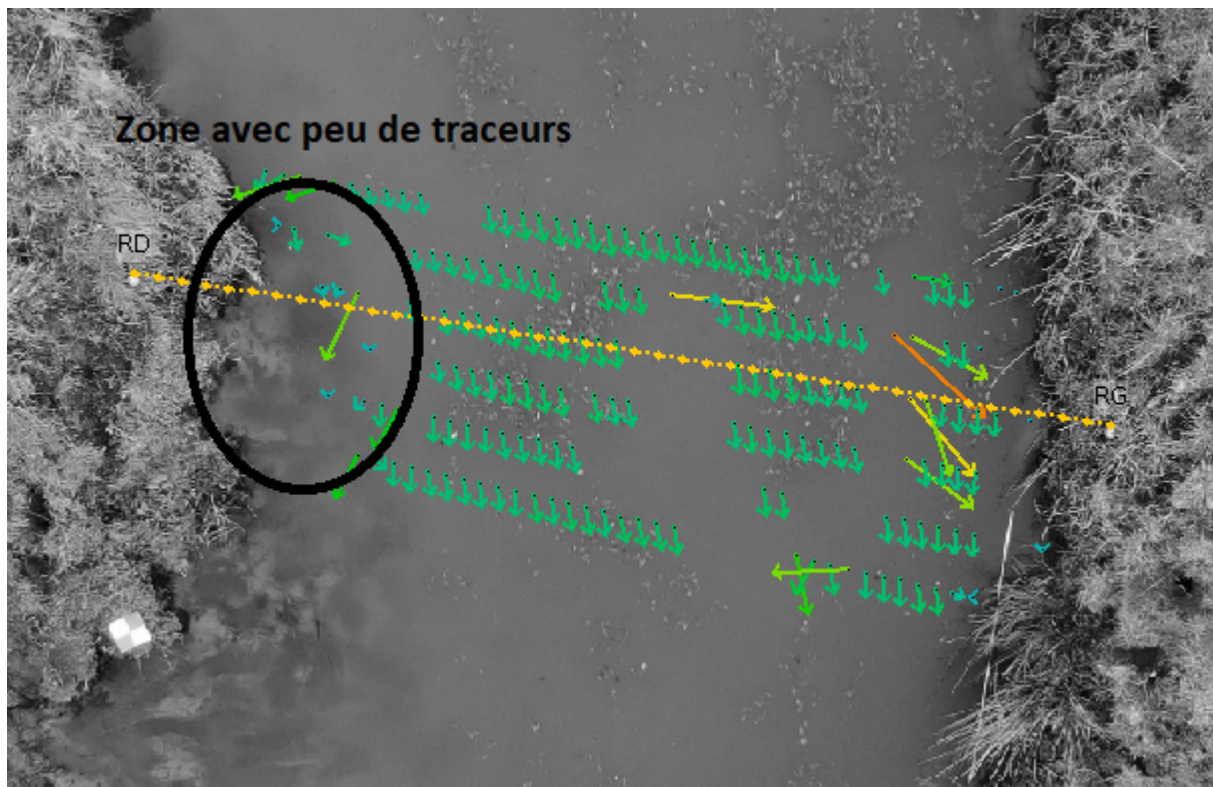


Figure 8.10 – Analyse LSPIV d’une mauvaise dispersion des traceurs sur *Fudaa-LSPIV* le 16 février 2021 (Rosières).

Dans l’analyse LSPIV, la partie de la vidéo reprenant la Figure 8.9 n’a pas été considérée car une trop grande zone de la section ne comportait pas de traceur. La Figure 8.10 tirée de l’analyse du logiciel *Fudaa-LSPIV* illustre la distribution des copeaux quelques secondes avant la Figure 8.9. La zone sans copeau est certes moins importante mais elle montre que les vecteurs vitesses dans cette zone sont erronés.

1.3. Paramètres de prise d’images

De nombreux paramètres liés directement à la caméra embarquée ou à la manière de filmer peuvent influencer les résultats. Outre la résolution même de la vidéo ou des images, deux autres paramètres peuvent aussi influencer l’analyse LSPIV :

- Le positionnement de la caméra
- L’effet "fisheye"

Le positionnement de la caméra

Le positionnement de la caméra ne va pas impacter directement les résultats, mais plutôt la façon de les obtenir.

Si le point de vue de la caméra n’est pas perpendiculaire au plan d’eau alors il sera nécessaire de réaliser une orthorectification afin d’effectuer une correction géométrique des images pour simuler un point de vue vertical à ce plan d’eau.

L'orthorectification nécessite un caractère intrusif dû à la pose de balise GRP. De ce fait il serait intéressant de pouvoir s'en passer. En théorie, si la caméra du drone est perpendiculaire au plan d'eau, il n'y a pas besoin d'orthorectification comme l'illustre la Figure 8.11. Néanmoins, il faut tout de même connaître la dimension d'un quelconque objet, proche de la surface de l'eau.

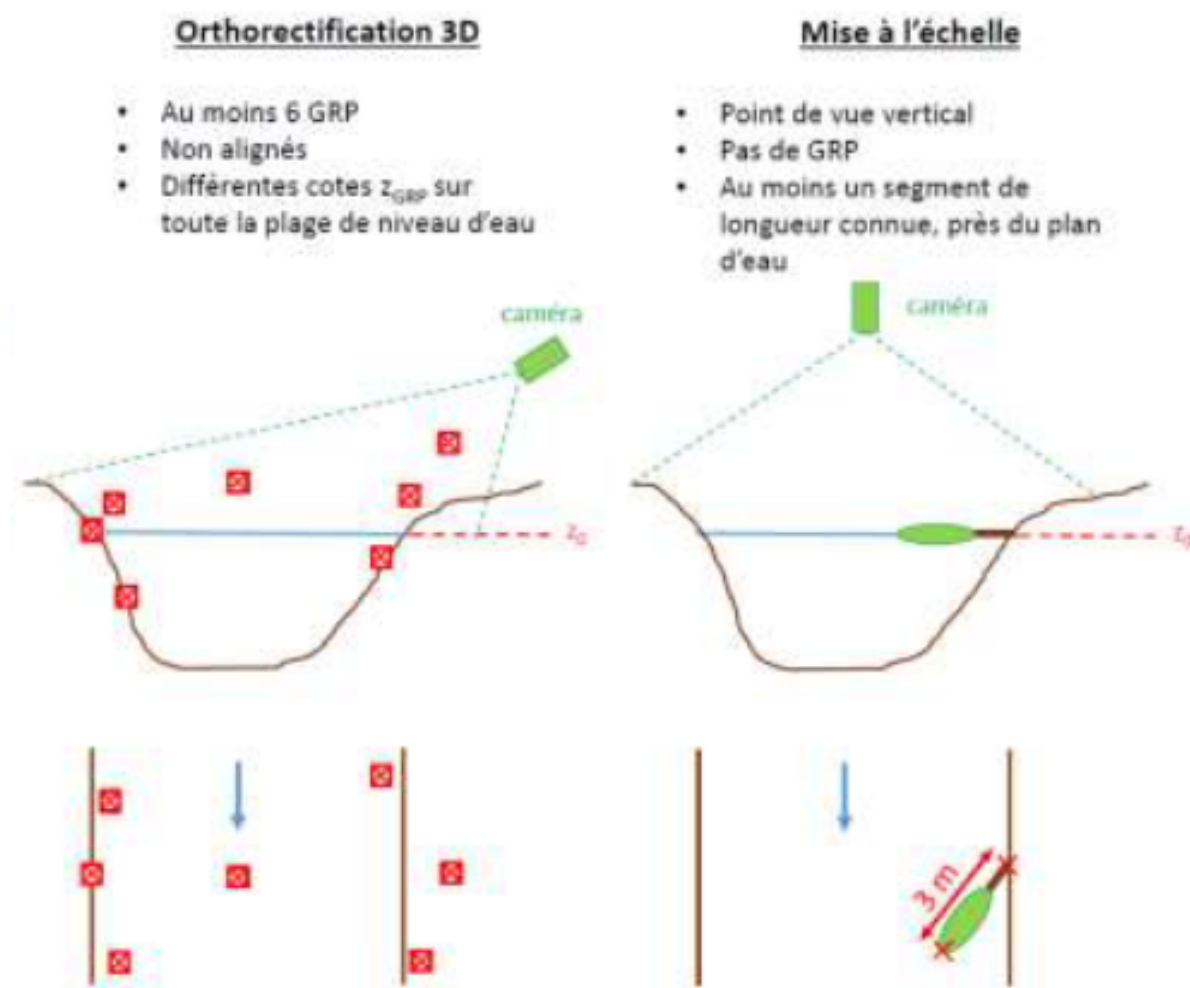


Figure 8.11 – Orthorectification 3D vs Mise à l'échelle [33].

Durant les différentes campagnes de mesures, l'orthorectification n'a pas été considérée comme nécessaire sachant que l'objectif de la caméra était perpendiculaire à la rivière. Pour vérifier cette hypothèse, une étude expérimentale a été menée pour savoir si l'orthorectification était nécessaire, ou bien si une simple mise à l'échelle suffisait.

Pour cela, les positions des six balises GRP's ont été géoréférencées grâce à une station LEICA GPS1200. Lors de l'analyse LSPIV sur *Fudaa-LSPIV*, une mise à l'échelle a été effectuée. Une comparaison a ensuite été réalisée entre la distance qui sépare les différentes bornes à la suite de la mise à l'échelle, et la distance réelle calculée grâce au géoréférencement.

De cette façon, 5 distances ont été mesurées. Entre les bornes 1 et 2, 2 et 3, et ainsi de suite jusqu'à la distance entre la borne 5 et la borne 6 (voir Figure 8.12).

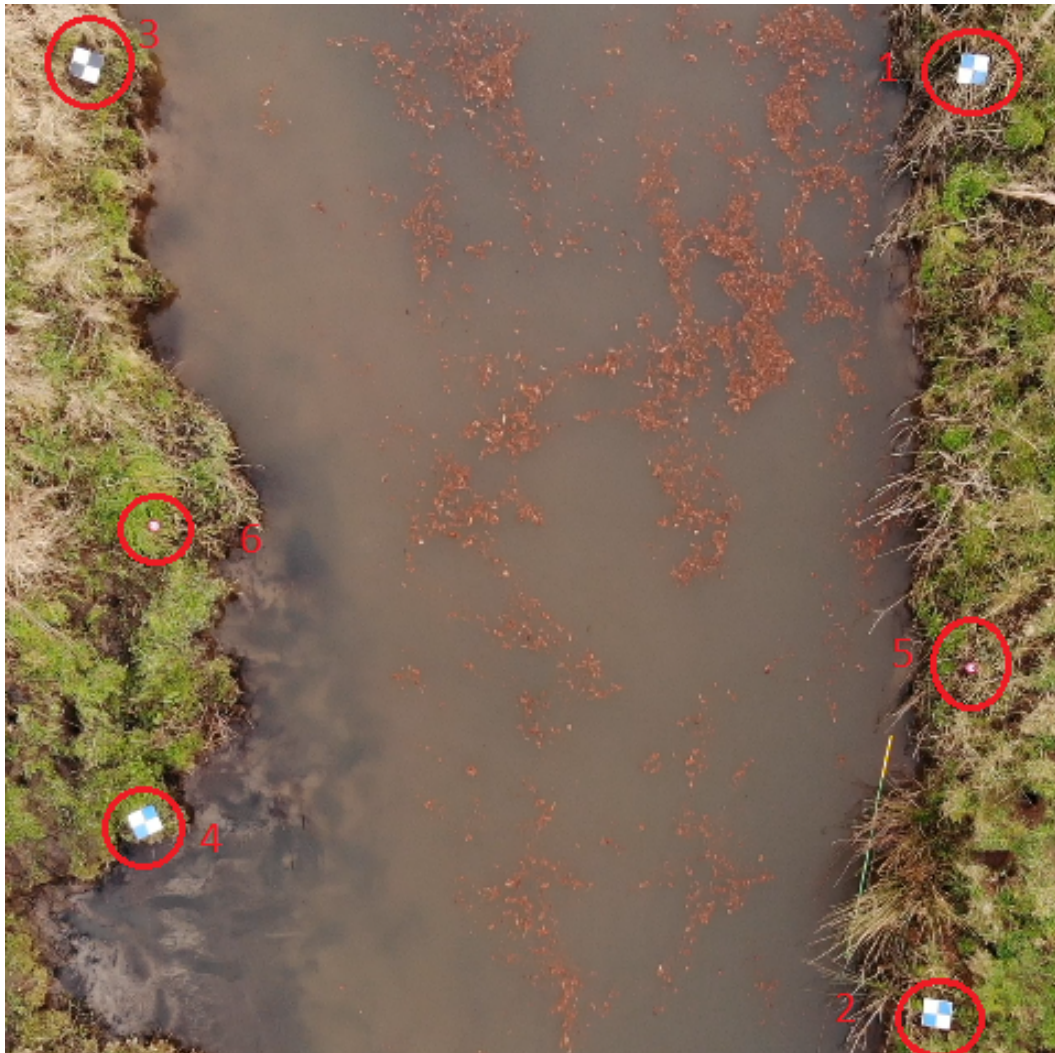


Figure 8.12 – Illustration du positionnement des 6 bornes GRP's. Les plots rose dans ce cas font office de GRP's également.

L'erreur a été mesurée en utilisant le rapport entre la distance réelle sur la distance obtenue avec une mise à l'échelle :

$$Erreur = \frac{\text{Distance réelle [m]}}{\text{Distance mise à l'échelle [m]}} \quad (8.1)$$

Cette expérience a été réalisée à deux dates différentes pour la station de Rosières. Les résultats sont présentés sur le graphe de la Figure 8.13.

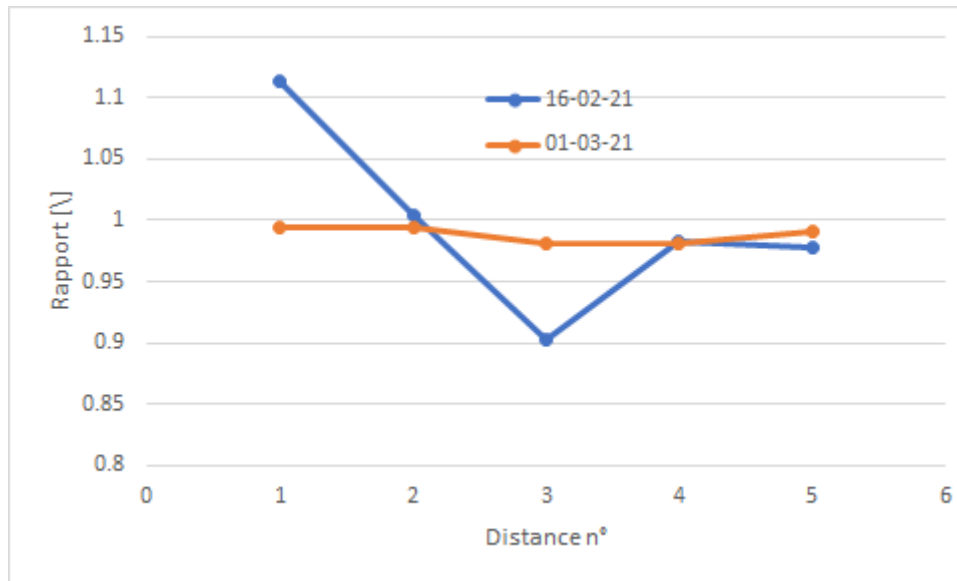


Figure 8.13 – Rapport des distances pour la station de Rosières.

Bien que les résultats soient un peu moins bons le 16 février 2021, le rapport reste en général très proche de 1 pour les deux dates. Réaliser une simple mise à l'échelle plutôt qu'une orthorectification complète n'aura donc pas d'impact sur la qualité des résultats finaux.

L'effet "fisheye"

Un autre effet de distorsion d'images est le "fisheye". Cela a pour conséquence "d'arrondir" l'image lorsque la longueur focale est faible et le FOV est grand (voir Figure 8.14). Lorsque cet effet est recherché, l'objectif utilisé a une longueur focale de minimum 10[mm] et un FOV d'au moins 160[°].

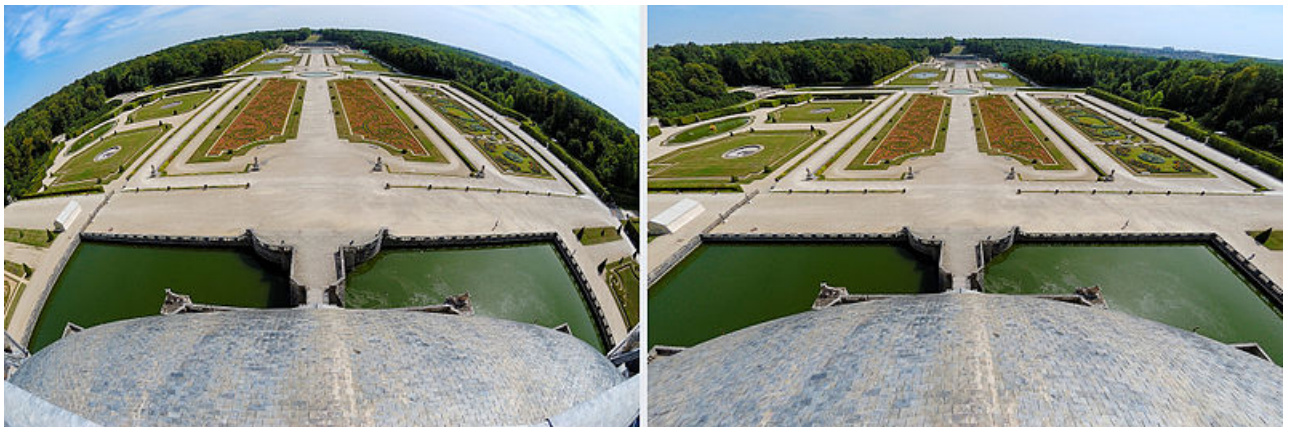


Figure 8.14 – Avec l'effet fisheye à gauche et avec correction de cet effet à droite. Photo prise avec un fisheye Nikon DX 2,8/10,5 mm et correction par Paint Shop Pro [34].

Le drone DJI MAVIC AIR utilisé a un FOV de 85[°] et une longueur focale de 24[mm]. Comme l'ont montré BIA T. et SOMERS H. [25], l'objectif utilisé sur le drone DJI MAVIC AIR ne crée pas d'effet "fisheye" notable. Si toutefois l'utilisateur choisit un objectif créant une grande distorsion, il sera nécessaire de passer par un logiciel qui élimine cet effet.

1.4. Aire de recherche et aire d'interrogation

L'aire de recherche et d'interrogation sont des paramètres qu'il est difficile d'établir. Afin que les résultats de vitesses soient les plus précis possible, une étude a été menée pour savoir comment trouver une aire d'interrogation optimale. L'aire de recherche a, quant à elle, été considérée comme valant deux fois l'aire d'interrogation.

Cette étude se base sur l'idée que si l'aire d'interrogation est trop importante, cela conduit à une perte de précision et si l'aire d'interrogation est trop faible, cela conduit plutôt à une perte d'information. Dans les deux cas, le débit déterminé sera plus faible qu'en réalité.

Une méthode a été développée pour les quatre stations traitées dans ce mémoire avec le logiciel *Fudaa-LSPIV*. Les résultats présentés ci-dessous sont valables uniquement pour une vidéo avec un nombre d'image par seconde (fps) de 25. Le principe reste évidemment le même quel que soit le fps choisi.

En tout, trois paramètres sont modifiés afin d'obtenir les meilleurs résultats possibles :

1. L'aire d'interrogation
2. L'aire de recherche directement liée à l'aire d'interrogation
3. Le nombre d'images gardées après le séquençage de la vidéo.

L'aire de recherche et d'interrogation sont à modifier lors de l'étape 4 du logiciel *Fudaa-LSPIV*, illustrée sur la Figure 8.15 et présentée en détails dans l'annexe A.2..

Figure 8.15 – Aire d'interrogation et aire de recherche.

Le nombre d'images gardées après séquençage comme présenté sur la Figure 8.16 correspond à l'étape 1 détaillée dans l'annexe A.2. également.

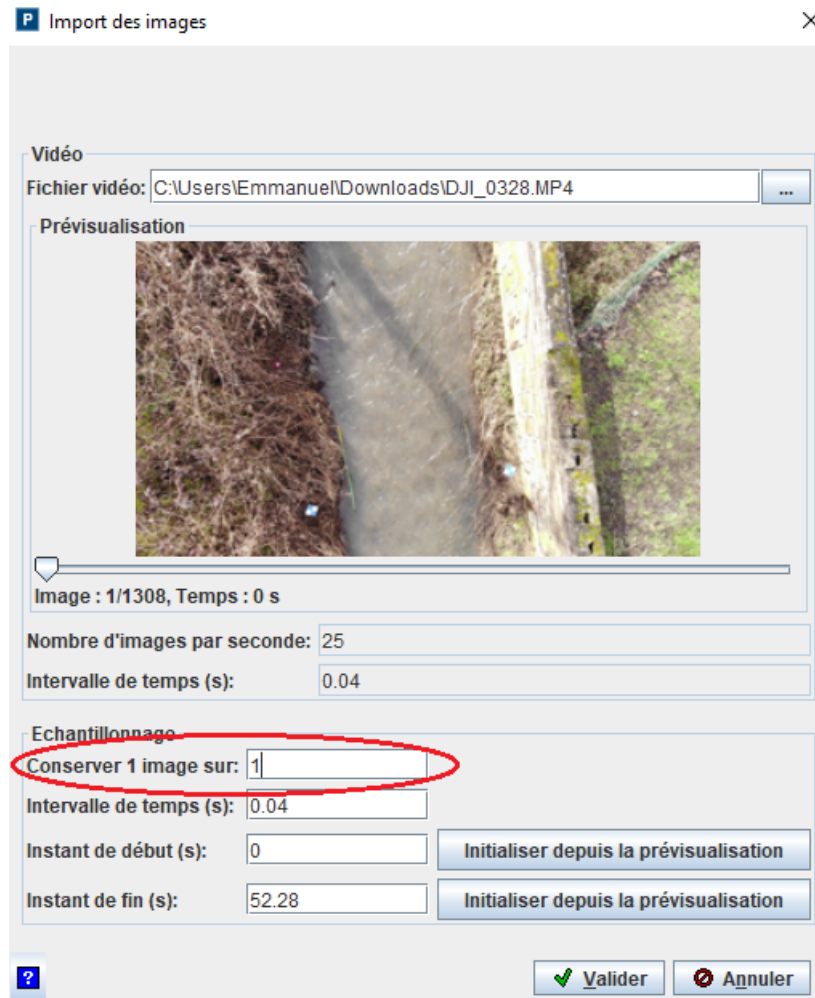


Figure 8.16 – Le nombre d’images gardées après séquençage de la vidéo.

La méthode s’articule de cette façon :

1. Une image sur une est sélectionnée (voir Figure 8.16).
2. L’aire d’interrogation vaut 20 pixels (voir Figure 8.15).
3. Lancement de l’analyse LSPIV complète jusqu’à obtenir le débit.
4. Les étapes 2 et 3 sont reproduites avec une aire d’interrogation de 24 pixels et de 12 pixels. Si cela aboutit à des débits plus importants qu’avec une aire d’interrogation de 20 pixels, c’est que le nombre d’images sélectionné à l’étape 1 est correct. Si ce n’est pas le cas alors le paramètre de l’étape 1 est changé en sélectionnant une image sur deux, puis une sur trois et ainsi de suite jusqu’à ce que l’étape 4 soit validée.
5. Une fois validée, l’aire d’interrogation est affinée afin de trouver celle qui permet d’obtenir le débit le plus important. Ce dernier débit sera le débit retenu pour le résultat final.

Le Tableau 8.1 illustre l’application de cette méthode pour la station de Limelette.

Nombre d'images sélectionnées	Ensemencement	Aire d'interrogation [px]	Débit [m^3/s]
Une sur deux	Non	30	/
Une sur deux	Non	26	/
Une sur deux	Non	24	1.254
Une sur deux	Non	20	1.414
Une sur deux	Non	18	1.411
Une sur deux	Non	16	1.359
Une sur deux	Oui	30	/
Une sur deux	Oui	26	/
Une sur deux	Oui	24	1.451
Une sur deux	Oui	20	1.492
Une sur deux	Oui	18	1.535
Une sur deux	Oui	16	1.507
Une sur deux	Oui	14	1.467

Tableau 8.1 – Aire d'interrogation pour la station de Limelette le 15 avril 2021.

Au vu des autres résultats qui ont été obtenus pour deux autres stations de mesure, le nombre d'images à sélectionner dépend de la vitesse de l'eau en surface comme le montre le Tableau 8.2.

Nombre d'images sélectionnées	Station	Ensemencement	Vitesse moyenne [m/s]
Une sur deux	Limelette	Oui	0.56
Une sur deux	Limelette	Non	0.56
Une sur quatre	Rosières	Oui	0.29
Une sur quatre	Rosières	Non	0.29
Une sur deux	Noirhat	Oui	0.64
Une sur deux	Noirhat	Non	0.64

Tableau 8.2 – Nombre d'images à sélectionner pour la campagne du 15 avril 2021.

2. Résultats de vitesses

Cette section présente les données des vitesses de surface obtenues grâce *Fudaa LSPIV* et *PIVlab*.

2.1. Hypothèses

Les valeurs de références utilisées dans ce travail sont normalement les relevés de la région wallonne disponibles sur le site Aqualim. Toutefois, les données de vitesses de surface sur la totalité de la largeur de la rivière ne sont pas disponibles sur ce site. Il a donc fallu faire quelques hypothèses afin de pouvoir comparer ces vitesses.

- Les vitesses de références sont celles prises par le vélocimètre.
- La vitesse de surface équivaut à la vitesse à 20% de la hauteur d'eau à partir de la surface.

La première hypothèse peut-être vérifiée en comparant les débits obtenus à l'aide du vélocimètre et les débits de la région wallonne. Si les débits sont identiques, les vitesses relevées à l'aide du vélocimètre sont considérées comme correctes.

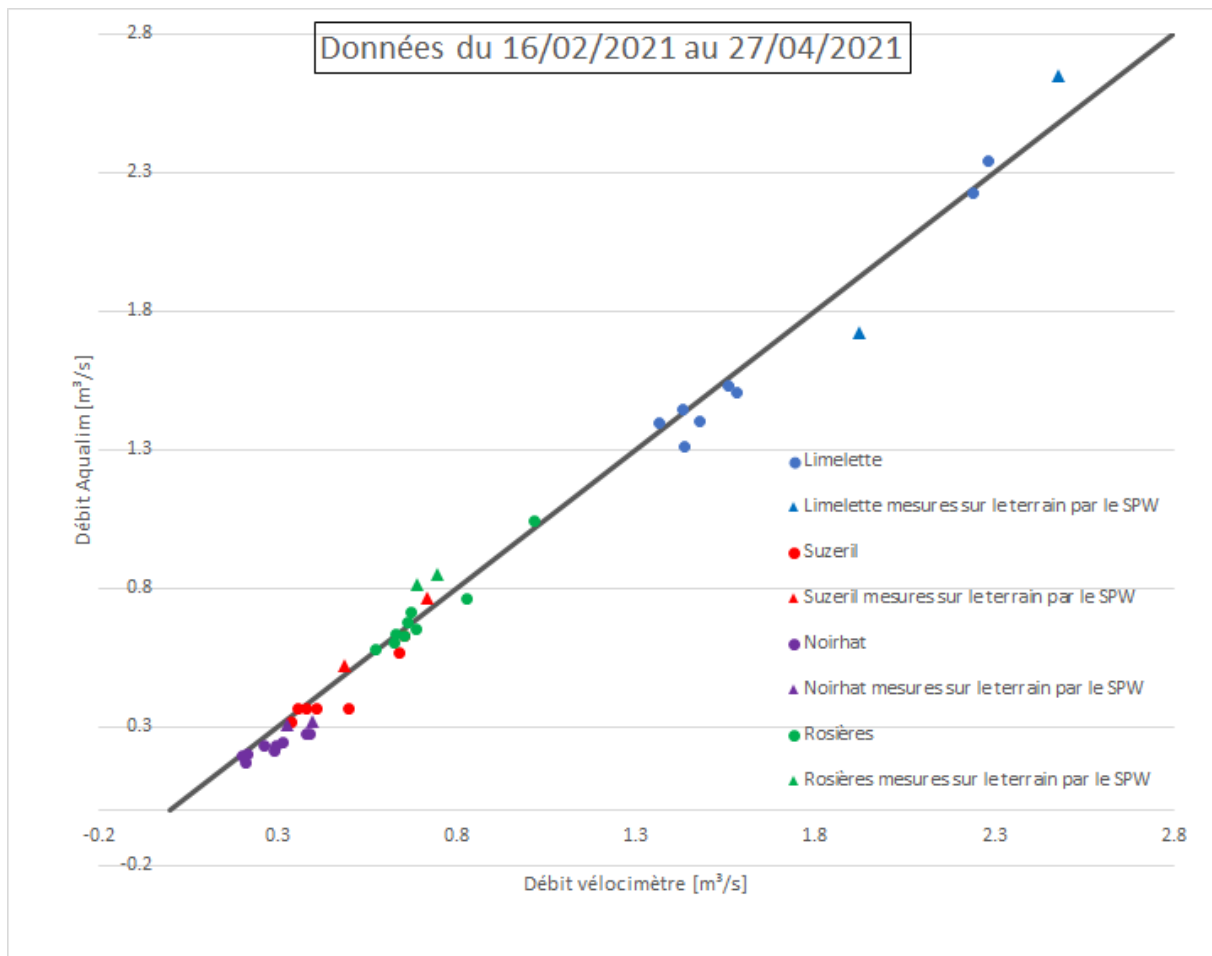


Figure 8.17 – Comparaison entre le débit du site Aqualim et le débit obtenu à l'aide du vélocimètre.

La Figure 8.17 confirme la première hypothèse, puisque globalement, les débits sont identiques aux débits d'Aqualim. Mais certains résultats, comme ceux de la station de Noirhat, ne sont pas très concluants.

Pour y voir plus clair, le Service Public de Wallonie nous a fournis les données de deux campagnes de mesures pour chaque station, réalisées le 20 janvier et le 15 février 2021. Un écart de 5 à 10% par rapport au débit d'Aqualim est parfois constaté. Pour Noirhat, ces données supplémentaires permettent de conclure que les débits d'Aqualim y sont légèrement sous-estimés et valident donc celles récoltées par vélocimètre. En revanche, pour les autres stations, ces deux campagnes n'ont pas pu apporter grand chose, mis à part à Suzeril où les débits Aqualim sont tout à fait justes.

La deuxième hypothèse vient du matériel mis à disposition pour cette étude qui ne permettait pas une mesure des vitesses en surface assez précise. Comme expliqué au Point 3.1. du chapitre 4, le profil de vitesse à la surface n'est que très légèrement inférieur à celui à 20% de la hauteur d'eau à partir de la surface. Le phénomène appelé "*dip phenomenon*" également introduit au Point 3.1., montre même que la vitesse maximale du profil de

vitesse n'est pas égale à la vitesse de surface dans certains cas. La combinaison de ces deux phénomènes permet donc de poser cette deuxième hypothèse.

2.2. Analyses

Afin de comparer la précision des résultats des logiciels *PIVlab* et *Fudaa-LSPIV*, l'indicateur d'écart statistique "Root Mean Square Error" (RMSE) a été utilisé.

$$RMSE[m/s] = \sqrt{\sum_{i=1}^n (X_{Véloci,i} - X_{Logiciel,i})^2} \quad (8.2)$$

avec :

- n , le nombre de points pour lesquels la vitesse a été prise;
- $X_{Véloci,i}$, la vitesse à 20% de la hauteur d'eau, à partir de la surface, prise à l'aide du vélocimètre ;
- $X_{Logiciel,i}$, la vitesse de surface calculée à l'aide d'un des deux logiciels.

Pour comparer le RMSE des différentes stations, cet indicateur a été adimensionnalisé

$$RMSEA[/] = \frac{RMSE}{\bar{v}} \quad (8.3)$$

avec :

- $\bar{v}$, la vitesse moyenne relevée à l'aide du vélocimètre pour la date et la station considérée.

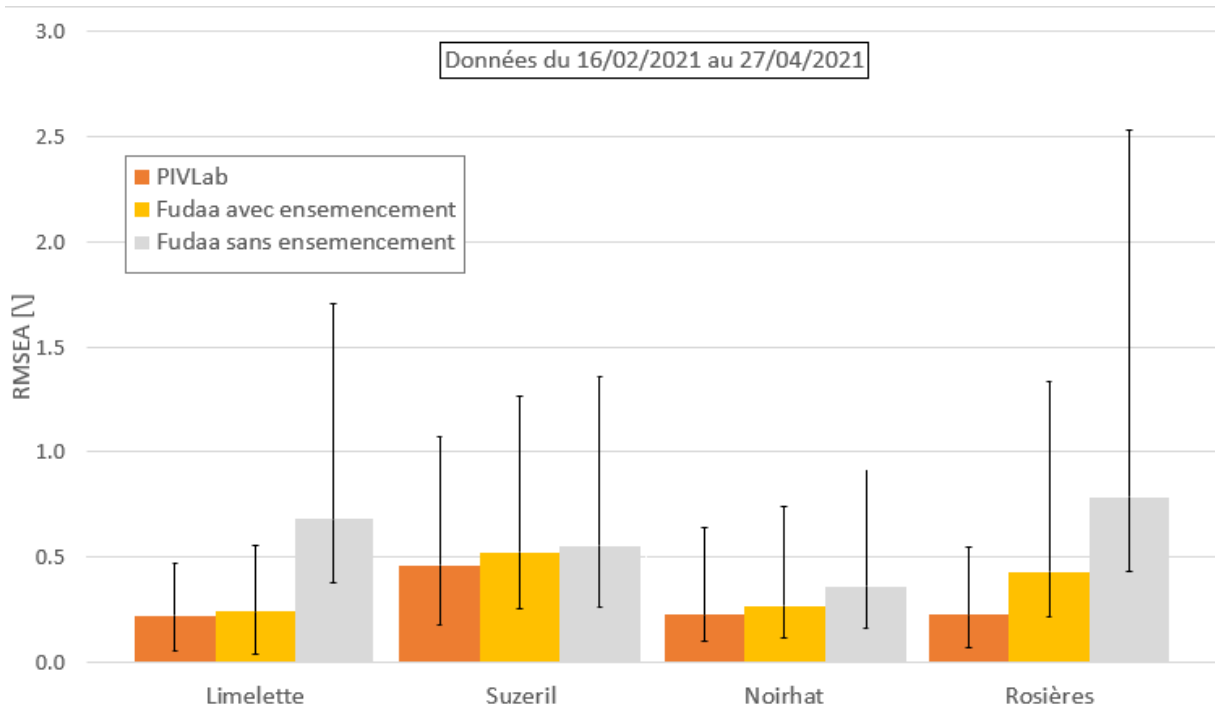


Figure 8.18 – Valeurs moyennes et valeurs extrêmes du RMSEA pour chaque station.

Différentes observations peuvent être faites du graphe de la Figure 8.18.

- Les résultats sont moins bons lorsqu'il n'y a pas d'ensemencement. Toutefois cette différence est moins flagrante dans le cas des stations de Suzeril et de Noirhat. Cela peut s'expliquer par le fait que ces deux rivières présentent des remous et de nombreuses formes de surface qui peuvent servir à l'analyse LSPIV.
- La station de Suzeril a le RMSEA (Root Mean Square Error Adimensionnée) le plus élevé lorsqu'il s'agit d'une analyse avec ensemencement. Cela peut-être dû à différents facteurs. La section étudiée se trouve dans un méandre important, ce qui empêche une distribution uniforme des copeaux sur toute la largeur; les vidéos étaient de moins bonne qualité car le drone avait du mal à se stabiliser correctement du à la présence de branches d'arbre proches; pour certaines dates, des rochers émergeaient de l'eau à l'endroit de la section étudiée ce qui compliquait les relevés avec le vélocimètre.
- Le logiciel *Fudaa-LSPIV* présente de moins bons résultats que le logiciel *PIVlab* aussi bien au niveau des valeurs extrêmes que des moyennes.

Une autre analyse intéressante à réaliser est de voir comment la précision des résultats a évolué au cours du temps. Le graphe de la Figure 8.19 reprend à la fois les données d'ASSELBERGS et PEETERS et celles de ce travail.

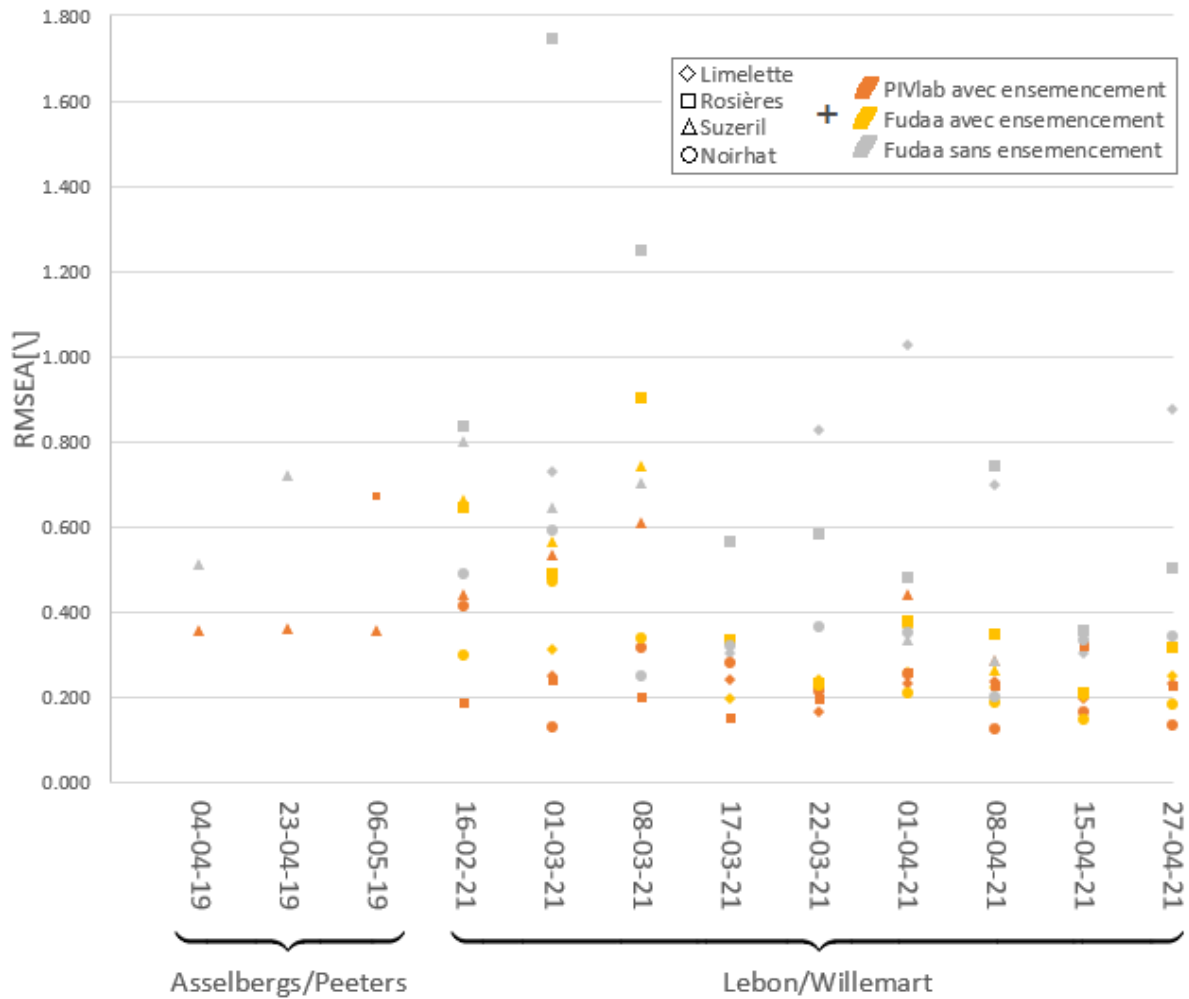


Figure 8.19 – Valeur du RMSEA de chaque campagne de mesures pour les 4 stations étudiées.

- Entre le 16/02/2021 et le 27/04/2021, le RMSEA tend à diminuer aussi bien avec et sans ensemencement. Cela peut s'expliquer de différentes manières. L'expérience des utilisateurs permet d'augmenter la précision; à partir du 17/03/2021 des copeaux avec un plus fort contraste sont utilisés; la méthode permettant d'affiner l'aire d'interrogation est mise en place pour *Fudaa-LSPIV* à partir du 08/04/2021.
- Le RMSEA des données d'Asselbergs et Peeters sont du même ordre que le RMSEA des données du 16/02/201 au 08/03/2021.
- Pour certaines dates le RMSEA avec et sans ensemencement est extrêmement différent. Ces dates correspondent à des prises de vidéos qui ont été effectuées avec une très forte luminosité.

2.3. Conclusion

Au vu des différents résultats obtenus, quelques recommandations peuvent être faites :

- Il faut veiller à bien choisir la section étudiée avec, si possible, des remous et des formes de surface.

- Éviter les méandres.
- Si les traceurs sont indispensables, privilégier des copeaux de bois clair.
- Réaliser une ou deux campagnes de mesures tests afin de se familiariser avec la méthode et la matériel.
- Privilégier les prises de vidéos lorsque le ciel est voilé ou très nuageux, pour une analyse sans traceur.
- Ne pas lésiner sur la qualité du drone et la caméra embarquée.
- S'assurer que le drone se trouve à bonne distance de tout obstacle lorsqu'il prend la vidéo.

3. Résultats de débits

Le logiciel *Fudaa-LSPIV* permet de trouver directement le débit. *PIVlab*, quant à lui, ne sort que les vitesses. La "Mid Section method" présentée au point 1.2. est alors utilisée pour obtenir le débit.

3.1. Résultats hybrides

Le calcul de débit pour cette section est effectué grâce à la hauteur d'eau relevée à la main et non pas à l'aide de méthodes non-intrusives. C'est pour cette raison que les débits sont présentés comme étant hybrides.

Contrairement à l'analyse des vitesses, les débits peuvent être directement comparés aux données d'Aqualim. Ceux-ci sont représentés sur le graphique de la Figure 8.20 ci-dessous, en fonction des débits Aqualim correspondants :

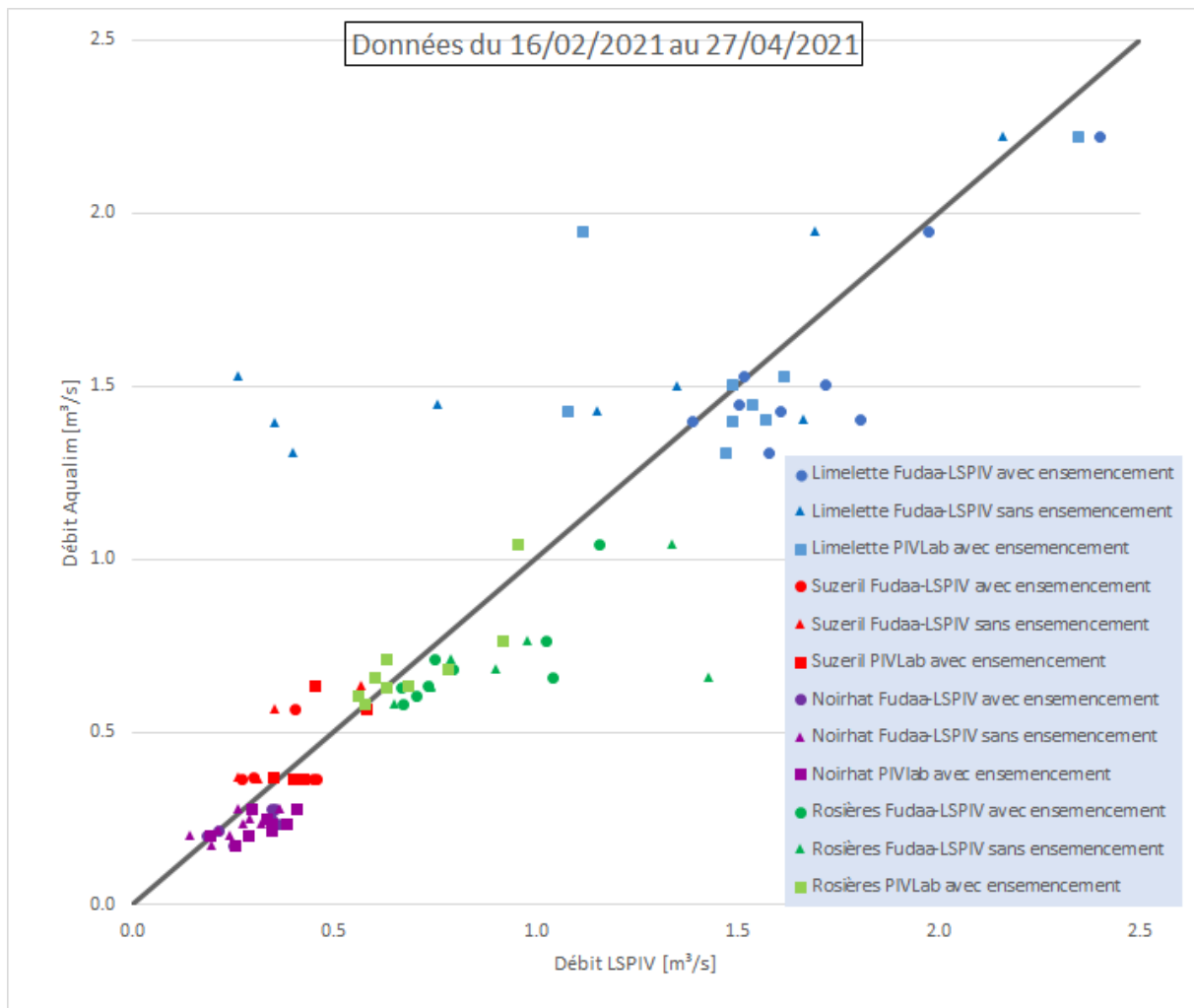


Figure 8.20 – Comparaison entre le débit du site Aqualim et le débit obtenu à l'aide de la LSPIV avec un coefficient $\alpha=1$.

De manière générale, les débits LSPIV de la Figure 8.20 sont surestimés (débits situés en-dessous de la droite). Sans un coefficient α adéquat n'étant pas égal à 1, la valeur exacte des débits ne sera que très rarement trouvée.

Pour rappel, ce coefficient se situe en théorie entre 0.8 et 0.9 et dépend fortement de la hauteur d'eau et de la rugosité du lit. Il est donc différent pour chaque station.

Afin de mieux visualiser l'importance du coefficient de vitesse α sur la détermination du débit, un second graphique a été tracé sur la Figure 8.21. Sur celui-ci, le coefficient α a été calculé pour chaque station et à chaque prise de mesures. Ce coefficient a ensuite été multiplié par le débit, étant donné qu'il est considéré identique sur toute la section, et donc pour chaque vitesse de surface mesurée. En théorie, ce graphe doit donner de meilleurs résultats que le graphe de la Figure 8.20, ce qui est bien le cas pour les stations de Noirhat et Rosières.

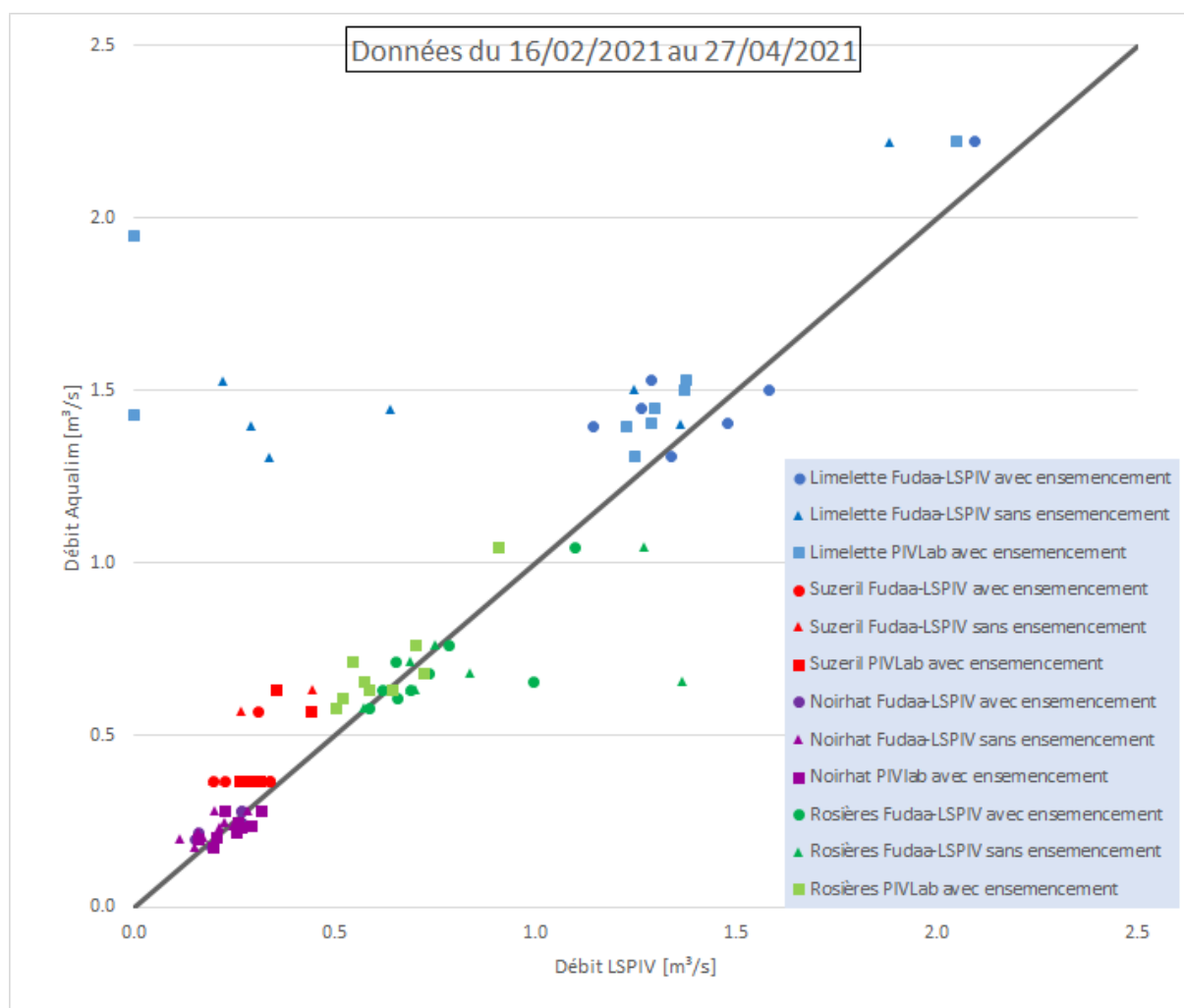


Figure 8.21 – Comparaison entre le débit du site Aqualim et le débit obtenu à l’aide de la LSPIV avec un coefficient α calculé avec le vélocimètre.

Pour avoir une idée plus précise des erreurs entre les débits trouvés et la valeur mesurée par Aqualim, les Tableaux 8.3 et 8.4 présentent la moyenne de ces erreurs pour chaque station. Les erreurs sont définies de la façon suivante :

$$Erreur = \left| 1 - \frac{Q_{LSPIV}}{Q_{Aqualim}} \right| * 100[\%] \quad (8.4)$$

Une moyenne de ces erreurs est ensuite calculée.

Station	Erreur moyenne [%] avec ensemencement PIVLab	Erreur moyenne [%] avec ensemencement Fudaa-LSPIV	Erreur moyenne [%] sans ensemencement Fudaa-LSPIV
Limelette	6.9	11	40.9
Suzeril	12.3	24.2	21.4
Noirhat	38	31.2	18.6
Rosières	9	19.4	32.8

Tableau 8.3 – Erreurs sur le calcul des débits en rivière de manière hybride avec un coefficient $\alpha=1$.

Station	Erreur moyenne [%] avec ensemencement PIVLab	Erreur moyenne [%] avec ensemencement Fudaa-LSPIV	Erreur moyenne [%] sans ensemencement Fudaa-LSPIV
Limelette	6.4	9.3	42.3
Suzeril	24.4	29.2	32.2
Noirhat	14.2	12.3	16.8
Rosières	11.1	10.6	22.2

Tableau 8.4 – Erreurs sur le calcul des débits en rivière de manière hybride avec un coefficient α déterminé avec le vélocimètre.

Ces 2 graphes et ces 2 tableaux permettent de se rendre compte de plusieurs choses :

- Les débits de Noirhat et de Rosières présentent une moins grande erreur lorsque les coefficients α adéquats sont utilisés. Ceci signifie que la mesure du coefficient pour ces deux rivières fonctionne bien.
- Dans le cas de la station de Suzeril, les valeurs du débit sans le coefficient sont majoritairement meilleures qu'avec. Les vitesses pour cette station sont bien souvent sous-estimées. Si un coefficient α , inférieur à 1, est multiplié à ces vitesses, l'erreur sera donc encore plus grande. De plus, la station de Suzeril présentait des difficultés pour un relevé de vitesse à l'aide du vélocimètre, ce qui peut conduire à une mauvaise évaluation de ce coefficient de vitesse α .
- Comme pour le calcul des vitesses, les données qui présentent les plus grandes erreurs sont celles obtenues sans ensemencement.
- Le débit pour la station de Limelette est majoritairement surestimé avec un coefficient α égal à 1 (voir Figure 8.20) et est sous-estimé pour un coefficient α calculé à l'aide du vélocimètre (voir Figure 8.21).

Les RMSEA pour la station de Limelette (voir Figure 8.18) sont les meilleures des quatre stations (pour les cas avec ensemencement). Si les coefficients α calculés avaient été corrects, la station de Limelette aurait donc dû présenter également les meilleurs résultats pour le débit.

3.2. Résultats totalement non-intrusifs

Afin d'avoir une idée de la différence de débit entre la méthode totalement sans contact et les valeurs réelles, les débits qui suivent ont été déduits à l'aide de toutes les méthodes non-intrusives étudiées dans ce mémoire. Pour être plus précis, les données utilisées pour calculer un débit sont :

- La hauteur et largeur d'eau déterminée par la méthode "*Hauteur-Angle*". Cette méthode a été préférée puisqu'elle présentait les meilleurs résultats.
- Le champ de vecteurs vitesses avec ensemencement déterminé par le logiciel *PIVlab*.
- Le coefficient de vitesse global moyen spécifique à chaque station, calculé à partir de la moyenne de tous les coefficients de vitesse α globaux comme présenté dans le chapitre 7. Ces coefficients sont déterminés suivant une étude intrusive mais en fixant un coefficient global moyen, celui-ci une fois connu, peut être réutilisé sans être remesuré.

- La bathymétrie qui est la seule donnée mesurée avec un instrument de mesure intrusif.

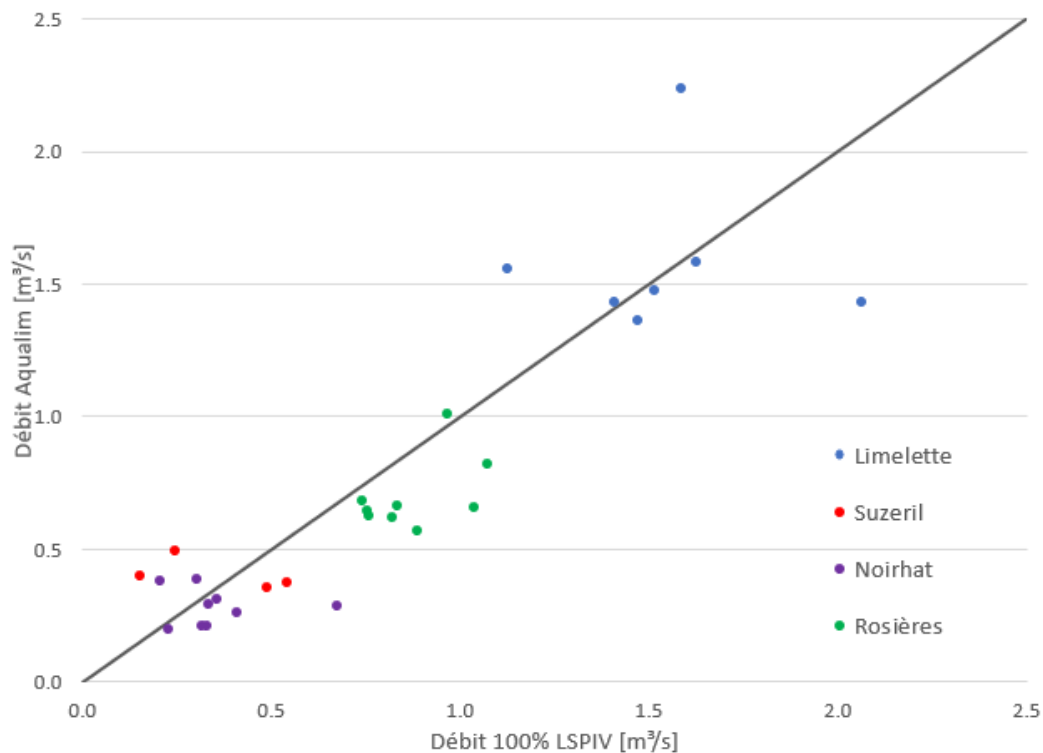


Figure 8.22 – Comparaison entre le débit du site Aqualim et le débit obtenu à l'aide de la LSPIV avec un coefficient α moyen calculé pour chaque station.

Les débits obtenus sont représentés sur la Figure 8.22 ci-dessus, en fonction des débits d'Aqualim pour avoir une idée de leur précision.

Les débits se retrouvent une nouvelle fois surestimés la plupart du temps, mais cela n'est plus dû à un coefficient de vitesse unitaire. La cause de cette surestimation est plutôt due à une détermination d'une hauteur d'eau, en général plus grande qu'en réalité, par la méthode "Hauteur-Angle".

Comme dans le cas des résultats intrusifs, pour avoir une idée plus précise des erreurs des débits, le Tableau 8.5 présente la moyenne de ces erreurs et l'écart type pour chaque station.

Station	Erreur moyenne [%]	Écart-type [%]
Rosières	27.5	18.4
Limelette	16.6	16.9
Suzeril	48.4	11.3
Noirhat	33.4	19.1

Tableau 8.5 – Erreurs sur le calcul des débits en rivière de manière totalement non-intrusive.

En observant ces résultats, Suzeril est la station qui apporte la plus grande erreur à nouveau. Cela s'explique par le fait que les vitesses déterminées pour cette station présentaient déjà les RMSEA les plus élevés des 4 stations.

Pour les autres stations, les résultats sont encourageants et sont parfois très précis (1.4% d'erreur pour un débit déterminé à Limelette), mais leur erreur moyenne reste trop grande pour être utilisée comme une méthode fiable. Puisque les débits à Limelette étaient sous-estimés avec *PIVlab*, en ajoutant une hauteur d'eau plus importante, déterminée par la méthode "*Hauteur-Angle*", cela permet d'obtenir des débits très proches de la réalité pour certains d'entre eux, diminuant ainsi l'erreur moyenne. Néanmoins, seul 35% des débits calculés ont une erreur sous les 15%, ce qui est trop peu pour approuver cette méthode totalement sans contact.

4. L'application "*Discharge*"

L'objectif ici, était de voir dans quelles conditions cette application fonctionnait et quel était son degré de précision.

L'application *Discharge* a été testée sur deux stations : la station de Noirhat et la station de Limelette. Ce choix a été fait puisque l'application, dans sa version gratuite, ne permet pas l'importation d'une bathymétrie précise.

Les choix possibles pour la bathymétrie sont les suivants : parabolique, rectangulaire ou trapézoïdale. Comme montré sur les Figures 8.23 et 8.24, les stations de Limelette et de Noirhat se prêtent facilement à une approximation par une bathymétrie trapézoïdale.

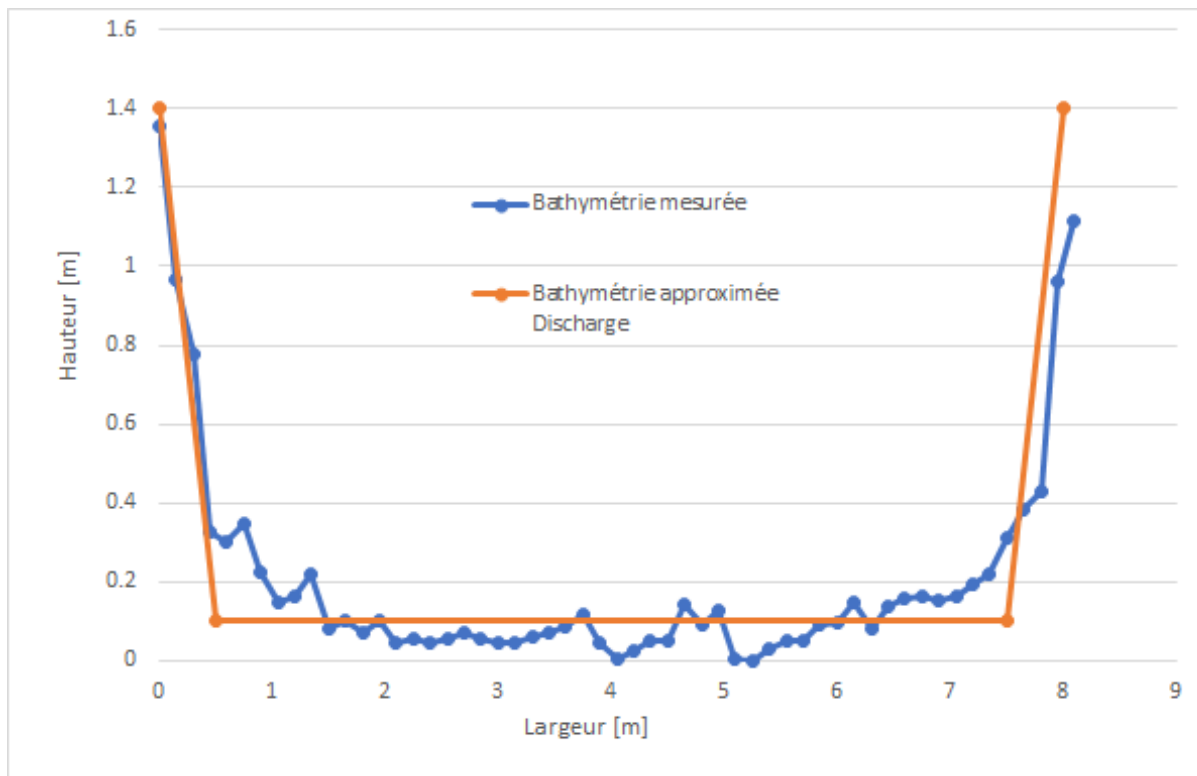


Figure 8.23 – Bathymétrie approximée et bathymétrie mesurée pour la station de Limelette.

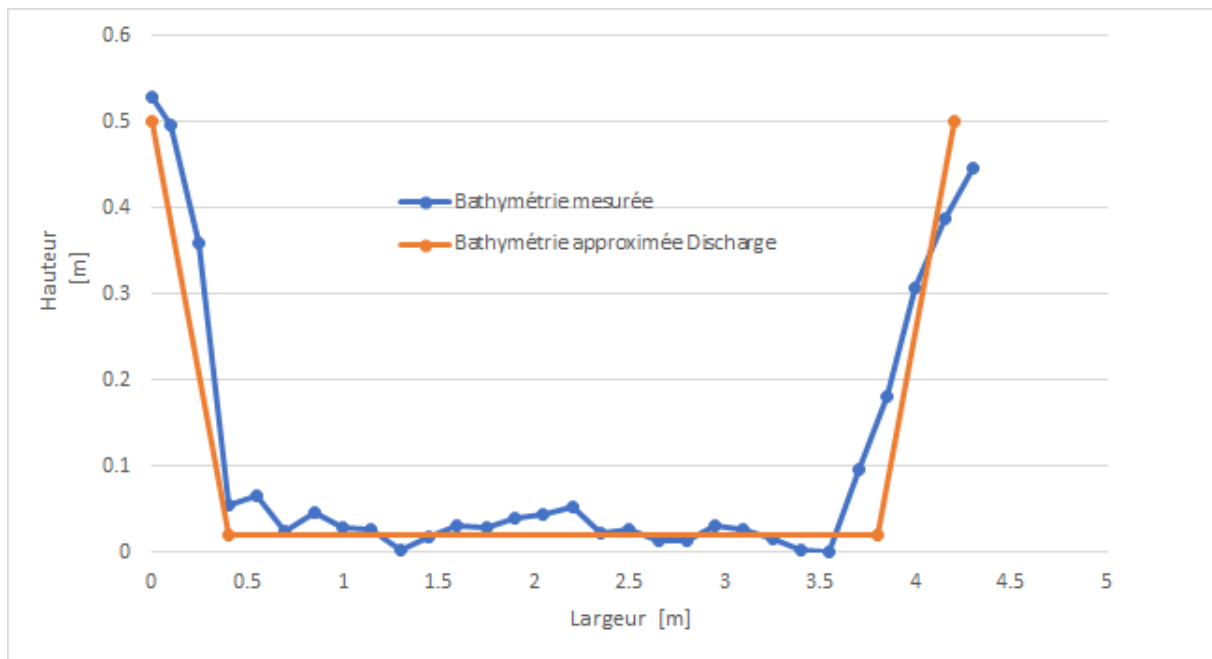


Figure 8.24 – Bathymétrie approximée et bathymétrie mesurée pour la station de Noirhat.

4.1. Résultats

Les résultats qui suivent ont été obtenus en utilisant un GSM Samsung Galaxy J5(2016). Les distances entre les quatre bornes GRP's, nécessaires au fonctionnement de l'application, ont été mesurées à chaque prise de mesures.

Dans un premier temps, la vidéo a été prise depuis un pont car cela permettait de voir plus facilement la totalité de la rivière. Cependant, les résultats qui en découlaient étaient totalement erronés que ce soit pour la station de Limelette ou de Noirhat.



Figure 8.25 – Utilisation de l'application *Discharge* depuis un pont pour la station de Noirhat le 08 mars 2021.

Les flèches bleues sur la Figure 8.25 doivent normalement représenter les vitesses en surface. Il est directement possible de voir que dans ce cas, l'application ne fonctionne pas correctement.

Il a donc été décidé par la suite de prendre les vidéos depuis une des deux rives de la rivière, mais d'autres erreurs sont alors survenues.

Pour les deux stations qui étaient étudiées, les berges sont relativement raides près du plan d'eau. Associées à une végétation assez dense, lorsqu'une vidéo est prise depuis la rive, une partie de la rivière n'est pas visible comme le montre la Figure 8.26.



Figure 8.26 – Utilisation de l'application *Discharge* depuis une rive pour (a) la station de Limelette et (b) la station de Noirhat le 17 mars 2021.

Dans le cas de la station de Noirhat, la végétation empêche une analyse correcte. Cependant, même sans végétation comme sur la Figure 8.26 (a), on ne peut pas discerner où s'arrête la ligne d'eau du côté de la rive droite (en bas sur les images). Le schéma de la Figure 8.27 illustre la zone de la rivière en rouge qui n'est pas visible.

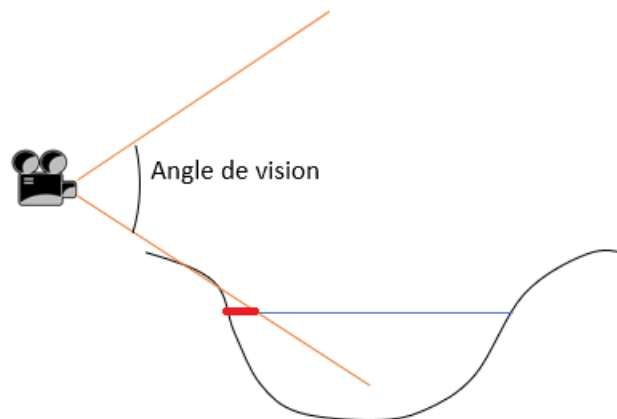


Figure 8.27 – Schéma de l'angle de vision de la caméra du GSM.

Pour pallier en partie à ce problème, la végétation a été coupée et les vidéos ont été prises plus près du bord (voir Figure 8.28).

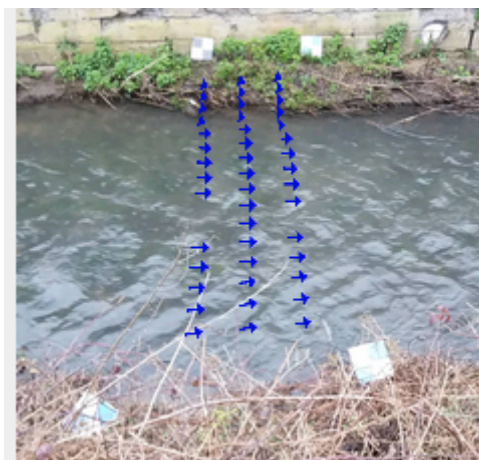


Figure 8.28 – Prise de vidéo près du bord avec une végétation coupée à Noirhat le 17 mars 2021.

Dû à l'angle de vision de la caméra du téléphone qui est assez faible, pour pouvoir prendre les vidéos plus près du bord et toujours avoir les 4 balises GCP's en visuel, il est nécessaire de diminuer la distance entre celles-ci; ce qui diminue la précision de l'orthorectification.

En théorie, ces balises GRP's doivent se trouver sur le même plan que le plan d'eau ce qui, en pratique, est difficilement réalisable.

4.2. Comparaison des résultats

Les résultats des deux stations sont comparés avec les stations Aqualim correspondantes toutes proches.

Station de Limelette

Les données de débits récoltées sont présentées dans le Tableau 8.6 et sur le graphe de la Figure 8.29. Il est possible de voir sur le graphique de la Figure 8.29 que "Discharge" ne donne pas de bons résultats en terme de débit, excepté pour les deux données du 17 mars.

Date	"Discharge" [m^3/s]	Aqualim [m^3/s]
08/03/2021	2.47	1.43
17/03/2021	2.34	2.22
17/03/2021	2.23	2.22
22/03/2021	0.074	1.53
01/04/2021	2.56	1.40
08/04/2021	2.27	1.45
15/04/2021	2.93	1.48
27/04/2021	3.79	1.31

Tableau 8.6 – Données de débits pour la station de Limelette.

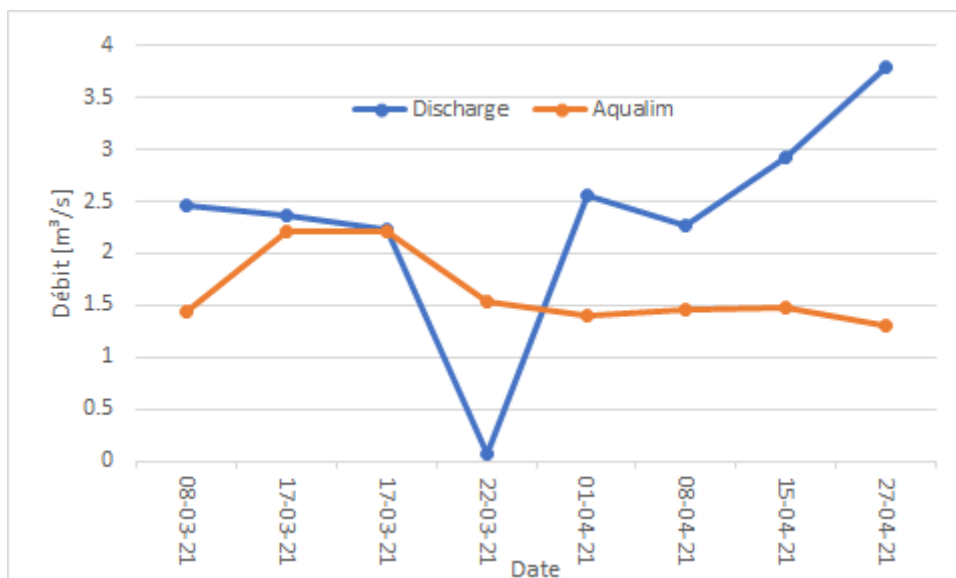


Figure 8.29 – Aqualim VS "Discharge" pour la station de Limelette.

Les bons résultats pour ces dates sont à nuancer. En regardant les vecteurs vitesses sur la Figure 8.30, il est à observer que les vitesses ne sont calculées que sur une partie de la largeur visible de la rivière. L'application a donc surestimé les vitesses qu'elle a pu calculer, et c'est donc pour cela que les débits obtenus sont proches de celui d'Aqualim ce jour-là.

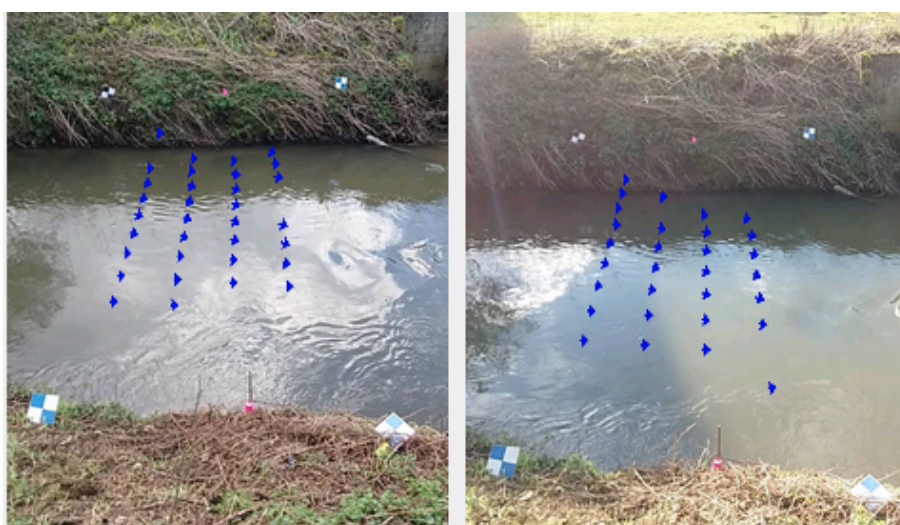


Figure 8.30 – Changement de luminosité en utilisant l'application *Discharge* pour la station de Limelette le 17 mars 2021.

Les deux analyses de la Figure 8.30 ont été effectuées à quelques minutes d'intervalle dans la même position de prise de vidéo. Tous les paramètres sont donc identiques excepté la luminosité. Comme les débits trouvés à l'aide de "Discharge" sont pratiquement identiques dans les 2 cas, cela pourrait laisser penser que le paramètre de la luminosité est bien géré par l'application. Elle aurait donc peu d'influence sur le résultat final.

Dans les autres cas, l'application surestime le débit de manière plus ou moins importante.

Station de Noirhat

Les données de débit récoltées pour Noirhat sont présentées dans le tableau 8.7 et sur le graphe de la Figure 8.31.

Date	"Discharge" [m^3/s]	Aqualim [m^3/s]
08/03/2021	0.01	0.2
17/03/2021	0.01	0.28
17/03/2021	0.46	0.28
22/03/2021	0.43	0.23
01/04/2021	0.44	0.25
08/04/2021	0.30	0.24
15/04/2021	0.30	0.20
27/04/2021	0.27	0.17

Tableau 8.7 – Données de débits pour la station de Noirhat.

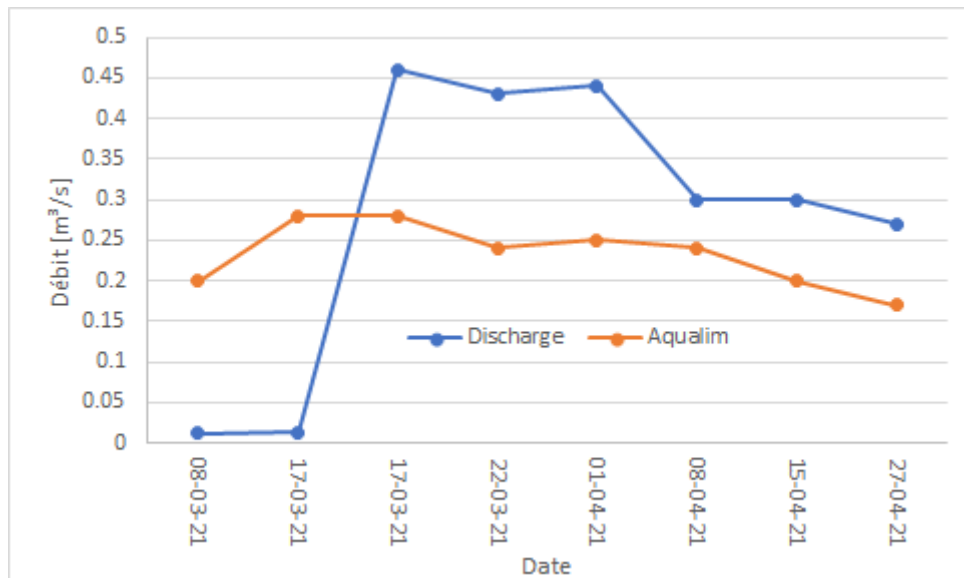


Figure 8.31 – Aqualim VS "Discharge" pour la station de Noirhat.

Comme dans le cas de la station de Limelette, les résultats pour l'application ne sont pas très concluants.

Les deux premiers résultats, du 08/03/2021 et du 17/03/2021, donnent des débits fortement sous-estimés. Cela est justifié par de mauvaises conditions de prise de vidéo comme expliqué précédemment. Dans de "bonnes" conditions, le débit est surestimé. En comparant à la station de Limelette, les résultats, bien qu'inexactes, présentent une moins grande erreur comme le montre le graphique de la Figure 8.32.

Ce graphe prend en ordonnée le rapport entre le débit *Discharge* et le débit Aqualim. Un rapport supérieur à 1 veut dire que le débit donné par *Discharge* est surestimé et inversement, si le rapport est plus petit que 1 cela signifie que le débit donné par *Discharge*, est sous-estimé.

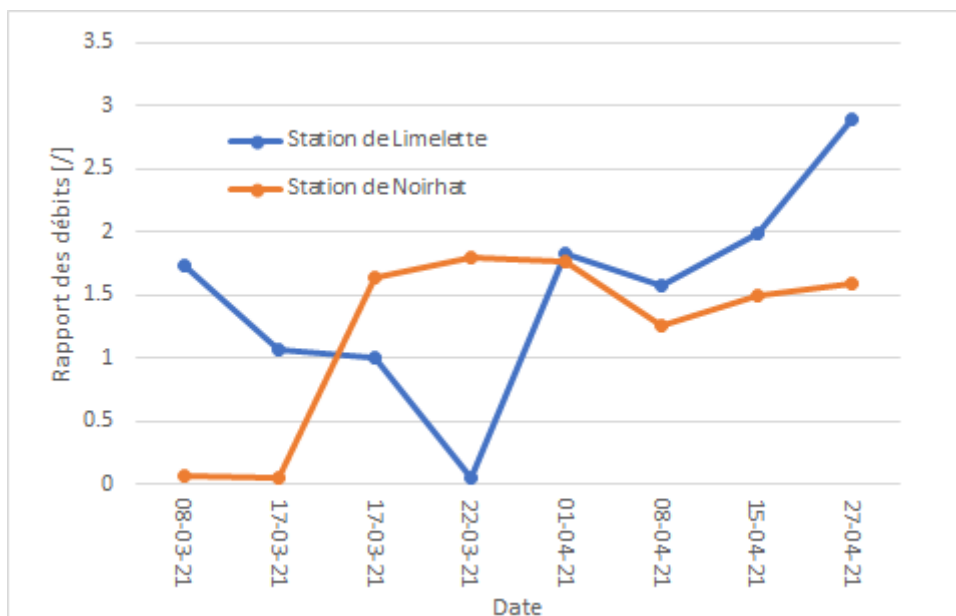


Figure 8.32 – Rapport des débits pour la station de Limelette et de Suzeril.

Si les deux premières données ne sont pas considérées, pour la station de Noirhat, le rapport tourne autour de 1.5. Dans le cas de la station de Limelette, ce rapport varie de manière beaucoup plus importante. De plus, comme le montrent les images de la Figure 8.33, les vitesses sont calculées sur pratiquement toute la largeur visible de la rivière pour la station de Noirhat. Ce qui n'est pas le cas à Limelette.

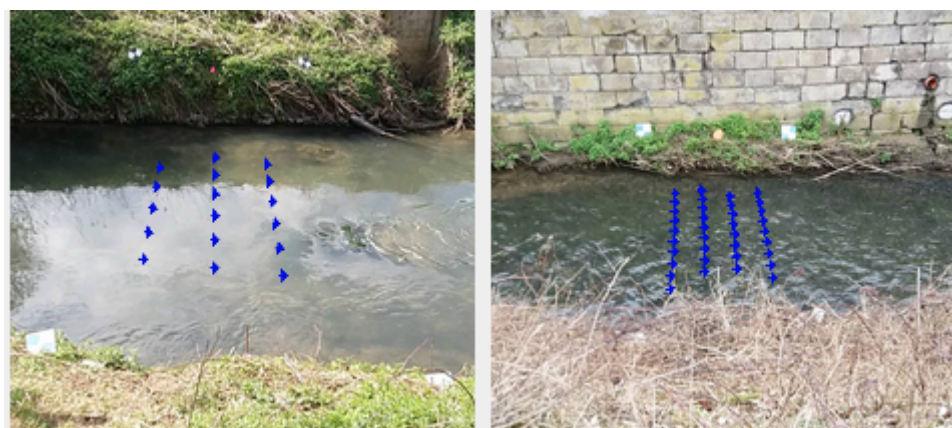


Figure 8.33 – Dispersion des vecteurs vitesses obtenus à la surface de l'eau pour (a) la station de Limelette le 08/04/2021. et (b) la station de Noirhat le 22/03/2021.

Suite à ces analyses, il est possible de penser qu'en calibrant le calcul de débit, *Discharge* donnerait de bien meilleurs résultats pour la station de Noirhat. Pour vérifier cela, il faudrait effectuer d'autres analyses de débit avec l'application pour cette station.

4.3. Conclusion

Après avoir utilisé cette application en conditions réelles, nous pouvons en conclure qu'elle présente de nombreux avantages mais aussi des inconvénients et des choses à améliorer.

Tout d'abord, l'application possède une interface intuitive et facile d'utilisation. Le matériel dont il faut disposer pour faire une analyse de débit est très limité. Un téléphone et quatre points de repères suffisent. Une fois, la vidéo prise, le résultat de débit est obtenu en quelques secondes. *Discharge* permet de stocker les données récoltées sur le cloud ce qui est très intéressant dans le cas d'un téléphone qui ne possède pas beaucoup de mémoire. De plus, l'application possède un site internet. Celui-ci est synchronisé avec le cloud et présente de manière plus détaillée que sur téléphone, les résultats pris sur le terrain. Finalement, au niveau des résultats, les conditions météorologiques n'ont pas l'air de trop les influencer.

Les désavantages sont toutefois nombreux. L'application est vendue comme étant rapide à mettre en place. Ceci n'est vrai que si l'on connaît les distances entre les quatre points de repères à l'avance. Dans notre cas, nous devons remesurer les distances entre ces bornes à chaque fois car elles n'étaient pas laissées sur place entre chaque campagne de mesures. Alors que *Discharge* permet en théorie d'être non-intrusif, il faut tout de même connaître la bathymétrie, le niveau d'eau et mesurer la distance entre les bornes pour obtenir le débit. Récolter ces 3 types de données nécessite d'adopter un caractère intrusif à moins d'avoir du matériel de pointe qui, dans ce cas, rend l'utilisation de *Discharge* désuète.

Il serait donc préférable de dire que, si la position des 4 points de repères est connue, le calcul des vitesses de surface est non-intrusif.

Un autre désavantage est la qualité des résultats. Comme vu ci-dessus, ceux-ci sont très peu concluants. Ce qui n'est pas étonnant en considérant le temps de calcul minime que met l'application pour trouver un débit. Les résultats permettent donc d'avoir uniquement un ordre de grandeur de celui-ci.

Au niveau des améliorations, il serait intéressant de pouvoir importer une vidéo dans l'application et de ne pas être obligé de la collecter avec un téléphone. En important par exemple une vidéo de drone, nous aurions pu comparer de manière plus exacte, le débit calculé à l'aide de *Fudaa-LSPIV*, *PIVlab* et *Discharge*. De manière indirecte, prendre une vidéo à l'aide d'un drone plutôt que d'un téléphone permettrait d'avoir des images du dessus de la rivière. Une mise à l'échelle, plutôt qu'une orthorectification complète qui nécessite de connaître la position des quatre balises, pourrait alors être réalisée.

Chapitre 9

Pistes d'améliorations

Ce chapitre s'intéresse à ce qu'il serait intéressant de développer ou d'approfondir dans les travaux suivants.

Les pistes d'améliorations peuvent être divisé en plusieurs points :

- La hauteur d'eau.
- Les vitesses.
- Les débits.

1. La hauteur d'eau

Tout d'abord, il serait intéressant de tester la méthode "*Longueur-pixel*" à plus haute altitude pour voir si les résultats sont plus précis pour la largeur de la ligne d'eau. Celle-ci elle présentait de meilleurs résultats à plus haute altitude en prenant comme objet de référence la bathymétrie.

Ensuite, réaliser des expériences sur une rivière avec des berges moins abruptes permettrait, en théorie, d'avoir une meilleure évaluation de la hauteur d'eau.

Concernant les vitesses de surface, celles-ci pourraient également aider pour la détermination de la largeur d'eau. Lorsque ces vitesses sont calculées avec les logiciels *Fudaa-LSPIV* et *PIVLab*, une partie des berges sont prises en compte dans la zone où les vitesses doivent être calculées. Les logiciels sortent bien souvent des vitesses soit nulles, soit très faibles sur les berges. Ces vitesses augmentent ensuite d'un coup une fois qu'elles sont calculées sur le plan d'eau. Autrement dit, via le calcul des vitesses, les logiciels LSPIV permettent d'établir la limite entre les berges et l'eau. L'idée serait alors, en connaissant cette limite, de calculer la largeur de la ligne d'eau de cette façon.

Un autre gros problème de la hauteur d'eau est la précision de la bathymétrie. Il serait bien de mesurer la bathymétrie de manière différente. Une bathymétrie mesurée en continu serait l'idéal. Une autre solution serait de prendre non pas la bathymétrie tous les 15 [cm] comme c'est le cas pour ce mémoire mais tous les 5 ou 10 [cm] et voir de quelle façon cela influencerait les résultats.

2. Les vitesses

Dans ce travail, une étude a été faite sur l'influence de l'aire d'interrogation. Il serait intéressant de faire de même avec l'aire de recherche.

Au cours de notre étude, les vitesses de surface des différentes rivières qui ont été étudiées étaient relativement faibles. Comme un des objectifs de ce travail est de développer une méthode qui permettrait de relever des débits en période de crue, trouver un cours d'eau avec un écoulement plus torrentiel et voir les résultats qui en ressortent ne serait pas une mauvaise idée. En théorie, cela doit donner de bon résultats sans ensemencement car il y a dans ce type de rivière, beaucoup de formes de surface.

Lorsque les graphes de profil de vitesses sont obtenus certains pics ou creux peuvent encore apparaître, alors qu'ils n'ont pas lieu d'être. Trouver un moyen d'interpoler correctement, après analyse LSPIV, les vecteurs produisant ces pics ou ces creux devrait permettre d'obtenir de meilleurs résultats. Un exemple est illustré sur les graphes de la Figure 9.1.

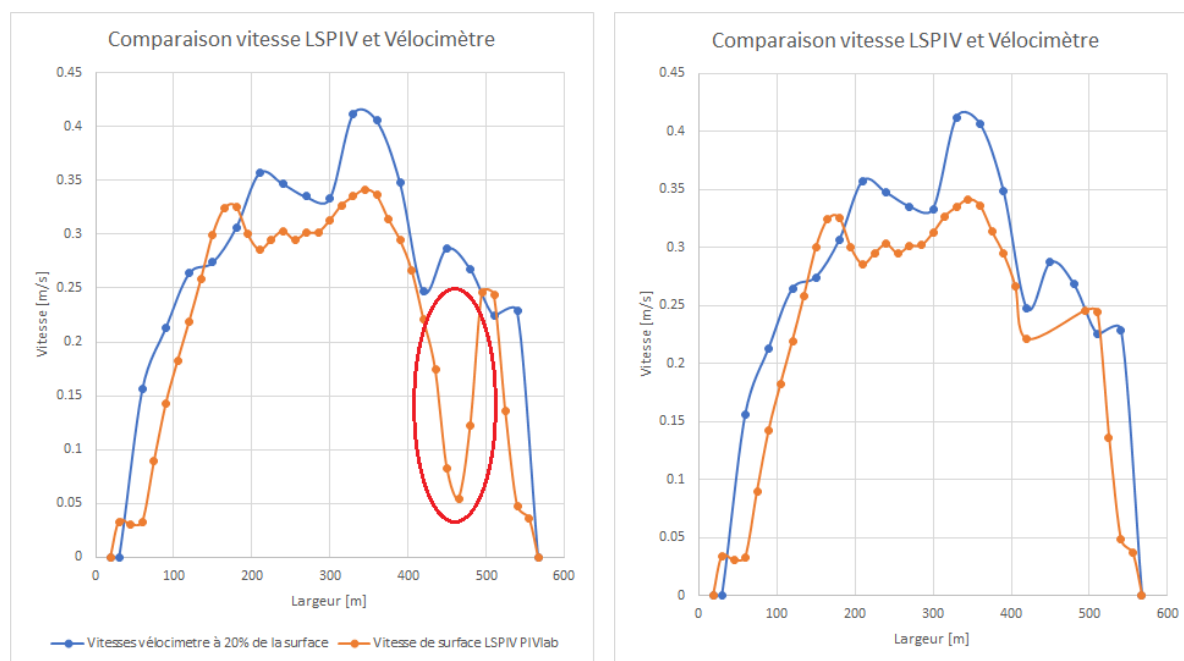


Figure 9.1 – Profil de vitesse pour la station de Rosières le 15 avril 2021, (a) sans correction et (b) avec correction.

3. Le débit

En ce qui concerne le débit, il est directement lié à la hauteur d'eau et aux vitesses. Améliorer l'évaluation de ces deux points, comme cité ci-dessus, permettrait donc d'améliorer les résultats de débits.

Un autre point à améliorer serait l'évaluation du coefficient de vitesse α . Pour cela, il est conseillé de continuer à l'évaluer sur les mêmes sections de rivières que celles étudiées dans ce travail. De cette façon, une base de valeurs du coefficient α est déjà disponible.

Il serait alors intéressant de voir la valeur de ce coefficient lorsque le niveau d'eau, pour ces sections, est soit très faible, soit très élevé.

De manière générale, tenter d'évaluer le débit sur des sections de rivières avec une hauteur d'eau plus importante et/ou un débit plus important (la Lesse, la Semois, etc.) et voir les résultats qui en ressortent serait intéressant.

Conclusion

L'objectif premier de ce travail était de déterminer le débit en rivière naturelle de manière non-intrusive, en utilisant un drone équipé d'une caméra et la LSPIV.

Pour rappel, un débit se calcule à l'aide de l'aire mouillée et des vitesses de l'écoulement. L'aire mouillée s'obtient grâce à la hauteur d'eau et à la bathymétrie. Le drone, lui, permet de prendre à la fois des vidéos pour l'analyse LSPIV et des photos pour le calcul de la hauteur d'eau. Les seuls éléments qui nécessitent un caractère intrusif sont : la prise de la bathymétrie et le calcul du coefficient de vitesse α .

Afin de récolter les données nécessaires au calcul du débit, 4 sections en rivières naturelles ont été choisies et un mode opératoire a été établi :

1. Mesure de la bathymétrie à l'aide la station totale LEICA TPS1200 .
2. Mesure des vitesses de la rivière à l'aide d'un vélocimètre.
3. Mesure du niveau d'eau et de la largeur de ligne d'eau à l'aide d'un mètre ruban et d'une perche graduée.
4. Prise d'images avec le drone en rivière naturelle.
5. Calcul des largeurs de lignes d'eau à l'aide des méthodes "*Hauteur-angle*" et "*Longueur-pixel*".
6. Calcul de la hauteur d'eau, suivi de l'aire mouillée grâce à la bathymétrie et à la largeur de la ligne d'eau.
7. Importation des vidéos dans *Fudaa-LSPIV* ou *PIVlab* afin d'obtenir les vitesses de surface de l'écoulement par LSPIV.
8. Calcul des vitesses moyennes à l'aide du coefficient α .
9. Calcul du débit.

Les points 2 et 3 adoptent un caractère intrusif afin d'obtenir des données de comparaison pour la hauteur d'eau, la largeur de la ligne d'eau et les vitesses obtenues de manière non-intrusives par la suite. Le point 2 permet également le calcul d'un coefficient de vitesse α global moyen, utilisé par après sans devoir le recalculer, et donc sans intrusion dans l'eau.

Dans un premier temps, ce travail s'est attardé sur la manière d'obtenir les hauteurs d'eau grâce aux photos aériennes. Deux méthodes ont été expérimentées : la méthode "*Hauteur-angle*" et la méthode "*Longueur-pixel*".

Ces deux méthodes donnent des résultats très encourageants pour la détermination de la largeur de la ligne d'eau. Si l'on fait exception de la station de Suzeril, l'erreur moyenne est inférieure à 1% pour la méthode "*Hauteur-angle*" et inférieure à 10% pour la méthode "*Longueur-pixel*". La première méthode est donc celle à privilégier au vue des résultats. Cependant, la méthode "*Longueur-pixel*" mériterait d'être améliorée afin de donner éventuellement de meilleurs résultats.

Néanmoins, dues principalement à des erreurs de précisions dans la bathymétrie, les résultats pour la hauteur d'eau ne sont pas aussi convaincants. L'erreur moyenne varie cette fois de 20 à 50%.

Dans un second temps, une étude a été faite sur le coefficient de vitesse α . La valeur moyenne obtenue pour chaque station est cohérente avec la théorie. Le coefficient α moyen a une valeur comprise entre 0.742 et 0.924 dans le cas de cette étude alors qu'elle se situe entre 0.8 et 0.9 en théorie.

Concernant sa relation avec la hauteur d'eau, celle-ci n'a finalement pas pu être déterminée pour les stations étudiées au vu d'une variation moindre du niveau d'eau, et d'un manque de données relevées.

Au niveau de l'analyse des vitesses de surface via la LSPIV, les différentes recherches menées ont permis de mettre en évidence certains paramètres qui l'influencent. Notamment l'ensemencement, qui est indispensable pour certains type d'écoulement mais dans d'autres cas, lorsqu'il y a de nombreuses formes de surface, il est possible de s'en passer.

Les résultats pour les vitesses de surface sont pertinents et cela d'autant plus que l'on se rapproche de la fin des prises de mesures, et ce grâce à une amélioration continue du procédé pour obtenir ces vitesses, tout au long des différentes campagnes de mesures.

Finalement les résultats de débits ont été divisés en deux parties. Les résultats hybrides et les résultats totalement non-intrusifs. Les résultats hybrides utilisent la LSPIV pour obtenir les vitesses et prennent comme hauteur d'eau, celle mesurée sur le terrain à l'aide d'un mètre. Quand aux résultats totalement non-intrusifs, ils utilisent les vitesses données par la LSPIV et la hauteur d'eau donnée par la méthode "*Hauteur-angle*".

Dans le cas des résultats hybrides, les erreurs avec ensemencement sont comprises entre 6% et 30% mais ont plus tendance à tourner autour des 10%, ce qui est raisonnable. Les erreurs sans ensemencement, quant à elles, varient entre 16% et 43%.

Pour les résultats totalement non-intrusifs, ces erreurs varient de 16% à 49% ce qui se rapproche du cas sans ensemencement.

Il est donc encore trop tôt pour conclure que les méthodes présentées dans ce travail permettent d'obtenir des débits totalement non-intrusifs de manière fiable avec de telles erreurs.

Les résultats sont, tout de même, encourageants en prenant les méthodes individuellement qui ont été développées dans ce mémoire. Avec des améliorations ciblées, il se pourrait qu'à terme, l'utilisation de la LSPIV par drone puisse permettre de mieux comprendre et de prédire les phénomènes de catastrophes naturelles liés aux cours d'eau.

Bibliographie

Articles

- [2] Ronald J Adrian. “Scattering particle characteristics and their effect on pulsed laser measurements of fluid flow: speckle velocimetry vs particle image velocimetry”. In: *Applied optics* 23.11 (1984), pp. 1690–1691.
- [3] Ronald J Adrian. “Twenty years of particle image velocimetry”. In: *Experiments in fluids* 39.2 (2005), pp. 159–169.
- [12] Philippe Dierickx and A Da Col. “Utilisation des techniques sonar et laser dans le cadre de la connaissance des zones d’inondations”. In: *AM/FM BELUX News* 24 (2002), pp. 13–16.
- [13] James T Dietrich. “Bathymetric structure-from-motion: extracting shallow stream bathymetry from multi-view stereo photogrammetry”. In: *Earth Surface Processes and Landforms* 42.2 (2016), pp. 355–364.
- [16] DJ Forliti, Paul J Strykowski, and K Debatin. “Bias and precision errors of digital particle image velocimetry”. In: *Experiments in Fluids* 28.5 (2000), pp. 436–447.
- [19] Ichiro Fujita, Marian Muste, and Anton Kruger. “Large-scale particle image velocimetry for flow analysis in hydraulic engineering applications”. In: *Journal of hydraulic Research* 36.3 (1998), pp. 397–414.
- [23] I Grant. “Selected papers on particle image velocimetry In: Grant I (ed) SPIE milestone series, vol MS 99”. In: *SPIE Optical Engineering Press, Bellingham* (1994).
- [24] Li Chuan Gui and W Merzkirch. “A method of tracking ensembles of particle images”. In: *Experiments in fluids* 21.6 (1996), pp. 465–468.
- [26] Alexandre Hauet. “Estimation de débit et mesure de vitesse en rivière par Large-Scale Particle Image Velocimetry”. In: *La Houille Blanche* 1 (2006), pp. 80–85.
- [28] Alexandre Hauet et al. “Méthodes innovantes pour la mesure des débits fluviaux en continu: profileur Doppler fixe horizontal (H-aDcp) et analyse d’images (LSPIV)”. In: *La Houille Blanche* 3 (2009), pp. 123–131.
- [35] E.Pranzini L.Rossi I.Mammi. “A comparison between UAV and high-resolution multispectral satellite images for bathymetry estimation”. In: *s.j.* (2019), pp. 143–146.
- [40] EA Meselhe, T Peeva, and M Muste. “Large scale particle image velocimetry for low velocity and shallow water flows”. In: *Journal of Hydraulic Engineering* 130.9 (2004), pp. 937–940.

- [41] N Michelletti, JH Chandler, and S Lane. “Structure from motion (SFM) photogrammetry”. In: *Geomorphological Techniques* (2015).
- [42] Marian Muste, I Fujita, and A Hauet. “Large-scale particle image velocimetry for measurements in riverine environments”. In: *Water resources research* 44.4 (2008).
- [50] Ursula Stephan and Dieter Gutknecht. “Hydraulic resistance of submerged flexible vegetation”. In: *Journal of Hydrology* 269.1-2 (2002), pp. 27–43.
- [54] William Thielicke. “The flapping flight of birds”. In: *Diss. University of Groningen* (2014).
- [55] William Thielicke and Eize Stamhuis. “PIVlab—towards user-friendly, affordable and accurate digital particle image velocimetry in MATLAB”. In: *Journal of open research software* 2.1 (2014).
- [59] Matilde Welber et al. “Field assessment of noncontact stream gauging using portable surface velocity radars (SVR)”. In: *Water Resources Research* 52.2 (2016), pp. 1108–1126.
- [60] B Wieneke. “Volume self-calibration for 3D particle image velocimetry”. In: *Experiments in fluids* 45.4 (2008), pp. 549–556.
- [62] Aleksander Wojtowicz and Konrad Stolarczyk. “Triangular 3D Laser Scanning in Underwater Photogrammetry”. In: *Polish Hyperbaric Research* 3.52 (2015), pp. 35–44.
- [63] Theresa M Wynn et al. “Variation in root density along stream banks”. In: *Journal of Environmental Quality* 33.6 (2004), pp. 2030–2039.

Livres et documents

- [1] Ronald J Adrian. *Bibliography of particle velocimetry using imaging methods: 1917-1995*. Department of theoretical and applied mechanics, University of Illinois, 1996.
- [5] Rob JM Bastiaans. *Cross-correlation PIV; theory, implementation and accuracy*. Eindhoven University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, 2000.
- [7] Wubbo Boiten. *Hydrometry: IHE Delft lecture note series*. CRC press, 2020.
- [8] Asselberghs Paul & Peeters Briec. *Mesure du niveau d'eau et de la vitesse de l'écoulement par imagerie en laboratoire et en rivière naturelle*. Université catholique de Louvain, 2019.
- [9] Ralph T Cheng et al. *Evaluating a radar-based, non contact streamflow measurement system in the San Joaquin River at Vernalis, California*. 2004.
- [10] D.Lague et al. *Le lidar aéroporté topo-bathymétrique pour la caractérisation et le suivi des corridors fluviaux*. Université Rennes, s.d.
- [11] Martin Detert and Volker Weitbrecht. *Helicopter-based surface PIV experiments at Thur River*. 2014, pp. 3–5.
- [18] Sandra Soares Frazao. *LGCIV2053 Hydraulique fluviale*. Université catholique de Louvain, 2017, p. 11.
- [25] Bia Tristan & Somers Harold. *Mesure du champ de vitesses superficielles en rivière à partir d'un drone*. Université catholique de Louvain, 2018.
- [27] Alexandre Hauet, Thomas Morlot, and Léa Daubagnan. *Velocity profile and depth-averaged to surface velocity in natural streams: A review over a large sample of rivers*. Vol. 40. EDP Sciences, 2018.
- [29] François-Xavier Hellebaut. *Mesure du niveau d'eau par photogrammétrie à partir d'un drone*. Université catholique de Louvain, 2018.
- [33] Magali Jodeau et al. *Manuel d'utilisation du logiciel Fudaa-LSPIV Version 1.7. 3*. EDF-INRAE, 2020.
- [38] Frédérique Larrarte et al. *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, 2016.
- [43] André Musy and Christophe Higy. *Hydrologie: Une science de la nature*. Vol. 21. PPUR presses polytechniques, 2004.
- [47] Ceyda Polatel. *Indexing by free surface velocity: a prospect for remote discharge estimation*. Korea Water Resources Association, 2005, pp. 1453–1454.
- [48] Markus Raffel et al. *Particle image velocimetry: a practical guide*. Springer, 2018.

- [49] Simon Renard. *Development of an application for river discharge measurement*. Université catholique de Louvain, 2020.
- [51] Breels Nicolas & Marneffe Stéphane. *Mesure de débit en rivière à partir de techniques d'imagerie combinant LSPIV et photogrammétrie*. Université catholique de Louvain, 2020.
- [61] BFA Wieneke. *PIV uncertainty quantification and beyond*. Delft University of Technology, 2017.
- [64] Ladan Zoheidi. *Flow Characterization of Milk Protein Foam Transport in Inner Geometries*. Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg (FAU), 2018.

Sites internet

- [4] Liberzon Alex et al. *OpenPIV*. Consulté le : 23-05-2020. URL: <http://www.openpiv.net/>.
- [6] Batiactu. *Tempête Alex : l'Etat débloque plus de 500 millions d'euros pour réparer les dégâts*. Consulté le : 05-06-2021. URL: <https://www.batiactu.com/edito/tempete-alex-etat-debloque-plus-500-millions-euros-62049.php>.
- [14] Discharge. *USER MANUAL 2021-04-06*. Consulté le : 27-05-2021. URL: https://app.discharge.ch/res/discharge_manual.pdf.
- [15] DJI. *Fiche technique Mavic Air*. Consulté le : 07-04-2021. URL: <https://www.dji.com/be/mavic-air/info>.
- [17] Franceinfo. *Éboulement, routes coupés, coupures d'électricités... Les Alpes-Maritimes font face à la tempête Alex*. Consulté le : 05-06-2021. URL: https://www.francetvinfo.fr/meteo/inondations/eboulements-routes-coupees-coupures-deelectricite-les-alpes-maritimes-font-face-a-la-tempete-alex_4126363.html.
- [20] Planete Geek. *Test des filtres PolarPro pour Mavic Air*. Consulté le : 19-05-2021. URL: <https://www.planetegeek.fr/test-filtres-polarpro-mavic-air/>.
- [21] Christian Gibbs. *Particle Image Velocimetry (PIV) Introduction*. Consulté le : 28-05-2021. URL: <https://slideplayer.com/slide/7048516/>.
- [22] PIVTEC GmbH. *Software for Particle Image Velocimetry (PIV)*. Consulté le : 23-05-2020. URL: <https://www.pivtec.com/pivview.html>.
- [30] Inconnu. *Drone altimeter by image analysis*. Consulté le : 07-04-2021. URL: https://www.technik-consulting.eu/en/problem%5C_solving/drone%5C_altimeter.html.
- [31] Inconnu. *Radar and Ultrasonic sensors*. Consulté le : 18-05-2020. URL: shorturl.at/ekwS2.
- [32] Rentschler J.E. and Salhab M. *1,47 milliard de personnes sont exposées à un risque d'inondation, et plus d'un tiers d'entre elles à des catastrophes aux effets dévastateurs*. Consulté le : 05-06-2021. URL: <https://blogs.worldbank.org/fr/voices/1-47-milliard-de-personnes-sont-exposees-risque-inondation>.
- [34] JPROCHE. *Fisheye correction*. Consulté le : 25-05-2021. URL: https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Fisheye_correction_DSC_4482EC.jpg.
- [36] Christian Lallement. *Hydrométrie : mesurer les débits d'une rivière, pourquoi et comment ?*. Consulté le : 11-04-2021. URL: <https://www.encyclopedie-environnement.org/eau/hydrometrie-mesurer-debits-dune-riviere/>.
- [37] Larousse. *Définition de la photogrammétrie*. Consulté le : 02-04-2021. URL: <https://www.larousse.fr/dictionnaires/francais/photogrammetrie/60448>.

- [39] Cavitator Ltd. *Time-Resolved PIV Measurements with CAVILUX HF Diode Laser*. Consulté le : 19-05-2020. URL: <https://www.cavitator.com/library/time-resolved-piv-measurements-cavilux-hf-diode-laser/>.
- [44] Nivus. *Instruments de mesure pour la gestion de l'eau*. Consulté le : 26-05-2021. URL: <https://www.nivus.fr/fr/service-telechargement/know-how/radar/>.
- [45] Géo Sud Ouest. *Définition de la bathymétrie*. Consulté le : 12-06-2021. URL: <https://geo-sud-ouest.fr/nos-prestations/bathymetrie/>.
- [46] PolarPro. *Camera & Drone Filters/PolarPro*. Consulté le : 19-05-2021. URL: https://www.polarprofilters.com/collections/filters?_pf&pf_t_drone=Drone%5C%3AMavic%5C%20Air.
- [52] William Thielicke. *PIVlab - Background and quick start guide*. Consulté le : 09-02-2021. 2018. URL: <https://www.youtube.com/watch?v=Sp30unq07Qc>.
- [53] William Thielicke. *PIVlab - Digital Particle Image Velocimetry Tool for MATLAB*. Consulté le : 09-02-2021. 2014. URL: https://pivlab.blogspot.com/p/blog-page_19.html.
- [56] Greg Tischler. *80 GHz radar vs. ultrasonic: Non-contact Level Measurement Technology Comparison*. Consulté le : 18-05-2020. URL: <https://www.vega.com/en-us/company/blog/2019/80-ghz-radar-vs-ultrasonic>.
- [57] Service Public de Wallonie. *Carte des sols de Wallonie*. Consulté le : 20-04-2021. URL: <http://geoapps.wallonie.be/Cigale/Public/#CTX=CNSW#BBOX=164139.4409872153,165441.1935907205,152362.46930827195,153058.32486664975>.
- [58] Service Public de Wallonie. *Réseau de mesure limnimétrique de la Direction des Cours d'Eau non navigables*. Consulté le : 14-04-2021. URL: <http://aqualim.environnement.wallonie.be/>.

Appendix A

ANNEXES

1. PIVlab (v.2.40) : manuel d'utilisation

Introduction

La méthode d'utilisation de *PIVlab* est décrite spécifiquement ici, pour permettre d'obtenir les vitesses de surfaces à l'aide des images/vidéos prises sur une rivière naturelle. Ce manuel d'utilisation se base principalement sur le tutoriel disponible sur le site de *PIVlab* [53].

Celui-ci se base également sur certains tutoriels disponibles sur Youtube [52] et sur d'anciens mémoires dont celui de Bia Tristan et Somers Harold [25] et celui de BREELS NICOLAS et MARNEFFE STÉPHAN [51].

Un forum est aussi disponible pour les questions et améliorations éventuelles proposées par les utilisateurs. Le forum est très actif, le fondateur de *PIVlab*, WILLIAM THIELICKE, prend le temps de répondre rapidement aux différentes publications.

Ce manuel d'utilisation se base sur la version 2.40 de *PIVlab* publiée le 08 février 2021.

1.1. Étape 1 : importer des images ou une vidéo

La première étape consiste à importer des images ou une séquence vidéo. Comme la rivière est directement filmée avec un drone, une vidéo sera plutôt importée. Cette vidéo aura été préalablement stabilisée par perspective comme le fait le logiciel *Fudaa-LSPIV* et coupée pour ne juste avoir que la séquence vidéo qui est à analyser, c'est-à-dire au moment du passage des traceurs sur la bathymétrie connue. Pour ce faire, un logiciel de montage vidéo gratuit a été utilisé, *DaVinci Resolve*.

En suivant les étapes 1 à 4 sur la Figure A.1 ci-dessous, il est possible d'importer facilement une vidéo. L'étape 3 consiste à choisir tout d'abord le numéro de l'image du début de la vidéo, ensuite le numéro de l'image de fin de la vidéo et enfin l'écart entre les images à analyser. Dans le cas où les images sont prises avec un trop court laps de temps pour que le logiciel puisse distinguer un mouvement entre deux images, l'écart des images à analyser sera augmenté. Dans le cas présent, une image sur deux sera analysée à chaque fois.

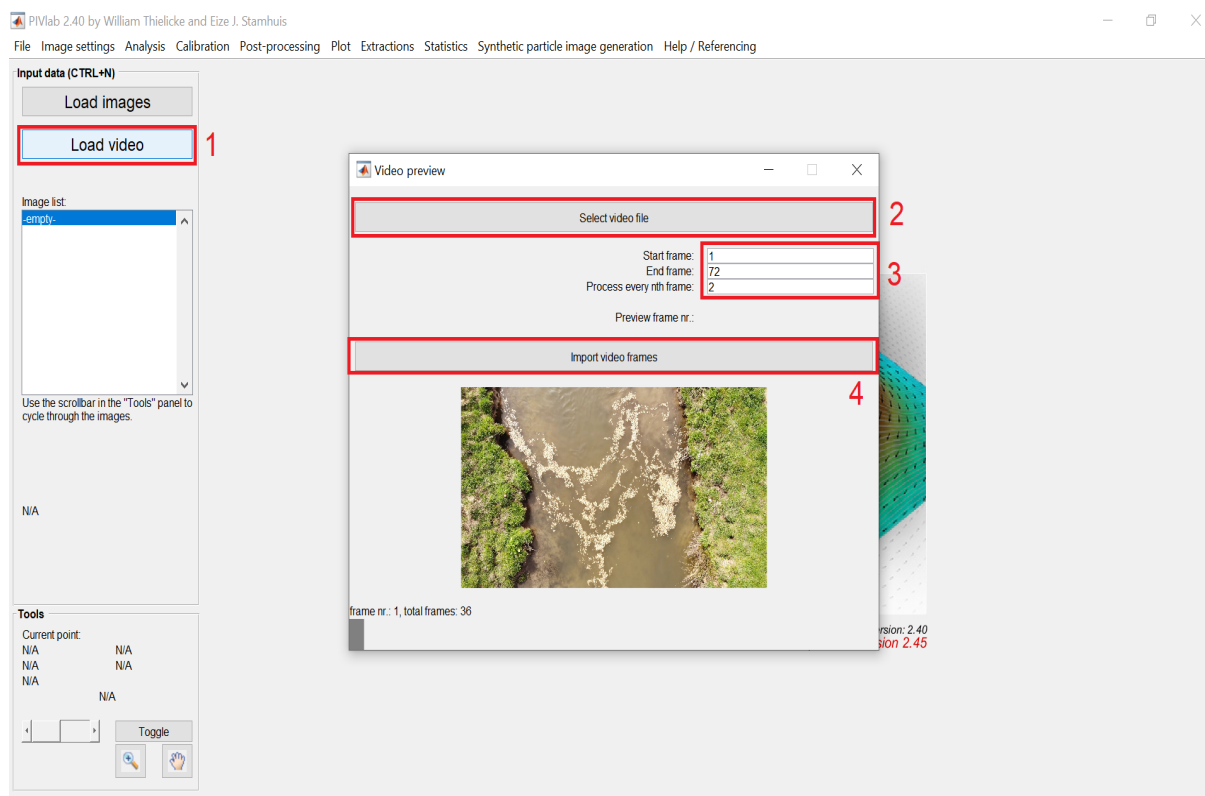


Figure A.1 – *PIVlab* (2.40) : menu d'importation d'éléments.

1.2. Étape 2 : configurer les paramètres d'analyse

Délimitation de la zone à étudier (ROI)

Il faut ensuite délimiter la *Region of interest* (ROI) (2) pour que le programme ne calcule que les vitesses à utiliser (au niveau de la bathymétrie connue). Une zone rectangulaire est sélectionnée en restant appuyé avec le clic gauche de la souris.

Ensuite un ou plusieurs *mask* (3) peuvent être appliqués lorsque dans cette zone, il y a des éléments qui pourraient perturber le calcul des vitesses tels que des rochers, des branches, les berges, etc. Il suffit de délimiter un *mask* en plaçant plusieurs points autour de l'élément et double-cliquer sur le dernier point. Une fois les masques faits, il suffit de les appliquer (4) sur toutes les autres images de la vidéo.

Prétraitement d'image

PIVlab propose également un certain nombre de techniques de prétraitement d'image qui peuvent améliorer considérablement la qualité de l'analyse.

Pour ce faire, il faut cliquer sur *Analyses settings* (1) – > *Image pre-processing*. Le filtre *CLAHE* améliore localement le contraste des images. Les autres filtres de prétraitement peuvent également être utiles dans certains cas (luminosité élevée,...). Pour avoir plus d'informations sur les filtres, il suffit de déplacer le curseur de la souris sur le nom du filtre. Une fois les filtres sélectionnés, cliquez sur le bouton de pré-visualisation (2), pour appliquer le filtre à l'image courante et vérifier qu'ils optimisent le contraste pour une meilleure analyse.

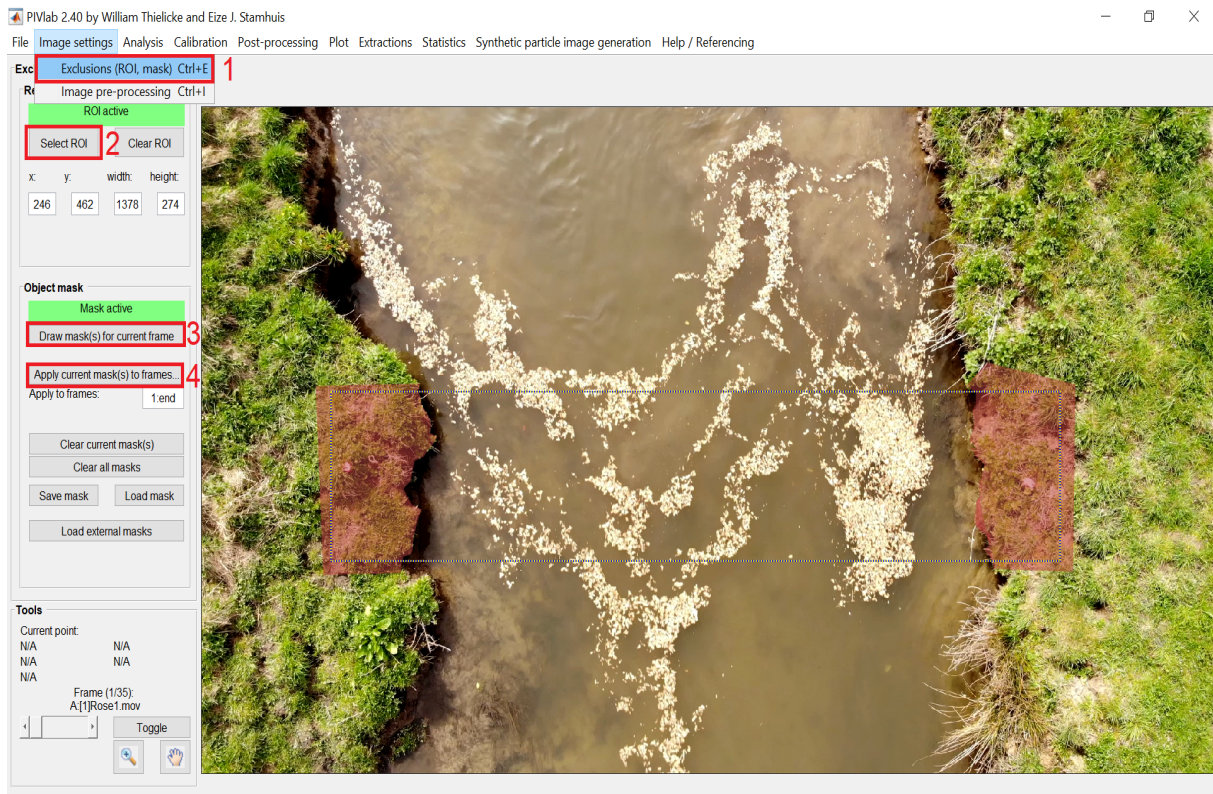


Figure A.2 – *PIVlab* (2.40) : image settings : exclusion (ROI).

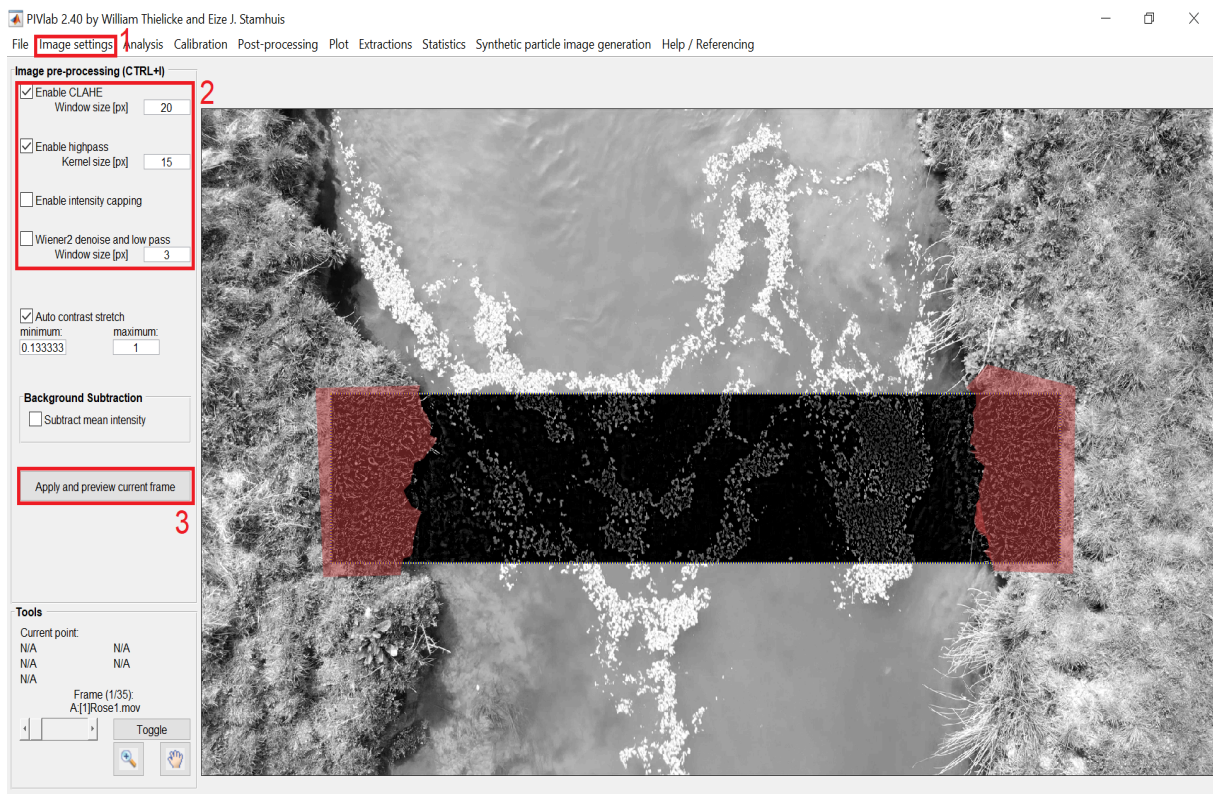


Figure A.3 – *PIVlab* (2.40) : image settings : image pre-processing.

PIV settings

En allant dans *Analysis* → *PIV settings* (1) l'algorithme d'analyse peut être choisi (2). *PIVlab* propose deux algorithmes de corrélations différentes, DCC (corrélation croisée directe en un seul passage) et déformation de fenêtre FFT (corrélation directe par transformée de Fourier avec plusieurs passes et fenêtres déformées). Ce dernier algorithme est activé par défaut et, dans la plupart des situations, il fournit les résultats les plus précis.

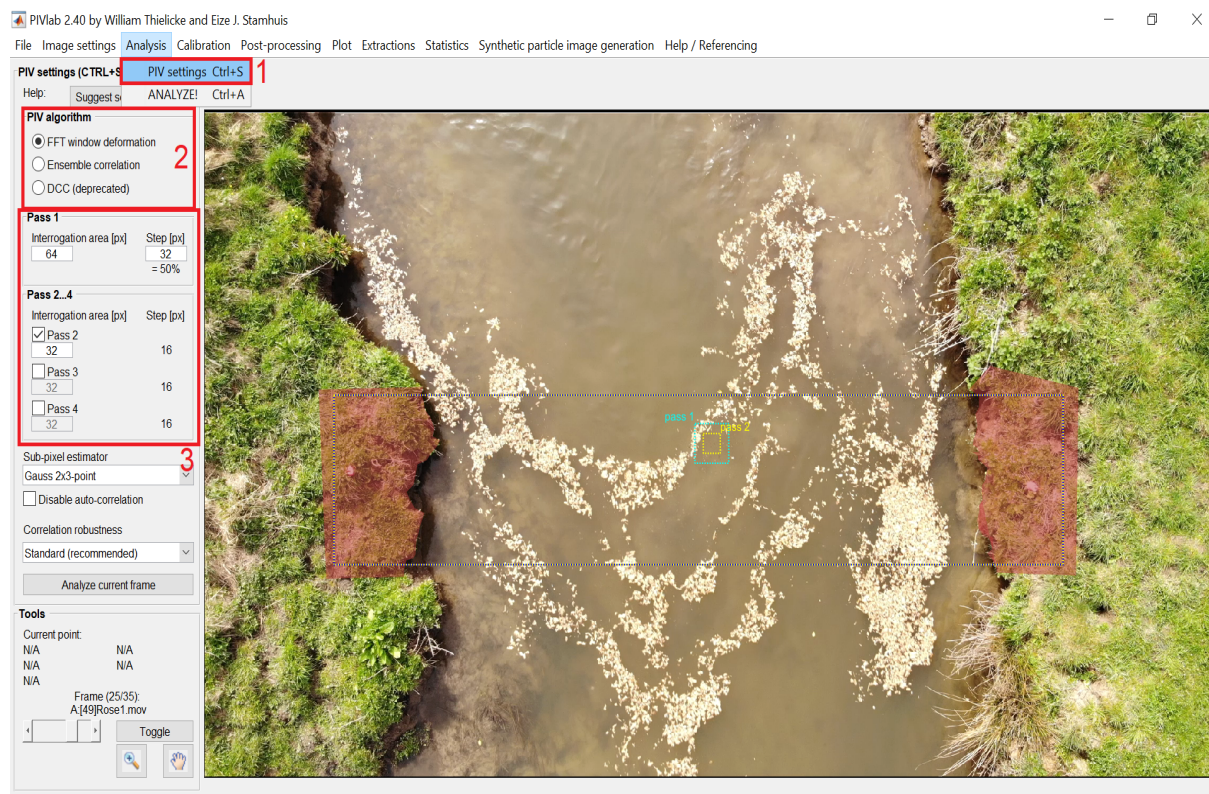


Figure A.4 – *PIVlab* (2.40) : PIV settings.

La taille en pixels des aires d'interrogation (3) peut également être choisie. Plus les zones d'interrogation sont grandes, meilleur est le rapport signal / bruit et plus la corrélation croisée est robuste. Mais de grandes zones d'interrogation ne donneront qu'une très faible résolution vectorielle ("vecteurs par image"). Nous laissons en général la taille par défaut mais cela dépend fortement du déplacement des traceurs entre deux images.

1.3. Étape 3 : calibration

Après avoir effectué l'analyse des images dans *Analysis* → *"ANALYZE!"*, il faut effectuer une calibration qui est indispensable. Cela permet d'obtenir une relation "pixel-mètre" et d'avoir des vecteurs vitesse en m/s.

Pour réaliser cette calibration, une distance de référence connue est sélectionnée en positionnant deux points (2), celle-ci correspond à la largeur totale de notre bathymétrie qui est la distance entre nos 2 plots roses.

Ensuite, cette distance est introduite en millimètres et le laps de temps entre 2 images successives en millisecondes (3). Dans notre cas, le laps de temps était de 25 fps (*frame per second*), et en ayant pris une image sur deux au moment d'importer la vidéo, on a donc 80 ms entre chaque image. Enfin, il ne reste plus qu'à appliquer cette calibration (4) pour avoir la relation pixel/mètre correspondante.

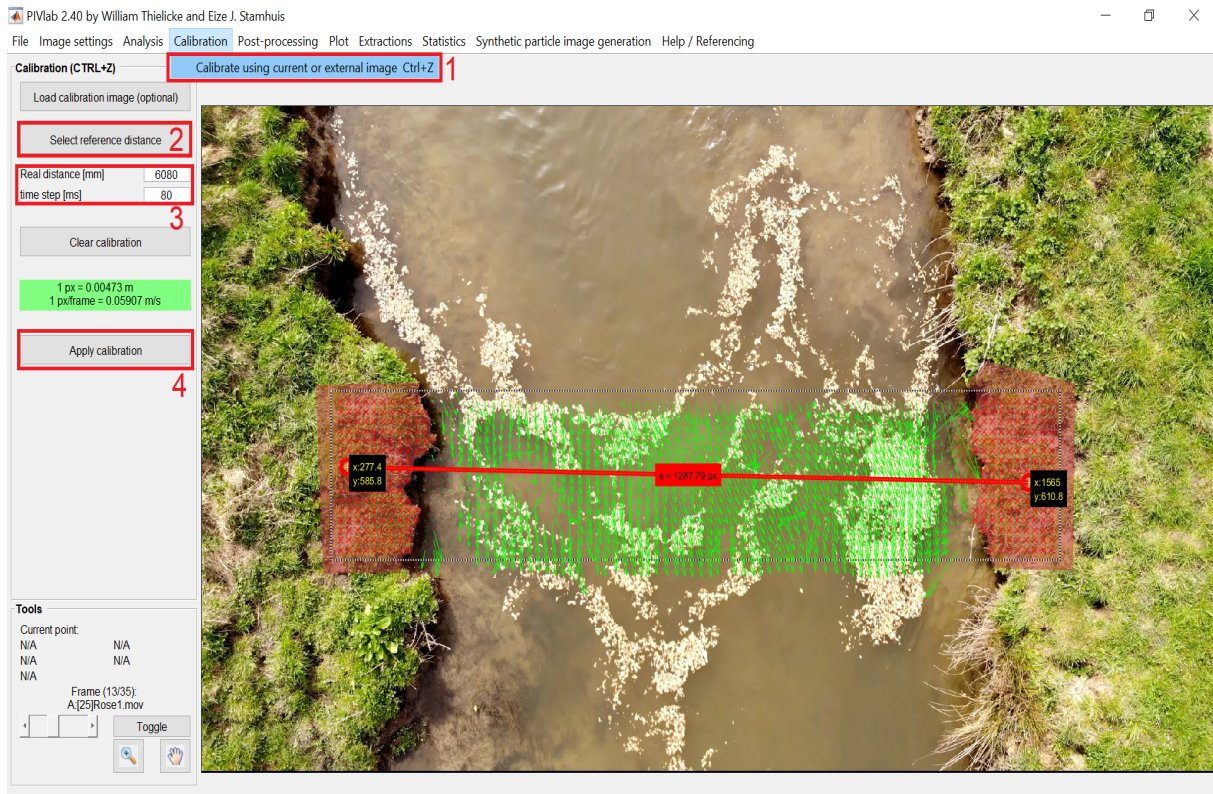


Figure A.5 – *PIVlab* (2.40) : calibration.

1.4. Étape 4 : validations des vecteurs

La *Vector validation* qui est proposée dans *PIVlab* comporte 4 méthodes de correction différentes qui peuvent être appliquées simultanément ou non :

1. Premièrement, une zone de vitesse (pour les 2 directions) peut être sélectionnée sur un nuage de points (1). Ici, la zone est choisie où la concentration de vitesse est la plus grande, tout en rejetant ainsi les vecteurs vitesses incohérents.
2. En second lieu, il y a la possibilité de supprimer les vecteurs dont les composantes verticales et horizontales sont trop éloignées de leur moyenne (2). Le programme calcule une moyenne μ et l'écart-type σ pour chaque composante. On choisit donc un n pour que les vecteurs dont une des composantes est plus grande ou plus petite que $\mu \pm n * \sigma$ soient supprimés.
3. L'autre possibilité (3) permet de supprimer les vecteurs dont l'amplitude est trop éloignée des amplitudes des vecteurs adjacents.

4. La dernière façon de rejeter certains vecteurs est de le faire manuellement. Elle n'est quasi jamais utilisée mais elle permet tout de même de supprimer les vecteurs qui semblent encore incohérents après avoir appliqué les 3 premières opérations.



Figure A.6 – *PIVlab* (2.40) : vector validation.

Pour visualiser le résultat d'une ou plusieurs opérations, il suffira d'appuyer sur *Apply to current frame*. Les vecteurs qui ont été modifiés apparaîtront en orange sur l'image courante.

Enfin, il faudra cliquer sur *Apply to all frames* pour appliquer ces modifications à l'ensemble des images.

1.5. Étape 5 : calcul d'une vitesse moyenne

Avant d'extraire les résultats, une moyenne sur l'ensemble des images analysées va être réalisée. Elle va permettre de corriger des petites erreurs aux endroits où les vitesses sont un peu plus faibles ou plus importantes par rapport à la réalité. Pour réaliser cette moyenne il faut aller dans le menu *Plot* –> *Temporal : Derive Parameters* (1). Ensuite, il suffit de cliquer sur le bouton *Calculate mean* (2) pour sortir une nouvelle image qui sera la moyenne de toutes les autres.

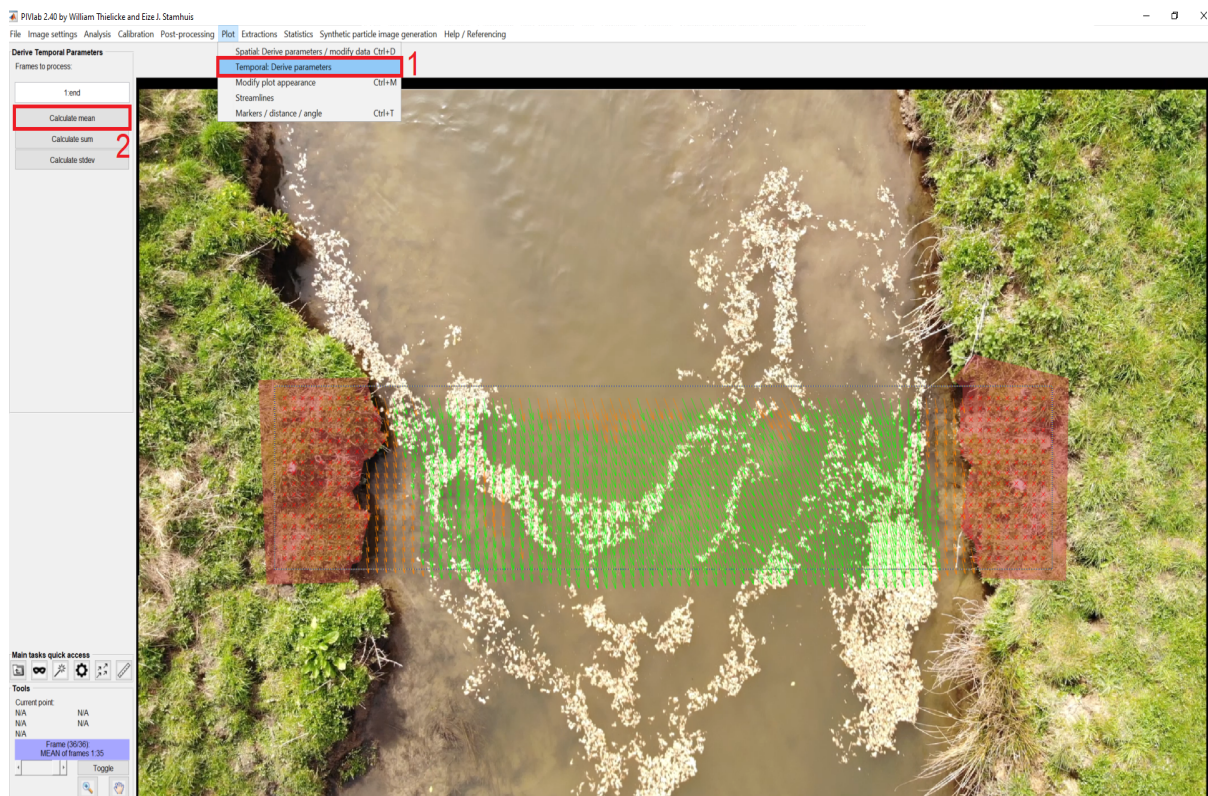


Figure A.7 – *PIVlab* (2.40) : calculate mean.

1.6. Étape 6 : résultats et extraction

Pour terminer l'analyse sur *PIVlab*, il est nécessaire maintenant, d'extraire les résultats. Pour ce faire, il faut aller dans *Extractions* – $\rightarrow$ *Parameters from poly-line* (1). Ensuite, une *poly-line* le long de la bathymétrie connue doit être tracée en cliquant sur *Draw* (2). Il faut ensuite placer les points aux deux extrémités de cette ligne en faisant attention qu'elle soit tracée dans le bon sens par rapport à la bathymétrie. Dans notre cas, le point zéro de la bathymétrie commence sur la rive gauche, donc le premier point est à placer à droite de l'image et le second à gauche, afin que les axes de vitesses soient dans le même sens que ceux de la bathymétrie. Une fois placés, un clic droit sur l'image permet de terminer et quitter le traçage.

Pour pré-visualiser les vitesses sur un graphe, il suffit de sélectionner *Velocity magnitude [m/s]* dans le menu déroulant et de cliquer sur *Plot data* (3). Finalement, il est possible d'exporter les résultats dans un fichier texte (.txt) en cliquant cette fois-ci sur *Save result as text file(s)*.

Une fois ce fichier texte obtenu, il faut l'exporter en fichier Excel (.xlsx) pour ainsi retirer les vitesses nulles qui se trouvent sur les berges et replacer uniquement la ligne d'eau (ici entre 0.18m sur la rive gauche et 5.65m sur la rive droite). Après cela, il sera possible de l'utiliser dans le code MATLAB *DebitPIVlab.m* (voir annexe A.[Code]) et de déterminer le débit.

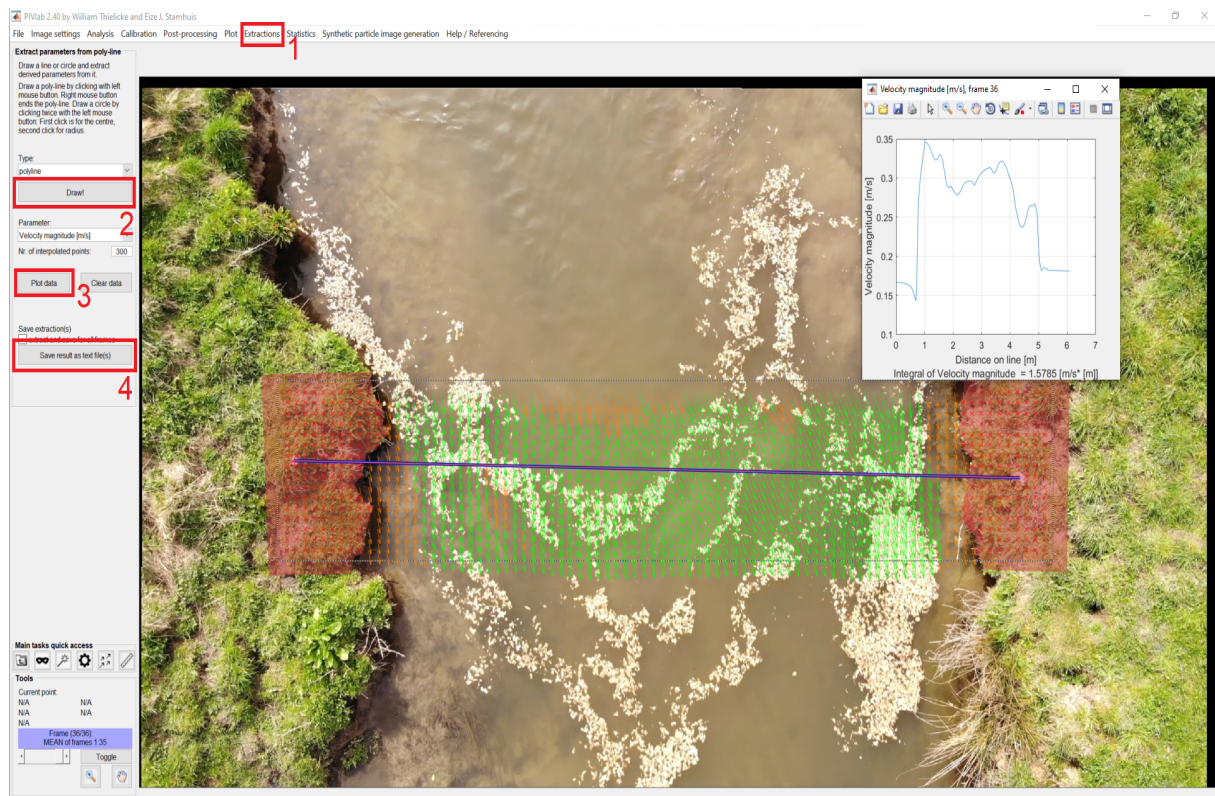


Figure A.8 – *PIVlab* (2.40) : exportation des coordonnées et amplitudes des vecteurs vitesses sur la ligne de bathymétrie.

2. Fudaa-LSPIV (v 1.7.3): manuel d'utilisation

Ce manuel d'utilisation reprend, de manière résumée, les différentes étapes qui nous ont été utiles pour le calcul du débit. Ce manuel est donc une version inspirée et adaptée du manuel officiel de *Fudaa-LSPIV* [33]. Contrairement à *PIVlab*, ce logiciel a été développé spécifiquement pour l'analyse de débit. Il a donc l'avantage de permettre une analyse complète sans recourir à d'autres logiciels.

2.1. Étape 1: importer des images ou une vidéo

Dans un premier temps, il faut soit importer une vidéo de l'écoulement de la rivière, soit importer une séquence de photos. Dans le cas de cette étude, une vidéo prise à l'aide du drone a été importée. Une fois cette vidéo importée, il est possible de choisir le nombre d'images que l'on garde "*Conserver une image sur...*". Comme montré au point 1.4, ce paramètre a une influence sur la précision des résultats finaux. Il faut aussi vérifier que le paramètre "*Nombre d'images par seconde*" corresponde au paramètre de la caméra utilisée. Les cases "*Instant de début (s)*" et "*Instant de fin (s)*" permettent de sélectionner une partie de la vidéo à importer. L'avantage est de permettre de sélectionner le moment de la vidéo où le drone bouge le moins ou, dans le cas de l'ensemencement, saisir le moment précis où les traceurs passent à travers la section étudiée.

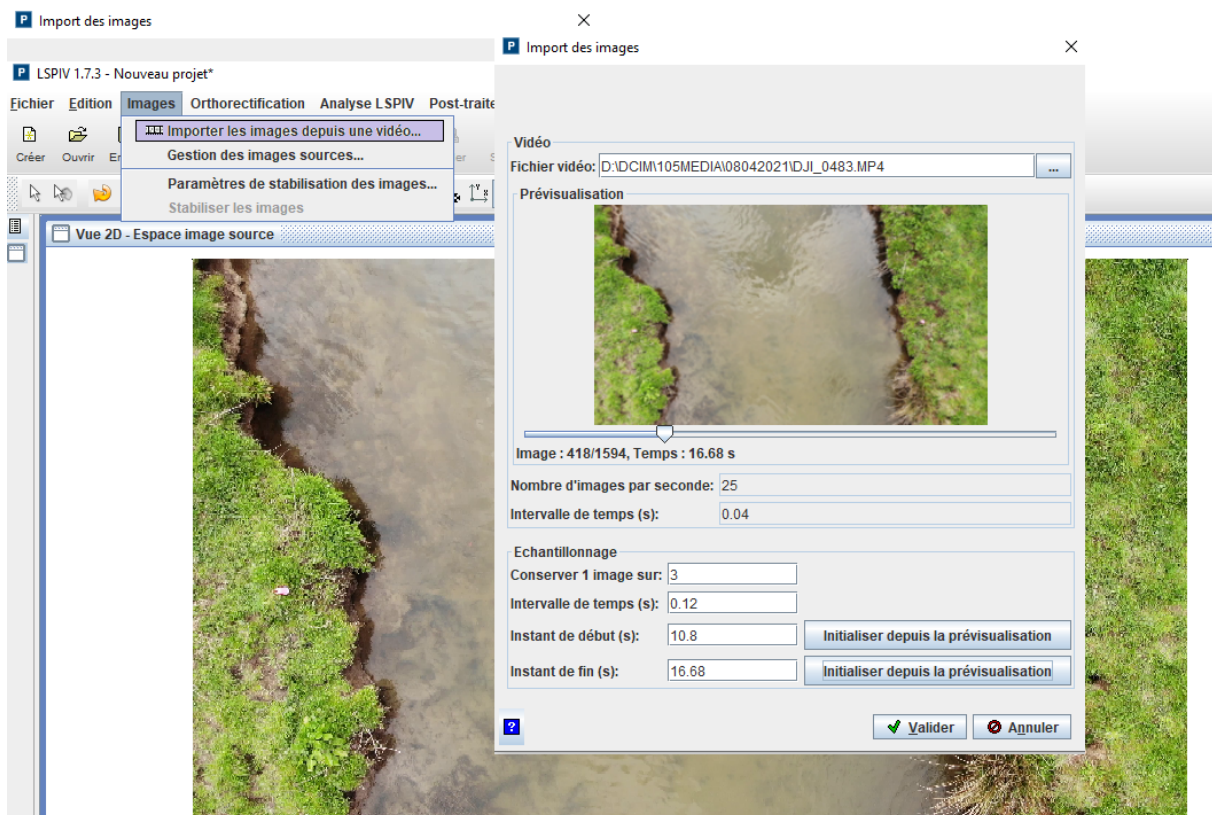


Figure A.9 – Importation de la vidéo

2.2. Étape 2: stabiliser la vidéo

La stabilisation permet que dans les résultats finaux, les vecteurs vitesses soient non nuls uniquement sur le plan d'eau et pas sur les berges. Pour ce faire, il faut se rendre à nouveau dans l'onglet "Image" et sélectionner "*paramètres de stabilisation des images*". Cocher la case "*Activer le module de stabilisation*" permet d'avoir accès aux différentes fonctionnalités.

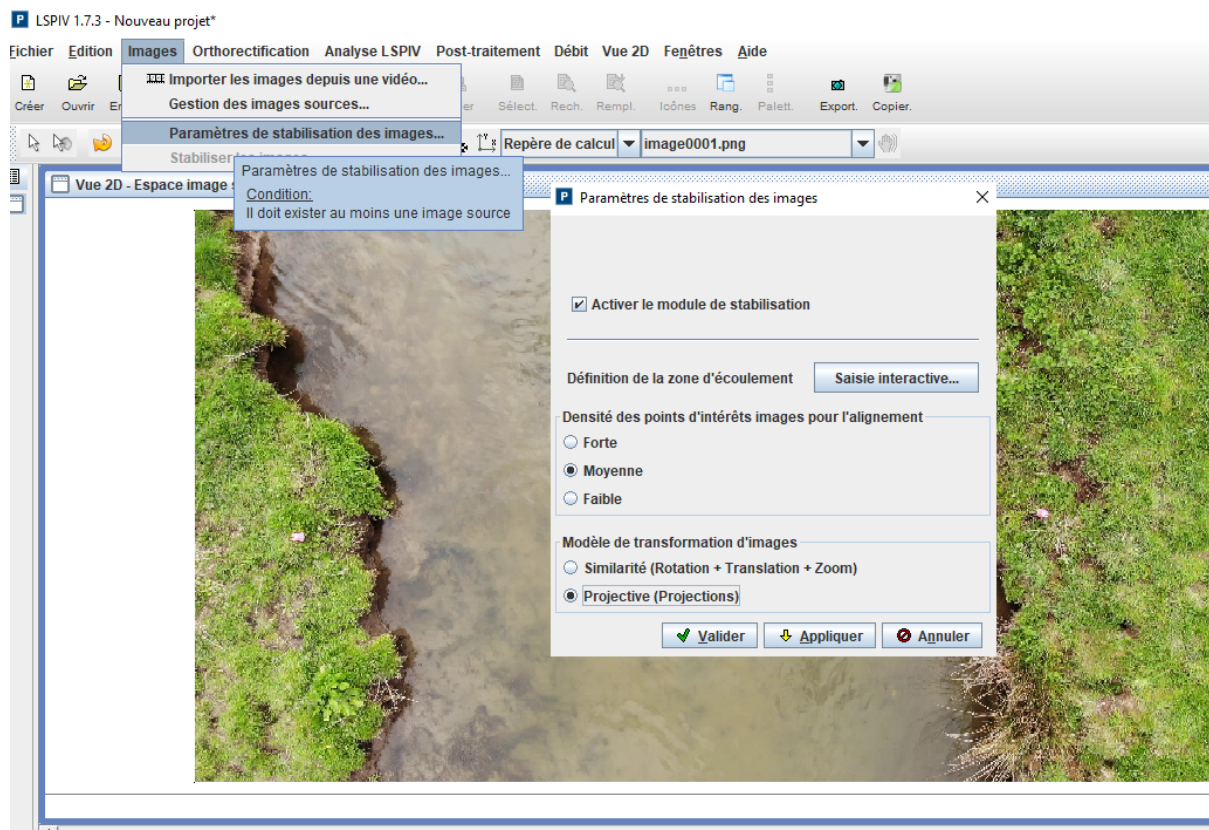


Figure A.10 – Stabilisation des images

Cliquer sur la case "*Saisie interactive*" permet d'appliquer un masque qui va couvrir la surface de la rivière de telle façon que le module de stabilisation ne se fie pas à cette partie de l'image pour stabiliser la vidéo.

Une fois ces coordonnées en $(x; y)$ obtenues, on peut y lier la coordonnée en z associée. Cette coordonnée est simplement la composante en z de la bathymétrie de la rivière.

Dans le point "*Densité des points d'intérêts images pour alignement*", il y a 3 choix. Une densité faible sera choisie dans le cas d'un environnement avec beaucoup de contrastes, des berges avec des textures bien identifiables etc. Dans le cas contraire, c'est-à-dire si les berges présentent très peu de contraste comme cela pourrait être le cas pour des berges entièrement bétonnées, il faudra choisir la cas avec une densité forte. Le choix de la densité de points d'intérêts influencera le temps de calcul et/ou la qualité de la stabilisation. Par exemple, choisir une densité faible pour des berges en béton lisse donnera de mauvais résultats. Par contre, choisir une densité forte pour des berges très contrastées augmentera le temps de calcul sans augmenter la qualité des résultats. Dans le cas des 4 sections étudiées dans ce travail, après différents tests, la densité de points moyenne a été choisie.

Le dernier paramètre, "*Modèle de transformation d'images*" doit être choisi en fonction du mouvement de la caméra. Si le mouvement entre les différentes images qui composent la vidéo est plus petit que 10 px alors on choisira la "*similarité*". Si le mouvement est plus grand que 10 px on devra prendre la "*Projective*". Le paramètre "*Similarité*" permet d'avoir une meilleure stabilisation mais le paramètre "*Projective*" donne toutefois des résultats très satisfaisants et suffisamment précis dans le cadre de notre étude. De par nos expériences et le matériel dont nous disposons, nous avons opté pour la paramètre "*Projective*".



Figure A.11 – Masque sur la rivière

2.3. Étape 3: orthorectification

Comme expliqué au point 1.3., une orthorectification complète n'est pas nécessaire. En se rendant dans l'onglet "*Orthorectification*", il faut sélectionner "*Mode d'orthorectification*" suivi de "*Mise à l'échelle*".

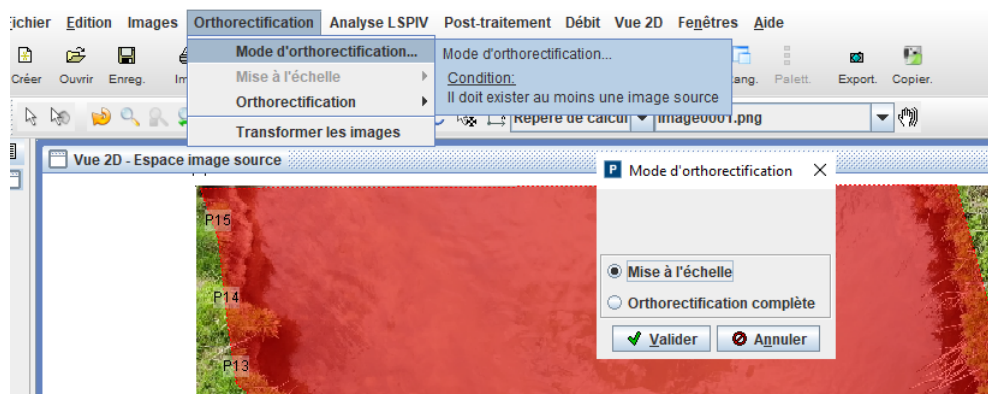


Figure A.12 – Mode d'orthorectification

"*Mise à l'échelle*" sera ensuite sélectionné dans l'onglet orthorectification. Une nouvelle fenêtre s'ouvre avec trois onglets "*Résolution*", "*Transformation*", "*Autres*".

L'onglet "*Résolution*" permet de donner au logiciel les informations nécessaires pour effectuer la conversion mètre/pixel. Cette conversion peut se faire en cochant "*Saisie par*

couple de points" suivit de *"Saisir un couple"*. Dans le cadre de ce travail, il n'y a qu'un seul couple de points qui a été sélectionné. Ce couple est constitué des deux points de bathymétrie extrêmes en rive droite/gauche et qui sont représentés par des plots roses sur l'image. Cette distance est connue et permet donc de trouver la résolution mètre/pixel. L'onglet *"Transformation"* n'est pas utilisé ici.

Dans *"Autres"*, le niveau d'eau est indiqué et la valeur des coins en X et Y peut être choisie. La plupart du temps, les valeurs par défaut ont été sélectionnées.

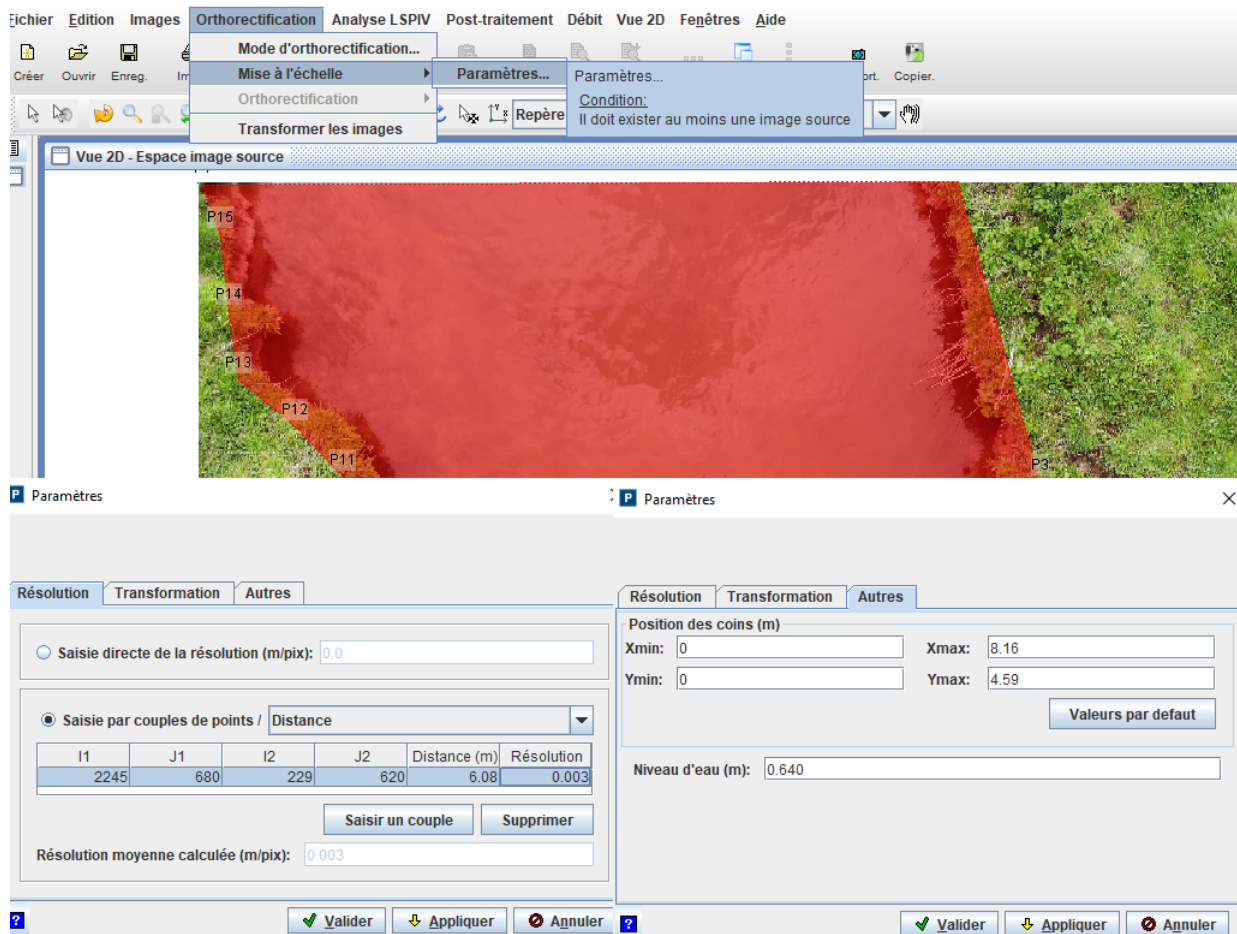


Figure A.13 – Mise à l'échelle

Cette étape se termine en transformant toutes les images via l'onglet *"Orthorectification"* → *"Transformer les images"*.

2.4. Étape 4: analyse LSPIV

En allant dans l'onglet *"Analyse LSPIV"*, *"Paramètres de calcul"* est sélectionné suivi de *"Définir"*. Une nouvelle fenêtre s'ouvre et permet de choisir les paramètres de l'aire d'interrogation et de l'aire de recherche. Le choix des dimensions de ces fenêtres est discuté au Point 1.4..

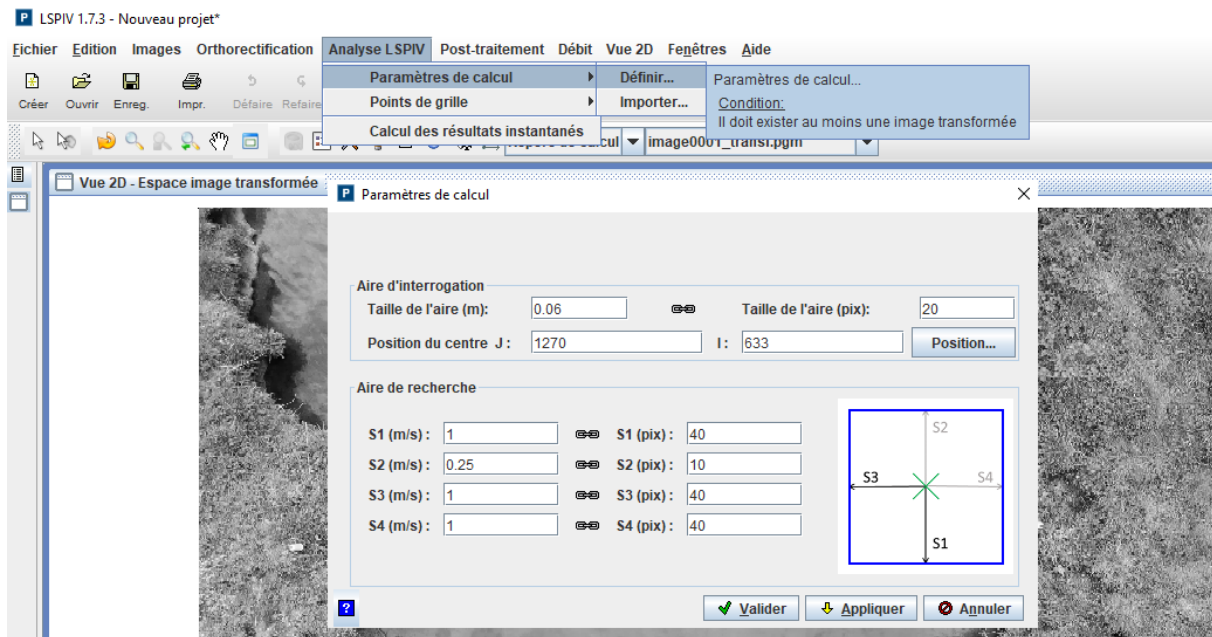


Figure A.14 – Paramètres de calcul LSPIV

Pour que le calcul des vitesses soit plus rapide, dans le cas d'un écoulement allant vers le bas, une dimension "S2" qui équivaut à la moitié de l'aire d'interrogation sera choisie. Cette hypothèse est prise en considérant que les traceurs ou les zones d'intérêts, se déplacent uniquement dans le sens de l'écoulement.

Avant d'effectuer le calcul des vitesses, l'endroit où les vitesses sont calculées doit être choisi. Cela se fait via les onglets "*Analyse LSPIV*" → "*Points de grille*" → "*Définir*".

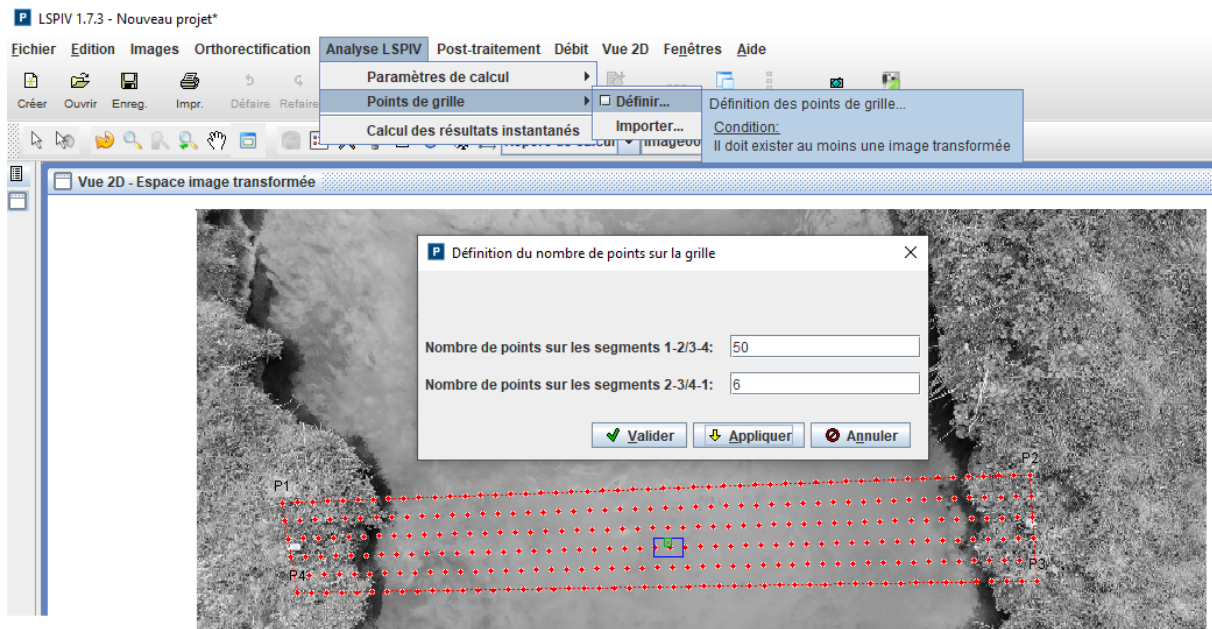


Figure A.15 – Point de grille

Un quadrilatère peut être défini dans lequel seront calculées les vitesses. Dans cette étude, il a été choisi que ce quadrilatère inclue une partie des berges. De cette façon, après le calcul des vitesses, il est possible de vérifier que les images aient été correctement

stabilisées. Si ce n'est pas le cas alors les vecteurs vitesses sur les berges ne seront pas nuls et il sera nécessaire de recommencer l'analyse vidéo à l'étape "Stabilisation".

La densité des points et la dimension du quadrilatère seront choisies par l'utilisateur en fonction de la précision souhaitée.

Cette étape se termine en sélectionnant, toujours dans l'onglet "Analyse LSPIV", la fonctionnalité "Calcul des résultats instantanés".

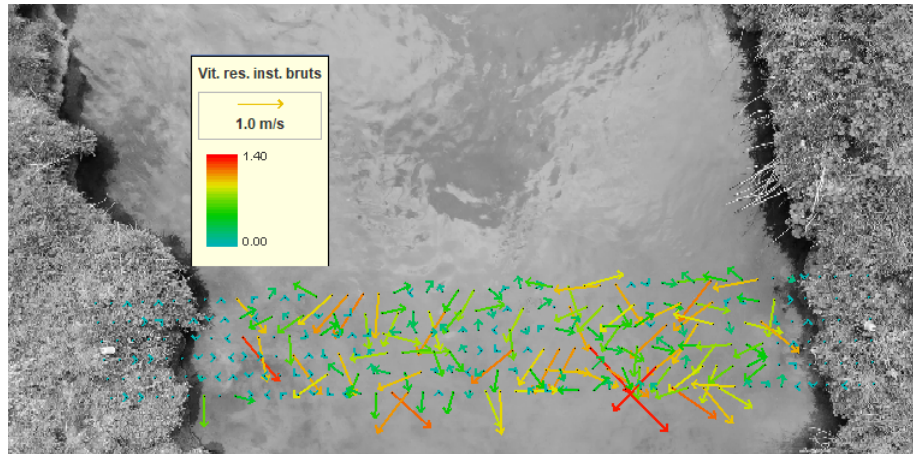


Figure A.16 – Vitesse LSPIV

2.5. Étape 5: post-traitement

L'étape de post-traitement permet de filtrer les valeurs de manière à éliminer les données qui semblent impossibles et de cette façon obtenir de meilleurs résultats.

En se rendant dans l'onglet "Post-traitement", sélectionner "Filtrages des résultats instantanés".

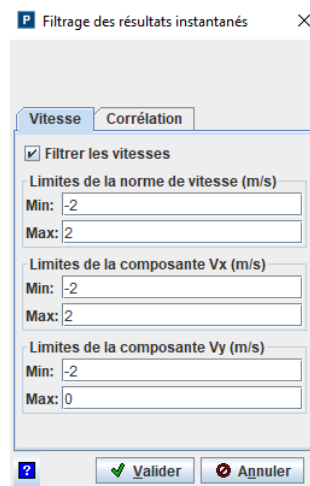


Figure A.17 – Filtrage des vitesses

Dans l'onglet vitesse de la fenêtre présenté à la Figure A.17, des limites peuvent être données pour les différentes composantes de vitesses. Dans *Fudaa-LSPIV* les abscisses sont positives vers la droite et les ordonnées positives vers le haut. Dans le cas d'un écoulement vers le bas, il faudra donc empêcher les vecteurs vitesses dans la direction y positif, comme c'est le cas dans l'exemple de la Figure A.17.

Les valeurs des limites doivent être choisies avec précaution. C'est à l'utilisateur de juger la vitesse limite qui sera la plus appropriée. De manière pratique, dans un premier temps une limite de vitesse très large est appliquée. Le nombre de vecteurs qui atteignent cette limite est ensuite observé. Si peu ou pas de vecteurs atteignent cette limite alors on pourra appliquer une nouvelle limite de vitesse plus basse. Attention toutefois à ne pas diminuer de trop cette valeur pour ne pas supprimer des données correctes.

L'onglet "*Corrélation*" permet d'ajuster la corrélation entre les motifs de l'aire d'interrogation de l'image i et l'aire d'interrogation de l'image $i + 1$. Dans ce mémoire, ce paramètre sera laissé par défaut.

Après ce filtrage des vitesses, la moyenne des vitesses sur toutes les images sera effectuée. Pour cela dans l'onglet "*Post-traitement*", sélectionner "*Moyenne des résultats instantanés filtrés*". Dans la fenêtre qui s'ouvre (voir Figure A.18), tous les résultats des images sont sélectionnés. En parcourant une image à la fois, on peut se rendre compte de la validité ou non des vecteurs vitesses calculés pour l'image sélectionnée. Si les vecteurs ne semblent pas valables, on peut alors désélectionner l'image du calcul des vitesses moyennes. Dans l'exemple de la Figure A.18, le résultat de l'image 1 et 2 sont désélectionnés.

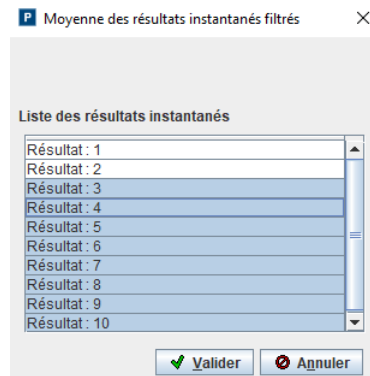


Figure A.18 – Moyenne des résultats filtrés

2.6. Étape 6: calcul du débit

Avec les vitesses moyennes, il manque l'aire mouillée pour pouvoir calculer le débit. L'onglet "*Débit*" de *Fudaa-LSPIV* permet d'importer un "traverse" (voir Figure A.19). Un transect est en réalité la bathymétrie de la rivière.

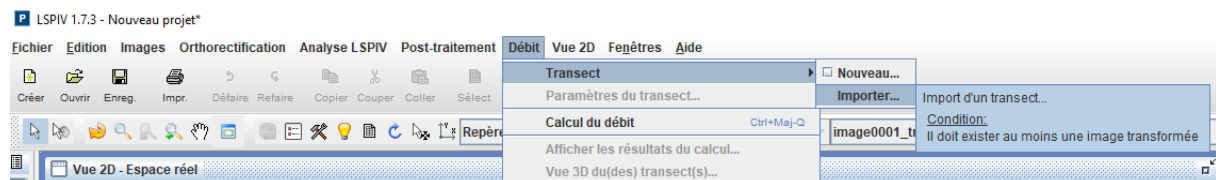


Figure A.19 – Import du transect

Pour pouvoir importer ce transect dans *Fudaa-LSPIV*, il sera nécessaire d'adapter les données de la bathymétrie relevées sur le terrain au système de coordonnées $(x; y)$ utilisées par le logiciel LSPIV. Les coordonnées en $(x; y)$ des plots qui se situent de part et d'autre de la rivière sont donc saisies. Ces plots délimitent les points extrêmes du relevé

bathymétrie effectué sur le terrain. Si X_0 et Y_0 sont respectivement les coordonnées en x et y du plot situé sur la rive gauche et X_n , Y_n les coordonnées du plot situé sur la rive droite, alors les valeurs de la première colonne du fichier transect sont calculées de cette façon :

$$X_i = \frac{(X_n - X_0)}{n} + X_{i-1} \quad (\text{A.1})$$

avec n correspondant aux nombres de points de bathymétrie relevés sur le terrain. Les coordonnées en y sont obtenues avec le même principe.

Une fois ces coordonnées en $(x; y)$ obtenues, la troisième colonne correspond aux coordonnées en z des points de bathymétrie de la rivière relevés sur le terrain. Il sera parfois nécessaire de modifier ces composantes z afin de s'assurer que le point le plus bas de la bathymétrie soit en $z = 0$. Un dernier élément que doit inclure le fichier "transect" est la valeur du coefficient α qui peut être donné pour chaque point de bathymétrie.

La disposition du fichier ".dat" à importer est tel que montré sur la Figure A.20. Avec x, y, z et α respectivement la première, deuxième, troisième et quatrième colonne.

4.55	3.21	1.354	0.85		
4.702777778		3.245740741		0.969	0.85
4.855555556		3.281481481		0.775	0.85
5.008333333		3.317222222		0.328	0.85
5.161111111		3.352962963		0.301	0.85
5.313888889		3.388703704		0.35	0.85
5.466666667		3.424444444		0.224	0.85
5.619444444		3.460185185		0.15	0.85
5.772222222		3.495925926		0.163	0.85
5.925	3.531666667	0.218	0.85		

Figure A.20 – Exemple de fichier .dat

Une fois le transect importé, il est alors possible de calculer le débit. Les caractéristiques du transect peuvent être modifiées afin d'obtenir des résultats plus précis.

2.7. Étape 7: exportation des données

Il est possible d'exporter les données de vitesses moyennes qui ont servi au calcul du débit en sélectionnant dans la partie "Calques", les vitesses moyennes puis "Tableau de valeurs" suivi de "Exporter". Ces vitesses sont exportées en fichier ".xls" qui peut être ouvert avec Excel.

Le type de fichier Excel qui en ressort est illustré sur la Figure A.21.

	A	B	C	D	E	F
1	Indices	X	Y	Norme	Vx	Vy
2	1	8,389	1,86	0,018682	-0,005	-0,018
3	2	8,384	1,862	0,028071	0,002	-0,028
4	3	8,336	1,874	0,024021	0,001	-0,024
5	4	8,288	1,887	0,024021	0,001	-0,024
6	5	8,24	1,9	0,028071	0,002	-0,028
7	6	8,215	1,906	0,043174	-0,01	-0,042
8	7	8,191	1,913	0,045607	-0,012	-0,044
9	8	8,143	1,925	0,048466	-0,018	-0,045
10	9	8,095	1,938	0,164694	-0,068	-0,15
11	10	8,047	1,951	0,139617	-0,058	-0,127
12	11	7,999	1,963	0,155641	-0,068	-0,14
13	12	7,975	1,97	0,169941	-0,076	-0,152
14	13	7,95	1,976	0,213825	-0,1	-0,189

Figure A.21 – Fichier des vitesses moyennes

Pour pouvoir comparer ces données avec des données d'autres logiciels, il sera préférable de changer le système de coordonnées $(x; y)$. On passera d'un système de coordonnées qui prend comme axes $(x; y)$ la largeur et la hauteur de l'image dans le cas de *Fudaa-LSPIV* à un système d'axe (x', y') qui sera positionné en fonction de la bathymétrie. Dans ce nouveau système d'axe le point $(0; 0)$ correspond à la limite en rive gauche de la bathymétrie, l'axe x' est concourant avec la droite qui relie les deux points extrêmes de la bathymétrie et l'axe y' est perpendiculaire à l'axe x' et parallèle à l'écoulement (voir Figure A.22).



Figure A.22 – Changement de repère

Ce changement de repère se fait via la formule

$$x'_{max} = \sqrt{(x_1 - x_{\text{Bathy droite}})^2 + (y_1 - y_{\text{Bathy droite}})^2} \quad (\text{A.2})$$

$$x'_{min} = L_{\text{Bathy}} - \sqrt{(x_n - x_{\text{Bathy gauche}})^2 + (y_n - y_{\text{Bathy gauche}})^2} \quad (\text{A.3})$$

avec :

- x_1 et y_1 , les coordonnées en (x,y) à l'indice 1 dans le fichier Excel (voir Figure A.21);
- x_n et y_n , les coordonnées en (x,y) à l'indice n dans le fichier Excel comportant n indices (voir Figure A.21);
- $x_{\text{Bathy droite (gauche)}}$ et $y_{\text{Bathy droite (gauche)}}$, les coordonnées en (x,y) de la limite de la bathymétrie à droite (gauche) sur l'image;
- L_{Bathy} , la largeur totale de la bathymétrie.

3. Base de données

Dans cette partie, nous allons expliquer en détail comment utiliser la base de données implémentée sur Excel par NICOLAS BREELS et STÉPHAN MARNEFFE [51].

Cette base de données est un outil permettant d’avoir un stockage structuré de toutes les mesures effectuées par les différents étudiants qui ont réalisé, ou qui poursuivront, les recherches sur le développement de techniques d’imagerie afin de déterminer des débits en rivière.

Quelques précisions sont d’ailleurs à prendre en connaissance avant son utilisation :

- Les macros de la base de données fonctionnent en local uniquement. Excel Online ou One drive ne permettront donc pas de l’utiliser correctement.
- Un seul utilisateur peut l’utiliser en même temps. Veillez à vérifier que vous êtes bien seul lorsqu’une modification est apportée.
- La totalité des documents doit se trouver dans un même dossier. Pour transférer et partager la base de données, il est préférable d’utiliser un dossier compressé regroupant l’ensemble des fichiers. Une fois que le dossier compressé est réalisé, il ne reste plus qu’à le nommer à la date de compression, soit par exemple *Base_de_données-2021_05_12*.
- Il faut également activer les macros et autoriser les modifications du fichier Excel lorsqu’il est téléchargé depuis internet.

3.1. Structure de la base de données

Sur la Figure A.23 de Breels et Marneffe, on retrouve tout le squelette de la base de données.

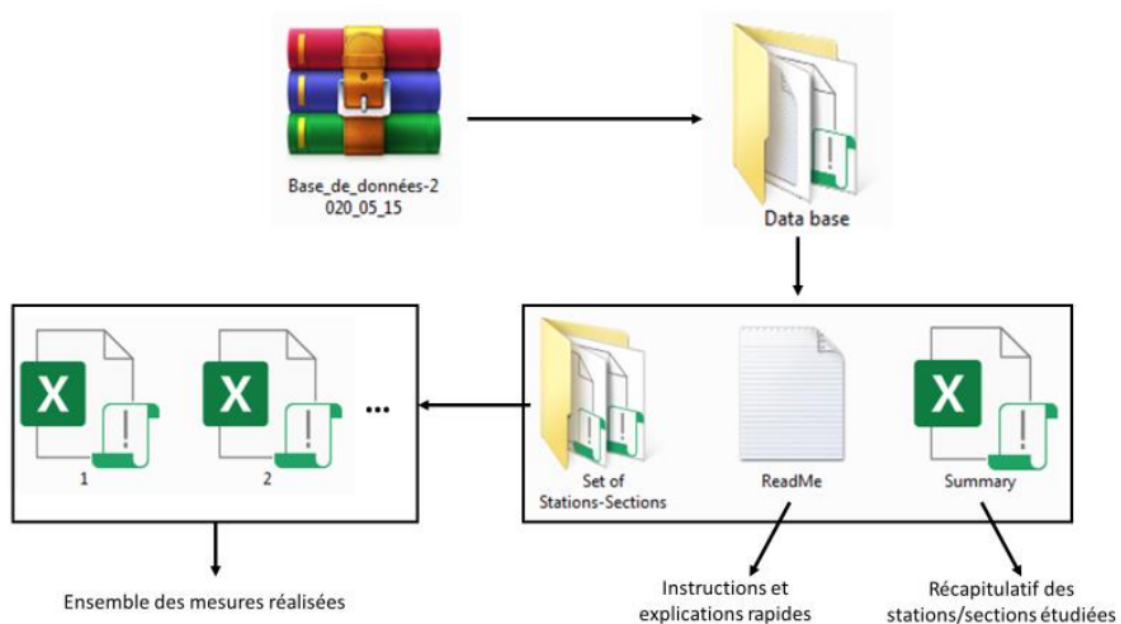


Figure A.23 – Structure de la base de données [51].

Lorsque le fichier compressé est extrait, on se retrouve avec un dossier *Data base*. Ce fichier est composé de 3 éléments :

1. Un classeur Excel *Summary* qui reprend la liste des différents sites étudiés.
2. Un fichier texte, *ReadMe*, regroupant quelques instructions et des conseils pour l'utilisation de la base de données.
3. Un dossier *Set of Stations-Sections* contenant l'ensemble des fiches des différents sites étudiés sous forme de classeurs Excel. Ils rassemblent l'ensemble des mesures collectées sur les sites étudiés.

3.2. Récapitulatif des stations/sections étudiées

Pour entrer dans la base de données, il suffit uniquement d'ouvrir le classeur Excel *Summary*. À partir de ce classeur, on peut accéder à l'ensemble des données récoltées. Ce document présente un tableau reprenant la liste des stations déjà étudiées, et 2 boutons pour ajouter ou modifier une station/section comme on peut le voir sur la Figure A.24. *Summary* est un classeur protégé, pour plus d'information sur son fonctionnement interne, vous pouvez consulter l'annexe 6 dans le travail de Breels et Marneffe [51].

Récapitulatif des stations/sections étudiées lors de la détermination des débits par photogrammétrie

ID	Nom du cours d'eau	Voie navigable ?	Station/Section			Double clic pour ouvrir	
			Localité	Référence SPW	Coordonnées Lambert		
					X	Y	
1	Thyle	Non	Suzeryl (1490)	L5460	163.837	146.834	Ouvrir
2	Orne	Non	Blamont (1450)	L7520	169.285	145.098	Ouvrir
3	Lasne	Non	Rosières (1331)	L7530	163.103	158.162	Ouvrir
4	Ligne	Non	Saint-Martin (5190)	L5570	169.937	132.807	Ouvrir
5	Biran	Non	Wanlin (5564)	L7190	199.399	94.416	Ouvrir
6	Train	Non	Archennes (1390)	L7620	172.055	159.931	Ouvrir
7	Dyle	Non	Florival (1390)	L6160	169.653	161.044	Ouvrir
8	Dyle	Non	Limelette (1342)	L6140	164.64	152.777	Ouvrir
9	Dyle	Non	Noirhat (1490)	L6640	161.878	146.765	Ouvrir

Ajouter une nouvelle station/section

Modifier une station/section

Figure A.24 – Classeur Excel *Summary*.

Ce tableau contenant la liste des stations/sections déjà étudiées est divisé en plusieurs colonnes :

- *ID* : identifiant unique attribué au classeur Excel de la station/section lorsque celle-ci est ajoutée.
- *Nom du cours d'eau* : nom du cours d'eau sur lequel des mesures ont été récoltées.
- *Voie navigable* : précision sur la navigabilité du cours d'eau étudié.

- *Station/Section* : partie regroupant des informations sur une station que l'on peut retrouver directement sur le site Aqualim du SPW [58].
 - *Localité* : nom de la ville et code postal de la station/section étudiée.
 - *Référence SPW* : référence de la station se trouvant non loin de la section étudiée. Si aucune station du SPW ne s'y trouve, pas de référence.
 - *Coordonnées Lambert* : géoréférencement de la station, situé au point 0 de la mire, en coordonnées Lambert.
- *Double clic pour ouvrir* : cette dernière colonne reprend des cellules permettant d'accéder au classeur Excel portant le nom de l'ID correspondant, en double-cliquant sur celles-ci. Une fois le double-clic effectué, le programme ouvre une fenêtre pour confirmer l'ouverture du classeur sélectionné. La première fois qu'on ouvre un classeur, une fenêtre de dialogue s'ouvre avec des conseils pour remplir la fiche de la station correspondante.
Ce document ne peut pas être modifié librement par l'utilisateur. Il faut qu'il utilise les 2 boutons prévus pour ajouter ou modifier une station/section. Lorsque l'utilisateur va cliquer sur un des 2 boutons, une série de fenêtres de dialogues vont s'ouvrir avec un commentaire qui sert d'explication sur ce qu'il faut entrer comme information.

3.3. Classeur Excel d'une station/section spécifique

Une fois que l'utilisateur a double-cliqué sur une station/section choisie dans *Summary*, un classeur avec l'ID de la section s'ouvre dans Excel. Celui-ci est composé de 3 types de feuilles différentes :

1. *Fiche signalétique* : Feuille qui reprend diverses informations sur la localisation de la station, des photos, un plan, et un résumé des différentes campagnes de mesures réalisées à cet endroit.
2. *Bathymétrie* : Feuille contenant l'ensemble des mesures liées à la section étudiée.
3. Feuille de type "*Date*" : Feuille qui regroupe l'ensemble des mesures et données prises sur le terrain hormis la bathymétrie. Le nom de ce type de feuille est celui de la date à laquelle les mesures ont été récoltées. Ces feuilles ne sont pas présentes lorsque la section est nouvelle. Pour en créer une nouvelle il faut se rendre sur la feuille "*Fiche signalétique*".

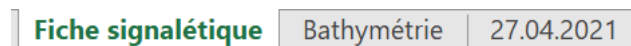


Figure A.25 – Feuilles dans un classeur Excel pour une station/section

Ces 3 types de feuilles sont expliqués plus en détails dans les sous-points suivants.

Fiche signalétique

Cette feuille Excel est divisée en 2 parties distinctes :

- La partie "*Fiche signalétique*" (voir Figure A.26) regroupe toutes les informations concernant la station/section. Celles-ci sont à rentrer manuellement. S'il s'agit d'une station, la plupart de ces informations se trouvent sur la site du SPW, Aqualim [58]. En cliquant sur le bouton "*Ajouter une première photo*", on ajoute en général, une photo de la station/section où les mesures sont récoltées et un plan pour mieux situer l'endroit.

<u>Fiche signalétique</u>	
<u>Localisation de la station</u>	
Localité	
Code Postal	
Nom du cours d'eau	
Bassin versant	
Superficie du bassin [km ²]	
Adresse	
Province	
Coordonnées Lambert (X,Y)	
Cours d'eau navigable ?	
Référence SPW	
Gestionnaire de la station	
Mise en service de la station	
Altitude du repère [m]	

Ajouter une première photo

Figure A.26 – Fiche signalétique.

- La partie "*Données disponibles*" (voir Figure A.27) reprend sous forme d'une liste, la date des campagnes de mesures et le nom de ceux qui les ont effectuées.

<u>Données disponibles</u>	
<u>Récapitulatif des données disponibles</u>	
Date ▼	Mesures réalisées par : ▼
25.04.2021	Chercheur1/Chercheur2

Ajouter un nouveau jeu de données

Modifier une date ou un nom

Rechercher/ouvrir une date

Figure A.27 – Données disponibles.

Afin d'ouvrir une nouvelle feuille "date" pour y rentrer des données, il faut cliquer sur "*Ajouter un nouveau jeu de données*". Des boites de dialogues vont s'ouvrir pour pouvoir rentrer les différentes informations. Il faut faire attention à bien encoder la date sous le bon format : "jj.mm.aaaa".

Le bouton "*Modifier une date ou un nom*" permet de corriger une erreur dans l'encodage de la feuille "date".

Enfin, le bouton "*Rechercher/ouvrir une date*" permet d'ouvrir la feuille "date" correspondante. Cette fonctionnalité peut également se faire en utilisant les flèches situées en haut de la colonne "Date" ou "Mesure réalisée par :".

Bathymétrie

Sur cette feuille, on retrouve en en-tête un premier cadre (voir Figure A.28) qui donne les consignes pour ajouter une nouvelle bathymétrie en précisant également la définition de chaque axe. Dans ce cadre, on a aussi un graphique permettant de comparer les différentes bathymétries relevées au fil du temps ou avec différents instruments.

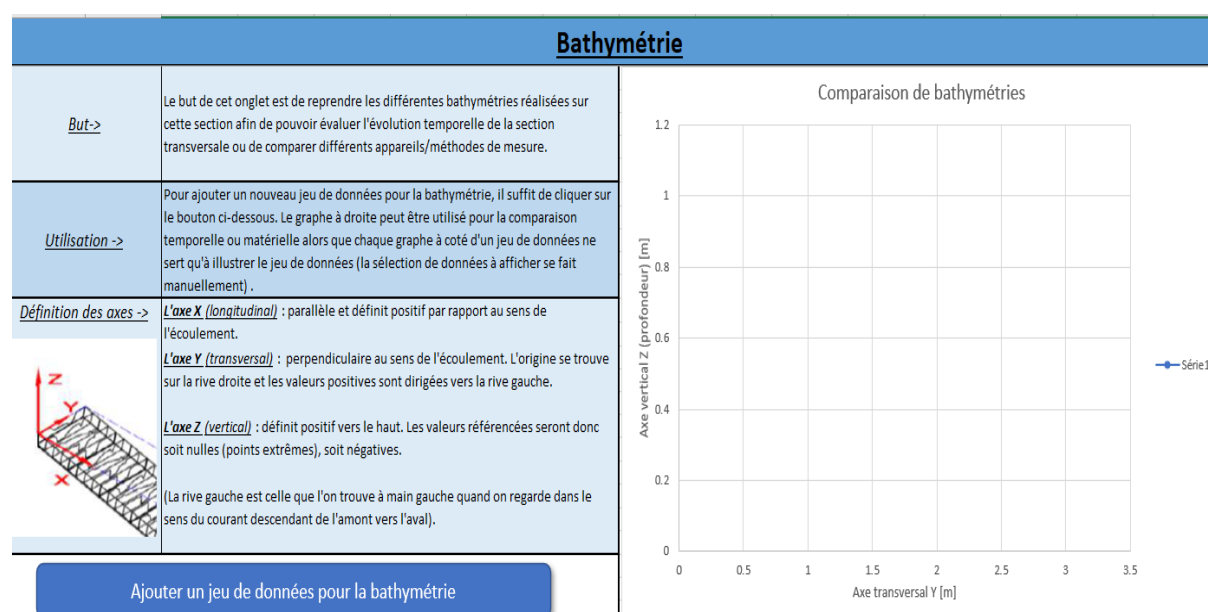


Figure A.28 – Entête de la feuille Excel "Bathymétrie".

Pour pouvoir encoder de nouvelles données, il faut cliquer sur le bouton "*Ajouter un jeu de données pour la bathymétrie*". Un nouveau cadre est alors créé correspondant à une nouvelle bathymétrie mesurée sur le terrain (voir Figure A.29). Un numéro est attribué automatiquement à cette bathymétrie, le reste des informations doit être complété manuellement par l'utilisateur. Une fois les données encodées, un graphique permet de visualiser la bathymétrie.

Données bathymétriques					
Bathymétrie 1	Bathymétrie n°	1	Date		
	Auteur(s) :				
	Appareil(s)/technique(s) utilisée(s)				
	Données pour la représentation graphique				
	Y [m]				
	Z [m]				
Commentaires					

Figure A.29 – Cadre pour encoder une nouvelle bathymétrie.

Feuille de type "Date"

Enfin, les feuilles de type "date" sont les seules non-protégées et permettent d'organiser comme le souhaite l'utilisateur la façon de stocker les mesures qu'il a effectuées. Tout de même, pour avoir une uniformisation dans les mesures, un canevas est proposé et est composé de quatre parties (voir Figures A.30 à A.33) qui sont :

1. Le niveau d'eau

Niveau d'eau				
Valeur Photoscan :		[m]	Commentaire	
Echelle limnimétrique :		[m]	Commentaire	
Autre		[m]	Commentaire	

Figure A.30 – Feuille Date - Niveau d'eau.

2. Les mesures de vitesse en surface et de section

Mesure de vitesse (en surface, de section,...)				
Méthode/Appareil n° 1	Unité de mesure	Commentaire sur les limites/points des berges	Pour une mesure en surface, mettez le vecteur vitesse et pour une mesure de section, mettez la matrice de vitesses (la définition des axes est la même que pour la bathymétrie) + graphiques si nécessaire	
	[m/s]			
	Commentaire			
Méthode/Appareil n° 2	Unité de mesure	Commentaire sur les limites/points des berges	Pour une mesure en surface, mettez le vecteur vitesse et pour une mesure de section, mettez la matrice de vitesses (la définition des axes est la même que pour la bathymétrie) + graphiques si nécessaire	
	[m/s]			
	Commentaire			

Figure A.31 – Feuille Date - Mesures de vitesse.

3. Les différentes valeurs de débit mesurées

<u>Valeurs des débits</u>				
Débit SPW		[m ³ /s]	<u>Commentaire</u>	
Débit calculé par méthode/appareil 1		[m ³ /s]	<u>Commentaire</u>	
Débit calculé par méthode/appareil 2		[m ³ /s]	<u>Commentaire</u>	
Débit calculé par méthode/appareil 3		[m ³ /s]	<u>Commentaire</u>	

Figure A.32 – Feuille *Date* - Valeurs de débit.

4. L'application *Discharge*

<u>Application Discharge</u>									
Si vous avez utilisé cette application, ajoutez vos valeurs, graphiques, photos et commentaires									

Figure A.33 – Feuille *Date* - Application Discharge.

Si l'utilisateur souhaite ajouter ou modifier une partie sur une feuille de type "date", il en a la possibilité.

4. Code MATLAB : détermination d'un débit avec le logiciel PIVlab

Le code MATLAB suivant, que nous avons implémenté, détermine un débit à partir d'une analyse PIV dans le logiciel *PIVlab*. Pour ce faire, il suffit de sortir un fichier ".txt" de *PIVlab* avec les coordonnées et les amplitudes des vecteurs vitesses situées sur la ligne de bathymétrie. Avec ces données exportées en fichier ".xls", les coordonnées de la bathymétrie, les informations sur le niveau d'eau et la largeur d'eau, et le coefficient de vitesse α , le code MATLAB sortira une valeur du débit.

```
1 function [DebitFinal]=DebitPIVlab()  
2  
3 %%  
4 %Donnees :  
5  
6 PIVdataX=xlsread("C:\sortie du 27-04-2021\Rosiere\Rose1","A2:  
    A273");  
7 %Importation des coordonnees en x des vecteurs vitesses de  
    PIVLAB  
8 PIVdataVelocity=xlsread("C:\sortie du 27-04-2021\Rosiere\Rose1  
    ","D2:D273");  
9 %Importation des amplitudes des vecteurs vitesses de PIVLAB  
10  
11 BathymetryX=xlsread("C:\Fiche de mesures 27-04-2021","Rosiere", "  
    A16:A57");  
12 %Importation des coordonnees en x de la bathymetrie  
13 BathymetryH=xlsread("C:\Fiche de mesures 27-04-2021","Rosiere", "  
    H16:H57");  
14 %Importation des coordonnees en z de la bathymetrie  
15  
16 HauteurEAU=0.43375; %[m] %Niveau d'eau max  
17 Xmin=0.19; %[m] %coordonnees en x minimum de la largeur d'eau  
18 Xmax=5.69; %[m] %coordonnees en x maximum de la largeur d'eau  
19 coefalpha = 0.924; %[] %coefficient de vitesse alpha adequat  
20 %%  
21  
22 %Calcul du debit :  
23  
24 BathymetryH=HauteurEAU-BathymetryH; %Niveau d'eau pour chaque  
    point x  
25 PIVdataVelocity=PIVdataVelocity*coefalpha;  
26 %Vitesses moyennes calculee a l'aide du coefficient de vitesse  
27  
28 n=1;  
29  
30 for i=1:length(BathymetryH) %Suppression des coordonnees de  
    niveaux d'eau negatives  
31     if BathymetryH(n)<0
```

```

32     BathymetryH(n) = [];
33     BathymetryX(n) = [];
34     else
35         n=n+1;
36     end
37 end
38
39 BathymetryH=[0;BathymetryH]; %Ajout niveau 0 a gauche de la
    largeur d'eau
40 BathymetryH(length(BathymetryH))=0;
41 %Ajout niveau 0 a droite de la largeur d'eau
42
43 BathymetryX=[Xmin;BathymetryX]; %Ajout coordonnee min de la
    largeur d'eau
44 BathymetryX(length(BathymetryX))=Xmax;
45 %Ajout coordonnee max de la largeur d'eau
46
47
48
49
50 VelocityMean=0;
51 VELOCITYMEAN=zeros(length(BathymetryX),1);
52 m=1;
53 div=1;
54
55 for j=2:length(PIVdataX) %Calcul des vitesses moyennes
    coorespondantes aux coordonnees de bathymetrie connues
56     if m==length(BathymetryX)
57         break
58     elseif (PIVdataX(j)) < ((BathymetryX(m)+BathymetryX(m+1))/2)
59         VelocityMean=PIVdataVelocity(j)+VelocityMean;
60         div=div+1;
61     else
62         if m==1
63             VELOCITYMEAN(m)=0;
64             VelocityMean=PIVdataVelocity(j);
65             m=m+1;
66             div=1;
67         else
68             VELOCITYMEAN(m)=VelocityMean/div;
69             VelocityMean=PIVdataVelocity(j);
70             m=m+1;
71             div=1;
72         end
73     end
74 end
75
76 DEBITS=zeros(length(BathymetryX)-2,1);

```

```

77
78 for k = 2:(length(DEBITS)+1) %Calcul des debits par tranche de
    section
79     Section(k-1)=((BathymetryX(k+1)-BathymetryX(k))+(BathymetryX
        (k)-BathymetryX(k-1)))/2*BathymetryH(k);
80     DEBITS(k-1)=Section(k-1)*VELOCITYMEAN(k);
81 end
82
83 DebitFinal=sum(DEBITS);%Somme des debits par tranche pour avoir
    debit total
84 xlswrite("1.xls",VELOCITYMEAN);
85 xlswrite("2.xls",Section);

```


UNIVERSITÉ CATHOLIQUE DE LOUVAIN

École polytechnique de Louvain

Rue Archimède, 1 bte L6.11.01, 1348 Louvain-la-Neuve, Belgique | www.uclouvain.be/epl