

École polytechnique de Louvain

Mesure de débit en rivière à partir de techniques d'imagerie combinant LSPIV et photogrammétrie

Auteurs : **Nicolas Breels, Stéphan Marneffe**
Promotrice : **Sandra Soares Frazão**
Lecteurs : **Charles Bielders, Olivier Carlier D'Odeigne**
Année académique 2019–2020
Master [120] : ingénieur civil des constructions

Abstract

For a long time now, people have tried to understand, measure and characterize rivers. The water flow is an important parameter. In fact, it plays an essential role in the design of infrastructures but also in the protection of the population and the environment when extreme events occur.

When the water flows are too high, traditional gauging methods are of no use. Besides, those methods are time-consuming and require specialized material which makes them expensive. In recent years, non-intrusive and contactless techniques have been developed and are of particular interest to the scientific community. However, those new techniques linking photogrammetry and hydraulics still involve a lot of adjustments to be completely functional.

This work presents a comparison between photogrammetrical software, water surface detection methods based on 3D models and a database which allow a centralization of information collected on the field. The aim of this publication is to complete, improve and automate the method developed at UCLouvain over the past few years.

Résumé

Depuis toujours, l'homme tente de comprendre, de mesurer et de caractériser les cours d'eau. Le débit des cours d'eau est un paramètre déterminant. En effet, celui-ci joue un rôle primordial tant dans la conception des ouvrages d'art que dans la protection de la population et du patrimoine lors d'événements extrêmes.

Lorsque les débits des cours d'eau sont trop élevés, les méthodes de jaugeage traditionnelles ne peuvent pas être utilisées. De plus, ces méthodes mobilisent beaucoup de temps et requièrent du matériel spécialisé, ce qui les rend onéreuses. Depuis quelques années, le développement de nouvelles techniques non intrusives et sans contact intéresse la communauté scientifique. Cependant, ces technologies liant photogrammétrie et hydraulique nécessitent encore un bon nombre d'ajustements pour être totalement opérationnelles.

Ce travail présente une comparaison entre logiciels photogrammétriques, des méthodes de détection de surface de l'eau sur des modèles 3D ainsi qu'une base de données qui permet de centraliser les informations relevées sur le terrain. L'objectif de cet ouvrage est de compléter, d'améliorer et d'automatiser la méthodologie développée depuis plusieurs années à l'UCLouvain.

Remerciements

Avant tout, nous tenons à remercier sincèrement les personnes qui ont participé, de près ou de loin, à la réalisation de notre travail de fin d'études, et tout particulièrement :

Madame S. Soares Frazão, notre promotrice, pour son dévouement, son suivi et ses nombreux conseils tout au long de l'année ;

Monsieur Feltz du Service Publique de Wallonie, pour ses conseils ainsi que le prêt de matériel ;

Le personnel du Laboratoire de Génie Civil et de la Faculté des Bioingénieurs pour le prêt de matériel ;

Messieurs Ch. Bielders et O. Carlier pour avoir accepté de faire partie de notre jury.

Enfin, nos remerciements s'adressent également à nos proches, pour leurs conseils et leur soutien tout au long de la réalisation de notre mémoire et plus particulièrement à nos parents, à Chloé et à Nicky pour la relecture de notre travail.

Nicolas Breels

Stéphan Marneffe

Juin 2020

INTRODUCTION

Depuis plusieurs années, Madame Soares Frazão, professeur et chercheuse à l'Université Catholique de Louvain au sein de l'IMMC, Institut de Mécanique, des Matériaux et du Génie Civil, mobilise des étudiants en vue d'établir une méthodologie de calcul de débit en rivière. Cette méthodologie, qui se veut non intrusive et sans contact, réunit deux sciences : l'hydraulique et la photogrammétrie. Depuis le début des campagnes de mesures sur le terrain, cette méthodologie se réalise en collaboration avec le Service Public de Wallonie, et plus précisément la Direction des Cours d'eau non navigables.

Dans le contexte actuel du réchauffement climatique, des événements extrêmes, de type crue ou étiage, se produisent de plus en plus fréquemment, et ce même dans des régions non-habituées. La caractérisation de ces phénomènes par la mesure de débit permet de se protéger et d'anticiper les problèmes qui en découlent.

La mesure de débit est une opération qui se fait depuis l'Antiquité. Les techniques traditionnelles ont montré leurs limites. En effet, dans certaines conditions, ces techniques mettent en danger les opérateurs et rendent l'utilisation du matériel difficile. Il en résulte que les mesures de débit en cas de crue sont peu nombreuses. Ceux-ci sont souvent extrapolés et des incertitudes quant à leur précision subsistent.

Afin de pallier à cette problématique, depuis déjà quelques années, la mesure de débit est réalisée par des méthodes non intrusives et sans contact. Ces méthodes offrent de nombreux avantages, notamment le fait de garantir la sécurité des opérateurs et des appareils de mesure, la rapidité de prises des mesures et la possibilité de mesurer des débits extrêmes.

Recourir aux nouvelles techniques d'imagerie et plus particulièrement à la photogrammétrie va s'avérer nécessaire. Bien que la combinaison de ces deux sciences, hydraulique et photogrammétrie, soit relativement récente, les résultats obtenus sont encourageants et leurs applications ne cessent d'évoluer. De plus, l'avènement des drones offre de nouvelles perspectives pour la prise d'images. Sur base de celles-ci, le débit pourra être estimé.

Pour calculer le débit d'un cours d'eau, il est nécessaire de connaître la section couverte par l'eau ainsi que la vitesse moyenne du flux passant au travers de cette section. Dans la méthodologie développée à l'UCLouvain, la photogrammétrie est utilisée pour déterminer la bathymétrie de la section analysée ainsi que la hauteur d'eau. Connaissant la hauteur de la surface libre et le profil de section du cours d'eau analysé, l'aire mouillée peut être calculée. Pour déterminer la vitesse moyenne de l'eau passant au travers de la section étudiée, la LSPIV, *Large Scale Particule Image Velocimetry*, une technique de traitement de photos/vidéos, est utilisée. Elle permet de calculer la vitesse de l'eau en surface. Il est important de noter que les vitesses de surface ne sont pas toujours représentatives de l'écoulement (fonction du vent, d'obstacles éventuels, ...). Cependant, en appliquant à ces vitesses de surface un coefficient de vitesse, une vitesse moyenne représentative de la section peut être obtenue. Enfin, en multipliant l'aire mouillée de la section par la vitesse moyenne calculée, on obtient le débit du cours d'eau. Cette méthodologie est appelée « méthode de l'UCLouvain » dans cet ouvrage.

Dans notre première partie, intitulée « Etat de l'art », nous présentons les techniques d'imagerie utiles pour la compréhension et l'utilisation de cette méthode, à savoir la photogrammétrie, la PIV et la LSPIV. Le dernier chapitre est consacré à la vitesse de l'eau, et plus particulièrement à la relation entre la vitesse moyenne en profondeur et la vitesse en surface.

Notre travail s'inscrit dans la continuité des mémoires réalisés par Bia et Somers (2018) sur l'étude de la PIV et le développement de la LSPIV, d'Hellebaut (2018) sur la détection du niveau d'eau à partir de modèles 3D et enfin d'Asselberghs et Peeters (2019) sur la mesure du niveau d'eau et de la vitesse de l'écoulement en rivière naturelle. Dans ce cadre, nous devions réaliser des mesures de débit en rivière et comparer nos résultats à ceux relevés aux stations limnimétriques du Service Public de Wallonie. Cette comparaison devait permettre de quantifier la précision de la méthode de l'UCLouvain. En parallèle, nous devions comparer deux programmes de photogrammétrie, à savoir Agisoft-PhotoScan, un logiciel commercial, et MicMac, un logiciel libre développé par l'IGN, Institut Géographique National français.

Mi-mars, le confinement lié au Covid-19 nous a obligés à revoir les objectifs de ce travail. En effet, nous ne pouvions plus aller prendre des mesures sur le terrain. En concertation avec Madame Soares Frazão, nous avons décidé de réaliser la comparaison des programmes de photogrammétrie sur les mesures réalisées antérieurement. En parallèle, nous avons développé des algorithmes pour détecter la hauteur d'eau, paramètre essentiel dans le calcul de débit. De plus, nous avons participé au challenge francophone de détermination de débit par jaugeage vidéo. Ce concours a été lancé pendant le confinement par Monsieur Le Coz, chercheur en hydraulique des rivières à l'INRAE Lyon-Grenoble. Sur base de vidéos, de bathymétries et d'autres données, nous devions calculer des débits.

Notre deuxième partie, intitulée « Réalisations », présente l'ensemble de nos travaux. Notre première et unique campagne de mesures fait l'objet du premier chapitre de cette partie. Le deuxième chapitre porte sur la base de données que nous avons créée. Celle-ci permet de centraliser les données des années antérieures et de faciliter l'accès aux différentes informations. Une fiche descriptive pour chacun des cours d'eau étudiés est établie. Le troisième chapitre présente le challenge de détermination de débits par jaugeage vidéo ainsi que nos résultats. Afin de tester deux logiciels de LSPIV, nous avons participé de manière individuelle à ce challenge. Une comparaison de ces logiciels, d'une part le logiciel PIVlab, logiciel utilisé dans la méthode de l'UCLouvain, et d'autre part le logiciel Fudaa-LSPIV, logiciel conçu pour la LSPIV, est également présentée. Le quatrième chapitre reprend les méthodes que nous avons développées pour détecter le niveau d'eau. Les principes des méthodes de la différence des bathymétries et de l'interpolation des bathymétries sont développés et les premiers résultats sont également présentés. Quant au dernier chapitre, il reprend la comparaison des programmes de photogrammétrie, à savoir Agisoft-PhotoScan et MicMac.

Dans la conclusion, vous trouvez nos recommandations pour des travaux futurs tant sur l'utilisation de notre méthode de détection de la ligne d'eau par interpolation des bathymétries que sur l'utilisation des logiciels de photogrammétrie et de LSPIV.

Liste des abréviations

ACDP	<i>Acoustic Doppler Current Profiler</i>
DEM	<i>Digital Elevation Model</i>
DGPS	<i>Differential Global Positioning System</i>
EDF	<i>Electricité De France</i>
GCP	<i>Ground Control Point</i>
GNSS	<i>Géolocalisation et Navigation par un Système de Satellites</i>
GRP	<i>Ground Referencing Point</i>
IA	<i>Interrogation Area</i>
INRA	<i>Institut National de la Recherche Agronomique</i>
INRAE	<i>« Fusion de l'INRA et de l'IRSTEA »</i>
iMMC	<i>Institut Mécanique, Matériaux et Génie Civil</i>
IRSTEA	<i>Institut de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture</i>
LSPIV	<i>Large Scale Particle Image Velocimetry</i>
MFPro	<i>Courantomètre à induction magnétique</i>
PIV	<i>Particle Image Velocimetry</i>
ROI	<i>Region Of Interest</i>
SfM	<i>Structure from Motion</i>
SPW	<i>Service Public de Wallonie</i>
SSIV	<i>Surface Structure Imaging Velocimetry</i>
UAS	<i>Unmanned Aerial Systems</i>
UAV	<i>Unmanned Aerial Vehicle</i>

Table des matières

INTRODUCTION.....	1
Liste des abréviations.....	3
ETAT DE L'ART	7
1. La photogrammétrie	7
1.1. Définition et évolution de la technique	7
1.2. Applications en hydraulique	9
1.3. Logiciels de photogrammétrie	12
2. La PIV – Particle Image Velocimetry	13
2.1. Définition et méthodologie.....	13
2.2. Evolution de la technique	16
3. La LSPIV – Large Scale Particle Image Velocimetry.....	17
3.1. Définition et méthodologie.....	17
3.2. Evolution de la technique	17
3.3. PIV versus LSPIV	19
3.4. Challenges	20
3.5. Atouts de la technique.....	29
3.6. Les logiciels d'analyse	30
4. La vitesse de l'eau	32
4.1. Distribution des vitesses au sein d'une rivière	33
4.2. Vitesse de surface versus vitesse moyenne.....	36
REALISATIONS	42
1. Mesure de débit - La méthode de l'UCLouvain	42
1.1. Description de la méthode.....	42
1.2. Première campagne de mesures - Février 2020	45
2. Base de données	47
2.1. Note importante avant utilisation	47
2.2. Architecture de la base de données	48
2.3. Récapitulatif des sites étudiés - <i>Summary</i>	49
2.4. Données spécifiques à une station/section	51
3. Vidéo Globe Challenge.....	55
3.1. Description du challenge.....	55
3.2. Les différentes étapes	56
3.3. Analyse de la sixième étape	56

3.4.	Résultats et observations.....	60
4.	Détection de la ligne d'eau sur un modèle numérique d'élévation	63
4.1.	Recherche de nouvelles méthodes	63
4.2.	Méthode de la différence de bathymétries.....	65
4.3.	Méthode de l'interpolation des bathymétries.....	74
4.4.	Création d'une interface avec Matlab	83
5.	Comparaison MicMac - Agisoft-PhotoScan	87
5.1.	Spécificités d'utilisation	87
5.2.	Comparaison du processus	87
5.3.	Comparaison des modèles obtenus.....	89
5.4.	Résultats de la comparaison	92
	CONCLUSION.....	93
	Liste des figures	95
	Liste des tableaux.....	98
	Bibliographie	99
	ANNEXES	103
1.	Appareils utilisés	103
1.1.	GOPRO Hero 6.....	103
1.2.	LEICA1200	103
1.3.	OTT MFPro	104
2.	Création d'un DEM avec Agisoft-PhotoScan.....	105
3.	Création d'un DEM avec MicMac.....	106
4.	Utilisation de PIVlab.....	108
4.1.	Première étape – L'importation d'images	108
4.2.	Deuxième étape – Paramètres des images et d'analyse	109
4.3.	Troisième étape – La calibration.....	110
4.4.	Quatrième étape – La validation des vecteurs vitesses.....	111
4.5.	Cinquième étape – Calcul de la vitesse moyenne.....	112
4.6.	Sixième étape –Exportation des résultats	112
5.	Manuel de l'utilisateur pour l'interface liée à la détection du niveau d'eau.....	114
5.1.	Démarrer le programme	114
5.2.	Importer un modèle 3D à analyser	114
5.3.	Traitement du modèle 3D avant son analyse	115
5.4.	Choix de la méthode de détection de la ligne d'eau	117
5.5.	Analyses et résultats de l'interpolation	118
5.6.	Note pour les futurs développeurs	121

6.	Informations sur la conception et le fonctionnement interne de la base de données	122
6.1.	Protection et sécurité	122
6.2.	Fonctionnement interne de la base de données	122
6.3.	Le code VBA	125
7.	Résultats de la méthode de l'interpolation des bathymétries sur les modèles de Agisoft-PhotoScan	127
8.	Résultats de la méthode de la différence de bathymétries sur les modèles de Agisoft-PhotoScan	128
9.	Résultats de la détection de la hauteur d'eau sur les modèles de MicMac	129
9.1.	Résultats de la méthode de la différence de bathymétries.....	129
9.2.	Résultats de la méthode de l'interpolation des bathymétries	130

ETAT DE L'ART

1. La photogrammétrie

1.1. Définition et évolution de la technique

Afin d'introduire la photogrammétrie, nous commençons par définir cette technique. Selon les ouvrages consultés, plusieurs propositions s'offrent à nous. Nous avons retenu les deux définitions suivantes :

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

« On groupe sous le nom de photogrammétrie l'ensemble des techniques qui permettent de déterminer la forme, les dimensions et la position d'un objet (au sens le plus large du terme) à partir de perspectives de cet objet enregistrées photographiquement. ».²

La photogrammétrie se résume donc à une reconstitution d'un modèle au départ de photographies.

Selon Kalantari et Kasser (2008), la photogrammétrie naît peu après l'invention de la photographie. En effet, en 1849, et ce à l'aide de plusieurs photographies prises au départ de points de vue différents, l'officier de l'armée française, Aimé Laussedat, tente de mesurer la façade de l'Hôtel des Invalides. A ses prémices, la photogrammétrie a principalement été utilisée dans les domaines militaires, entre autres, pour la représentation des territoires. A la suite du développement de l'aviation dans l'entre-deux-guerres, les photos aériennes se multiplient. Au départ de ces photos, la photogrammétrie permet d'améliorer la cartographie des pays.

En réalité, le développement de la photogrammétrie est directement lié à l'évolution de la science et de la technologie. En effet, selon Schenk (2005), les quatre grandes phases de développement de cette technique sont marquées par le développement de la photographie, des avions, des ordinateurs et enfin de l'électronique (voir Figure 1-1).

¹ Dictionnaire Larousse, 2020

² Encyclopædia Universalis, 2020

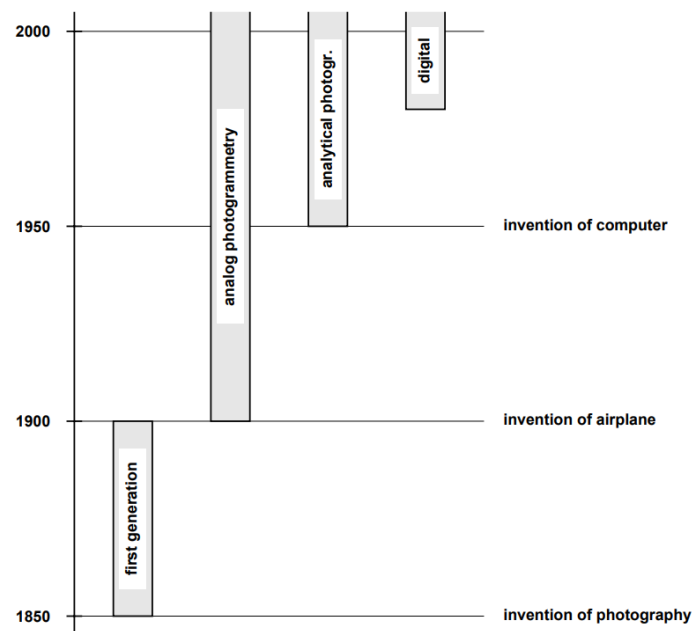


FIGURE 1-1 – EVOLUTION DE LA PHOTOGRAMMÉTRIE - SCHENK (2005)

Selon cet auteur, nous avons quatre générations de photogrammétrie, soit :

- la première génération qui analyse principalement des photos terrestres ;
- la deuxième génération, ou photogrammétrie analogique, qui se caractérise par l'invention de la stéréophotogrammétrie. La photogrammétrie devient incontournable pour la cartographie. La quantité de calculs devient rapidement un élément bloquant ;
- la troisième génération de photogrammétrie, ou photogrammétrie analytique, qui se développe avec l'évolution des ordinateurs. Dans les années 1950, les bases de cette technique sont posées. Plusieurs années se passent avant que des programmes informatiques ne soient disponibles ;
- la quatrième génération, ou photogrammétrie numérique, qui utilise des images numériques en lieu et place de photographies aériennes. Cette évolution technologique est liée au développement de l'imagerie numérique et à la puissance des microprocesseurs.

De nombreuses applications se sont développées, et ce, notamment pour les DEM's (*Digital Elevation Models*), soit les MNE, modèles numériques d'élévation (Manfreda et *al.*, 2019). Avec l'avènement du GPS (*Global Positioning System*) et des caméras digitales, la photogrammétrie aérienne a largement contribué à l'avancée et la précision des DEM's. L'introduction des UAS's (*Unmanned Aerial Systems*) représente une alternative *low-cost* à la photogrammétrie aérienne classique.

Grâce aux développements tant de l'imagerie que des systèmes d'exploitation des données, la SfM (*Structure from Motion*), structure acquise à partir d'un mouvement, révolutionne le domaine de la photogrammétrie (Westoby et *al.*, 2012). La SfM est une technique capable d'analyser des photos, d'un même lieu ou objet, prises dans différentes orientations et d'en reconnaître les points caractéristiques afin de reconstituer le modèle 3D de ce lieu ou objet. La Figure 1-2 présente le schéma de cette méthode.

Cette technique présente de nombreux avantages. En effet, la photogrammétrie SfM permet de reproduire des modèles numériques d'élévation sans connaître les caractéristiques de la caméra. Comme la distance focale, la distorsion radiale ou son positionnement. La SfM donne l'opportunité

aux chercheurs et techniciens, de produire des reconstructions « haute résolution » avec des petits budgets.

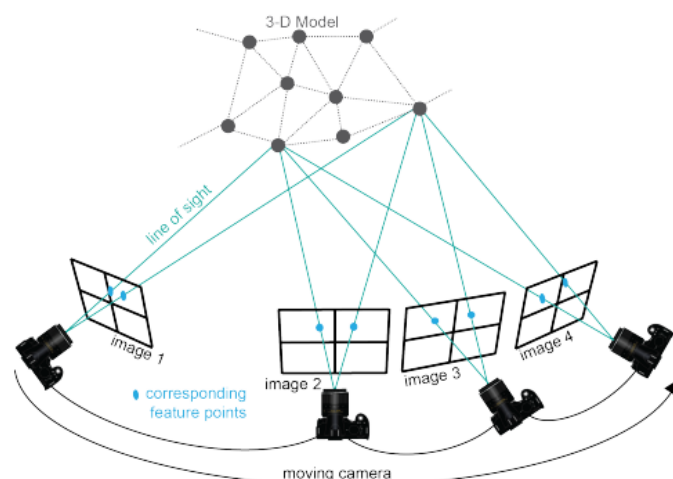


FIGURE 1-2 – SCHÉMA DE LA MÉTHODE SfM – SHERVAIS (2016)

1.2. Applications en hydraulique

Afin d'évaluer les risques liés aux fortes précipitations, à la rupture d'un barrage, etc. ou encore aux changements morphologiques des rivières, il est primordial de monitorer les cours d'eau pour préserver l'homme et le milieu naturel. Les niveaux d'eau ainsi que les débits sont les principaux facteurs impactés par la pluviométrie changeante ou le changement de morphologie de la rivière au cours du temps.

Les méthodes de jaugeages traditionnelles, c'est-à-dire les mesures ponctuelles des vitesses de l'eau dans une section de rivière, nécessitent la mise à l'eau de capteurs et des opérateurs. Ces méthodes sont donc intrusives. À l'inverse, la photogrammétrie offre une solution non intrusive, moins coûteuse et également moins risquée pour l'opérateur en charge des mesures, et ce notamment grâce à l'utilisation des drones pour la prise de photos.

Tant pour la bathymétrie que pour la détection de la ligne d'eau, le domaine de l'hydraulique profite du développement de la photogrammétrie. Des étudiants de l'EPL expérimentent également cette technique pour mener à bien leur travail de fin d'études.

1.2.1. Bathymétrie

La bathymétrie d'une rivière, à savoir l'étude de la profondeur, est une variable critique dans de nombreuses études (Dietrich, 2017). La profondeur de la rivière peut être calculée par l'utilisation d'un sonar (*Sound Navigation Ranging*), d'un LIDAR (*Light Detection And Ranging*) ou encore d'un ACDP (*Acoustic Doppler Current Profiler*). Il est important de noter que pour les rivières de moins de 2m de hauteur d'eau, la cartographie bathymétrique n'est pas précise.

Dans le cadre de ses recherches, Dietrich (2017) démontre la possibilité de déterminer la bathymétrie à l'aide de la SfM et des techniques de correction sur la réfraction de l'eau. Selon cet auteur, une précision de 0.02% de la mesure de hauteur d'eau, dans certaines conditions, comme la présence d'eau claire, est possible.

Kim (2006) et Butler et *al.* (2003) utilisent, quant à eux, la photogrammétrie pour étudier la rugosité du lit ainsi que le transport de sédiments. Ils développent un algorithme qui permet de corriger les erreurs dues à la réfraction qui apparaît à l'interface « eau-air » et appliquent un facteur correctif sur les DEM's calculés précédemment. Les résultats de bathymétrie ainsi obtenus sont plus précis.

1.2.2. Détection de la ligne d'eau

La photogrammétrie est également utilisée pour la détection du niveau d'eau. Différents auteurs abordant cette thématique, ainsi qu'un bref résumé de leurs travaux, sont présentés ci-dessous.

- Nguyen et *al.* (2009) ont développé un système de mesure de niveau d'eau pour les égouts afin de déduire le débit volumétrique passant par ces ouvrages. Ce système *in situ* utilise les techniques d'imagerie. En effet, à partir de plusieurs images, l'algorithme utilisé permet d'identifier l'interface « eau/mur » et de mesurer la position de cette interface avec les coordonnées réelles. Afin de valider leurs résultats, les auteurs ont comparé, en temps réel, les valeurs de niveau d'eau données par l'algorithme et celles obtenues avec les techniques de jaugeages traditionnelles. Pour trois configurations, les résultats sont comparables voire supérieurs. De plus, la prise d'images offre un avantage important, à savoir la possibilité pour l'homme de contrôler à posteriori les valeurs obtenues avec l'algorithme. Cette technologie offre donc de nouvelles perspectives pour le calcul de débits passant dans ces ouvrages.
- Lin et *al.* (2013) placent simultanément sur un cours d'eau, à proximité d'un pont, deux caméras « haute-résolution » durant trois jours consécutifs afin d'évaluer le niveau de l'eau et sa vitesse en surface. Pour connaître le niveau de l'eau, ils utilisent le traitement des images, qui reprennent la jauge d'eau et la ligne d'eau, en utilisant la reconnaissance des caractères sur une échelle graduée. La PIV, vélocimétrie par image de particules (décrite à la section 2), est utilisée pour la mesure de la vitesse de l'eau. Le système proposé, combinaison des deux technologies, est capable de fournir des informations en temps réel tant sur le niveau de l'eau que sur la vitesse en surface. Ce type de suivi est particulièrement important pendant les périodes d'inondation, et ce afin d'écarter tout risque d'effondrement des ponts.
- Han et Endreny (2014) appliquent la technologie de la "*close range photogrammetry*" sur une rivière modélisée en laboratoire, et ce en vue d'analyser l'impact des flux hyporhéiques intra-méandres. La précision de la méthode est de l'ordre du dixième de millimètre. L'article démontre la capacité de la photogrammétrie à modéliser la surface d'eau d'une rivière en laboratoire. Pour mener à bien ces expériences et rendre la surface de l'eau opaque (afin qu'elle soit reconnaissable), ils ont ajouté de la poudre de cire à l'eau.
- Franzini et *al.* (2016) s'interrogent sur les capacités et les limites de la photogrammétrie dans la détermination de la hauteur de la surface libre d'un modèle réduit de rivière à lit fixe. Sur base de leurs expériences, il en ressort que la photogrammétrie donne des résultats comparables aux mesures réelles pour les zones profondes. Cependant, et ce malgré l'ajout d'un colorant afin de rendre l'eau opaque, les résultats obtenus pour la mesure de niveau d'eau pour les faibles profondeurs sont nettement moins concluants. Plusieurs challenges sont également mis en évidence, entre autres, la limite d'utilisation de cette méthode lors de flux transitoire, la régularité du débit dans le modèle ou encore l'application de la photogrammétrie pour suivre l'évolution morphologique des flux sur des lits mobiles.
- Ferreira et *al.* (2017) utilisent la SfM afin de détecter la surface libre de l'eau à haute résolution spatiale (1 à 2 mm). La solution consiste à reconstruire, à l'aide d'un DEM, la morphologie de

la surface d'eau. Le potentiel de la technique est démontré à l'aide de deux approches différentes, à savoir, la recherche de la hauteur d'eau sur une seule section ainsi que, la recherche des dissimilitudes de la surface en trois dimensions avec ou sans végétation. La méthode est utilisée en laboratoire mais pourrait être réalisée en terrain naturel.

- Eltner et *al.* (2018) proposent une nouvelle technique pour la détection de la ligne d'eau. Ils utilisent la signature temporelle de la surface d'eau (en termes de variation de pixels) pour récupérer par traitement d'images les lignes de flottaison. Le niveau réel de l'eau est déduit par la projection de l'image dans un système de coordonnées réelles ; cette étape nécessite des modèles 3D de haute résolution. Afin d'évaluer l'exactitude et la faisabilité de leur nouvelle méthode, ils étudient deux bassins versants, soit un de petite taille et un de taille moyenne. Pour le bassin versant de taille moyenne, ils obtiennent des résultats probants, soit une différence moyenne de 0,6 cm et un écart-type de 1,5 cm entre les mesures de niveau réalisées avec caméra et celles obtenues avec la jauge de référence.

1.2.3. Utilisation de la technique dans les travaux de fin d'études de l'EPL

Dans cette partie, nous présentons en quelques lignes, quatre mémoires d'étudiants de l'UCLouvain qui ont utilisé la photogrammétrie tant pour la bathymétrie que pour la mesure du niveau de l'eau.

- Coutinho et Janssens (2017) utilisent la photogrammétrie pour caractériser leur modèle réduit de rivière. Ils mettent en place un dispositif pour l'acquisition de données tant pour modéliser la bathymétrie de leur modèle réduit que pour mesurer la surface libre de l'eau. Après comparaison des mesures réelles de leur modèle réduit et du modèle virtuel construit au départ des données acquises par le dispositif, ils obtiennent des résultats encourageants pour la bathymétrie. Quant à la mesure de la surface de l'eau, et ce même en utilisant différentes textures, leurs résultats sont moins prometteurs. En effet, ils ne parviennent pas à détecter avec précision le niveau de la surface libre de l'eau. Dans leurs pistes d'amélioration, ils proposent, entre autres, le développement d'un algorithme qui permettrait de détecter le point de décrochage entre le modèle numérique et la bathymétrie réelle.
- de Schoutheete et Hubert (2018) poursuivent le travail commencé par Coutinho et Janssens (2017). Au terme de leurs essais de mesure du niveau de l'eau par photogrammétrie sur un modèle réduit, ils arrivent aux conclusions suivantes : pour les écoulements permanents, la photogrammétrie permet d'obtenir des résultats prometteurs sans avoir recours à la modification de la texture de l'eau ; pour les écoulements transitoires, les résultats sont, quant à eux, peu concluants. En effet, bien que le traitement par vidéo ait été testé, la synchronisation de la prise d'images est difficile et ne permet donc pas d'obtenir des résultats cohérents.
- Le mémoire de Hellebaut (2018) s'inscrit également dans la suite du travail de Coutinho et Janssens (2017). Pour mesurer le niveau de l'eau du modèle réduit, il implémente en Matlab un algorithme qui permet de détecter le point de décrochage entre le modèle numérique et la bathymétrie réelle ; cet algorithme donne des mesures fiables. Ensuite, il élabore une méthodologie pour récupérer le niveau de l'eau en rivière naturelle ; il teste l'algorithme utilisé pour le modèle réduit et l'adapte pour l'utilisation *in situ*. Enfin, son système d'acquisition de photos ainsi que son algorithme sont mis à l'épreuve sur une deuxième rivière. Il obtient des résultats satisfaisants et encourageants. Néanmoins, il met en évidence la faiblesse de son algorithme et conclut par le fait que la méthode gagnerait à être testée sur un panel de rivières plus larges et variés.

- Enfin, Asselberghs et Peeters (2019) poursuivent les travaux réalisés précédemment. L'objectif de leur travail est de déterminer le débit par imagerie tant sur le modèle réduit qu'en rivière ; la mesure de la hauteur d'eau est évidemment une donnée indispensable au calcul du débit. Sur base de la méthode UCLouvain, ils obtiennent une erreur moyenne de débit inférieure à 5% pour le modèle réduit contre 12% en rivière naturelle. Leur travail a mis en évidence la difficulté de mise en œuvre de la méthode sur certaines rivières, notamment l'accès au cours d'eau, la luminosité, les remous, la profondeur, etc.

1.3. Logiciels de photogrammétrie

De nombreux logiciels de photogrammétrie existent ; certains sont des logiciels open-source, d'autres nécessitent l'acquisition d'une licence payante. Bien que chacun d'entre eux présente des avantages et des inconvénients, le choix d'un programme résulte de plusieurs facteurs non exhaustifs, comme : le budget, la qualité et la précision du modèle numérique, la facilité de prise en main, le système d'exploitation et les algorithmes d'analyse.

Remondino et *al.* (2012) comparent cinq logiciels de photogrammétrie, à savoir : Photosynth, Bundler, VisualSFM, Agisoft-PhotoScan et Apero-MicMac. La comparaison porte sur les échantillons suivants : un cube, une sphère, un phare, un temple, une gare et enfin la place Navone à Rome. À la suite de cette comparaison, les logiciels Agisoft-PhotoScan et Apero-MicMac ont été retenus.

En effet, peu importe l'échantillon, ceux-ci donnent de meilleurs résultats. Ci-dessous, nous présentons en quelques lignes ces deux logiciels.

- Agisoft-PhotoScan : logiciel payant développé en Russie dès 2010 et leader du marché. L'interface facilite la prise en main du programme et qui fonctionne sur divers systèmes d'exploitation à savoir : Mac, Windows ou encore Linux. L'inconvénient majeur de ce programme est qu'il est laborieux de trouver de l'information sur les processus utilisés. Par conséquent, nous ne connaissons ni les algorithmes de traitement des données ni les processus de correction appliqués automatiquement. Nous pouvons donc comparer ce programme à une boîte noire.
L'EPL dispose d'une licence, qui est mise à disposition des étudiants pour la réalisation de leur mémoire. Dans les cas pratiques, cités au point 1.2.3., les modélisations ont bien été réalisées sur base de ce logiciel.
- MicMac : logiciel développé par l'IGN, Institut Géographique National français, et l'ENSG, Ecole Nationale des Sciences Géographiques. Le principal avantage de cette solution est qu'elle est open-source. De plus, publiée sous licence « Cecil-B », seule l'obligation de citation doit être respectée pour une utilisation libre ou commerciale. En revanche, la difficulté majeure réside dans la complexité de la prise en main de ce logiciel. En effet, MicMac fonctionne en ligne de commande et constitue donc une barrière d'entrée pour un public non averti.

Enfin Dudka (2015) réalise une étude approfondie de comparaison des logiciels commerciaux Agisoft-PhotoScan et Pix4D ainsi que du logiciel open-source MicMac. La comparaison porte sur un seul échantillon, à savoir une chapelle. Différents critères tels que la calibration des caméras, les données d'orientation, le nuage de points densifié, les orthophotos, sont analysés. Selon cet auteur, le logiciel Pix4D est facile d'utilisation et donne les meilleurs résultats ; en effet, il observe que les erreurs sur les points de contrôle sont plus faibles et que les orthophotos générées sont de meilleures qualités.

2. La PIV – Particle Image Velocimetry

Dans cette partie, une définition de la PIV, son principe pour effectuer des mesures de vitesse et l'évolution de cette technique dans le temps sont présentés.

2.1. Définition et méthodologie

Comme nous l'indique Raffel et *al.* (2018), la PIV est une technique qui permet de déduire des informations sur les vitesses d'un champ d'écoulement gazeux ou liquide et ce à partir d'enregistrements d'images d'une partie ou de l'ensemble de ce champ. Adrian (2005), qui résume la PIV de 1884 à 2004, ajoute que celle-ci est une méthode qui permet de fournir des informations sur un ensemble de points simultanément.

Cette technique se base sur un principe élémentaire, c'est-à-dire l'enregistrement de la distance parcourue (ΔX) par un objet pendant un certain laps de temps (Δt) pour pouvoir en déterminer sa vitesse ($\vec{V}$). Le vecteur vitesse est le rapport entre la distance parcourue et le temps nécessaire au déplacement, soit :

$$\vec{V} = \frac{\Delta \vec{X}}{\Delta t} \left[\frac{m}{s} \right] \quad (Eq\ 2.1)$$

Il est important de noter que la PIV est une technique souvent utilisée sur des modèles réduits. Si on calcule un champ de vitesse en 2D, champ d'écoulement et particules visibles par l'œil humain, on parle de PIV. Pour un champ de vitesse en 3D, on utilise le terme de PIV-Stéréoscopique ou micro-PIV, technique pour laquelle l'échelle peut être inférieure au micron. La Figure 2-1 illustre cette technique d'imagerie non-intrusive permettant la mesure de vitesse.

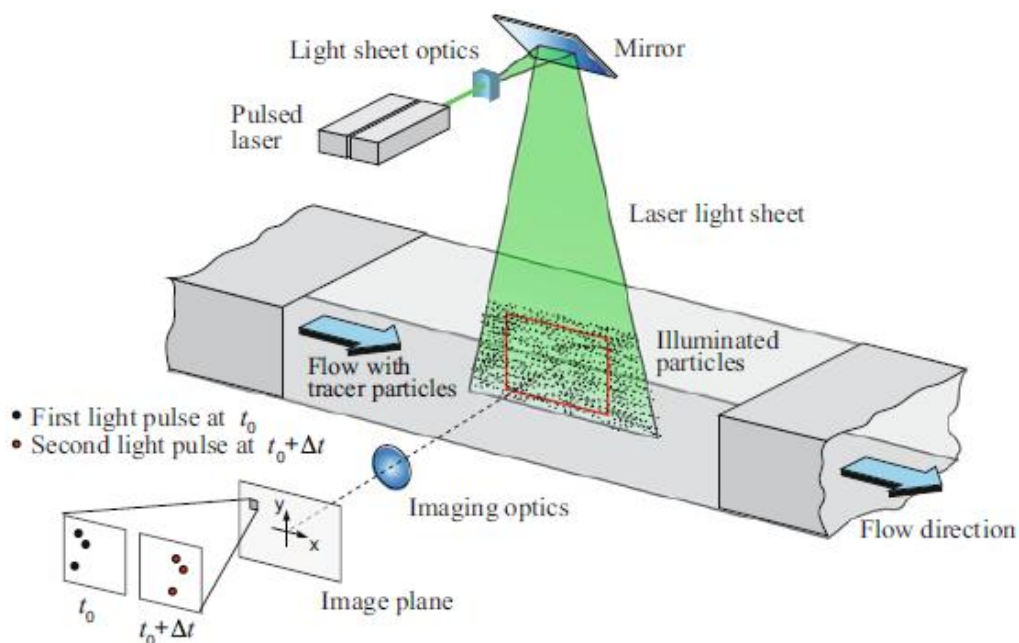


FIGURE 2-1 – ILLUSTRATION DE LA MÉTHODE PIV - RAFFEL ET AL. (2018)

Selon les auteurs, six voire sept étapes, sont nécessaires pour obtenir des résultats exploitables, à savoir :

1. Ensemencement : l'ajout de traceurs au sein du gaz ou du liquide afin d'avoir des particules détectables sur les photos ou vidéos. Pour ce qui est des liquides, une multitude d'éléments peuvent être utilisés tels que du polystyrène, des sphères en verre (creuses), différentes huiles ou des bulles d'oxygène. Pour ce qui est des fluides gazeux, on utilise généralement des bulles de savon, du polystyrène, de la fumée ou des gouttelettes d'huile dont le diamètre moyen des particules varie respectivement de 3000 à 200 μm , de 0,5 à 10 μm , aux alentours de 1 μm et de 0,5 à 0,3 μm . Les différentes caractéristiques/conditions à respecter pour les éléments qui servent de traceur sont développées dans la section 3.4.7 de ce mémoire.
2. Illumination : la détection des traceurs sur les enregistrements requiert une illumination de ceux-ci. Pour éviter les erreurs lors du traitement des données, l'illumination doit se faire dans le plan d'intérêt, de la manière la plus homogène possible, et ce en évitant les reflets.
3. Enregistrement d'images ou de vidéos : celles-ci doivent permettre de suivre l'écoulement dans le temps. Il est donc impératif d'enregistrer le temps qui sépare chacune des photos ou le paramètre « *fps* » des vidéos.
4. Prétraitement : étape prévue ou non en fonction des auteurs ou des expériences menées. Lors de cette étape, on peut sélectionner une zone d'intérêt (ROI) et des zones d'exclusions appelées « *masques* ». La délimitation de la zone d'intérêt permet d'accélérer le processus. L'application de filtres sur les images pour maximiser la visibilité des traceurs est également possible. La PIV étant une technique de laboratoire, de nombreux paramètres peuvent être fixés avant l'enregistrement, ce qui explique que ce prétraitement n'est pas toujours indispensable.
5. Calibration : étape qui permet de corriger les problèmes visuels liés aux images (distorsion, fish-eye, etc.) et d'associer une unité métrique aux pixels.
6. Evaluation - Analyse PIV : soit le traitement proprement dit des images.
7. Post-traitement : cette dernière étape consiste à détecter et à supprimer les mesures non pertinentes.

La charte synthétique présentée à la Figure 2-2 résume les étapes énumérées ci-dessus.

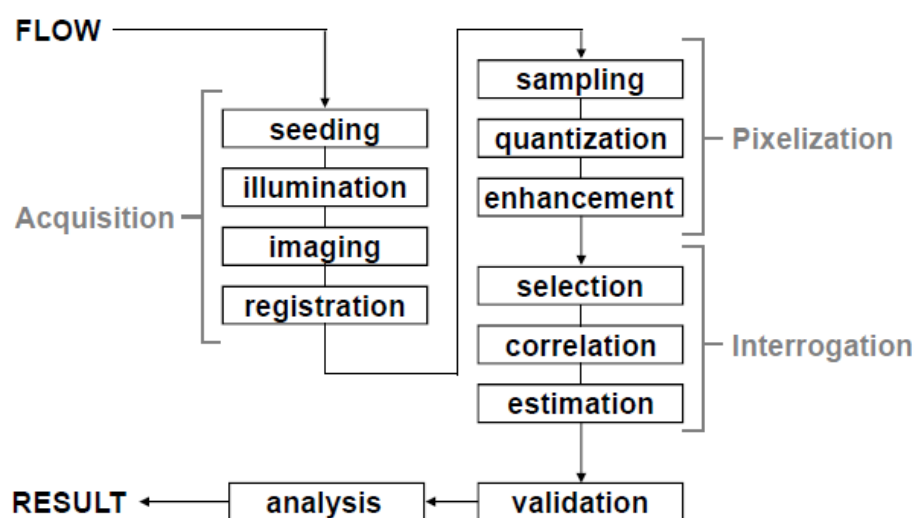


FIGURE 2-2 – CHARTE SYNTHÉTIQUE DU PROCESSUS PIV – KUOK ET CHAN (2017)

Une étape clé, à savoir l'analyse PIV, doit encore être détaillée. Pour déterminer la vitesse des particules, les déplacements sont évalués sur base de la méthode statistique de la corrélation croisée

(cross-correlation). Pour analyser deux images distantes d'un temps connu Δt , la méthode, illustrée à la Figure 2-3, reprend les étapes suivantes :

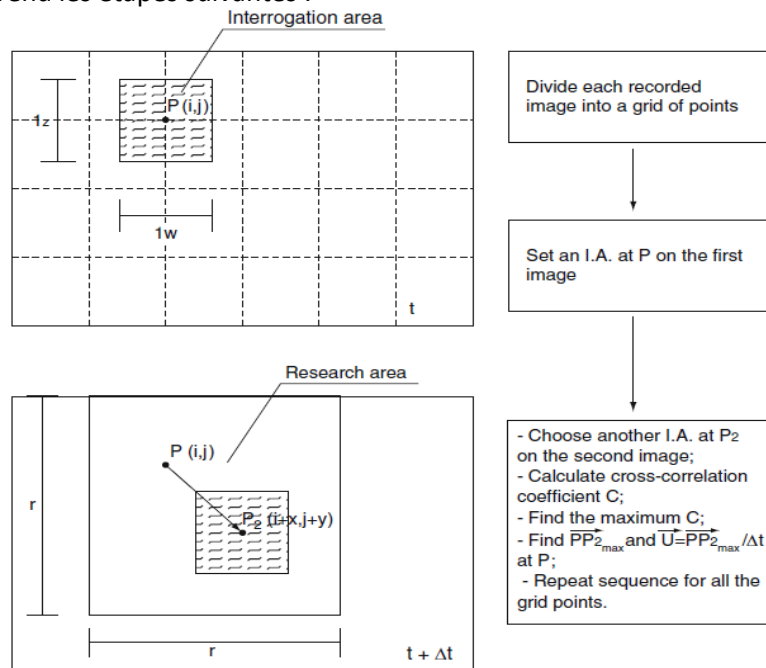


FIGURE 2-3 – ALGORITHME DE LA PIV - DI CRISTO (2011)

1. Diviser les deux images en une grille de points.
2. Définir la zone d'interrogation (*Interrogation Area* – IA) sur la première image ; le point $P(i, j)$ est le centre de cette zone. Cette aire d'interrogation contient un groupe de particules caractérisé par une distribution d'intensité (niveaux de gris).
3. Sur la deuxième image, prendre une zone plus étendue appelée zone de recherche.
4. Dans cette zone de recherche, définir une zone d'interrogation de la même taille que pour la première photo. Ensuite, calculer le coefficient de corrélation entre les deux zones d'interrogation. Répéter ce processus pour pouvoir couvrir tous les points de la deuxième image.
5. Retenir le coefficient de corrélation croisé le plus élevé et le point correspondant, soit $P_2(i + x, j + y)$. Sur base de la distance entre $P(i, j)$ et $P_2(i + x, j + y)$ et du temps écoulé entre la prise des deux images, on peut finalement calculer le vecteur vitesse.
6. Répéter les étapes 2 à 5 pour tous les points présents sur la grille afin de définir le vecteur « vitesse » associé à chaque point de la grille.

La Figure 2-4 présente les résultats de la corrélation croisée réalisée sur les points d'une aire de recherche au départ de deux enregistrements.

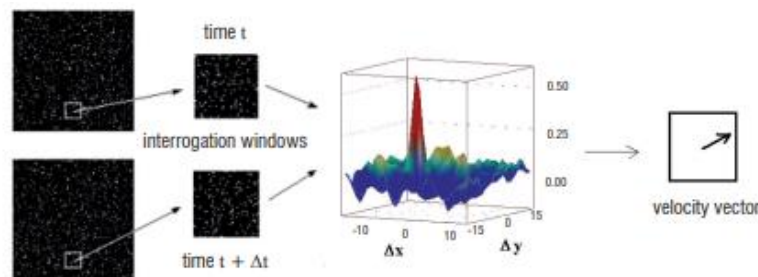


FIGURE 2-4 – CORRÉLATION CROISÉE DE 2 ENREGISTREMENTS ET DÉTERMINATION DU VECTEUR « VITESSE » - BROSSARD ET AL. (2009)

Cette corrélation permet de déduire le vecteur « vitesse ».

2.2. Evolution de la technique

Selon Adrian (2005), la PIV a été développée pour l'étude des flux turbulents et la dynamique des fluides en laboratoire dans le milieu des années 80. Bien que le principe de base n'ait pas changé, de nombreuses améliorations ont été apportées à cette technique au fil des années. Notamment grâce à l'évolution des ordinateurs, de leur puissance de calcul et du développement des images numériques. Aujourd'hui, cette technique de mesure est fondamentale aussi bien pour les industries que pour les instituts de recherche (Brossard et *al.*, 2009 ; Raffel et *al.*, 2018).

En parallèle de son application, par exemple, pour l'analyse des couches limites, des flux transsoniques et de l'aérodynamique (Raffel et *al.*, 2018) la communauté scientifique est particulièrement intéressée par son application dans le milieu de l'hydraulique pour les mesures de vitesse d'écoulement. De nombreuses études utilisant la PIV portent sur des écoulements dans des modèles réduits. Sur base de leurs travaux, Muste et *al.* (2004) ayant pour but de valider la PIV sur les modèles hydrauliques en laboratoire, mentionnent que, si les paramètres de la PIV sont fixés de manière optimale, les résultats obtenus avec cette technique sont très proches des valeurs réelles. En effet, l'erreur moyenne de mesure sur les vitesses est inférieure à 1.5%.

Fujita et *al.* (1997) utilisent la PIV pour analyser l'écoulement d'une rivière dans une plaine d'inondation ; c'est la première application de cette technique en milieu naturel. Pour passer de l'analyse des photos d'un modèle réduit d'environ 4 m² à celles couvrant 45.000 m², et ce même si les algorithmes de traitement des images restent inchangés, différents ajustements sont nécessaires. De nouveaux challenges apparaissent et la LSPIV (*Large Scale Particle Image Velocimetry*) se développe.

3. La LSPIV – Large Scale Particle Image Velocimetry

Dans cette section, nous présentons le principe de la LSPIV, son évolution, les principales différences entre PIV et LSPIV ainsi que les challenges qui lui sont liés. Ensuite, nous nous attardons sur deux techniques : le DFT, *Display Transfer Function*, pour le prétraitement des images et l'utilisation des graphes polaires pour le post-traitement. Nous clôturons cette section par les atouts de cette technique ainsi que par une brève présentation des logiciels d'analyse de PIV/LSPIV.

3.1. Définition et méthodologie

La LSPIV est l'application de la PIV en condition réelle ; elle ne s'applique pas au modèle réduit d'écoulement. Selon Jodeau *et al.* (2007), la LSPIV est une technique qui, par analyse d'images séquentielles, permet de mesurer les vitesses de surface en condition réelle. Cette technique permet de suivre et de calculer les déplacements de traceurs en surface, et ce par l'utilisation d'une identification statistique.

D'après Hauet (2006), Le Coz *et al.* (2014) et Bia et Somers (2018), la technique LSPIV nécessite le passage par plusieurs étapes, à savoir :

1. le choix du site et la préparation du terrain si nécessaire (par exemple, la pose de GRP, aussi appelé GCP) ;
2. l'ensemencement par ajout de traceurs visibles à la surface et la prise d'images ou de vidéos avec un intervalle de temps approprié ;
3. le prétraitement des images (orthorectification, suppression d'images ;
4. la calibration, soit la conversion des pixels en unité métrique ;
5. l'évaluation, soit l'analyse PIV ;
6. le post-traitement des résultats (correction des vitesses, interpolation des données).

3.2. Evolution de la technique

Dans leurs ouvrages respectifs, Muste *et al.* (2008), Di Cristo (2011) et Tauro *et al.* (2018) proposent un résumé des travaux concernant la LSPIV jusqu'en 2008, 2011 et 2018. Tout commence avec les travaux réalisés par Fujita *et al.* (1997). En effet, c'est en 1997 que, pour la première fois, la PIV est appliquée en milieu naturel. La technique PIV est modifiée afin de permettre l'étude des vitesses sur des zones plus étendues. Modifiée, cette technique porte le nom de LSPIV, *Large Scale Particule Image Velocimetry*.

Le développement de la LSPIV porte principalement sur l'adaptation de la méthode de laboratoire au terrain. La surface couverte varie généralement de 100 à 5000 m². Les principaux objectifs de cette technique sont d'obtenir les vitesses de surface instantanées, de décrire le comportement du flux et de déterminer le débit en rivière (Fujita et Aya, 2000) ; Muste *et al.*, 1997 ; Bradley *et al.*, 2002). Rapidement, comme l'indique Creutin (2001), une comparaison entre la LSPIV et les méthodes traditionnelles de mesure de vitesses de surface est réalisée.

Cette technique est développée selon deux axes. D'une part, la LSPIV est utilisée pour la mesure de vitesses sur des cours d'eau pour lesquels nous disposons de mesures réelles. Dans ce cas, les résultats de la LSPIV sont comparés aux résultats obtenus avec les méthodes conventionnelles. Cette méthode est également utilisée pour obtenir des mesures de vitesses de surface dans des conditions particulières et pour lesquelles nous ne disposons d'aucune information. D'autre part, les travaux portent sur la méthode en elle-même, ses paramètres et sa précision.

3.2.1. Développement des applications

De 2000 à 2010, la LSPIV est utilisée dans de nombreuses domaines. Fujita et Hino (2002) l'utilisent pour développer une nouvelle application de LSPIV à partir de vidéos prises d'un hélicoptère. Hauet (2006) étudie le développement d'un système de mesure qui permettrait d'obtenir une valeur de débit de manière instantanée et continue. Pour déterminer les vitesses de surface lors d'une décharge de barrage, Jodeau et *al.*, (2007) utilisent également la LSPIV ; lors de cette décharge, les débits passent de 10 à 150 m³/s. De leur côté, Muste et *al.* (2008) analysent des courants très lents et peu profonds par LSPIV. Dans ces conditions, les méthodes conventionnelles (même sans contact) ne sont pas applicables. Enfin, Bieri et *al.*, (2009) analysent le comportement des flux (direction et intensité) sur des ouvrages hydrauliques et Hauet et *al.* (2010) étudient la faisabilité d'installer une station débit-métrique sur une zone sujette aux crues éclairées.

De 2010 à nos jours, l'utilisation de la LSPIV a explosé dans le monde scientifique. Elle est largement utilisée dans des domaines pour lesquels la détermination des vitesses de surface ou du débit est difficile voire impossible. Cette technique est également utilisée pour exploiter des vidéos « amateurs », non réalisées pour l'étude des vitesses. En effet, Fujita et Kunita (2011) analysent une inondation datant de 2002 à partir de vidéos prises d'un hélicoptère. Quant à Tsubaki et *al.* (2011), ils tentent de déterminer un débit de crue en utilisant les vidéos d'une caméra présente sur le site, bien qu'elle ne soit pas configurée pour la LSPIV. De son côté, Wu (2012) développe une technique pour déterminer le débit dans un estuaire ; c'est d'ailleurs la première fois que l'analyse porte sur un cours d'eau d'une largeur supérieure à 100m. Enfin, Le Coz et *al.* (2014) et Le Boursicaud et *al.* (2015) utilisent la LSPIV pour exploiter les images des vidéos récupérées sur YouTube et mettent en évidence les difficultés liées à l'utilisation de celles-ci.

Les smartphones et les drones sont des outils largement utilisés de nos jours. La LSPIV s'intéresse aux données disponibles grâce à ces équipements. En effet, Lüthi et *al.* (2014) présentent une application de mesure de débit pour smartphone sans installation spécifique sur site. Quant à Tauro et *al.* (2015) et Detert et Weitbrecht (2016), ils tentent de déterminer des vitesses de surface à partir des images prises par drones.

Enfin, ces dernières années, la LSPIV s'est développée pour de nouveaux environnements. Dans des endroits où la végétation est dense (Creëlle et *al.*, 2016), sur des rapides saturés en débris (c'est-à-dire où les débris représentent 50% du volume ou 70% de la masse du fluide) (Theule et *al.*, 2018), pour l'analyse d'une rupture de digue à partir d'une vidéo issue des médias (Fujita et *al.*, 2018), pour le monitoring des rivières WADI (rivières éphémères en vallée d'une région aride) (Al-mamari et *al.*, 2019) ou encore pour l'étude de l'attractivité d'une passe à poissons présente sur un barrage d'une station hydroélectrique (Strelnikova et *al.*, 2020).

3.2.2. Evolution de la méthode

Dans les années 2000, Harpold et Mostaghimi (2004) évaluent la précision de la méthode LSPIV pour déterminer directement le débit en rivière. Quant à Hauet (2006), il analyse, identifie et quantifie les sources d'erreurs ainsi que la sensibilité de la LSPIV au départ d'images acquises avec des appareils mobiles. Kim (2006) se concentre principalement sur la sensibilité de la méthode. Pour pouvoir déterminer les vitesses de surface tout en limitant les tâches à réaliser sur le terrain, Kim et *al.* (2008) développent une technique de LSPIV mobile ; l'ensemble des appareils sont placés sur un pick-up.

Au fil des années, les recherches à caractère théorique se multiplient : Le Coz et *al.*, (2010) tentent de déterminer le débit de pointe de crues éclairées ; Le Coz et *al.*, (2010) décrivent et analysent des tests de performance en vue d'évaluer et d'améliorer la LSPIV ; Vanden Bergh (2013) mène des

recherches en vue de trouver l'application optimale du pré et du post-traitement ; Tauro et *al.*, (2015) évaluent les performances de la LSPIV pour le traitement des images prises avec un drone ; Naresh et Naik (2016) travaillent sur l'automatisation de la méthode, soit la diminution des opérations manuelles et l'augmentation de la confiance dans les résultats de l'analyse LSPIV ; Yeh et *al.* (2017) font évoluer les tailles de la ROI (*Region Of Interest*) et de l'IA (*Interrogation Area*) en fonction des conditions d'ensemencement et cherchent à automatiser la méthode ; pour finir, Pearce et *al.* (2020) testent et comparent cinq algorithmes utilisés pour la détermination de vitesses de surface dont la LSPIV et mettent en évidence les avantages et inconvénients respectifs de ceux-ci.

Enfin, plusieurs chercheurs tentent d'améliorer la méthodologie : Detert et Weibrecht (2014) essayent de standardiser la LSPIV pour l'analyse de vidéos enregistrées au départ d'un hélicoptère alors que Tauro et *al.*, (2014) et Bandini (2017) se passent des GCP's tant pour l'analyse LSPIV conventionnelle que pour la LSPIV à partir de drones.

3.3. PIV versus LSPIV

Au travers de la littérature, quatre différences majeures entre la PIV et la LSPIV sont mises en évidence, à savoir :

1. la taille du champ d'application (Fujita et Hino, 2003 ; Muste *et al.*, 2008) : la PIV s'applique aux modèles réduits (petites surfaces) tandis que la LSPIV est une technique utilisée dans les conditions naturelles, à l'échelle *in situ* (grandes surfaces) ;
2. l'angle de la caméra (Fujita et Hino, 2003 ; Hauet, 2006) : en PIV, le système d'enregistrement des images ou vidéos est perpendiculaire à l'écoulement. En revanche, en LSPIV, et afin de couvrir la zone d'étude, il faut soit prendre de la hauteur, soit incliner l'appareil d'enregistrement des images. En prenant de la hauteur, la résolution des images diminue (nombre de pixels constant pour une surface plus grande). Enfin, si on incline l'appareil de prise d'images, l'effet de perspective devra être corrigé par orthorectification. Cette étape supplémentaire dans le traitement d'images requiert la connaissance de quatre points de référence au minimum (inter-distances connues) ;
3. l'illumination (Muste *et al.*, 2008 ; Hauet, 2006 ; Jodeau *et al.*, 2007) : en PIV, l'illumination artificielle est requise et les sources lumineuses sont maîtrisées. En revanche, en LSPIV, elle dépend des conditions naturelles. Dans certaines situations, un éclairage artificiel sera requis ;
4. la taille et les caractéristiques des traceurs (Hauet, 2006 ; Naresh et Naik, 2016) : la résolution étant plus faible en LSPIV, il est nécessaire pour visualiser les traceurs sur les images d'augmenter leur taille.

Le Tableau 3-1 présente une synthèse des différences entre PIV et LSPIV ainsi que les challenges de la LSPIV.

TABEAU 3-1 – COMPARAISON DES CARACTÉRISTIQUES PIV ET LSPIV ET CHALLENGES - MUSTE ET AL. (2004)

Component	Conventional PIV	Large area, free-surface IV (LSPIV)	LSPIV Additional Procedures/Features
Illumination	Small image areas (up to 0.20 m ²) Strong illumination sources (cw or pulsed lasers)	Large areas (up to 100 m ²) Conventional illumination: white natural or artificial light	Elimination of light reflections on the flow free surface and uniform distribution of the light intensity over the imaged area
Seeding particles/ Material	Micron-size, neutrally buoyant, uniformly dispersed in the flow	cm size, lighter than water density	Seeding material color needs to contrast background color (Muste et al. 1999)
Recording	High-resolution or high-speed cameras Recording of a reference grid for scaling	Video-based cameras (low resolution, low speed) Recording of images to include marker points (known coordinates) needed	Special image processing algorithms required Geodetic survey of the marker points for image-to-real-coordinate transformation
Preprocessing	Not needed	Removal of image distortion due to lens aberrations and perspective effects	Image reconstruction using geometrical mapping (Fujita and Komura 1994)
Processing	Reliance on individual particle images	Flow tracing made on local image patterns formed by groups of particles	Implementation of algorithms using low resolution images to obtain high resolution measurements (Fujita et al. 1998)
	2D autocorrelation or cross-correlation of image pairs, usually with fast-fourier transform (FFT) —	2D cross correlation applied to image pairs in real space Decoupling of the interrogation area from its fixed location in the first image of the pair to any arbitrary location in the second image of the pair	Flexibility in choosing the interrogation area shape and size Eliminates velocity bias and improves processing of vortical flows (Fincham and Spedding 1997)

3.4. Challenges

Les challenges techniques pour la méthode de la LSPIV sont nombreux, à savoir : l'illumination, la résolution, l'angle de prise de vue, l'utilisation de drones ou d'hélicoptères, l'utilisation de vidéos, l'enregistrement d'images/vidéos et la fréquence d'échantillonnage, l'ensemencement, le prétraitement, l'analyse PIV, le post-traitement, la végétation, la variabilité spatio-temporelle des cours d'eau, l'utilisation de la méthode lors d'évènements extrêmes et finalement la fiabilité des mesures de vitesse de surface et de détermination de débit.

3.4.1. Illumination

Les conditions d'illumination du site impactent les résultats issus de l'analyse LSPIV. Hauet (2006) la divise en deux parties : l'illumination globale (moyenne des intensités des pixels d'une image) et l'illumination locale (intensité même d'un pixel ou d'un ensemble limité de pixels).

Une illumination globale faible ne pose généralement pas de problème pour autant que les traceurs soient visibles en surface de l'eau. Il est donc important d'avoir un bon contraste entre la surface de l'eau et les traceurs. Si l'illumination locale est faible, c'est-à-dire présence d'une zone d'ombre, on voit généralement moins bien les traceurs. Néanmoins, ceux-ci restent observables lors de l'analyse PIV. En revanche, en cas de forte illumination globale, les reflets présents à la surface de l'eau vont saturer l'intensité des pixels et le traitement des images sera alors impossible. Dans ce cas, il faudra reporter la prise d'images pour l'analyse LSPIV en attendant de meilleures conditions. En cas d'illumination locale élevée, les zones dans lesquelles les traceurs passent d'une zone d'ombre ou normale (là où ils sont visibles) à une zone saturée seront exclues de l'analyse. En effet, dans ces zones, les vecteurs de vitesse sont erronés. L'illumination dépend donc de la luminosité qui varie dans le temps.

Enfin, pour les analyses de nuit, il est nécessaire de recourir à une illumination artificielle. Afin d'appliquer la LSPIV en conditions nocturnes, Wu (2012) a illuminé, à l'aide de balises lumineuses, des

sillons à la surface de l'eau. Cependant, les résultats obtenus n'offrent pas la précision attendue. L'application de la LSPIV de nuit est donc une technique qui doit encore être améliorée.

3.4.2. Résolution

Pour pouvoir étudier un cours d'eau sur toute sa largeur sans incliner la caméra, il faudra prendre de la hauteur. En faisant cela, on augmente la zone couverte par un pixel et on diminue donc la résolution globale de l'image. La diminution de la résolution a un impact direct sur la précision des résultats. En effet, si un pixel correspond à une distance de l'ordre du décimètre, tous les déplacements de traceurs plus petits que cet ordre de grandeur seront considérés comme nuls lors de l'analyse PIV. Ces vecteurs nuls impacteront les résultats finaux.

Pour obtenir des résultats fiables lors de l'analyse LSPIV, une résolution suffisante, fonction de la vitesse de déplacement des traceurs, est nécessaire (Fujita et Hino, 2003 et Messelhe et *al.*, 2004). À chaque situation correspond une solution. Par exemple, Wu (2012) utilise deux caméras pour couvrir la surface d'un estuaire (largeur supérieure à 100m) et obtenir une résolution suffisante.

3.4.3. Angle de prise de vue

Dans certaines conditions, afin de couvrir toute la largeur de la rivière, il est nécessaire d'incliner la caméra. Avec cette inclinaison on crée un effet de perspective. Dans ce cas, la relation mètre-pixel n'est pas constante sur toute l'image. Pour deux traceurs ayant parcouru le même nombre de pixels, on peut donc obtenir des vitesses différentes. Comme le précisent Smith et *al.* (2005), si la caméra est placée sur une berge et qu'on ne corrige pas l'effet de perspective, les vitesses proches de cette rive seront sous-estimées alors que les vitesses proches de l'autre rive seront surestimées. De plus, le risque d'avoir des reflets à la surface de l'eau, et les problèmes associés, n'est pas nul.

Pour résoudre le problème de perspective, on recourt à l'orthorectification des images. Cette technique permet d'établir une relation pixel-mètre valable pour l'ensemble des images. Jodeau et *al.* (2007) présentent cette technique en détails. À titre d'exemple, la Figure 3-1 présente une image réelle (avec effet de perspective) et le résultat de cette image après orthorectification.

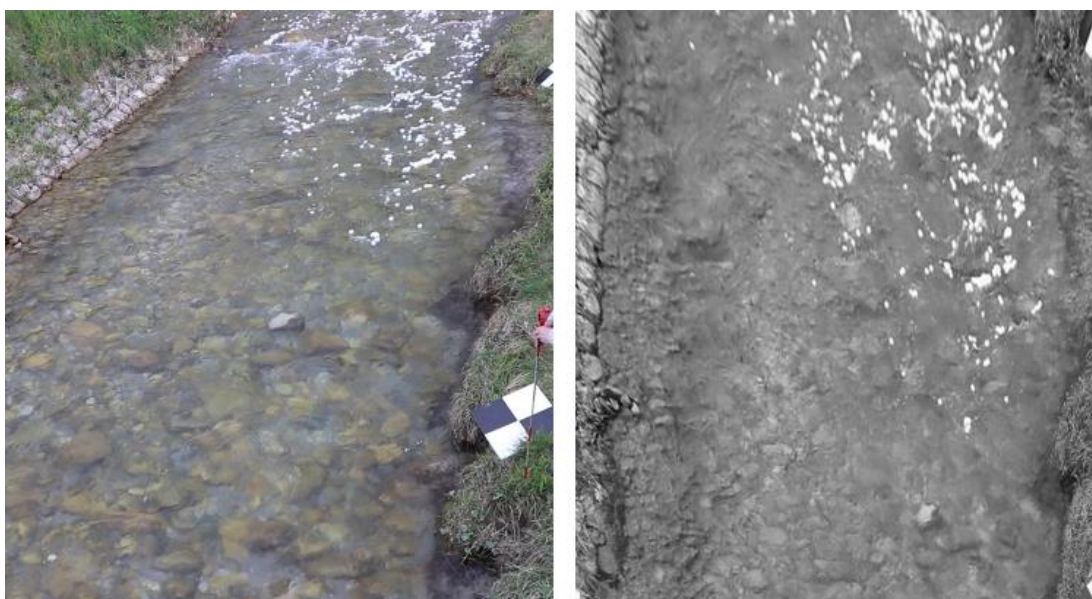


FIGURE 3-1 – IMAGE RÉELLE (À GAUCHE), IMAGE ORTHORECTIFIÉE (À DROITE) – JODEAU ET *AL.* (2007)

En parallèle, certains auteurs essayent de travailler sans corriger l'effet de perspective. En réalité, ils recherchent l'angle d'inclinaison pour lequel les résultats ne sont plus acceptables. Leurs résultats sont les suivants :

1. Harpold et Mostaghimi (2004) indiquent que l'inclinaison de la caméra influence significativement les résultats de la LSPIV. Selon eux, la précision devient inacceptable pour des angles dépassant 30°. Ils ajoutent que si l'inclinaison de la caméra est nécessaire pour couvrir la surface d'eau, l'inclinaison optimale se situe entre 15 et 30°.
2. Sutarto (2015) indique qu'une caméra perpendiculaire à la surface à analyser est la solution optimale pour la LSPIV. Selon lui, la précision reste acceptable pour des angles inférieurs à 10°.

3.4.4. Utilisation de drones ou d'hélicoptères

La figure 3-2 présente deux situations, à savoir la prise d'images au départ d'une caméra fixe et la prise d'images au départ d'un drone se déplaçant dans le sens du flux.

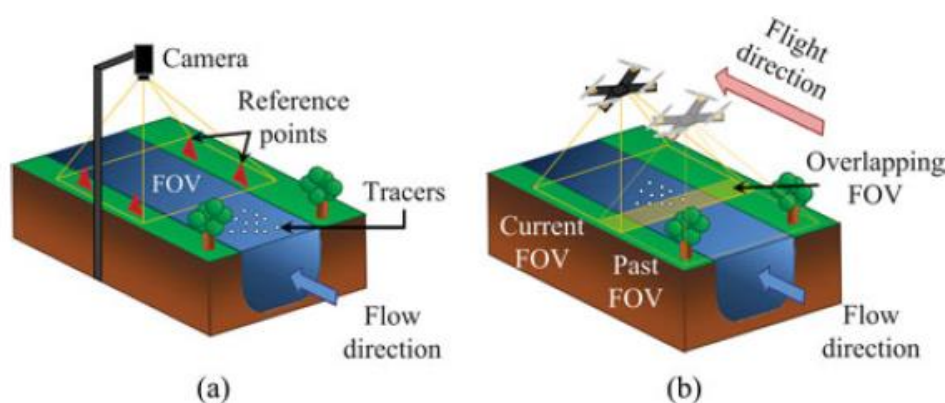


FIGURE 3-2 – PRISE D'IMAGES SUR SITE PAR CAMÉRA FIXE (A) OU PAR DRONE (B) – TAURO ET AL. (2015)

L'utilisation des drones permet d'obtenir rapidement des images. La plus grande difficulté est de trouver des conditions naturelles avec lesquelles les éléments présents à la surface soient traçables. Tauro et *al.*, (2015) précisent que l'illumination directe diminue la précision. Outre les problèmes de précision liés à la hauteur, il faut tenir compte de la vitesse du drone, de sa trajectoire et de sa stabilisation. Les vibrations de la caméra et l'inclinaison éventuelle de celle-ci impactent également les résultats de l'analyse LSPIV.

L'intérêt d'utiliser des drones n'est plus à prouver. Les techniques actuelles permettent d'équiper le drone de tout le matériel nécessaire pour connaître la hauteur d'eau, la bathymétrie et les vitesses de surface. Cette solution est présentée par Bandini (2017). En effet, il équipe son drone :

- d'un récepteur GNSS (Géolocalisation et Navigation par un Système de Satellites) pour connaître son altitude ;
- d'un radar pour calculer la distance « drone/surface de l'eau ». Il peut, in fine, déterminer la hauteur de la surface de l'eau ;
- d'un sonar captif pour déterminer la bathymétrie ;
- de deux lasers dont l'entre-distance est connue, afin de déterminer la relation pixel-mètre
- enfin, d'une caméra pour réaliser les enregistrements. Les vitesses de surface seront calculées à l'aide de la LSPIV.

3.4.5. Utilisations de vidéos

Selon Le Boursicaud et *al.* (2015), exploiter des vidéos réalisées en temps réel lors d'évènements naturels permet :

- de récupérer des données réelles pour les mesures de vitesse de surface de l'eau. Cette technique permet donc d'approcher les mesures réelles et ainsi éviter de recourir aux méthodes empiriques ;
- une observation directe des conditions d'écoulement ;
- la prise de différents points de vue et donc la possibilité de réaliser plusieurs analyses.

Dans ce cadre, la méthodologie préalable à l'analyse PIV requiert la récupération de vidéos « d'intérêt » dans leur version originale, si possible. Selon Le Coz et *al.*, (2014), une qualité « YouTube » est suffisante car une meilleure résolution n'apporterait que 5% de précision. Bien sûr, il est nécessaire de se rendre sur le terrain pour calculer la bathymétrie et déterminer des repères (GRP's) permettant l'exploitation des images. Selon Le Coz et *al.*, (2014) et Le Boursicaud et *al.* (2015), les principales sources d'erreurs de la LSPIV sont liées aux changements du lit de la rivière, soit son profil bathymétrique.

3.4.6. Enregistrement d'images/vidéos et fréquence d'échantillonnage

Avant de prendre des photos ou d'enregistrer des vidéos, il faut fixer plusieurs paramètres, à savoir : la résolution, l'intervalle de temps entre la prise de photos ou le paramètre *fps* de la vidéo, et la durée de l'enregistrement. Enfin, les mouvements de la caméra doivent être évités. Tous ces paramètres influencent directement l'estimation de vitesse (Hauet, 2006).

Dramais et *al.* (2011) indiquent que l'analyse de minimum cent images réduit la variance du résultat final à 1%.

Pour la prise de vidéos destinées à l'analyse LSPIV, l'USGS (*United State Geological Survey*) et l'ECCC (*Environment and Climate Change Canada*,) ont émis une directive qui est résumée par les points suivants :

- l'utilisation de plusieurs caméras doit être favorisée pour avoir assez d'informations sur chaque image. Une résolution minimum de 640 x 480 pixels est requise ;
- l'enregistrement doit durer au moins une minute ;
- la caméra doit être la plus stable possible. L'utilisation d'un trépied est donc vivement conseillée.
- si l'inclinaison de la caméra est inévitable, l'angle doit être inférieur à 15° ;
- il faut s'assurer de la présence de zones fixes dans le champ de vue de la caméra ; ces zones doivent reprendre au moins quatre points géo-référencables ;
- il est conseillé de filmer une zone où le modèle de perturbation de l'écoulement de surface est uniforme dans le temps ;
- la vidéo doit être réalisée à un endroit où le lit de la rivière est stable et ne risque pas d'évoluer durant l'enregistrement ;
- les problèmes d'illumination locaux doivent être évités (pas de zone d'ombre) ;
- si la vidéo est prise depuis ou à proximité d'un pont, il faudra tenir compte de l'influence que peuvent avoir les piliers du pont sur l'écoulement.

Quant à la fréquence d'échantillonnage définie avec l'équation Eq. 3.1, Messelhe et *al.* (2004) proposent la relation suivante :

$$TS = \Delta t * \frac{V}{\sqrt{A}} \quad [/] \quad (Eq. 3.1)$$

Où

- Δt est le temps qui sépare deux photos en [s]
- V est la vitesse moyenne de surface en [m/s]
- A est l'aire couverte par la zone d'interrogation (IA) en [m²]

Pour maximiser la confiance vis-à-vis des résultats de LSPIV, Messelhe et *al.* (2004) spécifient que le facteur TS doit être compris dans l'intervalle $0.05 \leq TS \leq 0.1$. Lewis et *al.* (2018) spécifient aussi que le pourcentage d'erreur augmente si la fréquence d'échantillonnage diminue.

3.4.7. Ensemencement

Selon les premières études en LSPIV, la taille des traceurs est un paramètre décisif mais un compromis doit être fait sur celle-ci. En effet, il doit être assez grand pour être visible et assez petit et léger pour flotter et ainsi permettre de suivre le flux.

En revanche, en LSPIV, il est important que la taille du traceur ne change pas entre deux images. Enfin, le traceur ne doit pas interférer de manière significative avec le flux et son mouvement doit être détecté en surface.

Selon Messelhe et *al.* (2004), la densité des traceurs sur la surface libre doit être suivie et analysée. En effet, en l'absence de traceurs en suffisance, la corrélation entre deux images est tronquée (manque de détection). Au contraire, si la densité de traceurs est trop importante, l'IA est saturée. La distinction entre traceurs est rendue difficile et les vecteurs de vitesse sont erronés. Pour obtenir de bons résultats, la densité de traceurs sur la zone analysée doit être comprise entre 10 et 30 %.

Il est également important que les traceurs soient équitablement répartis sur l'ensemble de la largeur du cours d'eau. Dans certains cas, des appareils permettant la distribution de l'ensemencement sur toute la largeur sont utilisés (Harpold et Mostaghimi, 2004 ; Tauro et *al.*, 2015). Harpold et Mostaghimi (2004) et Jodeau et *al.* (2007) confirment le fait que le manque de traceur a pour effet une sous-estimation importante des vecteurs de vitesse. En effet, lors de l'analyse LSPIV, des vecteurs nuls entrent dans le calcul de la moyenne. Selon Harpold et Mostaghimi (2004), au minimum trois traceurs par IA, sont nécessaires. Enfin, la précision augmente de manière importante dès la présence de cinq traceurs par IA.

De son côté, Di Cristo (2011) met en évidence le problème lié à la tension superficielle de l'eau. En effet, les traceurs ont tendance à s'agglutiner et à se fixer aux berges. La dispersion des traceurs n'est donc pas optimale et impacte directement la mesure des vecteurs de vitesse.

Dans son étude, Hauet (2006) indique que quatre types d'erreur sont imputables aux traceurs : leur évolution dans le temps (par exemple, temps de vie limité de l'écume), leur caractère non passif (il n'y a donc pas de représentation stricte du schéma d'écoulement), l'évolution de leur densité spatiale au cours de l'enregistrement et, le contraste non suffisant entre le traceur et la surface de l'eau.

Enfin, en vue d'optimiser la technique LSPIV, Detert et Weibrecht (2014) définissent les propriétés des traceurs, à savoir : être suffisamment flottant, assurer un contraste « traceur/surface de l'eau » suffisant, ne pas être influencé par le vent, être produit en grande quantité (à titre

d'exemple, Detert et Weibrecht (2014) utilisent plus de 6000 traceurs pour 120 secondes d'enregistrement), couvrir une surface minimum de $3 \times 3 \text{ px}^2$ sur une photo et, finalement, ne pas influencer la qualité de l'eau. Ils en concluent que des copeaux de bois sont de bons traceurs pour l'analyse LSPIV.

3.4.8. Prétraitement et post-traitement

Selon Vanden Berghe (2013), le pré et le post-traitement sont deux étapes indispensables pour maximiser la précision lors de l'analyse LSPIV des images. Différentes techniques de traitement des images existent, comme : l'orthorectification, la correction de l'effet « *fish-eyes* » (angles arrondis), l'application de filtres sur les images pour rendre les traceurs détectables et le retrait des vecteurs erronés induit par des vaguelettes à la surface de l'eau. À nouveau selon cet auteur, toutes ces opérations diminuent de manière considérable le travail sur terrain tout en augmentant la précision de la technique.

Enfin, Lewis et *al.* (2018) analysent l'impact de ces techniques de traitement d'images sur les étapes de pré et post-traitement. Ils concluent que les paramètres par défaut proposés par les logiciels permettent d'obtenir des résultats satisfaisants.

Focus sur une technique de prétraitement

Vanden Berghe (2013) utilise une nouvelle technique, nommée la DFT, *Display Function Transfer*. La fonction de transfert d'affichage est en fait une technique qui permet de modifier l'histogramme d'une image. Par histogramme d'une image, on entend une représentation graphique de la distribution des couleurs dans une image numérique. La modification de celui-ci permet d'augmenter le contraste sans perdre de qualité sur l'information que contient l'image. Certaines problématiques liées aux conditions naturelles (reflet, zone d'ombre) sont donc résolues. La Figure 3-3 présente les résultats d'une analyse PIV sans DFT (à gauche) et avec DFT (à droite).

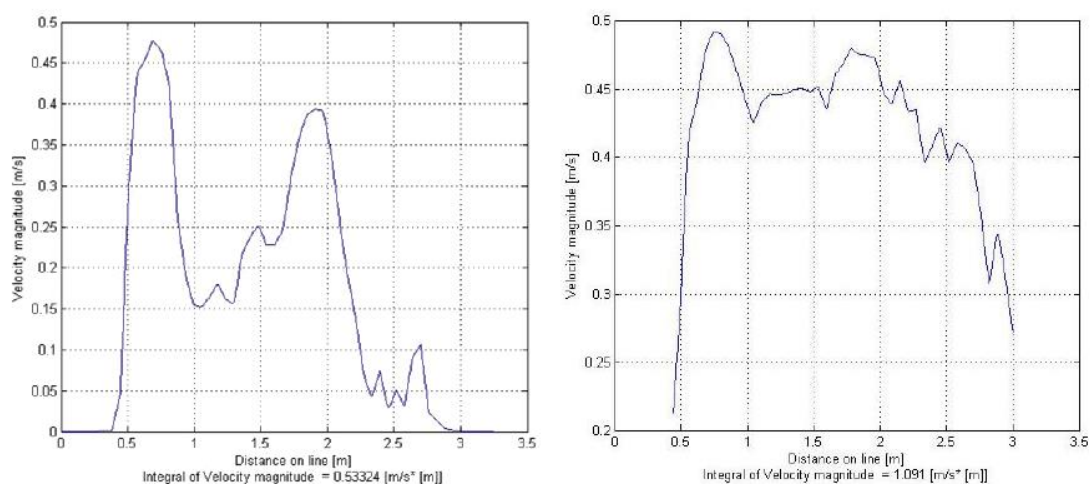


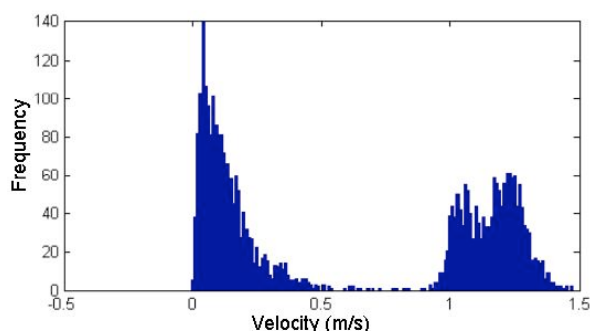
FIGURE 3-3 – RÉSULTATS D'UNE ANALYSE PIV SANS DTF (À GAUCHE) ET AVEC DFT (À DROITE) – VANDEN BERGHE (2013)

A la lecture de cette figure, nous constatons que les vitesses sont sous-estimées dans le cas de l'analyse PIV sans DFT. Cette technique semble donc prometteuse.

Focus sur une technique de post-traitement

Smith et *al.* (2005) proposent d'utiliser les graphes polaires pour améliorer le post-traitement en LSPIV. Sur base de l'histogramme repris à la Figure 3-4, ils mettent en lumière deux problèmes :

- le pic de vitesses très faibles, proche de zéro, n'est pas représentatif de l'écoulement. En réalité, l'eau est transparente et ces vitesses sont l'image du fond du cours d'eau ;
- la dispersion des vitesses (entre 1 et 1,4 m/s) est importante. Ce constat est lié au fait que l'algorithme PIV détermine des vecteurs vitesses dans toutes les directions.



1.

FIGURE 3-4 – HISTOGRAMME DE DISTRIBUTION DES VECTEURS DE VITESSE – SMITH ET AL. (2005)

Pour lever ces imprécisions, ils utilisent le graphe polaire pour déterminer l'axe principal du flux et fixent deux limites de vitesse. Toutes les vitesses présentes entre ces deux limites sont alors projetées sur cet axe principal. La méthode est illustrée à la Figure 3-5.

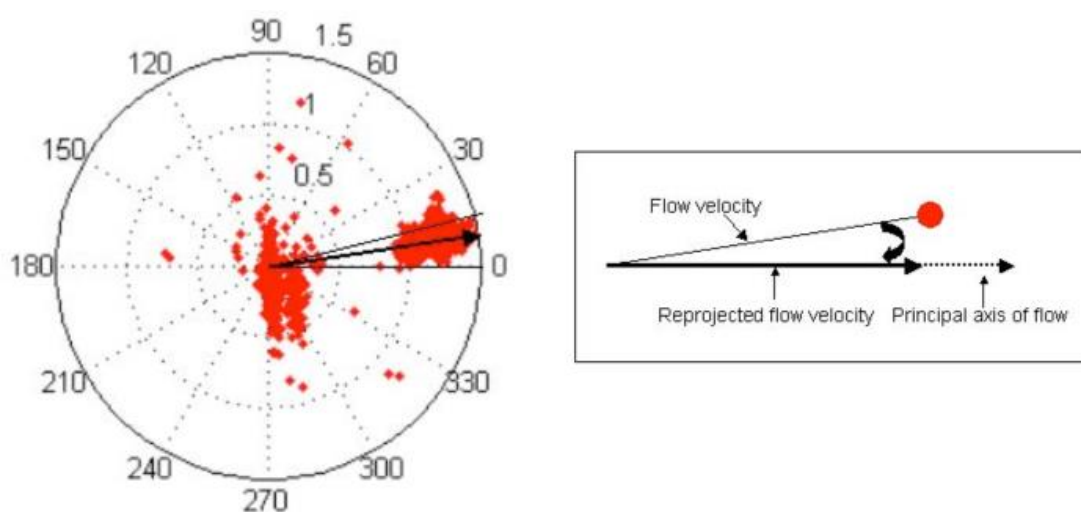


FIGURE 3-5 – ILLUSTRATION DE LA MÉTHODE PROPOSÉE PAR SMITH ET AL. (2005)

L'histogramme présenté à la Figure 3-6 reprend la distribution des vitesses après traitement des données comme expliqué ci-dessus.

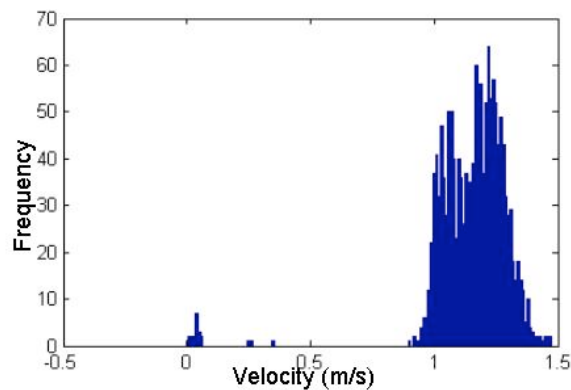


FIGURE 3-6 – HISTOGRAMME DE DISTRIBUTION DES VITESSES APRÈS TRAITEMENT – SMITH ET AL. (2005)

A la lecture de cette figure, nous constatons que les vitesses faibles ont quasiment disparu et que la distribution des vitesses est moins aléatoire. Cette technique offre donc de belles perspectives en matière de post-traitement.

3.4.9. Analyse PIV

L'algorithme de la PIV est relativement bien fixé et documenté. Bien que Kim (2006) mette en évidence que la méthode PIV est entachée de vingt-sept sources d'erreurs, seules les quatre plus importantes sont reprises ci-dessous :

- la densité de traceurs ;
- l'identification des GRP's (Ground Control Points) ;
- la précision du suivi du flux par les particules (si la résolution est mauvaise) ;
- la fréquence d'échantillonnage.

Ces sources d'erreurs sont externes à l'algorithme de la PIV. Legout et *al.* (2012) mettent en avant la robustesse de la technique d'analyse. De fait, ils testent l'algorithme en faisant varier 50% des paramètres et ils constatent que la différence au niveau des résultats est de l'ordre de 20%.

A l'heure actuelle, Strelnikova et *al.* (2020) indiquent qu'il n'existe toujours pas de logiciel où la ROI et l'IA s'adaptent en fonction des traceurs et de leur densité. Cette adaptation permettrait de limiter le nombre de vecteurs nuls, responsables de la sous-estimation des vitesses de surface.

3.4.10. La végétation

Lorsqu'on doit travailler sur un cours d'eau dont les berges présentent une importante densité de végétation et/ou que la végétation est relativement présente au sein même du cours d'eau, deux nouveaux problèmes peuvent surgir (Vanden Berghe, 2013) :

1. si la végétation bouge pendant la phase d'enregistrement, cela peut fausser les résultats parce que des vecteurs de vitesse vont apparaître au niveau de la végétation ;
2. les traceurs pouvant rester bloqués dans la végétation, peuvent être source de mauvais vecteurs vitesse lors de l'analyse PIV. Ils peuvent également perturber la surface de l'eau et donc fausser les résultats.

Enfin, Creëlle et *al.* (2016) indiquent que la végétation peut influencer de manière significative les vitesses en surface, et ce jusqu'à 35%.

3.4.11. Variabilité spatio-temporelle des cours d'eau

A partir du traitement d'images obtenues avec des techniques non intrusives, la LSPIV permet de caractériser la surface et la hauteur de l'eau d'une rivière. Un cours d'eau ne se résume pas à sa surface libre. En effet, la bathymétrie, le tracé et la rugosité du lit sont des facteurs qui évoluent dans le temps et l'espace. Ces variations spatio-temporelles sont largement réduites pour un cours d'eau canalisé.

Selon Creutin (2001), l'installation d'une station fixe pour monitorer le débit d'une rivière nécessite de prendre en compte divers paramètres. Effectivement, la géométrie de la vallée, la stabilité des berges et enfin, la variabilité de la rivière dans le temps impactent les mesures.

Le choix du site d'analyse est donc un élément primordial. La station d'analyse doit être posée à un endroit où la géométrie varie très peu dans le temps. Vu les caractéristiques uniques de chacun des cours d'eau, il n'est pas possible de créer une méthode valable pour tous les cours d'eaux (Creutin, 2001).

3.4.12. La fiabilité des mesures de vitesse de surface et de détermination de débit

La précision de la méthode LSPIV a fortement évolué au cours du temps. En effet, pour une analyse LSPIV dans des conditions normales, l'incertitude sur les mesures de vitesse de surface passe de +/- 28% en 2004 (Harpold et Mostaghimi, 2004) à +/- 10% en 2018 (Chen, 2018). Certains résultats montrent qu'une précision de +/- 1%, à savoir l'écart entre les résultats de l'analyse LSPIV et les mesures réelles, peut être atteinte (Naresh et Naik, 2016).

Quant au débit, les analyses LSPIV en conditions normales ne permettent pas de le quantifier de manière précise. Effectivement, pour ce calcul, le coefficient de vitesse doit être maîtrisé (voir section 4). Lors d'événements extrêmes, période de crue ou d'étiage, l'incertitude liée au coefficient de vitesse est très faible comparée à celle des extrapolations/méthodes empiriques utilisées pour déterminer le débit dans ces conditions. Les exemples repris ci-après illustrent ce propos :

- Messelhe et *al.* (2004), qui appliquent la LSPIV sur des hauteurs d'eau et de vitesses de surface très faibles (de 0.013 m/s à 0.002 m/s), montrent que l'erreur sur les débits est de l'ordre de 5% ;
- pour caractériser le débit lors d'une crue éclaircie, Le Coz et *al.* (2010) calculent, par la technique de LSPIV, des débits qui s'écartent de 10% par rapport à ceux prédits par la courbe de tarage ;
- Dramais et *al.* (2011) travaillent sur des débits supérieurs à 300 m³/s. Ils spécifient que, pour une LSPIV bien paramétrée, les résultats obtenus sont meilleurs que ceux prédits par la courbe de tarage établie par la société EDF.

3.4.13. Recommandations

Dramais et *al.* (2011) établissent des recommandations (voir Tableau 3-2) pour les mesures de vitesse et de débit par LSPIV. Ils attribuent aux différentes recommandations un degré d'importance. Assurément, certaines étapes affectent plus ou moins la précision de la méthode.

TABEAU 3-2 – RECOMMANDATIONS POUR L'APPLICATION DE LA LSPIV - DRAMAIS ET AL. (2011)

	Recommendations / Steps	Importance
LSPIV velocity measurement	Straight and uniform reach	***
	Choice of the cross-section (piers...)	**
	The camera viewpoint and site angle	**
	The GRP measurement and distribution	****
	Seeding of artificial tracers	*
	Water level measurements	**
Discharge measurements using LSPIV	Water level measurements	****
	Bathymetry before/after the flood	**
	Choice of discharge transects	**
	Concurrent stream gauging	***
	Velocity coefficient	**

Pour finir, Pearce et *al.* (2020) concluent que la LSPIV est une technique réservée à un opérateur averti et formé. Dans le cas contraire, les résultats sont généralement peu fiables car variables d'une analyse à l'autre.

3.5. Atouts de la technique

Creutin (2001) met en avant le fait que cette méthode est peu onéreuse, rapide et facilement transportable. D'après Jodeau et *al.* (2007), pour une rivière de +/- 50m de largeur, une heure de jaugeage est nécessaire pour avoir une valeur correcte du débit. En revanche, avec la LSPIV, le champ de vitesse en deux dimensions de la zone étudiée est obtenu de manière quasi instantanée. Creutin (2001) ajoute que les photos peuvent être visualisées et sélectionnées avant d'être analysées. Les données fournies à l'algorithme sont donc optimisées.

Fujita et Hino (2003), Messelhe et *al.* (2004) et Hauet (2006) mettent ainsi en évidence que la LSPIV n'est pas limitée par le caractère extrême des débits. Effectivement, les méthodes traditionnelles nécessitent le placement d'appareils dans le flux d'eau avec une hauteur d'eau minimum requise. En LSPIV, technique non intrusive, cette hauteur d'eau minimum n'est pas nécessaire. Enfin, en période de crue, les méthodes traditionnelles de jaugeage ne permettent pas de mesurer les vitesses de surface (impossibilité de maintien des appareils dans le flux et danger pour l'opérateur). Cependant, pour calculer ce débit de crue, l'utilisation d'un drone ou d'un hélicoptère permettra de prendre des images et recueillir ainsi des informations réelles en toute sécurité. Partant de cette idée, Hauet (2006) confronte les mesures prises par la LSPIV à une courbe de tarage. La LSPIV

permet d'avoir des mesures réelles tandis que dans les méthodes traditionnelles, les valeurs extrêmes sont extrapolées au départ de la courbe de tarage (voir Figure 3-7).

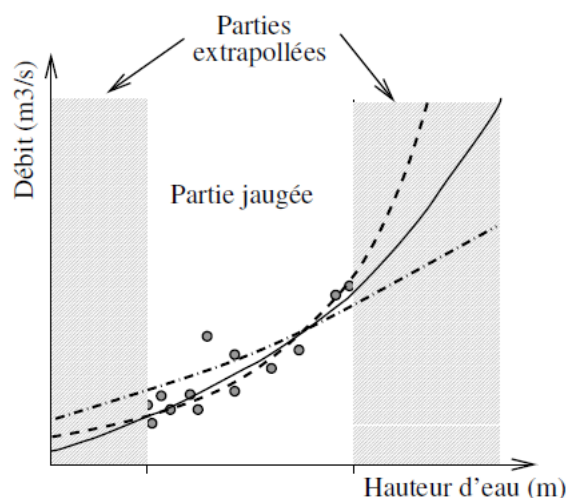


FIGURE 3-7 – COURBE DE TARAGE ET EXTRAPOLATION - HAUET (2006)

À la lecture de cette figure, nous remarquons que les mesures réelles (partie jaugée) ne représentent qu'un petit panel de débits. De plus, différentes extrapolations sont possibles : pour une même hauteur d'eau, différentes valeurs de débits peuvent donc être données. La LSPIV apporte des précisions quant à ces valeurs extrêmes de débit.

Pour finir, Pearce et *al.* (2020) mettent en avant le fait que cette méthode fournit un champ d'information complet sur les vitesses de surface. Selon eux, c'est l'algorithme le plus largement utilisé et documenté.

3.6. Les logiciels d'analyse

Dans cette partie du travail, deux logiciels utilisés dans nos travaux sont présentés. Le premier est PIVlab. Ce logiciel est déjà utilisé dans les mémoires traitant de la LSPIV à l'UCLouvain. Le deuxième est Fudaa-LSPIV qui est utilisé pour la première fois.

3.6.1. Le Logiciel PIVlab

Lors de leur travail de fin d'études, Bia et Somers (2018) ont utilisé le logiciel PIVlab. Ils y ont apporté quelques améliorations, et ce afin d'améliorer l'estimation des vitesses de surface. Nous reprenons les grandes lignes de leur travail pour présenter ce logiciel.

PIVlab est un logiciel développé en 2010 par William Thielicke (biologiste allemand et docteur en biomimétique ainsi qu'en dynamique des fluides). Initialement, ce logiciel a été conçu pour analyser l'aérodynamique du battement d'ailes des oiseaux. Ensuite, il a été développé pour d'autres applications, entre autres, pour analyser la déformation du sable ou encore pour l'analyse par LSPIV. En appliquant l'algorithme de la PIV sur des images, ce logiciel est capable de donner des informations de vitesse.

Il s'agit d'un logiciel open-source qui tourne sous Matlab, programme de calcul pour lequel une licence est nécessaire. Le logiciel PIVlab est doté d'une interface « *user-friendly* » ; l'annexe 4 reprend

les différentes étapes essentielles à son utilisation. Enfin, Thielicke et Stamhuis (2014) proposent un tutoriel pour une utilisation complète de ce logiciel.

3.6.2.Fudaa-LSPIV

À la différence de PIVlab, le logiciel Fudaa-LSPIV a été développé spécifiquement pour réaliser des analyses LSPIV. Il a été développé, entre autres, par Le Coz, Hauet et Jodeau sous la direction d'EDF et d'IRSTEA. Il est disponible aussi bien sur Microsoft que sur Linux, en anglais et en français. Il a été publié sous licence libre GPL. Le programme est en perpétuelle amélioration et la dernière version 1.7.3 a été publiée en février 2020.

Fudaa-LSPIV permet de réaliser toute la méthodologie liée à l'analyse LSPIV dans un seul et même programme. Il permet : d'importer des images ou vidéos d'un écoulement, de stabiliser et orthorectifier celles-ci, de réaliser l'analyse PIV et le post-traitement éventuel, d'importer une bathymétrie, et finalement, de calculer un débit. Le manuel d'utilisateur (Jodeau et *al.*, 2020) permet une prise en main facile et rapide du programme.

4. La vitesse de l'eau

Pour caractériser un cours d'eau, nous devons connaître sa bathymétrie, sa ligne d'eau et également son débit. Par débit, nous entendons le volume d'eau passant au travers d'une surface par unité de temps. Le débit, exprimé en m^3/s ou en l/s , résulte de la multiplication de deux grandeurs physiques, à savoir la surface (m^2) et la vitesse (m/s).

Dans le cas d'une rivière, la surface est calculée à partir de la bathymétrie et de la hauteur d'eau. Cette surface, appelée surface mouillée ou aire mouillée, représente la zone délimitée par la partie de la bathymétrie qui est en contact avec l'eau, communément appelée périmètre mouillé (P) et la ligne formée par la hauteur d'eau (h). Cette zone est représentée en bleu sur la Figure 4-1

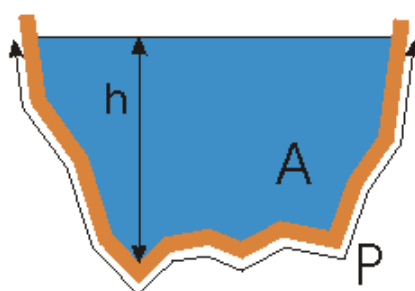


FIGURE 4-1 – ILLUSTRATION DE L'AIRE MOUILLÉE (EN BLEU) – UCLouvain (2020)

Ayant trouvé la surface mouillée, il nous faut donc connaître la vitesse de l'eau qui passe à travers cette section pour pouvoir calculer un débit. Pour valider la mesure de la vitesse moyenne d'un cours d'eau, nous devons être en mesure de répondre aux questions suivantes :

- Comment mesurer la vitesse d'un cours d'eau en surface ?
- La vitesse de l'eau en surface est-elle une constante quel que soit l'endroit de mesure ?
- La vitesse de l'eau est-elle constante quel que soit le tronçon analysé ?
- La vitesse de l'eau varie-t-elle horizontalement et verticalement ? Si oui, comment ?
- Comment calculer une vitesse moyenne à travers toute l'aire mouillée ?

Dans le cadre de ce travail, nous ne pouvons évidemment pas répondre à toutes ces questions. En rapport avec notre recherche, nous nous intéressons à la mesure de la vitesse de l'eau en surface, et ce en utilisant la LSPIV. D'autres questions se posent, à savoir :

- La vitesse de surface, en un point donné, est-elle constante sur toute la surface de la ligne d'eau ?
- La vitesse de surface, en un point donné, est-elle la vitesse moyenne de la colonne d'eau située sous ce point ? Si non, est-elle plus grande ou plus petite que cette vitesse moyenne ?
- La vitesse de surface est-elle toujours la vitesse maximale ?
- Comment, en se limitant aux vitesses de surface, peut-on déterminer la vitesse moyenne à travers toute la surface mouillée ?
- Comment échantillonner la distribution des vitesses de surface ?

Afin de répondre à ces questions, nous présentons ci-après la distribution de la vitesse de l'eau (tant horizontale que verticale), le rapport entre la vitesse de surface et la vitesse moyenne (y compris le coefficient qui lie ces deux vitesses) ainsi que la méthode d'échantillonnage verticale pour la mesure du débit.

4.1. Distribution des vitesses au sein d'une rivière

Cette section présente la distribution horizontale et verticale des vitesses de l'eau.

4.1.1. Distribution horizontale des vitesses

La distribution des vitesses de l'eau dans un plan horizontal est schématisée à la Figure 4-2.

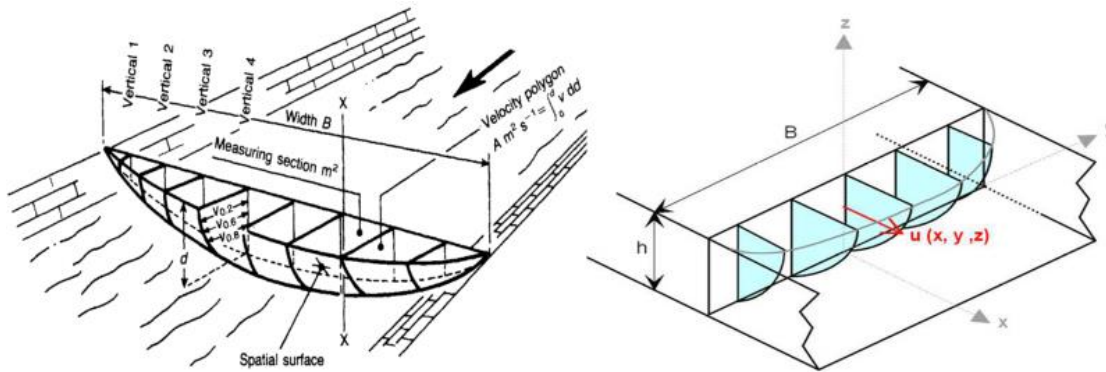


FIGURE 4-2 – PROFILS DE VITESSE (À GAUCHE HERSCHY (2009) – À DROITE LARRARTE ET AL. (2016))

Sur cette figure, Herschy (2009) et Larrarte et *al.* (2016) ont mis en évidence le fait que les vitesses augmentent progressivement de la paroi vers le centre de la rivière. Cette variation peut être plus ou moins importante en fonction de : la rugosité des parois, de l'importance de la végétation, etc. De nombreux facteurs liés aux berges impactent cette distribution.

La surface de l'eau correspond au plan horizontal accessible sans intrusion. Sur base de la mesure des vitesses de surface (Figure 4-3), on confirme le profil repris ci-dessus, à savoir une vitesse qui augmente des bords vers le centre de la rivière.

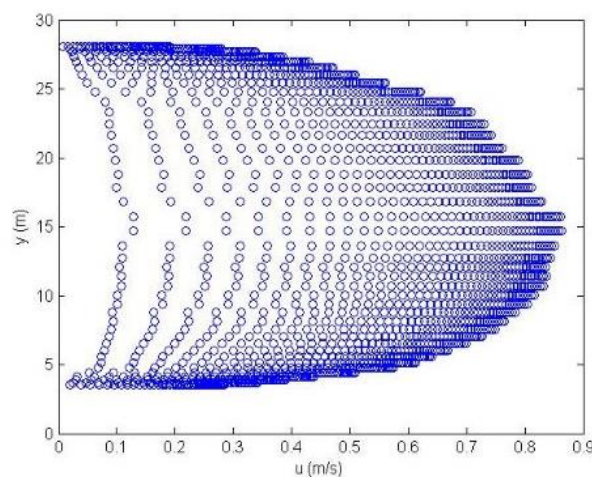


FIGURE 4-3 – PROFIL DES VITESSES DE SURFACE – HANSEN ET AL. (2017)

En conclusion, la vitesse de surface n'est pas constante en tout point d'un plan horizontal.

4.1.2. Distribution verticale des vitesses

Le profil vertical de vitesse n'est pas constant sur toute la hauteur d'eau. La Figure 4-2 présentant les profils de vitesse reprise ci-dessus. La distribution verticale des vitesses peut être déterminée soit de manière théorique, soit de manière expérimentale.

Moyennant certaines hypothèses et conditions, deux lois permettent d'établir ce profil théorique, à savoir :

1. la loi logarithmique

Selon Hauet et *al.* (2018), la distribution suit la relation ci-après :

$$\frac{u(z)}{U^*} = \frac{1}{\kappa} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (Eq. 4.1)$$

où $u(z)$ est la vitesse à la profondeur choisie (z), U^* la vitesse de cisaillement, κ la constante de von Karman ($\cong 0.4$) et z_0 un paramètre caractéristique de la rugosité hydraulique ;

2. la loi des puissances

Toujours selon Hauet et *al.* (2018), la distribution de vitesse satisfait la relation suivante :

$$u(z) = a * (z - z_0)^{\frac{1}{m}} \quad (Eq. 4.2)$$

où les nouveaux paramètres sont u_{max} la vitesse à la surface de l'eau, a un coefficient et $1/m$ l'indice de la loi des puissances.

La Figure 4-4 présente un profil de vitesse de type logarithmique.

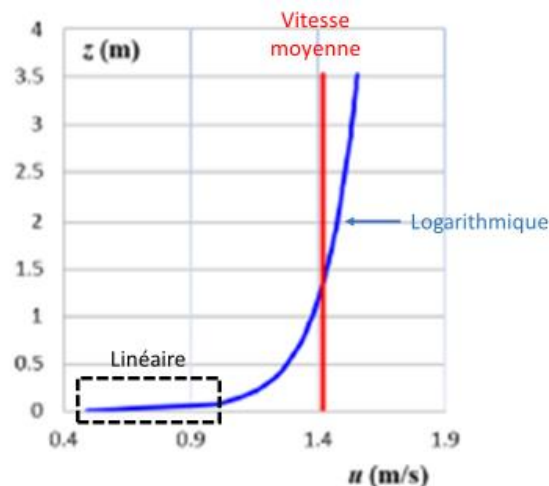


FIGURE 4-4 – PROFIL DE VITESSE DE TYPE LOGARITHMIQUE - SOARES-FRAZÃO (2017)

Sur cette figure, nous observons que le profil de vitesse près du lit du cours d'eau ne suit pas une loi logarithmique. En effet, Soares Frazão (2017) met en évidence que dans une couche limite dont l'épaisseur vaut z_0 , l'écoulement est laminaire et le profil de vitesse suit donc une loi linéaire.

Même si Cardoso et *al.* (1989), Le Coz et *al.* (2010) mettent en évidence que pour des rivières relativement larges, le profil logarithmique pour $z/h < 0.7$ permet d'établir de manière fiable la distribution verticale des vitesses, il s'avère que, dans de nombreux cas, le profil de vitesse ne répond pas strictement à l'une de ces deux lois. Effectivement, une multitude de facteurs tels que : le vent, la

largeur du canal, la végétation, le type d'écoulement, le transport de sédiments ou encore la population marine influencent le profil de vitesse.

Certains chercheurs proposent des profils qui répondent à des conditions particulières :

- Selon Stephan et Gutknecht (2002), la distribution de vitesse pour un cours d'eau dont le lit est recouvert de végétation suit la relation suivante :

$$u(z) = \frac{u^*}{\kappa} \ln \left(\frac{z - h_{p,m}}{h_{p,m}} \right) + u^* B_r \quad (\text{Eq. 4.3})$$

où $h_{p,m}$ est la hauteur moyenne de la végétation comme illustrée à la Figure 4-5.

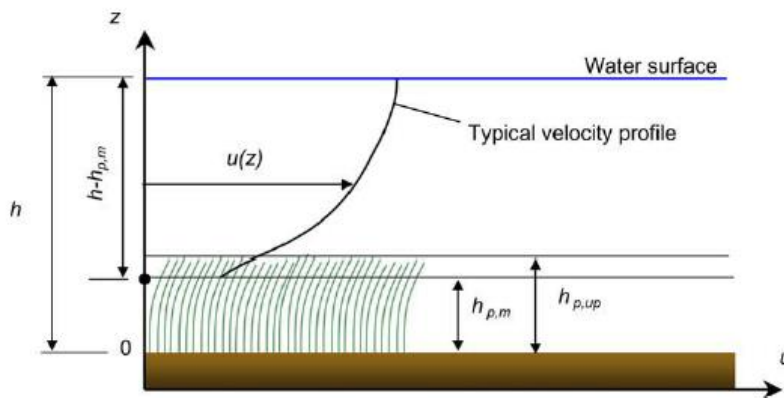


FIGURE 4-5 – PROFIL VERTICAL DE VITESSE AVEC DE LA VÉGÉTATION SUR LE LIT DE LA RIVIÈRE - STEPHAN ET GUTKNECHT (2002)

- Quant à Larrarte et *al.* (2016), ils spécifient que pour des canaux étroits, c'est-à-dire le rapport entre la largeur du canal et la hauteur d'eau inférieure à 5, un phénomène nommé « dip-phenomenon » se produit (voir Figure 4-6).

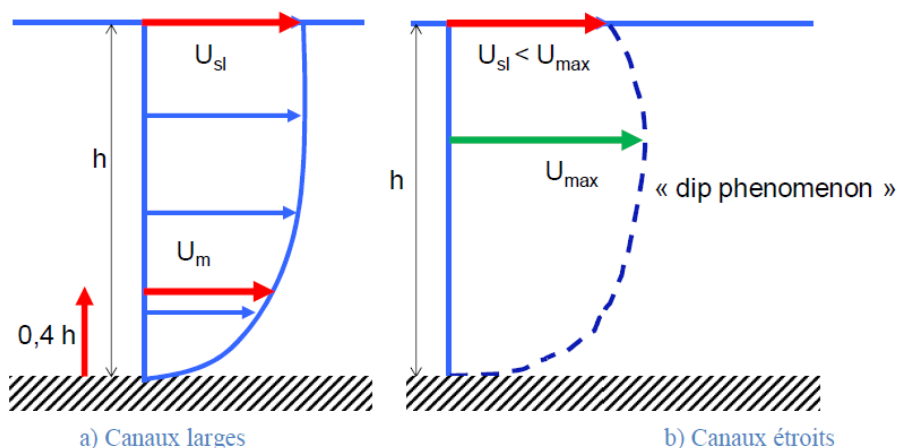


FIGURE 4-6 – ILLUSTRATION DU "DIP-PHENOMENON" - LARRARTE ET AL. (2016)

À la lecture de cette figure, nous constatons que contrairement au profil logarithmique, la vitesse maximale, U_{max} , n'est pas située à la surface de l'eau (U_{sl}).

Quant aux profils expérimentaux (Jodeau et *al.*, 2007 ; Dramais et *al.*, 2011), ils sont établis au départ des mesures de vitesse relevées, par jaugeage, à différentes hauteurs. Les données sont mises

en graphique afin d'en déduire une loi. Deux exemples repris à la Figure 4-7 illustrent cette méthodologie.

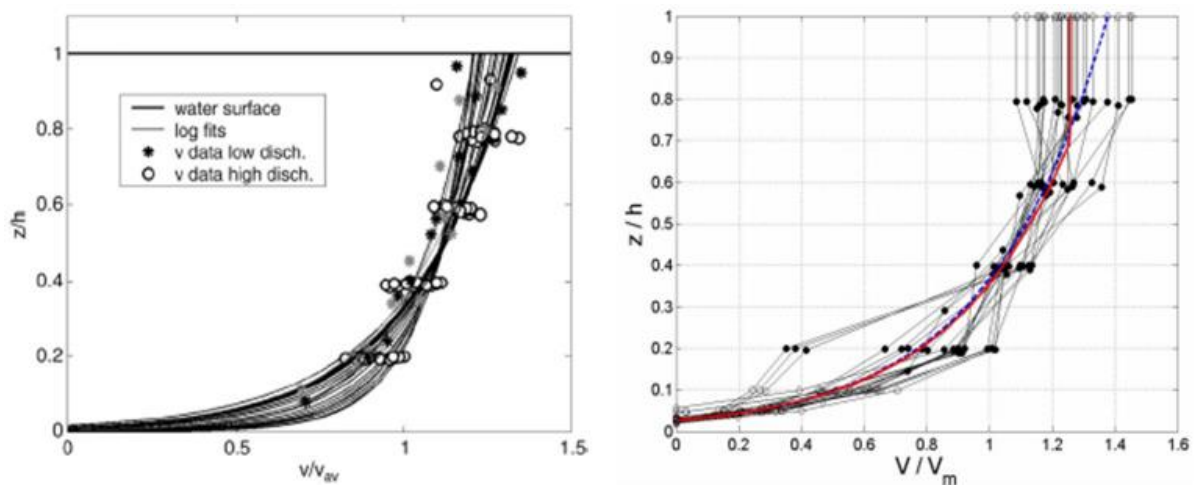


FIGURE 4-7 – PROFILS DE VITESSE (MESURES DES VITESSES PAR JAUGEAGE) - À DROITE JODEAU ET AL. (2017), À GAUCHE DRAMAÏS ET AL. (2011)

D'après cette figure, nous remarquons sur le profil de gauche que, pour chaque hauteur, les vitesses mesurées sont proches de la courbe donnée par l'interpolation de ces données. En revanche, pour le profil de droite, la dispersion des mesures réelles autour de la fonction d'interpolation est élevée.

En conclusion, la distribution des vitesses étant variable au sein même d'un cours d'eau, il est difficile sur base de la vitesse de surface aisément mesurable, d'estimer la vitesse moyenne à travers la section verticale, ou partie de la section. Le fait d'établir une relation entre vitesse maximale et vitesse moyenne à travers la section verticale, c'est-à-dire la vitesse nécessaire au calcul de débit d'un cours d'eau, est abordé dans la section suivante.

4.2. Vitesse de surface versus vitesse moyenne

La recherche d'une méthode de mesure de débit sans contact passe par la recherche de la relation entre la vitesse à la surface libre et la vitesse moyenne en profondeur. Selon Polatel (2005), le fait de relier ces deux vitesses est appelé *indexing*. Ce rapport établit le coefficient de vitesse α , soit :

$$\alpha = \frac{\text{vitesse moyenne en profondeur}}{\text{vitesse à la surface libre}} \quad (\text{Eq. 4.4})$$

Cette relation offre de belles perspectives pour les nouvelles technologies de mesure de vitesses sans contact (radars, images) en rivière. Connaissant le coefficient de vitesse α , la vitesse moyenne à travers la surface mouillée (nécessaire à la quantification du débit), pourra donc être déduite. De nombreux travaux sont réalisés afin d'estimer la valeur du coefficient α et d'analyser les facteurs qui l'affectent.

En réalisant l'échantillonnage du cours d'eau comme présenté à la Figure 4-8, on retrouve pour chaque colonne d'eau, les vitesses en surface (v_{surf_i}), les coefficients α associés (α_i) et les surfaces mouillées correspondantes (A_i).

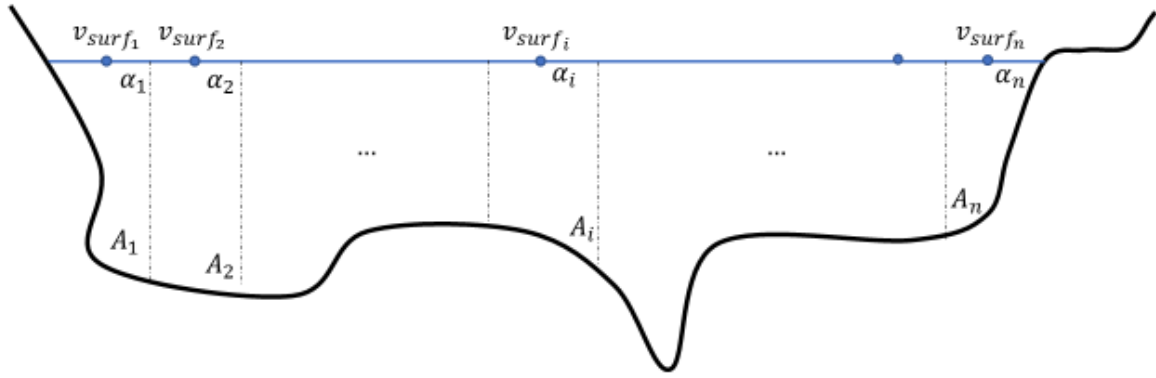


FIGURE 4-8 – ÉCHANTILLONNAGE VERTICAL DU COURS D'EAU

Dans ce cas, le débit du cours d'eau est la somme des débits de chacune des colonnes d'eau, soit :

$$Q = \sum_{i=1}^n Q_i = \sum_{i=1}^n \alpha_i * v_{surf_i} * A_i \left[\frac{m^3}{s} \right] \quad (Eq. 4.5)$$

Si le coefficient de vitesse α est constant le long de la ligne d'eau ($\alpha_1 = \alpha_2 = \dots = \alpha_n$), le calcul de débit devient :

$$Q = \sum_{i=1}^n Q_i = \alpha * \sum_{i=1}^n v_{surf_i} * A_i \left[\frac{m^3}{s} \right] \quad (Eq. 4.6)$$

La valeur de ce coefficient peut être déterminée théoriquement et/ou expérimentalement. Ci-dessous, nous présentons quelques travaux qui permettent de mesurer ce coefficient unique.

Afin de mesurer la vitesse de surface dans des canaux ouverts sans intrusion, Rantz (1982) indique que l'*U.S. Geological Survey* a développé un courantomètre optique. La vitesse de surface calculée doit être corrigée par un coefficient afin d'obtenir la vitesse moyenne de la verticale. Les mesures obtenues avec ce courantomètre montrent que l'application d'un coefficient de vitesse, de 0,9 pour les canaux en béton et de 0,85 pour les canaux naturels, permet d'obtenir la vitesse moyenne à 5% près.

Pour mesurer le débit de manière non intrusive dans un canal ouvert, Costa et al. (2000) mesurent la vitesse de surface pour vingt-cinq sous-sections du canal. En supposant un profil de vitesse normal, ils en déduisent la vitesse moyenne pour chaque sous-section. Un coefficient de vitesse de 0,85 permet d'obtenir le débit avec un écart de moins de 5% par rapport au débit de référence. Cette expérience prouve donc qu'il est possible de mesurer de manière fiable le débit d'une rivière en utilisant des méthodes sans contact.

Polatel (2005) s'interroge sur l'impact que la rugosité du lit peut avoir sur le coefficient α . La Figure 4-9 présente la variation de ce coefficient en fonction de la hauteur, soit à 0,06 – 0,08 et 0,1 m, pour cinq milieux différents. Polatel indique aussi que le coefficient de vitesse varie, de 0,789 à 0,928, en fonction de la hauteur et de la nature du lit.

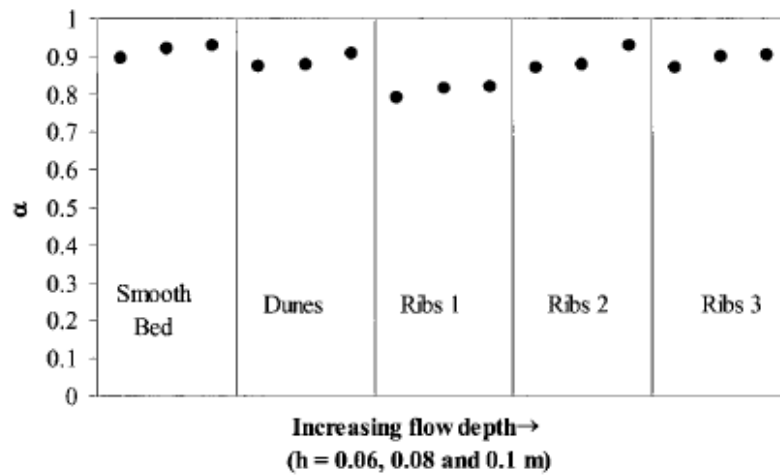


FIGURE 4-9 – VARIATION DU COEFFICIENT α DANS DIFFÉRENTS MILIEUX - POLATEL (2005)

Quant à Hauet et *al.* (2009), ils mesurent la vitesse d'un écoulement fluvial à l'aide de deux techniques innovantes : les profileurs Doppler fixes horizontaux et l'analyse d'image LSPIV. Dans leur conclusion, ils indiquent que ces techniques sont d'un grand intérêt pour débits importants qui sont généralement peu ou pas jaugés. En effet, l'incertitude sur le coefficient de vitesse deviendrait négligeable face à l'incertitude de l'extrapolation des courbes de tarage. Ils indiquent également qu'il serait intéressant de relier la valeur de ce coefficient α aux paramètres géométriques et hydrauliques des cours d'eau.

Afin d'évaluer la variabilité du coefficient α sur différents facteurs morphologiques et conditions hydrauliques, Welber et *al.* (2016) utilisent la technique de SVR (*Surface Velocity Radar*) pour établir la relation entre vitesse de surface et vitesse moyenne sur de nombreux sites.

Partant de la relation logarithmique de la distribution verticale des vitesses, Welber et *al.* (2016) en dérivent l'expression du coefficient α :

$$\alpha = \frac{D_i}{D_i - z_0} - \left[\ln \left(\frac{D_i}{z_0} \right) \right]^{-1} \quad (\text{Eq. 4.7})$$

où z_0 est un paramètre caractéristique de la rugosité hydraulique et D_i la profondeur d'écoulement.

Le coefficient α déterminé expérimentalement par Welber et *al.* (2016) est comparé avec le coefficient théorique selon la formule reprise ci-dessus (Eq. 4.7). La Figure 4-10 reprend en A la variation du coefficient de vitesse en fonction de la rugosité relative locale ; en B, on trouve la variation du coefficient de vitesse en fonction de la profondeur ; et, en C, la variation de ce coefficient en fonction de la rugosité relative globale est présentée. La ligne en pointillés représente la valeur par défaut du coefficient de vitesse (0,85), et la ligne continue, le coefficient théorique répondant à l'Eq. 4.7. Pour certains cours d'eau, les valeurs du coefficient de surface ne sont pas disponibles.

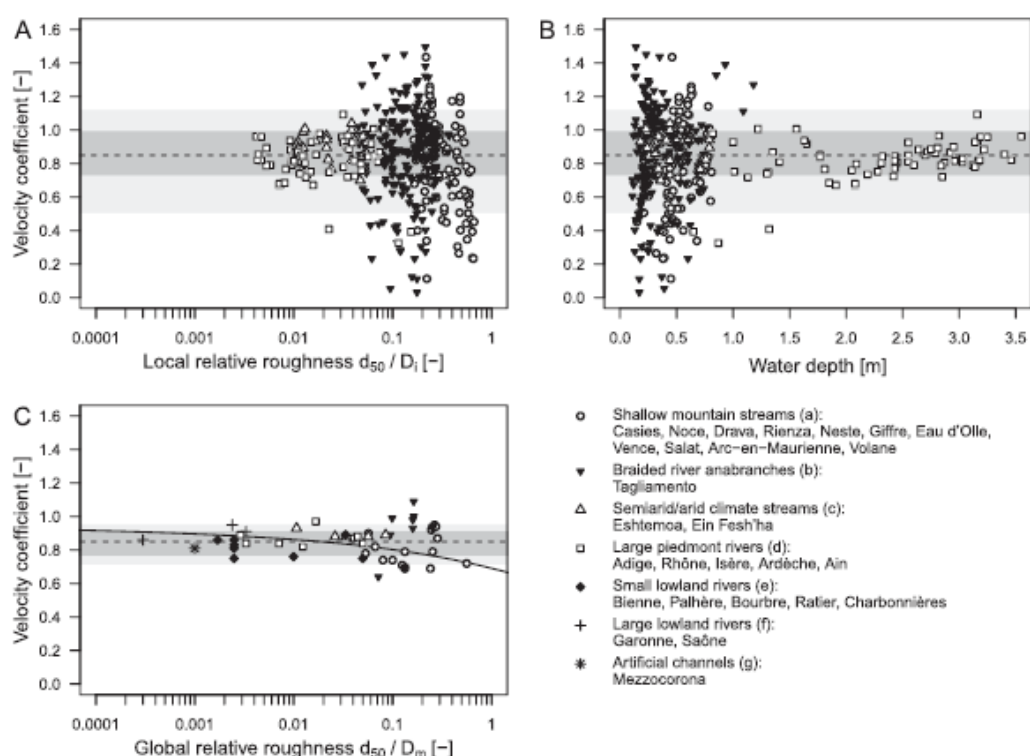


Figure 4. Variation of the local velocity coefficient with relative roughness (a) and local water depth (b) and variation of the global velocity coefficient with relative roughness (c). The dashed line represents the default value of the velocity coefficient (0.85). The solid line represents the theoretical velocity coefficient computed from equations (7) to (11). The interquartile range is shaded in dark grey; the 10th–90th percentile range is shaded in light grey. Local values of α are unavailable for some sites.

FIGURE 4-10 – VARIATION DU COEFFICIENT α - WELBER ET AL. (2016)

A la lecture de cette figure, nous constatons qu'une augmentation de la rugosité relative locale augmente la dispersion des valeurs du coefficient α (A). Nous observons également que ce coefficient varie fortement pour des cours d'eau de faible profondeur (B), et ce plus particulièrement pour les rivières étroites où le profil de vitesse ne suit pas nécessairement la loi logarithmique. Enfin, les valeurs du coefficient α en fonction de la rugosité relative globale sont nettement moins dispersées et proches de la valeur théorique de 0,85 pour les canaux naturels (C).

La valeur de 0,85 pour le coefficient α répond donc bien à une large gamme de valeurs de rugosité. Cependant, il faut souligner que cette valeur peut mener à des sous-estimations de débit dans des canaux très lisses et à des surestimations dans des canaux rugueux. Dans ces cas, une calibration sur site est nécessaire. En utilisant la technique de SVR pour la calibration, les débits finalement obtenus par Welber et *al.* (2016) sont précis à moins de 10% pour les rugosités intermédiaires. Cependant, pour les très faibles rugosités, l'estimation des débits n'est pas satisfaisante.

Hauet et *al.* (2018) ont, quant à eux, déterminé le coefficient α selon trois méthodes, à savoir la loi logarithmique, la loi des puissances et la mesure de la vitesse de surface. Pour réaliser leur étude, ils reprennent les données de 3611 jaugeages sur 176 sites différents d'EDF, Electricité de France. Avec ces données, ils couvrent ainsi un large échantillon de cours d'eau, d'une petite rivière de montagne à une large rivière de plaine. Le Tableau 4-1 reprend les caractéristiques suivantes des cours d'eau étudiés : le débit, la largeur, le rayon hydraulique et le ratio d'aspect, soit largeur sur rayon hydraulique. Pour chacun des paramètres, ce tableau présente le minimum, le maximum, la moyenne ainsi que les percentiles 10 et 90.

TABEAU 4-1 – CARACTÉRISTIQUES DES SITES ÉTUDIÉS - HAUET ET AL.

	Min	Max	Mean	Q10	Q90
Discharge (m ³ /s)	0.01	863	8.45	0.25	10.2
Width B (m)	0.49	90.3	13.1	3.80	24.8
Hydraulic radius Rh (m)	0.02	5.36	0.40	0.18	0.63
Aspect ratio B/Rh	2.43	165	35.2	14.0	64.0

Sur les 176 sites et les 3611 jaugeages, nous remarquons à la lecture de ce tableau que le débit varie fortement. En effet, le débit minimum est de 0,01 m³/s pour un débit maximum de 863 m³/s et un débit moyen de 8,45 m³/s. Enfin, 80% des cours d'eau analysés ont un débit compris entre 0,25 et 10,2 m³/s.

Le Tableau 4-2 présente le récapitulatif des résultats obtenus par Hauet et *al.* (2018) lors de la détermination des coefficients α par les trois méthodes.

TABEAU 4-2 – α_{log} , α_{power} ET $\alpha_{surface}$ - HAUET ET AL. (2018)

	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

Nous observons que les valeurs moyennes, quelle que soit la méthode de détermination du coefficient α , sont proches de la valeur par défaut de 0,85.

La Figure 4-11 présente les variations de α en fonction du rayon hydraulique, et donc de la profondeur du cours d'eau.

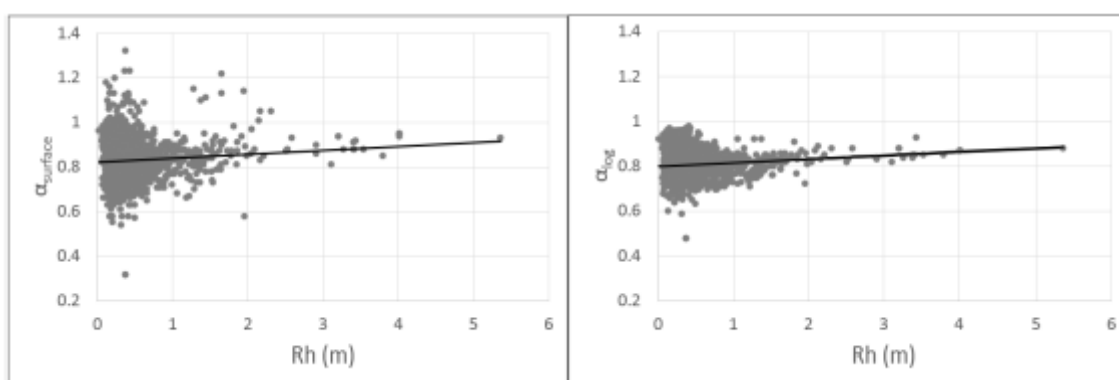


FIGURE 4-11 – ÉVOLUTION DE $\alpha_{surface}$ (À GAUCHE) ET α_{log} (À DROITE) EN FONCTION DU RAYON HYDRAULIQUE - HAUET ET AL. (2018)

80 % des cours d'eau analysés ont un rayon hydraulique compris entre 0,18 et 0,63 m avec comme valeur moyenne 0.4 m (Tableau 4-1). Nous sommes donc sur une majorité de cours d'eau de petite taille. Ce constat explique un coefficient légèrement plus faible que la valeur de référence de 0,85. Enfin, quelle que soit la méthode de calcul ($\alpha_{surface}$ ou α_{log}), ce coefficient de surface augmente très légèrement avec l'augmentation du rayon hydraulique. Les valeurs de $\alpha_{surface}$ supérieures à 1 sont dues aux effets du vent. En effet, les vitesses en surface diminuent lorsque le vent souffle à contre-courant.

Hauet et *al.* (2018) s'intéressent également à la variation du coefficient α avec « l'aspect ratio », défini comme le rapport entre la largeur du cours d'eau et son rayon hydraulique.

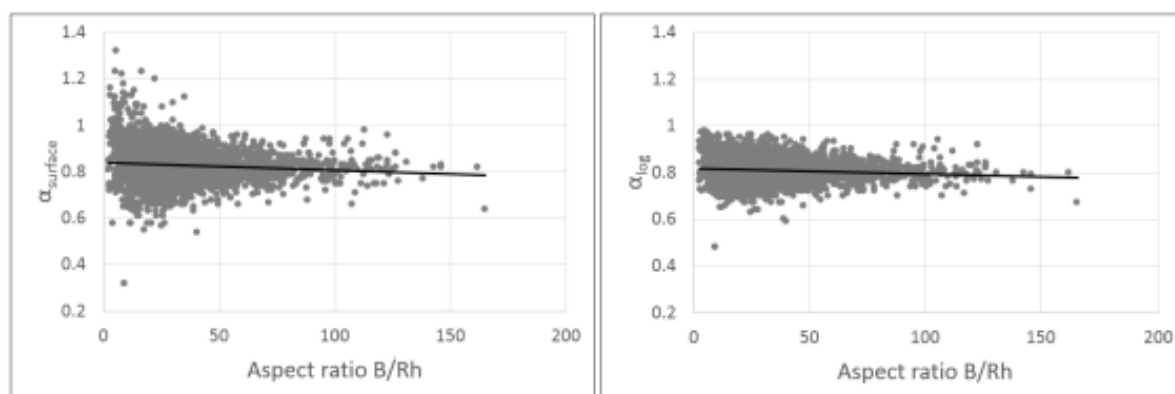


FIGURE 4-12 – ÉVOLUTION DE α EN FONCTION DU RAPPORT B/R_h - HAUET ET AL. (2018)

Dans ce cas, $\alpha_{surface}$ et α_{log} diminuent très légèrement avec l'augmentation de ce ratio.

Enfin, Hauet et *al.* (2018) évaluent la rugosité du lit pour les 3611 jaugeages et procèdent à un classement en quatre catégories. Pour chacune d'entre elles, ils enregistrent la valeur du coefficient de surface. La Figure 4-13 présente la distribution de α en fonction de la rugosité relative du lit. Par rugosité relative, on entend le rapport entre le rayon hydraulique et la taille moyenne des particules, soit R_h/d_{50} .

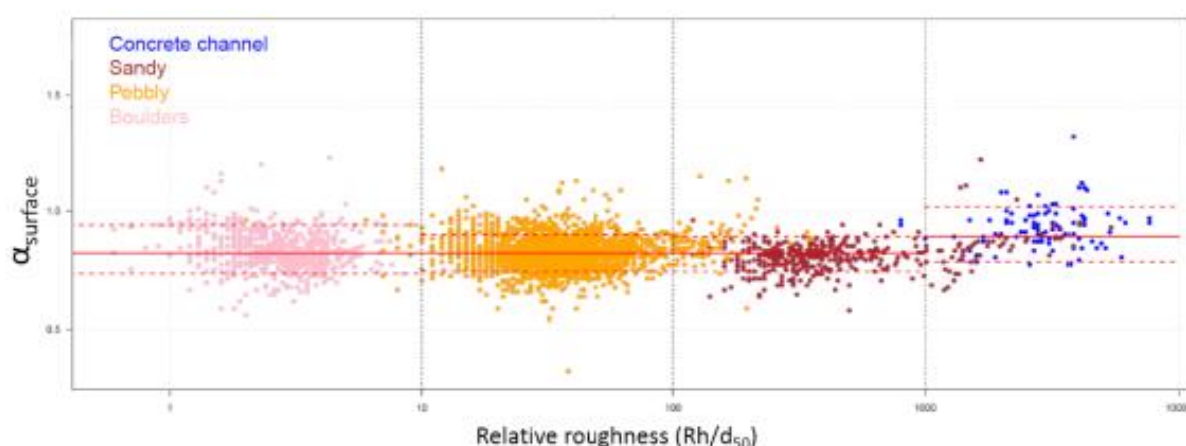


FIGURE 4-13 – ÉVOLUTION DE $\alpha_{surface}$ AVEC LA RUGOSITÉ RELATIVE - HAUET ET AL. (2018)

Sur base de cette étude, ils établissent que pour les rivières naturelles de faible profondeur (moins de 2 m), la valeur moyenne de α est de 0.8 et que celle-ci est de 0.9 pour les rivières plus profondes. Enfin, pour un canal artificiel en béton, ils proposent également un coefficient de 0.9. La valeur de 0.8 qui est inférieure à la valeur de référence de nombreux travaux (0.85), s'explique par la petite taille des rivières étudiée.

Finalement, dans le cadre de ce travail, nous posons l'hypothèse que le rapport entre la vitesse de surface et la vitesse moyenne de la colonne d'eau située sous ce point est constant le long du plan horizontal. Dès lors, nous prendrons un coefficient de vitesse unique.

REALISATIONS

1. Mesure de débit - La méthode de l'UCLouvain

Dans cette section, nous décrivons la méthodologie développée et appliquée à l'UCLouvain pour réaliser des mesures de débit en rivière. Cette méthode est généralement utilisée par les étudiants réalisant leur mémoire dans ce domaine. Ensuite, nous présentons notre première et unique campagne de mesures sur le terrain.

Pour rappel, au départ, les objectifs principaux de notre travail étaient de :

1. étudier la possibilité d'améliorer la méthode UCLouvain. A cette fin, nous devons prendre des mesures en rivière pour compléter et valider les résultats présentés par Asselberghs et Peeters (2019) et utiliser les débits déterminés par le SPW pour donner un ordre de précision à la méthode UCLouvain (décrite ci-dessous) ;
2. étudier l'évolution du coefficient de surface en fonction de la hauteur d'eau. Pour cet objectif, nous devons, pour un cours d'eau donné, soit la Lesse à Hérock, prendre diverses mesures de vitesse de l'eau.

1.1. Description de la méthode

Dans cette partie, nous présentons la méthodologie que nous avons suivie pour réaliser les mesures sur le terrain.

1.1.1. Première étape – La prise de mesures sur le terrain

Pour prendre des mesures sur le terrain, nous disposons du matériel mentionné ci-dessous et illustré à la Figure 1-1 :

- une GoPro Hero6 et un trépied avec un bras télescopique pour la GoPro ;
- des marqueurs codés en 12 bits issus de Agisoft-PhotoScan ;
- un système GNSS – Le Leica GPS1200 ;
- un courantomètre à induction magnétique – L'OTT MF pro.

Les spécifications techniques de ces appareils sont disponibles dans l'annexe 1.



Note : Les images de la GoPro, du MF pro et du GPS Leica proviennent des sites de leurs constructeurs

FIGURE 1-1 – APPAREILS UTILISÉS POUR LA PRISE DE MESURES SUR TERRAIN

La première étape importante consiste à prendre des photos qui doivent pouvoir être géoréférencées. Ces photos seront utilisées pour réaliser un modèle 3D de la berge. Ce modèle pourra être exploité par un algorithme de détection de surface libre de l'eau. La qualité des photos influencera directement la précision du modèle 3D, c'est pour cette raison que nous utiliserons une GoPro avec une résolution de 12Mpx.

Pour que les photos puissent être géoréférencées, deux conditions doivent être remplies, à savoir :

1. des GCP's doivent être visibles sur l'ensemble des photos ;
2. les coordonnées des GCP's doivent être connues.

Avant la prise de photos, nous devons donc placer au minimum cinq GCP's sur la berge et relever leurs coordonnées avec le Leica. Ensuite, afin que la berge puisse être correctement modélisée en 3D, nous prenons des photos sous différents angles de vue.

La deuxième mesure essentielle pour la détermination du débit est le relevé bathymétrique du cours d'eau. Pour réaliser ce relevé, nous utilisons le Leica.

Une vidéo de l'écoulement est également nécessaire. Pour rappel, si le cours d'eau doit être ensemené, il faudra prévoir les traceurs ad hoc. La vidéo de l'écoulement est réalisée à l'aide de la GoPro, préalablement placée perpendiculairement à l'écoulement. Pour ce faire, nous l'avons fixée le un pied d'appareil photo, pied placé sur un pont surplombant la rivière concernée.

Enfin, nous devons mesurer les vitesses de surface de l'eau. Cette mesure permettra de vérifier les vitesses de surface données à la suite de l'analyse vidéo. Afin de réaliser cette opération, nous avons utilisé le courantmètre du type OTT MF pro.

1.1.2. Deuxième étape – Le calcul de l'aire mouillée

Pour réaliser le calcul de l'aire mouillée, nous avons utilisé les logiciels suivants : Agisoft-PhotoScan et l'algorithme de détection de la surface libre sur un modèle 3D.

Pour cette deuxième étape, nous utilisons les photos géoréférencées prises sur le terrain. Ces photos sont introduites et traitées dans le logiciel de photogrammétrie Agisoft-PhotoScan en suivant la méthode expliquée dans l'annexe 2. C'est ainsi que nous obtenons le modèle 3D, ou DEM, de la berge.

A partir de ce modèle 3D, nous déterminons l'altitude du niveau d'eau. Connaissant le niveau d'eau et la bathymétrie de terrain, il nous sera possible de calculer l'aire mouillée. Cette deuxième étape est illustrée à la Figure 1-2.

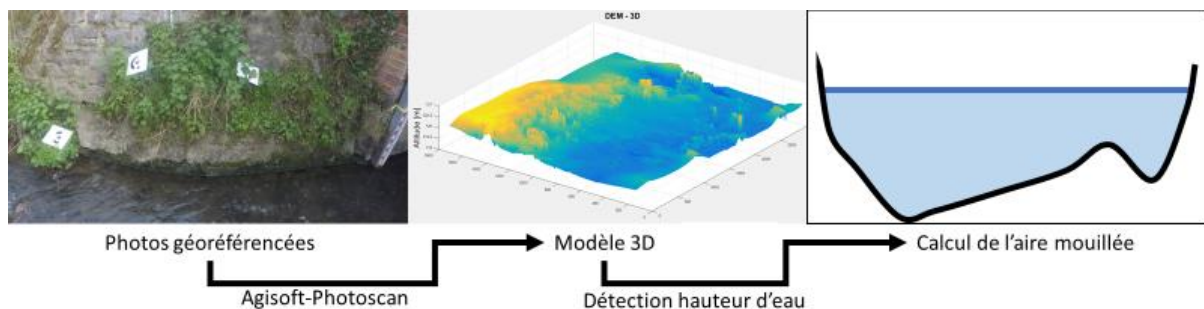


FIGURE 1-2 – ILLUSTRATION DE LA DEUXIÈME ÉTAPE DE LA MÉTHODOLOGIE SUIVIE À L'UCLouvain

1.1.3. Troisième étape – Le calcul des vitesses

Pour le calcul des vitesses en surface, nous utilisons le logiciel PIVlab.

En réalité, pour calculer le débit et connaissant l'aire mouillée, nous devons encore déterminer la vitesse de l'eau à travers cette surface. En réalisant une analyse LSPIV de notre vidéo avec PIVlab, nous obtenons les vitesses moyennes de surface. Ces vitesses sont converties en vitesses moyennes passant à travers l'aire mouillée à l'aide du coefficient de vitesse α . Un manuel d'utilisation pour PIVlab est disponible dans l'annexe 4.

En ce qui concerne la valeur du coefficient de surface, plusieurs possibilités s'offrent à nous : on peut lui assigner la valeur par défaut de 0.85, on peut prendre la valeur déterminée lors des campagnes de mesures antérieures, ou encore, on peut utiliser les vitesses réelles calculées avec le courantomètre pour déterminer sa valeur.

1.1.4. Quatrième étape – Le calcul du débit

Cette dernière étape consiste à calculer le débit avec l'aire mouillée et la/les vitesse(s) moyenne(s) qui passe(nt) à travers celle-ci. Afin de déterminer la précision de la méthode UCLouvain, nous comparons la valeur de débit obtenue avec le débit de référence, débit communiqué sur le site Aqualim du SPW.

Enfin, partant de ce débit de référence, nous pouvons également déterminer un coefficient de surface. En effet, en divisant le débit de référence par la surface d'aire mouillée calculée, nous obtenons la vitesse moyenne de l'eau qui passe à travers cette surface. Par conséquent, nous pouvons

en déduire le coefficient de surface qui, pour rappel, est le rapport entre la vitesse moyenne à travers l'aire mouillée et la vitesse moyenne de surface définie lors de l'analyse LSPIV.

1.2. Première campagne de mesures - Février 2020

Nous avons réalisé notre première campagne de mesures sur l'Orne à Blanmont et sur la Lasne à Rosières respectivement le 19 et 20 février 2020. Cette première expérience devait nous permettre de se rendre compte des réalités du terrain, et de préparer au mieux les futures campagnes de mesures.

En effet, nous avons prévu de prendre des mesures de manière récurrente sur quatre rivières à proximité de Louvain-la-Neuve. Ces quatre rivières, à savoir la Thyle, l'Orne, la Ligne et la Lasne, sont équipées d'une station limnimétrique du SPW. Ces 4 rivières ont déjà fait l'objet de campagnes de mesures les années précédentes, notamment par Asselberghs et Peeters (2019). Nous avons pour objectif de vérifier et compléter les données des années antérieures, et ce afin d'établir la précision liée à la méthodologie de l'UCLouvain.

Pour étudier la variation du coefficient de surface avec la hauteur d'eau, il est nécessaire d'avoir une rivière possédant les caractéristiques suivantes :

- avoir une hauteur d'eau présentant des variations importantes ;
- avoir une station limnimétrique du SPW.

Après discussion avec Monsieur Feltz du SPW, notre choix s'est porté sur la Lesse, et particulièrement sur la station limnimétrique située à Herock. Nous avons fixé une journée de prise de mesures avec le SPW. Lors de cette journée, nous devions procéder au relevé bathymétrique. Dès lors, connaissant la bathymétrie, nous pouvions nous rendre sur le terrain afin d'effectuer les relevés nécessaires à la détermination du coefficient de surface.

Malheureusement, à la suite de la crise sanitaire du Covid-19, ces campagnes, prévues dès la mi-mars, n'ont pu être réalisées.

1.2.1. Difficultés rencontrées lors de la première campagne

Lors de cette première campagne, nous avons rencontré de nombreuses difficultés.

La première difficulté s'est présentée lors des relevés bathymétriques, sur l'Orne et la Lasne, réalisés avec le GPS Leica. Cet outil de mesure permet, en théorie, d'obtenir des coordonnées avec une précision de 0.01 à 0.04 m. Sur une rivière dont la profondeur moyenne vaut 30 cm, cela représente jusqu'à 7 % d'incertitude sur la hauteur d'eau calculée. Or, lors de l'utilisation du Leica, nous obtenions une précision allant de 20 à 80 cm pour chaque point calculé. Ce manque de précision est certainement lié à la présence du pont et des arbres à proximité des deux sections étudiées. Les relevés bathymétriques n'ont donc pas pu être réalisés avec cet appareil. Néanmoins, nous avons pu nous passer du GPS Leica et réaliser cette opération manuellement. Le géoréférencement des GCP's n'a pas pu être réalisé ; nous ne pouvions donc pas modéliser la berge en 3D.

Bien que dans leurs études, Asselberghs et Peeters (2019) concluent que le MFPro est fiable, nous avons rencontré différents problèmes lors de l'utilisation cet appareil. En effet, afin de comparer nos vitesses de surface calculées par PIV, nous avons réalisé la mesure du débit et des vitesses de surface avec ce MFPro. Cependant, la sonde à induction magnétique, qui détermine les vitesses, ne

tenait au manche qu'à l'aide d'un colson et tombait régulièrement. De plus, l'outil prêté n'était pas muni de sonde pressiométrique. Par conséquent, il nous était impossible de connaître la profondeur à laquelle nous nous trouvions. Nous avons donc procédé à la détermination de cette profondeur manuellement pour placer l'appareil de mesure des vitesses à la hauteur requise.

Lors de notre campagne de mesures, des 19 et 20 février 2020, nous avons obtenu un débit de 0,320 m³/s pour l'Orne et 0,820 m³/s pour la Lasne. Les mesures de débit sur ces mêmes cours d'eau aux mêmes heures publiées sur le site d'Aqualim (SPW) donnent respectivement 0,228 m³/s et de 0,712 m³/s. Dans le Tableau 1-1, nous présentons le comparatif « débits Asselberghs et Peeters versus nos débits » des erreurs calculées lors de la détermination du débit sur l'Orne et la Lasne à l'aide du MFPro. L'erreur est calculée selon la formule Eq. 1.1.

$$Erreur = \left| 1 - \frac{Q_{MF\ pro}}{Q_{Aqualim}} \right| * 100 [\%] \quad (Eq. 1.1)$$

TABLEAU 1-1 – COMPARATIF DES ERREURS COMMISES SUR LES DÉBITS

Cours d'eau	Moyenne des erreurs de [Asselberghs et Peeters] [%]	Erreur lors de la campagne de février 2020 [%]
Orne	50,9	40,35
Lasne	12,46	15,16

Nous obtenons des ordres de grandeur comparables aux erreurs déjà mesurées. Ces différences sont, selon nous, trop importantes. Nous ne posons donc pas le même constat que nos prédécesseurs quant à la fiabilité du MFPro de l'UCLouvain.

1.2.2. Solutions envisagées

A la suite de cette première campagne, des solutions ont été envisagées afin de pouvoir prendre des mesures plus précises et continuer à tester la méthode développée à l'UCLouvain depuis plusieurs années, à savoir :

- utiliser un programme tel que le logiciel Fudaa-LSPiV pour orthorectifier les images. Nous pourrions donc prendre des vidéos avec un appareil qui ne doit pas nécessairement être perpendiculaire à la surface de l'eau. Cette solution nous permettrait de nous éloigner d'un pont pour prendre nos vidéos. Le fait de travailler dans une zone plus dégagée, permet d'augmenter la précision du Leica tant pour le relevé bathymétrique que pour le géoréférencement des GCP's ;
- utiliser le vélocimètre, matériel prêté par le SPW, pour s'affranchir du MFPro.

A la suite de la crise du Covid-19, ces deux solutions n'ont pu être mises en pratique. Cependant, nous les recommandons fortement pour les futures campagnes de mesure.

2. Base de données

Le suivi de débit en rivière est un sujet qui nécessite le traitement de nombreuses données. Dans le but de rassembler l'ensemble des mesures acquises dans le cadre des travaux antérieurs, nous avons réalisé une base de données en Excel. Celle-ci n'est pas un simple classeur Excel. En effet, nous avons créé une interface avec laquelle les utilisateurs peuvent interagir, pour consulter, stocker ou encore enregistrer des données.

Le travail réalisé se divise en deux parties. La première concerne la conception des interfaces et la réalisation du programme en Excel. La deuxième reprend la récupération et la vérification de l'ensemble des données reprises dans les anciens mémoires. Ci-après, nous vous présentons notre base de données.

2.1. Note importante avant utilisation

Cette base de données est l'outil final de présentation et de transfert des mesures. Ces mesures doivent être préalablement analysées avant de pouvoir y être ajoutées. Afin d'utiliser correctement notre base de données, il est important de savoir que :

1. les macros ne fonctionnent pas sur Excel Online ou dans le One Drive. Il faut donc travailler en local, c'est-à-dire sur son propre ordinateur ;
2. la base de données ne gère pas la concurrence (un seul utilisateur peut l'utiliser à la fois). En cas de modification de données, il faut donc s'assurer d'être le seul à travailler avec la base de données ;
3. l'ensemble des documents doit se trouver dans un même et unique dossier. Pour le transfert et le partage des fichiers, nous conseillons d'utiliser un dossier compressé de l'ensemble de la base de données (astuce : lorsque le dossier compressé est réalisé, il suffit de le nommer à la date de compression, soit par exemple *Base_de_données-2020_05_15*).

Enfin, si la base de données est téléchargée via internet, veuillez à autoriser les modifications et à activer les macros avant la première utilisation.

2.2. Architecture de la base de données

L'illustration à la Figure 2-1 présente l'architecture de la base de données.

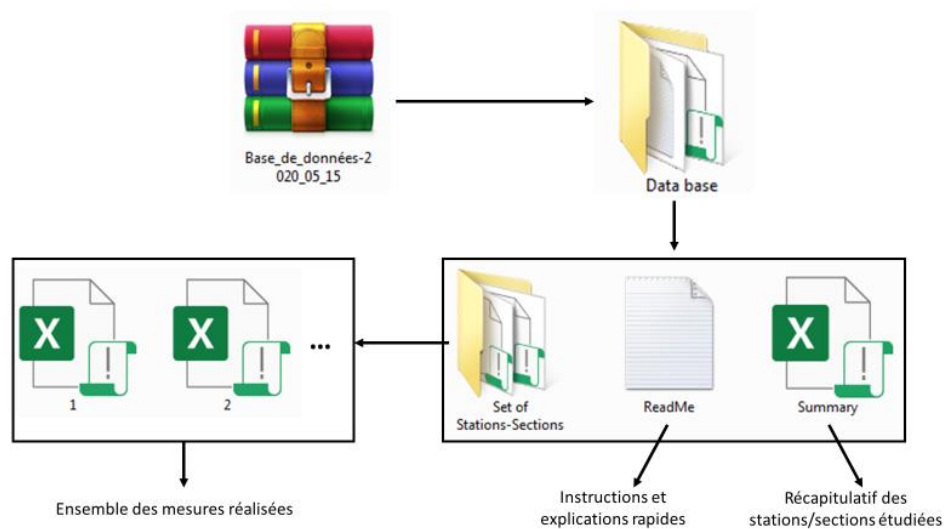


FIGURE 2-1 – ARCHITECTURE DE LA BASE DE DONNÉES

Une fois extraite, la base de données se trouve dans le fichier *Data base*. Ce fichier se décompose en trois parties :

1. *Summary* : classeur Excel reprenant l'ensemble des sites étudiés lors de la détermination des débits par photogrammétrie.
2. *Set of Stations-Sections* : dossier contenant l'ensemble des classeurs Excel. Ceux-ci rassemblent les mesures réalisées sur chacun des sites étudiés.
3. *ReadMe* : un fichier texte reprenant des points d'attention, des conseils et des instructions pour utiliser la base de données.

2.3. Récapitulatif des sites étudiés - *Summary*

En ouvrant le classeur Excel *Summary*, on lance la base de données. Ce classeur est le seul et unique document à ouvrir manuellement pour pouvoir interagir avec la base de données. Avec ce document, on accède au récapitulatif des stations ainsi qu'aux boutons permettant d'ajouter ou de modifier une station/section (voir Figure 2-2).

Récapitulatif des stations/sections étudiées lors de la détermination des débits par photogrammétrie								
ID	Nom du cours d'eau	Voie navigable ?	Station/Section		Coordonnées Lambert		Double clic pour ouvrir	
			Localité	Référence SPW	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	

FIGURE 2-2 – ILLUSTRATION DE LA PARTIE SUMMARY

Une sous-partie, intitulée « Récapitulatif des stations/sections étudiées lors de la détermination des débits par photogrammétrie » et contenant les données, reprend les colonnes suivantes :

- *ID* : identifiant unique pour chaque station/section ;
- *Nom du cours d'eau* : nom du cours d'eau sur lequel des études ont été menées ;
- *Voie navigable ?* : cette mention indique si le cours d'eau sur lequel les études ont été réalisées est une voie navigable ou non ;
- *Station/Section* : cette mention reprend les informations suivantes, à savoir :
 - *Localité* : ville et code postal de la station/section visée ;
 - *Référence SPW* : numéro de référence SPW. Si station/section non suivi par le SPW, pas de référence ;
 - *Coordonnées Lambert* : géoréférencement.
- *Double clic pour ouvrir* : colonne contenant un ensemble de cellules-boutons. En double-cliquant sur l'une de ces cellules, on accède au classeur, nommé selon l'ID de la station/section. Ce classeur reprend l'ensemble des mesures réalisées sur la station/section visée. Une fois le double clic réalisé, le programme demande une confirmation quant à l'ouverture de la station/section (voir Figure 2-3 haut). Lorsqu'une station/section est ouverte pour la première fois, des conseils sont formulés pour l'utilisateur (voir Figure 2-3 bas).

Il est important de noter que le *Summary* reste toujours actif en arrière-plan.

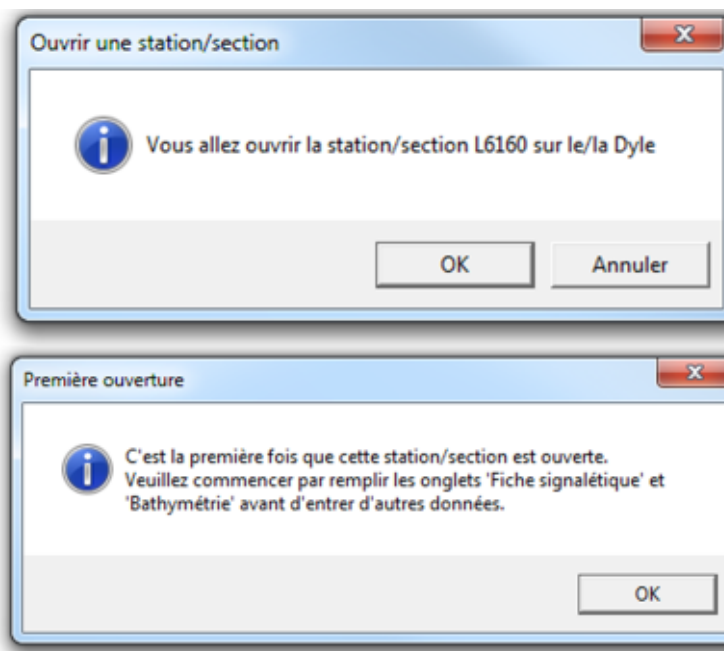


FIGURE 2-3 – ALERTES LORS DE L'OUVERTURE D'UNE SECTION

L'utilisateur ne peut pas modifier librement le classeur Excel. Il doit utiliser les deux boutons prévus à cet effet, soit un pour « *Ajouter une nouvelle station/section* » et un autre pour « *Modifier une station/section* ». En appuyant sur l'un de ces deux boutons, une série de boîtes de dialogue apparaissent à l'écran. L'utilisateur peut dès lors entrer de nouvelles données ou modifier des données existantes. A titre d'exemple, deux boîtes de dialogue sont illustrées à la Figure 2-4.

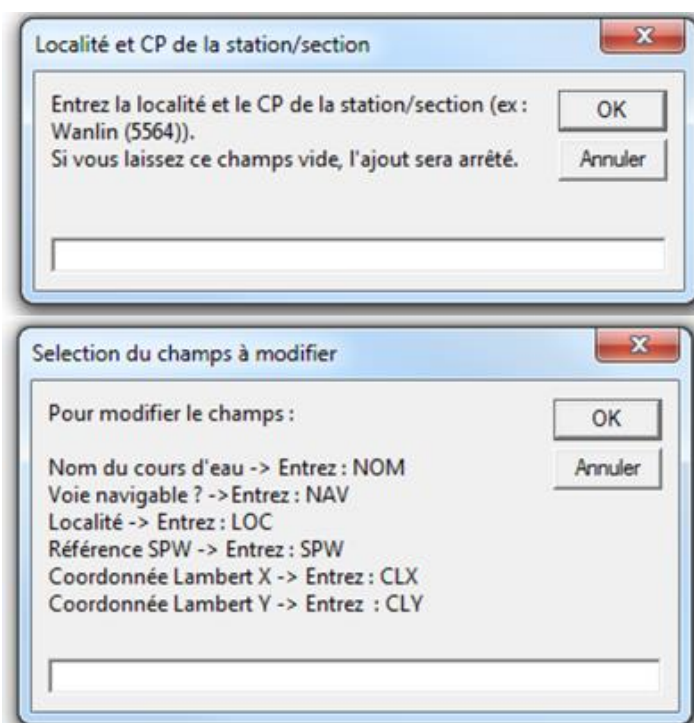


FIGURE 2-4 – EXEMPLES DE BOITES DE DIALOGUES GÉNÉRÉES PAR LA BASE DE DONNÉES

Le classeur *Summary* est en mode protégé. Pour plus d'informations, veuillez consulter l'annexe 6.

2.4. Données spécifiques à une station/section

Une fois qu'un double clic a été détecté sur une cellule « Ouvrir », Excel va ouvrir le classeur qui contient les données spécifiques à la station/section correspondante. Ce classeur contient trois types de feuilles (Figure 2-5) :

1. la feuille fiche signalétique : feuille reprenant diverses informations, des photos ainsi qu'un résumé des campagnes de mesure. Cette feuille est la première à s'ouvrir ;
2. la feuille bathymétrie : feuille dans laquelle on retrouve l'ensemble des mesures liées à la bathymétrie ;
3. les feuilles de type date : feuilles dans lesquelles on retrouve l'ensemble des données et mesures, hors bathymétrie, prises sur le terrain. Le nom de ces feuilles correspond à la date à laquelle les mesures ont été prises.

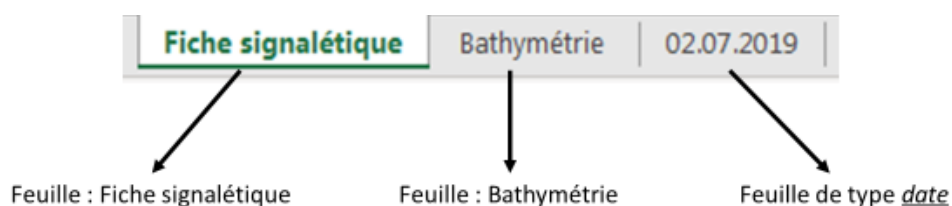


FIGURE 2-5 – FEUILLES DU CLASSEUR POUR UNE SECTION

Lorsque la section est nouvelle, les deux premières feuilles sont présentes dans le classeur. Les feuilles de type date sont créées lors de l'ajout de données. Ces trois fiches sont détaillées au point suivant.

2.4.1. La feuille - Fiche signalétique

La fiche signalétique comprend deux parties :

- La « Fiche signalétique » (voir Figure 2-6) reprend les informations de la station/section.

Fiche signalétique		
Localisation de la station		Ajouter une première photo
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]		

FIGURE 2-6 – INFORMATIONS DE LA STATION

Les différentes informations de la station/section sont à entrer manuellement. Pour ajouter une photo, il suffit de cliquer sur le bouton « Ajouter une première photo ».

- La fiche « Données disponibles » (voir Figure 2-7) reprenant les dates des campagnes de mesure hors bathymétrie ainsi que le nom des opérateurs.

Données disponibles	
Récapitulatif des données disponibles	
Date ▼	Mesures réalisées par : ▼
02.07.2019	Chercheur1

Ajouter un nouveau jeu de données

Modifier une date ou un nom

Rechercher/ouvrir une date

FIGURE 2-7 – DATES ET AUTEURS DES PRISES DE MESURE

Pour créer une nouvelle feuille de type *date*, il faut appuyer sur le bouton « *Ajouter un nouveau jeu de données* ». Des boîtes de dialogue s’ouvrent ; elles reprennent les instructions à suivre.

Pour modifier une date ou un (des) nom(s), il faut utiliser le bouton « *Modifier une date ou un nom* ».

Le bouton « *Rechercher/ouvrir une date nom* » permet d’accéder aux données. Cet accès peut également être réalisé directement en utilisant les flèches dans l’entête des colonnes « *Date* » ou « *Mesures réalisées par* ». Ces trois boutons sont les seuls moyens d’ajouter ou de modifier des données.

Note : veuillez respecter scrupuleusement le format de date demandé (jj.mm.aaaa). Cette date doit contenir exactement huit chiffres et des points pour séparer jour.mois.année. Le non-respect du format bloque l’accès à tout ajout/modification.

2.4.2. La feuille – Bathymétrie

Cette feuille est directement accessible en cliquant sur l’onglet *Bathymétrie*.

Le premier cadre de cette feuille (voir Figure 2-8) reprend la définition des axes pour les mesures de bathymétrie. Il donne également les consignes pour l’ajout de nouvelles bathymétries. Pour la comparaison de ces dernières, il faut sélectionner les données manuellement (*clic droit sur le graphe -> Sélection de données*).

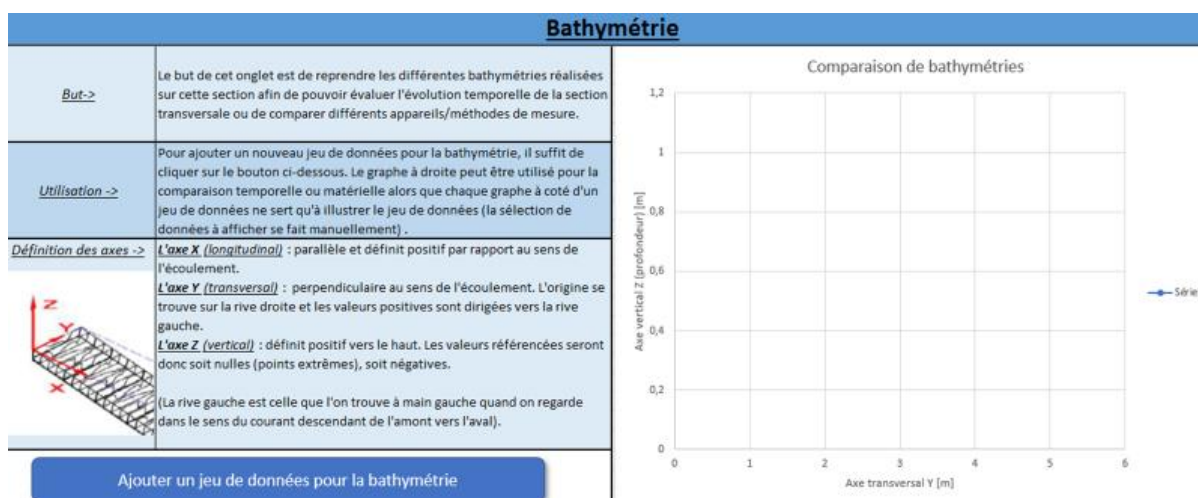


FIGURE 2-8 – ENTÊTE DE LA FEUILLE BATHYMÉTRIE

Afin d’enregistrer de nouvelles données, il faut cliquer sur le bouton « *Ajouter un jeu de données pour la bathymétrie* ». Cette action crée un nouveau cadre (voir Figure 2-9).

Ce nouveau cadre correspond à une nouvelle campagne de mesures bathymétriques. Le numéro de la bathymétrie repris dans ce cadre s'incrémente automatiquement et l'utilisateur doit ajouter les données suivantes :

- la date à laquelle le relevé bathymétrique a été réalisé ;
- les auteurs du relevé bathymétrique ;
- les appareils/techniques utilisés ;
- les mesures du relevé bathymétrique (Y, Z) ;
- des commentaires.

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 2-9 – ENSEMBLE DES DONNÉES BATHYMETRIQUES

Un graphe représentant la nouvelle bathymétrie est généré automatiquement à partir des mesures encodées.

2.4.3. Les feuilles de type *date*

Les feuilles de type *date* sont les seules qui ne sont pas protégées. Afin d'uniformiser la classification des données, un canevas est proposé à l'utilisateur. Ce canevas est composé de quatre parties (Figure 2-10 à Figure 2-13), à savoir :

1. Le niveau d'eau

Niveau d'eau			
Valeur Photoscan :		[m]	Commentaire
Echelle limnimétrique :		[m]	Commentaire
Autre		[m]	Commentaire

FIGURE 2-10 – FEUILLE DATE - NIVEAU D'EAU

2. Les mesures de vitesse de 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	
	[m/s]		
	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		
	<i>Commentaire</i>		
Méthode/Appareil n° 2	Unité de mesure	Commentaire sur les limites/points des berges	
	[m/s]		
	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		
	<i>Commentaire</i>		

FIGURE 2-11 – FEUILLE DATE – MESURES DE VITESSE

3. Les valeurs de débit

Valeurs des débits			
Débit SPW		[m³/s]	<i>Commentaire</i>
Débit calculé par méthode/appareil 1		[m³/s]	<i>Commentaire</i>
Débit calculé par méthode/appareil 2		[m³/s]	<i>Commentaire</i>
Débit calculé par méthode/appareil 3		[m³/s]	<i>Commentaire</i>

FIGURE 2-12 – FEUILLE DATE – VALEURS DE DÉBIT

4. L'application Discharge

Application Discharge			
Si vous avez utilisé cette application, ajoutez vos valeurs, graphiques, photos et commentaires			

FIGURE 2-13 – FEUILLE DATE – APPLICATION DISCHARGE

Cependant, chaque utilisateur reste libre d'ajouter d'autres données.

3. Vidéo Globe Challenge

Dans ce chapitre, nous présentons le Vidéo Globe Challenge. Ce challenge de jaugeage vidéo à l'aveugle, soit sans connaître le site, son débit de référence et le coefficient de surface, nous a été proposé, durant le confinement, par Monsieur Jérôme Le Coz. Le but de ce challenge est de proposer un entraînement de jaugeage vidéo à un réseau de personnes abonnées à la liste mail *doppler-group* de l'IRSTEA, Institut de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture français.

A travers ce challenge, notre objectif est d'appréhender et de comparer deux logiciels utilisant la LSPIV. Dans ce chapitre, nous présentons le challenge ainsi qu'une étape. Les résultats et nos observations post-challenge sont également exposés.

3.1. Description du challenge

Comme expliqué ci-dessus, le but du challenge est donc de réaliser des jaugeages à l'aveugle sur une série de vidéos afin d'estimer le débit sur différents sites. Ce challenge d'un mois (du 13 avril au 10 mai 2020) a été divisé en huit étapes.

A chaque étape, les participants doivent estimer le débit d'un cours d'eau sur un site non identifié, et donc sans aucune indication sur la valeur du débit de référence. Pour ce faire, certaines informations sont fournies aux participants, à savoir :

- une vidéo de l'écoulement ;
- des données de localisation, soit la position et l'altitude dans un repère local (coordonnées X, Y et Z) de minimum 4 GRP's, et ce pour pouvoir orthorectifier les différentes images ;
- un transect bathymétrique d'une section ; les coordonnées de ce transect sont référencées de la même manière que les GRP's ;
- l'altitude de la surface libre du cours d'eau, soit le niveau de l'eau.

Après avoir reçu toutes ces informations, les participants doivent traiter la vidéo en vue de déterminer les vitesses de surface. Ensuite, ils doivent choisir un coefficient de surface pour, déterminer le débit du cours d'eau à l'aide du transect bathymétrique.

Pour chaque étape, une fois l'analyse et les calculs terminés, les participants sont invités à envoyer leurs résultats en spécifiant le débit obtenu, le logiciel utilisé ainsi que le coefficient de vitesse de surface choisi.

Après chaque étape, Monsieur Le Coz traite les résultats sous forme d'un « Tour de France ». En réalité, il compare les valeurs de débit obtenues par les différents participants avec le débit de référence, débit souvent déterminé par un profileur de courant Doppler acoustique. Ensuite, il calcule la différence, en pourcents, entre le débit obtenu par chacun des participants et le débit de référence. Enfin, Monsieur Le Coz associe à chaque participant sa valeur de différence. Cette valeur sert à compter les points de pénalité et le gagnant de l'étape est celui qui obtient le plus petit score. En fin de challenge, le gagnant est le participant qui a cumulé le moins de points de pénalité.

Ce challenge s'adresse aux personnes désireuses de s'entraîner sur la pratique de jaugeage vidéo. Au total, 22 francophones, dont 19 Français, 1 Suisse et nous deux, ont participé à ce challenge. Ces 22 participants ont concouru à minimum 6 étapes.

Nous avons décidé de réaliser le challenge avec deux logiciels de traitement LSPIV différents, soit Fudaa-LSPIV pour Nicolas et PIVlab pour Stéphan.

Au cours de ce challenge, différentes méthodes et logiciels ont été utilisés. Dix-sept participants utilisent le logiciel Fudaa-LSPIV, un participant emploie PIVlab et un autre se sert de SSIVsuite (Surface Structure Imaging Velocimetry, méthodologie proche de la LSPIV). Enfin, les trois autres participants utilisent des méthodes de flotteurs (jaugeage perche, barème).

3.2. Les différentes étapes

Dans le cadre de ce challenge, les cours d'eau présentent une large variété tant en conditions d'écoulement qu'en dimensions. L'ensemble des illustrations présentent à la Figure 3-1 permettent de visualiser ces variétés.



FIGURE 3-1 – ILLUSTRATIONS DES HUIT ÉTAPES DU CHALLENGE

3.3. Analyse de la sixième étape

Pour mieux comprendre le déroulement du challenge, nous présentons ici une étape en détails. Nous décrivons d'abord les données qui nous ont été fournies. Ensuite, nous présentons les analyses Fudaa-LSPIV et PIVlab réalisées respectivement par Nicolas et Stéphan, ainsi que les résultats et les observations.

Il est important de noter que chaque étape présente des particularités : vidéos par drones, vidéos depuis la berge, vidéos non-stabilisées, écoulements avec traceurs, écoulements partiellement invisibles, cours d'eau en crue, etc.

3.3.1. Données fournies

Tout d'abord, les données brutes nous ont été transmises via un dossier compressé. Ce dossier comprend tous les éléments nécessaires afin d'orthorectifier les photos et de réaliser le jaugeage vidéo dans le but d'obtenir un débit. Ce dossier peut être divisé en trois parties, à savoir :

1. Les informations nécessaires à l'orthorectification (photos des GRP's, position dans un repère local et altitude).

Pour cette étape, les informations transmises concernent dix-sept GRP's. Cependant, seuls dix d'entre eux GRP's sont visibles sur la vidéo ; les autres GRP's sont submergés. Sur les photos, l'opérateur muni d'une mire permet de savoir la position exacte des points de référence. Un exemple de ces photos est donné à la Figure 3-2.



FIGURE 3-2 – PHOTOS EXTRAITES DU CHALLENGE N°6

Les données fournies pour l'orthorectification sont les coordonnées des différents GRP's ; ces coordonnées sont fournies sous la forme d'un fichier .DAT (fichier de données).

2. Les informations bathymétriques et le niveau d'eau, dans le même repère local que les GRP's.

A partir de ces données de bathymétrie et du niveau d'eau, il est possible de représenter l'aire mouillée (Figure 3-3).



FIGURE 3-3 – PROFIL BATHYMETRIQUE ET NIVEAU D'EAU – CHALLENGE N°6

3. La vidéo de l'écoulement.

La vidéo fournie pour cette étape est une vidéo stable d'une dizaine de secondes. Nous pouvons y voir l'écoulement du cours d'eau en condition de crue.

3.3.2. Analyse Fudaa-LSPIV (par Nicolas)

La première étape dans Fudaa-LSPIV consiste à importer la vidéo. L'échantillonnage de celle-ci est réalisé automatiquement dans le programme. Lors de cette étape, on peut analyser toute la vidéo ou une partie de celle-ci pour réduire le temps de calcul. De notre côté, nous avons choisi d'analyser l'ensemble de la vidéo afin d'avoir le résultat le plus précis possible.

La deuxième étape consiste à stabiliser les images afin d'éliminer les effets éventuels de mouvement de la caméra. Cette étape n'est pas nécessaire si la vidéo est stabilisée. Si par contre, la vidéo est prise avec un appareil tenu à la main ou réalisée à l'aide d'un drone, il sera important de passer par cette étape pour éviter d'avoir des vecteurs de vitesse parasites lors de l'analyse PIV.

La troisième étape est l'orthorectification. Pour réaliser celle-ci, trois cas de figures se présentent. Tout d'abord, une simple mise à l'échelle suffit si la vidéo est perpendiculaire à l'écoulement et que l'effet de perspective est néant. La deuxième possibilité est, lorsque nous disposons de quatre GRP's d'une altitude équivalente, de procéder à l'orthorectification 2D. Le dernier cas de figure nécessite de recourir à l'orthorectification 3D, en plaçant un maximum de points GRP's ; dans cette étape, nous sommes dans cette configuration.

Une fois l'orthorectification terminée, l'analyse LSPIV peut commencer. Les paramètres de calcul d'aire d'interrogation et d'aire de recherche, ainsi que les points de la grille sont à définir. Cette étape est certainement la plus critique pour nous, débutants en jaugeage vidéo.

Nous avons suivi les conseils du manuel d'utilisation (Jodeau *et al.*, 2020) en gardant un ordre de grandeur de 30 pixels pour l'aire d'interrogation. Quant à l'aire de recherche, toujours suivant les conseils du manuel d'utilisation, nous l'avons définie autour de l'aire d'interrogation, allongée dans le sens de l'écoulement. Lorsque ces paramètres sont définis, l'algorithme PIV est appliqué sur le maillage choisi.

Lorsque l'analyse PIV est terminée, nous réalisons la phase de post-traitement. Cette étape comprend un filtrage des résultats. Nous travaillons notamment sur les vitesses minimales et maximales ainsi que sur la corrélation entre les vecteurs de vitesse. Nous utilisons les valeurs par défaut proposées par Fudaa-LSPIV ; en effet, le résultat de ce post-traitement nous semble visuellement correct sur la majorité des photographies. Ensuite, une moyenne des vecteurs de vitesse est calculée en chaque point de la grille préalablement définie lors de l'analyse LSPIV.

Enfin, pour clôturer le challenge, nous devons déterminer le débit. Pour calculer le débit, nous importons le transect bathymétrique dans le programme Fudaa-LSPIV. L'importation étant directe, nous supposons que le fichier bathymétrique fourni a été exporté depuis Fudaa-LSPIV. En ce qui concerne le coefficient de vitesse de surface, nous l'avons estimé à 0,9 puisqu'il s'agit d'une rivière en crue. Après avoir introduit le transect bathymétrique et le coefficient de surface, le logiciel Fudaa-LSPIV nous donne le débit calculé ; un rapport reprenant les résultats de l'analyse est également disponible.

3.3.3. Analyse PIVlab (par Stéphan)

Pour ce qui est de l'analyse PIVlab, vu que ce logiciel n'est pas initialement conçu pour la LSPIV, il est nécessaire d'utiliser Excel en parallèle. De plus, les étapes de stabilisation et d'orthorectification ne sont pas prédéfinies dans PIVlab. Si la stabilisation a été développée par Bia et Somers (2018), la question de l'orthorectification reste toujours ouverte. Nous avons donc réalisé les étapes de stabilisation et d'orthorectification avec le logiciel Fudaa-LSPIV. Les images ainsi traitées sont extraites de Fudaa-LSPIV et importées dans le logiciel PIVlab.

De manière générale, la démarche suivie lors de l'analyse LSPIV avec PIVlab est la suivante :

1. téléchargement des données via le dossier compressé ;
2. importation de la vidéo, échantillonnage, stabilisation (si nécessaire) et orthorectification 3D avec le logiciel Fudaa-LSPIV ;
3. extraction des images de Fudaa-LSPIV et importation dans PIVlab ;
4. analyse PIV des différentes images. Pour cette analyse, nous suivons la démarche utilisée depuis le début à l'UCLouvain. Cette méthode est décrite dans l'annexe 4 (prétraitement - analyse PIV - post-traitement) ; nous utilisons les paramètres par défaut de PIVlab comme conseillé par Lewis et *al.* (2018) ;
5. une fois l'analyse PIV terminée avec PIVlab, on calcule la vitesse moyenne le long d'une ligne perpendiculaire à l'écoulement (endroit du transect bathymétrique) et on exporte les données dans un fichier texte ;
6. traitement des données avec Excel :
 - a. importation des données bathymétriques ;
 - b. traitement des données et calcul de l'aire mouillée ;
 - c. importation des données relatives aux vitesses de surface ;
 - d. calcul d'un débit à l'aide des vitesses de surface ;
 - e. on fixe un coefficient de surface ; dans ce cas, le coefficient est de 0.9 ;
 - f. on obtient un débit final.

3.3.4. Résultats de l'étape

Les résultats de l'étape portent uniquement sur le débit. Une fois l'étape terminée, Jérôme Le Coz nous transmet les résultats et nous indique le nom du cours d'eau ainsi la localisation concernée par le challenge. Il s'agit ici d'un jaugeage vidéo fourni par la DREAL (Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement) Auvergne-Rhône-Alpes réalisé sur le Groin à Altemare. Le débit de référence a été calculé avec un ADCP et les résultats, obtenus avec le programme Matlab Qrev (qui calcule le débit à partir des données prises par ADCP), font état d'un débit de $53.74 \text{ m}^3/\text{s}$ avec une incertitude Oursin (application qui calcule l'incertitude sur les résultats à partir des données prises par ADCP) de 9.3% et un coefficient de vitesse de surface de 0.93.

La Figure 3-4 reprend le classement final de cette étape.

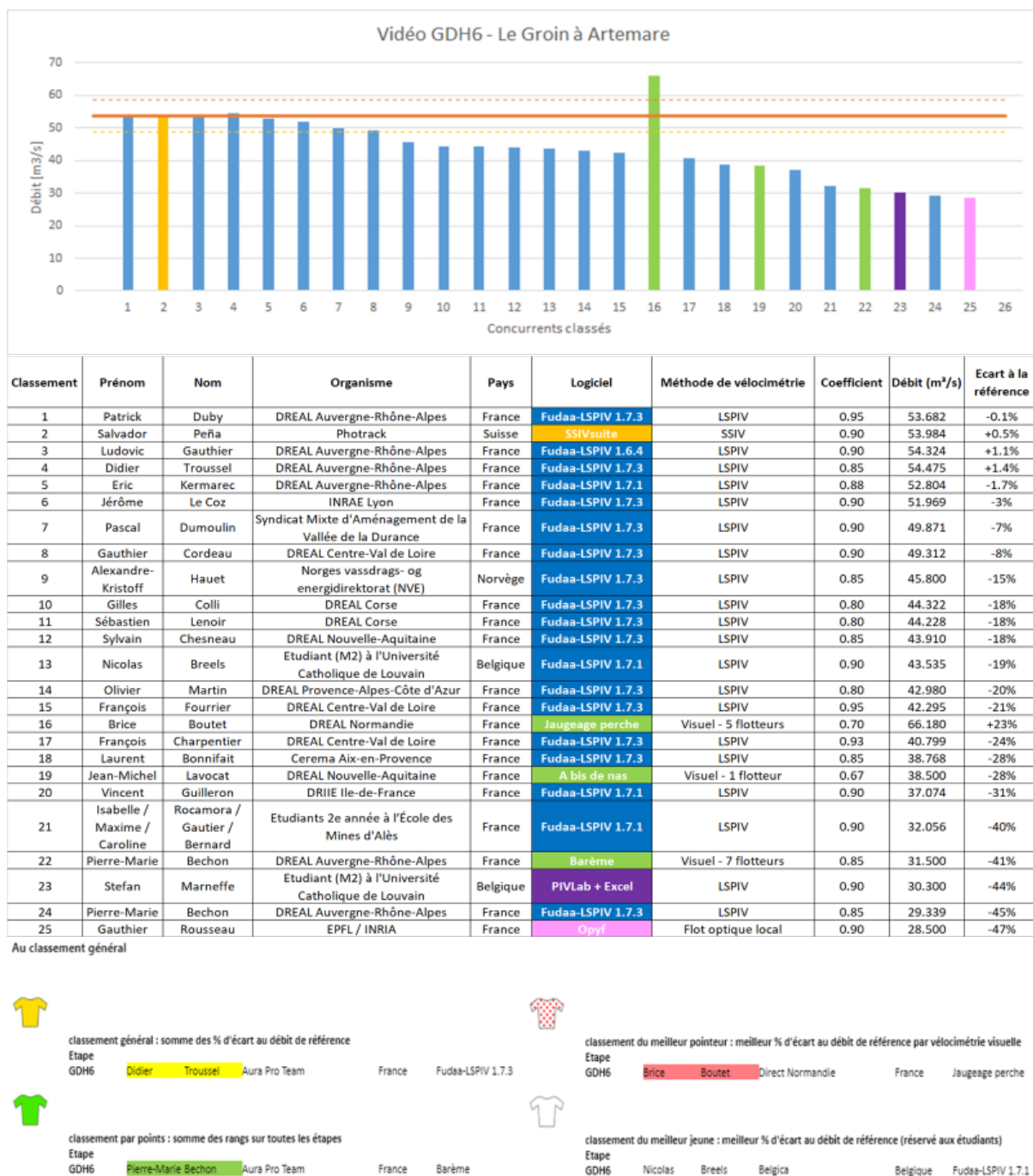


FIGURE 3-4 – CLASSEMENT DE L'ÉTAPE 6

Pour vingt-cinq participants, seulement huit (32%) ont donné un débit dont l'écart à la différence est inférieur à 10%. L'orthorectification, dû au manque de dispersion des GRP's, a rendu cette étape particulièrement compliquée. Comme en fin de chaque étape, dans l'esprit du Tour de France, les maillots « jaune, vert, à pois, et blanc » ont été remis ; le classement de l'étape est également affiché.

3.4. Résultats et observations

Le résultat final du challenge a été communiqué le dimanche 10 mai 2020, soit le dernier jour de confinement strict en France. Le classement définitif est illustré à la Figure 3-5. Nous sommes respectivement 18^{èmes} et 22^{èmes} sur un total de vingt-deux participants. Pour rappel, l'orthorectification

et l'estimation du coefficient de vitesse peuvent entrainer des erreurs significatives lors de la détermination du débit.

Classement général	Classement par points						Ecart cumulé	Rang cumulé
1	1	Yoan	Longefay	DREAL Auvergne-Rhône-Alpes	France	Fudaa-LSPIV 1.7.3	63.5%	64
2	4	Laurent	Bonnifait	Cerema Aix-en-Provence	France	Fudaa-LSPIV 1.7.3	63.7%	67
3	5	Didier	Troussel	DREAL Auvergne-Rhône-Alpes	France	Fudaa-LSPIV 1.7.3	64.7%	70
4	7	Salvador	Peña	Photrack	Suisse	SSIVsuite	73.9%	81
5	2	Sylvain	Chesneau	DREAL Nouvelle-Aquitaine	France	Fudaa-LSPIV 1.7.3	73.9%	65
6	3	Ludovic	Gauthier	DREAL Auvergne-Rhône-Alpes	France	Fudaa-LSPIV 1.6.4	74.2%	66
7	6	Gilles	Colli	DREAL Corse	France	Fudaa-LSPIV 1.7.3	85.2%	78
8	10	Pierre-Marie	Bechon	DREAL Auvergne-Rhône-Alpes	France	Barème	93.9%	91
9	11	François	Charpentier	DREAL Centre-Val de Loire	France	Fudaa-LSPIV 1.7.3	107.7%	94
10	8	Sébastien	Lenoir	DREAL Corse	France	Fudaa-LSPIV 1.7.3	110.8%	87
11	14	Olivier	Martin	DREAL Provence-Alpes-Côte d'Azur	France	Fudaa-LSPIV 1.7.3	115.8%	102
12	13	Gauthier	Cordeau	DREAL Centre-Val de Loire	France	Fudaa-LSPIV 1.7.3	117.9%	101
13	15	François	Fourrier	DREAL Centre-Val de Loire	France	Fudaa-LSPIV 1.7.3	118.8%	104
14	9	Pascal	Dumoulin	Syndicat Mixte d'Aménagement de la Vallée de la Durance	France	Fudaa-LSPIV 1.7.3	127.5%	89
15	12	Brice	Boutet	DREAL Normandie	France	Jaugeage perche	136.2%	98
16	17	Pierre-Marie	Bechon	DREAL Auvergne-Rhône-Alpes	France	Fudaa-LSPIV 1.7.3	145.9%	117
17	16	Isabelle / Maxime / Caroline	Rocamora / Gautier / Bernard	Etudiants 2e année à l'École des Mines d'Alès	France	Fudaa-LSPIV 1.7.3	168.2%	115
18	18	Nicolas	Breels	Etudiant (M2) à l'Université Catholique de Louvain	Belgique	Fudaa-LSPIV 1.7.1	179.2%	121
19	20	Vincent	Guilleron	DRHIE Ile-de-France	France	Fudaa-LSPIV 1.7.1	182.9%	140
20	21	Rémy	Klingelschmitt	DREAL Auvergne-Rhône-Alpes	France	Fudaa-LSPIV 1.7.3	185.8%	145
21	19	Jean-Michel	Lavocat	DREAL Nouvelle-Aquitaine	France	A bis de nas	289.5%	122
22	22	Stefan	Marneffe	Etudiant (M2) à l'Université Catholique de Louvain	Belgique	PIVLab	455.3%	175

FIGURE 3-5 – CLASSEMENT FINAL – VIDEO GLOBE CHALLENGE

Selon Monsieur Le Coz, ce challenge a permis de mettre certains constats en lumière, notamment au sujet du programme Fudaa-LSPIV dont il est le manager et un des développeurs. Tout d'abord, l'estimation des vitesses s'est avérée particulièrement sensible à l'expertise de l'utilisateur, même dans le cas où il y a présence de traceurs. Il souligne l'importance de la vérification de la cohérence des champs de vitesse instantanés, et celle d'appliquer des paramètres de calcul et des filtres adaptés. Monsieur Le Coz va donc travailler, avec son équipe et dans le cadre de la thèse de Guillaume Bodart (EDF/INRAE), pour améliorer cette partie du logiciel, en vue de la rendre moins dépendante de l'utilisateur. Monsieur Le Coz souligne également l'intérêt de réaliser des jaugeages de référence (ADCP ou autres) et des jaugeages vidéo en simultané pour s'entraîner et valider la technique. Il exprime aussi son point de vue, quant à l'usage du drone aérien, qui devrait se banaliser dans leurs pratiques.

Quant à nous, outre nos résultats décevants, la participation à ce challenge a été très bénéfique dans le cadre de ce mémoire. En effet, notre participation nous a permis, entre autres, de mettre en évidence les constats développés par Monsieur Le Coz. Travailler sur des cours d'eau de caractéristiques différentes, nous a permis de mieux nous approprier la méthode de détection de débit à l'aide de LSPIV, ainsi que comprendre l'importance de certains paramètres (aire d'interrogation, aire de recherche, ...). Enfin, nous tenons à signaler qu'une erreur a été faite dans certains calculs réalisés avec Excel ; cette erreur justifie l'écart important au niveau des résultats obtenus par Stéphan.

Le Tableau 3-1, reprend les débits de référence, les débits obtenus par Nicolas ainsi que les débits obtenus par Stéphan, avant et après la correction des calculs.

TABEAU 3-1 – RÉCAPITULATIF DES RÉSULTATS DU CHALLENGE AVEC CORRECTION DES ERREURS

Challenge n°	Valeurs de référence		Résultats de Nicolas (Fudaa-LSPIV)			Résultats de Stéphan (PIVLab - Excel)				
							Avec erreurs		Sans erreur	
	Coef. Surf. [°]	Débit [m³/s]	Coef. Surf. [°]	Débit [m³/s]	Écarts débit [%]	Coef. Surf. [°]	Débit [m³/s]	Écart [%]	Débit [m³/s]	Écarts débit [%]
1	0,83	1,26	0,85	0,817	35	0,85	0,713	43	0,85	33
2	0,85	107,945	/	/	/	/	/	/	/	/
3	0,95	55,16	0,85	57,48	4	1	132	139	70	27
4	0,91	139	0,91	153,085	10	0,91	46,6	66	105,36	24
5	0,86	19,7	1	18,59	6	0,86	11,5	42	11,5	42
6	0,93	53,74	0,9	43,535	19	0,9	30,3	44	30,03	44
7	0,95	962,8	0,85	1526,4	59	0,95	655	32	655	32
8	0,75	0,636	0,85	0,773	22	0,85	0,53	17	0,53	17
			Écarts cumulés [%]		176	Écarts cumulés [%]				249

Enfin, participer à ce challenge nous a permis de prendre en main le logiciel Fudaa-LSPIV. Pour répondre à nos objectifs, ce logiciel, développé spécifiquement pour l'étude des vitesses et la détermination de débit en rivière, est en réalité bien plus adapté que le logiciel PIVlab. De fait, ce logiciel reprend en un seul programme, et de manière simplifiée, toutes les étapes nécessaires à la détermination d'un débit à partir de vidéos, soit de l'échantillonnage, en passant par la stabilisation, l'orthorectification, l'analyse LSPIV et le post-traitement, au calcul de débit.

4. Détection de la ligne d'eau sur un modèle numérique d'élévation

Face à la pandémie du coronavirus et au confinement qui en a découlé, les prises de mesure sur le terrain n'ont pu être réalisées. Nous avons donc réorienté notre travail. Dans ce cadre, nous avons étudié la possibilité de rechercher la détection de la ligne d'eau sur des DEM's.

4.1. Recherche de nouvelles méthodes

Dans le cadre de son mémoire réalisé à l'UCLouvain, Hellebaut (2018) propose une méthode pour détecter le niveau d'eau sur un modèle 3D. Cette méthode consiste à trouver les points de décrochement entre une bathymétrie réelle (mesurée sur terrain) et une bathymétrie découlant du modèle 3D. Un point de décrochement est défini comme l'endroit à partir duquel la bathymétrie numérique ne concorde plus avec la bathymétrie réelle. Une illustration de ce concept est présentée à la Figure 4-1. Sur cette figure, nous avons en rouge la bathymétrie réelle, en bleu la bathymétrie d'une section d'un DEM, et enfin les points de décrochement calculés par la méthode sont représentés par les cercles rouge et vert. Pour rappel, le niveau d'eau est toujours donné par rapport au niveau de la mer.

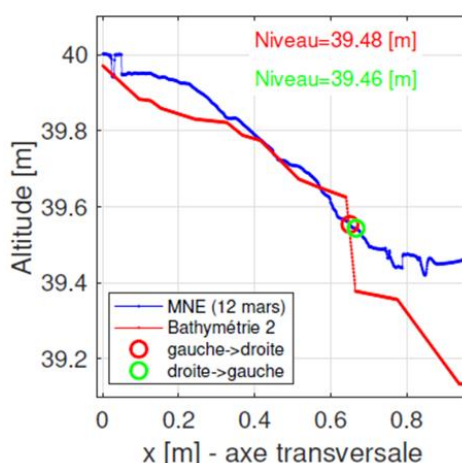


FIGURE 4-1 – MÉTHODE DE DÉTECTION DE LA LIGNE D'EAU – HELLEBAUT (2018)

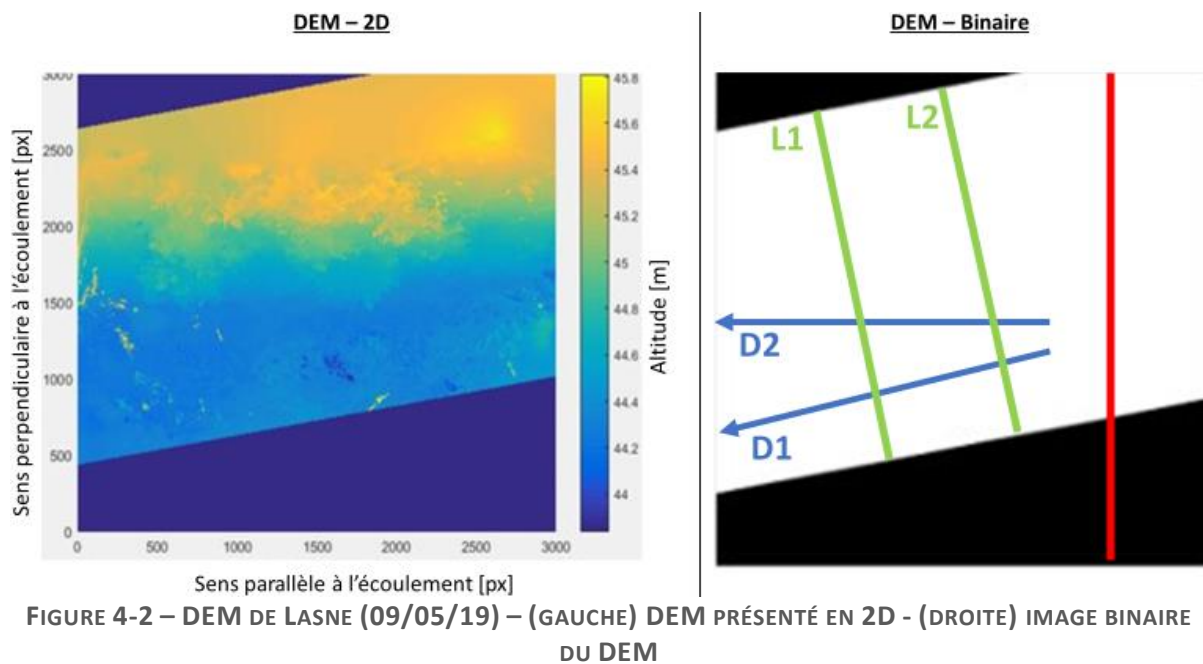
L'hypothèse de base de cette méthode est que les bathymétries « réelles et numériques » devraient se confondre au niveau des berges. En revanche en présence d'eau, la superposition des modèles montre des différences. En effet, les logiciels de modélisation 3D ne donnent pas de bons résultats pour des surfaces non-opaques et en mouvement.

Selon nous, la méthode élaborée par Hellebaut (2018) présente quelques faiblesses, à savoir :

- pour réaliser la comparaison entre une bathymétrie réelle et une bathymétrie numérique, huit paramètres doivent être encodés. Les valeurs à assigner nécessitent une pré-analyse des bathymétries et de leur superposition. Cette étape de pré-analyse empêche donc l'automatisation complète de la méthode ;
- une bathymétrie réelle est requise ;
- l'analyse se base sur la comparaison entre une bathymétrie numérique et une bathymétrie réelle. Un modèle 3D représente une berge sur une certaine longueur ; il contient donc plusieurs sections dépendant de la taille et de la découpe du modèle. La comparaison d'une section « bathymétrie réelle » avec une seule section numérique soulève donc des

interrogations. Sur la Figure 4-2, nous avons à gauche le modèle du DEM affiché en 2D et à droite le DEM binaire de ce modèle. Sur le modèle binaire, le blanc correspond à la modélisation et le noir à la partie non modélisée ; la ligne rouge (ou une parallèle) représente la section utilisée pour la comparaison des bathymétries dans la méthode de Hellebaut (2018). Notre questionnement est le suivant :

1. Lorsqu'on extrait une bathymétrie d'une section du modèle 3D, celle-ci sera-t-elle parallèle à la ligne rouge ?
2. Comment savoir où se situe la bathymétrie de terrain, établie sur une seule section, sur le DEM ? Plutôt en L1 ou en L2 ?
3. Quelle direction suit le courant d'eau ? Plutôt D1 ou D2 ?



Face à l'ensemble de ces contraintes et questions, nous avons tenté de développer de nouvelles méthodes pour déterminer la hauteur d'eau à partir d'un DEM. Les objectifs poursuivis sont les suivants :

- limiter au maximum le nombre de paramètres à encoder par l'utilisateur ;
- borner et/ou représenter visuellement l'impact de la valeur assignée à ces différents paramètres ;
- se baser uniquement sur le modèle 3D et ainsi éviter le relevé d'une bathymétrie sur le terrain ;
- tenir compte de l'ensemble des bathymétries numériques présentes sur le modèle 3D, soit analyses des différentes sections, plutôt que de se limiter à une seule section.

En tenant compte des points ci-dessus, nous avons développé deux méthodes. La première se base sur l'analyse de la différence entre les bathymétries numériques voisines et la deuxième repose sur une approximation par interpolation des données issues de l'analyse des sections du DEM.

Dans la suite de ce chapitre, nous nous limitons au terme « bathymétrie » pour désigner la bathymétrie numérique issue d'un DEM.

4.2. Méthode de la différence de bathymétries

4.2.1.Principe et hypothèses

Cette méthode part de l'idée que deux sections très proches, soit distantes d'un pixel sur le DEM, ne savent fondamentalement pas être très différentes. Pour rappel, les logiciels de photogrammétrie, établissant les modèles 3D, ne modélisent pas correctement l'eau de surface en mouvement ; cela se traduit par de grandes variations de hauteur pour des points très proches.

Par conséquent, la différence de bathymétries entre sections voisines de la berge devrait être réduite et cette différence sera plus élevée en présence d'eau.

Les hypothèses sur lesquelles nous nous basons pour développer notre méthode sont :

1. deux sections voisines d'un DEM, si la résolution (en mm/pixel) n'est pas trop grande, ne présentent pas de grandes différences au niveau de la berge ;
2. lors de la modélisation 3D, la surface de l'eau, difficilement modélisable par les logiciels de photogrammétrie, engendre de grandes différences de hauteurs pour des points proches ;
3. si la pente du cours d'eau n'est pas abrupte et que ce cours d'eau ne subit pas de changement morphologique important sur la portion modélisée, l'altitude du niveau d'eau est la même à l'amont qu'à l'aval du modèle 3D.

L'enjeu est donc de trouver une valeur seuil de différence qui, une fois dépassée, indique que nous nous trouvons sur l'interface entre la ligne d'eau et la berge.

4.2.2.Développement de la méthode

Première étape – Importation du modèle 3D dans Matlab

Tout d'abord, le DEM doit être importé dans Matlab et les valeurs aberrantes introduites par le logiciel de photogrammétrie, pour les points non modélisés correctement, doivent être supprimées. Ensuite, le DEM doit être orienté, et si nécessaire découpé, afin que l'algorithme puisse être appliqué. Les conditions à respecter sont les suivantes :

- le sens de l'écoulement doit être le plus horizontal possible donc parallèle à l'axe des abscisses ;
- les sections perpendiculaires à l'écoulement doivent être les plus verticales possibles donc parallèles à l'axe des ordonnées ;
- une seule berge doit se trouver sur le DEM ;
- la berge doit se trouver du côté de l'ordonnée la plus élevée et donc le cours d'eau du côté de l'ordonnée la plus basse.

Pour l'ensemble des opérations, une interface avec Matlab a été créée. Celle-ci permet à l'utilisateur de visualiser le DEM et ainsi répondre facilement aux conditions fixées. Cette interface est illustrée et expliquée au point 4.4. Un DEM de la Lasne (09/05/2019) importé dans Matlab, avec suppression des valeurs erronées et qui respecte nos conditions, est illustré à la Figure 4-3.

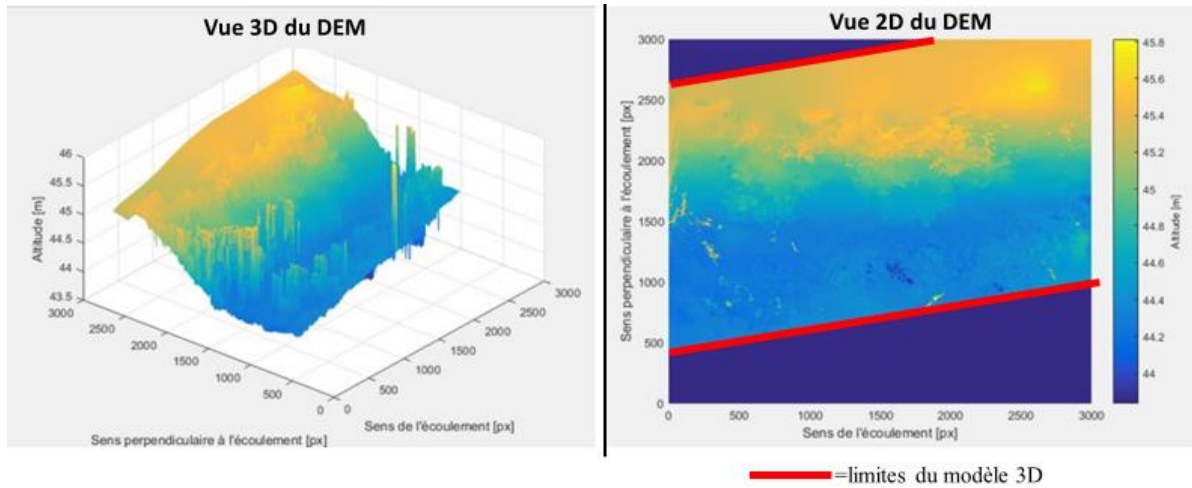


FIGURE 4-3 – DEM DE LA LASNE (09/05/2019) TRAITÉ AVEC MATLAB

Deuxième étape – Calcul des différences entre sections voisines

La deuxième étape de notre méthode est le calcul de différence entre sections voisines. Les indices des sections varient de 1 à n ; les sections sont donc numérotées de S_1 à S_n . Un DEM est composé de n pixels dans le sens de l'écoulement et m pixels dans le sens perpendiculaire à l'écoulement (voir Figure 4-4). Vu que chaque section représente un pixel dans le sens de l'écoulement, nous avons donc n sections.

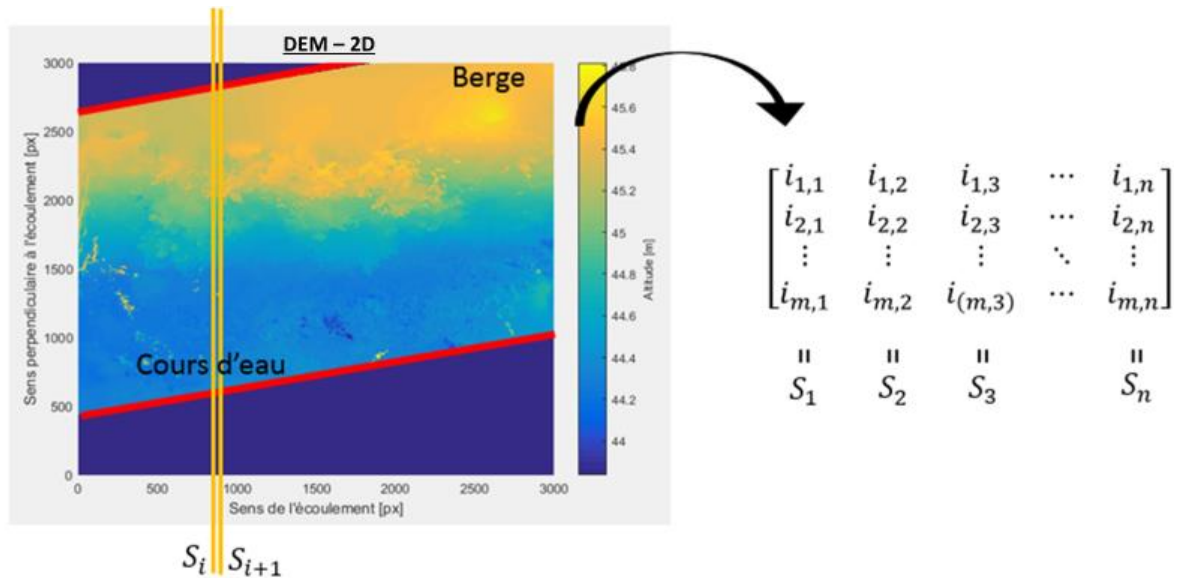


FIGURE 4-4 – REPRÉSENTATION MATRICIELLE D'UN DEM COMPOSÉ DE $m \times n$ PIXELS

Pour le calcul de différence, nous avons travaillé sur les valeurs absolues obtenues par différence arithmétique et par différence centrée :

- La différence arithmétique entre deux sections séparées d'un indice (variant de 1 à n), appelée différence vers l'avant, est définie avec l'équation suivante (Eq. 4.1.) :

$$d_i = |S_i - S_{i+1}| = |S_{i+1} - S_i| \quad (\text{Eq. 4.1})$$

- La différence centrée, couvrant trois indices, est définie avec l'équation Eq. 4.2. Cette différence demande une adaptation pour les bords, c'est-à-dire pour le premier et le dernier indice ; ces différences sont définies en Eq. 4.3.

$$d_i = \frac{|S_{i-1} - S_i| + |S_{i+1} - S_i|}{2} \quad (Eq. 4.2)$$

$$d_1 = |S_2 - S_1| \text{ et } d_n = |S_{n-1} - S_n| \quad (Eq. 4.3)$$

L'impact du choix de la méthode utilisée pour le calcul de la différence est discuté dans la partie qui reprend les résultats de notre méthodologie. Une fois la méthode de différence choisie, il suffit de l'appliquer à l'ensemble du DEM. Le résultat d'un calcul de différence vers l'avant est proposé à la Figure 4-5.

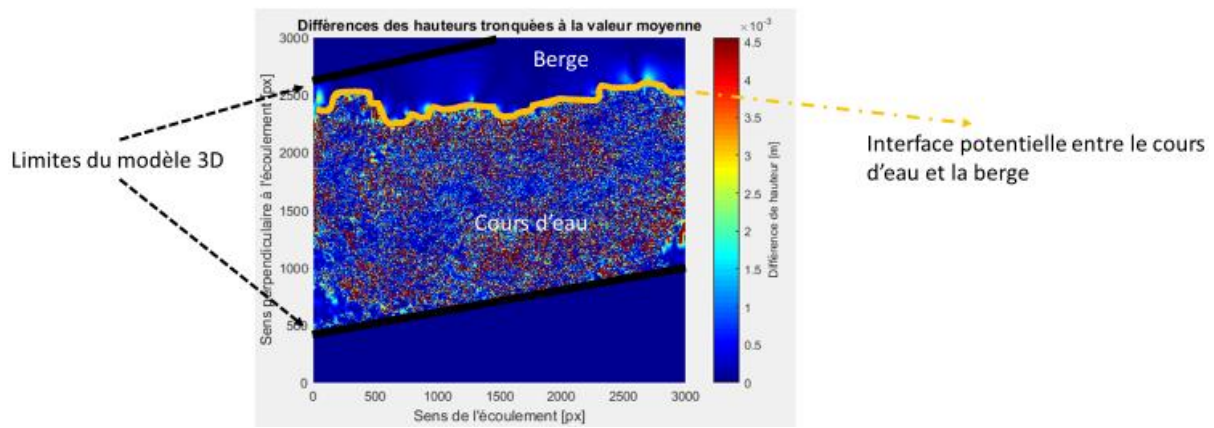


FIGURE 4-5 – RÉSULTAT DU CALCUL DE DIFFÉRENCE VERS L'AVANT SUR LE DEM DE LA LASNE (09/05/2019)

Troisième étape – Seuil de différence de hauteur & Détection de l'interface « berge / ligne d'eau »

La troisième étape est la détection de l'interface entre la berge et le cours d'eau. Pour détecter cette interface de manière « automatique », donc non visuelle, nous introduisons la notion de seuil de différence de hauteur.

Les différences de hauteur le long d'une section sont analysées ; dès que la valeur du seuil est dépassée voir Figure 4-6, la différence de hauteur correspondante indique le point d'interface « berge/ligne d'eau ».

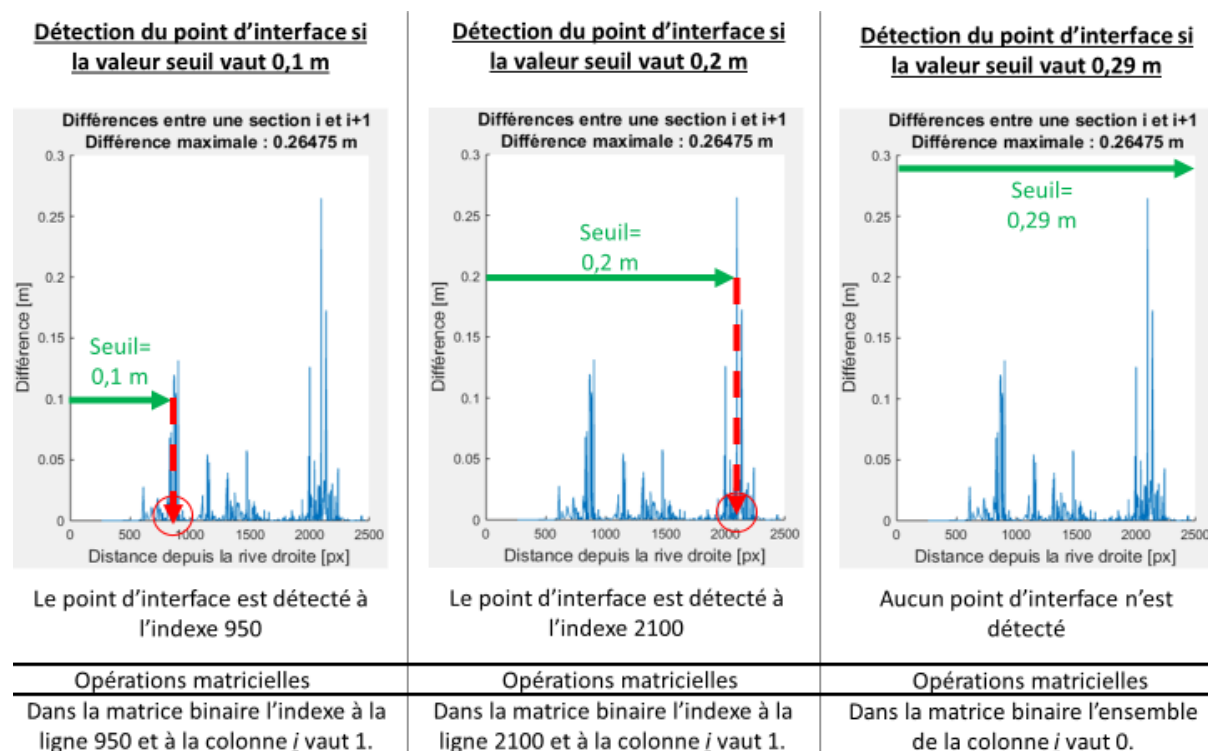


FIGURE 4-6 – FONCTIONNEMENT DU SEUIL DE DIFFÉRENCE POUR LA DÉTECTION DU POINT D'INTERFACE

C'est avec ce raisonnement que nous remplissons une matrice binaire qui contient, pour chaque section, ce point d'interface (voir Figure 4-7).



FIGURE 4-7 – CRÉATION D'UNE MATRICE BINAIRE APRÈS DÉTECTION DE LA VALEUR SEUIL

Evidemment, une question se pose : comment fixer la valeur du seuil de différence de hauteur ? Tout d'abord, il est important de souligner que cette valeur est bornée, soit valeur de la borne inférieure égale à la plus petite différence et valeur de la borne supérieure égale à la plus grande différence de hauteur. Ces valeurs sont reprises dans la matrice des différences. Cet intervalle de différence de hauteur minimum et maximum est donc proposé à l'utilisateur.

Enfin, une valeur trop faible ou trop élevée choisie au sein de cet intervalle amène des problématiques différentes, à savoir :

1. si la valeur de ce seuil est trop petite, une petite différence de hauteur de modélisation de la berge pourrait être détectée comme étant le point d'interface « berge/eau ». Dans ce cas, l'interface serait située sur la berge, soit à une altitude trop élevée (zone 1 de la Figure 4-8) ;
2. en revanche, si la valeur de ce seuil est trop grande, on passerait « outre » le point d'interface. Dans ce cas, l'interface serait située dans le cours d'eau, endroit dans lequel les valeurs de

différence évoluent de manière aléatoire. L'altitude donnée serait donc une valeur aberrante (zone 3 de la Figure 4-8).

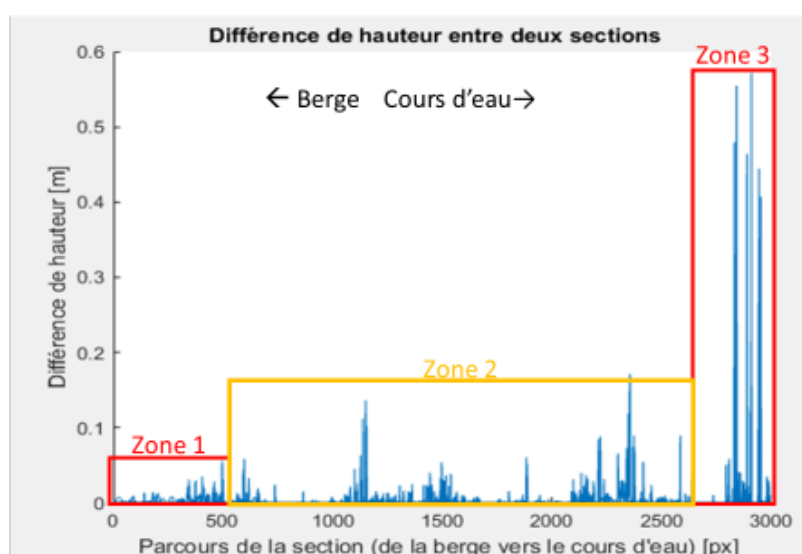


FIGURE 4-8 – DIFFÉRENCE DE HAUTEUR ENTRE DEUX SECTIONS

L'enjeu repose donc sur le fait de trouver une valeur pour ce seuil qui permette de se situer dans la deuxième zone (voir Figure 4-8) et donc ni sur la berge, ni dans le cours d'eau.

Quatrième étape – Récupération des altitudes des points d'interface détectés

Cette dernière étape consiste en la récupération de l'altitude des différents points d'interface, tels que définis ci-dessus. En multipliant la matrice initiale du DEM par la matrice binaire de détection de l'interface, et après avoir calculé la moyenne des valeurs non-nulles présentes dans la matrice binaire, nous obtenons la matrice des hauteurs des points d'interface (voir Figure 4-9).

$$\begin{array}{c} \text{Matrice initiale (DEM)} \\ \begin{bmatrix} i_{1,1} & i_{1,2} & i_{1,3} & \dots & i_{1,n} \\ i_{2,1} & i_{2,2} & i_{2,3} & \dots & i_{2,n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ i_{m,1} & i_{m,2} & i_{m,3} & \dots & i_{m,n} \end{bmatrix} \end{array} * \begin{array}{c} \text{Matrice binaire} \\ \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \end{array} = \begin{array}{c} \text{Matrice des hauteurs des points d'interface} \\ \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & i_{2,5} & 0 & 0 & \dots & 0 \\ i_{3,1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & i_{4,2} & 0 & i_{4,4} & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & i_{5,3} & 0 & 0 & i_{5,6} & i_{5,7} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix} \end{array}$$

FIGURE 4-9 – RÉCUPÉRATION DES HAUTEURS DES POINTS D'INTERFACE DÉTECTÉS

4.2.3. Résultats

À la suite du confinement décidé par le Gouvernement en mars 2020 pour éviter la propagation du coronavirus, nous n'avons pas eu la possibilité de prendre des mesures sur le terrain. De plus, l'accès à l'ordinateur sur lequel le logiciel de photogrammétrie est installé était impossible.

Pour tester notre méthode et juger de son efficacité, nous avons donc travaillé sur les données réalisées par les étudiants des années antérieures. En parcourant les différents backups disponibles, nous avons eu l'accès qu'à 10 DEM's ; ceux-ci sont repris dans le Tableau 4-1.

TABLEAU 4-1 – RÉCAPITULATIF DES DEM'S

N° du DEM	Mémoire de	Date	Cours d'eau	Endroit	Hauteur d'eau [m]
1	François-Xavier Hellebaut	12/03/2018	Train	Archennes	39,42
2	François-Xavier Hellebaut	30/03/2018	Train	Archennes	39,43
3	François-Xavier Hellebaut	6/04/2018	Train	Archennes	39,44
4	François-Xavier Hellebaut	17/04/2018	Train	Archennes	39,44
5	François-Xavier Hellebaut	7/05/2018	Dyle	Florival	31,96
6	François-Xavier Hellebaut	17/05/2018	Dyle	Florival	31,96
7	Paul Asselberghs et Brieuc Peeters	3/05/2019	Orne	Blanmont	119,69
8	Paul Asselberghs et Brieuc Peeters	6/05/2019	Thyle	Court-Saint-Étienne	65,69
9	Paul Asselberghs et Brieuc Peeters	7/05/2019	Orne	Blanmont	119,7
10	Paul Asselberghs et Brieuc Peeters	9/05/2019	Lasne	Rosière	44,4

Pour chacun de ces DEM's, notre méthodologie d'analyse est résumée ci-dessous :

1. on calcule la matrice des différences entre sections ;
2. on prend les valeurs de différence de hauteur minimale et maximale pour établir les bornes du seuil ;
3. ne disposant d'aucune indication pour la valeur du seuil, on calcule une hauteur moyenne pour différentes valeurs de seuil, allant de la différence minimale à la différence maximale avec un pas de 0.001 m ;
4. en parallèle, pour chacune de ces valeurs de seuil, nous comparons le pourcentage de sections du DEM sur lesquelles la valeur seuil est dépassée. Ce pourcentage représente la quantité de sections intervenant dans le calcul de la hauteur moyenne.

Quelle que soit la méthode de différence utilisée, vers l'avant ou centrée, les résultats obtenus sont comparables. Partant de ce constat, nous exposons ci-après les résultats obtenus avec la méthode de la différence vers l'avant. Le résultat de cette analyse pour le premier modèle 3D (n°1 Tableau 4-1) est présenté à la Figure 4-10.

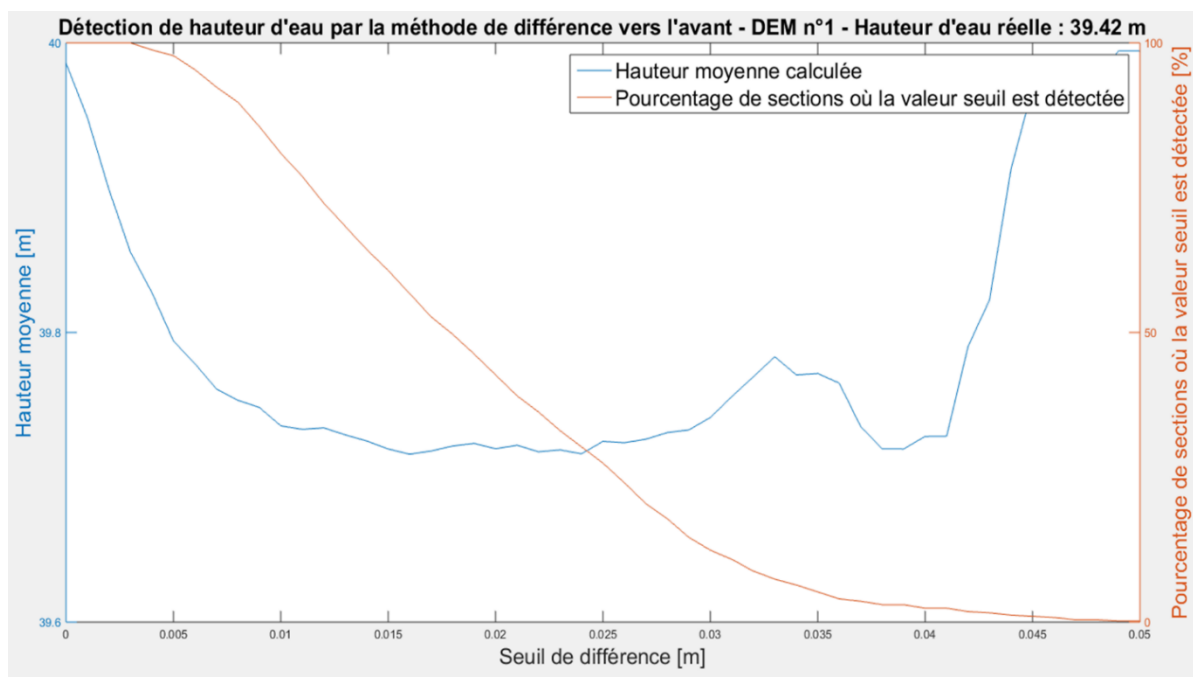


FIGURE 4-10 – DÉTECTION DE LA HAUTEUR D’EAU PAR LA MÉTHODE DE DIFFÉRENCE – DEM DU TRAIN (12/03/2018)

A l’analyse de cette figure, nous remarquons directement que :

- la hauteur d’eau moyenne détectée, pour tous les seuils, est toujours plus élevée que la hauteur d’eau réelle, de 39,42 m dans ce cas-ci ; cette valeur n’est même pas reprise sur l’axe des ordonnées ;
- la hauteur d’eau réelle n’est pas trouvée ;
- le pourcentage de sections intervenant dans le calcul de la hauteur moyenne, soit les sections où une valeur seuil est dépassée, diminue très rapidement. Cela signifie que des sections voisines ne présentent pas de différences significatives.

L’application de cette méthode sur les autres DEM’s mène aux mêmes observations.

Afin d’approcher la précision de la méthode, nous recherchons pour chacun des DEM’s, la hauteur d’eau moyenne la plus petite possible et pour laquelle au moins 50% des sections présentes sur le DEM rentrent dans le calcul de cette hauteur. Ensuite, nous calculons la différence entre cette hauteur d’eau moyenne et la hauteur d’eau réelle (voir Tableau 4-2).

En parallèle, pour chaque DEM, nous avons relevé le seuil correspondant à la hauteur d’eau moyenne optimale. Nous avons ensuite comparé ce seuil à la différence maximale pour obtenir le rapport suivant :

$$\text{Rapport seuil} = \frac{\text{Seuil}_{\text{hauteur moyenne minimum, nombre de sections} > 50\%}}{\text{Max}(\text{matrice de différences})} * 100 \text{ [\%]} \quad (\text{Eq. 4.4})$$

Pour chaque DEM, la différence maximale, le seuil optimal déterminé ainsi que le rapport de seuil sont repris au Tableau 4-2.

TABEAU 4-2 – RÉSULTATS DE LA MÉTHODE DE LA DIFFÉRENCE VERS L'AVANT

Méthode avec la différence vers l'avant						
N° du DEM	Hauteur d'eau réelle [m]	Hauteur moyenne DEM [m]	Différence [cm]	Différence maximale du DEM [m]	Seuil optimal [m]	Rapport seuil [%]
1	39,42	39,72	30,00	0,0506	0,016	31,62
2	39,43	39,80	37,00	0,1934	0,019	9,82
3	39,44	39,82	38,00	0,1927	0,047	24,39
4	39,44	39,76	32,00	0,33241	0,068	20,46
5	31,96	32,80	84,00	0,79198	0,206	26,01
6	31,96	32,58	62,00	0,5763	0,146	25,33
7	119,69	120,00	31,00	0,58589	0,167	28,50
8	65,69	66,42	73,00	0,78612	0,14	17,81
9	119,7	120,30	60,00	0,9932	0,276	27,79
10	44,4	44,90	50,00	1,05641	0,222	21,01

A la lecture de ce tableau nous observons que selon le DEM, la différence de hauteur (soit différence entre la hauteur d'eau moyenne obtenue à partir du DEM et hauteur d'eau réelle) varie de 30 à 84 cm.

En prenant les quatre premiers DEM's du « Train » à Archennes, on peut calculer une différence moyenne de 34,25 cm. Sur base de ce constat, et ce bien que l'échantillonnage soit très réduit (quatre échantillons), nous estimons que la précision de notre méthode n'est pas satisfaisante.

En effet, selon les données de Hellebaut (2018), la profondeur moyenne de ce cours d'eau vaut 35 cm. La plus petite différence établie sur base de notre méthodologie, soit 30 cm, équivaldrait donc à une erreur de 86% sur l'estimation de la profondeur d'eau. Cette erreur n'est évidemment pas parfaitement représentative de la précision de la méthode, puisqu'elle est calculée sur une profondeur moyenne de ce cours d'eau. Nous concluons néanmoins que la méthode décrite ci-dessus ne donne pas de résultats satisfaisants.

Malgré des hypothèses, selon nous, réalistes, les résultats obtenus tant avec la méthode de la différence vers l'avant qu'avec la méthode de la différence centrée (voir annexe 8), sont décevants. En effet, ces différences de hauteur, de 30 à 84 cm pour des cours d'eau dont la hauteur moyenne se situe entre 35 et 140 cm, ne sont pas acceptables.

En analysant de manière plus détaillée les résultats intermédiaires, et même si en apparence deux sections se ressemblent (voir Figure 4-11), une fois la différence entre ces deux sections calculée (voir Figure 4-12), on remarque des différences importantes au niveau de la berge. Il sera donc impossible, peu importe le seuil, de détecter le point d'interface potentiel « berge/cours d'eau » mis en évidence.

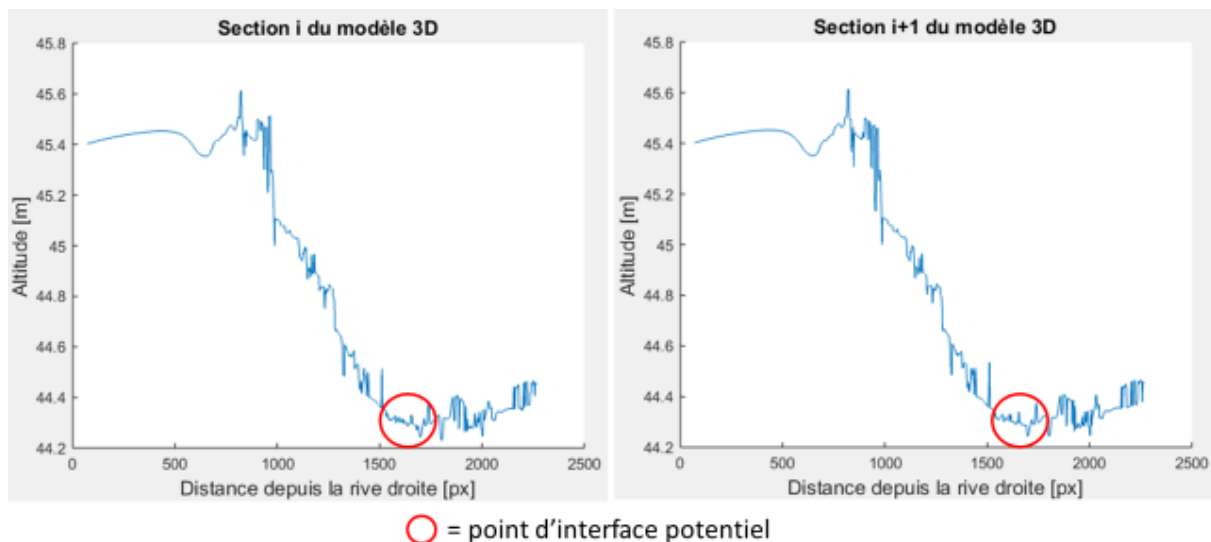


FIGURE 4-11 – SECTIONS VOISINES SEMBLABLES EN APPARENCE

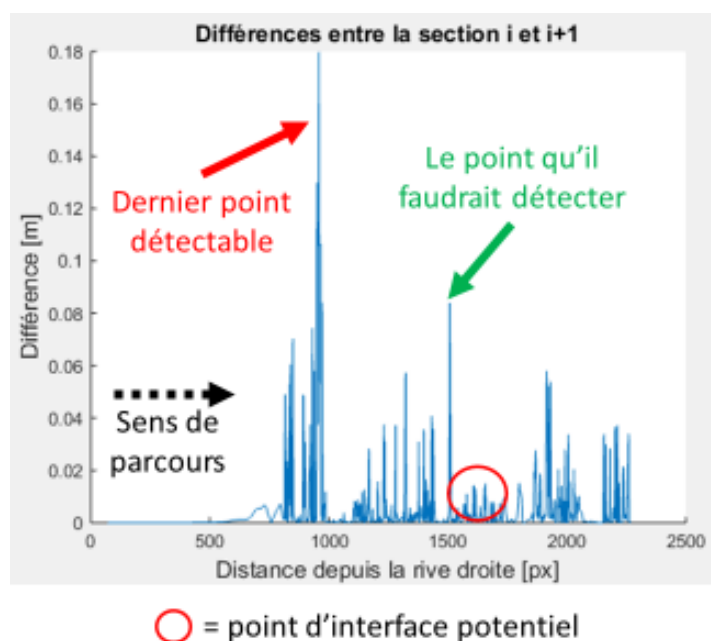


FIGURE 4-12 – DIFFÉRENCE ENTRE 2 SECTIONS VOISINES

Le fait d'obtenir des différences de hauteur élevées sur la berge rend impossible la détection du point de l'interface. Sur l'ensemble des modèles 3D à notre disposition, nous sommes confrontés à cette problématique, raison pour laquelle les hauteurs d'eau détectées sont plus élevées que les hauteurs d'eau réelles.

Notre première hypothèse, à savoir « *que deux sections voisines modélisées ne sont pas différentes au niveau de la berge* », n'est donc pas vérifiée. Ce constat explique pourquoi notre méthode ne fonctionne pas.

4.3. Méthode de l'interpolation des bathymétries

4.3.1. Principe et hypothèses

Vu les premiers résultats non concluants de détermination de la ligne d'eau par la méthode de la différence de bathymétries, nous avons développé une nouvelle méthode. Cette méthode doit être moins dépendante des « erreurs » de modélisation réalisées par les logiciels de photogrammétrie. Cette idée d'interpolation découle de l'analyse d'une section prise au hasard sur un modèle 3D. La Figure 4-13 présente une section du modèle 3D ainsi que les lignes correspondantes aux approximations par interpolation des données expérimentales.

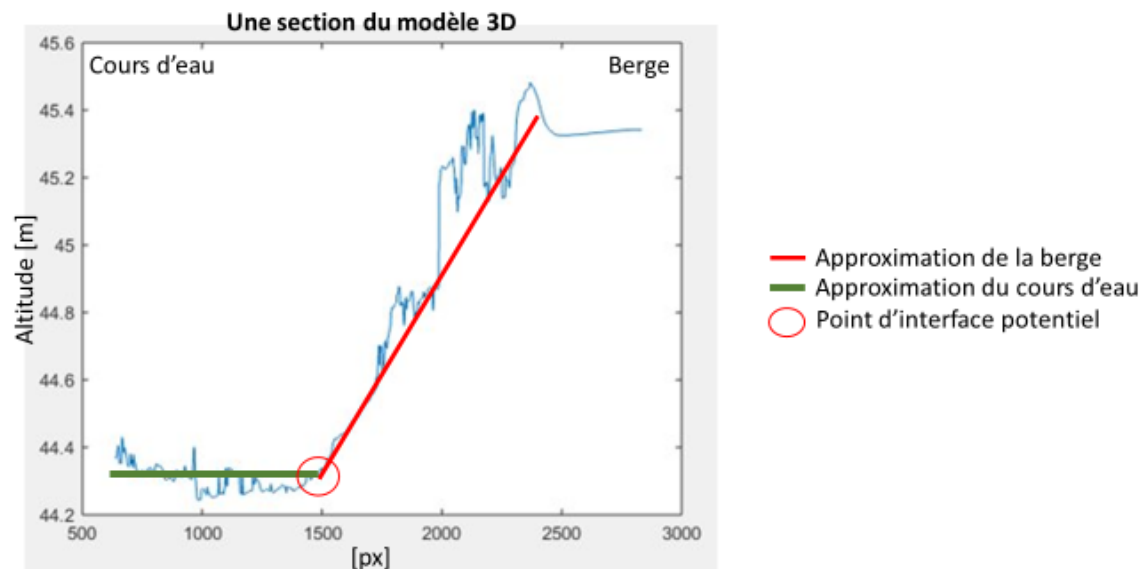


FIGURE 4-13 – SECTION D'UN MODÈLE 3D

A la lecture de cette figure, nous remarquons un changement de pente entre l'approximation de la berge et l'approximation du cours d'eau. Nous souhaitons détecter ce point particulier et l'assimiler au point d'interface entre la berge et le cours d'eau.

Dans cette méthode, nos hypothèses sont les suivantes :

1. les sections modélisées par un logiciel de photogrammétrie peuvent être interpolées par un polynôme ;
2. il existe un point particulier sur le polynôme d'interpolation qui peut être assimilé au point d'interface entre la berge et le cours d'eau ;
3. si la pente que suit le cours d'eau n'est pas abrupte et qu'il ne subit pas de changement morphologique important sur la portion modélisée, l'altitude du niveau d'eau est la même à l'amont qu'à l'aval du modèle 3D.

4.3.2. Développement de la méthode

Première étape – Approximation des données expérimentales par interpolation

Lors de cette première étape, nous réalisons une approximation des données expérimentales à l'aide d'une interpolation. La Figure 4-14 présente le résultat d'une première interpolation réalisée sur une section brute d'un DEM.

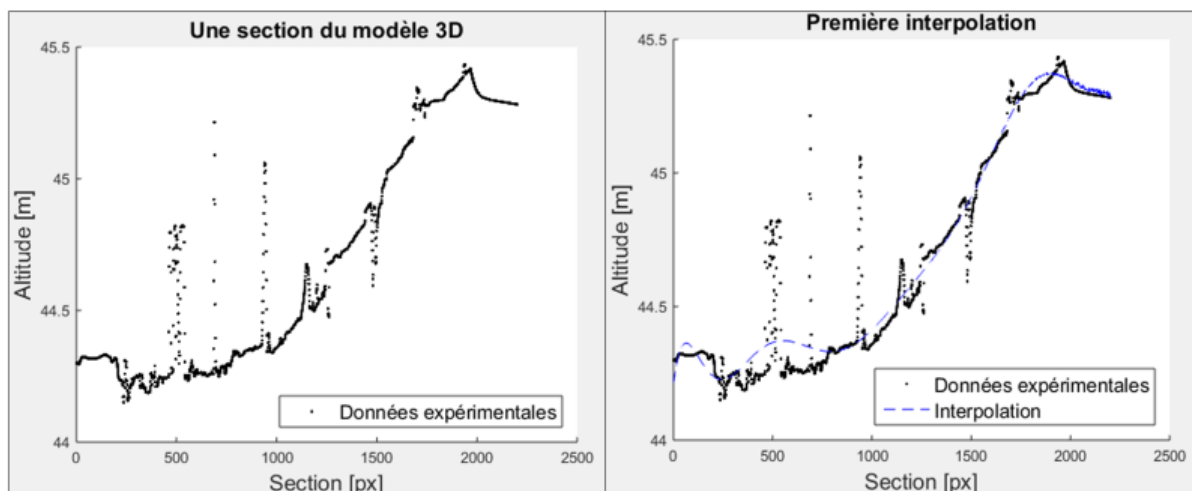


FIGURE 4-14 – PREMIÈRE INTERPOLATION D'UNE SECTION BRUTE

La question du choix du degré du polynôme d'interpolation se pose.

Les 10 DEM's disponibles, à raison d'environ 3.000 sections par DEM, ont été analysés. Les interpolations ont été réalisées pour des degrés de polynôme allant de 2 à 12. De notre première analyse, il ressort que :

- seuls les degrés allant de 9 à 11 permettent d'approcher la bathymétrie d'une section du modèle 3D analysé. En effet, les degrés, 2 à 8 et 12, n'interpolent pas bien les données expérimentales ;
- bien que le degré 9 donne une bonne interpolation sur une partie importante des données expérimentales, l'interpolation sur les basses altitudes n'est pas satisfaisante. En effet, l'interpolation ne suit pas les données expérimentales du cours d'eau (voir Figure 4-15) ;

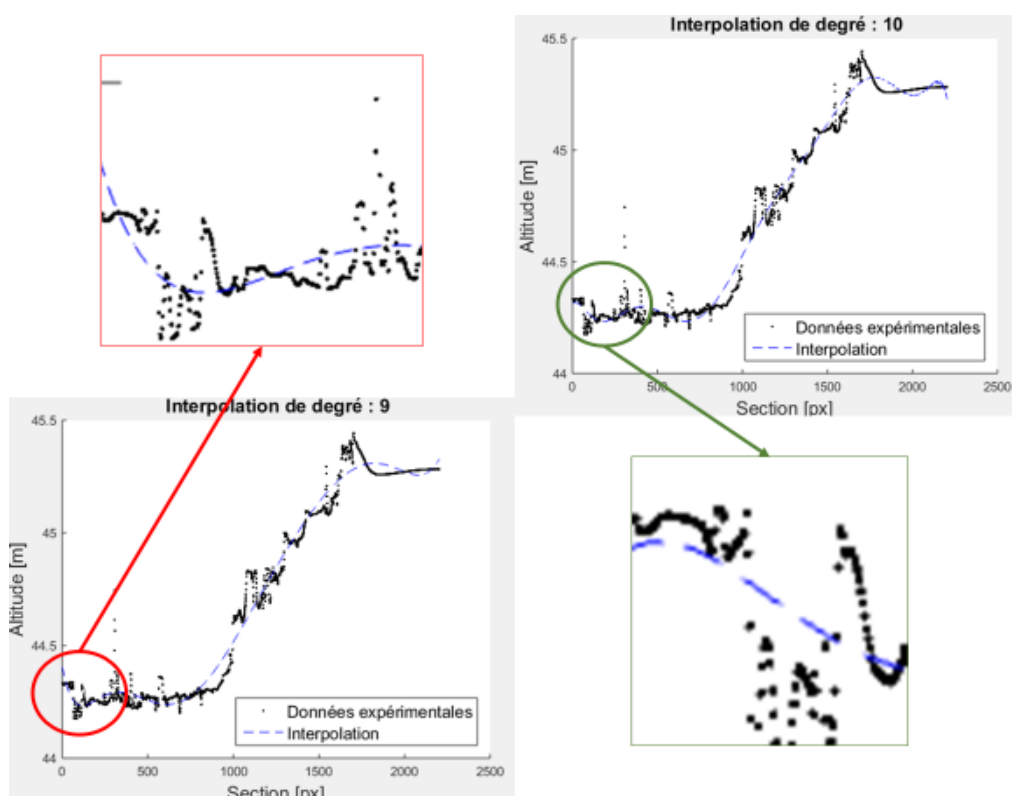


FIGURE 4-15 – COMPARAISON DES INTERPOLATIONS DES DEGRÉS 9 ET 10

- le degré 10 donne de bons résultats ;
- enfin, le degré 11 donne des interpolations moins « stables ». Cette observation pose un problème lors de la recherche du minimum sur la courbe d'interpolation. Cette instabilité est détaillée à l'étape suivante.

En conclusion, nous pensons que le degré du polynôme optimal est le degré 10. Pour la suite de notre travail, sauf indication contraire, nous prendrons donc cette valeur.

Deuxième étape – Recherche du point particulier sur le polynôme d'interpolation

Cette deuxième étape consiste en la recherche du point d'interface entre la berge et l'eau. Dans certains cas, le minimum global peut être associé à ce point d'interface. Néanmoins, il arrive très souvent que le point d'interface ne corresponde pas à ce minimum global (voir Figure 4-16).

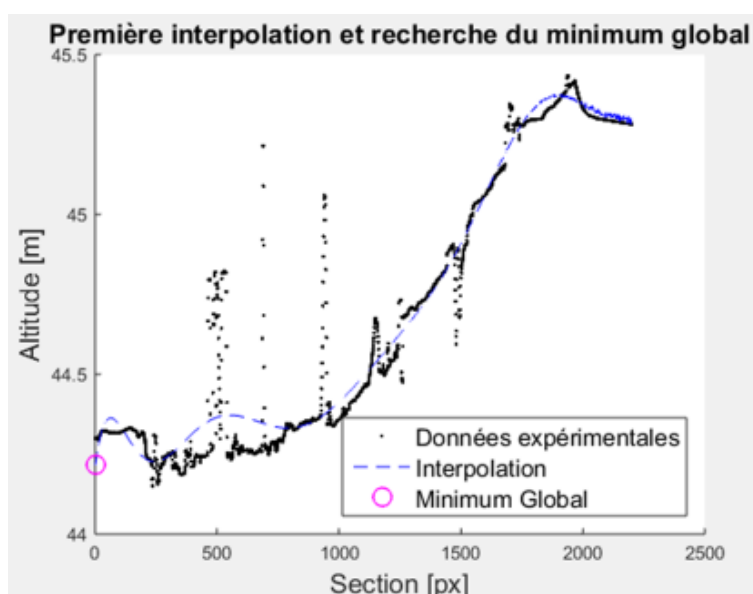


FIGURE 4-16 – RECHERCHE DU MINIMUM GLOBAL SUR L'INTERPOLATION

Partant du principe que le minimum global ne peut être automatiquement associé au point d'interface, nous proposons de chercher le minimum « local ou global » du polynôme qui pourrait être associé à ce point d'interface.

Pour ce faire, nous suivons la méthodologie suivante :

1. recherche de l'ensemble des minimums, global et locaux, du polynôme d'interpolation ;
2. localisation du minimum global. A partir de ce point, parcourir les minimums locaux du polynôme pour arriver au point d'interface ;
3. pour définir si le minimum sur lequel on se trouve est optimal, on calcule la différence entre ce minimum et le suivant. Si la différence est inférieure à un certain pourcentage, le minimum de référence devient le minimum suivant. En revanche, si un certain pourcentage est dépassé, le premier minimum est défini comme étant optimal. Ce pourcentage permettant de valider le minimum, et donc le point d'interface, doit être défini.

Cette deuxième étape est illustrée à la Figure 4-17.

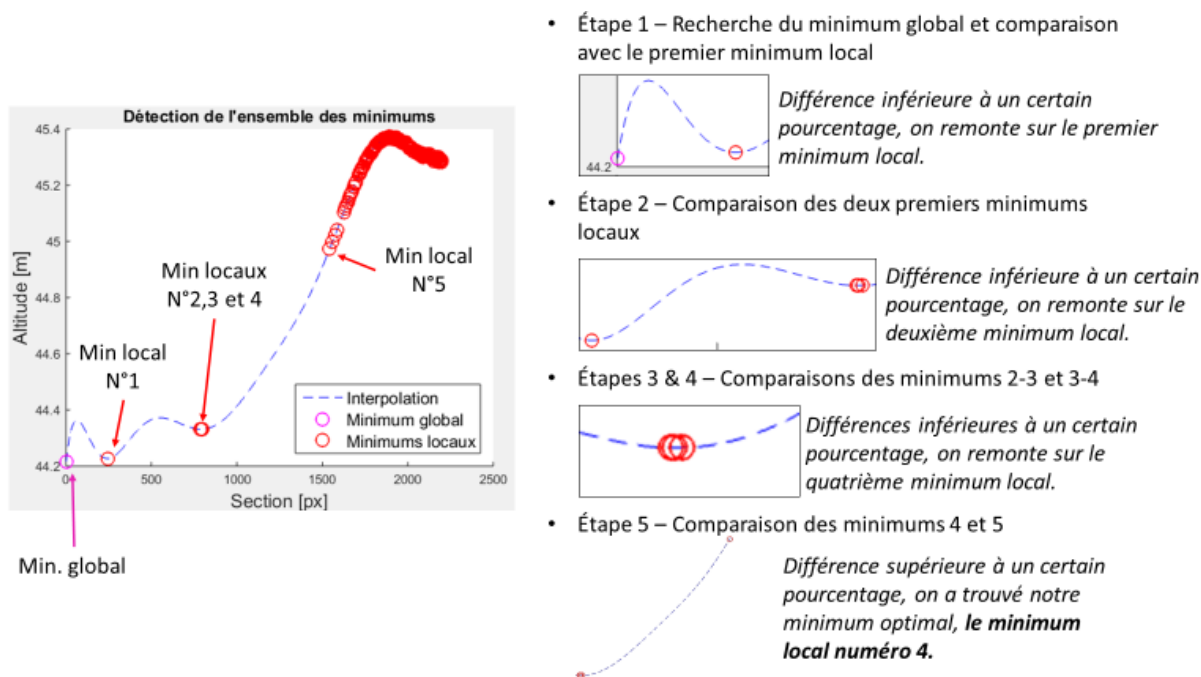


FIGURE 4-17 – ÉTAPE 2 DE LA DÉTERMINATION DE LA HAUTEUR D'EAU PAR INTERPOLATION DE LA BATHYMÉTRIE

L'application de cette méthodologie permet de trouver un minimum optimal ; celui-ci est assimilé au point d'interface (Figure 4-18).

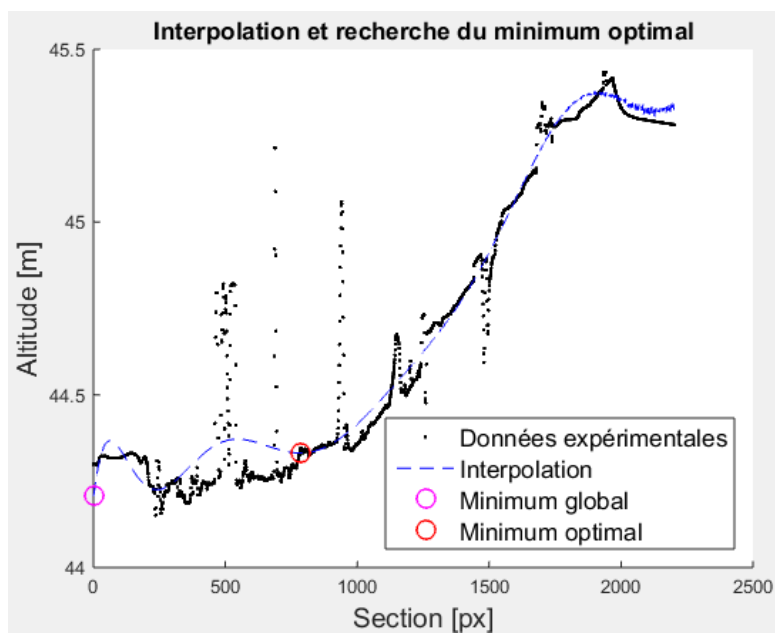


FIGURE 4-18 – RÉSULTAT DE LA RECHERCHE DU MINIMUM OPTIMAL DU POLYNÔME D'INTERPOLATION

Pour définir le pourcentage de différence admissible entre deux minimums consécutifs, nous proposons de travailler sur une valeur allant de 0.2 à 1%. En effet, selon nous, un pourcentage inférieur à 0.2% empêche l'algorithme de remonter les minimums sur la courbe d'interpolation. On risque donc de déterminer un minimum avant l'optimal. En revanche, pour une valeur supérieure à 1%, on pourrait remonter toute la berge ; ce minimum donnerait donc une valeur erronée. Une illustration de ces deux problèmes est présentée à la Figure 4-19.

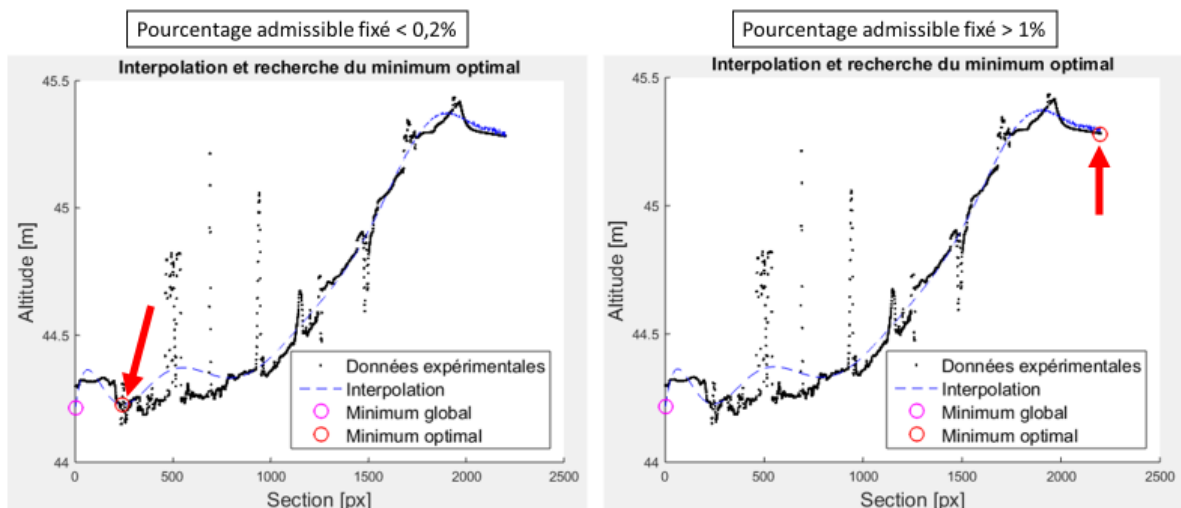


FIGURE 4-19 – ERREUR DE DÉTECTION SI POURCENTAGE ADMISSIBLE TROP FAIBLE OU TROP ÉLEVÉ

Pour un degré d'interpolation égal à 11, la situation illustrée à la Figure 4-20 peut survenir.

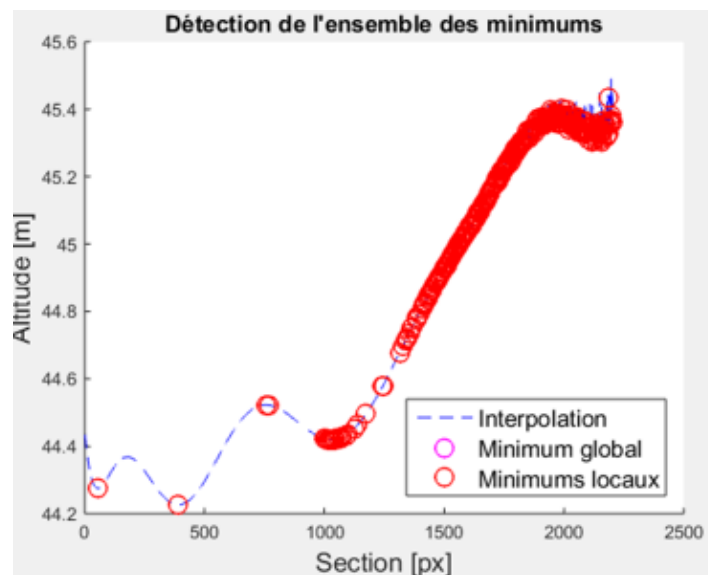


FIGURE 4-20 – ENSEMBLE DES MINIMUMS POUR UN POLYNÔME D'INTERPOLATION DE DEGRÉ 11

A la lecture de cette figure, nous constatons que nous sommes face à une multitude de minimums, parfois très proches les uns des autres. Dans ce cas, même si on se limite au pourcentage admissible inférieur à 1%, l'algorithme va d'office remonter toute la courbe d'interpolation. C'est pour cette raison que nous conseillons d'appliquer le degré 10 au polynôme d'interpolation.

Troisième étape – Traitement des valeurs aberrantes

La troisième étape consiste en la suppression des valeurs aberrantes apparaissant lors de la construction du modèle 3D. Pour ce faire, nous réalisons trois opérations :

1. on calcule une hauteur moyenne du niveau d'eau entre l'abscisse zéro et le minimum optimal ;
2. on détermine les 25^{ème} et 75^{ème} percentiles liés à l'ensemble de ces valeurs ;
3. toutes les données expérimentales en dehors de l'intervalle formé par ces deux percentiles sont ramenées à la hauteur moyenne.

L'application de ces trois opérations donne le résultat présenté à la Figure 4-21.

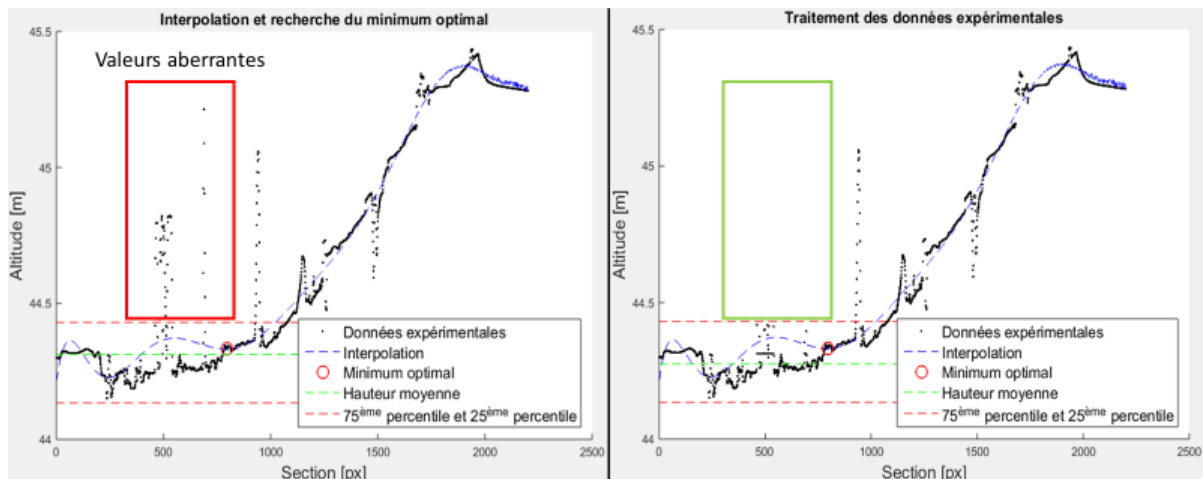


FIGURE 4-21 – LISSAGE DES VALEURS ABERRANTES SUR L'INTERVALLE D'INTÉRÊT

A la lecture de cette figure, nous constatons que les valeurs aberrantes sont correctement lissées entre l'abscisse zéro et le minimum optimal.

Quatrième étape – Deuxième interpolation et hauteur moyenne de la ligne d'eau

La quatrième et dernière étape consiste à :

- calculer une nouvelle interpolation sur base des données expérimentales partiellement lissées ;
- recalculer le minimum optimal ;
- enfin, déterminer la hauteur moyenne sur base des valeurs se situant entre l'abscisse zéro et le minimum optimal.

Le résultat final de cette deuxième interpolation est présenté à la Figure 4-22.

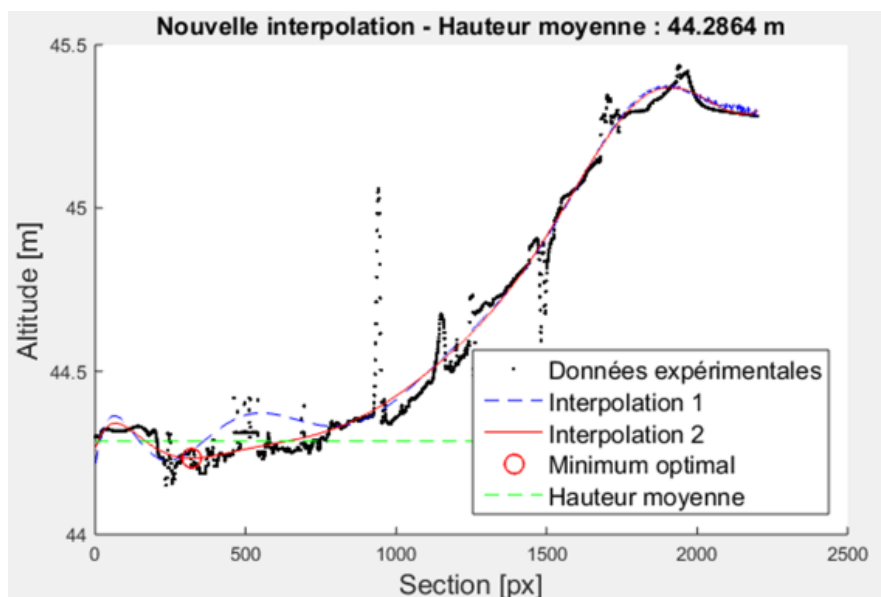


FIGURE 4-22 – RÉSULTAT DE LA DEUXIÈME INTERPOLATION AVEC RECHERCHE DU MINIMUM OPTIMAL

Pour déterminer la hauteur moyenne finale du modèle 3D, la méthodologie que nous venons de décrire est appliquée à l'ensemble des sections numériques d'un DEM.

En conclusion

Notre méthodologie pour la détection de la ligne d'eau au départ d'un modèle 3D se résume comme suit :

- on fixe le degré du polynôme. Pour rappel, les degrés acceptables sont de 9,10 ou 11 avec une recommandation pour le degré 10 ;
- on fixe le pourcentage de différence admissible entre deux minimums consécutifs, soit minimum 0.2 et maximum 1% ;
- cette méthode ne nécessite pas de bathymétrie de terrain ;
- toutes les sections du modèle 3D sont analysées.

4.3.3. Résultats

Pour évaluer notre méthode, nous disposons des mêmes modèles que pour la section précédente (voir Tableau 4-1). Lors de la mise en application de cette méthode, nous devons faire face à plusieurs questions, à savoir :

- Tant pour les résultats que pour les temps de calcul associés, la deuxième interpolation est-elle vraiment nécessaire ?
- Lorsqu'on analyse et qu'on affiche le *boxplot* des valeurs utilisées pour le calcul de la hauteur moyenne finale, on remarque qu'il y a des *outliers*. Quel est l'effet de ces *outliers* sur le calcul de la hauteur moyenne ?
- D'un point de vue « purement calculatoire », ne serait-il pas plus optimal de calculer une section moyenne à partir de l'ensemble des sections du modèle 3D ; et ensuite appliquer sur cette section moyenne la méthode de détection de la ligne d'eau développée ci-dessus ?

Pour répondre à l'ensemble de ces questions, nous avons testé la méthode sur différentes configurations. Le schéma de ces configurations est repris à la Figure 4-23.

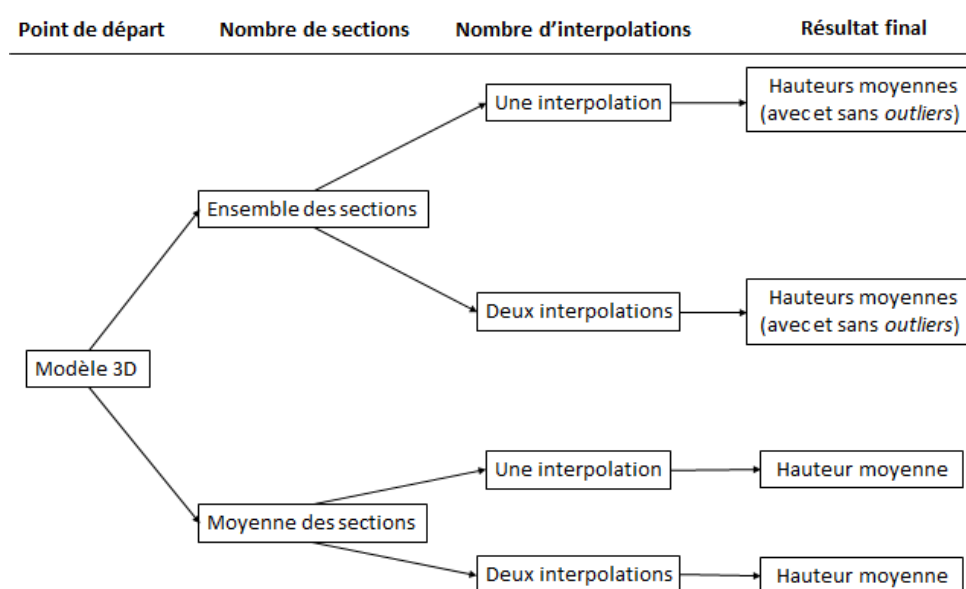


FIGURE 4-23 – ENSEMBLE DES CONFIGURATIONS TESTÉES PAR L'ALGORITHME

Pour chaque DEM, ces différentes configurations sont testées et des tableaux reprenant les résultats détaillés sont repris dans l'annexe 7.

A titre d'exemple, le Tableau 4-3 présente les résultats obtenus avec la méthode d'interpolation des bathymétries sur l'ensemble des sections d'un DEM, et ce pour une seule interpolation.

TABEAU 4-3 – RÉSULTATS DE LA MÉTHODE DE L'INTERPOLATION SUR L'ENSEMBLE DES SECTIONS

Méthode avec l'interpolation sur l'ensemble des sections							
N° du DEM	Hauteur d'eau réelle [m]	Une interpolation					
		Avec outliers			Sans outliers		
		Hauteur moyenne DEM [m]	Différence [cm]	Temps de calcul [sec]	Hauteur moyenne DEM [m]	Différence [cm]	Temps de calcul [sec]
1	39,42	39,4818	6,18	3,12	39,4818	6,18	3,12
2	39,43	39,4501	2,01	13,4	39,4501	2,01	13,4
3	39,44	39,3788	-6,12	16,74	39,3788	-6,12	16,74
4	39,44	39,4536	1,36	17,47	39,4547	1,47	17,47
5	31,96	31,9527	-0,73	17,84	31,9536	-0,64	17,84
6	31,96	31,8035	-15,65	13,48	31,8049	-15,51	13,48
7	119,69	119,6604	-2,96	21,76	119,6481	-4,19	21,76
8	65,69	65,705	1,5	22,39	65,704	1,4	22,39
9	119,7	119,691	-0,9	22,31	119,6846	-1,54	22,31
10	44,4	44,3161	-8,39	20,5	44,3161	-8,39	20,5

A la lecture de ce tableau, les résultats semblent prometteurs. En effet, les différences de hauteur sont nettement moins élevées que celles obtenues avec notre méthode de la différence de bathymétries, basée sur les différences entre sections voisines. En effet, pour 90% des cas étudiés, nous avons une différence maximale de hauteur d'eau de 8.39 cm.

Comme indiqué dans le Tableau 4-1, les DEM's n° 5 et 6 représentent tous les deux une berge de la Dyle. Il est important de rappeler que ces deux modèles ont été réalisés avec une hauteur d'eau réelle pratiquement identique. Cependant, en sortie d'algorithme, les résultats sont très différents. En effet, les différences de hauteur sont respectivement de 0.73 cm et 15.65 cm pour les DEM n° 5 et 6.

En analysant les modèles 3D illustrés à la Figure 4-24, on remarque que sur celui du 17 mai 2018, DEM n°6, l'eau est transparente ; le logiciel de photogrammétrie a donc reconstruit une partie de la berge présente sous l'eau.

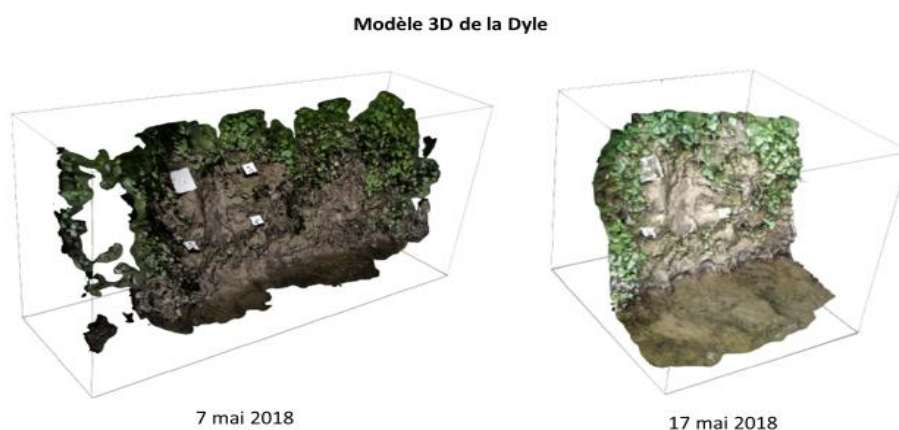


FIGURE 4-24 – MODÈLE 3D DE LA DYLE – HELLEBAUT (2018)

Le point d'interface, minimum optimal de l'interpolation, est donc détecté par notre algorithme dans le lit du cours d'eau.

Sur base de ce constat, nous pouvons donc déduire que nos résultats ne sont pas uniquement liés à la précision de la méthode ; ils dépendent également de la qualité du modèle 3D. Pour rappel, nous n'avons pas réalisé les DEM's. Les erreurs liées à cette méthode, au géoréférencement ou encore à la modélisation par photogrammétrie, ne peuvent pas être dissociées. Il est donc difficile d'établir une précision pour la méthode d'interpolation des bathymétries.

Néanmoins, nous observons que :

- sur base de l'ensemble des résultats obtenus dans les différentes configurations et repris en annexe (voir l'annexe 7), nous ne pouvons pas conclure quant à la précision de la méthode avec ou sans *outliers*. En effet, la différence de hauteur n'est pas systématiquement diminuée en utilisant la méthode sans les *outliers* ;
- en ce qui concerne la deuxième interpolation, outre le fait que cette étape augmente considérablement le temps de calcul, elle donne parfois des résultats plus éloignés que ceux obtenus avec la première interpolation ;
- sur base de nos résultats, nous ne pouvons pas affirmer que la méthode basée sur l'interpolation de la moyenne des sections est plus précise que la méthode basée sur l'interpolation de l'ensemble des sections ;
- en revanche, il apparaît que la méthode basée sur l'interpolation de la moyenne des sections réduit, d'un facteur 100, le temps de calcul. Bien que ce facteur soit élevé, il faut cependant le considérer dans la globalité de la méthode. Ce temps additionnel est négligeable par rapport au temps de construction du modèle photogrammétrique. En effet, la construction d'un modèle peut prendre plusieurs heures ;
- enfin, bien que la faiblesse de notre algorithme soit mise en évidence, par le fait qu'il est possible d'obtenir le point d'interface dans l'eau, on ne peut pas pour autant conclure que celui-ci n'offre aucune perspective. En effet, nous conseillons de tester l'algorithme sur d'autres modèles, et notamment sur des cours d'eau plus dynamique. Dans ce cas, l'eau n'est pas transparente et la surface du fond n'est pas visible.

Dans la section 5.3 de ce travail, nous appliquons notre méthode d'interpolation des bathymétries sur des modèles issus de MicMac.

4.4. Création d'une interface avec Matlab

Pour faciliter l'utilisation de nos méthodes de détection de la ligne d'eau sur un DEM, méthode par différence de bathymétries ou méthode par interpolation des bathymétries, nous avons créé une interface. Cette interface (voir Figure 4-25) offre les avantages suivants :

- pour toute personne souhaitant utiliser une de ces méthodes et analyser ses résultats, il n'est pas nécessaire de se plonger dans le code sous-jacent de l'interface. Les paramètres nécessaires à l'utilisation de la méthode sont directement insérés via celle-ci ;
- on obtient directement un aperçu du DEM et par le biais de boutons, on peut également l'orienter et le prétraiter ;
- enfin, on peut utiliser les deux méthodes développées avec une même et unique interface.

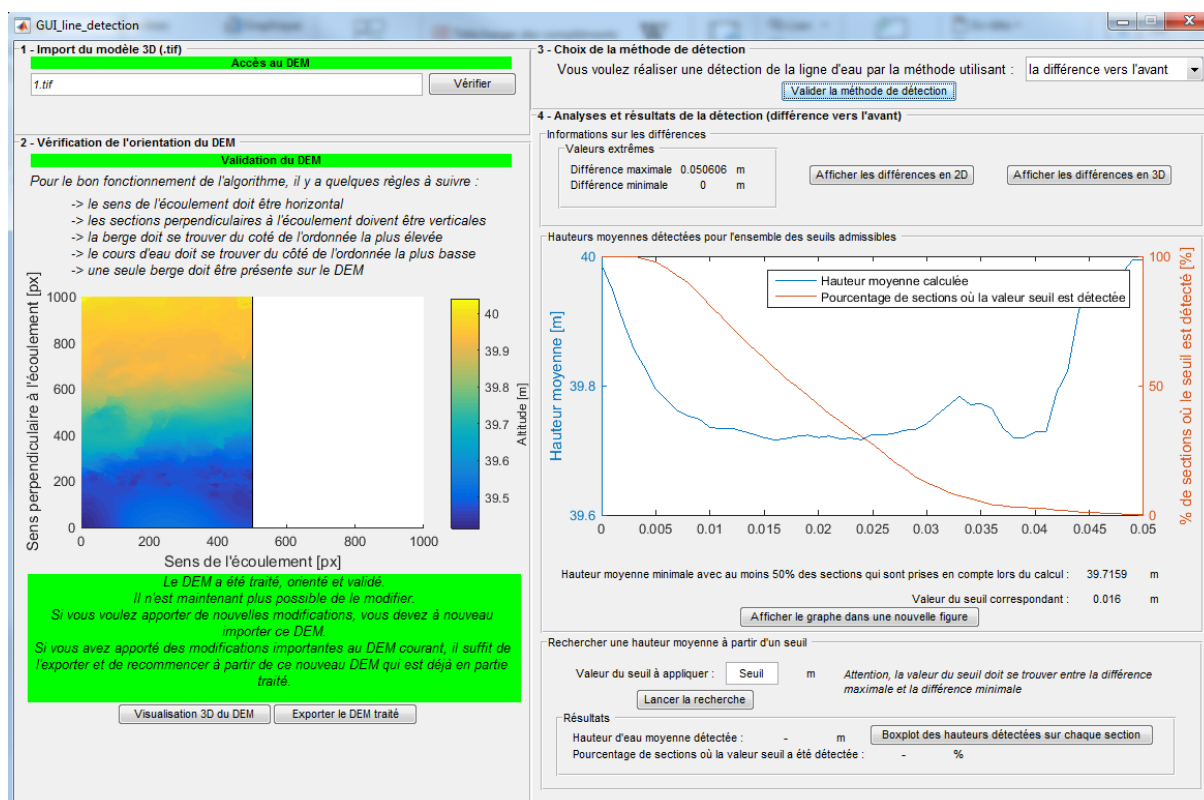


FIGURE 4-25 – INTERFACE COMPLÈTE

Ci-dessous, nous illustrons les différentes parties de notre interface. Le manuel de l'utilisateur est disponible à l'annexe 5.

4.4.1. Première étape – Importation du modèle 3D

La première étape consiste à importer un modèle 3D dans Matlab. Cette importation est réalisable au départ de la première partie de l'interface (Figure 4-26).

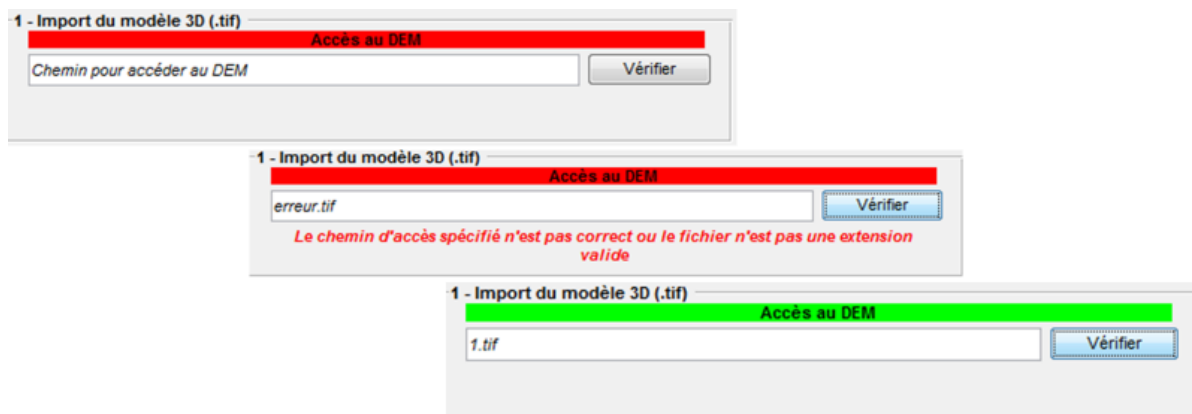


FIGURE 4-26 – PREMIÈRE PARTIE DE L'INTERFACE : IMPORTATION DU DEM

Une fois le chemin pour accéder au DEM validé, la deuxième partie de l'interface se dévoile.

4.4.2. Deuxième étape – Orientation et prétraitement du modèle 3D

Dans cette deuxième partie, on retrouve une illustration du modèle 3D (voir Figure 4-27). On y trouve également des boutons pour orienter et prétraiter un DEM ainsi que les règles à suivre pour qu'il soit correctement introduit dans notre algorithme de détection.

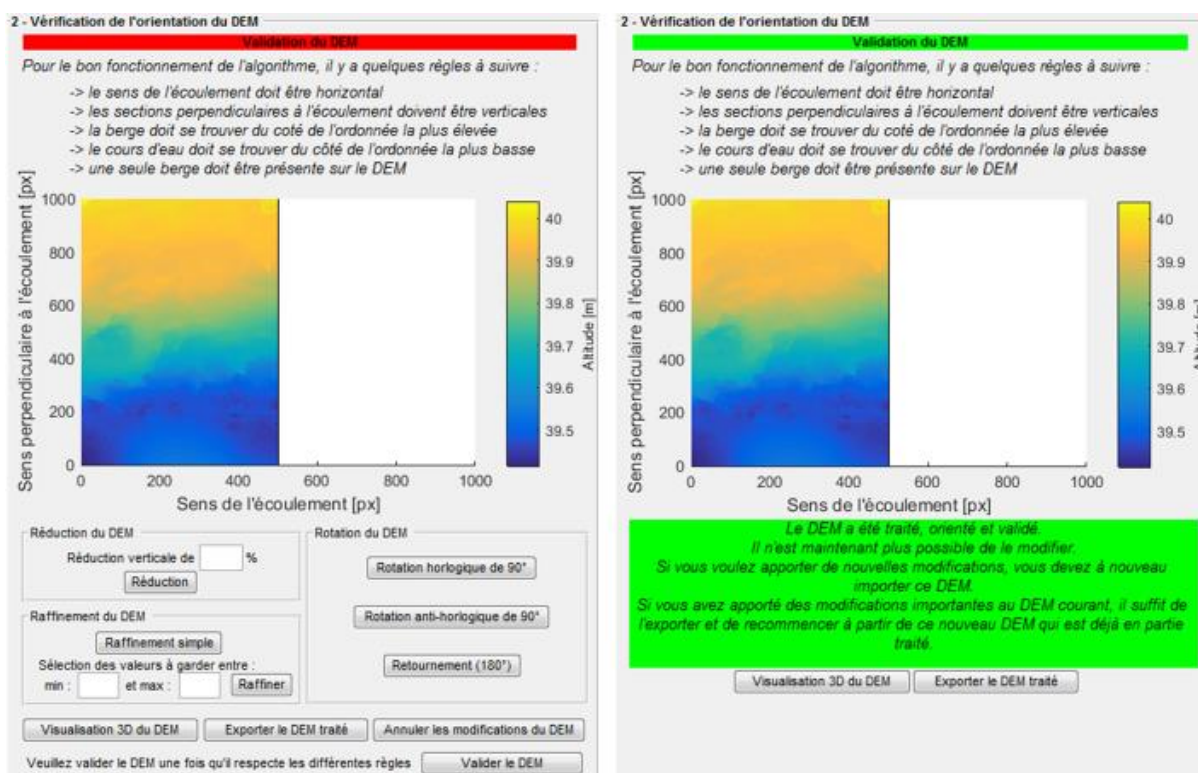


FIGURE 4-27 – DEUXIÈME PARTIE DE L'INTERFACE – TRAITEMENT ET ORIENTATION DU DEM

Dès que ces opérations sont terminées et que le DEM respecte les spécifications, la validation du DEM fait apparaître la troisième partie de l'interface.

4.4.3.Troisième étape – Choix de la méthode

Cette troisième partie permet de choisir la méthode de détection de la ligne d'eau (voir Figure 4-28).

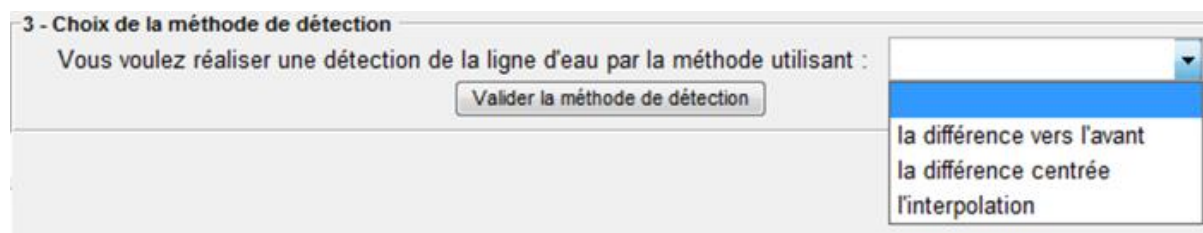


FIGURE 4-28 – TROISIÈME PARTIE DE L'INTERFACE – CHOIX DE LA MÉTHODE DE DÉTECTION

Dès que la méthode de détection est validée, la dernière partie apparaît à l'écran.

4.4.4.Quatrième étape – Résultats

Dans cette quatrième et dernière partie, les paramètres nécessaires à l'analyse des bathymétries (seuil de différence, degré du polynôme, etc.) selon la méthode choisie doivent être introduits. L'affichage du graphe reprenant les données est directement visible. La Figure 4-29 présente les résultats obtenus si la méthode de la différence vers l'avant est choisie.

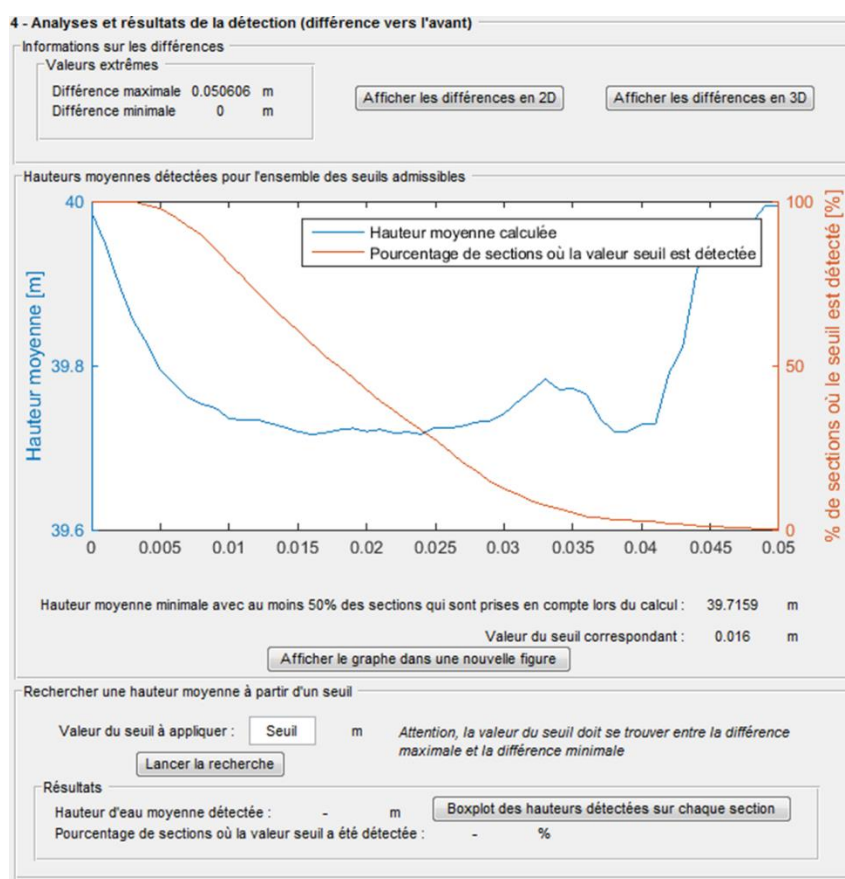


FIGURE 4-29 – QUATRIÈME PARTIE DE L'INTERFACE – CONFIGURATION DE LA MÉTHODE ET PRÉSENTATION DES RÉSULTATS POUR UNE DÉTECTION UTILISANT LA DIFFÉRENCE VERS L'AVANT

Quant à elle, la Figure 4-30 présente les résultats obtenus si la méthode d'interpolation des bathymétries est choisie.

4 - Analyses et résultats de la détection (interpolation)

Valeur pour les paramètres

Degré du polynôme d'interpolation des sections
(Valeur par défaut : 10)

Pourcentage d'écart admissible entre deux minimums consécutifs du polynôme d'interpolation (pour la recherche du minimum optimal)
(Valeur par défaut : 0.5 [%])

Nouvelle valeur pour le degré Vérifier la nouvelle valeur Nouvelle valeur du pourcentage Vérifier la nouvelle valeur

Relancer la détection par interpolation avec les nouvelles valeurs des paramètres

Résultats (avec un degré 10 et un pourcentage de 0.5%)

Interpolation sur l'ensemble des sections

Une interpolation

	avec outliers	sans outlier	
Hauteur moyenne = moyenne des 75ièmes percentiles ->	39.4826	39.4826	m
Hauteur moyenne = moyenne des hauteurs moyennes ->	39.4818	39.4818	m
Hauteur moyenne = moyenne des 25ièmes percentiles ->	39.4814	39.4814	m

Afficher le boxplot

Deux interpolations

	avec outliers	sans outlier	
Hauteur moyenne = moyenne des 75ièmes percentiles ->	39.4825	39.4825	m
Hauteur moyenne = moyenne des hauteurs moyennes ->	39.4811	39.4811	m
Hauteur moyenne = moyenne des 25ièmes percentiles ->	39.4802	39.4802	m

Afficher le boxplot

Interpolation sur une moyenne des sections

Une interpolation

Hauteur moyenne = moyenne des 75ièmes percentiles ->	39.484	m
Hauteur moyenne = moyenne des hauteurs moyennes ->	39.4836	m
Hauteur moyenne = moyenne des 25ièmes percentiles ->	39.4834	m

Afficher les résultats sur la section

Deux interpolations

Hauteur moyenne = moyenne des 75ièmes percentiles ->	39.484	m
Hauteur moyenne = moyenne des hauteurs moyennes ->	39.4834	m
Hauteur moyenne = moyenne des 25ièmes percentiles ->	39.4828	m

Afficher les résultats sur la section

FIGURE 4-30 – QUATRIÈME PARTIE DE L'INTERFACE – CONFIGURATION DE LA MÉTHODE ET PRÉSENTATION DES RÉSULTATS POUR UNE DÉTECTION UTILISANT L'INTERPOLATION DES BATHYMÉTRIES

5. Comparaison MicMac - Agisoft-PhotoScan

Dans cette section, nous confrontons deux logiciels de traitement photogrammétrique. Nous décrivons les spécificités de chaque programme et nous réalisons une comparaison tant du processus que des résultats.

Pour rappel, le logiciel commercial Agisoft-PhotoScan utilisé dans la méthodologie de l'UCLouvain n'est accessible qu'à partir de l'ordinateur sur lequel la licence est installée. Remplacer ce logiciel par le logiciel open source MicMac permettra donc de réaliser la méthode UCLouvain sur son ordinateur personnel.

Ce chapitre présente une comparaison des programmes pour répondre aux besoins de la méthode UCLouvain. Ils ne sont donc pas comparés dans leur entièreté.

5.1. Spécificités d'utilisation

Bien que les deux logiciels soient utilisés pour une même fin dans notre méthodologie, le fonctionnement de ceux-ci est totalement différent. En effet, comme précisé dans la section 1.3, MicMac fonctionne uniquement en ligne de commande alors que le logiciel Agisoft-PhotoScan est doté d'une interface. Cette première différence est un frein à l'emploi de MicMac. En effet, le fonctionnement en ligne de commande n'est pas connu du grand public. Néanmoins, cet apprentissage peut rapidement s'effectuer.

La suite MicMac est extrêmement modulable. Elle a été développée afin de fournir une solution générale aux principales applications cartographiques de mise en correspondance. La stratégie de MicMac est une approche multi-résolutions où l'utilisateur doit définir à chaque étape l'algorithme utilisé et l'ensemble de ses paramètres (IGN, 2020). La paramétrisation de chaque étape, qui constitue un atout majeur à première vue, rend la prise en main extrêmement complexe. En effet, il existe aujourd'hui plus de 200 outils différents, permettant chacun un nombre de commandes et d'arguments non négligeables. À titre d'exemple, l'outil **Tapioca** qui calcule les *tie-points* (points de correspondance), permet de réaliser cinq commandes, avec chacune un nombre d'arguments différents. La maîtrise de MicMac nécessite donc beaucoup de patience, de recherches, mais surtout la compréhension du principe de reconstruction photogrammétrique afin de savoir quel outil ou quelle commande utiliser.

À l'inverse, Agisoft-PhotoScan est simple d'utilisation, rapide et peut être totalement utilisé comme une boîte noire. Dans la plupart des cas, ce programme est également beaucoup plus rapide que MicMac.

Enfin, une dernière particularité de MicMac est le fait qu'il génère tous les résultats intermédiaires. Cela peut être avantageux pour certaines applications. Dans notre cas, ces résultats ne sont pas nécessaires et volumineux. À titre de comparaison, un modèle « semblable » avec résultats intermédiaires pèse 3Go en MicMac contre seulement 200 Mo en fichier compressé pour Agisoft-PhotoScan, soit 15 fois moins que le dossier MicMac.

5.2. Comparaison du processus

Pour arriver à obtenir un DEM traitable sur Matlab, les deux programmes suivent un *workflow* semblable que nous avons résumé à la Figure 5-1. Par la suite, nous décrivons chacune de ces étapes.

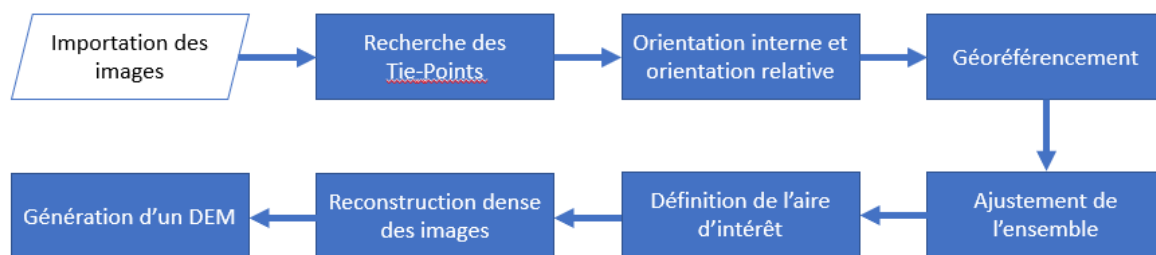


FIGURE 5-1 – WORKFLOW DU PROCESSUS PHOTOGRAMMÉTRIQUE

Importation des images

L'importation des images est nécessaire dans Agisoft-PhotoScan. Pour MicMac, toutes les lignes de commande doivent être réalisées dans le répertoire qui contient les photos de la berge à modéliser.

Recherche des *tie-points*

Les deux programmes utilisent une variation de l'algorithme SIFT (*Scale-Invariant Feature Transform*) qui permet de détecter et d'identifier les éléments similaires entre différentes images. Il faut garder en tête qu'étant donné qu'Agisoft-PhotoScan est un logiciel commercial, il est difficile de trouver quelle variation de l'algorithme est utilisée. A l'inverse, nous pouvons facilement trouver l'algorithme utilisé par MicMac dans le code source de celui-ci. La recherche des *tie-points* en MicMac est réalisée avec la commande ***Tapioca***.

Orientation interne et orientation relative

Ici, on peut calculer l'orientation de la caméra et également de vérifier que les résidus (erreurs de reprojection en pixel) sont admissibles. Cette information, pourtant primordiale afin de juger de la qualité d'un calcul, est relativement cachée dans Agisoft-PhotoScan.

Dans Agisoft-PhotoScan, l'orientation et la recherche des *tie-points* sont regroupées en une seule commande, soit ***Align Photos***. Dans MicMac, cette étape est réalisée à l'aide de ***Tapas***.

Géoréférencement

Cette étape est nécessaire afin de géoréférencer les images. Pour cela, il faut identifier tous les GCP's dans toutes les images dans lesquelles ils apparaissent et les géoréférencer en coordonnées géographiques locales, à savoir en X, Y et Z.

Ajustement de l'ensemble

Il faut maintenant ajuster la position des caméras. Cela doit se faire en tenant compte de la position des GCP's. Sous Agisoft-PhotoScan, cette étape correspond une nouvelle fois à la commande ***Align Photos***, alors que nous utilisons la commande ***Campari*** pour réaliser cet ajustement dans MicMac.

Définition de l'aire d'intérêt

Cette étape permet de sélectionner une aire d'intérêt pour limiter les calculs lors de la reconstruction dense des images. Sous Agisoft-PhotoScan, cette aire d'intérêt est proposée automatiquement, mais il est possible de la modifier. La commande **SaisieMasqQT** est utilisée pour définir cette aire d'intérêt.

Reconstruction dense des images

Ici, on densifie le nuage de points calculé après la recherche de *tie-points*. Pour cela, nous utilisons les outils **C3DC** et **Build Dense Cloud** pour MicMac et Agisoft-Photoscan respectivement.

Génération d'un DEM

La dernière étape permet de générer un DEM qui sera ensuite exploité sur Matlab. Cette dernière étape est réalisée avec la commande **PIMs2Mnt** de MicMac et **Build DEM** de Agisoft-PhotoScan.

5.3. Comparaison des modèles obtenus

À la suite de la crise du Covid-19, l'accès au poste de travail sur lequel la licence Agisoft-PhotoScan est installée a été rendu impossible. Pour comparer deux modèles obtenus avec des programmes différents, il faut pouvoir les superposer. Pour cela, deux informations sont nécessaires, à savoir les limites d'abscisses et d'ordonnées du DEM dans le repère local, ainsi que la largeur et la longueur de chaque pixel. Bien que nous disposions des DEM's réalisés par Asselberghs et Peeters (2019) et Hellebaut (2018), les informations utiles à la comparaison de ces modèles ne sont pas disponibles. La comparaison des modèles est donc rendue compliquée.

Dans cette section, trois modèles sur les dix disponibles sont comparés (voir Tableau 4-1). En effet, les photos prises par Hellebaut (2018) ne permettent pas de générer un DEM en MicMac. Le programme MicMac, lors de l'utilisation de la commande **PIMs2Mnt**, renvoie en permanence l'erreur : « *Not any point with good incidence* ». Après plusieurs recherches, cette erreur serait due à un manque de photos perpendiculaires à la berge. Ce manque de photos ne permet pas de calculer un DEM dans le sens désiré. Dès lors, nous pouvons réaliser des DEM's en MicMac uniquement pour trois cours d'eau, à savoir l'Orne à Blanmont (03/05/2019), la Thyle à Suzeril (06/05/2019) et enfin la Lasne à Rosières (09/05/2019). Les modèles obtenus par MicMac et Agisoft-PhotoScan sont comparés. Il est important de noter que les limites des modèles et les résolutions en pixels ne sont pas les mêmes.

Les résultats intermédiaires sont analysés visuellement. Effectivement, si on compare uniquement les **dense clouds** des deux modèles, étape précédant la génération du DEM, on remarque à la Figure 5-2 que la reconstruction est plus complète sous Agisoft-Photocan.

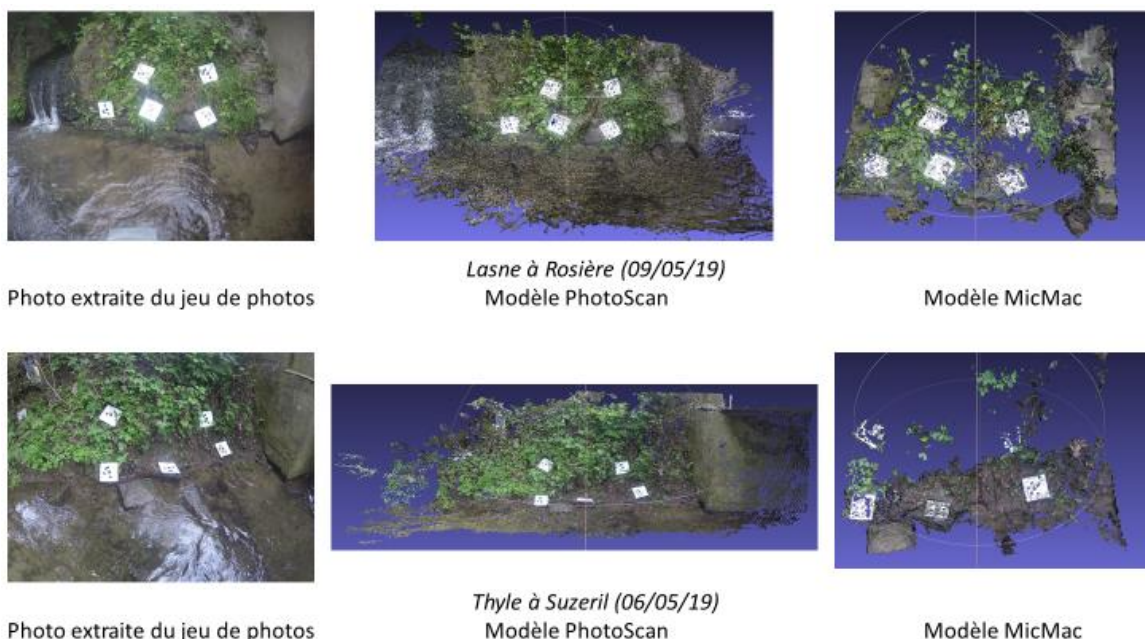


FIGURE 5-2 – COMPARAISON DES DENSE CLOUDS

Cependant, bien que ce nuage soit plus complet, il n'est pas pour autant exempt de défauts. En effet, on peut s'interroger sur la capacité de Agisoft-PhotoScan à modéliser l'eau en 3D de façon « fixe » puisque dans un cours d'eau, l'eau est constamment en mouvement. Après avoir fait plusieurs recherches sur le sujet au travers de forums sur la photogrammétrie, il ressort que Agisoft-PhotoScan a tendance à donner un résultat visuellement satisfaisant quel que soit le jeu de données et parfois au dépend de la qualité. En revanche, MicMac préfère ne pas donner de résultat plutôt qu'un résultat erroné. En effet, sur les photos des modèles MicMac, le cours d'eau n'est pas modélisé. Dès lors, nous ne pouvons pas déduire qu'un des programmes est plus performant que l'autre.

Les seules comparaisons possibles doivent donc se faire sur base des DEM's et des résultats des différents algorithmes de détection du niveau de l'eau. Pour réaliser ces comparaisons, nous avons placé les points des DEM's sur un graphe dans Matlab (voir Figure 5-3).

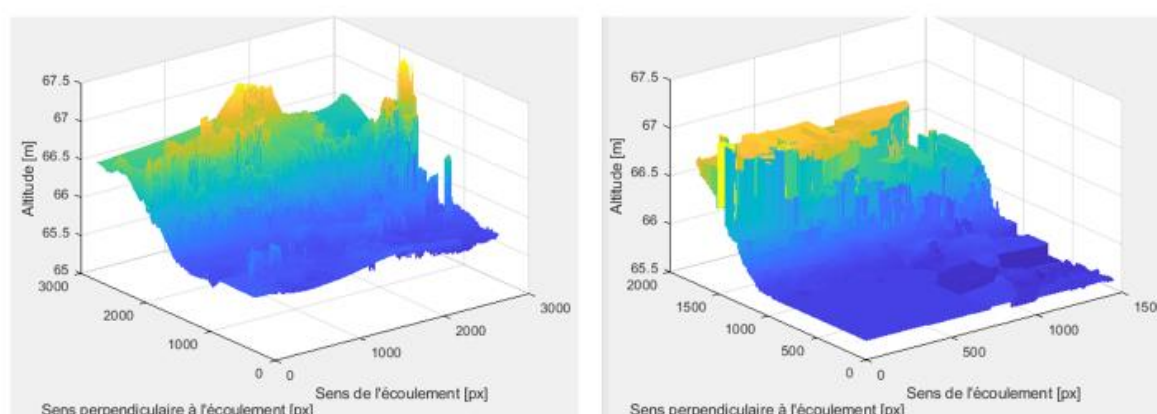


FIGURE 5-3 – DEM DE LASNE, À DROITE DEM AGISOFT-PHOTO SCAN, À GAUCHE DEM MICMAC

En sélectionnant de manière aléatoire une section, on remarque à la Figure 5-4 que le modèle MicMac présente généralement, dans le cours d'eau, des sections plus lisses que le modèle Agisoft-PhotoScan. Pour rappel, les dimensions (abscisses, ordonnées, résolution) du modèle Agisoft-

PhotoScan ne sont pas connues ; les sections analysées de manière aléatoire sont certainement différentes.

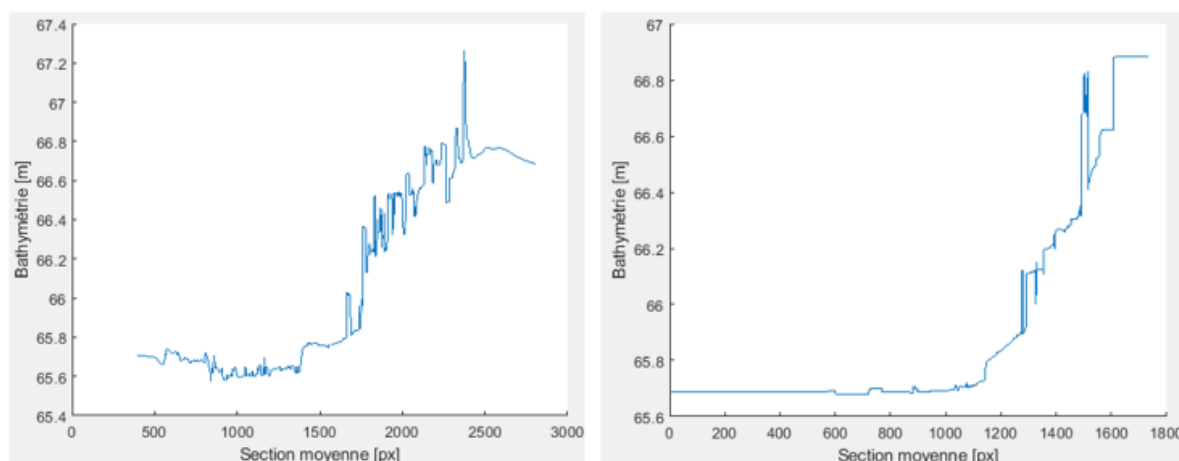


FIGURE 5-4 – SECTION ALÉATOIRE DU DEM DE LA LASNE, À DROITE SECTION DEM AGISOFT-PHOTOSCAN, À GAUCHE SECTION DEM MicMac

5.3.1. Application de la méthode de la différence des bathymétries

Nous avons appliqué la méthode de la différence de bathymétries, différence vers l'avant et différence centrée (voir section 4.2), sur les modèles MicMac. Les résultats reprenant les hauteurs d'eau réelles et les hauteurs d'eau moyennes sont présentés à l'annexe 9.1. La différence entre les hauteurs réelles et les hauteurs moyennes calculées peut aller jusqu'à 82cm (méthode de la différence centrée).

Comme discuté dans la section 4.2, cette méthode ne donne pas des résultats satisfaisants. Nous avons donc décidé de ne pas comparer les modèles obtenus par MicMac avec les modèles obtenus par Agisoft-PhotoScan sur base de la méthode de la différence de bathymétries.

5.3.2. Application de la méthode de l'interpolation des bathymétries

Nous avons appliqué la méthode d'interpolation des bathymétries (voir section 4.3) sur les modèles obtenus par MicMac. Les résultats reprenant les hauteurs d'eau réelles et les hauteurs d'eau moyennes sont présentés à l'annexe 9.2

Au Tableau 5-1, nous présentons les résultats des modèles provenant de MicMac et de Agisoft-PhotoScan. Ces résultats ont été obtenus en appliquant une seule interpolation sur l'ensemble des sections.

TABEAU 5-1 – INTERPOLATION DES BATHYMÉTRIES, MICMAC VERSUS AGISOFT-PHOTOSCAN

Modèle MicMac					
Méthode avec l'interpolation sur l'ensemble des sections, 1 interpolation					
Cours d'eau	Hauteur réelle	Avec outliers		Sans outliers	
		Hauteur moyenne DEM [m]	Différence [cm]	Hauteur moyenne DEM [m]	Différence [cm]
Thyle	65,69	65,6838	-0,62	65,6832	-0,68
Orne	119,7	119,7675	6,75	119,722	2,2
Lasne	44,4	44,3669	-3,31	44,3658	-3,42
Modèle PhotoScan					
Méthode avec l'interpolation sur l'ensemble des sections, 1 interpolation					
Cours d'eau	Hauteur réelle	Avec outliers		Sans outliers	
		Hauteur moyenne DEM [m]	Différence [cm]	Hauteur moyenne DEM [m]	Différence [cm]
Thyle	65,69	65,705	1,5	65,704	1,4
Orne	119,7	119,691	-0,9	119,6846	-1,54
Lasne	44,4	44,3161	-8,39	44,3161	-8,39

Nous observons que sur deux des trois DEM's, avec ou sans *outliers*, les modèles MicMac nous donnent des résultats plus proches des hauteurs d'eau réelles.

Les résultats obtenus sur les modèles de Agisoft-PhotoScan sont présentés à l'annexe 7 et les résultats obtenus sur les modèles de MicMac sont repris à l'annexe 9.2. Que ce soit avec Agisoft-PhotoScan ou avec MicMac, les résultats obtenus, par la méthode de l'interpolation des bathymétries avec deux interpolations sur l'ensemble des sections ou avec les interpolations (une ou deux) sur la moyenne des sections, sont similaires.

Ces premiers résultats, obtenus avec des modèles MicMac, calculés avec une seule interpolation sans *outliers* sur l'ensemble des sections, nous donnent une différence de maximum 3,42 cm par rapport à la hauteur d'eau réelle. Ces résultats sont donc prometteurs. Cependant, nous ne pouvons pas conclure quant à la précision de la méthode de l'interpolation des bathymétries sur les modèles MicMac au départ de seulement trois modèles.

5.4. Résultats de la comparaison

Bien que Agisoft-PhotoScan soit plus simple d'utilisation et nous donne des résultats visuellement plus satisfaisants, MicMac semble nous donner de meilleurs résultats quant à la précision de la détection du niveau d'eau. Cependant, cette détection de hauteur d'eau n'a été réalisée que sur trois modèles.

Afin de valider l'utilisation de MicMac dans la méthodologie de l'UCLouvain il est nécessaire de poursuivre la comparaison de ces logiciels sur de nouveaux modèles numériques.

CONCLUSION

Depuis plusieurs années, Madame Soares Frazão développe une méthode non intrusive et sans contact pour mesurer le débit en rivière. Celle-ci a pour but de s'affranchir des jaugeages traditionnels qui présentent des risques lors des crues, tant pour les opérateurs que pour le matériel de mesure. La méthode développée à l'UCLouvain, avec l'aide de certaines technologies comme la LSPIV, la photogrammétrie ou encore l'utilisation des drones permet de garantir la sécurité des opérateurs ainsi que d'opérer plus vite et à moindre coût.

Dans le cadre de ce mémoire, nous nous sommes tout d'abord appropriés les principes des technologies utilisées dans la méthode de l'UCLouvain. Nous avons parcouru de nombreux articles scientifiques traitant de la photogrammétrie, de la technique de PIV, de son extension en LSPIV et enfin des différents profils de vitesses d'eau.

Lors du premier quadrimestre, nous avons réalisé une base de données. Celle-ci permet de centraliser les informations et mesures relatives aux différents cours d'eau aussi bien pour les années antérieures que futures. Notre programme sur Excel, codé en VBA, permet une utilisation facile pour un grand nombre de clients. Pour rappel, ce programme est séparé en deux parties. La première reprend le récapitulatif des cours d'eau sur lesquels des mesures ont été réalisées. C'est également dans cette partie que chaque utilisateur peut ajouter un nouveau cours d'eau ou des données pour une section/station déjà existante. La seconde partie présente, pour chaque station, les caractéristiques de celle-ci ainsi que les mesures relevées classées par date et par opérateur. Afin de toujours disposer de l'ensemble des informations et des mesures, nous recommandons la mise à jour de cette base de données après traitement des données de chaque campagne de mesures.

Mi-février, nous avons réalisé nos premières mesures de terrain. Lors de cette campagne, nous avons rencontré divers problèmes. Le manque de précision du Leica1200 ne nous permet pas de géoréférencer la bathymétrie et les GCP's. Nous émettons également des doutes sur les mesures de vitesses relevées par le courantomètre MFPro, utilisé dans la méthode de l'UCLouvain. Afin de pallier à ces problèmes, nous avons envisagé les solutions suivantes : s'écarter d'un pont pour la prise de vidéos de l'écoulement et utiliser l'orthorectification des images à posteriori et utiliser un vélocimètre du SPW en lieu et place du MFPro. Ces solutions n'ont pas pu être mises en pratique à cause de la crise sanitaire du Covid-19 qui nous a empêchés de retourner sur le terrain. Néanmoins, pour les futures campagnes, nous recommandons ces alternatives.

Durant le confinement, nous avons participé au Vidéo Globe Challenge lancé par Monsieur Le Coz. Celui-ci a pour objectif de tester le jaugeage vidéo à l'aveugle. Pour réaliser ce challenge, nous avons concouru avec deux logiciels de LSPIV, à savoir le logiciel Fudaa-LSPIV et le logiciel PIVlab qui est classiquement utilisé dans la méthode de l'UCLouvain. Etant novices dans la détermination de débit par jaugeage vidéo, en fin de challenge, nous sommes classés 18^{ème} et 22^{ème} sur vingt-deux. Ce classement confirme le fait que l'analyse vidéo est sensible à l'expertise de l'utilisateur. L'outil Fudaa-LSPIV, développé spécifiquement pour les mesures de vitesse d'eau, s'est révélé intéressant. En effet, ce programme permet à lui seul de stabiliser et orthorectifier les images, d'en réaliser l'analyse PIV et le post-traitement éventuel et, enfin, d'importer la bathymétrie d'une section pour calculer le débit de la section concernée. Pour améliorer la méthode de l'UCLouvain, nous recommandons l'utilisation de ce logiciel, en lieu et place du logiciel PIVlab.

Comme expliqué dans ce travail, suite de la crise du Covid-19, nous avons défini, en accord avec Madame Soares Frazão, un nouvel objectif. Celui-ci est d'élaborer une technique de détection de la ligne d'eau à partir de modèles 3D. La technique développée par Hellebaut (2018), méthode basée sur

la comparaison d'une bathymétrie numérique d'un DEM et d'une bathymétrie réelle, présente quelques faiblesses. En effet, sa méthode requiert une paramétrisation importante et nécessite une bathymétrie de terrain. Notre objectif est donc de proposer une méthodologie dont la paramétrisation est réduite, qui ne requiert pas de bathymétrie de terrain et qui tient compte du modèle numérique en entier.

La première méthode développée, nommée méthode de la différence de bathymétries, se base sur le fait que les DEM's modélisent correctement la berge qui est un élément statique. Par contre, la modélisation du cours d'eau en mouvement n'est pas fiable. Notre hypothèse de base, à savoir que deux sections voisines modélisées ne sont pas différentes au niveau de la berge n'est pas vérifiée. En effet, nos résultats de différence entre la hauteur d'eau réelle et la hauteur d'eau obtenue à partir du DEM ne sont pas satisfaisants car les différences de hauteur sont trop élevées.

La deuxième méthode, appelée interpolation des bathymétries, se base sur l'hypothèse qu'une section issue d'un modèle 3D peut être interpolée par un polynôme. Le point d'interface entre la berge et le cours d'eau sera un minimum de ce polynôme. Bien que la différence entre la hauteur d'eau réelle et la hauteur d'eau obtenue à partir du DEM reste non-négligeable, cette méthode d'interpolation des bathymétries donne des résultats encourageants. En effet, la différence de hauteur ne dépend pas que de notre algorithme, mais également de la précision des modèles 3D. Nous recommandons de tester notre méthode d'interpolation des bathymétries sur de nouveaux modèles 3D.

Enfin, pour faciliter l'utilisation de nos méthodes, nous avons développé une interface avec Matlab. Ce programme permet d'obtenir facilement les résultats de différence de hauteurs.

Pour clôturer ce travail, nous nous sommes penchés sur la possibilité d'utiliser le logiciel open-source MicMac, en lieu et place du logiciel commercial Agisoft-PhotoScan, logiciel utilisé dans la méthode de l'UCLouvain. Dans un premier temps, nous avons comparé les spécificités d'utilisation de ces deux logiciels. Pour rappel, MicMac s'utilise en entrant des instructions en ligne de commande, ce qui rend la prise en main du logiciel compliquée. Quant à Agisoft-PhotoScan, il s'utilise comme une boîte noire avec sa propre interface. Ensuite, afin de comprendre chaque étape de la modélisation photogrammétrique des deux logiciels, nous avons comparé les processus et réalisé un *workflow* synthétique. Enfin, nous avons comparé les modèles obtenus sur base de nos algorithmes de détection de niveau d'eau. Lors de cette comparaison, et en utilisant la méthode de l'interpolation des bathymétries, nous obtenons des résultats encourageants. En effet, la différence moyenne maximale est de +/- 3.4 cm pour les modèles Mic-Mac contre +/- 8.4 cm pour les modèles PhotoScan équivalents. Cette différence de hauteur moyenne correspond à la différence maximale sur les hauteurs d'eau détectées sur nos modèles 3D et les hauteurs d'eau réelles. Nous recommandons donc de tester le logiciel MicMac sur d'autres modèles 3D et ce afin d'évaluer la précision de notre méthode de l'interpolation des bathymétries.

Ce mémoire ouvre donc de nouvelles pistes pour les logiciels utilisés dans la méthode de l'UCLouvain, tant de photogrammétrie que de LSPIV, ainsi que pour la détection de la ligne d'eau par la méthode de l'interpolation des bathymétries.

Liste des figures

Etat de l'art

FIGURE 1-1 – EVOLUTION DE LA PHOTOGRAMMÉTRIE - SCHENK (2005)	8
FIGURE 1-2 – SCHÉMA DE LA MÉTHODE SFM – SHERVAIS (2016)	9
FIGURE 2-1 – ILLUSTRATION DE LA MÉTHODE PIV - RAFFEL ET AL. (2018)	13
FIGURE 2-2 – CHARTE SYNTHÉTIQUE DU PROCESSUS PIV – KUOK ET CHAN (2017)	14
FIGURE 2-3 – ALGORITHME DE LA PIV - DI CRISTO (2011)	15
FIGURE 2-4 – CORRÉLATION CROISÉE DE 2 ENREGISTREMENTS ET DÉTERMINATION DU VECTEUR « VITESSE » - BROSSARD ET AL. (2009).....	15
FIGURE 3-1 – IMAGE RÉELLE (À GAUCHE), IMAGE ORTHORECTIFIÉE (À DROITE) – JODEAU ET AL. (2007)	21
FIGURE 3-2 – PRISE D'IMAGES SUR SITE PAR CAMÉRA FIXE (A) OU PAR DRONE (B) – TAURO ET AL. (2015)	22
FIGURE 3-3 – RÉSULTATS D'UNE ANALYSE PIV SANS DTF (À GAUCHE) ET AVEC DFT (À DROITE) – VANDEN BERGHE (2013).....	25
FIGURE 3-4 – HISTOGRAMME DE DISTRIBUTION DES VECTEURS DE VITESSE – SMITH ET AL. (2005)	26
FIGURE 3-5 – ILLUSTRATION DE LA MÉTHODE PROPOSÉE PAR SMITH ET AL. (2005)	26
FIGURE 3-6 – HISTOGRAMME DE DISTRIBUTION DES VITESSES APRÈS TRAITEMENT – SMITH ET AL. (2005)	27
FIGURE 3-7 – COURBE DE TARAGE ET EXTRAPOLATION - HAUET (2006).....	30
FIGURE 4-1 – ILLUSTRATION DE L'AIRE MOUILLÉE (EN BLEU) – UCCLOUVAIN (2020)	32
FIGURE 4-2 – PROFILS DE VITESSE (À GAUCHE HERSCHY (2009) – À DROITE LARRARTE ET AL. (2016))	33
FIGURE 4-3 – PROFIL DES VITESSES DE SURFACE – HANSEN ET AL. (2017)	33
FIGURE 4-4 – PROFIL DE VITESSE DE TYPE LOGARITHMIQUE - SOARES-FRAZÃO (2017)	34
FIGURE 4-5 – PROFIL VERTICAL DE VITESSE AVEC DE LA VÉGÉTATION SUR LE LIT DE LA RIVIÈRE - STEPHAN ET GUTKNECHT (2002).....	35
FIGURE 4-6 – ILLUSTRATION DU "DIP-PHENOMENON" - LARRARTE ET AL. (2016).....	35
FIGURE 4-7 – PROFILS DE VITESSE (MESURES DES VITESSES PAR JAUGEAGE) - À DROITE JODEAU ET AL. (2017), À GAUCHE DRAMAIS ET AL. (2011).....	36
FIGURE 4-8 – ÉCHANTILLONNAGE VERTICAL DU COURS D'EAU	37
FIGURE 4-9 – VARIATION DU COEFFICIENT A DANS DIFFÉRENTS MILIEUX - POLATEL (2005).....	38
FIGURE 4-10 – VARIATION DU COEFFICIENT A - WELBER ET AL. (2016).....	39
FIGURE 4-11 – EVOLUTION DE ASURFACE (À GAUCHE) ET ALOG (À DROITE) EN FONCTION DU RAYON HYDRAULIQUE - HAUET ET AL. (2018)	40
FIGURE 4-12 – ÉVOLUTION DE A EN FONCTION DU RAPPORT BRH - HAUET ET AL. (2018)	41
FIGURE 4-13 – ÉVOLUTION DE ASURFACE AVEC LA RUGOSITÉ RELATIVE - HAUET ET AL. (2018)	41

Réalisations

FIGURE 1-1 – APPAREILS UTILISÉS POUR LA PRISE DE MESURES SUR TERRAIN	43
FIGURE 1-2 – ILLUSTRATION DE LA DEUXIÈME ÉTAPE DE LA MÉTHODOLOGIE SUIVIE À L'UCCLOUVAIN.....	44
FIGURE 2-1 – ARCHITECTURE DE LA BASE DE DONNÉES	48
FIGURE 2-2 – ILLUSTRATION DE LA PARTIE SUMMARY	49
FIGURE 2-3 – ALERTES LORS DE L'OUVERTURE D'UNE SECTION	50
FIGURE 2-4 – EXEMPLES DE BOITES DE DIALOGUES GÉNÉRÉES PAR LA BASE DE DONNÉES	50
FIGURE 2-5 – FEUILLES DU CLASSEUR POUR UNE SECTION	51
FIGURE 2-6 – INFORMATIONS DE LA STATION	51
FIGURE 2-7 – DATES ET AUTEURS DES PRISES DE MESURE	52
FIGURE 2-8 – ENTÊTE DE LA FEUILLE BATHYMÉTRIE	52
FIGURE 2-9 – ENSEMBLE DES DONNÉES BATHYMETRIQUES.....	53
FIGURE 2-10 – FEUILLE DATE - NIVEAU D'EAU	53
FIGURE 2-11 – FEUILLE DATE – MESURES DE VITESSE.....	54

FIGURE 2-12 – FEUILLE <i>DATE</i> – VALEURS DE DÉBIT	54
FIGURE 2-13 – FEUILLE <i>DATE</i> – APPLICATION DISCHARGE	54
FIGURE 3-1 – ILLUSTRATIONS DES HUIT ÉTAPES DU CHALLENGE	56
FIGURE 3-2 – PHOTOS EXTRAITES DU CHALLENGE N°6.....	57
FIGURE 3-3 – PROFIL BATHYMÉTRIQUE ET NIVEAU D’EAU – CHALLENGE N°6	57
FIGURE 3-4 – CLASSEMENT DE L’ÉTAPE 6.....	60
FIGURE 3-5 – CLASSEMENT FINAL – VIDEO GLOBE CHALLENGE	61
FIGURE 4-1 – MÉTHODE DE DÉTECTION DE LA LIGNE D’EAU – HELLEBAUT (2018)	63
FIGURE 4-2 – DEM DE LASNE (09/05/19) – (GAUCHE) DEM PRÉSENTÉ EN 2D - (DROITE) IMAGE BINAIRE DU DEM	64
FIGURE 4-3 – DEM DE LA LASNE (09/05/2019) TRAITÉ AVEC MATLAB	66
FIGURE 4-4 – REPRÉSENTATION MATRICIELLE D’UN DEM COMPOSÉ DE $M \times N$ PIXELS	66
FIGURE 4-5 – RÉSULTAT DU CALCUL DE DIFFÉRENCE VERS L’AVANT SUR LE DEM DE LA LASNE (09/05/2019) ..	67
FIGURE 4-6 – FONCTIONNEMENT DU SEUIL DE DIFFÉRENCE POUR LA DÉTECTION DU POINT D’INTERFACE	68
FIGURE 4-7 – CRÉATION D’UNE MATRICE BINAIRE APRÈS DÉTECTION DE LA VALEUR SEUIL	68
FIGURE 4-8 – DIFFÉRENCE DE HAUTEUR ENTRE DEUX SECTIONS	69
FIGURE 4-9 – RÉCUPÉRATION DES HAUTEURS DES POINTS D’INTERFACE DÉTECTÉS	69
FIGURE 4-10 – DÉTECTION DE LA HAUTEUR D’EAU PAR LA MÉTHODE DE DIFFÉRENCE – DEM DU TRAIN (12/03/2018).....	71
FIGURE 4-11 – SECTIONS VOISINES SEMBLABLES EN APPARENCE	73
FIGURE 4-12 – DIFFÉRENCE ENTRE 2 SECTIONS VOISINES	73
FIGURE 4-13 – SECTION D’UN MODÈLE 3D	74
FIGURE 4-14 – PREMIÈRE INTERPOLATION D’UNE SECTION BRUTE	75
FIGURE 4-15 – COMPARAISON DES INTERPOLATIONS DES DEGRÉS 9 ET 10.....	75
FIGURE 4-16 – RECHERCHE DU MINIMUM GLOBAL SUR L’INTERPOLATION.....	76
FIGURE 4-17 – ÉTAPE 2 DE LA DÉTERMINATION DE LA HAUTEUR D’EAU PAR INTERPOLATION DE LA BATHYMÉTRIE	77
FIGURE 4-18 – RÉSULTAT DE LA RECHERCHE DU MINIMUM OPTIMAL DU POLYNÔME D’INTERPOLATION	77
FIGURE 4-19 – ERREUR DE DÉTECTION SI POURCENTAGE ADMISSIBLE TROP FAIBLE OU TROP ÉLEVÉ	78
FIGURE 4-20 – ENSEMBLE DES MINIMUMS POUR UN POLYNÔME D’INTERPOLATION DE DEGRÉ 11	78
FIGURE 4-21 – LISSAGE DES VALEURS ABERRANTES SUR L’INTERVALLE D’INTÉRÊT	79
FIGURE 4-22 – RÉSULTAT DE LA DEUXIÈME INTERPOLATION AVEC RECHERCHE DU MINIMUM OPTIMAL.....	79
FIGURE 4-23 – ENSEMBLE DES CONFIGURATIONS TESTÉES PAR L’ALGORITHME	80
FIGURE 4-24 – MODÈLE 3D DE LA DYLE – HELLEBAUT (2018)	81
FIGURE 4-25 – INTERFACE COMPLÈTE.....	83
FIGURE 4-26 – PREMIÈRE PARTIE DE L’INTERFACE : IMPORTATION DU DEM.....	84
FIGURE 4-27 – DEUXIÈME PARTIE DE L’INTERFACE – TRAITEMENT ET ORIENTATION DU DEM	84
FIGURE 4-28 – TROISIÈME PARTIE DE L’INTERFACE – CHOIX DE LA MÉTHODE DE DÉTECTION	85
FIGURE 4-29 – QUATRIÈME PARTIE DE L’INTERFACE – CONFIGURATION DE LA MÉTHODE ET PRÉSENTATION DES RÉSULTATS POUR UNE DÉTECTION UTILISANT LA DIFFÉRENCE VERS L’AVANT	85
FIGURE 4-30 – QUATRIÈME PARTIE DE L’INTERFACE – CONFIGURATION DE LA MÉTHODE ET PRÉSENTATION DES RÉSULTATS POUR UNE DÉTECTION UTILISANT L’INTERPOLATION DES BATHYMÉTRIES	86
FIGURE 5-1 – <i>WORKFLOW</i> DU PROCESSUS PHOTOGRAMMÉTRIQUE	88
FIGURE 5-2 – COMPARAISON DES <i>DENSE CLOUDS</i>	90
FIGURE 5-3 – DEM DE LASNE, À DROITE DEM AGISOFT-PHOTOSCAN, À GAUCHE DEM MICMAC.....	90
FIGURE 5-4 – SECTION ALÉATOIRE DU DEM DE LA LASNE, À DROITE SECTION DEM AGISOFT-PHOTOSCAN, À GAUCHE SECTION DEM MICMAC.....	91

Annexes

FIGURE 1-1 – GOPRO HERO 6	103
FIGURE 1-2 – LEICA1200	103
FIGURE 1-3 – MFPRO	104
FIGURE 3-1 – STRUCTURE GCP.XML	106
FIGURE 4-1 - IMPORTATION D'IMAGES DANS PIVLAB	108
FIGURE 4-2 - SÉLECTIONNER LA ROI ET APPLIQUER DES MASQUES SUR PIVLAB	109
FIGURE 4-3 - APPLIQUER DES FILTRES SUR LES IMAGES IMPORTÉES DANS PIVLAB	110
FIGURE 4-4 - AJOUTER UNE CALIBRATION DANS PIVLAB	111
FIGURE 4-5 – RÉALISER L'ÉTAPE DE VALIDATION DES VECTEURS VITESSES DANS PIVLAB	112
FIGURE 4-6 – RÉSULTAT FINAL D'UNE APPLICATION PIV AVEC PIVLAB	113
FIGURE 5-1 - IMPORTER UN MODÈLE 3D DANS LE PROGRAMME DE DÉTECTION DE LIGNE D'EAU	114
FIGURE 5-2 - TRAITEMENT ET ORIENTATION DU MODÈLE 3D	115
FIGURE 5-3 - DERNIÈRE ALERTE POUR S'ASSURER QUE LES SPÉCIFICATIONS SUR LE DEM SOIENT RESPECTÉES	116
FIGURE 5-4 - NOUVELLE CONFIGURATION DU PANNEAU 2 APRÈS LA VALIDATION DU DEM PAR L'UTILISATEUR	117
FIGURE 5-5 - ILLUSTRATION DU TROISIÈME PANNEAU DE L'INTERFACE	117
FIGURE 5-6 - FENÊTRE QUI INDIQUE QUE LA MÉTHODE DE DÉTECTION EST EN TRAIN D'ÊTRE APPLIQUÉE SUR LE MODÈLE 3D	118
FIGURE 5-7 - ILLUSTRATION DU QUATRIÈME PANNEAU QUI APPARAÎT LORSQUE LA MÉTHODE DE DIFFÉRENCE VERS L'AVANT EST CHOISIE	119
FIGURE 5-8 - ILLUSTRATION DU QUATRIÈME PANNEAU QUI APPARAÎT LORSQUE LA MÉTHODE DE L'INTERPOLATION EST CHOISIE	120
FIGURE 6-1 - ACCÈS À LA FEUILLE CACHÉE DANS <i>SUMMARY</i>	123
FIGURE 6-2 - ÉTAT DE LA BASE DE DONNÉES	123
FIGURE 6-3 – CONTENU DU DOSSIER <i>SET OF STATIONS-SECTIONS</i>	124
FIGURE 6-4 – FEUILLE CACHÉE DANS LE CLASSEUR <i>TEMPLATE</i>	124

Liste des tableaux

Etat de l’art

TABLEAU 3-1 – COMPARAISON DES CARACTÉRISTIQUES PIV ET LSPIV ET CHALLENGES - MUSTE ET AL. (2004).	20
TABLEAU 3-2 – RECOMMANDATIONS POUR L’APPLICATION DE LA LSPIV - DRAMAIS ET AL. (2011)	29
TABLEAU 4-1 – CARACTÉRISTIQUES DES SITES ÉTUDIÉS - HAUET ET AL. (2018)	40
TABLEAU 4-2 – ALOG,APOWER ET ASURFACE - HAUET ET AL. (2018).....	40

Réalisations

TABLEAU 1-1 – COMPARATIF DES ERREURS COMMISES SUR LES DÉBITS	46
TABLEAU 3-1 – RÉCAPITULATIF DES RÉSULTATS DU CHALLENGE AVEC CORRECTION DES ERREURS	62
TABLEAU 4-1 – RÉCAPITULATIF DES DEM’S	70
TABLEAU 4-2 – RÉSULTATS DE LA MÉTHODE DE LA DIFFÉRENCE VERS L’AVANT	72
TABLEAU 4-3 – RÉSULTATS DE LA MÉTHODE DE L’INTERPOLATION SUR L’ENSEMBLE DES SECTIONS	81

Annexes

TABLEAU 5-1 – INTERPOLATION DES BATHYMÉTRIES, MICMAC VERSUS AGISOFT-PHOTOSCAN.....	92
TABLEAU 7-1 – RÉSULTATS DE LA MÉTHODE DE L’INTERPOLATION SUR LES MODÈLES DE AGISOFT - PHOTOSCAN.....	127
TABLEAU 8-1 – RÉSULTATS DES MÉTHODES DE DIFFÉRENCE SUR LES MODÈLES DE AGISOFT-PHOTOSCAN	128
TABLEAU 9-1 – RÉSULTATS DES MÉTHODES DE DIFFÉRENCE SUR LES MODÈLES DE MICMAC.....	129
TABLEAU 9-2 – RÉSULTATS DE LA MÉTHODE DE L’INTERPOLATION SUR LES MODÈLES DE MICMAC	130

Bibliographie

- Adrian, R. (2005). Twenty years of particle image velocimetry. *Experiments in Fluids* 39, 159-169.
- Adrien, R. (2011). Bibliography of Particle Image Velocimetry Using Imaging Methods: 1917–1995. *DLR Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.* .
- Asselberghs, P., & Peeters, B. (2019). Mesure du niveau d'eau et de la vitesse de l'écoulement par imagerie en laboratoire et en rivière naturelle. *Master thesis*, Université Catholique de Louvain.
- Bandini, F. (2017). Hydraulics and drones: observations of water level, bathymetry and water surface velocity from Unmanned Aerial Vehicles.
- Berghe, T. V. (2013). Image processing for a LSPIV application on a river.
- Bia, T., & Somers, H. (2018). Mesure du champ de vitesses superficielles en rivière à partir d'un drone. *Master thesis*, Université Catholique de Louvain.
- Bieri, M., Althaus, J., Kantoush, S., & Boillat, J.-L. (2009). Large scale particle image velocimetry applications for complex free surface flows in river and dam engineering.
- Bradley, A., Kruger, A., Meselhe, E., & Muste, M. (2002). Flow measurement in streams using video imagery. *WATER RESOURCES RESEARCH*, VOL. 38.
- Brossard, C., Monnier, J.-C., Barricau, P., Vandernoot, F., Le Sant, Y., Champagnat, F., & Le Besnerais, G. (2009). Principles and applications of particle image velocimetry.
- Butler, J., Lane, S., Chandler, J. H., & Porfiri, E. (2003). Through-Water Close Range Digital Photogrammetry in Flume and Field Environments. *The Photogrammetric Record* , 419 - 439.
- Cardoso, A. H., Graf, W. H., & Gust, G. (1989). Uniform flow in a smooth open channel. *Journal of Hydraulic Research*, Volume 27.
- Chen, K. (2018). APPLICATION OF LARGE-SCALE PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY AT THE HYDRAULICS LABORATORY OF COLORADO STATE UNIVERSITY .
- Costa, J., Spicer, K., Cheng, R., Haeni, F., Melcher, N., Thurman, E., . . . Keller, W. (2000). Measuring stream discharge by non-contact methods: A proof-of-concept experiment.
- Coutinho, J. H., & Janssens, N. (2017). Mesure de la surface libre d'écoulement en bathymétrie complexe par photogrammétrie. *Master thesis*, Université Catholique de Louvain.
- Creëlle, S., Roldan, R., & Herremans, A. (2016). Validation of large-scale particle image velocimetry to acquire free-surface flow fields in vegetated rivers. *Journal of Applied Water Engineering and Research*, 171-182.
- Creutin, J. D. (2001). LOCAL REMOTE SENSING OF RIVERS.
- de Schoutheete, F., & Hubert, T. (2018). Mesure du niveau d'eau par photogrammétrie en laboratoire. *Master thesis*, Université Catholique de Louvain.
- Detert, M., & Weitbrecht, V. (2014). Helicopter-based surface PIV experiments at Thur River.
- Detert, M., & Weitbrecht, V. (2016). Estimation of flow discharge by an airborne velocimetry system. *La Houille Blanche*.
- Di Cristo, C. (2011). Particle Imaging Velocimetry and Its Applications in Hydraulics: A State-of-the-Art Review.
- Dietrich, J. T. (2017). Bathymetric Structure from Motion: Extracting shallow stream bathymetry from multi-view stereo photogrammetry. *Earth Surface Processes and Landforms* 42, 355-364.
- Dramais, G., Le Coz, J., Camenen, B., & Hauet, A. (2011). Advantages of a mobile LSPIV method for measuring flood discharges and improving stage–discharge curves. *Journal of Hydro-environment Research* 5, 301-312.
- Dramais, G., Le Coz, J., Camenen, B., Hauet, A., & Buby, P. (2011). Utilisation des mesures sans contact pour quantifier le débit des rivières torrentielles.
- Dudka, T. (2015). Photogrammétrie et Modélisation 3D à partir d'images drone au sein de TPLM-3D. *Master thesis*, INSA Strasbourg.

- Eltner, A., Elias, M., Sardemann, H., & Spieler, D. (2018). Automatic Image-Based Water Stage Measurement for Long-Term Observations in Ungauged Catchments. *Water Resources Research*.
- Ferreiea, E., Chandler, J., Wackrow, R., & Shiono, K. (2017). Automated extraction of free surface topography using SfM-MVS photogrammetry. *Flow Measurement and Instrumentation*, 243-249.
- Franzini, F., & Soares-Frazão, S. (2016). Measurement of the free-surface elevation in a steady flow in complex topography using photogrammetry. *River Flow*.
- Fujita, I., & Aya, S. (2000). Refinement of LSPIV technique for monitoring river surface flows, paper presented at Water Resources Joint Conference on Water Resource Engineering and Water Resources Planning and Management.
- Fujita, I., & Hino, T. (2003). Unseeded and Seeded PIV Measurements of River Flows Videotaped from a Helicopter. *Journal of Visualization*, Vol. 6, No. 3, 245-252.
- Fujita, I., & Kunita, Y. (2011). Application of aerial LSPIV to the 2002 flood of the Yodo River using a helicopter mounted high density video camera. *Journal of Hydro-environment Research* 5, 323-331.
- Fujita, I., Muste, M., & Kruger, A. (1997). Large-scale particle image velocimetry for flow analysis in hydraulic engineering applications. *Journal of Hydraulic Research*, 36, 397-414.
- Fujita, I., Notoya, Y., & Furuta, T. (2018). MEASUREMENT OF INUNDATING FLOW FROM A BROKEN ENBANKMENT BY USING VIDEO IMAGES SHOOT FROM A MEDIA HELICOPTER.
- Han, B., & Endreny, T. (2014). River Surface Water Topography Mapping at Sub-Millimeter Resolution and Precision With Close Range Photogrammetry: Laboratory Scale Application. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing* 7, 602-608.
- Hansen, I., Warriar, R., Satzfer, C., & Sattler, M. (2017). An Innovative Image Processing Method for Flow Measurement in Open Channels and Rivers.
- Harpold, A., & Mostaghimi, S. (2004). Stream Discharge Measurement Using A Large-Scale Particle Image Velocimetry Prototype.
- Hauet, A. (2006). Estimation de débit et mesure de vitesse en rivière par Large-Scale Particle Image Velocimetry.
- Hauet, A., Jodeau, M., Le Coz, J., Marchand, B., Moran, A., Le Boursicaud, R., & Dramais, G. (2014). Application de la méthode LSPIV pour la mesure de champs de vitesse et de débits de crue sur modèle réduit et en rivière. *La Houille Blanche*, 16-22.
- Hauet, A., Le Coz, J., Dramais, G., Carre, C., Legras, D., Pierrefeu, G., & Godayer, C. (2009). Méthodes innovantes pour la mesure des débits fluviaux en continu : profileur Doppler fixe horizontal (H-aDcp) et analyse d'images (LSPIV). *LA HOUILLE BLANCHE/N° 3*.
- Hauet, A., Le Coz, J., Dramais, G., Carre, C., Legras, D., Pierrefeu, G., & Godayer, C. (2009). Méthodes innovantes pour la mesure des débits fluviaux en continu : profileur Doppler fixe horizontal (H-aDcp) et analyse d'images (LSPIV). *La Houille Blanche*.
- Hauet, A., Morlot, T., & Daubagnan, L. (2018). Velocity profile and depth-averaged to surface velocity in natural streams: A review over a large sample of rivers. *River Flow 2018*.
- Hellebaut, F.-X. (2018). Mesure du niveau d'eau par photogrammétrie à partir d'un drone. *Master thesis*, Université Catholique de Louvain.
- Herschy, R. W. (2009). Streamflow Measurement.
- IGN. (2020). <http://logiciels.ign.fr/?Micmac>, Consulté le 09 avril 2020.
- Jodeau, M., Hauet, A., Le Coz, J., Faure, J., & Bodart, G. (2020). Manuel d'utilisation du logiciel Fudaa-LSPIV Version 1.7.3. *EDF-INRAE*.
- Jodeau, M., Hauet, A., Paquier, J., Le Coz, J., & Dramais, G. (2007). Application and evaluation of LS-PIV technique for the monitoring of river surface velocities in high flow conditions. *Flow Measurement and Instrumentation*.
- Kalantari, M., & Kasser, M. (2008). Photogrammétrie et vision par ordinateur.

- Kim, Y. (2006). Uncertainty analysis for non-intrusive measurement of river discharge using image velocimetry.
- Kim, Y., Muste, M., Hauet, A., Krajewski, W. F., Kruger, A., & Bradley, A. (2008). Stream discharge using mobile large-scale particle image velocimetry: A proof of concept. *WATER RESOURCES RESEARCH*, VOL. 44.
- Kuok, K., & Chan, C. (2017). Application of Particle Image Velocimetry (PIV) for Measuring Water Velocity in Laboratory Sedimentation Tank.
- Larrarte, F., Joannis, C., Mignot, E., Rivière, N., & Kouyi, G. (2016). Fiabiliser les mesures de vitesse - Représentativité spatiale des mesures en continu de vitesse et incertitudes sur les mesures de débit.
- Le Boursicaud, R., Pénard, L., Hauet, A., Thollet, F., & Le Coz, J. (2015). Gauging extreme floods on YouTube: application of LSPIV to home movies for the post-event determination of stream discharges: Application of LSPIV to Flood Home Movies. *Hydrological Processes* 30.
- Le Coz, J., Hauet, A., Pierregeu, G., Dramais, G., & Camenen, B. (2010). Performance of image-based velocimetry (LSPIV) applied to flash-flood discharge measurements in Mediterranean rivers. *Journal of Hydrology*, 42-52.
- Le Coz, J., Jodeau, M., Hauet, A., Marchand, B., & Le Boursicaud, R. (2014). Image-based velocity and discharge measurements in field and laboratory river engineering studies using the free FUDAA-LSPIV software.
- Legout, C., Darboux, F., Nédélec, Y., Hauet, A., Esteves, M., Renaux, B., . . . Cordier, S. (2012). High spatial resolution mapping of surface velocities and depths for shallow overland flow.
- Lewis, Q., Lindroth, E., & Rhoads, B. (2018). Integrating Unmanned Aerial Systems and LSPIV for Rapid, Cost-effective Stream Gauging. *Journal of Hydrology*.
- Lin, F., Chang, W., Lee, L., Hsiao, H., Tsai, W., & Lai, J. (2013). Applications of Image Recognition for Real-Time Water Level and Surface Velocity. *IEEE International Symposium on Multimedia*.
- Lüthi, B., Philippe, T., & Peña-Haro, S. (2014). Mobile device app for small open-channel flow measurement.
- Manfreda, S., Dvořák, P., Müllerová, J., & Herban, S. (2019). Assessing the Accuracy of Digital Surface Models Derived from Optical Imagery Acquired with Unmanned Aerial Systems.
- Messelhe, E., Peeva, T., & Muste, M. (2004). Large Scale Particle Image Velocimetry for Low Velocity and Shallow Water Flows. *Journal of Hydraulic Engineering* 130.
- Muste, M., Eterna, R., & Fujita, I. (2000). Image-based technique for monitoring ice motion in laboratory and field conditions.
- Muste, M., Fujita, I., & Hauet, A. (2008). Large-scale particle image velocimetry for measurements in riverine environments. *WATER RESOURCES RESEARCH*, VOL. 44.
- Muste, M., Xiong, Z., Schöne, J., & Li, Z. (2004). Validation and Extension of Image Velocimetry Capabilities for Flow Diagnostics in Hydraulic Modeling.
- Naresh, A., & Naik, M. (2016). EXPERIMENTAL STUDY ON SURFACE FLOW MEASUREMENT USING LARGE SCALE PARTICLE IMAGE VELOCIMETRY TECHNIQUES.
- Nguyen, L. S., Schaeli, B., Sage, D., Kayal, S., Jeanbourquin, D., Barry, D., & Rossi, L. (2009). Vision-based system for the control and measurement of wastewater flow rate in sewer systems. *Water Science & Technology* 60.
- Pearce, S., Ljubičić, R., & Peña-Haro, S. (2020). An Evaluation of Image Velocimetry Techniques under Low Flow Conditions and High Seeding Densities Using Unmanned Aerial Systems.
- Polatel, C. (2005). Indexing by free surface velocity - a prospect for remote discharge estimation.
- Raffel, M., Willert, C., Scarano, F., Kähler, C., Wereley, S., & Kompenhans, J. (2018). *Particle Image Velocimetry*. Springer International Publishing AG.
- Rantz, S. (1982). *Measurement and Computation of Streamflow*. U.S. G.P.O.
- Remondino, F., Del Pizzo, S., Kersten, T. P., & Troisi, S. (2012). Low-Cost and Open-Source Solutions for Automated Image Orientation – A Critical Overview. *Lecture Notes in Computer Science (LNCS)*, Vol. 7616.

- Schenk, T. (2005). Introduction to Photogrammetry. *The Ohio State University, Colombus*.
- Shervais, K. (2016). Structure from Motion (SfM) Photogrammetry Field Methods Manual for Students.
- Smith, J. C., Bérubé, F., & Bergeron, N. E. (2005). A field application of particle image velocimetry (PIV) for the measurement of surface flow velocities in aquatic habitat studies.
- Soares-Frazão, S. (2017). Cours d'hydraulique fluviale - LGCIV2053. Université Catholique de Louvain.
- Stephan, U., & Gutknecht, D. (2002). Hydraulic resistance of submerged flexible vegetation. *Journal of Hydrology* 269, 27-43.
- Strelnikova, D., Paulus, G., Käfer, & Anders, K.-H. (2020). Drone-Based Optical Measurements of Heterogeneous Surface Velocity Fields around Fish Passages at Hydropower Dams. *Remote Sensing* 12.
- Sutarto, T. (2015). Application of Large Scale Particle Image Velocimetry (LSPIV) to Identify Flow Pattern in a Channel.
- Tauro, F., Pagano, C., Phamduy, P., Grimaldi, S., & Porfiri, M. (2015). Large-Scale Particle Image Velocimetry From an Unmanned Aerial Vehicle.
- Tauro, F., Petroselli, A., & Arcangeletti, E. (s.d.). Assessment of drone-based surface flow observations.
- Tauro, F., Petroselli, A., & Grimaldi, S. (2018). Optical sensing for stream flow observations: a review.
- Tauro, F., Porfiri, M., & Grimaldi, S. (2014). Orienting the camera and firing lasers to enhance large-scale particle image velocimetry for streamflow monitoring.
- Theule, J., Crema, S., Marchi, L., Cavali, M., & Comiti, F. (2018). Exploiting LSPIV to assess debris flow velocities in the field.
- Thielicke, W., & Stamhuis, E. J. (2014). PIVlab - Time-Resolved Digital Particle Image Velocimetry Tool for MATLAB.
- Tsubaki, R., Fujitz, I., & Tsutsumi, S. (2011). Measurement of the flood discharge of a small-sized river using an existing digital video recording system. *Journal of Hydro-environment Research* 5, 313-321.
- UCLouvain. (2020). <https://sites.uclouvain.be/didacticiel-hydraulique>. Consulté le 30 mars 2020.
- Welber, M., Le Coz, J., Laronne, J., Zolezzi, G., Zamier, D., Dramais, G., . . . Salvaro, M. (2018). Field assessment of noncontact stream gauging using portable surface velocity radars (SVR).
- Westoby, M., Brasington, J., Glasser, N., Hambrey, M., & Reynolds, J. (2012). 'Structure-from-Motion' photogrammetry: A low-cost, effective tool for geoscience applications. *Geomorphology*.
- Wu, C. (2012). Development and application of an automated river-estuary discharge imaging system. *Journal of Hydraulic Engineering*.
- Yeh, M.-T., Chung, Y.-N., & Huang, Y.-X. (2017). Applying adaptive LS-PIV with dynamically adjusting detection region approach on the surface velocity measurement of river flow.

ANNEXES

1. Appareils utilisés

1.1. GOPRO Hero 6

Les vidéos pour la détermination des traceurs, et les photos pour la modélisation des berges ont été prises grâce à la GoPro Hero 6 (voir Figure 1-1). Cette caméra a une résolution de 12MPx pour les photos et de 4K pour les vidéos. Cependant une telle résolution vidéo n'est pas nécessaire dans le cadre de notre méthode.



FIGURE 1-1 – GOPRO HERO 6

1.2. LEICA1200

La prise des coordonnées des marqueurs ainsi que la bathymétrie peuvent être réalisées par le GPS Leica1200 (Voir Figure 1-2). Celui-ci obtient les coordonnées des points calculés dans le système de coordonnées Lambert72 qui est le système de géoréférencement en Belgique.

Le GPS Leica1200 est connecté au réseau WALCORS qui offre une correction RTK afin d'augmenter la précision de l'ordre du centimètre. Les erreurs lors de prises de mesures varient fortement à cause de la végétation (Asselberghs et Peeters, 2019).



FIGURE 1-2 – LEICA1200

1.3. OTT MFPro

Le courantomètre à induction magnétique OTT MFPro est destiné aux mesures de débit de 0 à 6 m³/s (Voir Figure 1-3). Il convient parfaitement à des vitesses d'écoulement réduites ou un taux élevé de particules en suspension.



FIGURE 1-3 – MFPRO

Sa précision est de +/- 2% de la valeur calculée, pour les vitesses de 0 à 3 m/s l'erreur est de +/- 0,015 m/s et cette imprécision ne diminue pas sur les débits de 3 à 5 m/s mais le pourcentage d'erreurs diminue donc mathématiquement parlant (Asselberghs et Peeters, 2019).

2. Création d'un DEM avec Agisoft-PhotoScan

Cette section présente la démarche à suivre afin de construire un DEM sur Agisoft-PhotoScan. Elle se base en grande partie sur l'annexe C du travail de Asselberghs et Peeters (2019).

La démarche à suivre est présentée ci-dessous :

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

Pour terminer, il faut exporter le DEM du modèle trois dimensions dans un format lisible par Matlab. Il faut spécifier deux choses lors de l'exportation du DEM :

- les limites d'abscisses et d'ordonnées du DEM exporté ;
- la largeur et la longueur de chaque pixel.

3. Création d'un DEM avec MicMac

Cette section présente la démarche à suivre afin de construire un DEM sur MicMac.

Nous expliquons la méthodologie à suivre sur un ordinateur Windows. Le *workflow* sera semblable sur un système d'exploitation Linux.

Avant de réaliser toute commande MicMac, il faut créer un dossier dans lequel on ajoute les photos, en format JPG, ainsi qu'un fichier xml, appelé « *GCP.xml* ». Par simplicité, il suffit de copier-coller un fichier « *GCP.xml* » d'un autre dossier MicMac afin d'en garder la structure (voir Figure 3-1).

```
<?xml version="1.0"?>
- <DicoAppuisFlottant>
  - <OneAppuisDAF>
    <Pt>0 0 40.0043</Pt>
    <NamePt>target1</NamePt>
    <Incertitude>1 1 1</Incertitude>
  </OneAppuisDAF>
  - <OneAppuisDAF>
    <Pt>0 0.517346 40.032</Pt>
    <NamePt>target2</NamePt>
    <Incertitude>1 1 1</Incertitude>
  </OneAppuisDAF>
  - <OneAppuisDAF>
    <Pt>0.412363 0.565864 39.8561</Pt>
    <NamePt>target3</NamePt>
    <Incertitude>1 1 1</Incertitude>
  </OneAppuisDAF>
  - <OneAppuisDAF>
    <Pt>0.41658 0.085728 39.8018</Pt>
    <NamePt>target4</NamePt>
    <Incertitude>1 1 1</Incertitude>
  </OneAppuisDAF>
</DicoAppuisFlottant>
```

FIGURE 3-1 – STRUCTURE GCP.XML

Il faut ensuite remplacer les coordonnées des différentes *targets* par les coordonnées de nos différents GCP's, dans un repère local cartésien. S'il y a plus ou moins de GCP's, il faut supprimer ou ajouter des *targets*. Il faut au minimum trois *targets* pour que le logiciel MicMac sache orienter le modèle.

Une fois cette étape réalisée, il faut ouvrir un terminal et se placer dans le dossier nouvellement créé à l'aide de la commande « *cd* ». Afin de suivre le *workflow* présenté à la Figure 5-1, il faut réaliser les différentes commandes, à savoir :

- mm3d Tapioca All ".*JPG" 3000

Afin de réaliser la recherche des *tie-points* sur l'ensemble de l'image.

- mm3d Tapas FishEyeBasic ".*JPG" Out=MEP ou mm3d Tapas Fraser ".*JPG" Out=MEP

Afin d'orienter les appareils photos. La première option est utilisée lorsqu'on a des photos réalisées à l'aide de GOPRO, la deuxième lorsqu'elles sont réalisées avec un appareil photo classique.

- mm3d AperiCloud ".*JPG" MEP

Afin de créer un nuage de points ;

- mm3d SaisieAppuisInitQT ".*JPG" MEP target1 Mesure.xml

Afin d'indiquer le GCP « target1 » sur toutes les images ;

- mm3d SaisieAppuisInitQT ".*.JPG" MEP target2 Mesure.xml
Afin d'indiquer le GCP « target2 » sur toutes les images ;
- mm3d SaisieAppuisInitQT ".*.JPG" MEP target3 Mesure.xml
Afin d'indiquer le GCP « target3 » sur toutes les images ;
- mm3d SaisieAppuisInitQT ".*.JPG" MEP target4 Mesure.xml
Afin d'indiquer le GCP « target4 » sur toutes les images ;
- mm3d GCPBascule ".*.JPG" MEP MEP-Basc GCP.xml Mesure-S2D.xml
Afin d'orienter le modèle dans les nouvelles coordonnées ;
- mm3d Campari ".*.JPG" MEP-Basc MEP-Terrain GCP=[GCP.xml,0.02,Mesure-S2D.xml,0.5]
Afin d'ajuster la position des caméras ;
- mm3d AperiCloud ".*.JPG" MEP-Terrain
Afin de créer un nuage de points orienté avec les GCP's ;
- mm3d SaisieMasqQT AperiCloud_MEP-Terrain.ply
Afin de sélectionner un masque pour définir la zone d'intérêt ;
- mm3d C3DC MicMac ".*.JPG" MEP-Terrain Masq3D=AperiCloud_MEP-Terrain.ply
Out=C3DC_MicMac_Train.ply
Afin de construire un nuage de points dense ;
- mm3d Pims2MNT MicMac
Afin de construire un DEM. Le DEM nouvellement créé se trouve alors dans le dossier PIMs-TmpBasc et se nomme PIMs-Merged_Prof .tif.

4. Utilisation de PIVlab

Dans cette annexe, nous présentons la démarche que nous avons suivie lors de l'utilisation du logiciel PIVlab. Cette démarche se base sur celle qui a été présentée dans le travail Bia et Somers (2018).

Ce logiciel open source est disponible à l'adresse (consultée le 11/06/2020) :

<https://nl.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/27659-pivlab-particle-image-velocimetry-piv-tool>

Lorsque le téléchargement du dossier compressé est terminé, il suffit de décompresser ce dossier et d'exécuter le fichier *PIVlab_GUI.m* dans Matlab pour démarrer le logiciel.

La version utilisée pour la réalisation de ce mémoire est la version 2.31.

4.1. Première étape – L'importation d'images

Pour importer des images qui seront analysées dans le logiciel, il suffit de suivre les étapes une à quatre sur la Figure 4-1. Il faut préalablement découper la vidéo de l'écoulement si cela n'a pas encore été fait car on ne sait importer que des images dans ce logiciel.

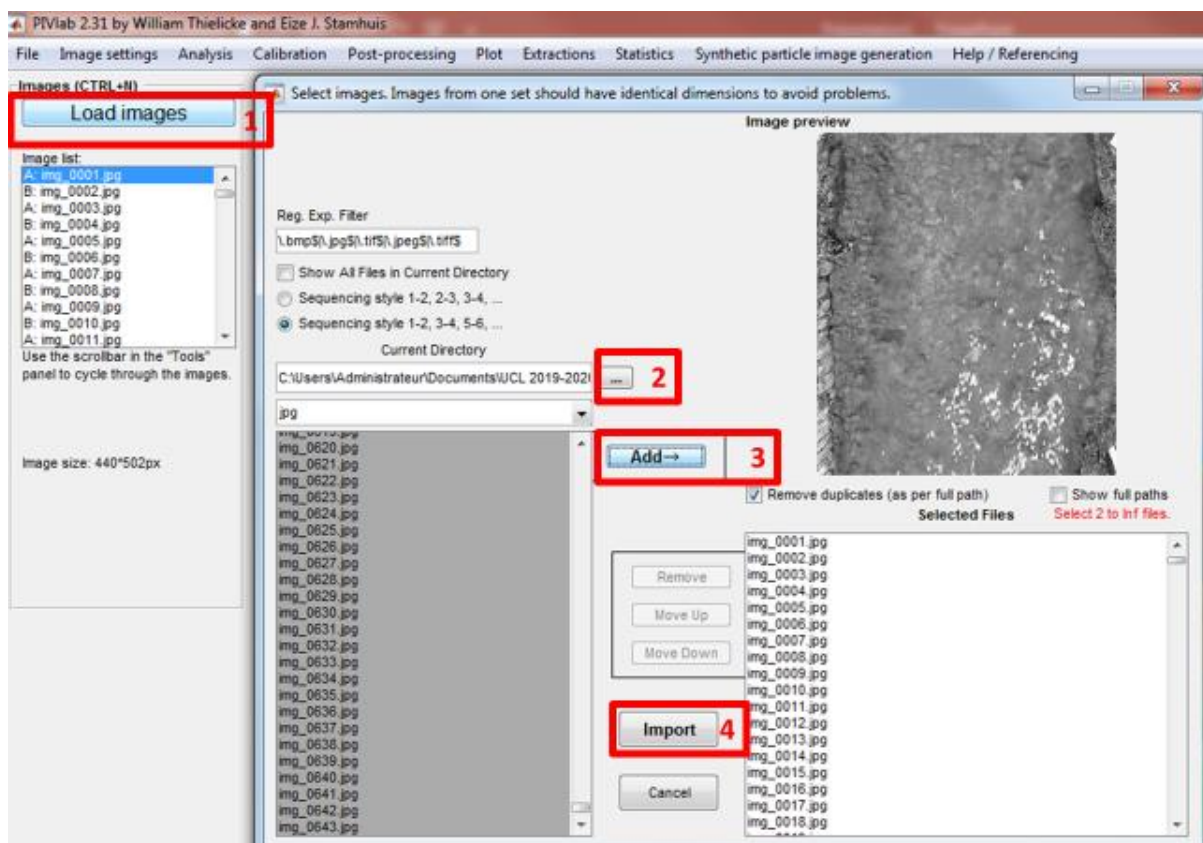


FIGURE 4-1 - IMPORTATION D'IMAGES DANS PIVLAB

4.2. Deuxième étape – Paramètres des images et d’analyse

4.2.1. Définition de la région d’intérêt (ROI) et des masques

C’est ici qu’on va définir la zone de l’image qui va être étudiée (la *ROI*) et, dans celle-ci, les éléments particuliers qui ne devront pas être analysés (les masques : par exemple un rocher au centre du cours d’eau ou la berge).

Pour accéder à la fenêtre illustrée à la Figure 4-2, il faut cliquer sur « *Image settings -> Exclusions (Roi, mask)* » ou utiliser le raccourci « *Ctrl+E* ». Sur cette figure, le point 1 permet de définir la *ROI* et le point 2 le(s) masque(s).

Si le(s) masque(s) qui sont créé(s) doivent être appliqué(s) à toutes les images, il faudra finalement cliquer sur « *Apply current mask(s) to frame* » en laissant le paramètre *1:end* juste en-dessous.

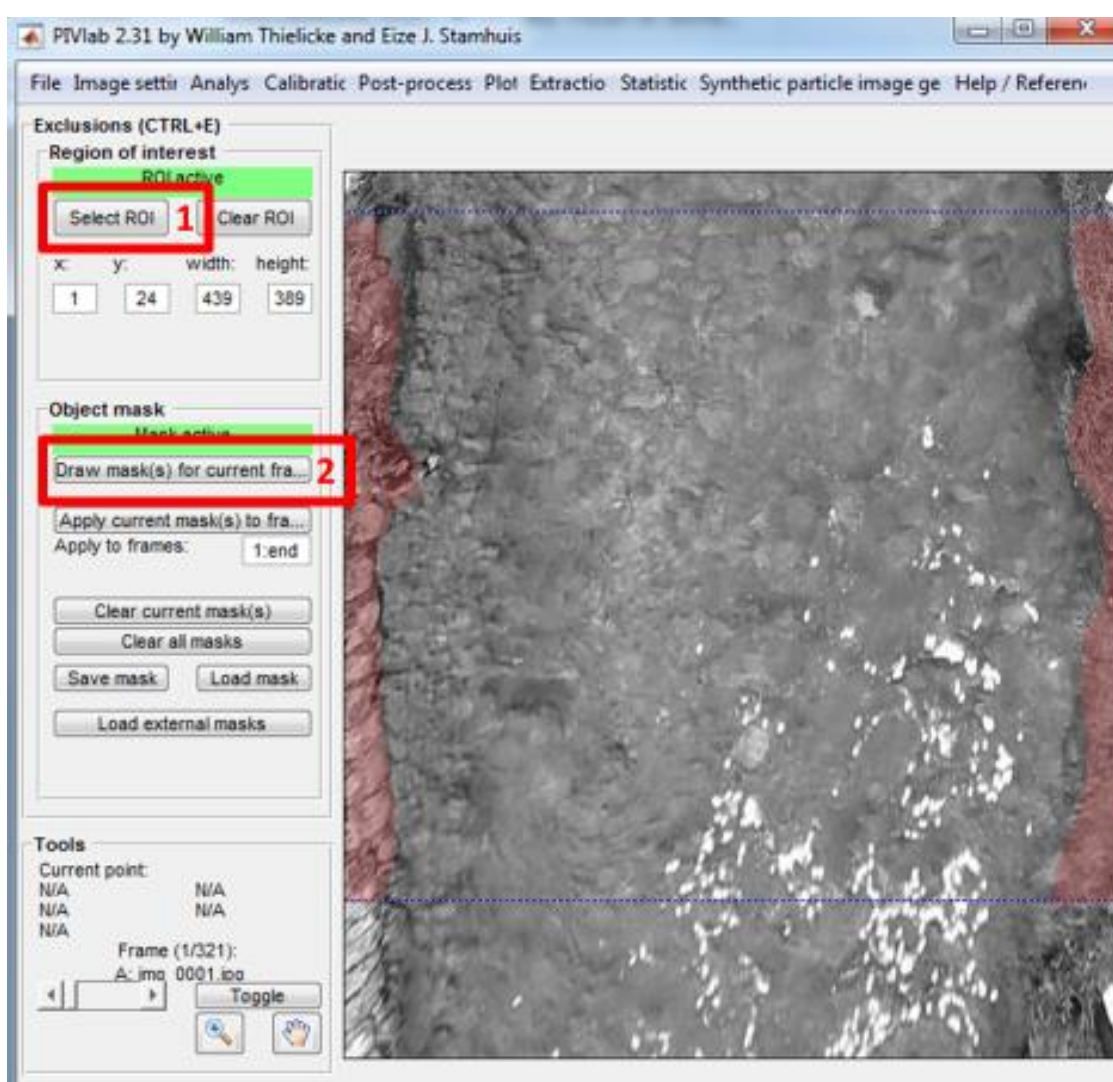


FIGURE 4-2 - SÉLECTIONNER LA ROI ET APPLIQUER DES MASQUES SUR PIVLAB

4.2.2. Le prétraitement des images et la paramétrisation de la PIV

Dans cette partie, il va être possible d'appliquer différents filtres aux images qui, en fonction des conditions d'illuminations sur site, vont permettre d'augmenter le contraste entre les traceurs et la surface de l'eau. Le fonctionnement et le résultat de chaque filtre est décrit dans le travail de Bia et Somers (2018). Pour arriver à cette partie illustrée à la Figure 4-3, il faut cliquer sur « *Image settings* » > *Image pre-processing* » ou utiliser le raccourci « *Ctrl+I* ».

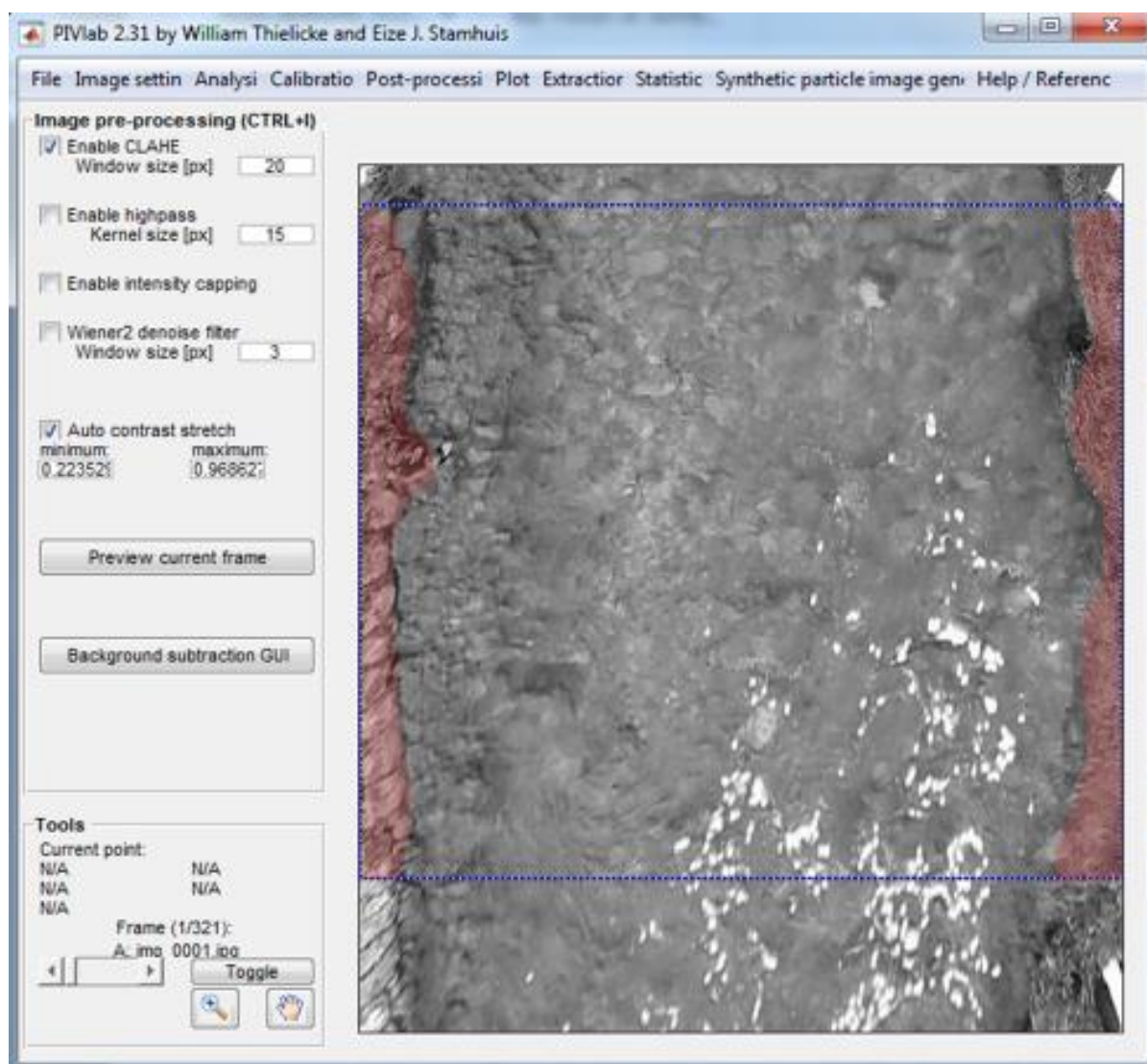


FIGURE 4-3 - APPLIQUER DES FILTRES SUR LES IMAGES IMPORTÉES DANS PIVLAB

Finalement, pour accéder aux paramètres de la PIV il faut cliquer sur « *Analysis* -> *PIV settings* » ou utiliser le raccourci « *Ctrl+S* ». Nous avons utilisé les paramètres par défaut de PIVlab lors de nos différentes analyses.

4.3. Troisième étape – La calibration

La dernière opération à réaliser avant de pouvoir lancer l'analyse PIV sur les images est la calibration. Il faut donc cliquer sur « *Calibration* -> *Calibrate using current or external image* » et suivre les opérations présentées à la Figure 4-4.

La distance à tracer sur la photo est une distance dont on connaît la valeur réelle (en mm) et il faut aussi connaître le pas de temps qui sépare deux photos (en ms). Une fois que la calibration est appliquée, il ne reste plus qu'à lancer l'analyse PIV en cliquant sur « *Analysis-> ANALYZE !* » ou en utilisant le raccourci « *Ctrl+A* ».

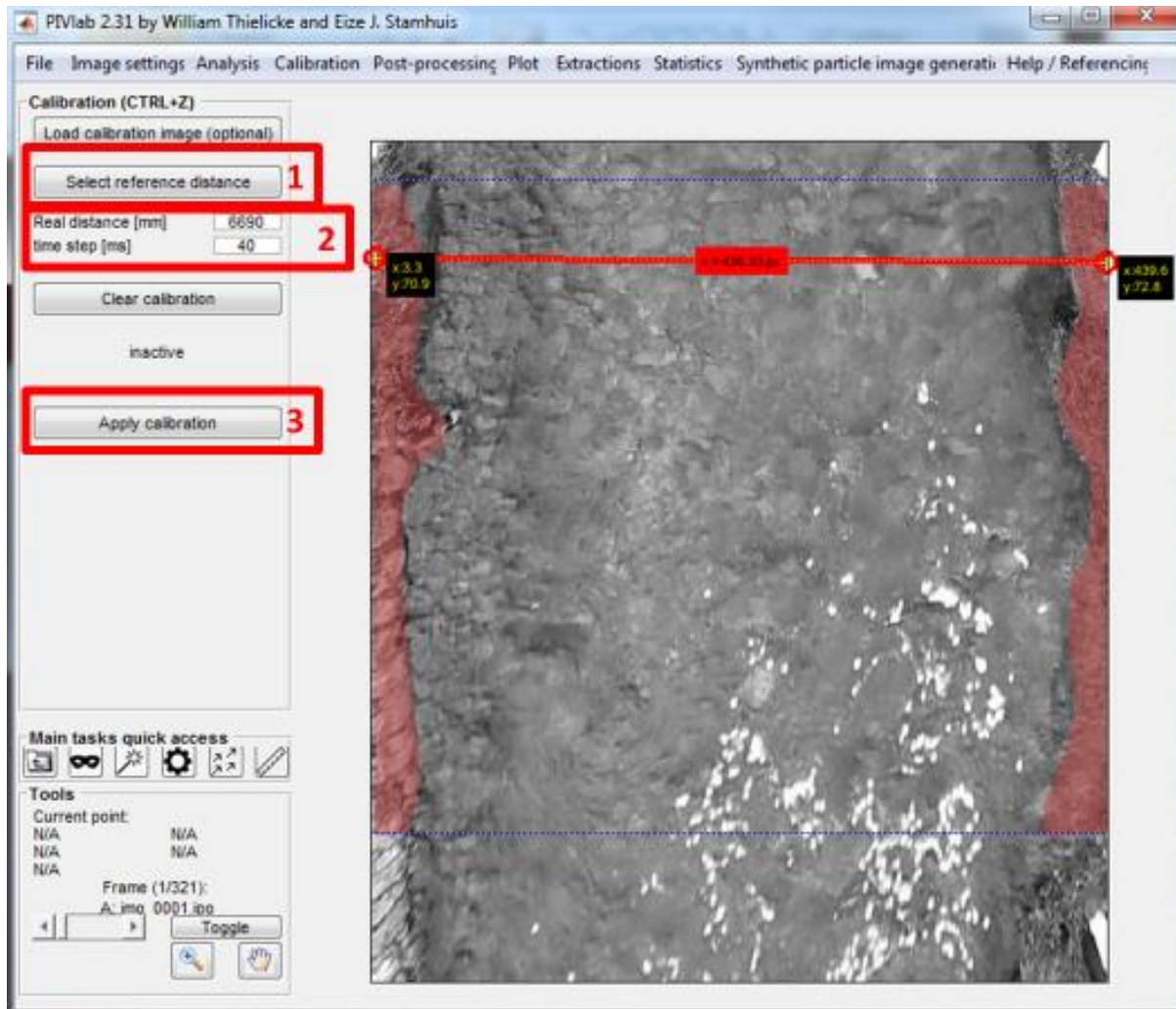


FIGURE 4-4 - AJOUTER UNE CALIBRATION DANS PIVLAB

4.4. Quatrième étape – La validation des vecteurs vitesses

Une fois que l'analyse PIV est terminée, un résultat brut des vecteurs vitesses est disponible. Ce résultat est illustré à la Figure 4-5. Pour accéder à ce résultat il faut cliquer sur « *Post-processing -> Vector validation* » ou utiliser le raccourci « *Ctrl+V* ». A partir de ce panneau, il est possible d'appliquer quatre corrections différentes au résultat initial :

1. on peut sélectionner une zone de vitesse (dans les deux directions) sur un nuage de points qui reprend l'ensemble des vitesses calculées. Dans l'idéal, il faut choisir la zone où la concentration est la plus forte tout en restant cohérent quant aux valeurs des vitesses ;
2. on peut supprimer les vecteurs dont les composantes verticales et horizontales sont trop éloignées de leur moyenne ;
3. on peut supprimer les vecteurs dont l'amplitude est trop éloignée de la médiane des amplitudes des vecteurs voisins ;
4. on peut finalement supprimer, un par un et manuellement, des vecteurs qui semblent encore incohérents malgré l'application des trois opérations citées ci-dessus.

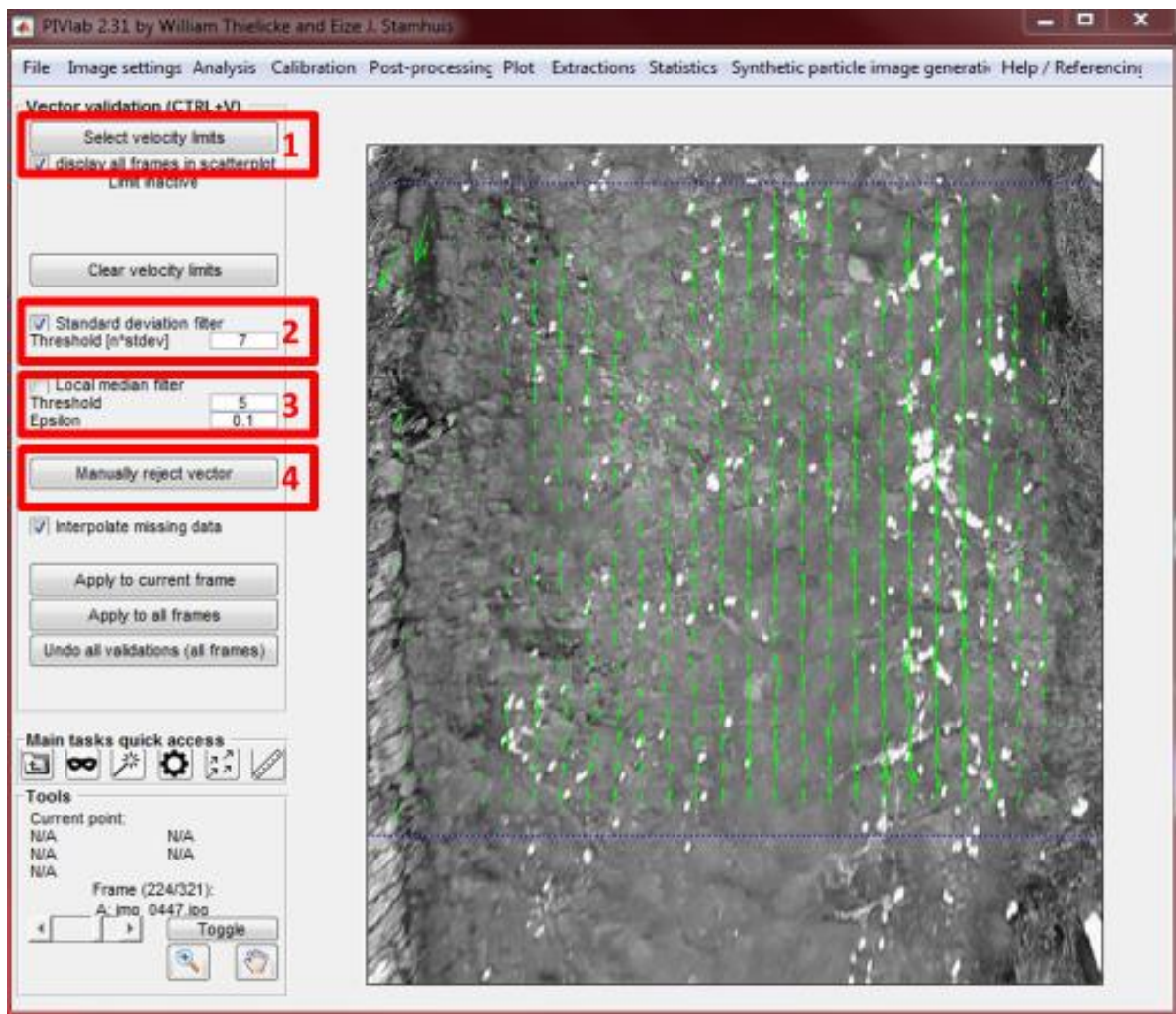


FIGURE 4-5 – RÉALISER L'ÉTAPE DE VALIDATION DES VECTEURS VITESSES DANS PIVLAB

Pour vérifier le résultat de l'un ou l'autre traitement, il faut cliquer sur « *Apply to current frame* ». Il faudra finalement cliquer sur « *Apply to all frames* » pour que le résultat soit appliqué à l'ensemble des paires d'images.

4.5. Cinquième étape – Calcul de la vitesse moyenne

Après avoir calculé l'ensemble des vecteurs vitesses pour un ensemble d'images, il faut en déduire une vitesse moyenne. Pour ce faire il suffit de cliquer sur « *Plot -> Derive parameters / modify data -> Calc. mean* » ou utiliser le raccourci « *Ctrl+D* » et cliquer sur le bouton « *Calc. mean* » qui est sur la nouvelle fenêtre.

4.6. Sixième étape –Exportation des résultats

Une fois que la moyenne a été calculée, il est possible d'exporter les résultats finaux. Pour ce faire, il faut accéder au dernier panneau que nous utilisons dans le cadre de ce mémoire et qui est accessible via « *Extractions -> Parameters from poly-line* » ou en utilisant le raccourci « *Ctrl+P* ».

Pour afficher des résultats, il suffit ensuite de réaliser les opérations suivantes :

1. cliquer sur « *Draw !* » :
2. tracer la ligne (et quand elle est tracée, réaliser un clic droit sur l'image pour indiquer que le traçage est terminé) ;
3. sélectionner « *Velocity magnitude [m/s]* » (ou un autre paramètre de votre choix) dans le menu déroulant ;
4. cliquer sur « *Plot data* ».

Le résultat de ces opérations est illustré à la Figure 4-6.

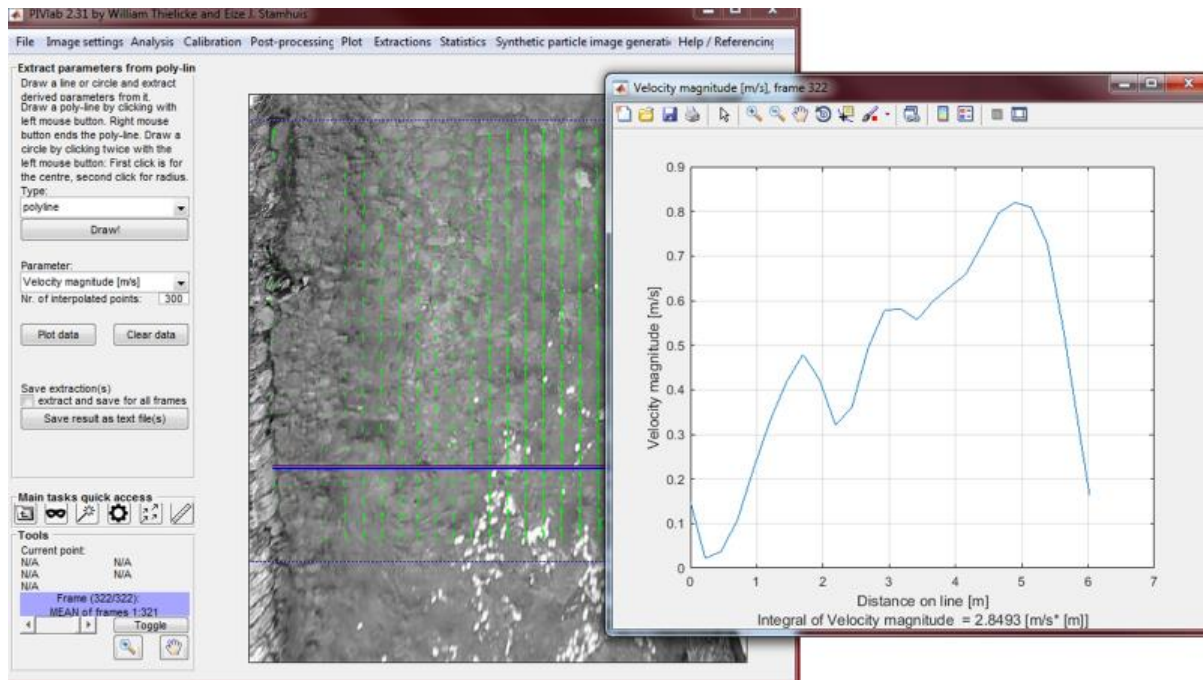


FIGURE 4-6 – RÉSULTAT FINAL D'UNE APPLICATION PIV AVEC PIVLAB

Pour finalement exporter les résultats calculés par PIVlab, il faut utiliser le bouton « *Save result as text file(s)* ». Un document texte (.txt) sera exporté dans le répertoire courant.

5. Manuel de l'utilisateur pour l'interface liée à la détection du niveau d'eau

5.1. Démarrer le programme

Pour lancer l'interface qui permettra d'exécuter une des méthodes de détection du niveau d'eau sur un modèle 3D, il suffit d'exécuter le script *Gui_line_detection.m* dans Matlab. Il faut néanmoins s'assurer que les fichiers suivants soient dans le même dossier que ce script :

- *GUI_line_detection.fig*
- *DEM_WSD_Forward_Diff.m*
- *DEM_WSD_Central_Diff.m*
- *DEM_WSD_AS_INT1.m*
- *DEM_WSD_AS_INT2.m*
- *DEM_WSD_MS_INT1.m*
- *DEM_WSD_MS_INT2.m*
- *verif_parameters.m*
- *ok_icon.png*

Tous ces fichiers sont utilisés lors de l'exécution du programme. Si un fichier est manquant, des erreurs se produiront et l'interface ne fonctionnera pas correctement. Dans la suite de cette annexe, le dossier où se trouve l'ensemble de ces fichiers sera appelé le dossier courant.

5.2. Importer un modèle 3D à analyser

Une fois que l'interface est lancée, une fenêtre s'ouvre et le premier panneau s'affiche directement comme illustré à la Figure 5-1. Ce premier panneau est celui avec lequel on introduit un modèle 3D dans le programme.



FIGURE 5-1 - IMPORTER UN MODÈLE 3D DANS LE PROGRAMME DE DÉTECTION DE LIGNE D'EAU

Le chemin pour accéder au modèle 3D doit être introduit dans la partie prévue à cet effet. Il existe deux types de chemins :

- *Nom_du_modele3D.tif* si le DEM se trouve dans le dossier courant
- *C:\Users\Administrateur\...\Nom_du_modèle3D.tif* si le DEM n'est pas dans le dossier courant

Une fois qu'un chemin est introduit, il faut cliquer sur le bouton « Vérifier ».

Si le chemin est correct, la bannière du panneau devient verte et la suite de l'interface est dévoilée à l'utilisateur. Si le chemin d'accès est incorrect ou que le fichier que l'on tente d'ouvrir n'est pas un fichier qui peut être traité (donc une extension différente de *.tif*), il est indiqué à l'utilisateur qu'il y a une erreur. Tant qu'un chemin valide n'est pas introduit, le reste de l'interface ne s'affiche pas.

5.3. Traitement du modèle 3D avant son analyse

Une fois qu'un chemin vers un modèle 3D valide est entré dans l'interface, le deuxième panneau s'affiche. Via ce panneau, il est possible de traiter le DEM avant d'y appliquer un algorithme de détection. Ce panneau est illustré à la Figure 5-2.

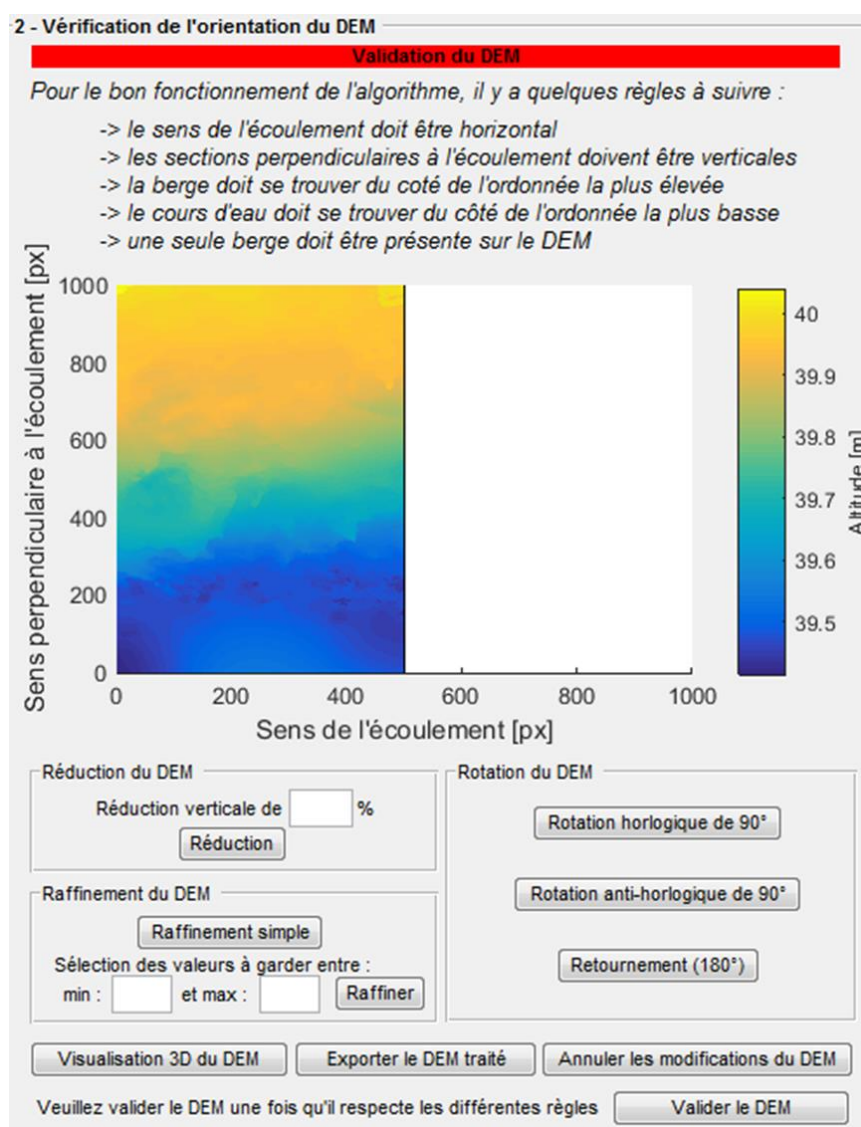


FIGURE 5-2 - TRAITEMENT ET ORIENTATION DU MODÈLE 3D

Ce panneau peut se décomposer en plusieurs parties. Tout d'abord, celle qui rappelle les différentes spécifications que doit respecter le DEM et qui indique que le modèle 3D n'a pas encore été vérifié (bannière en rouge).

La deuxième partie illustre le DEM en deux dimensions et permet à l'utilisateur de visualiser directement le modèle importé ainsi que les modifications apportées.

La troisième et dernière partie est composée de différents boutons, qui permettent de traiter et d'orienter le modèle 3D. Les boutons sont les suivants :

- « *Réduction* » : après avoir préalablement entré une valeur comprise entre 1 et 99 dans l'espace prévu à cet effet, ce bouton va retirer x % en bas du DEM. Si on veut réduire un autre côté du DEM il suffit de le faire tourner (avec les boutons prévus à cet effet) et d'appliquer une nouvelle réduction.
- « *Raffinement simple* » : lors de la construction des modèles 3D, les logiciels de photogrammétrie mettent une altitude nulle ou négative aux points qu'ils n'ont pas modélisés. A cause de ces points, il est parfois impossible de visualiser les DEM's. Le raffinement simple va changer ces valeurs nulles ou négatives en *NaN* afin qu'elles ne soient plus illustrées sur la partie centrale du panneau.
- « *Raffiner* » : après avoir préalablement entré des valeurs pour le *min* et le *max*, ce bouton va réduire les altitudes de l'ensemble du modèle 3D pour qu'elles soient toutes comprises dans l'intervalle [*min* ; *max*].
- « *Rotation horlogique de 90°* », « *Rotation anti-horlogique de 90°* » et « *Retournement (180°)* » : sont trois boutons qui permettent de faire tourner le modèle 3D.
- « *Visualisation 3D du DEM* » : va ouvrir une nouvelle figure avec le DEM illustré en trois dimensions.
- « *Exporter le DEM traité* » : va enregistrer le DEM qui a été modifié via cette interface. Une fois qu'un clic est réalisé sur ce bouton, une fenêtre dans laquelle on peut introduire un nom pour le DEM qui sera exporté va s'ouvrir. Par défaut, le nom « *nom_initial_du_DEM_traité.tif* » est proposé.
- « *Annuler les modifications du DEM* » : va annuler toutes les modifications qui ont été apportées au modèle 3D.
- « *Valider le DEM* » : est le bouton qu'il faut utiliser que lorsqu'on est certain que le modèle 3D respecte bien les spécifications imposées. Il n'est pas possible de vérifier automatiquement que l'orientation du DEM est correcte et qu'il est bien traité. Cette tâche est donc sous la responsabilité de l'utilisateur.

Une fois que le dernier bouton de cette liste est utilisé, une dernière fenêtre s'ouvre pour s'assurer définitivement que l'utilisateur respecte bien les spécifications. Nous insistons sur cette étape car une fois validé, le DEM ne sera plus modifiable (pour éviter que des erreurs ne se produisent dans la suite de l'utilisation du programme).

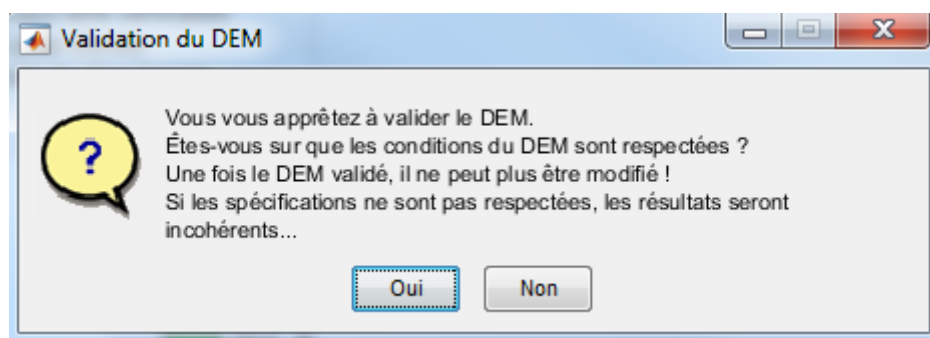


FIGURE 5-3 - DERNIÈRE ALERTE POUR S'ASSURER QUE LES SPÉCIFICATIONS SUR LE DEM SOIENT RESPECTÉES

Une fois que l'utilisateur a validé le DEM (en cliquant sur « *Oui* » de la nouvelle fenêtre illustrée à la Figure 5-3), la bannière du panneau devient verte et toute la partie permettant de modifier le modèle 3D disparaît. Il reste néanmoins possible d'exporter et de visualiser en 3D le DEM comme illustré à la Figure 5-4.

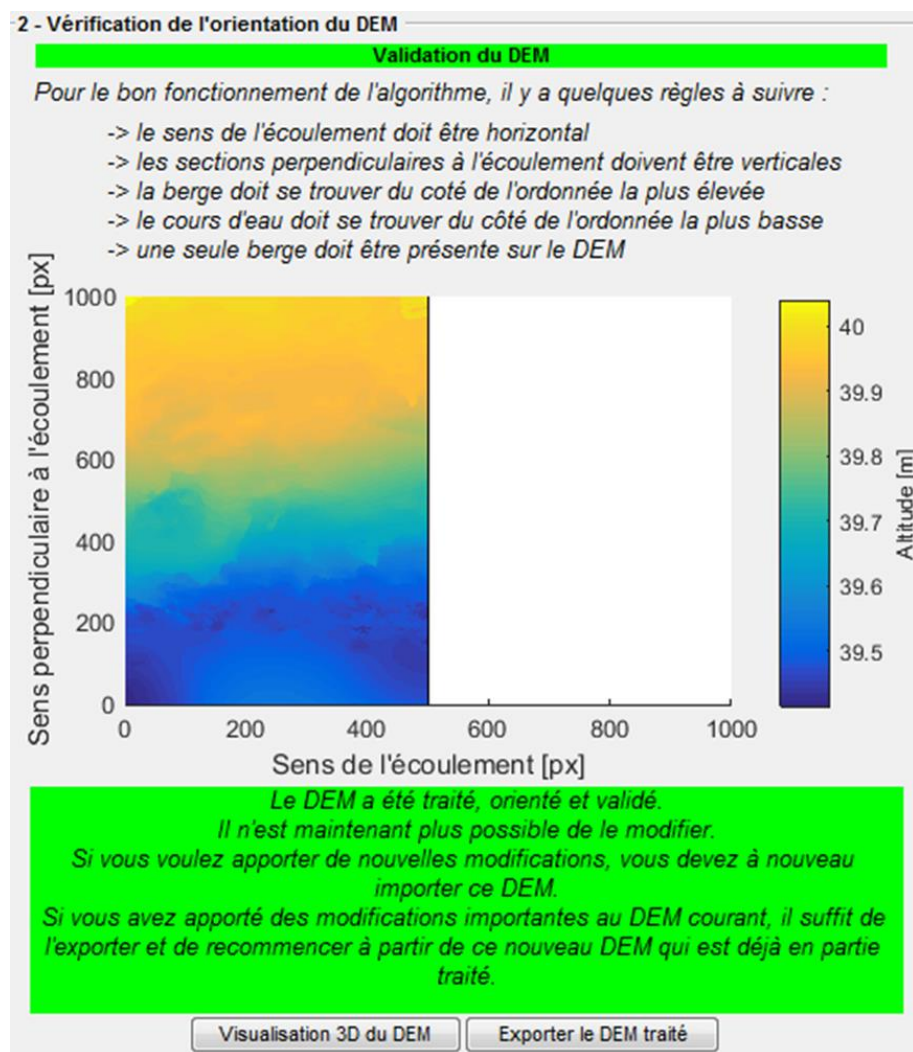


FIGURE 5-4 - NOUVELLE CONFIGURATION DU PANNEAU 2 APRÈS LA VALIDATION DU DEM PAR L'UTILISATEUR

Si vous voulez apporter de nouvelles modifications au modèle 3D ou travailler sur un autre modèle, il suffit d'importer un nouveau DEM et suivre les étapes à partir du point 5.2.

5.4. Choix de la méthode de détection de la ligne d'eau

Une fois que le modèle 3D a été traité, orienté et validé, un troisième panneau s'affiche sur l'interface. Ce panneau permet de choisir la méthode de détection comme illustré à la Figure 5-5.

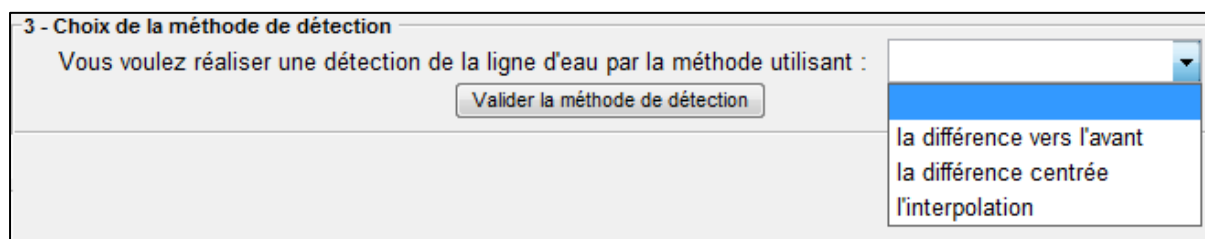


FIGURE 5-5 - ILLUSTRATION DU TROISIÈME PANNEAU DE L'INTERFACE
« CHOIX DE LA MÉTHODE DE DÉTECTION »

Pour choisir l'une ou l'autre méthode, il suffit d'en sélectionner une parmi les trois proposées et d'ensuite cliquer sur le bouton « Valider la méthode de détection ». Une fois que le clic a été réalisé, une fenêtre s'ouvre pour indiquer que l'algorithme de détection a été lancé sur le modèle 3D et que

le calcul peut prendre un certain temps. Une fois que l'algorithme a fini son application, les résultats s'affichent dans un quatrième et dernier panneau.

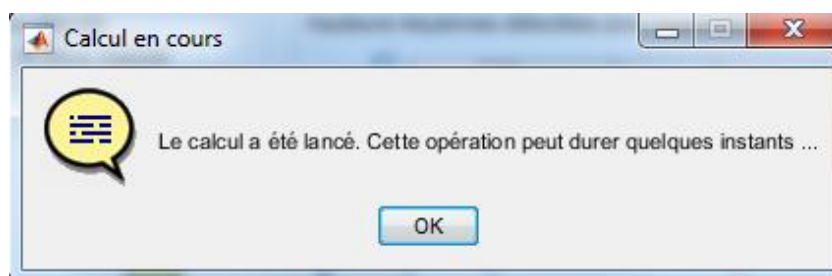


FIGURE 5-6 - FENÊTRE QUI INDIQUE QUE LA MÉTHODE DE DÉTECTION EST EN TRAIN D'ÊTRE APPLIQUÉE SUR LE MODÈLE 3D

5.5. Analyses et résultats de l'interpolation

5.5.1. Analyses et résultats de la détection par la méthode de la différence de bathymétries

Si, lors de la troisième étape, la méthode de différence vers l'avant ou la méthode différence centrée est sélectionnée, le panneau illustré à la Figure 5-7 va s'afficher sur l'interface. Le titre de ce panneau va dépendre de la méthode choisie. A nouveau, il est divisé en trois parties.

Tout d'abord il y a celle qui présente les informations relatives aux différences calculées par l'algorithme de détection. Les différences maximale et minimale y sont indiquées. Il est aussi possible d'afficher (dans une nouvelle figure) l'ensemble des différences calculées pour tout le modèle tant en 2D qu'en 3D en utilisant les boutons prévus à cet effet.

Ensuite, il y a la partie qui présente l'ensemble des hauteurs d'eau moyennes calculées pour des valeurs seuils allant de la différence minimale à la différence maximale (avec un pas de 0.001 m). En parallèle, il y est indiqué (pour chaque seuil) le pourcentage de sections du modèle 3D pour lesquelles la valeur seuil a été détectée. C'est donc sur ce pourcentage de sections que la hauteur moyenne est calculée. Il est aussi possible d'afficher le graphe présenté dans une nouvelle figure en utilisant le bouton prévu à cet effet.

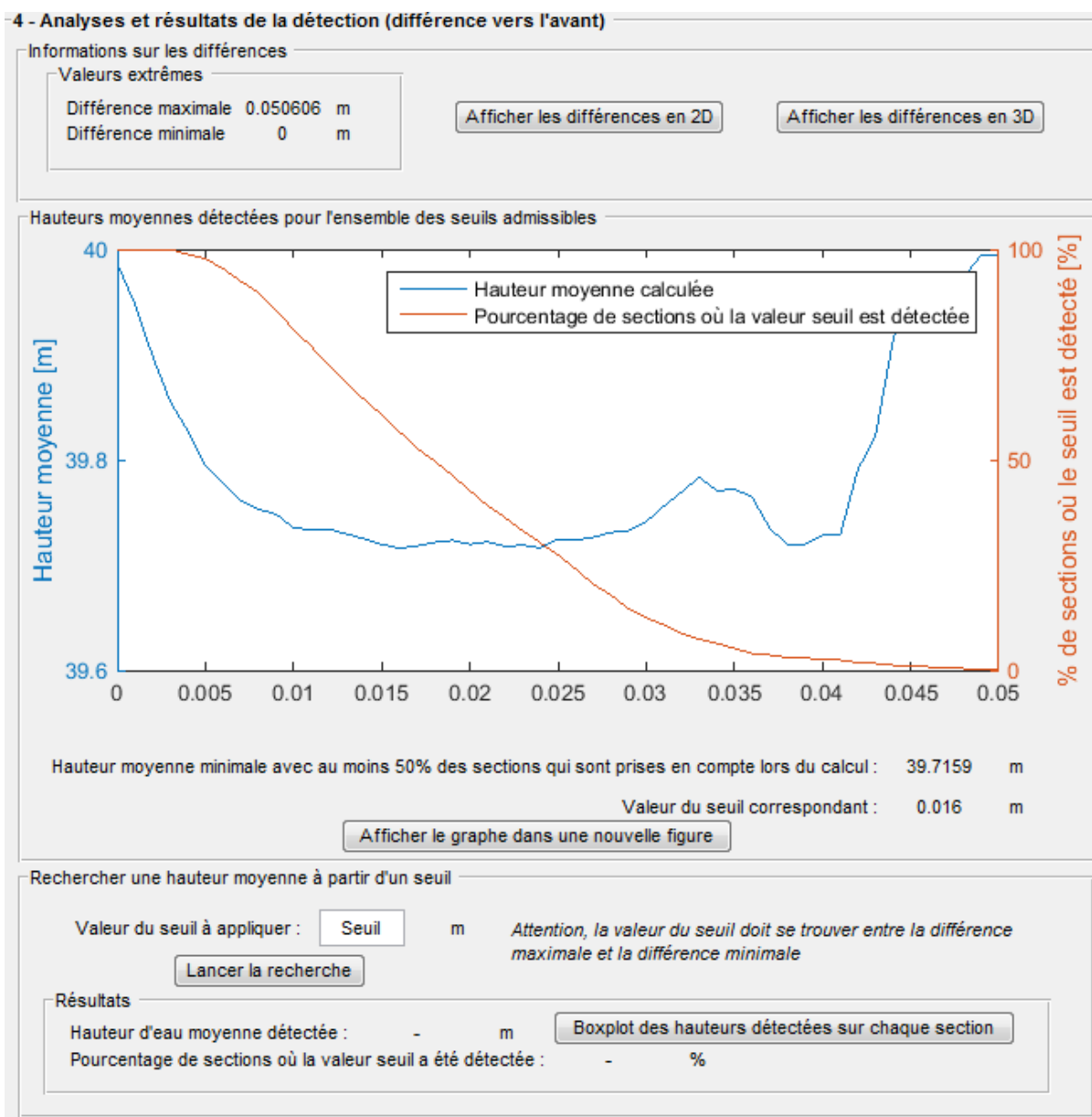


FIGURE 5-7 - ILLUSTRATION DU QUATRIÈME PANNEAU QUI APPARAÎT LORSQUE LA MÉTHODE DE DIFFÉRENCE VERS L'AVANT EST CHOISIE

Finalement, la troisième et dernière partie est celle via laquelle il est possible de rechercher une hauteur d'eau moyenne pour une valeur seuil. Pour ce faire, il faut entrer une valeur seuil correcte (donc comprise entre la différence minimale et la différence maximale) et cliquer sur le bouton « Lancer la recherche ». Une fois que la hauteur d'eau moyenne a été calculée, les résultats s'affichent dans la section *Résultats* de cette partie. Il est aussi possible d'obtenir un *boxplot* des hauteurs détectées sur chaque section pour la valeur de seuil préalablement choisie en utilisant le bouton prévu à cet effet.

5.5.2. Analyses et résultats de la détection par la méthode de l'interpolation des bathymétries

Si la méthode choisie lors de la troisième étape est celle utilisant l'interpolation, le panneau illustré à la Figure 5-8 va s'afficher sur l'interface. Celui-ci peut se diviser en deux parties différentes.

4 - Analyses et résultats de la détection (interpolation)

Valeur pour les paramètres

Degré du polynôme d'interpolation des sections (Valeur par défaut : 10)	Pourcentage d'écart admissible entre deux minimums consécutifs du polynôme d'interpolation (pour la recherche du minimum optimal) (Valeur par défaut : 0.5 [%])
--	--

Résultats (avec un degré 10 et un pourcentage de 0.5%)

Interpolation sur l'ensemble des sections

Une interpolation

	avec outliers	sans outlier	
Hauteur moyenne = moyenne des 75ièmes percentiles ->	39.4826	39.4826	m
Hauteur moyenne = moyenne des hauteurs moyennes ->	39.4818	39.4818	m Afficher le boxplot
Hauteur moyenne = moyenne des 25ièmes percentiles ->	39.4814	39.4814	m

Deux interpolations

	avec outliers	sans outlier	
Hauteur moyenne = moyenne des 75ièmes percentiles ->	39.4825	39.4825	m
Hauteur moyenne = moyenne des hauteurs moyennes ->	39.4811	39.4811	m Afficher le boxplot
Hauteur moyenne = moyenne des 25ièmes percentiles ->	39.4802	39.4802	m

Interpolation sur une moyenne des sections

Une interpolation

Hauteur moyenne = moyenne des 75ièmes percentiles ->	39.484	m
Hauteur moyenne = moyenne des hauteurs moyennes ->	39.4836	m Afficher les résultats sur la section
Hauteur moyenne = moyenne des 25ièmes percentiles ->	39.4834	m

Deux interpolations

Hauteur moyenne = moyenne des 75ièmes percentiles ->	39.484	m
Hauteur moyenne = moyenne des hauteurs moyennes ->	39.4834	m Afficher les résultats sur la section
Hauteur moyenne = moyenne des 25ièmes percentiles ->	39.4828	m

FIGURE 5-8 - ILLUSTRATION DU QUATRIÈME PANNEAU QUI APPARAÎT LORSQUE LA MÉTHODE DE L'INTERPOLATION EST CHOISIE

La première partie permet de gérer les deux paramètres de la méthode. Initialement un calcul est lancé avec un degré 10 et un pourcentage admissible de 0.5% (valeurs que nous avons définies par défaut dans l'algorithme de détection). Étant donné qu'il s'agit de paramètres, ces deux valeurs doivent pouvoir être modifiées et c'est dans cette partie que cela peut être fait. Pour relancer un calcul (ou tout simplement pour vérifier que les valeurs par défaut donnent de bons résultats), il suffit d'entrer une nouvelle valeur et de cliquer sur le bouton « *Vérifier la nouvelle valeur* » correspondant. Une fois cette opération réalisée, une nouvelle fenêtre s'ouvre. Il y est affiché neuf sections aléatoires sur lesquelles on peut vérifier tant l'interpolation que le minimum optimal détecté par l'algorithme.

Si un utilisateur désire vérifier ses résultats sur d'autres sections, il lui suffit de cliquer à nouveau sur le bouton « *Vérifier la nouvelle valeur* » et une nouvelle fenêtre s'ouvrira avec d'autres sections prises aléatoirement.

Il faut noter que lorsqu'on vérifie une nouvelle valeur pour un paramètre, les résultats qui s'affichent dans la nouvelle figure ont été obtenus en changeant uniquement la valeur de ce paramètre. Le deuxième garde sa valeur initiale.

Une fois qu'un utilisateur a entré et vérifié une nouvelle valeur pour les deux paramètres (s'il ne désire en faire varier qu'un, il lui suffit d'indiquer la valeur initiale pour le second), il doit finalement cliquer sur le bouton « *Relancer la détection par interpolation avec les nouvelles valeurs des paramètres* » pour que le calcul soit relancé. A nouveau, le message illustré à la Figure 5-6 apparaîtra, ce qui indique à l'utilisateur que le DEM est en train d'être analysé.

La deuxième et dernière partie de ce panneau est celle qui contient les résultats. Dans son titre, il est rappelé la valeur des paramètres utilisés pour obtenir les résultats. Finalement il est possible d'afficher les différents résultats (soit un *boxplot* des hauteurs trouvées pour l'interpolation sur l'ensemble des sections, soit les hauteurs détectées directement sur la section pour l'interpolation sur une moyenne des sections) en utilisant les différents boutons présents dans cette partie.

5.6. Note pour les futurs développeurs

En parallèle de l'interface et des fonctions qu'elle utilise pour réaliser la détection de la ligne d'eau sur un modèle 3D, nous avons écrit différents scripts qui permettent de tester l'une ou l'autre méthode tout en se passant de l'interface. Ces différents scripts sont :

- *DEM_WSD_Forward_Diff_script.m*
- *DEM_WSD_Central_Diff_script.m*
- *DEM_WSD_AS_INT1_script.m*
- *DEM_WSD_AS_INT2_script.m*
- *DEM_WSD_MS_INT1_script.m*
- *DEM_WSD_MS_INT2_script.m*

Avec ces différents fichiers il est possible de tester et/ou d'améliorer les différentes techniques de manière plus aisée.

6. Informations sur la conception et le fonctionnement interne de la base de données

6.1. Protection et sécurité

Afin de forcer les utilisateurs à utiliser les différents boutons et empêcher les modifications manuelles, le programme est protégé par un mot de passe.

6.1.1. Protection des feuilles

L'ensemble des feuilles, sauf les feuilles de type *date* présentées au point 2.4.3, sont protégées par un mot de passe unique, à savoir :

- sa valeur est vide, c'est-à-dire qu'il suffit d'appuyer sur *Enter* lorsqu'on veut déverrouiller une feuille ;
- après toute modification, il faut impérativement protéger à nouveau la (les) feuille(s) concernée(s) en utilisant la valeur vide pour le mot de passe (donc à nouveau, simplement appuyer sur *Enter* lors de l'étape de protection). Nous nous permettons d'insister sur ce point car les différentes fonctions codées en VBA utilisent cette valeur de mot de passe vide pour déverrouiller, modifier et verrouiller à nouveau les différentes feuilles

6.1.2. Protection du code VBA

Le code VBA n'est pas protégé par un quelconque mot de passe ; il est donc directement accessible à toute personne qui souhaite le consulter.

6.2. Fonctionnement interne de la base de données

Ci-dessous, nous expliquons le fonctionnement de la partie de la base de données qui n'est pas exclusivement programmée en VBA.

6.2.1. Fonctionnement interne de la partie 1 – Le classeur Summary

Lorsqu'un utilisateur ajoute une nouvelle station/section au sein de la base de données (via le bouton *Ajouter une nouvelle station/section*), outre le fait de rajouter une ligne dans la feuille Excel, le programme réalise deux opérations à la suite l'une de l'autre :

1. il se renseigne sur l'état de la base de données (via une feuille masquée) et la met à jour pour qu'elle corresponde à la nouvelle situation ;
2. il crée un nouveau classeur qui contiendra les mesures relatives à la nouvelle section dans le dossier *Set of Stations-Sections*.

Feuille cachée et état de la base de données

Pour avoir accès à la feuille cachée dans ce classeur, il faut réaliser les étapes illustrées à la Figure 6-1.

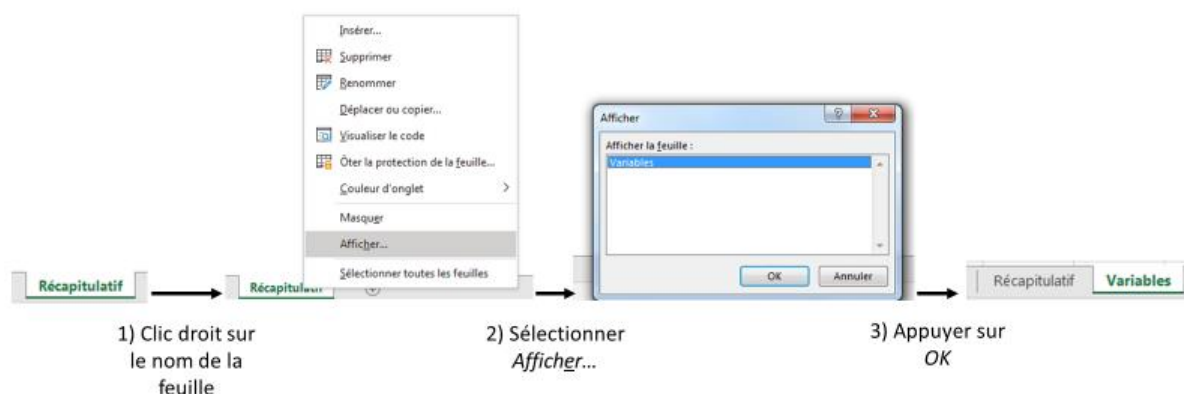


FIGURE 6-1 - ACCÈS À LA FEUILLE CACHÉE DANS *SUMMARY*

Dans cette nouvelle feuille *Variables*, est en réalité contenu, l'état de la base de données. L'état de la base de données est exprimé à l'aide de deux variables (illustrées à la Figure 6-2) :

- *Next id* : qui doit contenir la valeur de l'*ID* qui sera assignée à la nouvelle section (et qui doit donc valoir une unité supplémentaire que le plus grand *ID* déjà présent sur la page *Summary*) ;
- *Première ouverture ?* : qui indique si le classeur contenant les données liées à une section a déjà été ouvert ou non.

	A	B	C
1	Next id :	5	
2			
3	Gère les premières ouvertures		
4	id	Première ouverture ?	
5		1 Non	
6		2 Non	
7		3 Non	
8		4 Oui	

FIGURE 6-2 - ÉTAT DE LA BASE DE DONNÉES

En cas d'erreur lors de l'utilisation d'Excel, il faut vérifier que les variables d'état correspondent à l'état actuel de la base de données. Si vérifier la cohérence de la variable *Next id* semble assez aisé, la cohérence de la variable *Première ouverture ?* est plus compliquée. Pour ce faire, nous conseillons d'ouvrir l'ensemble des classeurs présents dans le dossier *Set of stations-Sections* (sauf le classeur *Template*) et si la fiche signalétique est vide (ou s'il n'y a pas de données pour la bathymétrie et pas de feuille de type *date* dans un des classeurs), indiquer *Oui* pour la variable d'état à l'*id* correspondant au nom du classeur vide.

La feuille *Variables* n'est pas protégée ; c'est pour cette raison qu'elle est masquée. Cependant, une fois les vérifications réalisées et avant d'utiliser à nouveau la base de données, il faut impérativement masquer à nouveau (*clic droit sur le nom de la feuille Variables -> Masquer*) cette feuille. Si cette opération n'est pas réalisée, le programme ne fonctionnera pas.

Création du nouveau classeur Excel

Lors de l'ajout d'une section/station dans la base de données, une fois les variables d'état mises à jour, le programme va créer un nouveau classeur. En réalité, un nouveau classeur n'est pas créé, mais une copie du classeur *Template* (du dossier *Set of Stations-Section*) est réalisée. Ce nouveau classeur copié aura pour nom l'*ID* correspondant à la nouvelle section/station.

En cas d'erreur lors de l'utilisation d'Excel, en plus de vérifier les variables d'état, il faudra aussi s'assurer que le nombre de fichiers et d'*ID's* sont les mêmes tant dans le classeur *Summary* que dans le classeur *Template* du dossier *Set of Stations-Sections*. Tout autre fichier sera à extraire de la base de données afin d'en assurer le bon fonctionnement.

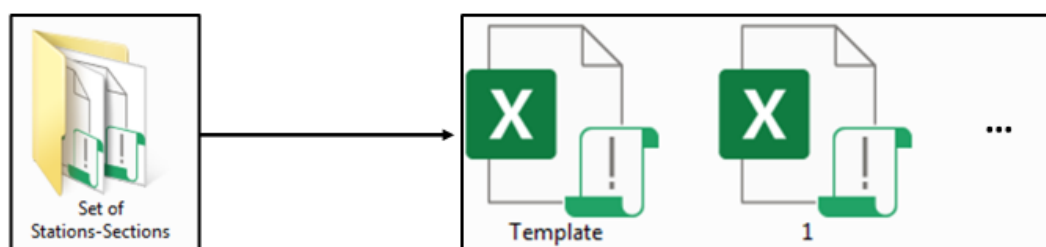


FIGURE 6-3 – CONTENU DU DOSSIER *SET OF STATIONS-SECTIONS*

6.2.2. Fonctionnement interne de la partie 2 – Les classeurs spécifiques à une station/section

Comme il est déjà spécifié au point précédent, la création d'un nouveau classeur n'est en réalité que la copie d'un classeur déjà existant qui est le classeur *Template*. En dehors du code VBA, il n'y a en réalité pas grand-chose qui est exécuté. Dans ce classeur, il y a deux feuilles qui existent d'origine et qui sont *Fiche signalétique* et *Bathymétrie*. Lorsqu'un utilisateur décide d'ajouter une date de prises de mesures en dehors des mesures bathymétriques (sur la feuille *Fiche signalétique*), une page du type *date* est créée et ajoutée au classeur Excel. A nouveau, cette feuille n'est pas créée de tout pièce en VBA mais elle est en réalité une copie d'une feuille cachée. Donc lorsqu'un utilisateur ajoute une nouvelle date, le programme réalise les étapes suivantes :

1. copier-coller de la feuille cachée *Template_date* ;
2. on lui attribue comme nom la date à laquelle les mesures ont été faites ;
3. on insère, dans l'entête de la nouvelle feuille Excel, la date à laquelle les mesures ont été réalisées.

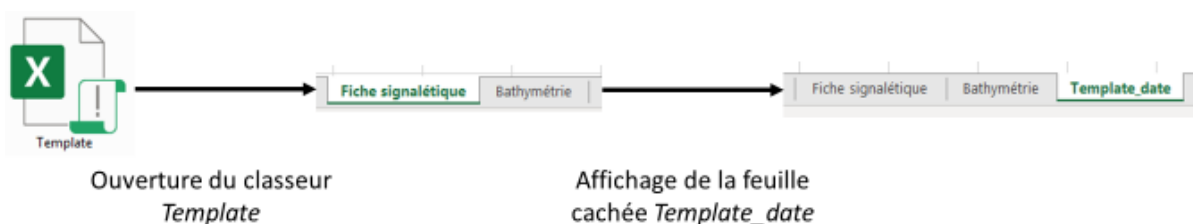


FIGURE 6-4 – FEUILLE CACHÉE DANS LE CLASSEUR *TEMPLATE*

Pour les futurs développeurs/modificateurs du fonctionnement ou de l'interface de la base de données, si vous voulez :

- modifier les prochains classeurs qui seront créés.
Il faut modifier le classeur *Template* et la feuille cachée *Template_date*. Il ne faut pas oublier, une fois les modifications terminées, de masquer la feuille *Template_date* ;
- modifier les prochaines feuilles de type *date* dans les classeurs déjà existants.
Il faut modifier la feuille cachée *Template_date* dans chaque classeur déjà existant. A nouveau, il ne faut pas oublier, une fois les modifications terminées, de masquer les feuilles *Template_date* dans les différents classeurs ;

- modifier les feuilles de type *date* déjà existantes dans les différents classeurs.
Il faut, dans ce cas, changer manuellement toutes les feuilles de type *date* présentes dans l'ensemble des classeurs déjà existants.

6.3. Le code VBA

Le but de cette partie est d'énumérer et d'expliquer ce que font les procédures écrites dans le langage Virtual Basic pour Application qui organisent et gèrent la base de données.

Pour rappel, il existe deux types de procédures en VBA, il y a les sous-routines qui exécutent du code sans retourner de valeurs à la fin et les fonctions qui exécutent aussi du code, mais elles retournent une valeur une fois que leur exécution est terminée. Pour l'exécution de la base de données, nous utilisons ces deux types de procédures.

6.3.1. Les procédures utilisées dans le classeur Summary

Les sous-routines

- Ajout()
 - *Bouton associé* : « Ajouter une nouvelle station/section ».
 - *Objectif* : ajouter une nouvelle ligne dans la feuille Excel contenant les informations d'une nouvelle station/section.
- Modif()
 - *Bouton associé* : « Modifier une station/section ».
 - *Objectif* : modifier, pour une section choisie, une valeur de champs erroné ou qui a été modifié.
- Ouverture_de_fichier(ligne As String)
 - *Argument* :
 - *ligne* : indice de la ligne à laquelle un double-clic a été fait.
 - *Bouton associé* : aucun.
 - *Objectif* : ouvrir le classeur (du dossier *Set of Stations-Sections*) correspondant au choix de l'utilisateur.

La fonction

- Création_de_fichier(id As Integer) As Boolean
 - *Argument*:
 - *id* : nom qui sera donné au fichier créé dans le dossier *Set of Stations-Sections*.
 - *Valeur de retour* :
 - *True* : si la création du classeur se passe correctement.
 - *False* : si une erreur survient lors de la création du classeur.
 - *Bouton associé* : aucun.
 - *Objectif* : créer un nouveau classeur (dans le dossier *Set of Stations-Sections*) lorsqu'une nouvelle station/section est ajoutée à la base de données.

6.3.2. Les procédures utilisées dans les classeurs propres aux différentes stations/sections

Les sous-routines

- Ajout_de_bathy()

- *Bouton associé* : « Ajouter un jeu de données pour la bathymétrie ».
 - *Objectif* : ajouter un nouveau cadre et un graphe lié pour pouvoir insérer des nouvelles données bathymétriques au sein de la feuille *Bathymétrie*.
- Ajout_de_date()
 - *Bouton associé* : « Ajouter un nouveau jeu de données ».
 - *Objectif* : dans la feuille *Fiche Signalétique*, ajouter une nouvelle date de prises de mesures (date et nom(s)) et créer une nouvelle feuille qui porte le nom de la date ajoutée.
 - Modifier_date_nom()
 - *Bouton associé* : « Modifier une date ou un nom ».
 - *Objectif* : dans la feuille *Fiche signalétique*, permet de modifier une date ou des noms dont la valeur initiale est erronée.
 - Photo1() et Photo2()
 - *Boutons associés* : respectivement « Ajouter une première photo » et « Ajouter une deuxième photo ».
 - *Objectif* : dans la feuille *Fiche signalétique*, permet d'ajouter une photo et de la mettre aux dimensions des cadres prévus à cet effet.
 - Rechercher_date()
 - *Bouton associé* : « Recherche/ouvrir une date ».
 - *Objectif* : dans la feuille *Fiche signalétique*, permet de vérifier si une date existe dans la base de données, et si tel est le cas, permet d'ouvrir la feuille qui contient les mesures relevées à cette date.

La fonction

- EstUneDate(mydate As String) As Boolean
 - *Argument*:
 - *mydate* : doit être une date dont le format est à vérifier.
 - *Valeur de retour* :
 - *True* : si l'argument entré est une date correcte.
 - *False* : si l'argument entré n'est pas une date correcte.
 - *Bouton associé* : aucun.
 - *Objectif* : vérifier si le format de la date entrée en argument est correct, c'est-à-dire qu'elle comporte huit chiffres séparés uniquement par des points.

7. Résultats de la méthode de l'interpolation des bathymétries sur les modèles de Agisoft-PhotoScan

TABEAU 7-1 – RÉSULTATS DE LA MÉTHODE DE L'INTERPOLATION SUR LES MODÈLES DE AGISOFT - PHOTOSCAN

Méthode avec l'interpolation sur l'ensemble des sections							
N° du DEM	Hauterud'eau réelle [m]	Une interpolation					
		Avec outliers			Sans outliers		
		Hauteur moyenne DEM [m]	Différence [cm]	Temps de calcul [sec]	Hauteur moyenne DEM [m]	Différence [cm]	Temps de calcul [sec]
1	39,42	39,4818	6,18	3,12	39,4818	6,18	3,12
2	39,43	39,4501	2,01	13,4	39,4501	2,01	13,4
3	39,44	39,3788	-6,12	16,74	39,3788	-6,12	16,74
4	39,44	39,4536	1,36	17,47	39,4547	1,47	17,47
5	31,96	31,9527	-0,73	17,84	31,9536	-0,64	17,84
6	31,96	31,8035	-15,65	13,48	31,8049	-15,51	13,48
7	119,69	119,6604	-2,96	21,76	119,6481	-4,19	21,76
8	65,69	65,705	1,5	22,39	65,704	1,4	22,39
9	119,7	119,691	-0,9	22,31	119,6846	-1,54	22,31
10	44,4	44,3161	-8,39	20,5	44,3161	-8,39	20,5

Méthode avec l'interpolation sur l'ensemble des sections							
N° du DEM	Hauterud'eau réelle [m]	Deux interpolations					
		Avec outliers			Sans outliers		
		Hauteur moyenne DEM [m]	Différence [cm]	Temps de calcul [sec]	Hauteur moyenne DEM [m]	Différence [cm]	Temps de calcul [sec]
1	39,42	39,4811	6,11	6,5	39,4811	6,11	6,5
2	39,43	39,5061	7,61	28,18	39,4611	3,11	28,18
3	39,44	39,4473	0,73	32,95	39,3852	-5,48	32,95
4	39,44	39,5316	9,16	39,29	39,4573	1,73	39,29
5	31,96	31,9562	-0,38	38,62	31,9537	-0,63	38,62
6	31,96	31,8044	-15,56	29,61	31,805	-15,5	29,61
7	119,69	119,6667	-2,33	45,74	119,6453	-4,47	45,74
8	65,69	65,7091	1,91	49,25	65,703	1,3	49,25
9	119,7	119,729	2,9	48,85	119,6858	-1,42	48,85
10	44,4	44,314	-8,6	46,99	44,3142	-8,58	46,99

Méthode avec l'interpolation sur une moyenne des sections							
N° du DEM	Hauterud'eau réelle [m]	Une interpolation			Deux interpolations		
		Hauteur moyenne DEM [m]	Différence [cm]	Temps de calcul [sec]	Hauteur moyenne DEM [m]	Différence [cm]	Temps de calcul [sec]
1	39,42	39,4836	6,36	0,04	39,4834	6,34	0,09
2	39,43	39,4479	1,79	0,18	39,4479	1,79	0,2
3	39,44	39,381	-5,9	0,23	39,381	-5,9	0,24
4	39,44	39,4557	1,57	0,16	39,4557	1,57	0,17
5	31,96	31,9445	-1,55	0,2	31,9444	-1,56	0,21
6	31,96	31,78	-18	0,21	31,78	-18	0,22
7	119,69	119,6543	-3,57	0,27	119,6528	-3,72	0,27
8	65,69	65,6904	0,04	0,41	65,6904	0,04	0,41
9	119,7	119,6216	-7,84	0,41	119,6216	-7,84	0,42
10	44,4	44,3147	-8,53	0,39	44,4145	1,45	0,41

8. Résultats de la méthode de la différence de bathymétries sur les modèles de Agisoft-PhotoScan

TABEAU 8-1 – RÉSULTATS DES MÉTHODES DE DIFFÉRENCE SUR LES MODÈLES DE AGISOFT-PHOTOSCAN

Méthode avec la différence vers l'avant						
N° du DEM	Hauteur d'eau réelle [m]	Hauteur moyenne DEM [m]	Différence [cm]	Différence maximale du DEM [m]	Seuil optimal [m]	Rapport seuil [%]
1	39,42	39,72	30,00	0,0506	0,016	31,62
2	39,43	39,80	37,00	0,1934	0,019	9,82
3	39,44	39,82	38,00	0,1927	0,047	24,39
4	39,44	39,76	32,00	0,33241	0,068	20,46
5	31,96	32,80	84,00	0,79198	0,206	26,01
6	31,96	32,58	62,00	0,5763	0,146	25,33
7	119,69	120,00	31,00	0,58589	0,167	28,50
8	65,69	66,42	73,00	0,78612	0,14	17,81
9	119,7	120,30	60,00	0,9932	0,276	27,79
10	44,4	44,90	50,00	1,05641	0,222	21,01
Méthode avec la différence centrée						
N° du DEM	Hauteur d'eau réelle [m]	Hauteur moyenne DEM [m]	Différence [cm]	Différence maximale du DEM [m]	Seuil optimal [m]	Rapport seuil [%]
1	39,42	39,72	30,00	0,0506	0,014	27,67
2	39,43	39,78	35,00	0,1283	0,015	11,69
3	39,44	39,82	38,00	0,12631	0,035	27,71
4	39,44	39,75	31,00	0,2184	0,054	24,73
5	31,96	32,78	82,00	0,615	0,16	26,02
6	31,96	32,58	62,00	0,4793	0,127	26,50
7	119,69	120,00	31,00	0,4806	0,133	27,67
8	65,69	66,42	73,00	0,6468	0,115	17,78
9	119,7	120,20	50,00	0,6461	0,23	35,60
10	44,4	44,87	47,00	0,905	0,18	19,89

9. Résultats de la détection de la hauteur d'eau sur les modèles de MicMac

9.1. Résultats de la méthode de la différence de bathymétries

TABEAU 9-1 – RÉSULTATS DES MÉTHODES DE DIFFÉRENCE SUR LES MODÈLES DE MICMAC

Modèle MicMac						
Méthode avec la différence vers l'avant						
<i>Cours d'eau</i>	<i>Hauteur d'eau réelle [m]</i>	<i>Hauteur moyenne DEM [m]</i>	<i>Différence [cm]</i>	<i>Différence maximale du DEM [m]</i>	<i>Seuil optimal [m]</i>	<i>Rapport seuil [%]</i>
Thyle	65,69	66,46	77,00	0,844	0,147	17,42
Orne	119,7	120,50	80,00	1,33	0,464	34,89
Lasne	44,4	44,96	56,00	0,639	0,248	38,81
Méthode avec la différence centrée						
<i>Cours d'eau</i>	<i>Hauteur d'eau réelle [m]</i>	<i>Hauteur moyenne DEM [m]</i>	<i>Différence [cm]</i>	<i>Différence maximale du DEM [m]</i>	<i>Seuil optimal [m]</i>	<i>Rapport seuil [%]</i>
Thyle	65,69	66,51	82,00	0,828	0,147	17,75
Orne	119,7	120,40	70,00	1,009	0,296	29,34
Lasne	44,4	44,98	58,00	0,634	0,144	22,71

9.2. Résultats de la méthode de l'interpolation des bathymétries

TABEAU 9-2 – RÉSULTATS DE LA MÉTHODE DE L'INTERPOLATION SUR LES MODÈLES DE MICMAC

Méthode avec l'interpolation sur l'ensemble des sections, 1 interpolation					
Cours d'eau	Hauteur réelle	Avec outliers		Sans outliers	
		Hauteur moyenne DEM [m]	Différence [cm]	Hauteur moyenne DEM [m]	Différence [cm]
Thyle	65,69	65,6838	-0,62	65,6832	-0,68
Orne	119,7	119,7675	6,75	119,722	2,2
Lasne	44,4	44,3669	-3,31	44,3658	-3,42
Méthode avec l'interpolation sur l'ensemble des sections, 2 interpolations					
Cours d'eau	Hauteur réelle	Avec outliers		Sans outliers	
		Hauteur moyenne DEM [m]	Différence [cm]	Hauteur moyenne DEM [m]	Différence [cm]
Thyle	65,69	65,686	-0,4	65,6833	-0,67
Orne	119,7	119,7653	6,53	119,7219	2,19
Lasne	44,4	44,3682	-3,18	44,3649	-3,51
Méthode avec l'interpolation sur une moyenne des sections					
Cours d'eau	Hauteur réelle	Une interpolation		Deux interpolation	
		Hauteur moyenne DEM [m]	Différence [cm]	Hauteur moyenne DEM [m]	Différence [cm]
Thyle	65,69	65,6808	-0,92	65,6809	-0,91
Orne	119,7	119,7331	3,31	119,7316	3,16
Lasne	44,4	44,374	-2,6	44,3714	-2,86

UNIVERSITÉ CATHOLIQUE DE LOUVAIN
École polytechnique de Louvain

Rue Archimède, 1 bte L6.11.01, 1348 Louvain-la-Neuve, Belgique | www.uclouvain.be/epl