UCLouvain

École polytechnique de Louvain

Riverapp: Application de mesure non-intrusive du débit des rivières basée sur l'analyse PIV d'une vidéo de l'écoulement

Author: **Alexandre MIGNOT**
Supervisor: **Sandra SOARES-FRAZÃO**
Readers: **Pierre-Yves GOUSENBOURGER, Benoît HERMAN, Pierre LATTEUR**
Academic year 2023–2024
Master [120] in Civil Engineering

Remerciements

Avant tout, je tenais à remercier toutes les personnes sans qui la réalisation de ce travail n'aurait pas été possible.

Je voudrais tout d'abord remercier les promoteurs de ce mémoire, la Professeure Sandra Soarez-Frazão, et Pierre-Yves Gousenbourger, assistant de recherche à l'UCLouvain, pour leur disponibilité et leurs conseils avisés qui ont contribué à me maintenir sur la bonne voie.

Je souhaite également remercier Andréas Bombaert, avec qui j'ai collaboré durant toute l'année sur le projet RiverApp. Je le remercie pour son aide lors des prises de mesure sur le terrain ainsi que son soutien précieux lors des difficultés informatiques liés à l'application.

Le Professeur Benoît Herman pour son temps et ses conseils précieux sur la fabrication du kit.

Justin Goose, assistant de recherche à l'IMMC, pour son aide sur les calculs de structure en bois du kit.

Les membres du projet Rivialis de m'avoir permis de visiter les sites de recherches avec eux. Leur expertise et leurs conseils, concernant les méthodes de mesure de débit non-intrusives, ainsi que les images prises à l'aide de leur drone, ont été très utiles pour mon travail.

Gil Wagenaar et Manu Vaillant pour le prêt de leur drone et de leurs conseils de pilotage.

Benoît Schoeps et Pierre Laurent du Relais des Ingénieurs pour la mise à disposition de leurs véhicules qui m'ont permis de me déplacer lors des différentes campagnes de mesure.

Sébastien François, technicien en sciences environnementales à l'UCLouvain, pour son temps précieux à m'expliquer les différents instruments de mesure utile aux campagnes de mesure. Mais également pour le temps passé à extraire les données de la station LEICA GPS.

Enfin, je tenais à remercier mes proches pour leur soutien tout au long de ce mémoire.

Résumé

Depuis la nuit des temps, le débit a été une source d'informations indispensables dans bien des domaines. Allant de la gestion des ressources en eau, la planification urbaine ou encore la surveillance environnementale.

Ce dernier point est d'autant plus important compte tenu des conditions climatiques actuelles. En effet, ces dernières années, la Belgique a connu des périodes de sécheresse prolongées ainsi que des épisodes de fortes pluies provoquant des crues des rivières et des fleuves.

Dans un contexte où le changement climatique devient de plus en plus critique et où ces phénomènes extrêmes deviennent de plus en plus fréquents et imprévisibles, une connaissance plus approfondie des débits fluviaux est essentielle à la gestion durable des ressources hydrauliques.

Les méthodes traditionnelles pour mesurer ces débits, utilisées depuis une centaine d'années, sont de plus en plus performantes. Cependant, lors de crues ou d'étiage, ces méthodes dites intrusives ne sont plus utilisables ou deviennent imprécises. C'est d'autant plus le cas en période de crue, où les prises de mesures sont dangereuses, voire mortelles.

C'est pourquoi, depuis maintenant 5 ans, une application de mesure du débit non-intrusive est développée à l'UCLouvain. Mon travail de fin d'études s'inscrit dans la continuité de recherches antérieures, en prolongeant et approfondissant les travaux menés par P.Laurent et C.Dufromont[1] en utilisant une version plus récente de l'application.

Dans un premier temps, un kit de mesure a été développé pour améliorer l'efficacité des mesures sur le terrain. Les différents kits créés ont été comparés pour identifier le plus adapté, et le protocole de mesure a été mis à jour en conséquence. Parallèlement, la sensibilité de l'application a été testée avec un plus grand nombre de vidéos, incluant des mesures sur la Dyle et le Petit Bocq. Une analyse approfondie des vidéos a permis de déterminer les conditions optimales. Des recommandations et des pistes d'amélioration seront proposées pour l'avenir, en tenant compte des observations faites durant ce travail.

Avertissements

L'intelligence artificielle a été utilisée à quelques reprises dans ce mémoire. Elle a principalement été utilisée pour reformuler et corriger certains paragraphes de ce travail, à l'aide de QuillBot et Scribens.

La seconde utilisation de l'IA a été celle de Perplexity afin d'alimenter la documentation de l'état de l'art.

Table des matières

1 Introduction **6**

2 Etat de l'art **8**
2.1 Hydrométrie et débit 8
2.1.1 Techniques intrusives 11
2.1.2 Limite technique intrusive 18
2.1.3 Non intrusive 19
2.2 Concepts lié à l'application 21
2.2.1 Pre-processing/Traitement d'images 21
2.2.2 Lien entre vitesse de surface et vitesse moyenne 24

3 Présentation de l'application RiverApp **27**
3.1 Première version de RiverApp 27
3.2 Version actuelle de RiverApp 29
3.2.1 Nouvelle application 29
3.2.2 Guide utilisateur 30

4 Contribution au mémoire **44**
4.1 Kit d'orthorectification 44
4.1.1 Cahier des charges 45
4.1.2 ancien Kit 45
4.1.3 Kit en PVC 46
4.1.4 Kit en bois 51
4.1.5 Comparaison des 3 kits d'orthorectification 63
4.2 Mesures sur le terrain 64
4.2.1 Protocole de mesures sur le terrain 64
4.2.2 Mesure du débit sur terrain 64
4.2.3 Dyle Limelette 69
4.2.4 Petit Bocq 72
4.3 Test sensibilité de l'application 74
4.3.1 Influence de l'ensemencement 74

4.3.2 Influence de la luminosité . . . 75
4.3.3 Influence de la prise de vue des vidéos . . . 77
4.3.4 Influence de la résolution de la caméra . . . 83
4.3.5 Détection des balises par l'application . . . 85
4.3.6 Influence de l'espacement des balises par rapport à la largeur de la rivière . . . 87
4.4 Condition optimale . . . 88
4.5 Comparaison ancien RiverApp et nouveau RiverApp . . . 88

5 Pistes d'améliorations 90
5.1 Amélioration lié à la prise de mesure . . . 90
5.2 Amélioration lié à l'application . . . 91

6 Conclusion 93

Annexes 95

A Récapitulatif des tailles du kit en PVC 96

B Plan kit en bois 97

C Guide de montage du kit en bois 100

D Tableaux de résultats 105
D.1 Débits limelette - vidéo du milieu du pont . . . 105
D.2 Débits limelette - vidéo de la gauche du pont . . . 106
D.3 Débits limelette - vidéo de la droite du pont . . . 106
D.4 Débit Petit Bocq - vidéo à 90° . . . 106
D.5 Débit Petit Bocq - vidéo à 45° . . . 107

E Protocole de prise de mesures 108

F Calculs kit en bois 112

Chapitre 1

Introduction

Depuis la nuit des temps, le débit a été une source d'informations indispensables dans bien des domaines. Allant de la gestion des ressources en eaux, la planification urbaine ou encore la surveillance environnementale.

Ce dernier point est d'autant plus important compte tenu des conditions climatiques actuelles. En effet, ces dernières années, la Belgique a connu des périodes de sécheresse prolongées ainsi que des épisodes de fortes pluies provoquant des crues des rivières et des fleuves.

De ce fait, il est nécessaire de connaître les données de ce débit afin de prévenir les inondations et de planifier des mesures d'urgence en cas de crue, ou d'éviter les pénuries d'eau et d'assurer la survie de la faune et la flore en période d'étiage.

Dans un contexte où le changement climatique devient de plus en plus critique et où ces phénomènes extrêmes deviennent de plus en plus fréquents et imprévisibles, une connaissance plus approfondie des débits fluviaux est essentielle à la gestion durable des ressources hydrauliques.

Les méthodes traditionnelles pour mesurer ces débits, utilisés depuis une centaine d'années, sont de plus en plus performantes. Cependant, lors de crues ou d'étiage, ces méthodes dites intrusives ne sont plus utilisables ou deviennent imprécises. C'est d'autant plus le cas en période de crue, où les prises de mesures sont dangereuses, voire mortelles.

C'est pourquoi, depuis maintenant 5 ans, une application de mesure du débit non-intrusive est développée à l'UCLouvain. Une première version de l'application a été créée par Simon Renard[2] en 2020, dont la sensibilité a été testée dans le travail de P.Laurent et C.Dufromont[1].

Plus récemment, en 2023, une nouvelle version de l'application ainsi qu'une nouvelle interface ont été développées dans le cadre du travail de fin d'études de A.Meunier[3]. Mon travail de fin d'études s'inscrit dans la continuité de ces recherches antérieures, en prolongeant et approfondissant les travaux menés par P.Laurent et C.Dufromont[1] en utilisant cette nouvelle version de RiverApp.

Dans un premier temps, un kit de mesure a été conçu et mis au point pour prendre des mesures sur terrain plus efficacement. Les différents kits conçus ont été comparés afin de déterminer lequel répond le mieux aux attentes. De plus, une mise à jour du protocole de mesure a été faite suite à l'ajout de ce kit.

En parallèle, la sensibilité de l'application a été évaluée en élargissant le nombre de vidéos disponibles. Des mesures ont été réalisées sur la Dyle, à proximité de Louvain-la-Neuve, tout en testant le prototype du kit, ainsi que sur le Petit Bocq avec l'aide des membres du projet Rivialis. Un large ensemble de vidéos ont été prises en isolant soigneusement les paramètres susceptibles d'influencer les résultats, permettant ainsi d'établir une liste des conditions optimales.

Enfin, des recommandations pratiques et des pistes d'améliorations seront proposées pour l'avenir, en tenant compte des divers points d'attention relevés au cours de ce travail, tant pour le kit de mesure que pour l'utilisation de l'application par un utilisateur lambda.

Chapitre 2

Etat de l'art

2.1 Hydrométrie et débit

Afin de comprendre les différentes données nécessaires au bon fonctionnement de l'application RiverApp, il est important de définir l'hydrométrie ainsi que le débit.

- L'hydrométrie est une science de la mesure. Celle-ci se concentre sur les mouvements de l'eau et permet de mesurer plusieurs caractéristiques des cours d'eau. Voici une liste des différentes caractéristiques importantes à mesurer dans le cadre de cette étude :
  - la profondeur de l'eau
  - la forme du lit (bathymétrie)
  - La pente et la rugosité
  - La vitesse du courant en un point donné

- Le débit est le volume d'eau passant à travers la section d'un cours d'eau par unité de temps comme nous le montre la figure 2.1.

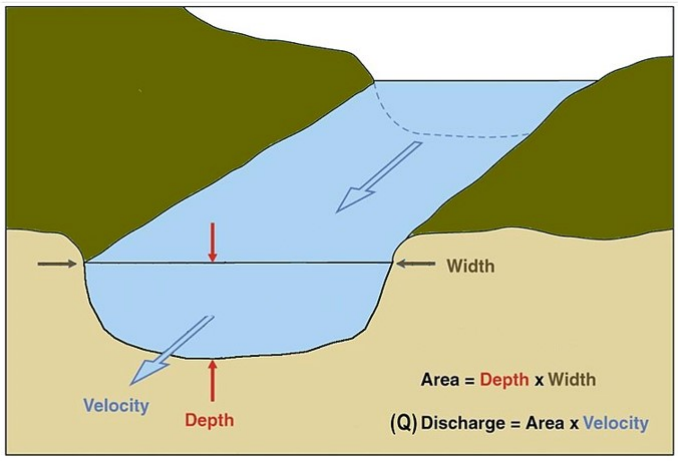


FIGURE 2.1 – Calcul du débit d'une rivière d'une section connue

Il est exprimé de façon très simpliste par l'équation suivante :

$$Q[\frac{m^3}{s}] = V[\frac{m}{s}].A[m^2] \tag{2.1}$$

Cependant, il existe 2 méthodes principales pour calculer le débit d'une rivière :

— Sur base du niveau d'eau z_{eau} mesuré

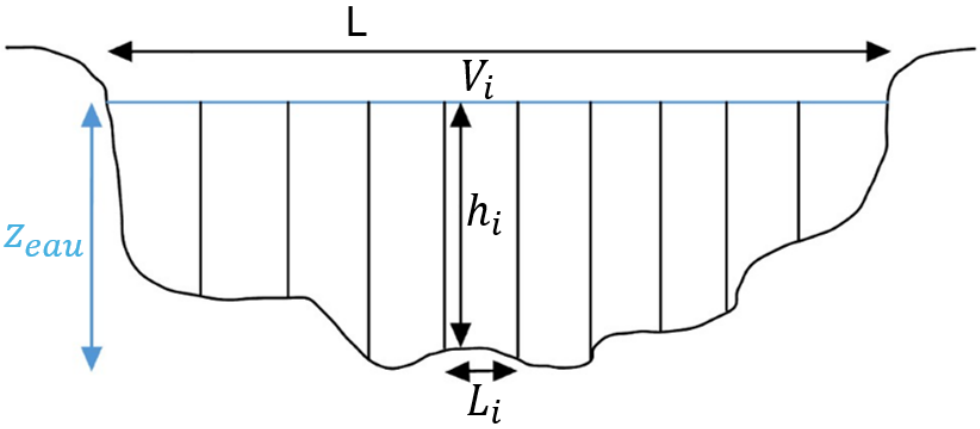


FIGURE 2.2 – Calcul du débit sur base du niveau d'eau mesuré z_{eau}

$$Q = \sum L_i h_i V_i \tag{2.2}$$

— Sur base des valeurs moyennes

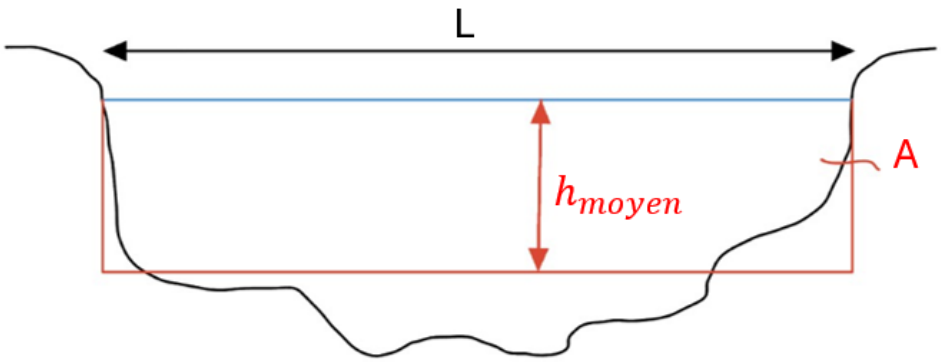


FIGURE 2.3 – Calcul du débit sur base des valeurs moyennes

$$Q = AV_{moyen} = Lh_{moyen}V_{moyen} \tag{2.3}$$

avec $V_{moyen} = \frac{\sum V_i L_i}{L}$

L'application RiverApp, utilise la deuxième méthode, sur base des valeurs moyennes.

Pour quantifier les caractéristiques citées précédemment, nous avons recours à plusieurs méthodes de mesures. Celles présentées ici sont les plus utilisées ou celles qui ont été employées lors des prises de mesure de ce travail. Ces méthodes peuvent être regroupées en 2 catégories : les techniques intrusives et les techniques non-intrusives, comme cela a été fait lors des mémoires précédents de Laurent P. et Dufromont C.[1] ou encore celui de de Grand Ry E. et Everaert C. [4].

2.1.1 Techniques intrusives

Méthode du flotteur

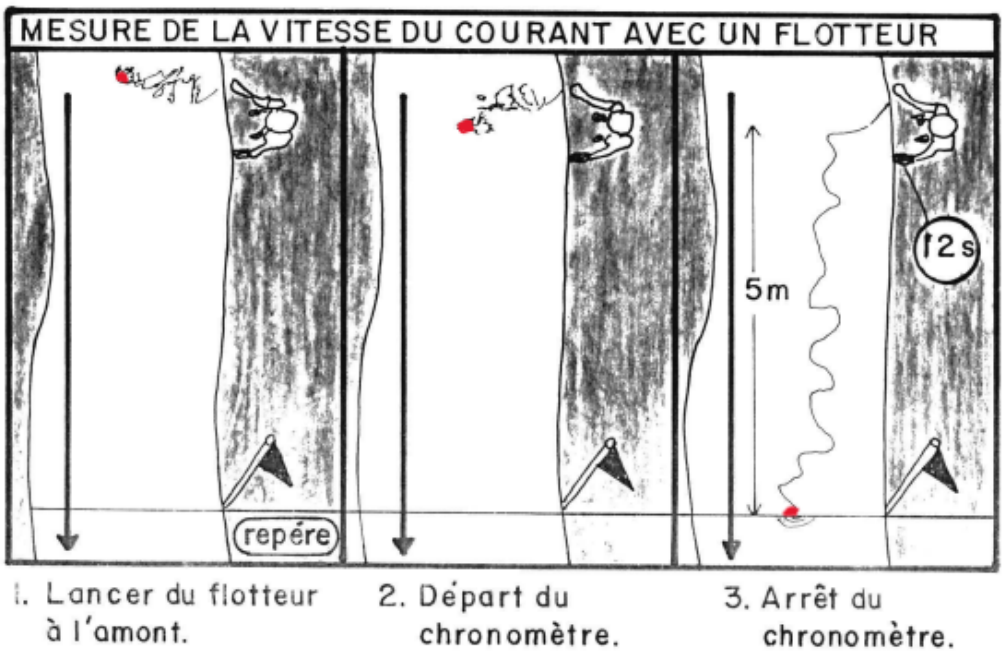


FIGURE 2.4 – Méthode du flotteur issu de [5]

La méthode du flotteur consiste à déterminer la vitesse du courant en utilisant un objet flottant. Il faut ensuite chronométrer le temps que met le flotteur à parcourir une certaine distance dans l'eau. Pour se faire, on place en amont un repère depuis lequel on lancera dans l'eau le flotteur et un repère en aval pour le point d'arrivée. L'observateur lance alors le flotteur en amont et lance le chronomètre lorsque celui-ci arrive à son niveau et l'arrête lorsqu'il passe devant le repère situé en aval. Pour améliorer la précision de la méthode, il est conseillé de procéder à 3 mesures consécutives.
Étant donné que la vitesse qui nous intéresse est la vitesse moyenne et que cette méthode calcule la vitesse de surface, il faut utiliser un coefficient de surface $\alpha = 0.85$ (l'obtention de ce coefficient sera expliquer dans la section 2.2.2). Voici comment calculer la vitesse du courant en surface :

$$V_{moyen} = \alpha V_{surface} = 0.85 \frac{3d}{t_1 + t_2 + t_3} [m/s] \tag{2.4}$$

Mesures limnimétriques et courbes de tarage

Les mesures limnimétriques sont effectuées à l'aide d'une station de jaujeage (échelle limnimétrique 2.5) qui mesure la hauteur d'eau d'une rivière en un point et fournit des estimations continues du débit. Ces stations se basent sur l'hypothèse qu'il existe une relation entre la hauteur d'eau et le débit de la rivière, cette relation est appelée courbe de tarage.

FIGURE 2.5 – Station limnimétrique issu de [6]

Cette courbe de tarage est construite à partir des mesures de vitesse effectuées sur la section de la rivière qui est contrôlée, cette opération est appelée jaugeage.

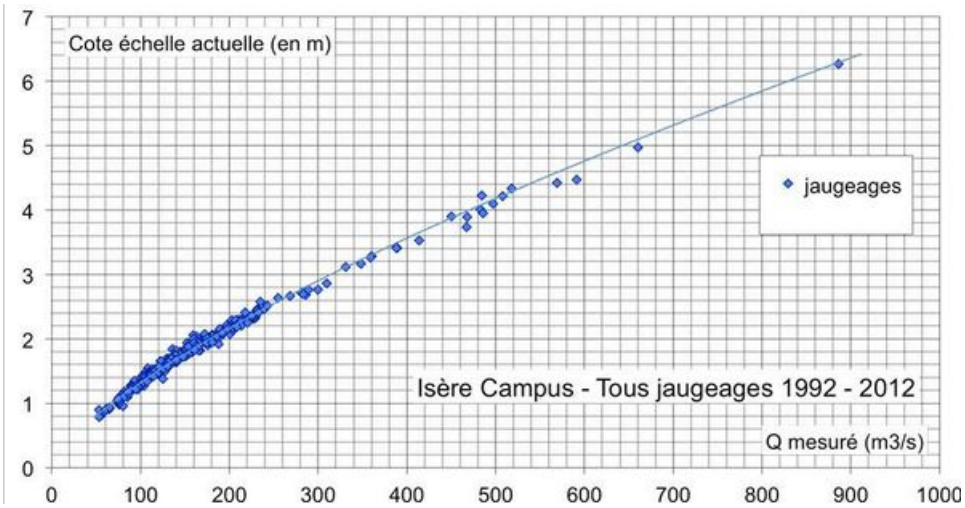


FIGURE 2.6 – Exemple de courbe de Tarage issu de [7]

L'intérêt de cette courbe est de permettre par une simple lecture de la hauteur d'eau sur une échelle limnimétrique à une section de la rivière connue, d'estimer le débit d'un cours d'eau en un instant donné.

Courantomètre

Un courantomètre est un instrument mesurant la vitesse d'écoulement de l'eau. Le courantomètre est monté sur une tige métallique appelée perche et mesure la vitesse du courant à l'aide d'un capteur, ce capteur diffère en fonction du type de courantomètre. Voici une brève description de ces différents capteurs.

— **Courantomètre mécanique**

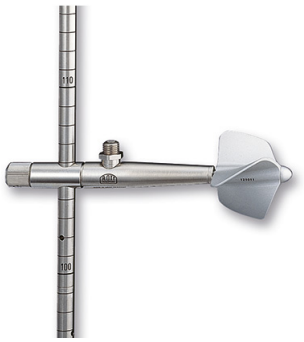


FIGURE 2.7 – Courantomètre mécanique OTT issu de [8]

Nous avons tout d'abord l'hélice qui tourne proportionnellement à la vitesse de l'eau. À chaque tour d'hélice, celle-ci produit une impulsion électrique qui est transmise à l'appareil et est comptabilisée. La vitesse du courant est ensuite calculée en divisant le nombre de tours par le temps écoulé.
La relation entre le nombre d'impulsions et la vitesse du courant est propre à chaque type de moulinet et doit être déterminée au préalable.

Les courantomètres mécaniques sont peu coûteux et utilisable dans la plupart des conditions, cependant, ils sont plus sensibles aux débris dans l'eau et nécessitent un étalonnage régulier.

— **Courantomètre éléctromagnétique**

FIGURE 2.8 – Courantomètre électromagnétique OTT issu de [9]

Ce courantomètre fonctionne à l'aide d'un capteur électromagnétique. Ce capteur crée un champ magnétique entre 2 électrodes fixes et lorsque l'eau, qui est un fluide conducteur, se déplace dans ce champ magnétique, une tension proportionnelle à la vitesse est induite. Ensuite, la tension résultante est traitée par l'appareil afin de donner la vitesse du courant.
Ce courantomètre est sans pièce mobile contrairement à celui à hélice, celui-ci permet d'éviter les imprécisions de mesure due aux débris dans l'eau.

— **Courantomètres à effet Doppler (ADCP)**

FIGURE 2.9 – Courantomètres à effet Doppler de surface issu de [10]

Le courantomètre à effet Doppler émet un signal ultrasonore soit vers le bas ou soit vers le haut selon qu'il s'agisse respectivement d'un courantomètre de surface ou immergé. Ce signal est transmis et réceptionné par des transducteurs piézoélectriques et rebondit sur les particules présentes dans l'eau et l'on mesure la vitesse de ces particules dans l'eau. Une fois recueilli par les transducteurs, l'information est traitée afin de calculer les différentes composantes de la vitesse d'écoulement de l'eau.
Cette analyse est possible, car on émet l'hypothèse que les particules en suspension sur lesquelles les signaux rebondissent n'ont pas de vitesse propre et se déplacent avec la masse d'eau environnante.

Jaugeage par perche transparente

FIGURE 2.10 – Utilisation de la perche transparente sur la Dyle à Limelette

Le jaugeage par perche transparente est une méthode peu coûteuse et efficace dont le principe de mesure est de mesurer la différence de niveau d'eau entre l'amont et l'aval d'une planche placée perpendiculairement face à l'écoulement du cours d'eau.

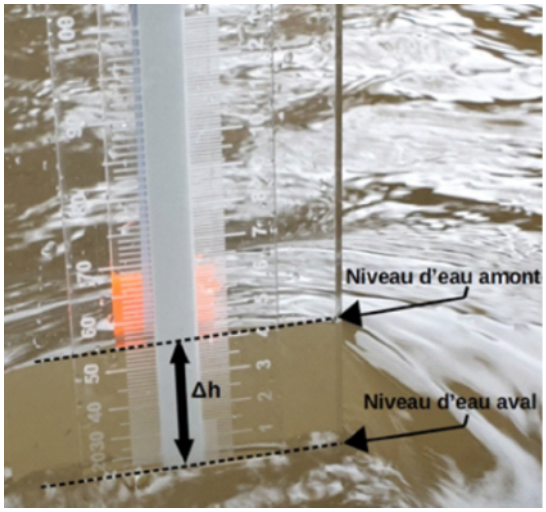


FIGURE 2.11 – Calcul de la vitesse à partir de la charge dynamique issu de [11]

En plaçant la perche de cette manière face au flux d'eau, on peut déterminer la force dynamique liée à la vitesse moyenne de l'écoulement. Ceci est possible à l'aide d'une relation d'étalonnage semi-empirique établie par Pike et al. 2016 [12], donné par l'équation ci-dessous qui permet de calculer la vitesse moyenne $V[m/s]$ à partir de cette différence de hauteur $\Delta h[m]$.

$$V = 0.641\sqrt{2g\Delta h} - 0.019 \tag{2.5}$$

Cependant, cette méthode a des limites selon les caractéristiques de la rivière :
— La profondeur d'eau doit être comprise entre 5 cm et 75 cm
— La charge minimum doit être comprise entre 2 mm et 100 mm.
— La vitesse maximum mesurée doit être comprise entre 10 et 90 cm/s.

Jaugeage par dilution de sel

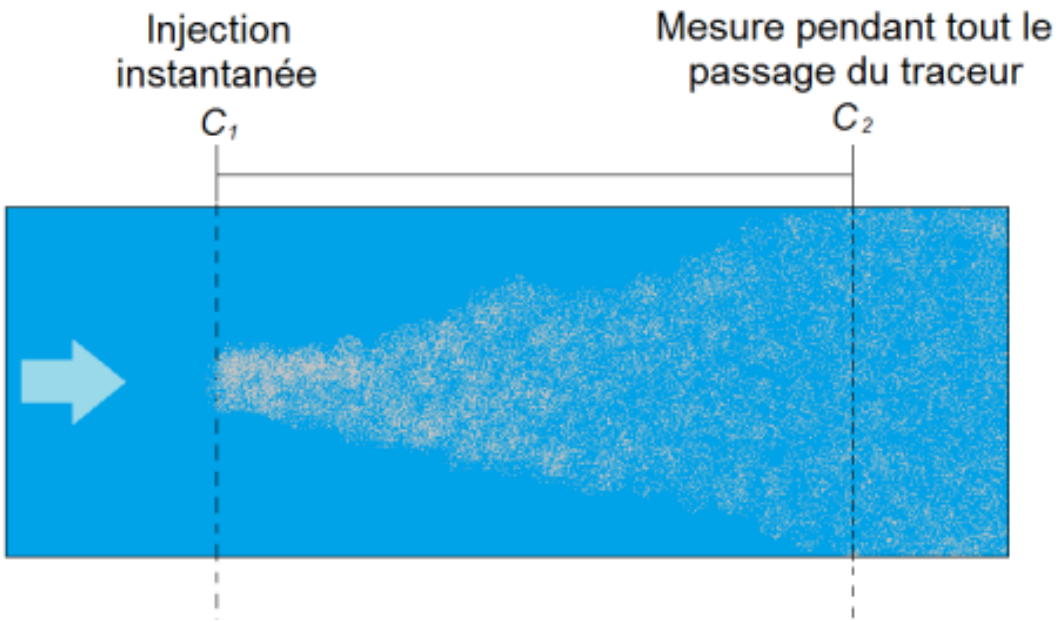


FIGURE 2.12 – Méthode de dilution par intégration [13]

Le Jaugeage par dilution de sel est une méthode qui consiste à injecter un volume connu de solution salée comme traceur dans le cours d'eau. Il faut ensuite mesurer, durant un temps suffisamment long, la variation de conductivité électrique de l'eau en aval pour déterminer le débit.
Sa mise en oeuvre est rapide, peu coûteuse et peut être considérée comme une technique non-intrusive, car il n'est pas nécessaire d'aller dans l'eau pour cette méthode.
Contrairement aux méthodes citées précédemment, pour lesquelles les remous de l'eau sont une source d'incertitude sur les mesures, cette méthode utilise à son avantage le brassage du cours d'eau.

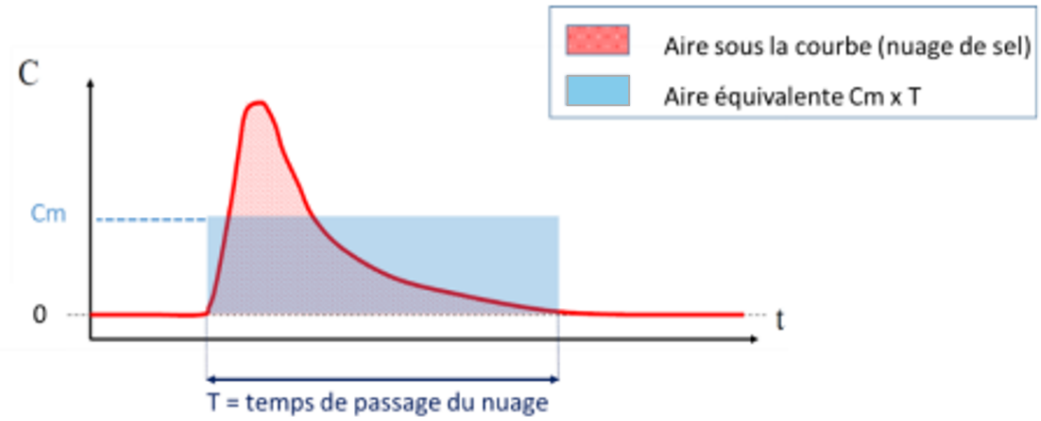


FIGURE 2.13 – évolution temporelle de la concentration en sel [14]

Le débit est calculé à l'aide de l'équation suivante :

$$Q = \frac{M}{TC_m} \tag{2.6}$$

avec :

- Q : débit [L/s]
- M : masse de sel injectée [mg]
- C_m : concentration moyenne en sel [mg/L]
- T : temps de passage du nuage [s]

2.1.2 Limite technique intrusive

Les méthodes de mesure intrusives citées précédemment donnent des résultats assez satisfaisant lorsque les conditions d'écoulement sont "normales". Cependant, elles ne sont pas adaptées lors des événements extrêmes et lorsque certains sites sont difficiles ou dangereux d'accès.

Période d'étiage

Les étiages sont des événements rarement observés et peu fréquents. Lors de ces périodes, les mesures de débits à l'aide d'appareils intrusifs ne sont pas adaptées ou produisent des résultats trop incertains. Par exemple, dans le cas d'un moulinet ou d'un ADCP, les faibles hauteurs d'eau ne permettent pas de remplir les conditions du nombre minimum de mesures sur la section du lit.

Période de crue

Similaire aux étiages, les périodes de crue sont rarement observées et sont peu récurrentes. Durant ces périodes, les mesures intrusives y sont impossibles, car ces techniques mettent en danger l'utilisateur et l'équipement utilisé. Cela est principalement dû au fait que lors de débits importants, on a un transport de matériaux solides plus important et ceci couplé à la vitesse d'écoulement élevée peut abîmer le matériel et blesser l'utilisateur.

De plus, les méthodes de mesure intrusives sont pour leur majorité chronophages et nécessitent donc un débit relativement constant pendant la période de mesure. Lors de crues, le débit et la hauteur d'eau de la rivière varient fortement et ceci sur une courte période de temps, rendant ces méthodes inutilisables ou produisant des résultats avec trop d'incertitude.

Limites pratiques

Dans certains cas, les sites se trouvent difficile d'accès et privent les chercheurs de données essentielles. Certaines rivières nécessitent des procédures lourdes et chères et des équipements spéciaux comme un câble porteur, un pont ou un bateau. Comme le dit la charte qualité de l'hydrométrie ([15]), « un site idéal, mais peu accessible ou dangereux devra être abandonné au profit d'une station hydrauliquement un peu moins satisfaisante mais qui fera l'objet d'une exploitation suivie ».

2.1.3 Non intrusive

Comme il a été décrit dans la section précédente, les méthodes de mesures traditionnelles ne sont pas adaptées à tous les types de rivières ainsi qu'à toute période de leur évolution (étiage et crue). Selon Belleudy (2000)[16], il est nécessaire de développer un outil permettant d'acquérir un champ de vitesse sur un certain tronçon de rivière de façon instantanée dans la mesure du possible.

Particule Image Velocimetry (PIV)

La vélocimétrie par images de particules (PIV) est une technique d'imagerie permettant de mesurer le champ de vitesse dans l'écoulement d'un fluide à partir des images consécutives de cet écoulement.

Cette méthode compare la position des groupes de particules entre chaque image et ainsi suit le déplacement via la technique de corrélation croisée. Celle-ci consiste à prendre un sous-ensemble d'une image et de trouver sa position correspondante

dans la deuxième image et calcule la corrélation entre les intensités de pixels, une corrélation élevé signifie que les pixels correspondent bien (2.14). Pour faire ressortir ces groupes de particules, l'écoulement est ensemencé de traceur.
Connaissant les déplacements des particules et le temps entre chaque image comparé, la vitesse peut être déduite par la relation suivante :

$$\overrightarrow{V} = \frac{\Delta \overrightarrow{X}}{\Delta t} \tag{2.7}$$

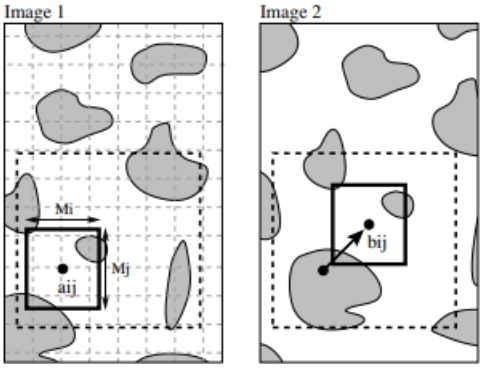


FIGURE 2.14 – déplacement d'un groupe de particule durant un temps Δt

Large Scale Particule Image Velocimetry (LSPIV)

La LSPIV est une technique dérivée de la PIV à la seule différence que la PIV est adapté à des analyses en laboratoire de l'ordre de $10^{-2}m^2$ alors que la LSPIV est adapté à l'échelle de rivière de l'ordre de $10000m^2$, selon [17].
Au vu de la différence d'échelle entre les 2 méthodes, il est nécessaire de faire quelques ajustements. Par exemple, la taille des traceurs utilisés pour l'ensemencement doit être adaptée à la largeur de la rivière. De plus dans le cas où les remous seraient suffisamment importants, il n'est plus nécessaire d'avoir des traceurs pour observer des groupes de particules. D'après A.Hauet[17], la méthode de mesure LSPIV se déroule selon 4 étapes suivantes :

1. Enregistrement d'une séquence d'images.
2. Rectification géométrique des images et correction des effets de perspective via l'orthorectification.
3. Analyse PIV des images corrigés.
4. Ajustement des vecteurs erronés et vérification de la qualité de chaque vecteur.

2.2 Concepts lié à l'application

Dans cette section, différents concepts essentiels à la compréhension de l'application et de ce travail seront présentés. Tout d'abord, les notions liées au traitement d'image seront décrites qui prépareront le terrain pour la sous-section suivante consacrée à l'analyse PIV. Finalement, une explication du coefficient de surface requis par l'application sera fait.

2.2.1 Pre-processing/Traitement d'images

Afin d'appliquer l'analyse PIV, il est nécessaire d'apporter certaines corrections aux images importées. Ces rectifications, apportées aux images, seront détaillées dans les paragraphes suivants et ne seront pas toutes obligatoires dans chaque situation.

Stabilisation

Lorsque l'on prend une vidéo à l'aide de son smartphone ou d'un drone, il est impossible de maintenir un cadre parfaitement stable en raison des mouvements indésirables causés par le corps humain, le vent et d'autres facteurs. L'étape de stabilisation de l'image vise à corriger les mouvements de la caméra. Car pour l'analyse PIV, il est nécessaire de réaliser une conversion pixel-mètre précise afin de déterminer correctement le déplacement des groupes de particules. Cette conversion a du sens si chaque pixel reste fixe dans l'espace.

Calibration

Lorsqu'on utilise une caméra, les propriétés physiques de la lentille peuvent provoquer un effet fish-eye. Cette étape a pour but de corriger la distorsion des images pour garantir, encore une fois, une bonne conversion pixel-mètre. La figure ci-dessous illustre une image originale et sa version calibrée.

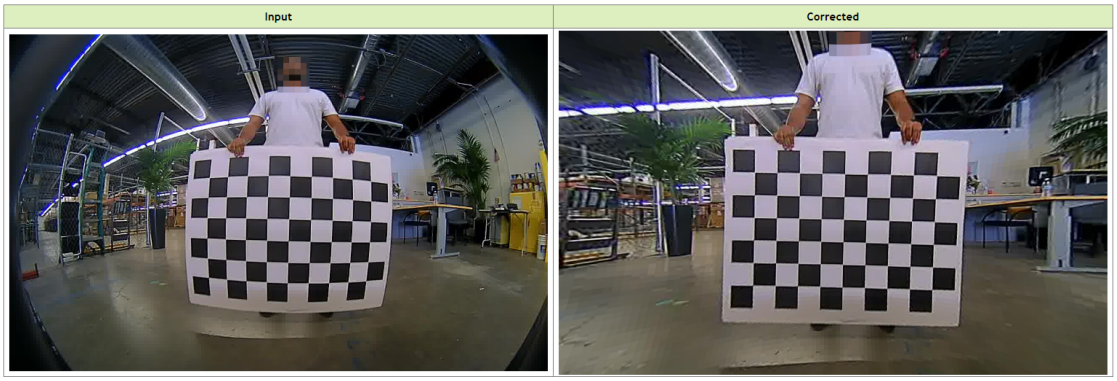


FIGURE 2.15 – Image de la correction de la distorsion fish-eye. Figure issu de [18]

Orthorectification

Lors des prises de mesures, l'utilisation d'un drone n'est pas toujours possible, ce qui empêche parfois d'obtenir une vidéo avec un angle de vue de 90° par rapport à l'écoulement de la rivière. Par conséquent, les images sont souvent prises depuis les berges ou un pont avec un angle différent de 90°.
Cependant, pour l'analyse PIV, il est primordial que les images analysées soient perpendiculaires à la caméra. Car, cette dernière mesurant la distance du déplacement d'un groupe de particules entre 2 images, il faut s'assurer que la distance entre chaque pixel soit identique. C'est ici qu'intervient l'orthorectification, cette étape permet de compenser les effets de distorsion de l'image dus à l'angle de prise de vue comme on peut le voir sur la figure 2.16.

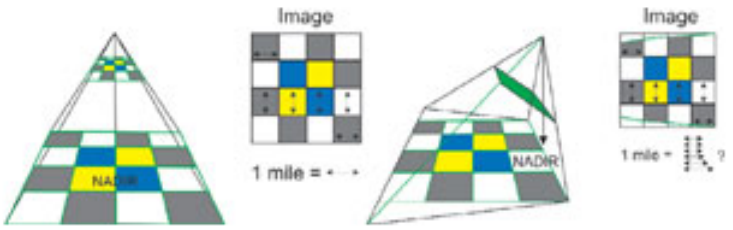


FIGURE 2.16 – Image de la correction de la distorsion de l'image due aux perspectives liés à l'angle de prise de vue. Figure issu de [19]

Pour réaliser cette correction géométrique des images, le but est de trouver la position du pixel dans le repère orthogonal à la prise de vue (x', y') et ceci depuis sa position initiale dans le repère réel (x, y).

Cette transformation est possible grâce à l'homographie (transformation H) et peut être écrite sous la forme suivante :

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} H_{11} & H_{12} & H_{13} \\ H_{21} & H_{22} & H_{23} \\ H_{31} & H_{32} & H_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} \tag{2.8}$$

En observant l'équation matricielle ci-dessus, on peut voir qu'il suffit de connaître les coordonnées de 4 points dans le monde réel ainsi que leurs positions respectives sur l'image pour obtenir la matrice d'homographie H.
Lors de ce travail, ces 4 points de référence, sont appelés Ground Control Points (GCPs) et seront identifiés comme des balises 4.1.3. Ces 4 points, qui délimitent la région à orthorectifier, doivent se trouver sur le même plan que la rivière analysée, et les longueurs entre chacune de ces balises doivent être connues.
L'ordre des balises et les distances qui les séparent doivent correspondre à celles représentés dans la figure suivante :

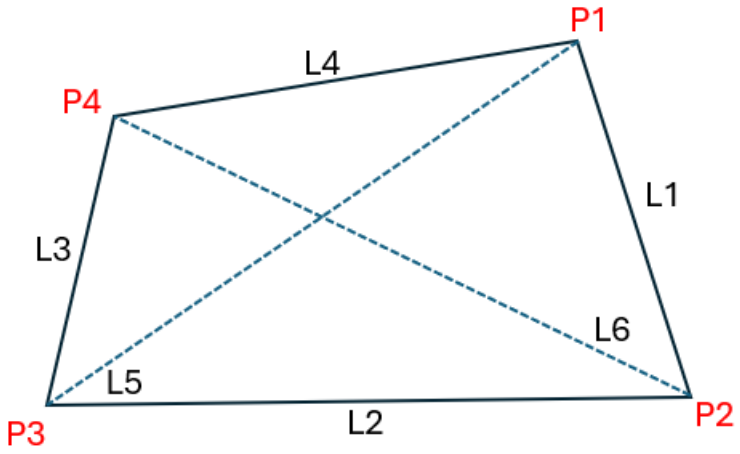


FIGURE 2.17 – Convention de distance utilisée dans l'application

Les coordonnées des balises peuvent être trouvées à partir des 6 distances les séparant fournis par l'utilisateur et peuvent être exprimées de la façon suivante :

$$\begin{cases} L1=\sqrt{(x_2-x1)^2+(y_2-y_1)^2} \\ L2=\sqrt{(x_3-x2)^2+(y_3-y_2)^2} \\ L3=\sqrt{(x_4-x3)^2+(y_4-y_3)^2} \\ L4=\sqrt{(x_1-x4)^2+(y_1-y_4)^2} \\ L5=\sqrt{(x_3-x1)^2+(y_3-y_1)^2} \\ L6=\sqrt{(x_2-x4)^2+(y_2-y_4)^2} \end{cases}$$

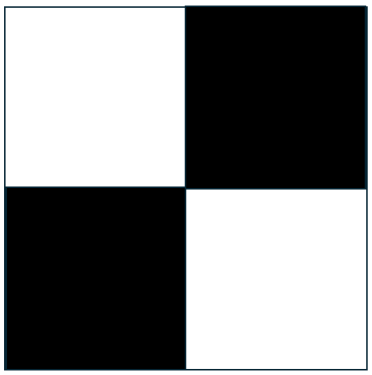
On a donc 6 équations à 8 inconnues dont une qui peut être déduite des autres. Il y a donc 3 degrés de liberté à fixer pour résoudre le système, pour ce faire les hypothèses suivantes sont posées :

— $P3 = (x_3, y_3) = (0, 0)$
— P4 est aligné verticalement à P3 et donc $P4 = (0, y_4)$

Détection des GCPs

La détection automatique des balises (GCPs) est un processus développé par G.Debray et D.Hay [20].
Cette amélioration vise à simplifier l'utilisation de l'application et à garantir l'invariance des points détectés, contrairement à une détection effectuée manuellement par l'utilisateur.
Lors de ces travaux, 5 techniques de pattern matching utilisant un algorithme ont été étudiées, mais aucune n'était compatible avec RiverApp. G.Debray et D.Hay se sont alors tournés vers un concept de traitement d'image basé sur 3 aspects distinctifs d'une balise GCP :

1. Leurs couleurs extrêmes, le noir et le blanc, qui sont rarement présentes dans la nature.
2. Les balises sont composés de 4 carrés uniformes.
3. ces carrés se rejoignent en un seul point au centre et forment un motif de damier unique.



2.2.2 Lien entre vitesse de surface et vitesse moyenne

Comme il a été décrit dans la section 2.1.3, la PIV et la LSPIV permettent d'obtenir des vitesses de surface d'un cours d'eau mais la vitesse nécessaire au calcul du débit de RiverApp est la vitesse moyenne de l'écoulement.

De ce fait, il faut définir une relation entre la vitesse de surface de l'eau suite à l'analyse PIV et la vitesse moyenne de l'eau nécessaire au calcul du débit. Afin de comprendre le lien entre ces 2 vitesses, il est essentiel de connaître le profil de vitesse d'un écoulement.

Le profil de vitesse, comme représenté sur la figure 2.18, suit une loi logarithmique à l'exception des zones proche du lit de la rivière où son profil est linéaire.

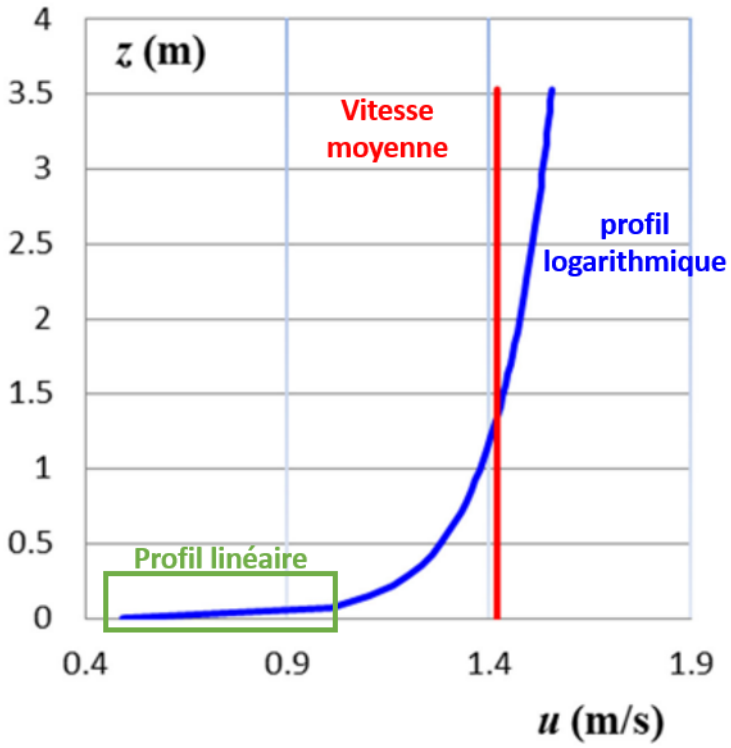


FIGURE 2.18 – Profil de vitesse dans une section et vitesse moyenne issu du cours LGCIV2053 - Hydraulique Fluviale [21]

En situation réelle, le profil de vitesse ne suit pas systématiquement cette loi logarithmique. Plusieurs facteurs naturels tels que le vent, la végétation et les caractéristiques du lit de la rivière peuvent perturber l'écoulement. Cette perturbation modifie le profil de vitesse théorique et est appelée "*Dip phenomenon*".

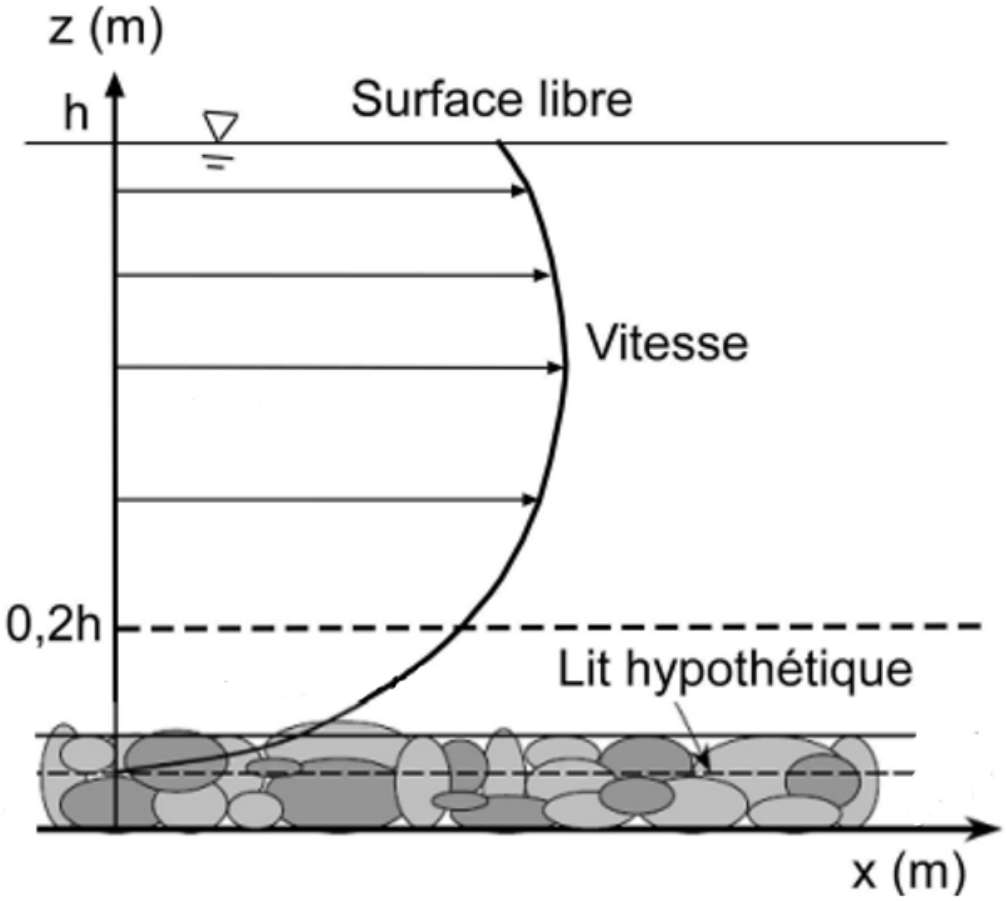


FIGURE 2.19 – Illustration du "*Dip phenomenon*" issu de [22]

Ce phénomène étant lié a de nombreux facteurs, il est difficile de trouver une relation théorique entre la vitesse de surface et la vitesse moyenne. C'est pourquoi, de nombreuses études ont été faites afin de déterminer au mieux un coefficient α.

$$\alpha = \frac{\text{vitesse moyenne de la rivière}}{\text{vitesse de surface issue de l'analyse PIV}} \tag{2.9}$$

Une valeur de α a été déterminé empiriquement, en 2005, lors d'une étude de terrain du groupe Hydro21 ([23]). Le groupe a vu varier ce coefficient entre 0.8 et 0.91 pour différentes verticales et ont de ce fait trouvé une valeur de $\alpha = 0.85$.
Quelques années plus tard, en 2009, Hauet et al.[24] ont également étudié ce coefficient α et on estimé des valeurs de 0.85 ou 0.9 en fonction des cas.
De ce fait, une valeur $\alpha = 0.85$ sera utilisé lors de chaque utilisation du RiverApp dans le cadre de ce travail.

Chapitre 3

Présentation de l'application RiverApp

Le projet RiverApp est une application python conçu pour estimer le débit d'eau d'une rivière en analysant une vidéo de l'écoulement. Elle gère le pré-traitement des images, l'analyse PIV et inclut également des étapes supplémentaires pour faciliter la visualisation des résultats de débit.

3.1 Première version de RiverApp

Le moteur de calcul de la première version de RiverApp, créée en 2019-2020, a été codé manuellement sans utiliser de librairies spécialisées dans les analyses PIV et fonctionnait selon le flowchart ci-dessous 3.1.

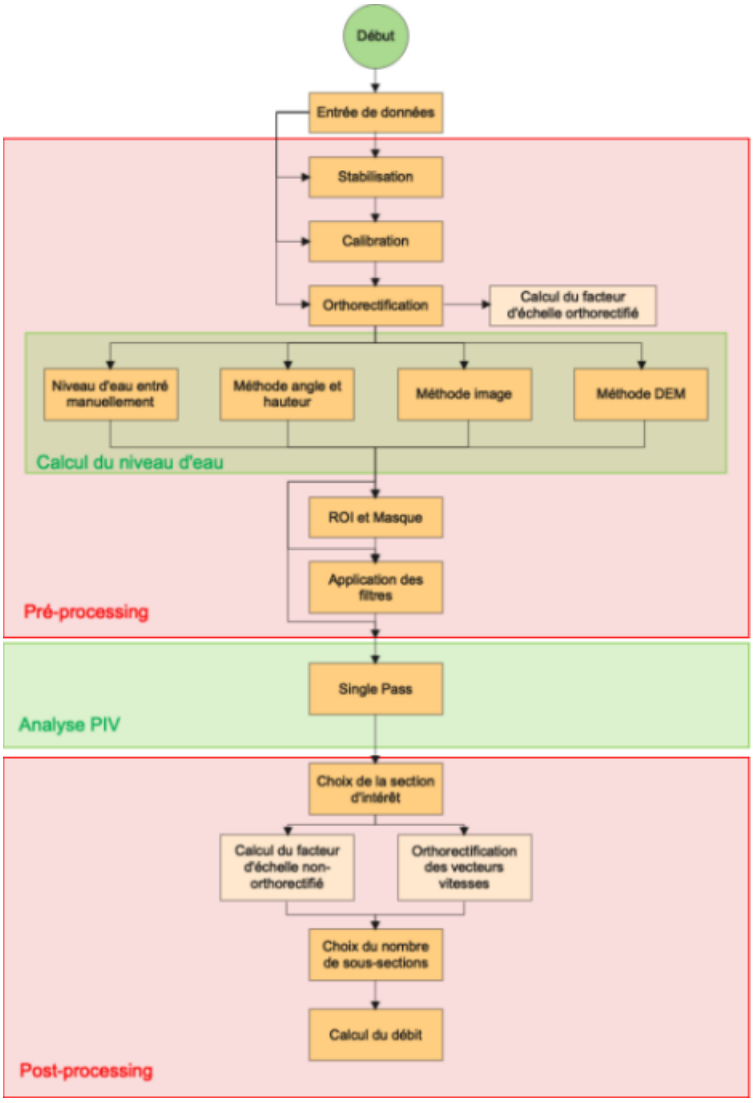


FIGURE 3.1 – Flowchart RiverApp V1

P. Laurent et C. Dufromont [1] ont fourni une première série de résultats en utilisant cette version et les valeurs obtenues se rapprochaient du débit réel calculé par Aqualim [25] mais avec une marge d'erreur notable.
De plus, l'interface de l'application n'était pas intuitive et manquait de clarté comme on peut le voir sur l'image ci-dessous 3.2.

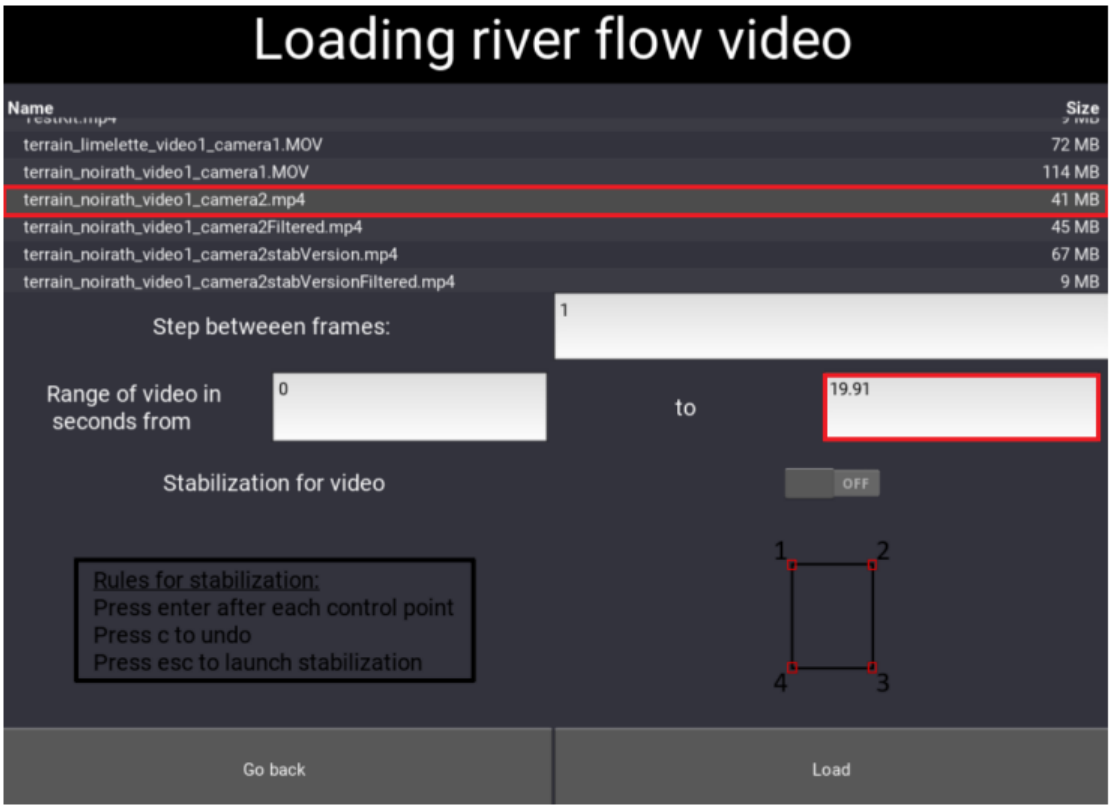


FIGURE 3.2 – Interface de la première version de RiverApp

3.2 Version actuelle de RiverApp

3.2.1 Nouvelle application

Étant donné que l'ancienne version produisait des résultats avec une erreur non-négligeable, G.Debray et D.Hay[20] ont cherché des applications similaires à RiverApp. Parmi les applications testées, la bibliothèque Python PyORC s'est démarquée grâce à ses nombreux avantages. Elle prend en charge plusieurs étapes du pré-traitement, de l'analyse PIV, ainsi que des étapes du post-traitement. De plus, une comparaison entre RiverApp et PyORC a montré que cette dernière offrait des résultats plus constants et précis.
Ainsi, PyORC a servi de base solide pour redévelopper l'application et la rendre plus performante.
Par conséquent, la version actuelle de RiverApp a été développée autour de la librairie PyORC, avec une nouvelle interface plus intuitive, qui sera détaillée dans la section suivante.

3.2.2 Guide utilisateur

Récupération de l'application RiverApp

Il est tout d'abord important de noter que l'application fonctionne sur base de python 3.10. Il n'est pas garanti qu'elle fonctionne correctement avec d'autres versions de Python.

Dans un premier temps, il convient de récupérer le code source de l'application. Pour installer le RiverApp, aller sur *https ://forge.uclouvain.be/hydraulics-simulations/riverapp* et télécharger le dossier **.zip** comme indiqué sur les figures 3.3 et 3.4 et d'extraire tous les éléments du fichier.

Pour récupérer l'application, il est également possible de cloner le code avec *git* en insérant les commandes suivantes dans le terminal de votre environnement de développement intégré (IDE) :

— git clone https ://forge.uclouvain.be/hydraulics-simulations/riverapp.git
— cd riverapp

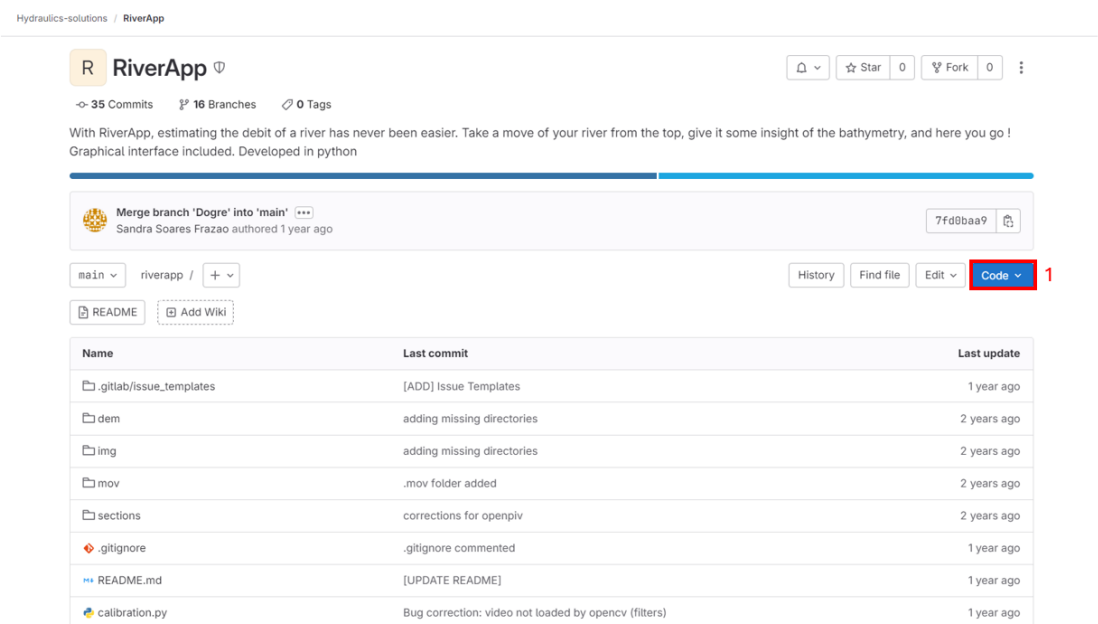


FIGURE 3.3 – Code source depuis le Forge

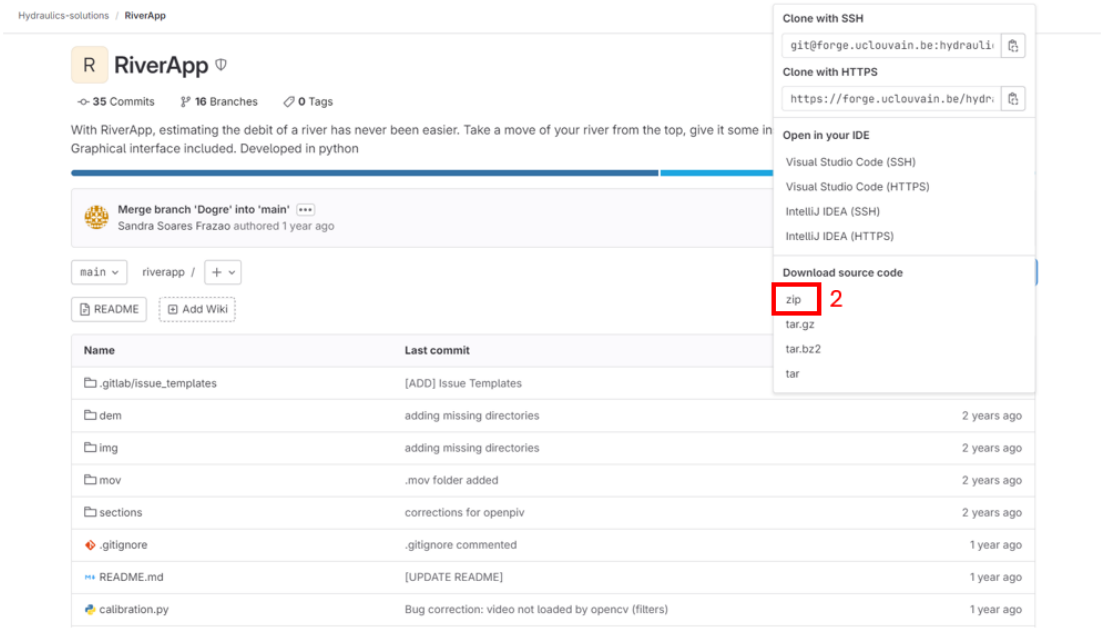


FIGURE 3.4 – lien .zip

Environnement virtuel

L'environnement virtuel est essentiel au bon fonctionnement de l'application. C'est un dossier autonome qui contient une installation de Python ainsi qu'un certain nombre de paquets et modules additionnels qui ne font pas partie de la bibliothèque standard [26].
Pour installer l'environnement virtuel nécessaire à l'application, il faut introduire les commandes suivantes dans le terminal de votre IDE [27].

- pip install libs/pyproj-3.3.1-cp310-cp310-win_amd64.whl
- pip install libs/Shapely-1.8.2-cp310-cp310-win_amd64.whl
- pip install -r requirements.txt
- pip install libs/Cartopy-0.20.2-cp310-cp310-win_amd64.whl

Lancement de l'application

tUne fois le RiverApp installé, exécuter le programme python main.py, le lancement de l'application peut prendre quelques secondes avant que la première fenêtre n'apparaisse (3.5). Cette fenêtre comprend :

1. Tous les projets déjà créés, chacun de ces projets peuvent être téléchargés ou supprimés.
2. Une barre de recherche pour rechercher un projet particulier

3. un bouton upload pour importer un projet déjà existant (ne fonctionne pas)
4. un bouton + pour créer un nouveau projet

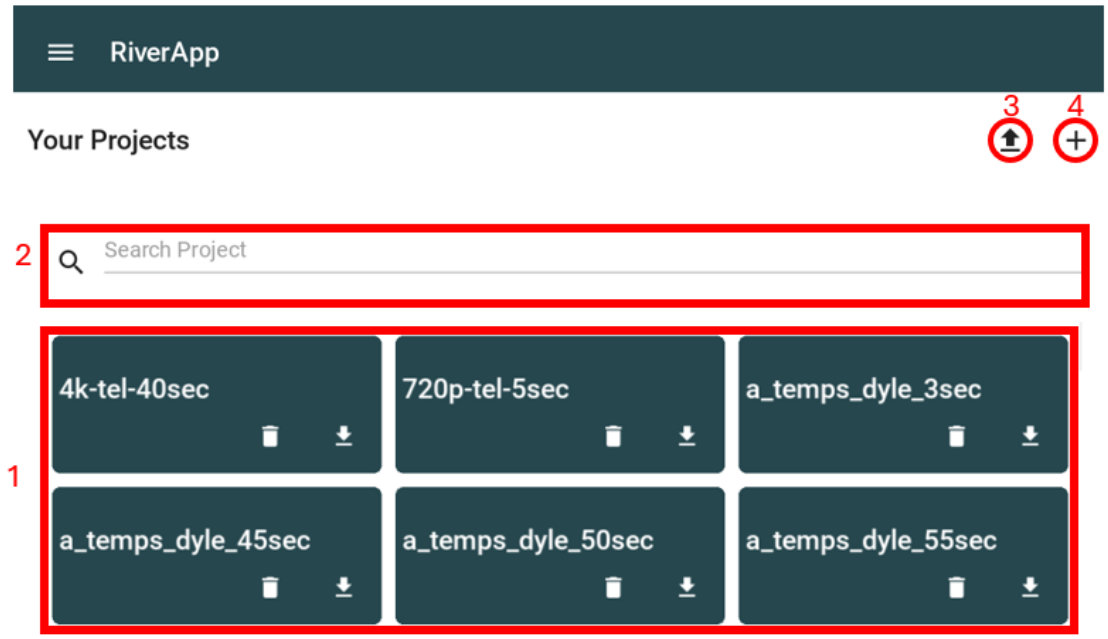


FIGURE 3.5 – Première fenêtre de RiverApp

En cliquant sur le bouton + (point 4 de la figure 3.5) une fenêtre de création de projet apparaît, donner un nom à ce projet et cliquer sur la case "new".

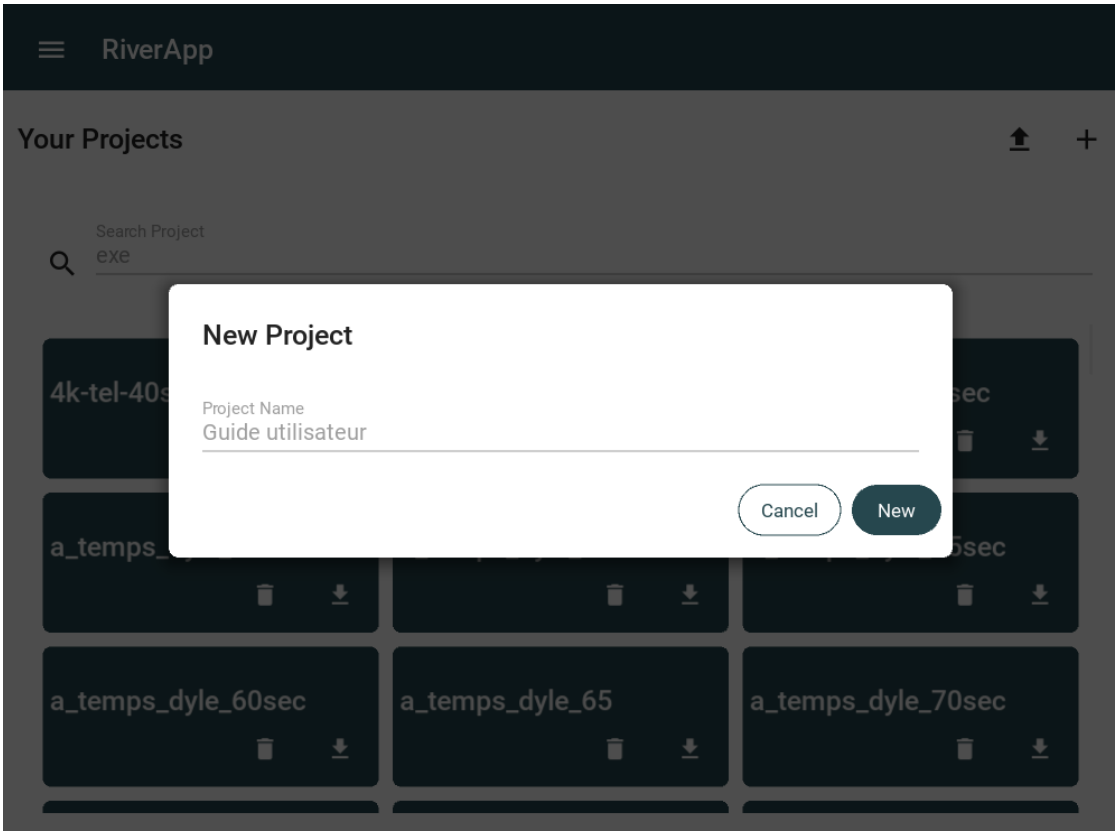
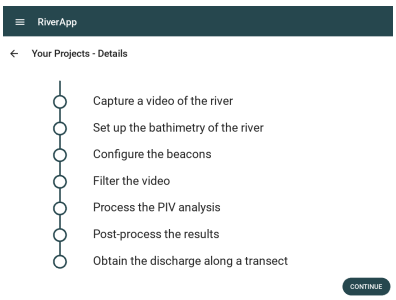


FIGURE 3.6 – Création d'un projet

Une fois le projet créé, un détail des différentes étapes nécessaires au bon fonctionnement de l'application apparaît. Le projet sera considéré comme complet et fournira le débit du cours d'eau lorsque toutes les étapes seront marquées d'un "v".



Les différentes étapes seront expliquées lors des points ci-dessous.

Choix et configuration de la vidéo

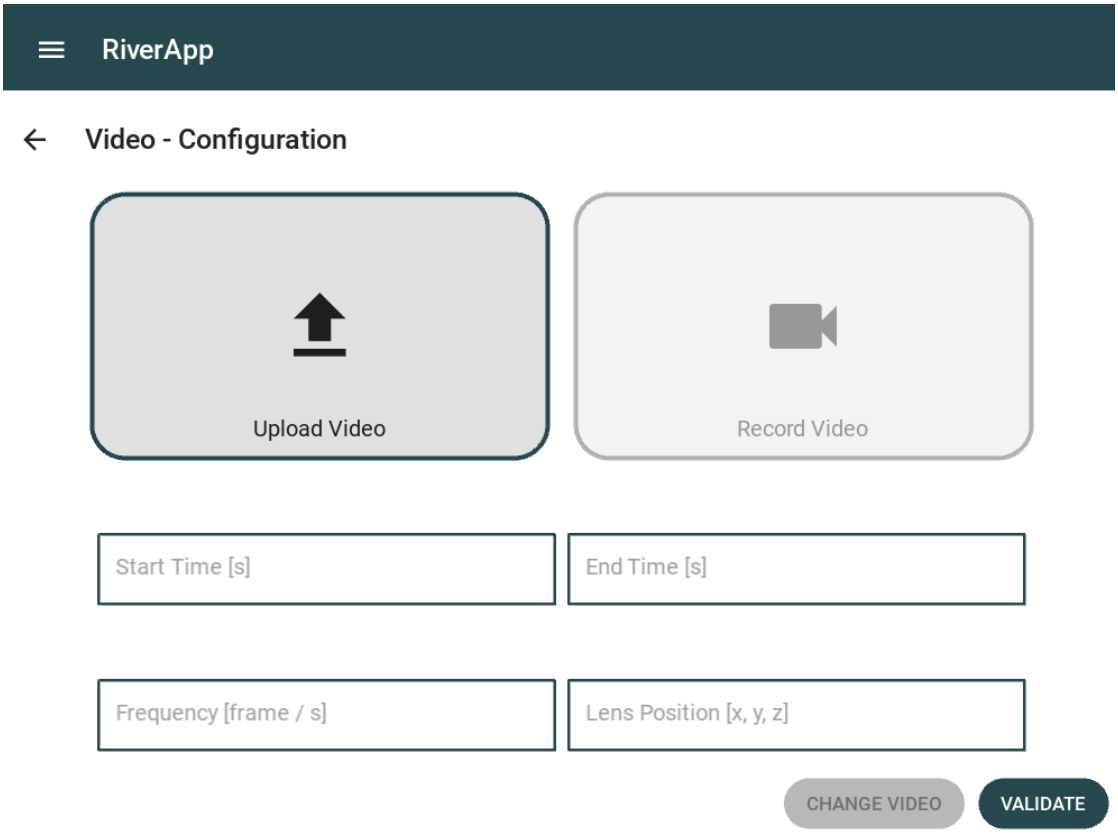


FIGURE 3.7 – Fenêtre de configuration de la vidéo

Une fois votre projet créé, la fenêtre représentée à la figure 3.7 devrait apparaître. Cette fenêtre comprend les boutons et cases suivantes :

- **Upload Video** : Après avoir cliqué sur ce bouton, il faut sélectionner la vidéo à analyser. Pour ce faire, naviguez dans les dossiers de votre ordinateur jusqu'à trouver la vidéo. Les étapes de sélection de la vidéo sont illustrées par les figures 3.10 et 3.11.
  Une fois upload, il est possible de la visionner, de la mettre en pause et de couper le son, comme le montre la figure 3.8.
  Remarque *il est important que les vidéos soient en format .mp4*
- **Change video** : Une fois qu'une vidéo est choisie, le bouton *change video* est utilisable et permet de sélectionner une autre vidéo, si celle initialement choisie n'est pas la bonne.
- **Record Video** : Actuellement, ce bouton ne fonctionne pas. Étant donné que l'application pourra être utilisée par un smartphone dans le futur, ce bouton aura pour but de pouvoir prendre une vidéo depuis l'application.

— **Start Time** : Indiquer la seconde de la vidéo à laquelle on souhaite commencer l'analyse.
Remarque *l'analyse de la vidéo ne peut pas commencer à 0 seconde car l'application ne réalise pas correctement l'analyse PIV et il faut faire attention à bien convertir les minutes en secondes.*
— **End Time** : Indiquer la seconde de la vidéo à laquelle on souhaite terminer l'analyse.
— **Frequency** : Indiquer le nombre d'images par seconde à analyser.
Remarque *Le nombre d'image par seconde donnant les meilleurs résultat est de **1**.*
— **Lens Position** : Indiquer la position de la caméra à partir de laquelle la vidéo est prise. Les positions [x,y,z] sont à encoder à partir de la balise se situant en bas à gauche de l'image selon le système d'axe de la figure 3.9. Cette position n'est pas une valeur par défaut, celle-ci change en fonction des paramètres de mesure. Dans le cas de la figure 3.8 , la caméra est à $3.65m$ en x et $-5.32m$ en y et $3.74m$ au dessus de la balise.
— **Validate** : Valide la configuration vidéo une fois toutes les données ci-dessus remplie.

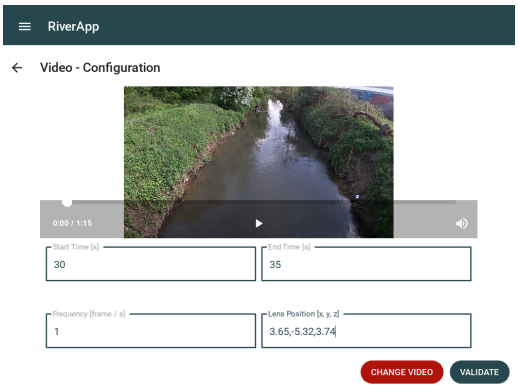


FIGURE 3.8 – Configuration de la vidéo

FIGURE 3.9 – Repère de la Lens Position

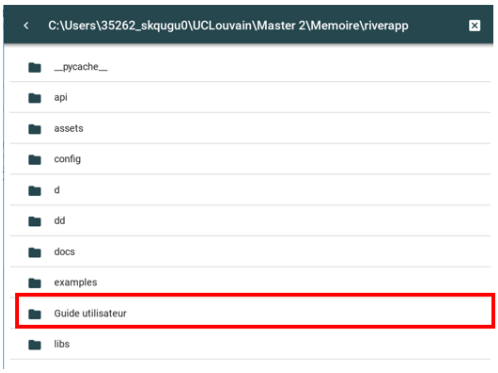


FIGURE 3.10 – Choix de la vidéo

FIGURE 3.11 – vidéo.mp4

Configuration de la bathymétrie

Après avoir validé la configuration de la vidéo, la fenêtre de configuration de la bathymétrie devrait apparaître comme représentée à la figure 3.12. Cette fenêtre comprend les boutons et cases suivantes :

- **Upload Bathymetry** : après avoir cliqué sur ce bouton, il faut sélectionner la bathymétrie liée à la vidéo choisie dans la section précédente. Pour ce faire, il faut naviguer dans les dossiers de votre ordinateur et aller là où se trouve la bathymétrie en question. Le choix de la bathymétrie est illustrée par la figure 3.14 et doit être sous la forme illustrée par la figure 3.15 Une fois la bathymétrie upload, un affichage de celle-ci apparaît comme dans la figure 3.13.
  Remarque *il est important que la bathymétrie soit en format .txt et que la première ligne soit [x,y].*
- **Change Bathymetry** : une fois qu'une bathymétrie est choisie, le bouton *change bathymetry* apparaît et permet d'en sélectionner une autre si celle initialement choisie n'est pas la bonne.
- **Water level** : indiquer la hauteur moyenne sur la section étudiée de la rivière.
- **Surface coefficient** : indiquer le coefficient de surface utilisé.
  Remarque *Lors de ce travail, nous utilisons la valeur trouvée par le groupe Hydro21 [23]*
- **Validate** : valide la configuration de la bathymétrie une fois toutes les données ci-dessus remplies.

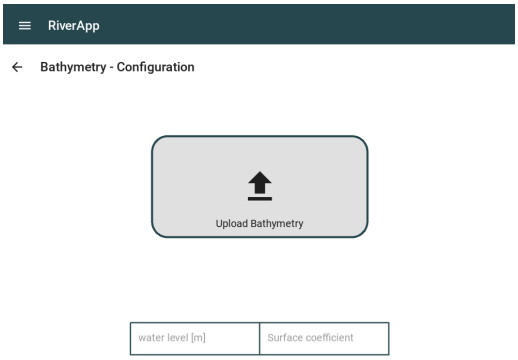


FIGURE 3.12 – Fenêtre de configuration de la Bathymétrie

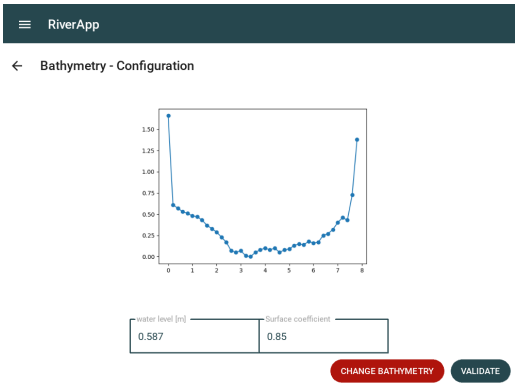


FIGURE 3.13 – configuration de la bathymétrie

raccourcir le fichier bathy type.

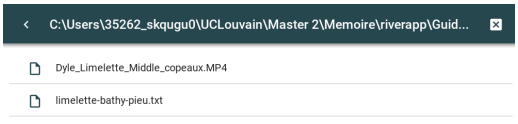


FIGURE 3.14 – Choix de la bathymétrie

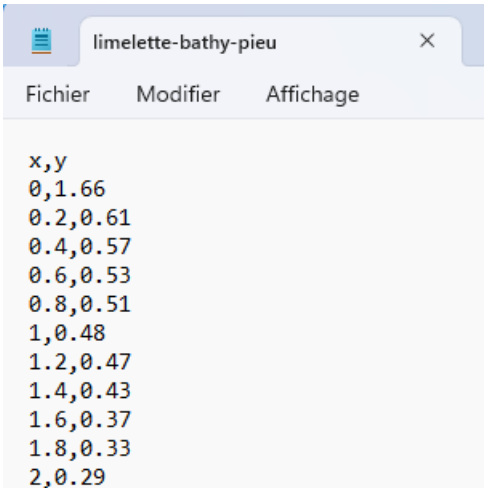


FIGURE 3.15 – Fichier de bathymétrie type

Détection des balises

Une fois que nous avons toutes les données de la rivière étudiée et une vidéo de celle-ci, nous pouvons effectuer une analyse PIV. Cependant, pour que l'analyse soit correcte, il nous faut une vidéo avec un angle de vue de 90° et sans distorsion. C'est à cette étape que l'orthorectification intervient.
Si la vidéo est prise à 90° depuis un drone, il est nécessaire de l'orthorectifier afin de corriger l'effet fish-eye de la caméra. Si la vidéo est prise depuis une berge ou un pont, il faut corriger l'effet fish-eye et ajuster l'angle de prise de vue pour obtenir

un angle de 90°, rendant l'orthorectification encore plus nécessaire.

Afin d'accomplir cette tâche, RiverApp a besoin de 4 points de référence qui sont ici nos balises et les distances les séparant.
Comme le montre la figure 3.16, dans un premier temps l'application essaie de détecter les balises sur l'image. Toutefois, dans la majorité des cas, l'application a du mal à détecter les balises ou alors détecte un point hasardeux de l'image. De ce fait, il est possible de bouger les différents points sur l'image et de les positionner à la main sur les balises comme il a été fait sur la figure 3.17.
Remarque : *Il est important que l'ordre des points soit respecté et que ceux-ci soient dans l'ordre suivant :*

- *P1 en haut à droite*
- *P2 en bas à droite*
- *P3 en bas à gauche*
- *P4 en haut à gauche*

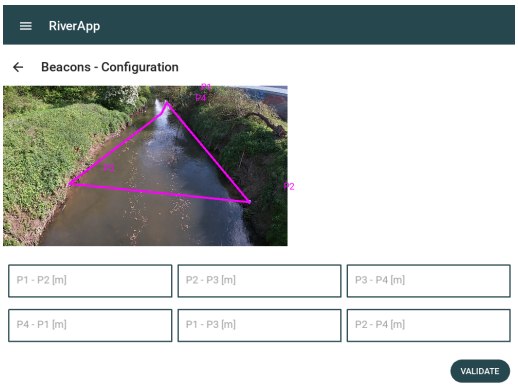


FIGURE 3.16 – Fenêtre de positionnement des balises

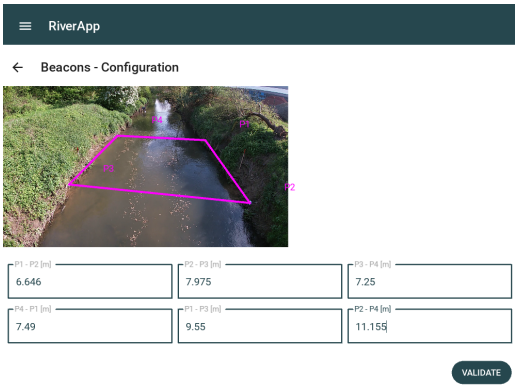


FIGURE 3.17 – Correction positionnement des balises

Ensuite, il faut entrer les distances mesurées séparant les balises lors de la prise de mesure, en respectant les points indiqués dans chacune des cases. Il est préférable d'y indiquer des distances mesurées à l'aide d'une station GPS, mais des distances mesurées manuellement fonctionnent également correctement.

Une fois que les points sont correctement placés sur l'image et que toutes les distances sont encodées, on peut valider le positionnement des balises en cliquant sur le bouton *Validate*.

Filtre et analyse PIV

Maintenant que l'orthorectification est terminé, il est possible de procéder à l'analyse PIV.

Dans les fenêtres d'affichage ci-dessous, il est normalement possible d'appliquer des filtres à la vidéo avant de procéder à l'analyse PIV. Cependant, ces fonctionnalités ne sont pas encore opérationnelles et seul le bouton *Launch PIV* est fonctionnel et permet de lancer l'analyse PIV.

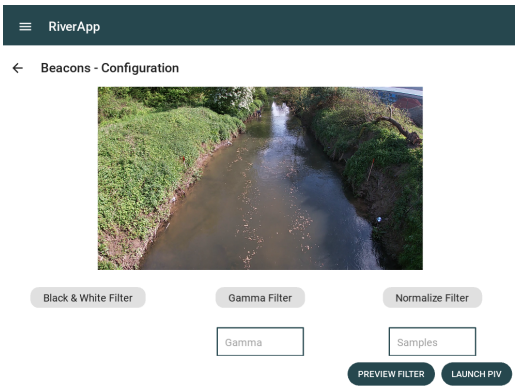


FIGURE 3.18 – Filtre

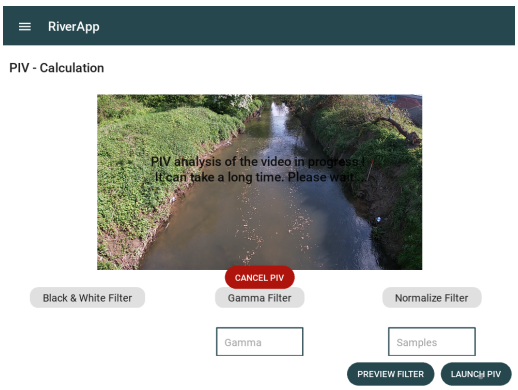


FIGURE 3.19 – Analyse PIV

L'analyse PIV se fait sur la fenêtre de la figure3.19 en fenêtre d'attente. Actuellement, il est possible de performer celle-ci soit localement sur sa machine ou soit sur un serveur à distance si l'appareil est connecté à internet. L'analyse depuis un serveur est utile dans le cas où le calcul serait trop lourd pour la machine utilisée ou que la mémoire n'est pas suffisante.
Remarque : *Si la fenêtre de l'application ne répond plus durant l'analyse PIV, ce n'est pas grave. Le calcul continue de se faire en arrière-plan, il suffit donc d'attendre qu'il se termine. De plus, si l'analyse dure plus de 600 secondes, l'application s'arrêtera automatiquement (timeout).*

Configuration transect

Lorsque l'analyse PIV est terminée, il faut déterminer la section de la rivière à analyser dans la zone de recherche.
Dans cette étape, le transect est défini comme la ligne le long de laquelle cette section est analysée, c'est-à-dire que la ligne du transect doit se trouver au-dessus de la bathymétrie étudiée. De la même manière que les points des balises, il est possible de placer à la main les points du transect.
Afin d'obtenir les résultats les plus proches de la réalité possible, il est conseillé de placer les points du transect uniquement à la surface de l'eau de la bathymétrie étudiée et non

sur le lit de la rivière comme réalisé sur la figure 3.21, l'application corrigera elle-même la section étudiée grâce à l'orthorectification. Il est également conseillé de ne pas placer les points sur les berges de la rivière, car cette manipulation amène dans la majorité des cas des imprécisions.

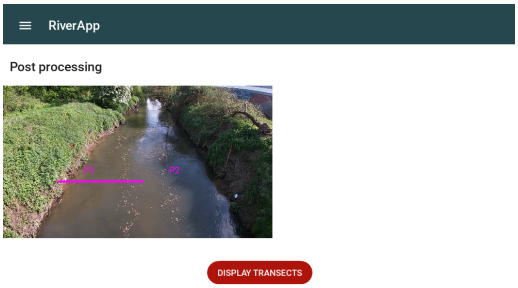


FIGURE 3.20 – Fenêtre du positionnement du transect

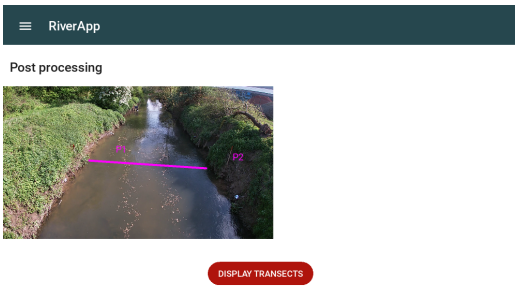


FIGURE 3.21 – Correction du positionnement du transect

Maintenant le transect correctement positionné, on peut cliquer sur le bouton *Display Transects* pour obtenir le débit de la rivière.

Débit calculé par RiverApp

Nous avons désormais le débit de notre rivière qui est donné et le champ vectoriel de celui-ci affiché sur la ligne de transect comme indiqué sur la figure ci-dessous.

FIGURE 3.22 – Débit calculé par RiverApp

Après Résultat

Après avoir obtenu le débit final du projet crée, il est possible de revenir voir le résultat obtenu lorsque l'on relance l'application. Il suffit d'entrer le nom du projet dans la barre de recherche et de cliquer sur le projet en question.
On peut voir sur la figure 3.24, que lorsque le projet est fini, chacune des étapes est notifiée d'un v. Cependant il est impossible de modifier les paramètres du projet depuis l'application. Pour tester le projet avec d'autres paramètres, il y a 2 possibilités, soit recréer un projet en changeant les paramètres à tester(3.2.1) soit modifier les paramètres directement dans le fichier JSON.
Remarque : ***Lors de la recherche de projet, bien faire attention aux majuscules dans le nom de celui-ci s'il y a une.***

FIGURE 3.23 – Recherche de projet

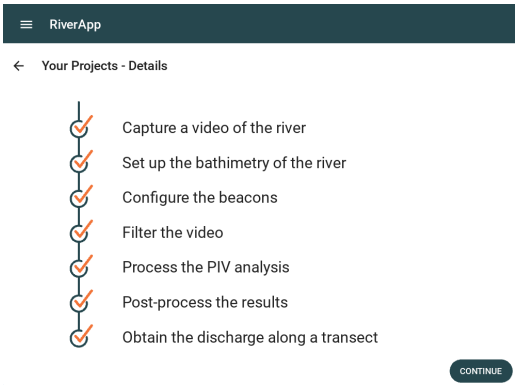


FIGURE 3.24 – Détails des étapes terminées du projet

Modification de projet

Pour pouvoir modifier un projet déjà existant, il faut chercher son fichier *.Json*. Pour ce faire, il faut aller dans le dossier *Projects* du dossier RiverApp et rechercher le projet en question comme l'indiquent les figures ci-contre.

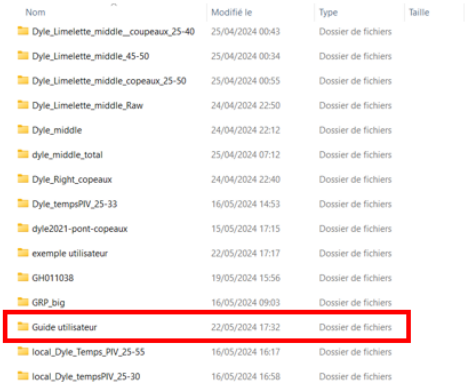


FIGURE 3.25 – Organisation projet

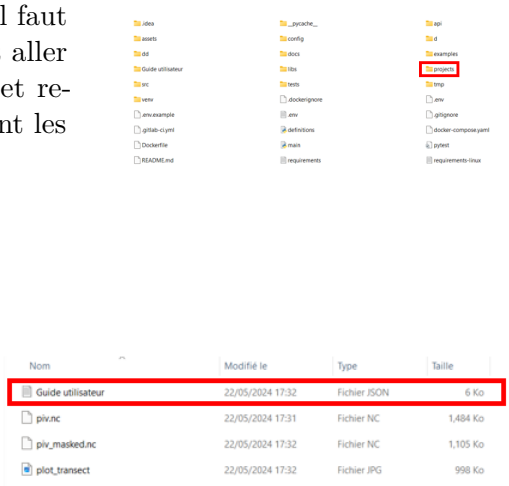


FIGURE 3.26 – Projet

Maintenant que l'on est dans le fichier Json, nous pouvons remettre à "0" les paramètres que l'on souhaite. Si l'on souhaite par exemple refaire le transect de notre projet, il faut changer le "*post_process*" : *true* en "*post_process*" : 0 et sauvegarder de la manière réalisée sur les figures ci-dessous.

Remarque : ***Par exemple, si l'on souhaite refaire la configuration des balises du projet, il faut remettre tous les paramètres suivants également à 0.***

FIGURE 3.27 – fichier .JSON

FIGURE 3.28 – fichier .JSON modifié

Chapitre 4

Contribution au mémoire

4.1 Kit d'orthorectification

Pour rappel, l'objectif de ce travail de fin d'étude est de mesurer le débit d'un cours d'eau de manière non-intrusive à partir d'une vidéo de l'écoulement. Les vidéos peuvent être capturées depuis un drone, un pont ou une berge de la rivière. Dans chaque cas, une orthorectification est nécessaire, ce qui implique la mise en place de quatre points de référence et la connaissance de la distance qui les sépare.

Actuellement, afin d'obtenir une distance connue entre ces points de référence, des balises GRPs doivent être placées sur les berges de la rivière. Cette méthode présente plusieurs inconvénients :

- les balises GRPs sont surélevés par rapport au niveau de l'eau et apporte de l'imprécision lors de l'orthorectification.
- La distance entre les repères peut être imprécise due aux différents obstacles sur la berge.
- La végétation sur les berges peut rendre les balises difficilement visibles.
- Dans la majorité des cas, il est nécessaire d'entrer dans l'eau pour mesurer la distance entre les repères, compromettant le caractère non-intrusif.
- L'accès aux berges peut être difficile ou dangereux.
- Le placement des GRPs et la mesure de distance entre elles prennent beaucoup de temps.

Pour remédier à ces problèmes, un kit d'orthorectification a été conçu sous la forme d'un dispositif rectangulaire pouvant être jeté à l'eau. Ainsi, chaque vidéo contiendrait quatre points de référence situés le plus près possible de la surface de l'eau, avec des distances fixes et connues.
Ce chapitre présentera le cahier des charges du kit, la première ébauche du dispositif, une seconde version du kit répondant à davantage de contraintes, une version plus robuste du kit, et enfin une comparaison des différentes versions.

4.1.1 Cahier des charges

Grâce au mémoire de Laurent P. et Dufromont C.[1], une liste des contraintes plus complète que le kit doit respecter a été mise en place, basée sur leur premier prototype :

- Les six distances entre les quatre points doivent être fixes et connues.
- Le kit doit être capable de flotter à la surface de l'eau.
- Les coins du kit doivent être positionnés le plus près possible de la surface de l'eau.
- Le kit doit rester maniable par une seule personne et rester léger.
- Le kit doit être modulable et disponible en différentes dimensions en fonction de la taille du cours d'eau.
- la taille des balises doit être assez grand pour être détectée par l'application.

4.1.2 ancien Kit

FIGURE 4.1 – Première ébauche du kit réalisé par Laurent P. et Dufromont C. [1]

La première version de kit d'orthorectification, réalisé par Laurent P. et Dufromont C.[1], consiste en un carré en bois de palette de 50cm x 50cm rigidifié par une planche en diagonale. Les coins du dispositif ont été peints de manière à imiter les balises GRPs et les 6 distances nécessaires à l'orthorectification ont été mesurées.

Bien que ce kit réponde à la majorité des critères cités dans la section4.1, sa taille et celle des points de référence (balise de 10 cm de côté) se sont avérées insuffisantes pour la plupart des cas.
Lors des prises de mesures, l'application avait des difficultés à détecter les balises GRPs en raison de leur petite taille. De plus, la zone de recherche de 50 cm x 50 cm s'est avérée inadéquate dans de nombreux cas. Comme l'ont constaté Laurent P. et Dufromont C.[1], l'orthorectification n'a pas toujours permis le calcul ou bien les résultats obtenus variaient considérablement par rapport à la valeur réelle du débit.

En raison de sa taille limitée, ce kit s'est révélé peu utilisable dans de nombreuses situations, malgré sa maniabilité et sa légèreté.

4.1.3 Kit en PVC

Suite à la première ébauche du kit qui ne répondait pas au critère modulable, il a été nécessaire de créer un nouveau kit répondant à ces exigences. Pour tester un premier prototype, le PVC a été choisi en raison de ses composants standardisés, légers et flottants.
Pour créer un kit modulable, une base a été conçue, comme illustrée sur la figure ci-contre, permettant d'ajouter des éléments pour augmenter la taille du kit. L'objectif était de réaliser une base avec des prolongements à 90° les uns des autres et d'y emboîter des tubes de 1 mètre de long chacun.

Le choix de 90° entre chaque prolongement permet, si ceux-ci sont de longueur identique, d'avoir un kit aux longueurs équivalentes et ainsi avoir une distance entre les balises identiques et connus à chaque ajout d'élément.
Cependant, dans ce cas-ci, le matériel a disposition ne permettait pas d'avoir une base symétrique, rendant cette configuration impossible.

Ce prototype est disponible en 3 tailles différentes. La plus petite taille permet d'atteindre une envergure de 2,44 mètres, rendant le kit utilisable dans de petites rivières. La taille intermédiaire offre un compromis entre maniabilité et portée et dernièrement la plus grande taille permet de couvrir un espace plus important avec une envergure allant jusqu'à 6,31 mètres. Ses différentes tailles permettent au kit d'être utilisé dans un large éventail de rivières, répondant aux besoins spécifiques de chaque projet.

Pour ce kit en PVC, le matériel suivant était nécessaire pour chaque taille de kit :
— une base en PVC
— 4 tubes en PVC de 1m avec crochet
— 4 tubes coudés
— 4 balises avec socle
— Cordes de taille adéquate

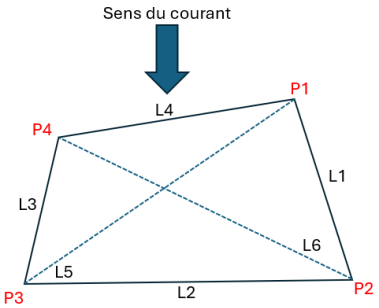
FIGURE 4.2 – tube en PVC de 1m

FIGURE 4.3 – tube coudé

FIGURE 4.4 – balise avec socle

FIGURE 4.5 – éléments emboîtés

Dans la partie suivante ci-dessous, nous comparons les distances théoriques entre les balises de chaque taille de kit et les distances qui ont été mesurés lorsque nous plaçons celui-ci dans l'eau. Pour éviter que ces distances ne soient trop grandes et que le kit soit totalement inutilisable, chaque membrure du kit est attachée à l'aide d'une corde pour contreventer chacun d'entre eux.
Les distances mesurées sur le terrain sont de la façon décrite sur l'image ci-contre.



Kit en PVC petite taille

Sur la figure ci-dessous, on peut voir le kit de petite taille dans la Dyle, le kit ne parait pas adapté pour une rivière aussi grande.

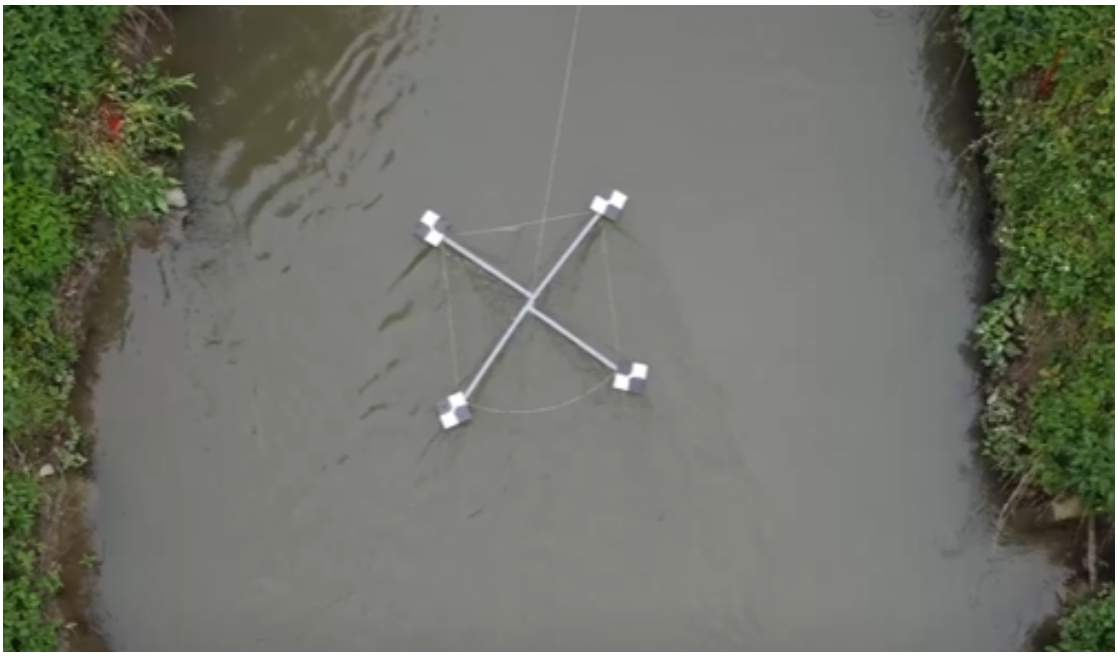


FIGURE 4.6 – Petit kit en PVC sur la Dyle

On peut également voir sur cette image que certaines cordes utilisées pour contreventer les éléments fonctionnent, mais il y a quand même une longueur entre les éléments qui est modifiée, comme le montre le tableau ci-dessous.

Petit kit	**L1**	**L2**	**L3**	**L4**	**L5**	**L6**
Longueur théorique [m]	1.53	1.67	1.60	1.62	2.44	2.2
Longueur avec courant de la rivière [m]	1.6	1.74	1.64	1.43	2.33	2.19
Erreur sur la longueur [%]	4.57	4.19	2.50	11.73	4.51	0.45

Le kit de petit taille est facile à manipuler et à mettre à l'eau, une personne seule peut s'en occuper. Une fois dans l'eau, il reste facile à manoeuvrer et à maintenir en place face au courant de la rivière mais l'erreur sur les longueurs une fois le kit dans l'eau, est très important.
Lorsque celui-ci est porté, ses membres fléchissent et ont une flèche maximum de :

$$f_{max} = 0.25[m] \tag{4.1}$$

kit en PVC moyenne taille

Sur la figure ci-dessous, on peut voir le kit de moyenne taille dans la Dyle qui est un peu plus adapté à la largeur de la rivière mais, ne recouvre pas l'entièreté de celle-ci.

FIGURE 4.7 – Moyen kit en PVC sur la Dyle

Comme observé sur le kit de petite taille, les cordes utilisées au contreventement fonctionnent mais la marge d'erreur sur les longueurs restent non négligeables.

Moyen kit	**L1**	**L2**	**L3**	**L4**	**L5**	**L6**
Longueur théorique [m]	3.00	2.98	3.01	3.05	4.33	4.18
Longueur avec courant de la rivière [m]	3.12	2.98	3.03	2.88	4.32	4.17
Erreur sur la longueur [%]	4.00	0.00	0.66	5.57	0.23	0.24

Le kit de moyenne taille est difficilement manipulable seul mais sa mise à l'eau reste possible pour une seule personne. Une fois le kit face au courant de la rivière, il est préférable d'être à 2 personnes.
Lorsque celui-ci est porté, ses membres fléchissent et on une flèche maximum de :

$$f_{max} = 0.65[m] \tag{4.2}$$

kit en PVC grande taille

Sur la figure ci-dessous, on peut voir le kit de grande taille dans la Dyle qui recouvre pratiquement entièrement la largeur de la rivière.

FIGURE 4.8 – Grand kit en PVC sur la Dyle

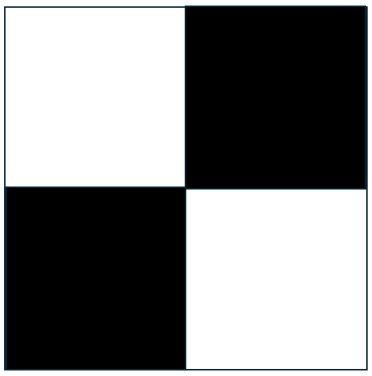
Comme observé avec les deux tailles de kits précédentes, certaines cordes utilisées pour stabiliser les éléments fonctionnent, mais la marge d'erreur reste encore trop importante.

Grand kit	**L1**	**L2**	**L3**	**L4**	**L5**	**L6**
Longueur théorique [m]	4.35	4.22	4.49	4.37	6.16	6.31
Longueur avec courant de la rivière [m]	4.45	4.56	4.50	4.17	6.13	6.3
Erreur sur la longueur [%]	2.30	8.06	0.22	4.58	0.49	0.16

Le kit de grande taille est impossible à manipuler seul et sa mise à l'eau est laborieuse et assez dangereuse malgré le fait que celui-ci reste léger, car il n'en reste pas moins encombrant. Une fois le kit face au courant de la rivière, il faut être à 2 pour pouvoir le maintenir en place.
Lors que celui-ci est porté, ses membres fléchissent et ont une flèche maximum de :

$$f_{max} = 1.37[m] \tag{4.3}$$

Balise modulable



Dernièrement, comme le système de balise du kit est modulable, des tailles différentes de balises en plastique ont également été pensé. Ainsi, il était possible de tester des tailles de balises différentes et à quel point l'application repère celle-ci en fonction de leur taille.
À ce jour, il existe uniquement 2 tailles différentes :

- 4 balises de 50x50cm
- 4 balises de 1x1m

Ces balises ont également été testées sur les berges de la rivière et peuvent être utilisées sur les autres kits.

4.1.4 Kit en bois

Étant donné la faible résistance du PVC et sa tendance à se déformer facilement, un second prototype de kit a été conçu en bois. L'avantage du bois est qu'il a des propriétés mécaniques intéressantes et une densité plus faible que l'eau, lui permettant ainsi de flotter naturellement.

Démarche de conception

Les dimensions du kit en bois ont été établies en tenant compte des résultats obtenus avec le premier prototype. Pour que ce kit soit pratique et fonctionnel, il devait remplir les conditions suivantes :

- Suffisamment léger pour être déplacé seul.
- Chaque pièce du kit doit être facilement transportable.
- Le kit ne doit pas être trop encombrant une fois monté.
- La taille maximale du kit doit permettre de couvrir la largeur de nombreuses rivières.
- Encastrement à la base du kit
- une flèche maximale de $\frac{L}{100}$.
- Disponible en trois tailles de modules différents.

La première étape consistait à concevoir une base sur laquelle des extensions peuvent être ajoutées afin qu'il soit modulable. Cette conception s'inspire de la première ébauche du kit 4.1 caractérisé par une forme carrée de 50x50 cm et une planche diagonale pour rigidifier l'ensemble. En partant d'une base carrée, chaque taille de kit conserve une forme carrée, simplifiant ainsi les mesures pour les différentes tailles.

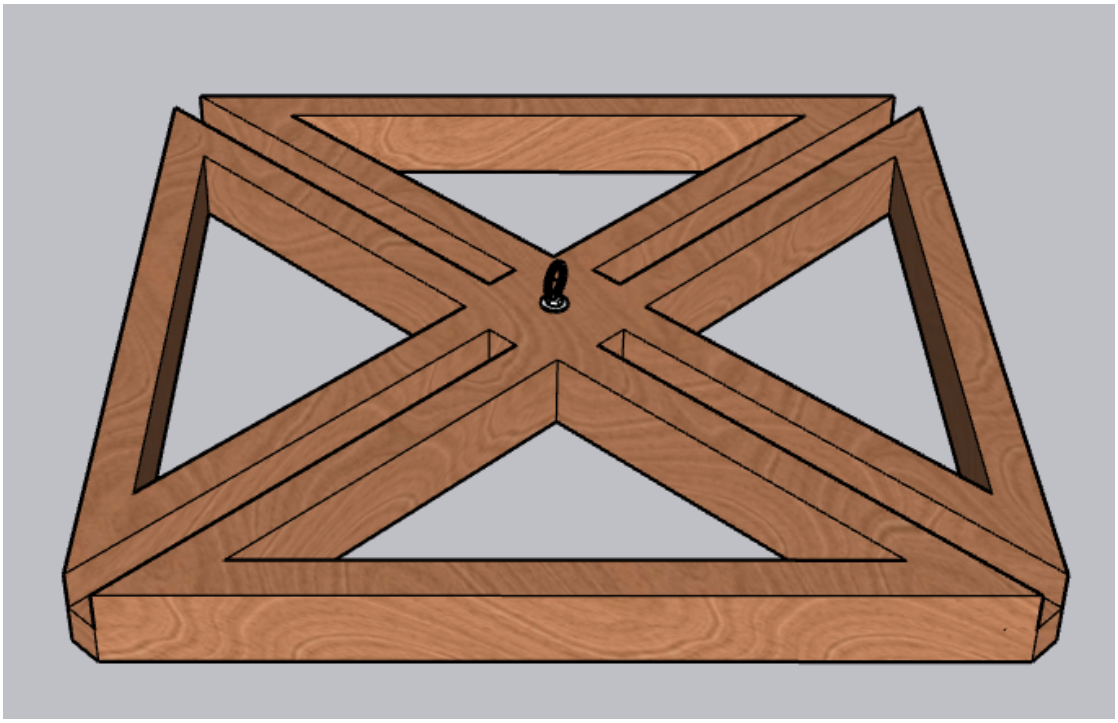


FIGURE 4.9 – Base du kit en bois

En raison de la forme spéciale de la base de ce kit, il n'est pas possible de la fabriquer en bois résineux ou feuillu. Par conséquent, un bois lamellé-collé GL24h est utilisé. À partir de cette base, il est encore possible de modifier les dimensions des extensions futures en fonction des calculs effectués.
Les quatre trous dans la base allègent la structure, facilitent son transport, tout en maintenant une rigidité suffisante.

La seconde étape impliquait de déterminer les dimensions optimales du kit. Pour cela, les principes du cours LGCIV2043 de structure en bois[28] ont été utilisés. Les formules de ce cours ont permis de tester diverses sections des extensions du kit en fonction des paramètres initiaux.

La dernière étape était de concevoir des assemblages pour rendre le kit modulable et s'assurer de sa faisabilité pratique.

Calcul de dimensionnement

Les calculs ci-dessous visent à déterminer les dimensions optimales de la base et de la hauteur de la section de la membrure, tout en respectant les critères de conception et en maintenant un élancement acceptable.

Deux hypothèses ont été formulées :

1. Premièrement, les extensions en bois sont considérées comme étant un seul et même morceau et non en plusieurs modules. Le bois utilisé est un bois résineux, choisi pour sa légèreté et ses propriétés mécaniques plus adéquates que le bois feuillu. Le bois C24 est le plus courant parmi les bois résineux. Les propriétés mécaniques du bois C24, présentées dans le tableau ci-dessous, sont utilisées pour tous les calculs.

		Résineux C24
[MPa]	$f_{m,k}$	24
	$f_{t,0,k}$	14.5
	$f_{t,90,k}$	0.4
	$f_{c,0,k}$	21
	$f_{c,90,k}$	2.5
	$f_{v,k}$	4
[MPa]	$E_{0,moy}$	11000
	$E_{0,k}$	7400
	$E_{90,moyen}$	370
	G_{moyen}	690
$[kg/m^3]$	ρ_k	350
	ρ_{moyen}	420

2. Deuxièmement, les chevrons sont considérés comme encastrés à la base du kit. Cette hypothèse sera détaillée dans la sous-section des assemblages. Pour les calculs, les chevrons sont traités comme encastré-libre, comme illustré ci-dessous.

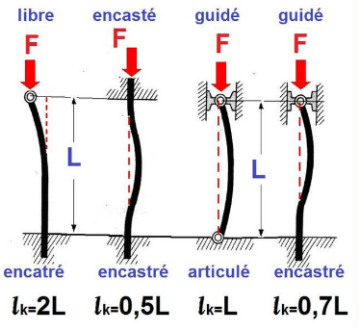


FIGURE 4.10 – Longueur de flambement issu de [29]

Force en action

Afin de vérifier les critères de résistance, 2 forces ont été prises en compte :

1. Le poids propre de la membrure :

$$Q_1 = A \cdot L \cdot \rho \tag{4.4}$$

avec :
— $\rho = 420[kg/m^3]$
— $L = 1.5[m]$
— $A = bh[m^2]$

2. La force exercée par l'eau qui agit perpendiculairement à la membrure :

$$F_d = \frac{1}{2}\rho v^2 C_d A \tag{4.5}$$

avec :
— $\rho = 1000[kg/m^3]$
— $C_d = 2$
— $A = bh[m^2]$
— $v = 2[m/s]$ choisi après mesure sur site

Les 2 forces agissent selon la façon représentée sur la figure ci-dessous.

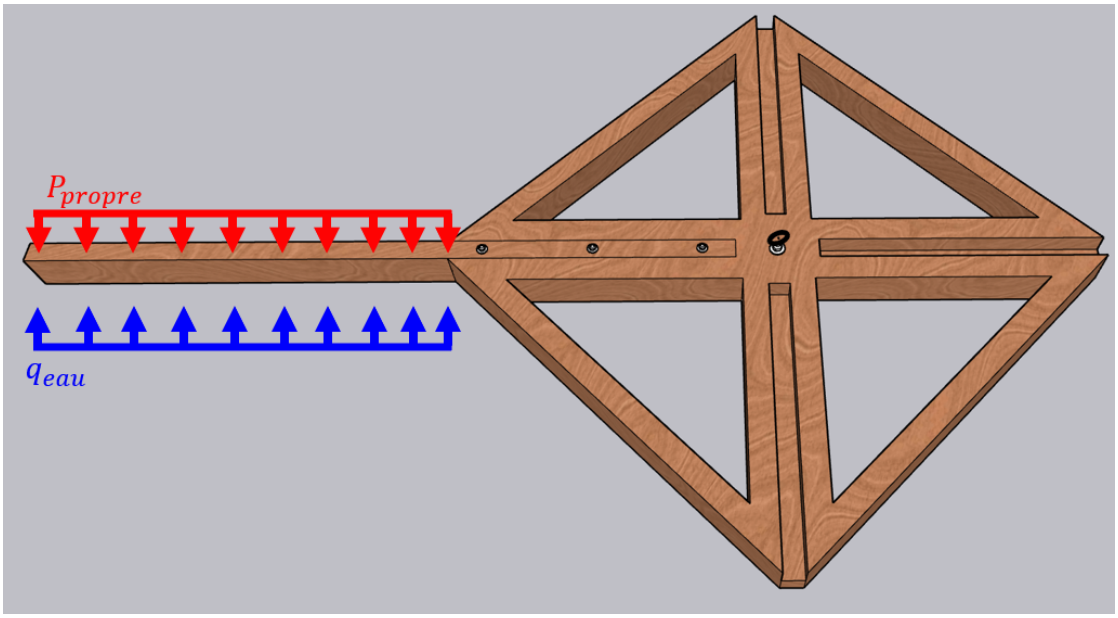


FIGURE 4.11 – Forces agissant sur une membrure du kit en bois

Une fois les forces agissant sur le kit déterminées, le dimensionnement des membrures d'extension peut être réalisé en prenant en compte les divers critères de résistance suivant :

— **Critère de flexion simple :**

$$\sigma_{m,d} = \frac{M_{ed}}{W_{el}} \leq f_{m,d} = \frac{k_{mod} f_{m,k}}{\gamma_m} [MPa] \tag{4.6}$$

avec :

— $\gamma_d = 1.3$
— $k_{mod} = 0.9$
— $f_{m,k} = 24[MPa]$
— $W_{el} = \frac{I}{y} = \frac{bh^3}{12} \frac{1}{\frac{h}{2}} [m^4]$
— $M_{ed} = \frac{q_{ELU} L^2}{2} [kNm]$
— $q_{ELU} = 1.35q[kN/m]$

— **Critère d'effort tranchant :**

$$\tau_{v,d} = \frac{3V_{ed}}{2k_{cr}A} \leq f_{v,d} = \frac{k_{mod} f_{v,k}}{\gamma_m} [kN] \tag{4.7}$$

avec :

— $\gamma_d = 1.3$
— $k_{cr} = 0.67$
— $k_{mod} = 0.9$
— $f_{v,k} = 4[MPa]$
— $V_{ed} = q_{ELU} L[kN/m]$

— **Critère d'effort tranchant grugée en bas :**

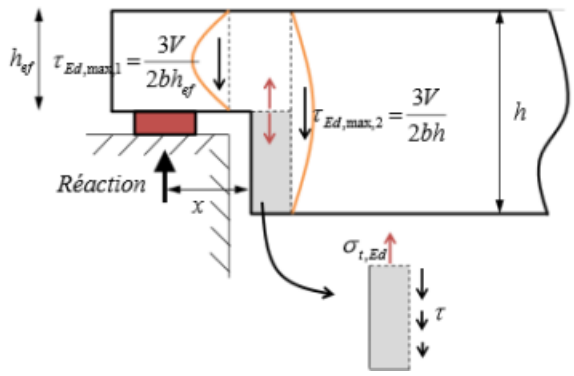


FIGURE 4.12 – Critère d'effort tranchant pour une poutre entaillée en bas à son extrémité

$$\tau_{Ed,max,1} = \frac{3V}{2bh_{ef}} \leq k_v \tau_{v,d} [kN] \tag{4.8}$$

avec :

— $h_{ef} = \frac{h}{2}$
— $k_v = 1$

— **Critère de flèche en porte à faux à court terme :**

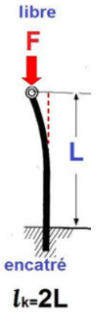
$$\delta_m = \frac{qL^4}{8E_{0,moy}I} \leq \delta_{max}[mm] \tag{4.9}$$

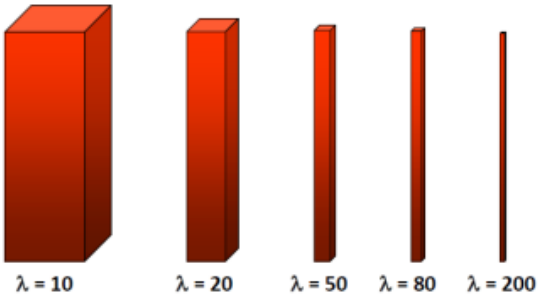
avec :
— $I = \frac{bh^3}{12}[m^4]$
— $E_{0,moy} = 11000[MPa]$
— $\delta_{max} = \frac{L}{100}[mm]$

— **Critère de compression parallèle aux fibres avec flambement du à la force de l'eau :**

$$\sigma_{c,0c} = \frac{N_{ed}}{A} \leq k_c f_{c,0,d} = k_c \frac{k_{mod} f_{c,0,k}}{\gamma_m} \tag{4.10}$$

avec :
— $k_c = \frac{1}{k+\sqrt{k^2-\lambda_{rel}^2}}$
— $k = 0.5(1 + \beta_c(\lambda_{rel} - 0.3) + \lambda_{rel}^2)$
— $\beta_c = 0.2$
— $\lambda_{rel} = \frac{\lambda}{\pi}\sqrt{\frac{f_{c,0,k}}{E_{0,k}}}$
— $\lambda = L_f\sqrt{\frac{A}{I}}$
— L_f est choisi selon le schéma ci-contre.





λ	Sensibilité au flambement
0 à 20	aucune
20 à 50	faible à moyenne
50 à 80	forte
80 à 200	très forte
> 200	à proscrire

FIGURE 4.13 – Sensibilité au flambement à prendre en compte

Dimension du kit

Après une analyse approfondie des critères de résistance, une section optimale de 25x60 mm a été déterminée pour les membrures d'extension du kit, avec une longueur maximale de 1.5 mètre. Maintenant que les dimensions finales du kit sont établies, l'attention se porte sur les assemblages.

Assemblage

Afin de rendre ce kit modulable, il a été nécessaire de subdiviser les membrures en segments plus petits. Afin d'offrir trois tailles de kits différentes, chaque membrure a été divisée en segments de 50 cm de longueur. De plus, il a été nécessaire de connecter ces membrures à la base du kit.

Pour ce faire, deux types d'assemblages ont été pensés :

1. Un assemblage entre la base et la première membrure, qui rappelons le, doit être considéré comme encastré. Pour cela, un minimum de trois boulons est nécessaire pour assurer cet encastrement. L'assemblage est illustré sur la figure ci-dessous.

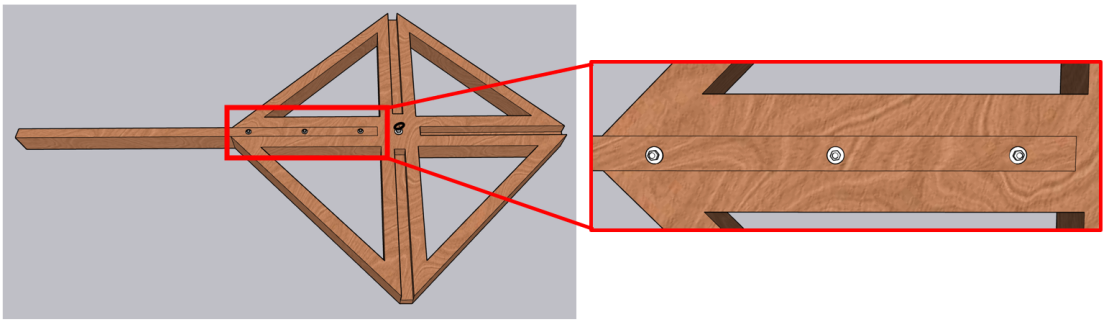


FIGURE 4.14 – Assemblage avec boulons

2. Ensuite, un assemblage permettant de connecter les membrure entre elle facilement a été conçu. L'assemblage est illustré sur la figure ci-dessous.

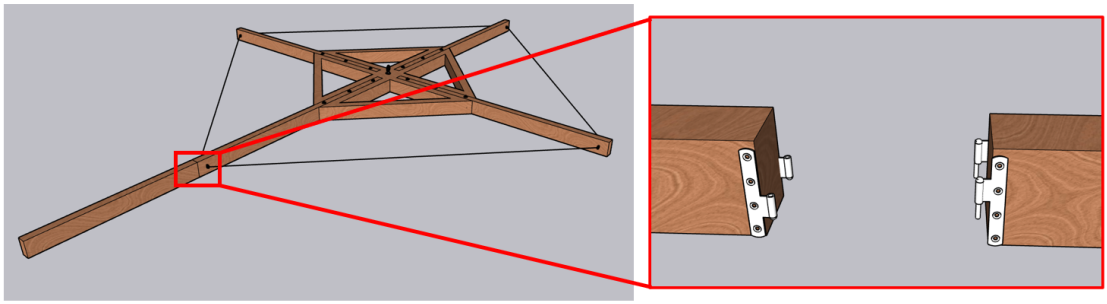


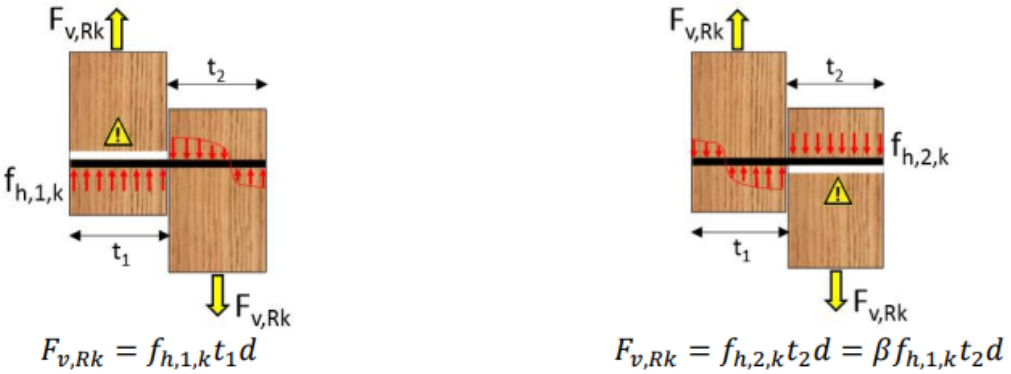
FIGURE 4.15 – Assemblage avec charnière

Calcul assemblage

Pour garantir la faisabilité des assemblages précédemment présentés, des calculs ont été réalisés. Voici la démarche suivie pour ces deux types d'assemblages.

1. **Assemblage encastrement** Pour le calcul de cet assemblage, nous considérons un assemblage simple bois-bois. Selon le cours de structures en bois [28], il existe six modes de rupture possibles listé ci-dessous :

   — **Mode de rupture n°1 et n°2 :** Le boulon reste droite et il y a un dépassement de $f_{h,k}$:



$F_{v,Rk} = f_{h,1,k} t_1 d$ $\quad F_{v,Rk} = f_{h,2,k} t_2 d = \beta f_{h,1,k} t_2 d$

FIGURE 4.16 – Mode de rupture n°1 et n°2 issu du cours LGCIV2043 [28]

   — **Mode de rupture n°2 : Le boulon reste droite et pivote, il y a dépassement de $f_{h,k}$ dans le bois 1 et le bois 2**

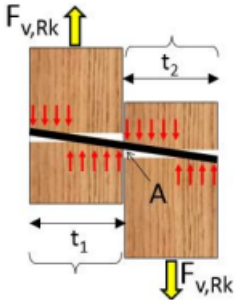


FIGURE 4.17 – Mode de rupture n°3 issu du cours LGCIV2043 [28]

   — **Mode de rupture n°4 et n°5 :Une rotule plastique apparaît dans le boulon, soit dans le bois 1 soit dans le bois 2**

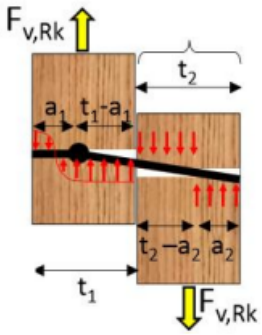


FIGURE 4.18 – Mode de rupture n°4 et n°5 issu du cours LGCIV2043 [28]

— **Mode de rupture n°6 : Deux rotules plastiques apparaissent simultanément dans le boulon, à la fois dans le bois 1 et le bois 2.**

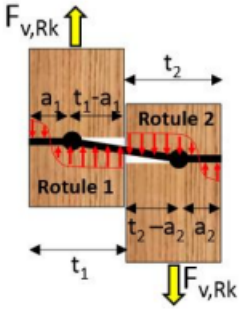


FIGURE 4.19 – Mode de rupture n°6 issu du cours LGCIV2043 [28]

La figure ci-dessous résume les formules permettant de calculer ces six modes de rupture. Il est donc nécessaire de vérifier que chacun de ces modes ne conduit pas à une rupture.

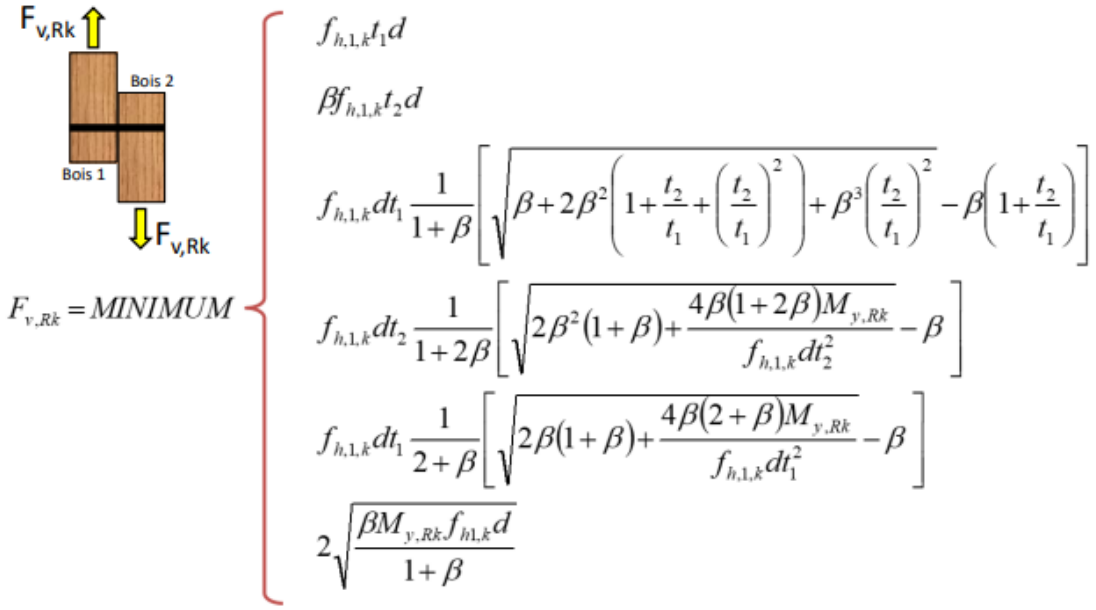


FIGURE 4.20 – Critère de rupture d'un assemblage à simple cisaillement bois-bois issu du formulaire du cours LGCIV2043[28]

On a :

— $t_1 = 25[mm]$
— $t_2 = 85[mm]$
— $d = 6[mm]$
— $f_{h,1,k} = 0.082(1 - 0.01d)\rho_k$ avec $\rho_k = 350[kg/m^3]$
— $f_{h,2,k} = 0.082(1 - 0.01d)\rho_k$ avec $\rho_k = 383[kg/m^3]$
— $\beta = \frac{f_{h,2,k}}{f_{h,1,k}}$
— $M_{y,Rk} = 0.3 f_{u,k} d^{2.6}$ avec $f_{u,k} = 400[MPa]$

Dans ce cas ci, le critère de rupture le plus contraignant est le mode de rupture n°4 avec une force maximum de $F_{v,Rk} = 1.54[kN]$. Ce qui correspond à un poids d'environ 150[kg]. Cet assemblage peut résister largement à son poids propre, ainsi qu'à d'autres forces supplémentaires dans des conditions extrêmes.

2. **Assemblage charnière** Pour le calcul de cet assemblage, il faut vérifier les contraintes maximum admissibles de la charnière. Les dimensions de celle-ci sont les suivantes :
   — Hauteur (h) = 51 [mm]
   — Largeur (w) = 20 [mm] pour chaque bras de la charnière
   — épaisseur (t) = 2 [mm]

$$\text{Vérification des contraintes} \begin{cases} \sigma_{max} = \sigma + \sigma_b = \frac{F}{A} + \frac{M \cdot c}{I} < \sigma_y = 250[MPa] \\ \tau_{max} = \frac{V}{A} < \frac{\sigma_y}{\sqrt{3}} = 144.25[MPa] \end{cases}$$

où :
— $A = t \cdot w = 40[mm^2]$
— $I = \frac{w \cdot t^3}{12} = 13.33[mm^4]$
— $c = \frac{t}{2}$

Il en résulte que l'assemblage avec charnière peut également résister largement à son propre poids et à d'autres charges supplémentaires.

Caractéristiques finales du kit

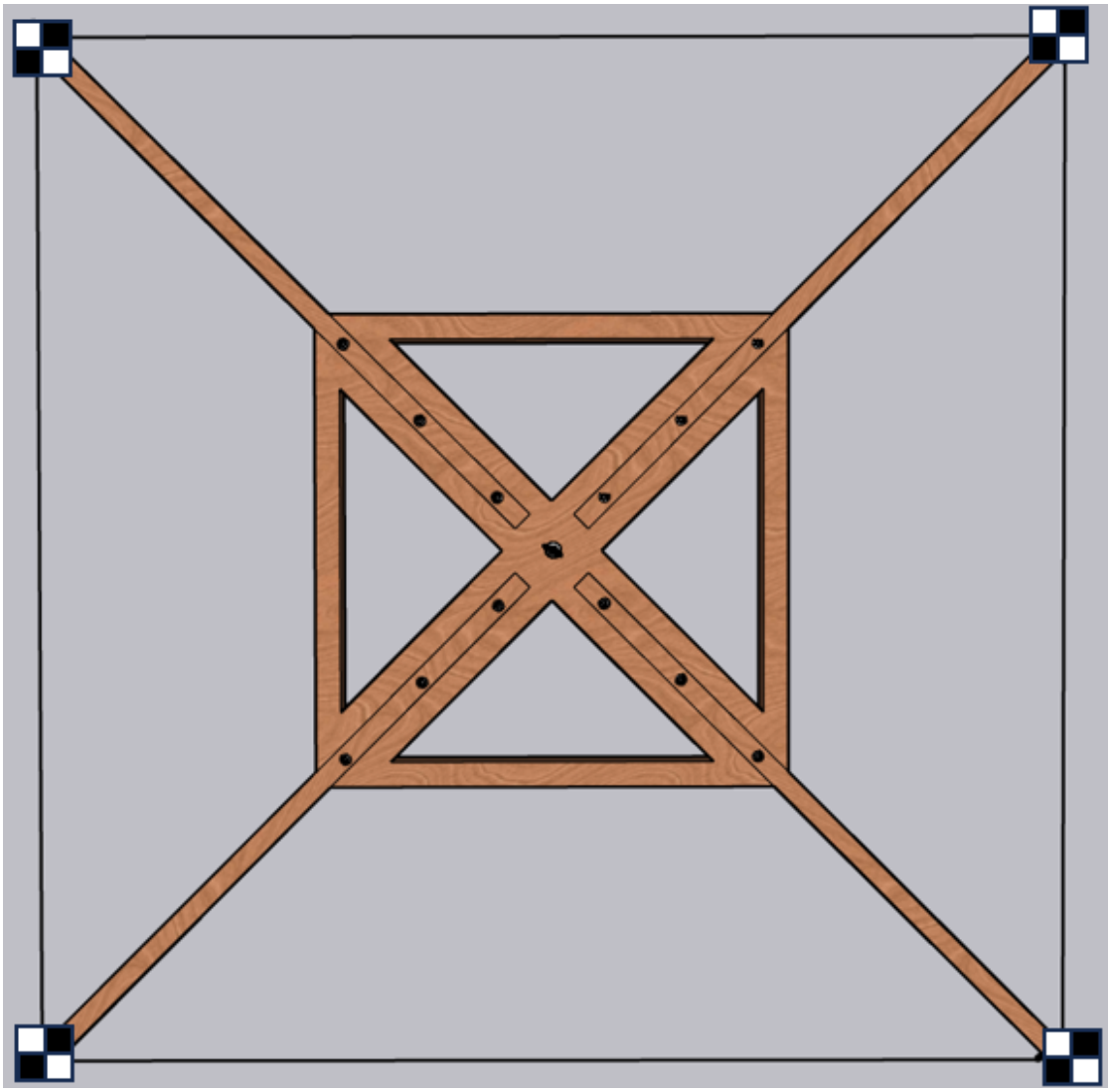


FIGURE 4.21 – Petit kit en bois final

Voici à quoi ressemble le kit en bois de petite taille 4.21lorsqu'il est entièrement monté. Pour que ce kit puisse être assemblé par n'importe qui, un guide de montage est disponible en annexe C.

Le tableau ci-dessous reprends les caractéristiques importantes de chaque taille de kit. On a les longueurs des côtés et des diagonales utiles lors de l'orthorectification, le poids total du kit et la flèche maximale en bout de membrure du kit.

	$L_{côté}$ [m]	$L_{diagonale}$ [m]	Poids [kg]	$Flèche_{max}$ [mm]
Petit kit	1.189	1.682	4.80	0.00
Moyen kit	1.896	2.682	6.06	0.51
Grand kit	2.603	3.682	7.32	14.34

Ces dimensions ont été calculés pour garantir à la fois la robustesse et la maniabilité du kit dans diverses conditions d'utilisation.

4.1.5 Comparaison des 3 kits d'orthorectification

Pour conclure cette section sur les kits d'orthorectification, il est intéressant d'évaluer les avantages et les inconvénients de chaque modèle et de les comparer afin de déterminer celui qui convient le mieux à toutes les situations.

Dans le tableaux ci-dessous, les critères à remplir sont listés et chaque kit est évalué en fonction de sa capacité à remplir ces critères :

— **++ :** Remplit parfaitement le critère
— **+ :** Rempli le critère mais peut être amélioré
— **- :** Remplit partiellement le critère
— **– :** Ne remplit pas le critère

	Premier kit	**Kit en PVC**	**Kit en bois**
Léger et maniable	++	-	-
Distances entre balises fixes	++	-	+
Flottabilité	+	+	+
Modulable	-	+	++
Tailles des balises modulable	-	+	+
Repère proche de l'eau	+	+	+

On peut déduire du tableau ci-dessus, que le kit en bois est pour l'instant le kit le plus efficace et pratique parmi les 3 modèles évalués.

4.2 Mesures sur le terrain

4.2.1 Protocole de mesures sur le terrain

Dans le travail de P.Laurent et C.Dufromont[1], un protocole de mesure a été mis en place pour uniformiser les campagnes de mesure et assurer une qualité homogène des données collectées.

Cette procédure vise à garantir que les mesures soient exploitables, quel que soit l'opérateur. Lors des précédents travaux, une collaboration avec des chercheurs internationaux a eu lieu, rendant crucial ce protocole pour obtenir des données utilisables malgré leur méconnaissance de RiverApp et de ses exigences.

Le protocole a été mis à jour pour inclure les kits d'orthorectification developpés dans la section précédentes 4.1, ainsi que le matériel supplémentaire nécessaire. Le guide est divisé en 3 étapes, chacune décrivant le matériel requis et les instructions détaillées.
Le protocole de mesure mis à jour est disponible en annexe E.

Ce document, à lire avant la prise de mesure, décrit la procédure idéale, bien que les conditions optimales ne soient pas toujours réunies sur le terrain.

4.2.2 Mesure du débit sur terrain

Afin de comparer les résultats obtenus par le RiverApp avec le débit réel de la rivière, il est indispensable de mesurer celui-ci au préalable. Lors des différentes campagnes menées durant ce travail, 3 méthodes différentes, dont le fonctionnement est détaillé dans la section 2.1.1, ont été utilisées :

- Les mesures limnimétriques
- Le jaugeage par perche transparante
- Le courantomètre électromagnétique

Mesures limnimétriques

Pour les mesures de débit via une station limnimétrique, les données récoltées par la SPW (Aqualim)[25] sont utilisées. Ces données sont collectées et vérifiées par une source fiable et serviront de référence lors de ce travail.
Pour s'assurer une précision maximum de chacune des stations limnimétriques, la SPW doit vérifier le bon fonctionnement des capteurs mesurant la hauteur d'eau et ceci toutes les 2 semaines minimum. Pour contrôler les courbes de tarage, un minimum de 10 jaugeages par an est réalisé sur chacune des stations de mesure.
Leur utilisation garantit donc que les analyses sont basés sur des informations exactes et reconnues, renforçant ainsi la fiabilité des résultats.

Courantomètre électromagnétique

Lors des mesures effectuées sur terrain, nous avons utilisé le courantomètre électromagnétique 2.8.
Pour avoir une précision maximum du débit de la rivière, nous devons suivre une méthode de prise de mesure décrite dans les notes de W.Boiten [30].

Cet instrument mesure la vitesse du courant en un point du cours d'eau sur sa verticale et de ce fait, la précision de l'instrument dépend du nombre de mesure prise par rapport à la morphologie de la rivière. Nous avons :

— **Le nombre de mesure à prendre sur la section en fonction de la largeur du cours d'eau :**
Dans le cas où la bathymétrie serait trop irrégulière, un espacement plus adapté doit être réalisé, mais en temps normal, le nombre de mesure verticale à prendre doivent être équidistante sur la largeur.

Largeur du cours d'eau [m]	**Nombre de mesure verticale**
b <0.5	3
0.5 <b <1.0	4 à 5
1.0 <b <3.0	5 à 8
3.0 <b <6.0	8 à 12
6.0 >b	12 ou plus

Dans notre cas de bathymétrie de la Dyle 4.25, nous avons pris 12 mesures espacées de plus ou moins 60 centimètres sur la largeur du cours d'eau.

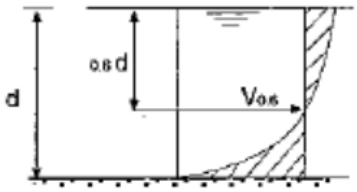
— **Le nombre de mesures sur la verticale en fonction de la hauteur de l'eau :**
Sachant que le profil de vitesse de l'eau est parabolique, nous pouvons limiter nos prises de mesure à seulement quelques points. Cela permet d'avoir une mesure du profil de vitesse assez précise et en un temps raisonnable.

Hauteur d'eau [m]	**Nombre de point de mesure**
d <0.25	1
0.25 <d <0.5	2
0.5 >d	3 ou plus

En fonction des critères cités dans les tableaux ci-dessus, du temps disponible et de la précision souhaitée, il existe plusieurs méthodes permettant de trouver la vitesse moyenne d'écoulement de l'eau.

1. Méthode à 1 point :

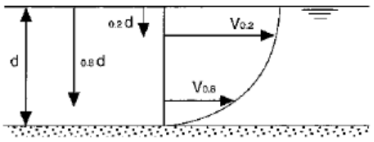
$$\overline{v} = v_{0.6} \tag{4.11}$$



avec $v_{0.6}$ qui est la vitesse mesurée à 60% de la hauteur à partir de la surface de l'eau.

2. Méthode à 2 points :

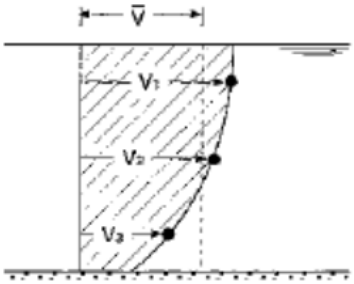
$$\overline{v} = 0.5(v_{0.2} + v_{0.8}) \tag{4.12}$$



avec $v_{0.2}$ et $v_{0.2}$ qui sont respectivement les vitesses mesurées à 20% et 80% de la hauteur à partir de la surface de l'eau.

3. Méthode à 3 points :

$$\overline{v} = 0.25v_{0.2} + 0.5v_{0.6} + 0.25v_{0.8} \tag{4.13}$$



avec $v_{0.2}$, $v_{0.6}$ $v_{0.2}$ qui sont respectivement les vitesses mesurées à 20%, 60% et 80% de la hauteur à partir de la surface de l'eau.

4. Méthode à 5 points :

$$\overline{v} = 0.1(v_s + 3v_{0.2} + 2v_{0.6} + 3v_{0.8} + v_b) \tag{4.14}$$

avec v_s et v_b qui sont respectivement les vitesses mesurées à la surface de l'eau et au fond de l'eau.

Tiges transparentes à tête de vitesse

La méthode de mesure de cet instrument a été détaillée dans la section2.1.1 2.10. Au cours de la campagne de mesure, la bathymétrie et la vitesse, telles que mesurées par la perche, ont été relevées simultanément, permettant ainsi d'avoir des mesures tous les 20 cm.

conversion vitesse-débit

Le point commun des 2 dernières méthodes précédemment mentionnées est qu'elles fournissent la vitesse de l'écoulement et non le débit. Pour calculer le débit résultant, les 2 méthodes suivantes peuvent être utilisées :

— **Mean section method**

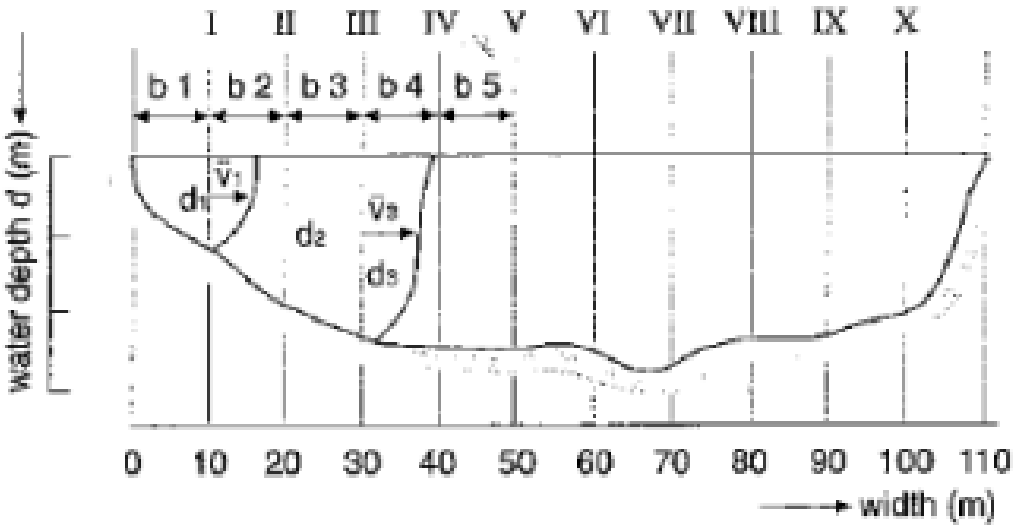


FIGURE 4.22 – Mean Section method issu de [30]

$$Q_P = \frac{\overline{v_1} + \overline{v_2}}{2} \cdot \frac{d_1 + d_2}{2} \cdot b \tag{4.15}$$

Lorsque nous sommes proche des berges, l'équation est la suivante :

$$Q_P = \overline{v_1}\frac{2}{3} \cdot \frac{1}{2}(d_0 + d_1) \cdot b \tag{4.16}$$

avec :

— b = la largeur entre la berge et la verticale I de la rivière

— $\overline{v_1}$ = la vitesse moyenne dans la verticale I

Le débit total est alors la somme des Q_p caculés.

— **Mid section method**

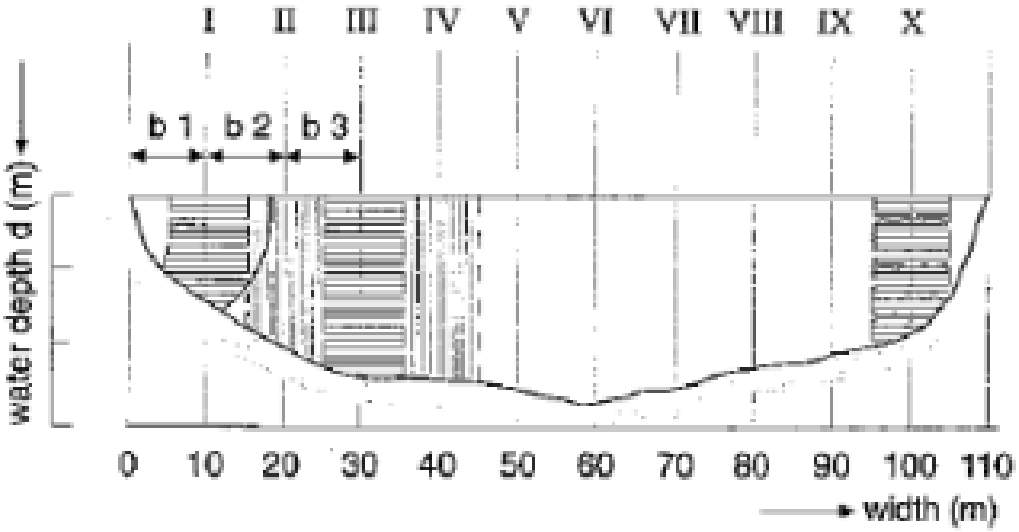


FIGURE 4.23 – Mid Section method issu de [30]

$$Q_P = \overline{v_2} \cdot d_2 \cdot \frac{1}{2}(b_2 + b_3) \tag{4.17}$$

avec :
— b_2 = la longueur entre la verticale I et la verticale II
— b_3 = la longueur entre la verticale II et la verticale III
— les valeurs de $\overline{v} \cdot d = 0$ pour les largeurs au niveau des berges

Le débit total est alors la somme des Q_p caculés.

4.2.3 Dyle Limelette

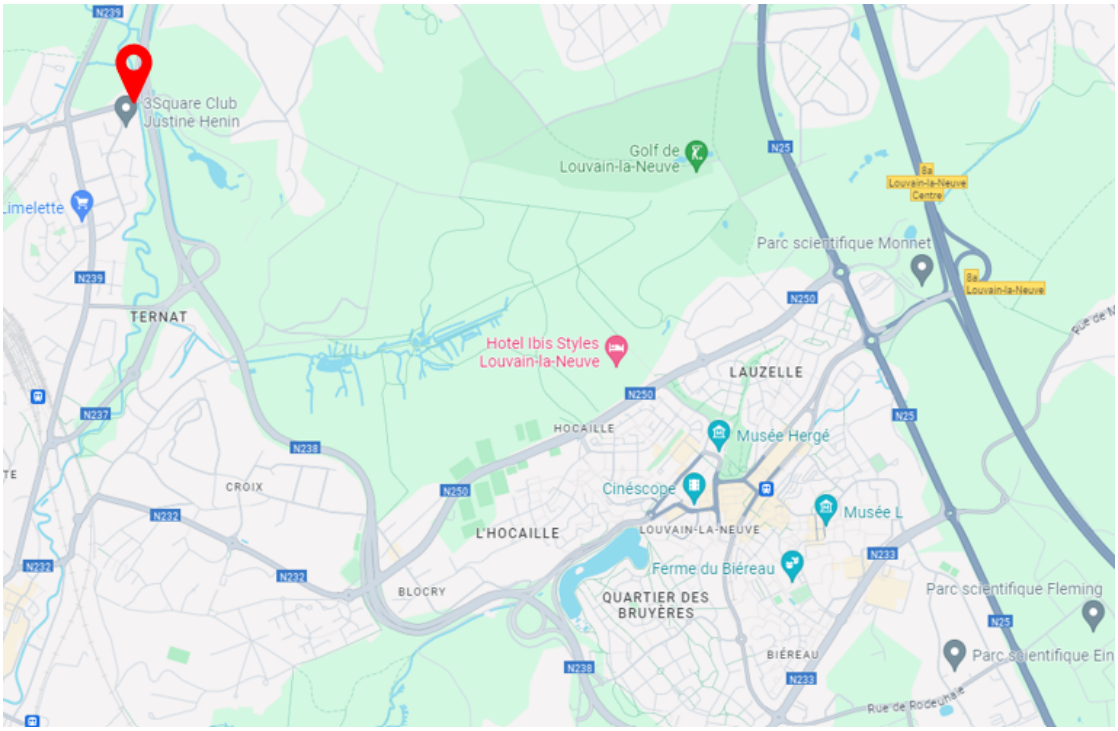


FIGURE 4.24 – Localisation des prises de mesure sur la Dyle à Limelette

Nos mesures ont été effectuées sur le site de la Dyle à Limelette (en rouge sur la figure ci-dessus 4.24) qui a déjà été utilisé dans des mémoires précédents et qui est également le site avec une station limnimétrique le plus proche de Louvain-la-Neuve. Au cours de ces mesures, même si la bathymétrie avait été mesurée auparavant, nous avons effectué une nouvelle mesure de bathymétrie. Lors des prises de mesures de vitesse, nous avons utilisé les instruments cités précédemment.

Bathymétrie

Pour la mesure de la Bathymétrie de la Dyle nous avons décidé de prendre une mesure tous les 20 cm.

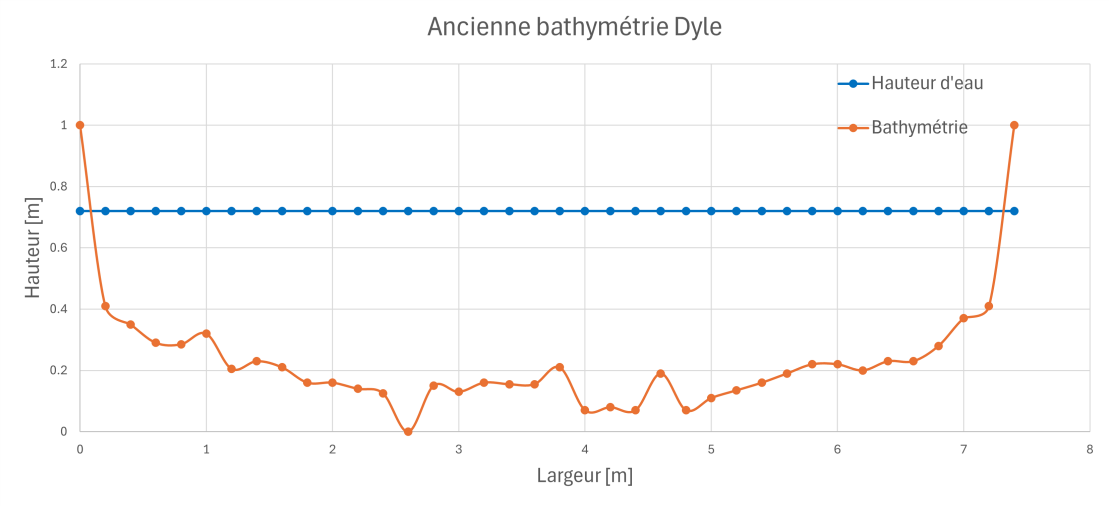


FIGURE 4.25 – Bathymetrie Dyle 2024

Au cours de nos prises de mesures nous avons également retrouvé 2 armatures dépassant des herbes dans les berges. Ces armatures sont les points de repères de la bathymétrie mesurées en 2021 par E.DE GRAND RY, C.EVERAERT [4].

FIGURE 4.26 – Positionnement des bathymétries sur la Dyle

Ainsi, nous avons pu réexaminer la bathymétrie entre ces deux points, ce qui nous a donné l'opportunité d'étudier la Dyle avec deux bathymétries différentes et d'analyser l'évolution du lit de la rivière au fil du temps.

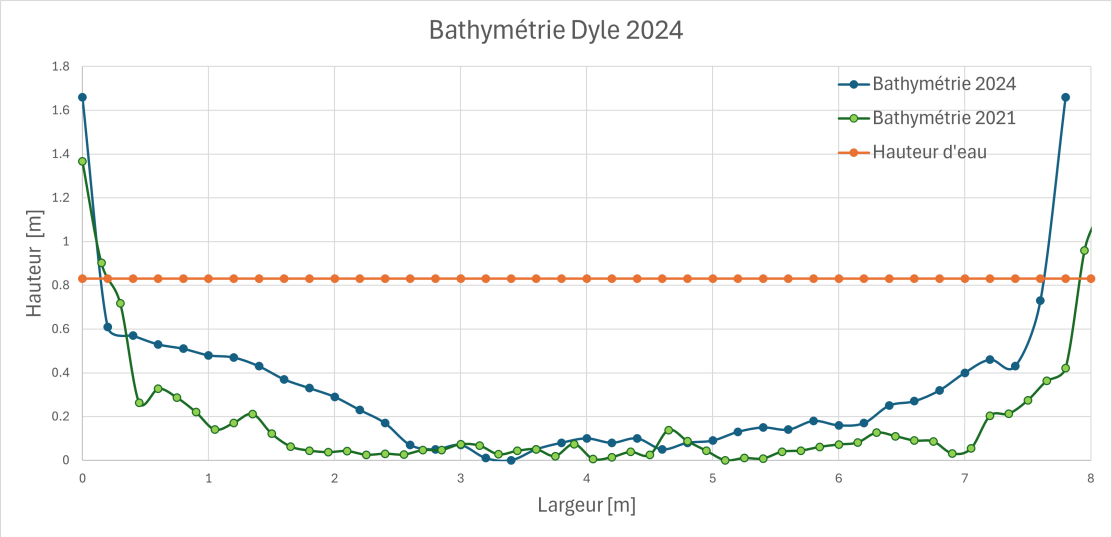


FIGURE 4.27 – Comparaison de ma bathymétrie

Nous observons sur le graphe ci-dessus 4.27, que les bathymétries sont assez différentes et que le lit de la rivière actuellement est plus haut qu'en 2021 et plus particulièrement lorsque l'on se rapproche des berges. Cela peut être causés par plusieurs facteurs :

- Une accumulation des sédiments suite à une plus forte érosion en amont.
- Une accumulation des débris végétaux, comme des branches ou des feuilles par la végétation entourant la rivière.
- Un glissement de terrain : les berges de la Dyle sont fort pentues et pourraient avoir cédé suite à une forte variation du niveau d'eau due aux crues.
- L'urbanisation en développement, les constructions peuvent perturber les flux naturels de sédiments et la zone voisinant le site est en pleine construction.

On peut en conclure en observant le graphique 4.27, qu'il est recommandé de remesurer la bathymétrie régulièrement. Plus particulièrement après des évènements majeurs tels que des crues ou des travaux de génie civil à proximité de la rivière.

Comparaison des différentes techniques de mesure

Voici les débits résultants des diverses techniques de mesure faites sur la Dyle entre les 2 bathymétries ainsi que leur précision par rapport au débit calculé par la SPW.

	$Q_{Aqualim}[m^3/s]$	$Q_{Courantomètre}[m^3/s]$		$Q_{Perche}[m^3/s]$
		Mid section method	Mean section method	
Bathy 2021	2.09	2.431	2.550	2.18
Bathy 2024	2.09	2.265	2.339	2.43

	Courantomètre		Perche transparante
	Mid section method	Mean section method	
Marge d'erreur [%]	12.34	16.96	10.29

4.2.4 Petit Bocq

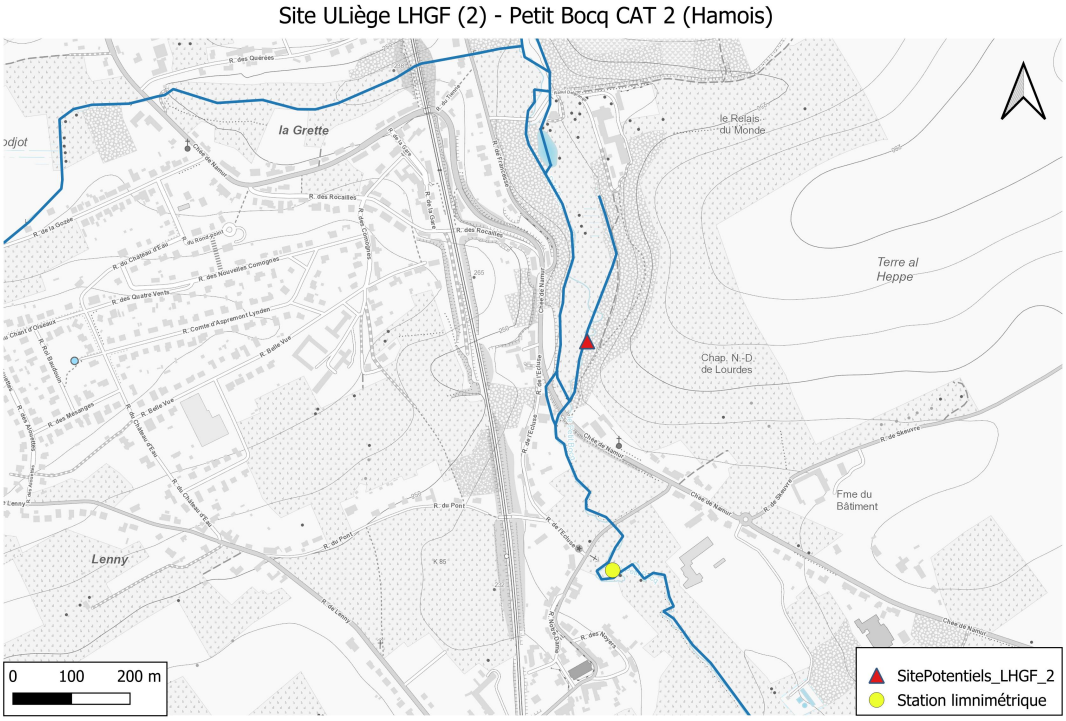


FIGURE 4.28 – Localisation des prises de mesure sur le Petit Bocq

Lors de la sélection d'endroit pour prendre des mesures, il nous a été conseillé de faire une visite de site avec le projet Rivialis [1] servant de repérage pour le projet. Dans un second temps, une sortie de prise de mesures dans le cadre du cours de Hydraulique fluvial[21] nous a permis de prendre des mesures. Voici sur l'image ci-dessous, la bathymétrie résultante.

1. Projet regroupant plusieurs startups (Kapta survey, Skalup, S&R), ainsi que plusieurs membres du personnel de l'UCLouvain et de l'ULiège. Le projet ayant vocation de visualiser des cours d'eau en 3D, ainsi que d'autres informations sur celui-ci, pour permettre aux petites communes d'assainir les cours d'eau pour favoriser les écosystèmes de ceux-ci.[27]

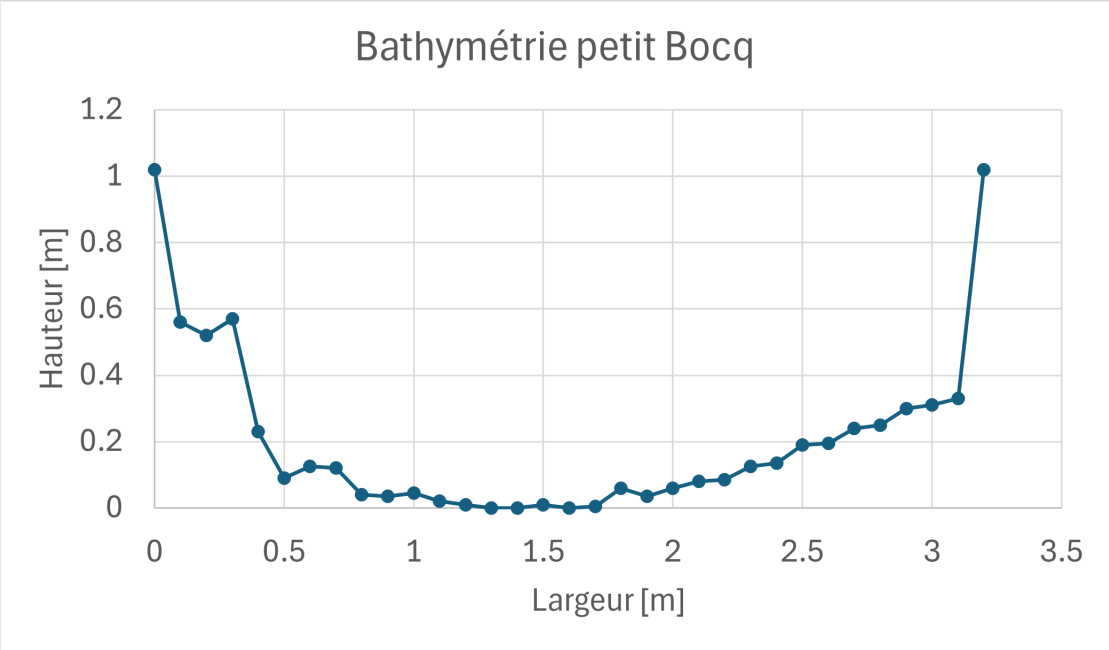


FIGURE 4.29 – Bathymétrie Petit Bocq

Lors de cette campagne de prise de mesure, nous utiliserons comme valeurs de référence le débit calculé par les étudiants du cours de Hydraulique fluvial[21].

4.3 Test sensibilité de l'application

L'objectif de cette section est d'identifier les différents paramètres susceptibles d'influencer le débit résultant de l'application lors de la prise de mesures.
Afin de déterminer l'impact de ces paramètres, une série de tests exhaustifs a été effectuée, isolant autant que possible chacun des paramètres listés ci-dessous :

- Influence de l'ensemencement
- Influence de la luminosité
- Influence de la prise de vue des vidéos
- Influence de la résolution de la caméra
- Influence du temps de vidéo analysé
- Détection des balises par l'application
- Influence de l'espacement des balises par rapport à la largeur de la rivière

4.3.1 Influence de l'ensemencement

Après lecture du protocole d'acquisition des données réalisé par DUFROMONT Célestin et LAURENT Pierre [1], on en a déduit que l'ensemencement est un des premiers paramètres qu'il fallait tester afin de mener à bien les tests des autres paramètres.
En effet, si les remous créés par l'environnement sont suffisants, l'analyse PIV se fait correctement et nous obtenons des résultats à l'aide de l'application proche de la réalité. Cependant, cela est rarement le cas et de ce fait l'ensemencement a été fait pour chaque prise de mesures.
Des vidéos ont été prises avec et sans ensemencement pour chaque mesure des autres paramètres testés lors de ce travail et en observant le graphique 4.30 on remarque que le pourcentage de marge d'erreur est beaucoup plus élevé lorsque nous n'effectuons pas l'ensemencement. En effet, les débits calculés sans celui-ci étaient dans chacun des cas sous-évalués. De ce fait, l'ensemencement a été utilisé pour l'analyse de tous les autres paramètres.

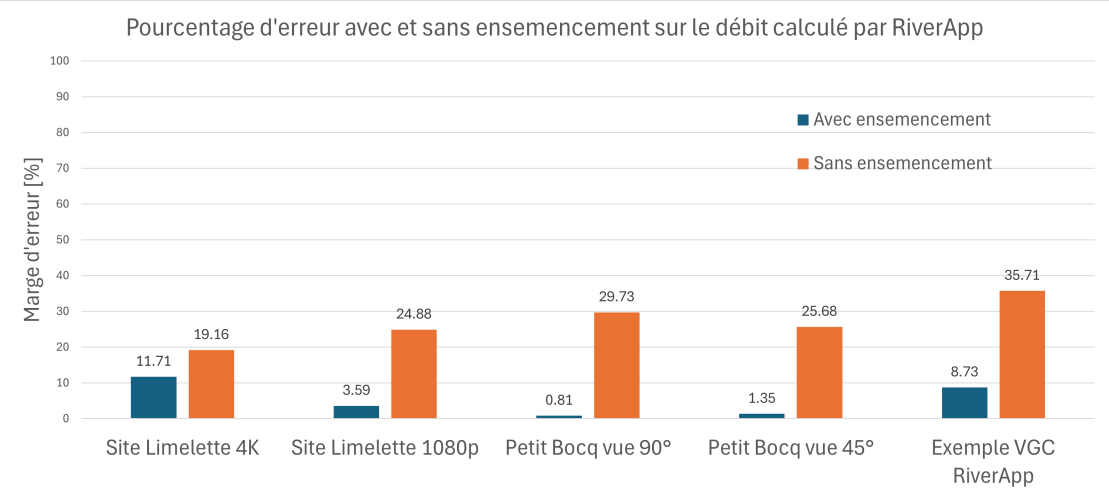


FIGURE 4.30 – Nécessité de l'ensemencement

4.3.2 Influence de la luminosité

Dans cette section, on étudie l'influence de la luminosité qui est le seul paramètre que nous ne pouvons pas modifier comme bon nous semble.

Contraste météo

Les figures ci-dessous montrent l'importance de la luminosité lors des prises de vidéos. Si la luminosité est insuffisante, l'application ne peut pas bien effectuer l'analyse PIV et produits des résultats incorrects.

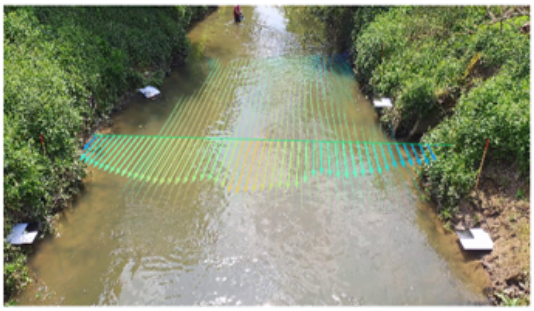


FIGURE 4.31 – Débit calculé par RiverApp avec condition météo stable

FIGURE 4.32 – Débit calculé par RiverApp avec condition météo instable

Dans le cas de la figure 4.31, la météo était bonne et homogène, ce qui signifie que les conditions étaient stables et uniformes. En revanche, pour la figure 4.32, bien que la météo soit globalement bonne, elle était très variable et contrastée. Cette variabilité a entraîné des problèmes d'ajustement de la luminosité dans la vidéo, ce qui a fait que certaines parties de la vidéo étaient trop sombres tandis que d'autres étaient trop claires. Lors de l'analyse PIV, cette fluctuation de luminosité a provoqué l'apparition et la disparition des groupes de particules, rendant l'analyse inefficace et produisant des résultats incorrects On peut confirmer que ces problèmes proviennent du fait que la météo était contrastée et changeante. En effet, lors de nos mesures effectuées au Petit Bocq, la météo était mauvaise mais homogène, ce qui a permis un ajustement correct de la luminosité de la vidéo. Comme on peut le voir sur la figure ci-contre, l'ajustement de luminosité y est bien réalisé, malgré les mauvaises conditions météorologiques.

Zones d'ombre

Comme montré précédemment, RiverApp a des difficultés à effectuer l'analyse PIV lorsque la vidéo est trop sombre. Dans les figures suivantes, on observe qu'une zone d'ombre sur l'image peut également poser des problèmes à l'application. Par exemple, dans le cas de la figure 4.34, cette zone d'ombre pourrait être interprétée comme une berge de la rivière ou un obstacle immobile, comme un rocher ou une branche. Cette zone, n'étant pas prise en compte par l'application, pourrait expliquer pourquoi nous obtenons des résultats inférieurs à ceux obtenus sans zone d'ombre, qui sont plus proches de la réalité.

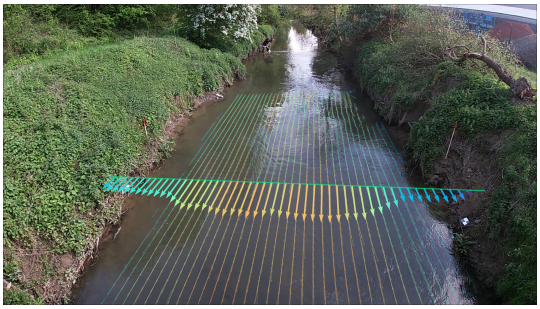


FIGURE 4.33 – Résultat sans zone d'ombre

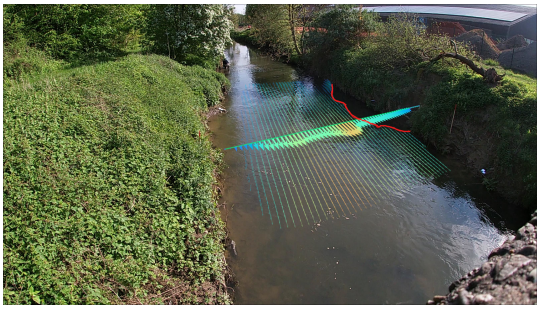


FIGURE 4.34 – Résultat avec zone d'ombre

4.3.3 Influence de la prise de vue des vidéos

Dans cette section, on analyse l'influence de la prise de vue des vidéos analysées par rapport au débit réel. On distingue 4 cas différents :

- vertical instable : correspond à une vidéo prise verticalement au-dessus de la Dyle à l'aide du drone Snaptain SP650.
- vertical stable : correspond à une vidéo prise verticalement au-dessus du petit Bocq à l'aide du drone DJI mini 2.
- inclinaison de caméra 45° : correspond à une vidéo prise à 45° au-dessus du petit Bocq
- inclinaison de caméra 60° : correspond à une vidéo prise à 60° au-dessus de la Dyle depuis un pont. Dans ce cas, on étudie des vidéos prises à trois endroits différents sur le pont.

vertical instable

Lors des premières prises de vidéo à l'aide d'un drone, un drone Snaptain SP650 prêté par l'EPL a été utilisé. Cependant, ce drone n'est pas équipé d'un système de stabilisation contre le vent, et sa caméra ne possède pas non plus de stabilisation, en plus d'être de basse qualité. Les analyses effectuées avec l'application n'ont produit aucun résultat valable, générant des champs de vecteurs incohérents, comme le montre le résultat négatif ci-dessous.

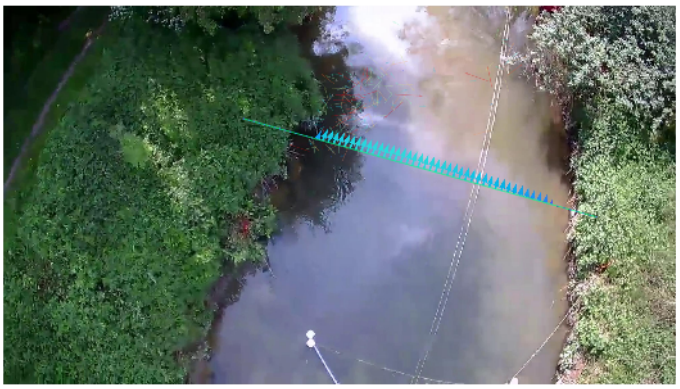


FIGURE 4.35 – Résultat avec drone instable

Ce drone nécessitait des conditions météorologiques presque parfaites pour fonctionner correctement. Même dans des conditions idéales, les vidéos obtenues restaient inutilisables, même après stabilisation avec RiverApp. Par conséquent, l'utilisation du drone Snaptain SP650 a été abandonnée.

vertical stable

En raison des résultats peu concluants causés par la mauvaise qualité d'image du drone Snaptain SP650, un DJI DRONE MINI 2 a été emprunté. Ce drone offre une stabilisation contre le vent et est équipé d'une caméra 4K avec stabilisation, garantissant ainsi une meilleure qualité d'image.

On observe sur le graphe 4.36, que les résultats obtenus par l'application sont constants et très proches de ceux mesurés par Martin Petitjean, assistant chercheur à l'IMMC.

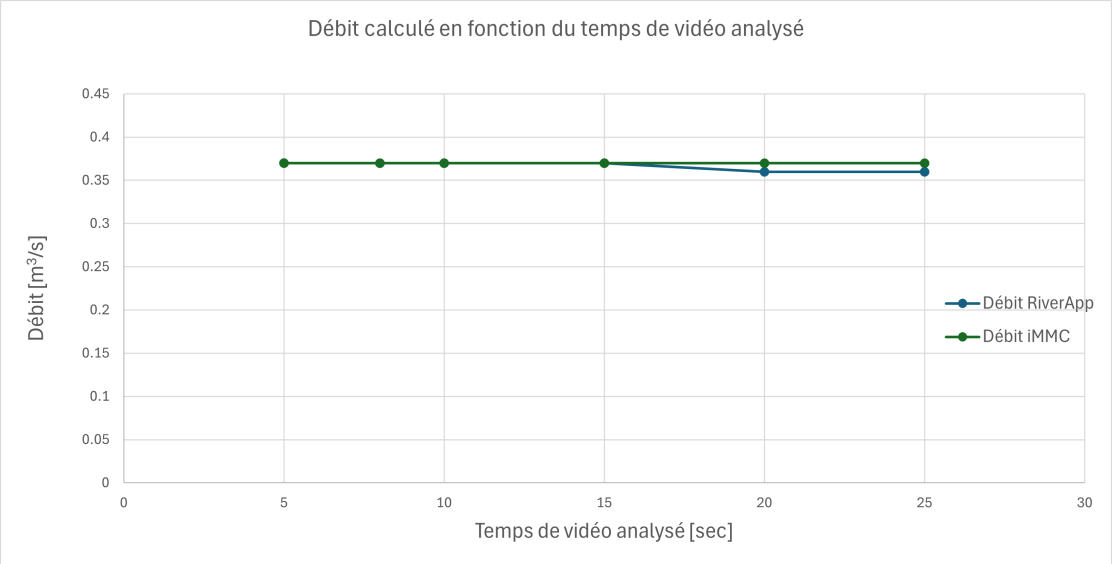


FIGURE 4.36 – Débit en fonction du temps de vidéo analysée - Petit Bocq 90°

inclinaison de caméra 45°

Dans ce cas-ci, on peut observer sur le graphique 4.37 que les valeurs obtenues par RiverApp sont également proches de celle obtenues par Martin Petitjean. De plus, la précision des résultats s'améliore à mesure que la durée de la vidéo analysée augmente.

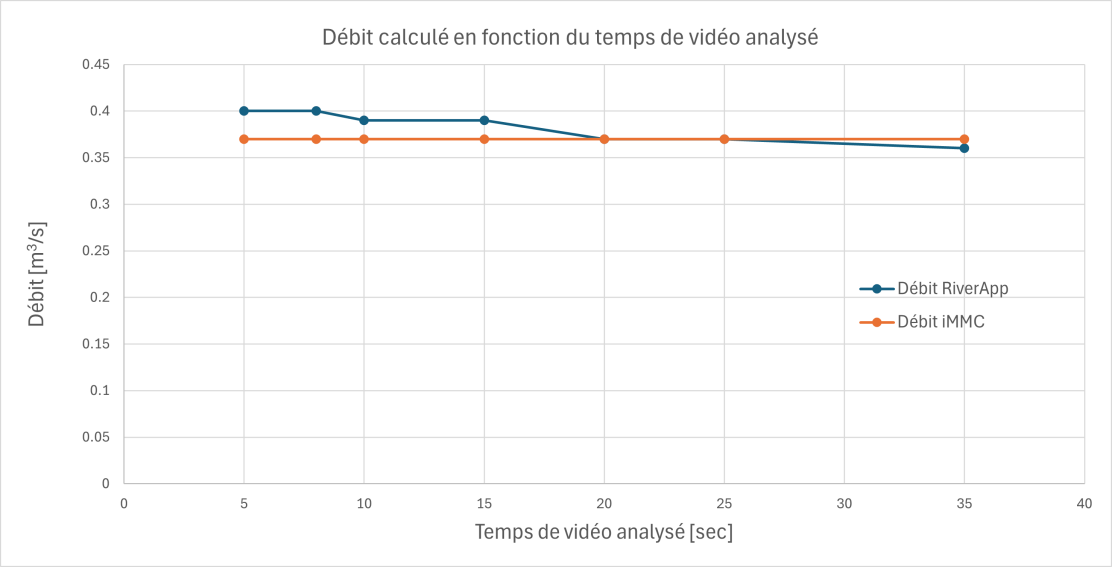


FIGURE 4.37 – Débit en fonction du temps de vidéo analysée - Petit Bocq 45°

inclinaison de caméra 60°

FIGURE 4.38 – Gauche du pont

FIGURE 4.39 – Centre du pont

FIGURE 4.40 – Droite du pont

Lors de cette prise de mesure sur la Dyle à Limelette, nous avons filmé depuis trois angles : la gauche, le centre et la droite du pont. Voici les résultats obtenus à partir de ces différents points de vue.

— **Vidéo prise depuis le côté droit du pont 4.40 :** Contrairement à nos attentes, le graphe 4.41 montre que plus la durée de la vidéo est longue, plus le débit calculé s'éloigne du débit réel. En particulier, nous avons constaté que la vue depuis la droite du pont a tendance à sous-estimer le débit.

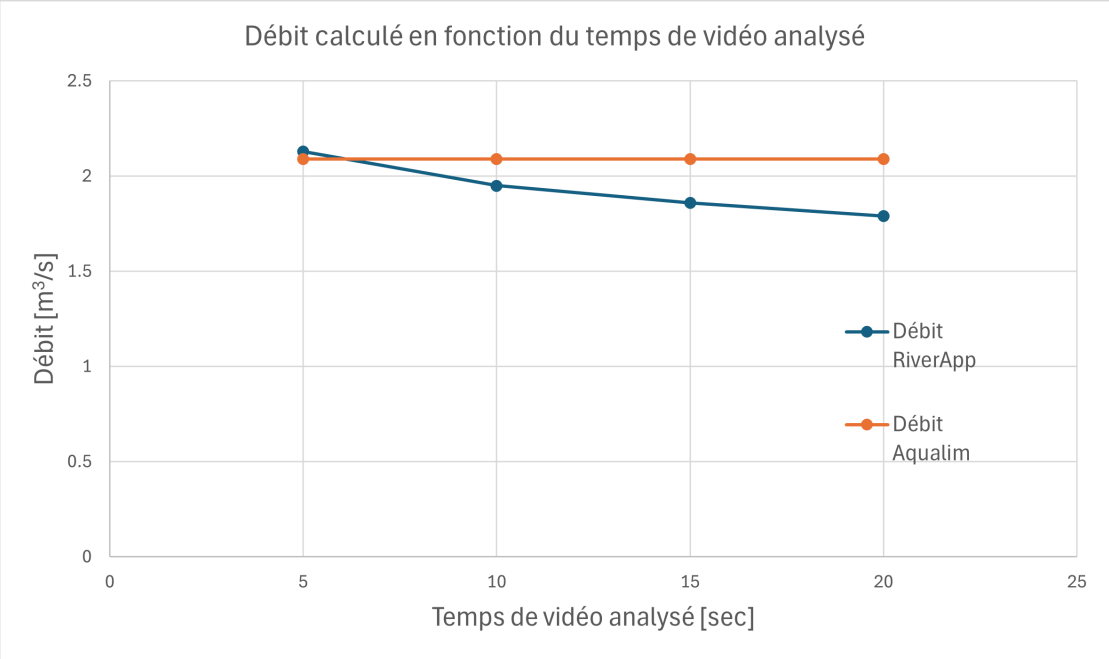


FIGURE 4.41 – Débit en fonction du temps de vidéo analysée - Limelette droite

— **Vidéo prise au centre du pont 4.39 :**
Pour cette prise de vue, les résultats présentés dans le graphe 4.42 sont les plus proches de ceux mesurés par la station limnimétrique de la SPW[25]. De plus, la marge d'erreur au-delà de 25 secondes est plus qu'acceptable et reste relativement constante.

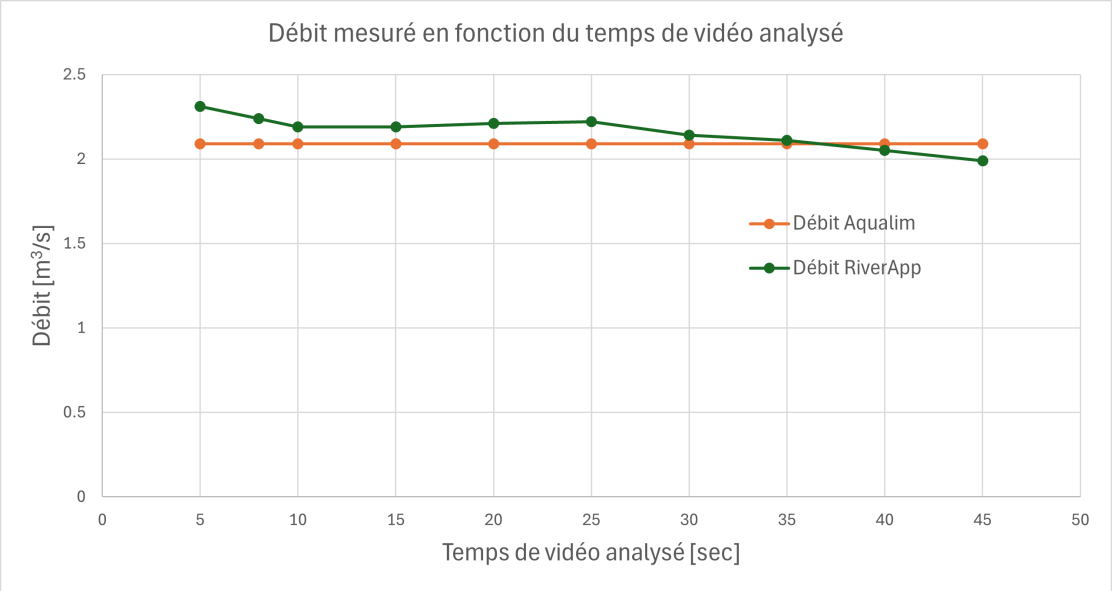


FIGURE 4.42 – Débit en fonction du temps de vidéo analysée - Limelette milieu

— **Vidéo prise depuis le côté gauche du pont4.38**

Comme c'était le cas pour la vidéo prise depuis le coté droit du pont, on observe sur le graphe 4.43 que l'application a tendance à sous estimer le débit mais cette fois-ci, les résultats restent constants.

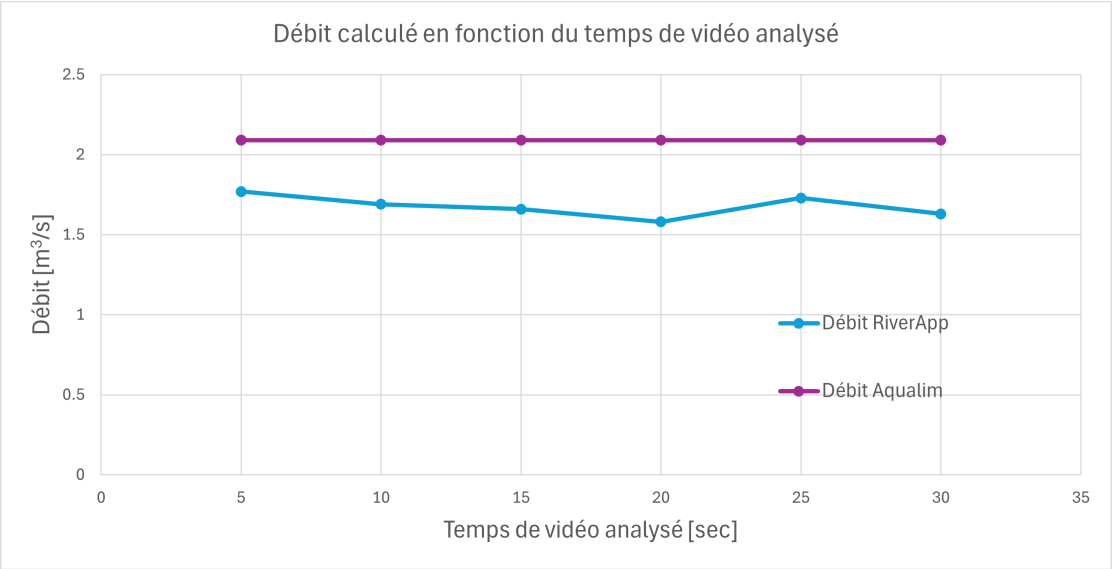


FIGURE 4.43 – Débit en fonction du temps de vidéo analysée - Limelette gauche

— **Résultat :** Les résultats des trois prises de vues montrent que celles réalisées

face à la rivière tendent à fournir des résultats plus précis que celles prises depuis des positions excentrées. Cette observation suggère que l'angle de vue influence la qualité des résultats. Cependant, il est important de noter que les vidéos prises avec des vues excentrées 4.404.38 contiennent des zones d'ombres. Dans la section 4.3.2, il a été observé que celle-ci ont également un impact sur la qualité des résultats.
Il est donc difficile d'affirmer à 100% que l'angle de vue a une influence majeure sur les résultats, mais il est certain qu'il est affecté par la présence d'ombre sur la rivière.

4.3.4 Influence de la résolution de la caméra

Pour tester l'influence de la résolution de la caméra, une vidéo en 4K prise sur la Dyle depuis le centre du pont a été utilisée. La qualité de cette vidéo a ensuite été réduite à 1080p, 720p et 480p. Cela a permis de déterminer la marge d'erreur apportée par chaque résolution et de les comparer en y insérant les mêmes paramètres initiaux.

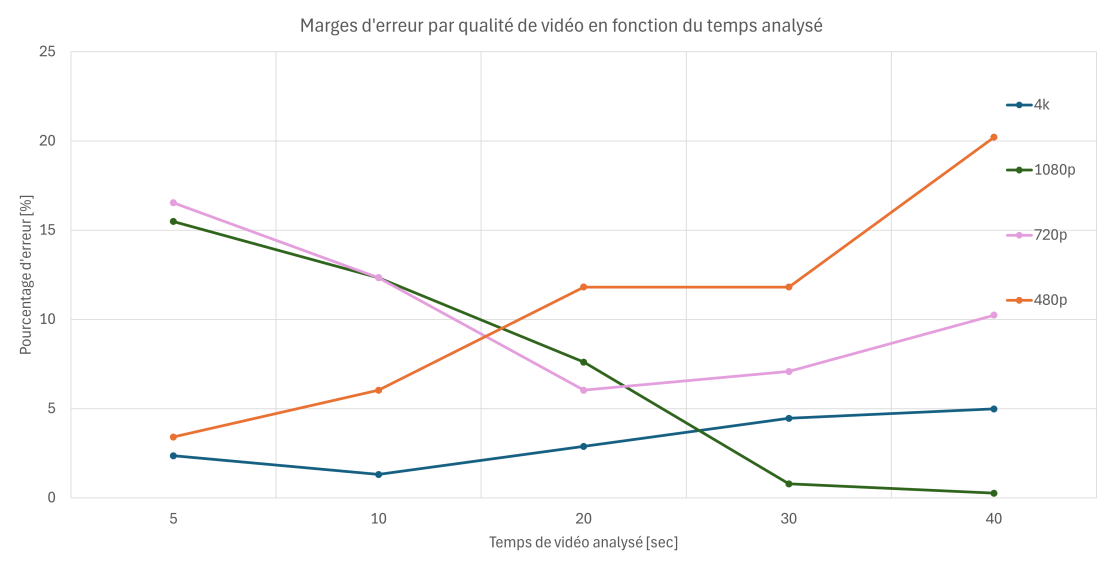


FIGURE 4.44 – Marges d'erreur par résolution en fonction du temps d'exécution sur la vidéo de Limelette - milieu

— **480p :** La résolution de 480p ne permet pas de tirer de conclusions, sauf qu'elle n'est pas suffisante pour le bon fonctionnement de l'application. En effet, il est étrange que la marge d'erreur augmente avec la durée de la vidéo analysée. Ainsi, les débits obtenus avec 5 et 10 secondes de vidéo, bien qu'ayant une faible marge d'erreur, ne peuvent pas être utilisés comme résultats.
— **720p :** Pour cette résolution, on voit que plus la durée de la vidéo analysé est grande plus celle-ci est précise. Au-dela de 10 secondes de vidéos nous avons une

marge d'erreur entre 5 et 10 % ce qui reste très grand.

— **1080p :** La 1080p permet d'avoir des résultats très satisfaisant lorsque la durée de vidéo analysé dépasse les 20 secondes. Au dela de ces 20 secondes nous avons une marge d'erreur constante inférieure à 5%

— **4k :** La résolution 4K donne les meilleurs résultats. Quelle que soit la durée de la vidéo à analyser, cette résolution assure une marge d'erreur inférieure à 5% à chaque fois

Suite à ces observations, on peut en conclure que les vidéos pris avec une résolution inférieur à de la 1080p ne permettent pas d'obtenir des résultats satisfaisants et sont presque inexploitables.
Les résolutions 1080p et 4k se révèlent donc plus intéressantes. Cependant, il faut également prendre en compte que plus la résolution augmente plus le temps d'analyse PIV sera grande comme on peut l'observer sur l'image ci-dessous4.45.

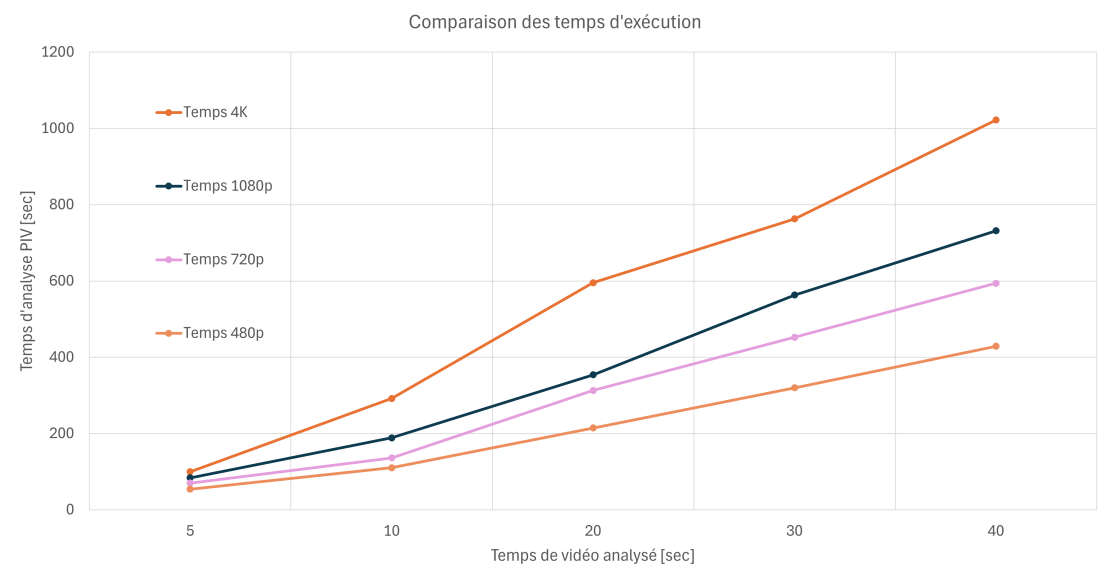


FIGURE 4.45 – Comparaison des temps d'exécution de la PIV en fonction de la durée de la vidéo analysée de Limelette - milieu

Par conséquent il est nécessaire de trouver un équilibre entre le temps d'analyse PIV et le pourcentage d'erreur. Compte tenu des résultats insatisfaisant obtenus avec les résolutions 480p et 720p, il est préférable de se limiter à la 1080p et la 4k.

Sur le graphique ci-dessous 4.46, on peut observer que pour rester sous une marge d'erreur de 3%, il est intéressant de passer d'une résolution 4k à une résolution 1080p au delà de 500 secondes d'analyse PIV. Toutefois, une analyse dépassant 500 secondes est une analyse très longue. Même si l'analyse PIV des vidéos en 4K prend plus de temps que

celle des vidéos en 1080p pour une durée équivalente, il est recommandé de privilégier les vidéos capturées en 4K pour garantir une meilleure précision.

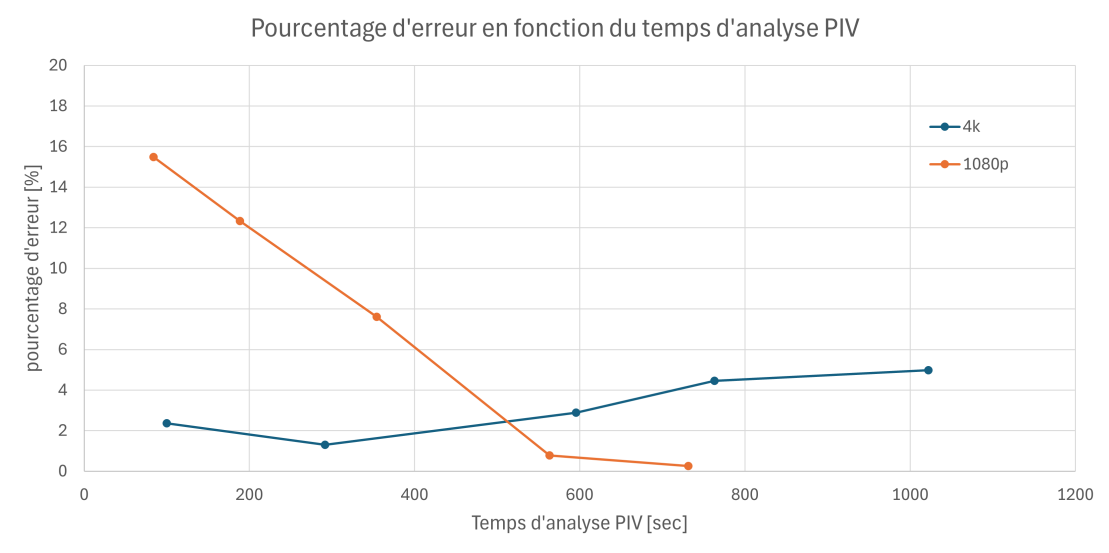


FIGURE 4.46 – Comparaison de la marge d'erreur entre l'analyse d'une vidéo en 1080p et 4k

4.3.5 Détection des balises par l'application

Angle de vue incliné avec balise sur berge

On peut observer sur les figures ci-dessous que la détection des balises sur la berge depuis un angle de vue incliné ne se fait pas correctement. Dans ce cas, la possibilité de déplacer les points de détection dans l'application est utile.

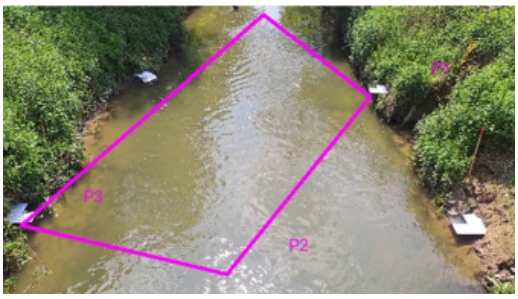


FIGURE 4.47 – Détection de grande balise sur berge

FIGURE 4.48 – Détection de petite balise sur berge

Angle de vue incliné avec balise sur kit

Sur les figures ci-dessous, on observe le même problème que dans la section précédente. La détection des balises sur le kit depuis un angle de vue incliné ne se fait pas correctement. Dans ce cas également, la possibilité de déplacer les points de détection dans l'application est utile

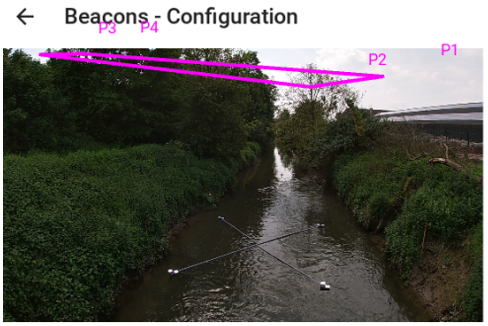


FIGURE 4.49 – Détection de balise sur le grand kit

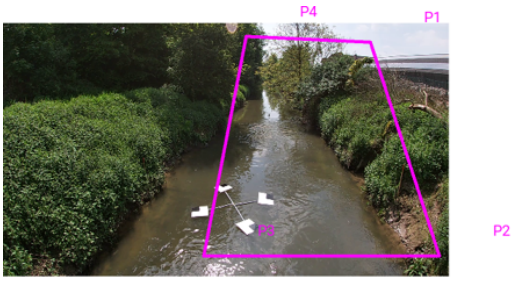


FIGURE 4.50 – Détection de balise sur le petit kit

Angle de vue 90° depuis un drone

Lorsqu'un drone est utilisé pour prendre des vidéos avec un angle de vue perpendiculaire à l'écoulement, la détection des balises se fait correctement que celles-ci soit sur le kit ou sur les berges.

FIGURE 4.51 – Détection de balise sur le kit depuis un drone

FIGURE 4.52 – Détection de balise sur les berges depuis un drone

4.3.6 Influence de l'espacement des balises par rapport à la largeur de la rivière

Dans ce travail, il m'a été demandé de réaliser un kit de taille modulable capable d'aller dans l'eau. Par conséquent, le kit ne peut pas couvrir 100% de la largeur de la rivière. Il est donc pertinent d'étudier l'erreur commise par RiverApp en fonction de la largeur de la rivière couverte par le kit. Les quatre cas présentés sur le graphe ci-dessous (4.53) ont été calculés dans des conditions optimales

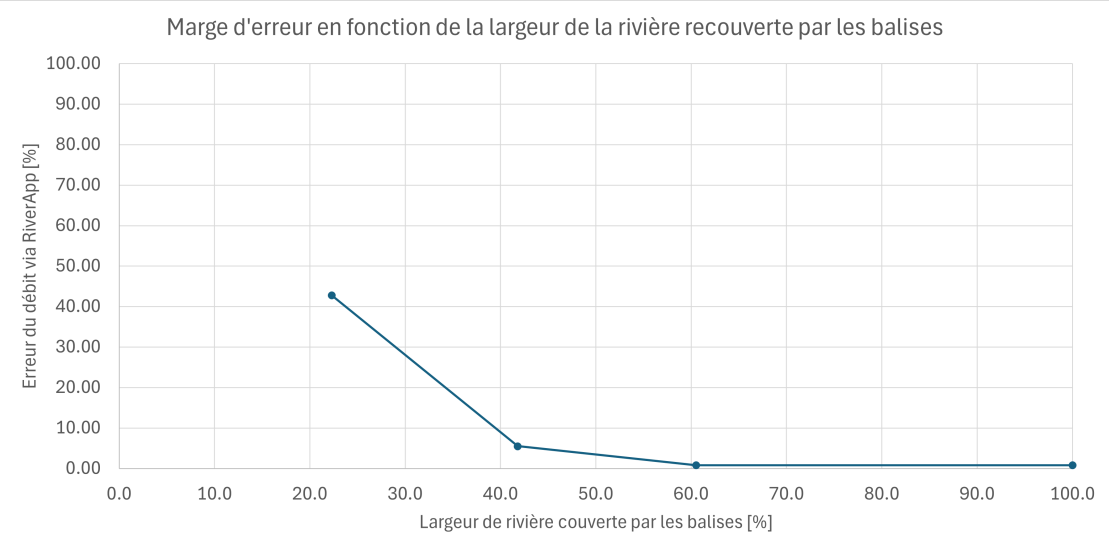


FIGURE 4.53 – Marge d'erreur du débit calculé par RiverApp en fonction de la largeur de la Dyle recouverte

Le graphe ci-dessus (4.53) montre que plus la rivière est couverte par le kit, plus les résultats de l'application sont précis.

Un kit ne couvrant qu'environ 20% de la largeur de la rivière entraîne une marge d'erreur trop importante dans le calcul du débit par RiverApp. Il n'est donc pas recommandé d'utiliser un kit couvrant un si faible pourcentage de la largeur de la rivière.

En revanche, lorsque le kit couvre entre 40% et 60% de la largeur de la rivière, le débit calculé reste acceptable, avec une marge d'erreur d'environ 5%. Au-delà de 60% de la largeur couverte par le kit, les résultats sont comparables à ceux obtenus avec des balises placées sur les berges

Ce résultat est intéressant car, dans cette étude, les données ont été collectées sur la Dyle, une rivière de 7,2 m de largeur, qui est la plus large étudiée depuis la création de RiverApp en 2020. Ainsi, le kit peut être utilisé sur une grande variété de rivières tout

en obtenant des résultats similaires à ceux obtenus si les balises étaient disposées sur les berges.

4.4 Condition optimale

Suite aux analyses des paramètres mentionnés précédemment, il est possible de synthétiser ces informations pour déterminer les conditions optimales de prise de vidéo.. Les conditions optimales auraient les caractéristiques suivantes :

- Un ensemencement de la rivière.
- Une luminosité naturelle suffisante sans contraste et une météo qui ne soit pas changeante.
- Aucune zone d'ombre visible sur la rivière.
- Une vidéo prise depuis un drone stable ou depuis le centre de la rivière si l'utilisation d'un drone n'est pas possible.
- Une résolution en 4k avec une vidéo de maximum 20 secondes ou une résolution en 1080p de minimum 20 secondes.
- Les 4 balises à 100% visible.
- Si un kit est utilisé, celui-ci doit couvrir au minimum 50% de la largeur de la rivière.

Il est bien sûr possible d'obtenir des résultats satisfaisants sans respecter toutes les caractéristiques mentionnées précédemment, mais la marge d'erreur sera plus élevée.

4.5 Comparaison ancien RiverApp et nouveau RiverApp

Afin de conclure cette section sur les analyses de l'application, il est intéressant de comparer les résultats obtenus selon les conditions optimales avec ceux de l'ancienne version de l'application, tels que présentés dans le travail de P. Laurent et C. Dufromont [1].
Cette comparaison révèle que la nouvelle version de RiverApp offre des résultats nettement plus prometteurs et précis que son ancienne version.

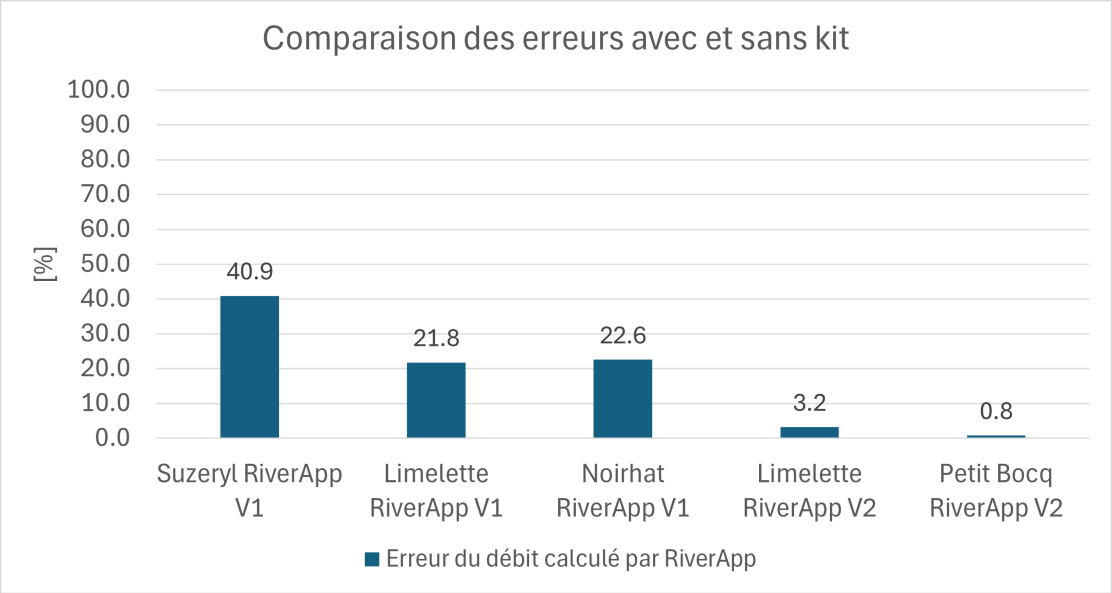


FIGURE 4.54 – Comparaison des résulats fournis par la V1 et la V2 de RiverApp

Chapitre 5

Pistes d'améliorations

Lors des différentes campagnes de mesures et des analyses réalisés avec l'application, de nombreux problèmes ont été constatés et ceux-ci demandent encore des améliorations qui peuvent être corrigés pour les futurs travaux.
Voici une liste des améliorations à approfondir, tant pour les prises de mesures que pour le développement de l'application.

5.1 Amélioration lié à la prise de mesure

Suggestion pour le terrain

Le premier point est une suggestion pratique pour le terrain plus qu'une amélioration. Il serait conseillé pour les futures prises de mesure sur le terrain de se procurer :

1. Une paire de cuissardes montant jusqu'au ventre pour au moins deux personnes, permettant d'effectuer des mesures en toute saison, notamment durant la fin du premier quadrimestre et le début du second, lorsque les températures sont basses, en particulier celle de l'eau.
2. Un drone stable au vent et équipé d'une caméra 4k si possible. Actuellement, un drone Snaptain SP650 est fourni par l'EPL, mais la qualité de sa caméra est insuffisante et le drone n'a pas d'autostabilisation, ce qui le rend difficile à utiliser dans de nombreuses situations.
   Des drones avec camera 4k et une excellente stabilisation sont disponibles pour des prix raisonnables, autour de 500€. Un tel drone permettrait d'obtenir des images de qualité, même dans des conditions météorologiques contraignantes.

Kit d'orthrectification

L'un des objectifs de ce travail était d'améliorer le kit de mesure comme expliqué dans la section 4.1. Malgré les résultats concluants et satisfaisants des nouveaux kits, le kit en PVC a des déformations trop importantes et le kit en bois est assez encombrant et

éventuellement trop lourd.
Il est possible d'améliorer ces aspects en optant pour un matériaux tel que l'aluminium, qui offre un meilleur rapport résistance/poids et une bonne résistance à l'eau. Les profilés extrudés en aluminium, par exemple, sont légers, résistants et modulables.

Coefficient α

Dans la section 2.2.2, le lien entre la vitesse de surface et la vitesse moyenne a été établi en introduisant le coefficient α. Il a également été mentionné que ce coefficient dépend de plusieurs facteurs, notamment des caractéristiques du lit de la rivière.
Il serait intéressant de calculer le coefficient α de chaque site de mesure plutôt que de fixer cette valeur à 0.85 pour chacun d'entre eux. D'autant plus que, comme expliqué dans la section 3.2.2 qu'il est possible de spécifier ce coefficient à l'application.

5.2 Amélioration lié à l'application

Filtres PIV

Dans la précédente version de RiverApp, la possibilité d'appliquer des filtres vidéos avant de lancer la PIV était disponible, et leur utilité a été démontrée dans les travaux de E.de Grand Ry et C.Everaert [4]. Actuellement, bien qu'une prévisualisation des filtres vidéo soit affichée dans l'interface utilisateur de RiverApp, aucun filtres n'est fonctionnel. Il serait bénéfique de réintégrer ces filtres dans la future version de l'application.

Détection des balises

La détection des balises, implémentées par G.Debray et D.Hay [20], présente actuellement des limitations qui ont été mis en évidence dans la section 4.3.5. Cette fonctionnalité fonctionne uniquement lorsque les vidéos sont capturées avec un angle de vue de 90° et que chaque balise est parfaitement visible.
De plus, il faudrait implémenter une fonctionnalité qui permettrait à l'application de continuer à fonctionner même si l'image ne contient pas de balise. Cette amélioration permettrait d'effectuer l'orthorectification à partir d'éléments naturels du terrain.

Configuration du transect

Lors de la configuration du transect dans l'application 3.2.2, l'utilisateur doit positionner manuellement les points délimitant la section de rivière à analyser. Automatiser cette étape serait intéressant, d'autant plus qu'elle influence fortement le résultat final. De plus, il arrive que ces points ne correspondent pas à leur emplacement initial, comme illustré par les figures5.1 et 5.2, où le transect, qui était initialement aligné sur la ligne rose, se retrouve finalement sur la ligne verte.

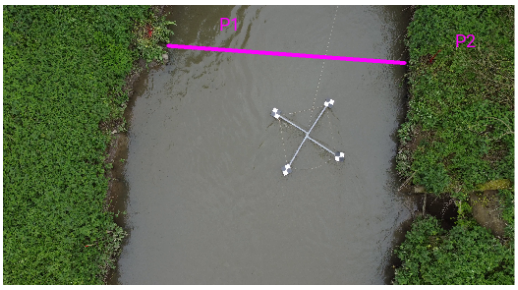


FIGURE 5.1 – Positionnement initial du transect

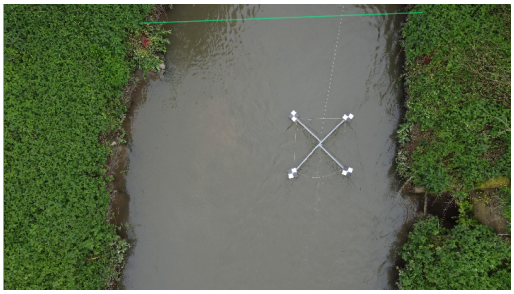


FIGURE 5.2 – Positionnement utilisé par RiverApp

Chapitre 6

Conclusion

Ces dernières années, le besoin de moderniser l'hydrométrie s'est fait ressentir, en particulier en raison du changement climatique qui favorise les phénomènes de crues et d'étiage. Les techniques non-intrusives développées récemment pour répondre à cette problématique sont très prometteuses. C'est la raison pour laquelle, au sein de l'EPL, une application a été créée en 2020 et mise à jour en 2023 afin d'estimer le débit d'une rivière à partir d'une vidéo de l'écoulement.

L'application reçue en septembre n'étant pas terminée, il a fallu attendre qu'Andréas Bombaert, responsable de la partie informatique et collaborateur sur ce mémoire, finalise la nouvelle version de RiverApp avant de pouvoir l'utiliser. En conséquence, la première partie de ce travail s'est concentrée sur la création d'un kit d'orthorectification modulable basé sur un prototype développé antérieurement. Ce kit servant à faciliter les prises de mesures sur site.

La première étape de la création du kit consistait à établir le cahier des charges sur base de la première ébauche du kit. Un premier kit en PVC a été fabriqué, offrant une construction facile, intuitive et légère, mais ses déformations excessives ne répondaient pas aux critères du cahier des charges. En parallèle, un kit en bois plus complexe a été conçu, accompagné d'un guide de montage. Ce dernier répond à tous les critères du cahier des charges, mais est plus lourd et encombrant que le kit en PVC. Après comparaison entre le prototype initial, le kit en PVC et le kit en bois, il a été conclu que le kit en bois était le plus adapté.

Parallèlement, une liste de paramètres à tester a été établie pour évaluer la sensibilité de l'application, ainsi qu'une méthode pour isoler ces paramètres.

Ensuite, avec l'aide d'Andréas Bombaert, des mesures ont été effectuées pour tester ces paramètres et augmenter la base de vidéos à analyser. Lors de ces excursions, le kit d'orthorectification en PVC a été testé, permettant d'identifier les besoins du kit et ses fonctionnalités, et d'améliorer la version en bois pour la rendre plus pratique et optimale.

Suite à ces mesures, le protocole de mesure a été mis à jour et l'analyse des différents paramètres isolés lors des tests de l'application a permis de dresser une liste de conditions optimales pour les prises de mesure.

Dernièrement, en utilisant une vidéo dans ces conditions optimales, il a été possible de comparer les résultats obtenus avec l'ancienne et la nouvelle version de RiverApp. La marge d'erreur est passée de 20-40% à moins de 5 %.

Ce travail a permis d'améliorer la qualité des mesures pour les futurs utilisateurs, d'identifier les conditions optimales pour ces mesures et de fournir un kit qui leur fera gagner du temps. Tous les paramètres n'ont pas encore été testés et il reste une marge d'erreur sur l'application. C'est pourquoi des pistes d'amélioration ont été listées à l'intention des futurs utilisateurs.

Annexes

Annexes A

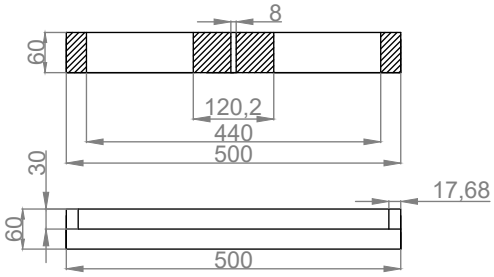
Récapitulatif des tailles du kit en PVC

	Petit kit		Moyen kit		Grand kit	
	L [m]	Lcourant [m]	L [m]	Lcourant [m]	L [m]	Lcourant[m]
L1	1.53	1.6	3.00	3.12	4.35	4.45
L2	1.67	1.74	2.98	2.98	4.42	4.56
L3	1.60	1.64	3.01	3.01	4.49	4.50
L4	1.62	1.43	3.05	2.88	4.37	4.17
L5	2.44	2.33	4.33	4.32	6.16	6.13
L6	2.2	2.19	4.18	4.17	6.31	6.3
$Flèche_{max}$ [m]	0.25		0.65		1.37	

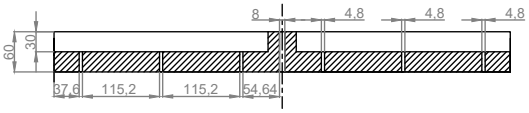
Annexes B

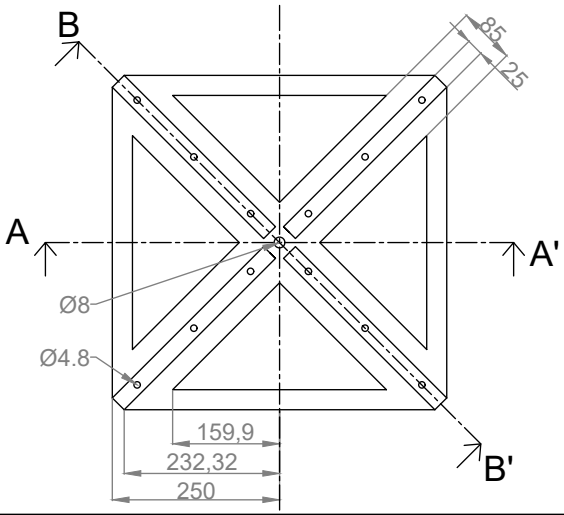
Plan kit en bois

Coupe A-A'

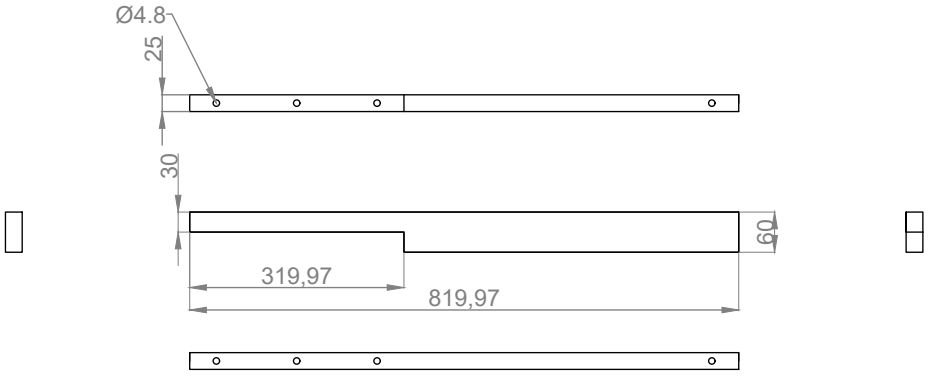


Coupe B-B'

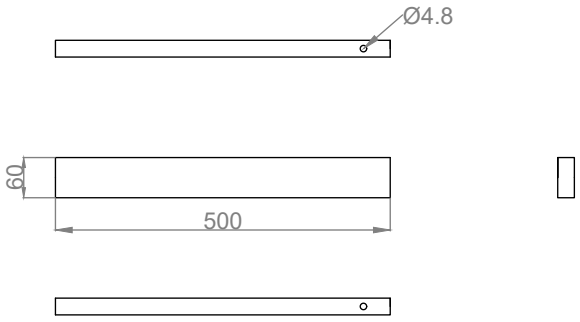




Base du kit en bois	
UCL	EPL
Sandra SOARES-FRAZÃO Pierre-Yves GOUSENBOURGER	
Date	03/06/2024
Dessiné par	Alexandre Mignot
Format	A3
Echelle	1:5



Membrure en bois encastrée	
UCL	EPL
Sandra SOARES-FRAZÃO Pierre-Yves GOUSENBOURGER	
Date	03/06/2024
Dessiné par	Alexandre Mignot
Format	A3
Echelle	1:5



Membrure en bois extension	
UCL	EPL
Sandra SOARES-FRAZÃO Pierre-Yves GOUSENBOURGER	
Date	03/06/2024
Dessiné par	Alexandre Mignot
Format	A3
Echelle	1:5

Annexes C

Guide de montage du kit en bois

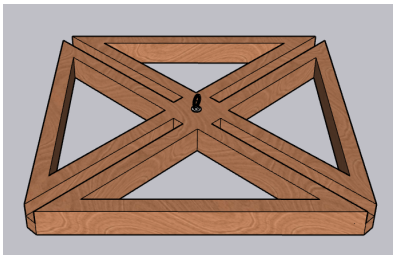
Kit en bois de petite taille

Pour assembler le kit en bois de petite taille, il vous faudra disposer du matériel suivant :

- Base du kit en bois
- 1 Boulon à anneau M10 x 73
- 4 Membrures en bois encastrée B
- 2 rondelles M10
- 16 boulons M6
- 32 rondelles M6
- 4 Câbles
- 8 tendeurs
- 8 crochets à oeil de vis (55mm, 12mm)
- 2 clés mixte de 6mm
- 2 clés mixte de 10mm
- 4 balises

1. **Fixation du boulon à anneau :**

   Tout d'abord, commencez par fixer le boulon M10x73 au centre de la base du kit en bois, comme illustré sur la figure ci-contre. Pour cette étape, il vous faudra 2 clés mixtes de 10 mm afin de fixer le boulon. Assurez vous également d'intercaler les rondelles M10 entre le boulon et le bois, celles-ci permettent de protéger le bois contre les dégâts dus à la pression du boulon. Cet anneau servira à tenir le kit lors de vos mesures.



2. **Assemblage de la base et des membrures :**

Munissez vous de la base du kit et d'une membrure en bois à encastrer B, puis emboîtez-les en suivant les instructions illustrées dans les figures ci-dessous :

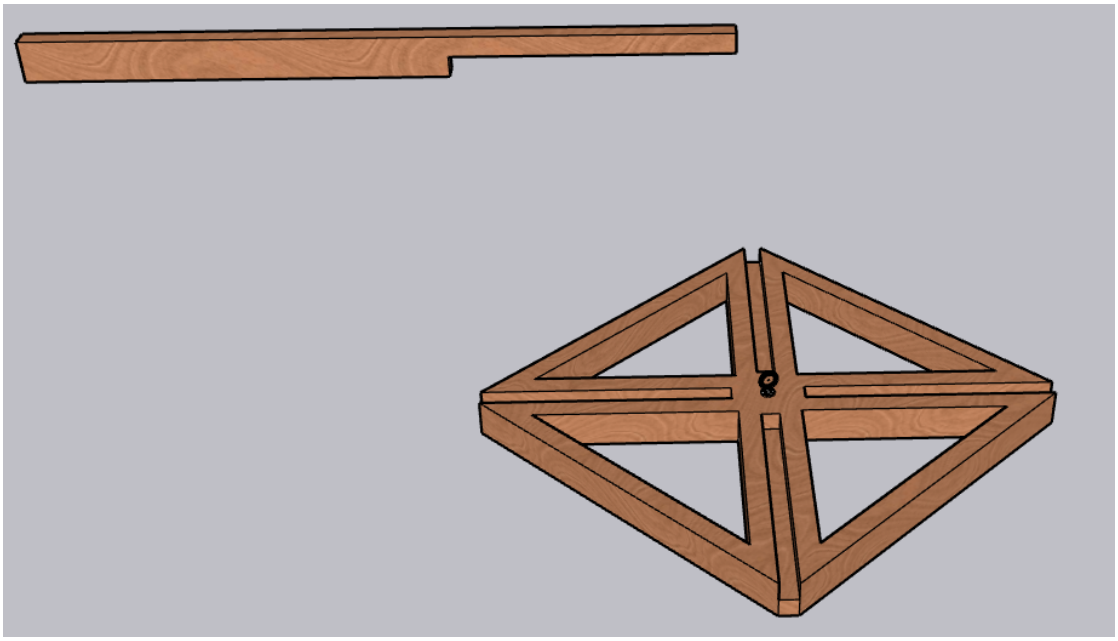


FIGURE C.1 – Membrure à encastrer

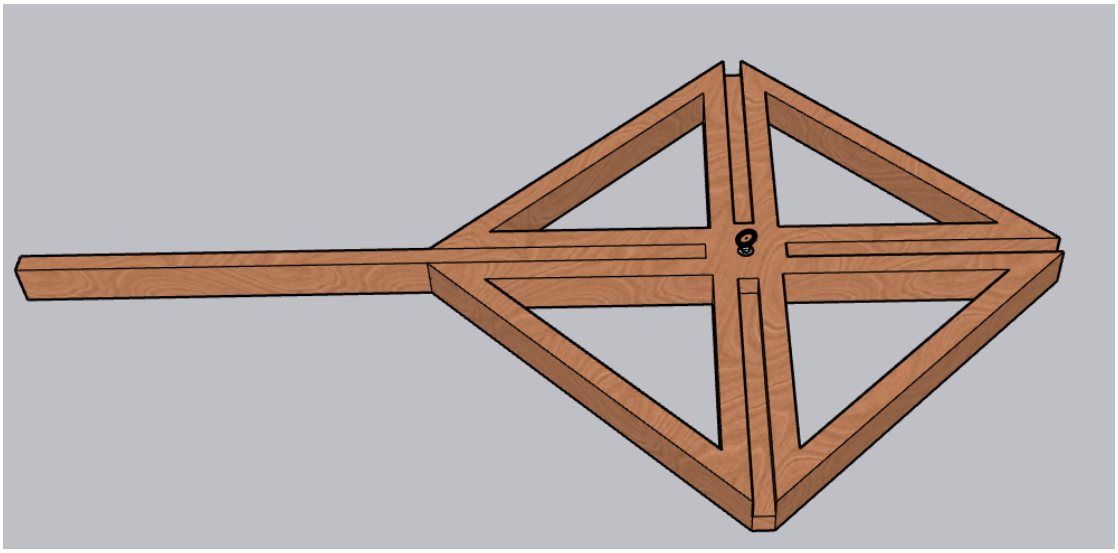


FIGURE C.2 – Membrure encastrée

Ensuite, fixez les 2 éléments en utilisant 3 boulons M6 et 6 rondelles M6. Pour cette étape, il vous faudra 2 clés mixtes de 6 mm pour serrer les boulons, comme illustré sur la figure C.3. Il faut également faire attention à ce que les rondelles soient placées entre le bois et les boulons pour les mêmes raisons que pour la première étape.

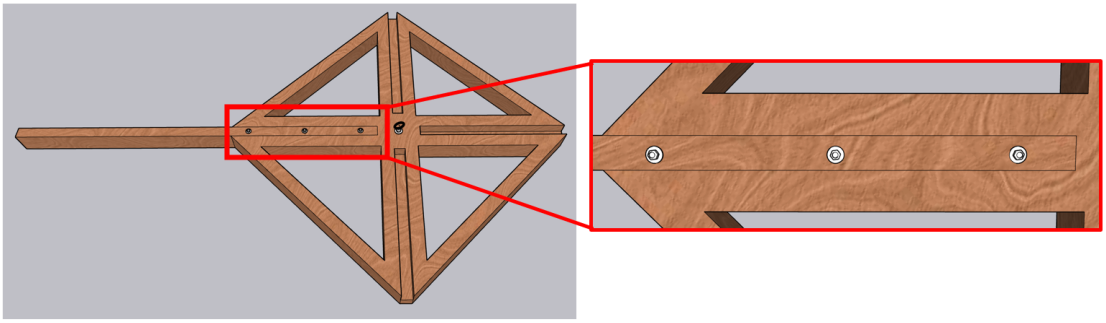


FIGURE C.3 – Assemblage des boulons

Répétez cette opération pour chaque coin du kit.

3. **Fixation des câbles :**

   Avant de commencer cette étape, il est important de noter que les crochets à oeil de vis sont déjà installés sur le kit. Il faut éviter le plus possible de les retirer pour éviter d'endommager le bois avec des manipulations répétées.
   Pour cette étape, accrochez les câbles aux crochets et mettez les en tension à l'aide des tendeurs.

4. **Fixation des balises :**

   Pour terminer l'assemblage du kit, il reste à fixer les balises aux extrémités des membrures en utilisant les trous prévus à cet effet. De la même manière que pour les étapes précédentes, utilisez des rondelles pour chaque boulon et serrez-les avec les clés mixtes.

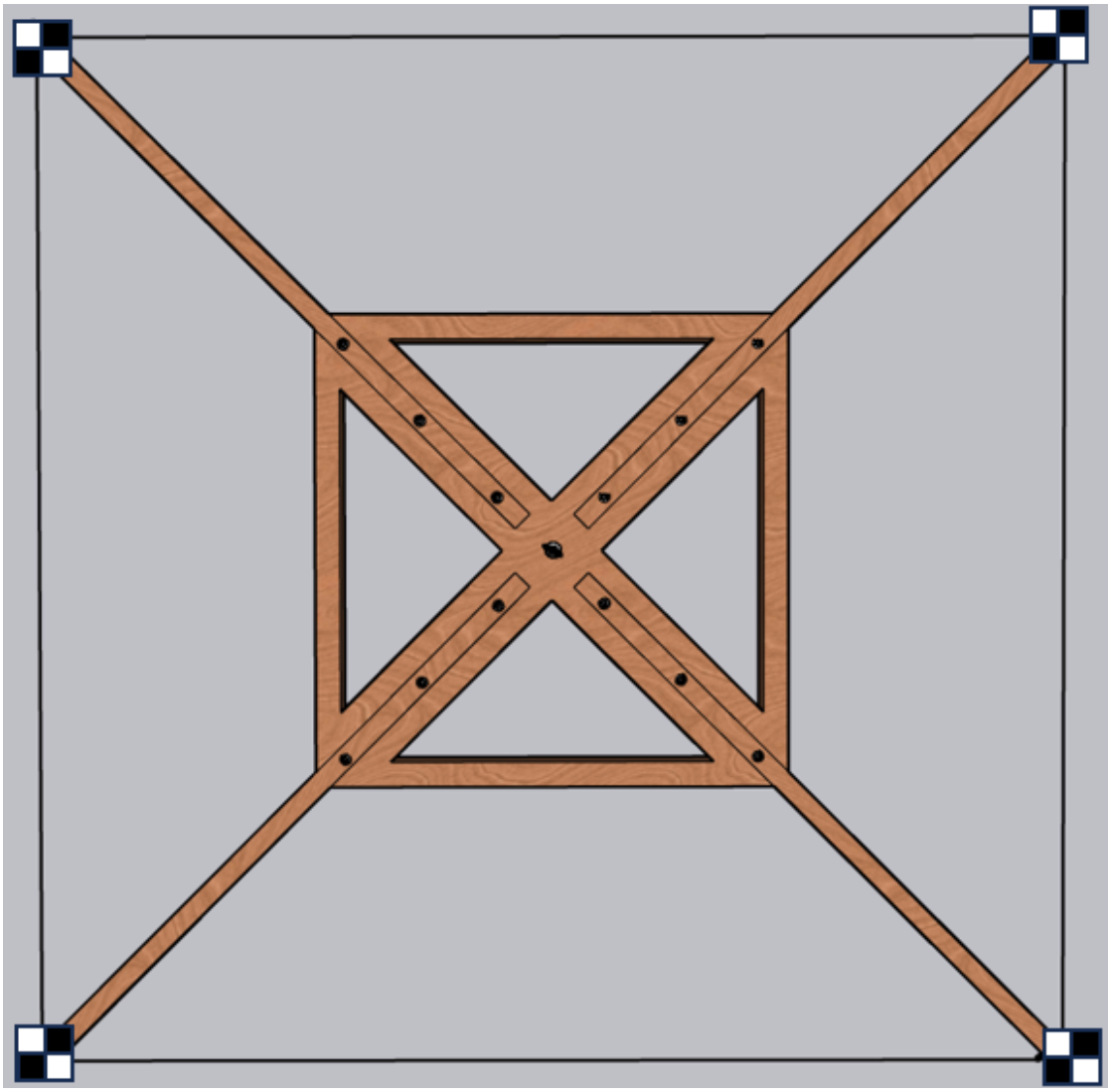


FIGURE C.4 – Kit en bois final

Kit en bois moyenne et grande taille

Pour les kits de moyenne et grande taille, il vous faudra une étape supplémentaire entre l'étape 2 et l'étape 3 de la section précédente. Cette étape consiste à assembler les membrures en bois d'extension sur les membrures en bois encastrées B.

Étape 2.5 Extension du kit :

Pour cette étape, il faudra le matériel suivant :
— 8 Charnière métalliques autobloquantes en T (5.1cm)
— Membrure en bois extension B

De la même manière que les crochets à oeil de vis, les charnières métalliques autobloquantes en T sont déjà fixées sur les membrures en bois et il faut éviter le plus possible de les retirer pour éviter d'endommager le bois avec des manipulations répétées.
Ces charnières sont fixes et s'emboîtent de la manière illustrée sur la figure ci-dessous.

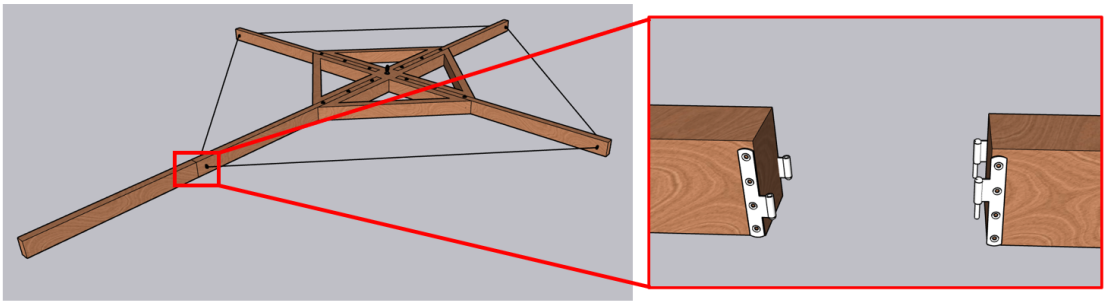


FIGURE C.5 – Assemblage charnière

Il vous faudra répéter cette étape pour chaque coin restant afin d'obtenir le kit de taille moyenne.
Pour le kit de grande taille, réitérez toutes ces étapes deux fois.

Annexes D

Tableaux de résultats

D.1 Débits limelette - vidéo du milieu du pont

Temps de vidéo analysé [sec]	Débits calculés par RiverApp [m^3/s]	Débit Aqualim
5	2,31	2,09
8	2,24	2,09
10	2,19	2,09
15	2,19	2,09
20	2,21	2,09
25	2,22	2,09
30	2,14	2,09
35	2,11	2,09
40	2,05	2,09
45	1,99	2,09

TABLE D.1 – Débits calculés en commençant l'analyse au début de l'ensemencement

D.2 Débits limelette - vidéo de la gauche du pont

Temps de vidéo analysé [sec]	Débits calculés par RiverApp [m³/s]	Débit Aqualim
5	1,77	2,09
10	1,69	2,09
15	1,66	2,09
20	1,58	2,09
25	1,73	2,09
30	1,63	2,09

TABLE D.2 – Débits calculés par RiverApp sur la Dyle à Limelette, depuis la gauche du pont

D.3 Débits limelette - vidéo de la droite du pont

Temps de vidéo analysé [sec]	Débits calculés par RiverApp [m³/s]	Débit Aqualim
5	2,13	2,09
10	1,95	2,09
15	1,86	2,09
20	1,79	2,09

TABLE D.3 – Débits calculés par RiverApp sur la Dyle à Limelette, depuis la droite du pont

D.4 Débit Petit Bocq - vidéo à 90°

Temps de vidéo analysé [sec]	Débits calculés par RiverApp [m³/s]	Débit dilution
5	0,37	0,37
8	0,37	0,37
10	0,37	0,37
15	0,37	0,37
20	0,36	0,37
25	0,36	0,37

TABLE D.4 – Débits calculés par RiverApp sur la vidéo à 90° au dessus du Petit Bocq

D.5 Débit Petit Bocq - vidéo à 45°

Temps de vidéo analysé [sec]	Débits calculés par RiverApp [m^3/s]	Débit dilution
5	0,4	0,37
8	0,4	0,37
10	0,39	0,37
15	0,39	0,37
20	0,37	0,37
25	0,37	0,37
35	0,36	0,37

TABLE D.5 – Débits calculés par RiverApp sur la vidéo à 45° au dessus du Petit Bocq

Annexes E

Protocole de prise de mesures

Fiche d'information générale

Nom du projet : .....
Lieu : .....
Cours d'eau : .....
Date : ...../...../..... **Heure :** .....
Prise de vue : .....
Condition Météorologiques : .....

Mesure de la bathymétrie

La section suivante présentera les étapes générales de la mesure de la bathymétrie, ainsi que les équipements requis :

- 2 pieux en bois
- une bombe de couleur/peinture
- un mètre ruban (20m)
- un mètre gradué ou perche transparente à tête de vitesse
- Cuissarde de pêche

1. **Sélection de l'emplacement** :
   Choisissez l'emplacement où vous souhaitez effectuer la mesure de la bathymétrie. Délimitez la section à étudier en posant un pieu en bois de part et d'autre de la rivière et colorez l'extrémité du pieu à l'aide de la bombe de couleur. Il est important de mettre en évidence le pieu à l'image afin de faciliter sa détection à l'oeil nu lors de l'utilisation de l'application.
2. **Mise en place** :
   Attacher le mètre ruban à un pieu en bois et le dérouler jusqu'au pieu de l'autre côté de la rivière en veillant à ce que le mètre soit bien tendu, de sorte à pouvoir lire la distance directement sur le mètre tendu. Il vous faut ensuite, déterminer

l'intervalle à partir duquel vous allez prendre les mesures. Il est conseillé d'ajuster cet intervalle en fonction de la largeur de la rivière car cette étape peut être très lourde. Par exemple, lors des prises de mesures sur la Dyle (largeur de rivière 8m) un intervalle de 20 cm a été utilisé, tandis que sur le petit Bocq (largeur de rivière de 3.6m), un intervalle de 10 cm a été utilisé.

3. **Mesure** : Pour mesurer la bathymétrie, il est possible d'utiliser un mètre gradué ou une perche transparente à tête de vitesse pour mesurer la profondeur.
   La perche transparente est plus efficace dans le sens où l'on peut mesurer la profondeur et s'assurer que celle-ci est parfaitement à la verticale à l'aide d'un niveau à bulle tridimensionnelle. De plus, elle permet également de mesurer la vitesse de l'écoulement comme le montre la figure 2.11.
4. **Encoder la bathymétrie** :

   Pour encoder la bathymétrie, il faut créer un fichier *.txt* et y insérer les coordonnées comme sur la figure 3.14. Les abscisses commencent au point le plus à gauche de la rivière, tandis que les ordonnées commencent au point le plus profond mesuré.

Pose des balises

Comme mentionné dans la section 2.2.1, pour réaliser une analyse PIV correcte, il est nécessaire de réaliser une orthorectification. Afin de préparer ces étapes, il est nécessaire d'avoir le matériel suivant :

— 4 balises (GCPs)
— Station dGPS Leica1200
— Kit d'orthorectification (4.2)
— Corde

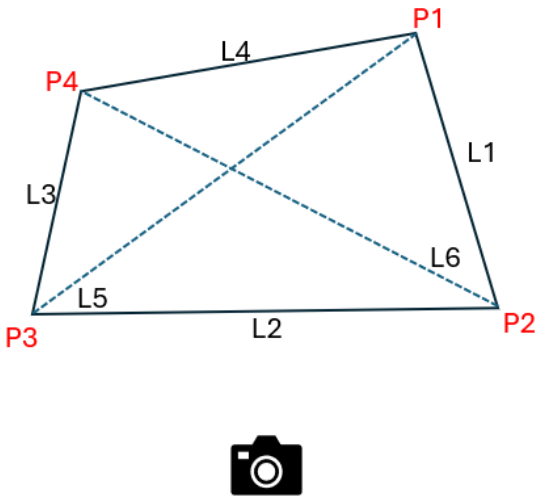
Pour ces étapes, deux approches sont maintenant envisageables. La méthode est disponible avec ou sans kit d'orthorectification.

— **Méthode sans kit d'orthorectification :**

1. **Pose de balise** :
   Dans un premier temps, il faut placer les balises. Pour ce faire, il faut les placer, sur les berges, aux 4 coins de la zone que vous souhaitez traiter. Ces balises doivent être visibles depuis la caméra qui sera utilisée.
2. **Mesurer la distance entre les balises** :
   Ensuite, il vous faudra mesurer la distance entre les balises comme l'indique la figure E.1. Si vous avez uniquement de la corde, il vous faudra mesurer les distances les séparant à l'aide de celle-ci au risque d'avoir des mesures imprécises dues à la végétation des berges ou d'autres obstacles.
   Cependant, si vous savez vous procurer une station dGPS Leica1200, il est possible de prendre les coordonnées GPS de chaque balise avec une précision de +- 2[cm] et à partir de ces coordonnées d'utiliser la formule de distance

entre 2 points fonctionne :

$$L_{A-B} = \sqrt{(x_B - x_A)^2 + (y_B - y_A)^2 + (z_B - z_A)^2} \tag{E.1}$$



L1	[m]
L2	[m]
L3	[m]
L4	[m]
L5	[m]
L6	[m]

FIGURE E.1 – Teamplate mesure des balises

3. **Mesurer la Lens position** :

   Comme expliqué dans le guide utilisateur et illustré sur l'image 3.9, il est désormais nécessaire à l'application de connaître la position de la caméra selon le repère de la figure3.9. De la même manière que dans le point précédent, il est possible de mesurer ces distances avec une corde ou avec une station dGPS.

— **Méthode avec kit d'orthorectification :**

Dans le cas où un kit d'orthorectification est utilisé, on épargne un bon nombre de manipulations laborieuses.
Dans ce cas-ci, les balises sont directement fixées sur le kit et les distances les séparant sont connues et sont référencées dans la section 4.1 4.1.
Il suffit donc seulement de mettre le kit à l'eau et de mesurer la *lens position*, pour ce dernier, il est possible de procéder de la même manière que sans kit d'orthorectification.

Prise de vidéo

Finalement, il nous faudra prendre les vidéos de l'écoulement et pour se faire le matériel suivant est nécessaire :

- une caméra (GoPro ou smart phone)
- Un trépied
- un drone avec caméra intégrée
- des traceurs (copeaux de bois 10/40[mm])
- un filet 2x10[m], maillage 1.8[mm]

1. **Position de la caméra :**

   - Dans le cas où l'on utiliserait une caméra, il faut placer et orienter celle-ci de manière à avoir sur l'image les 4 balises ainsi que les pieux en bois de la bathymétrie. On peut stabiliser les caméras à l'aide d'un trépied si le terrain le permet.
   - Si l'on utilise un drone, il faut s'assurer que les balises ainsi que les pieux en bois de la bathymétrie soient visibles depuis celui-ci et que le drone reste au maximum stationnaire le temps de la vidéo.

2. **Lancement de la vidéo :**
   Avant de lancer la vidéo, 2 derniers préparatifs sont nécessaires, premièrement l'ensemencement. Pour ensemencer la rivière, il faudra se munir des traceurs et se placer suffisamment en amont de la zone d'intérêt pour assurer un ensemencement recouvrant une zone assez grande et de les jeter dans l'eau en nombre suffisant.
   Deuxièmement, il faudra placer le filet en aval de la rivière pour récupérer les traceurs lancés en amont. Ce filet permet de faire des économies et de ne pas polluer la rivière.
   Maintenant, que tous les préparatifs sont faits, la vidéo peut être lancée. Il est important de noter que la vidéo prise doit être sous le format *.mp4*

Annexes F

Calculs kit en bois

	Force en action		Valeur max
	Poids propre	**Action de l'eau**	
Flexion simple [MPa]	1.251	3.375	16.615
Effort tranchant [kN]	0.018	0.201	2.769
Flèche en parte à faux [mm]	3.16	14.30	15.00

TABLE F.1 – Résultats des critères de résistance du kit en bois

Mode de rupture n^o	$F_{v,Rk}$ [kN]
1	4.05
2	15.06
3	4.96
4	1.54
5	1.85
6	2.07

TABLE F.2 – Résultats des modes de ruptures de l'assemblage encastrement

Bibliographie

[1] Dufromont P Célestin ; Laurent. Mesures de débit en rivière à partir de techniques d'imagerie : développement d'une application [Master's thesis]. Louvain-la-Neuve, BE ; 2022. Available at https://dial.uclouvain.be/memoire/ucl/fr/.

[2] RENARD S. Development of an application for river discharge measurement [Master's thesis]. Louvain-la-Neuve, BE ; 2020. Available at https://dial.uclouvain.be/memoire/ucl/object/thesis:26501.

[3] Arnaud M. Amélioration et correction du code source de RiverApp [Bachelor's thesis]. Louvain-la-Neuve, BE ; 2023.

[4] de Grand Ry C Edouard ; Everaert. Mesures de débit en rivière à partir de techniques d'imagerie : développement d'une application [Master's thesis]. Louvain-la-Neuve, BE ; 2021. Available at https://dial.uclouvain.be/memoire/ucl/fr/.

[5] TECHNIQUES DE MESURE DE DEBIT ;. (Consulté le 24/05/2024). https ://iris.who.int/bitstream/handle/10665/363746/363746.pdf ?sequence=3.

[6] Hydroservices. Échelle limnimétrique ; 2023. Consulté le 26/05/2024. Available from : https://www.hydroservices.net/actualites/echelle/2.

[7] Ministère de la Transition Écologique et Solidaire. Courbe de tarage (HU) ; s.d. Consulté le 12/05/2024. Available from : http://wikhydro.developpement-durable.gouv.fr/index.php/Courbe_de_tarage_%28HU%29.

[8] OTT HydroMet. OTT Water Flow Meter ;. Consulté le 12 mai 2024. https://www.ott.com/fr-fr/produits/le-debit-deau-70/ott-c2-463/.

[9] OTT HydroMet. OTT MF Pro 177 ; n.d. Consulté le 12 mai 2024. Available from : https://www.ott.com/fr-fr/produits/le-debit-deau-70/ott-mf-pro-177/.

[10] Ifremer. Courantomètre ; 2021. Consulté le 12 mai 2024. Available from : https://littoral.ifremer.fr/Laboratoires-Environnement-Ressources/LER-Normandie/Infrastructures-et-Moyens/Engins-de-prelevements-et-de-mesures/Courantometre.

[11] non spécifié A. Outils pour améliorer la mesure du débit minimum biologique des petits cours d'eau. 2023. Consulté le 14/04/2024. Available from : https://www.researchgate.net/publication/367536401_Outils_pour_ameliorer_la_mesure_du_debit_minimum_biologique_des_petits_cours_d%27eau.

[12] Pike EA, Robertson DM, Hunt RJ. Development and testing of a modified transparent velocity-head rod for stream discharge measurements. Canadian Water Resources Journal. 2016 ;41(3) :372-84. Consulté le 10/04/2024.

[13] d'expertise en analyse environnementale du Québec C. Mesure du débit dans un conduit à l'aide d'un débitmètre à effet Doppler ; 2023. Consulté le 02/05/2024. Available from : https://www.ceaeq.gouv.qc.ca/documents/publications/echantillonnage/debit_conduit_ouvc7.pdf.

[14] Thollet F, Bonazzi C, Coz JL, Bonnefoy A. Solution NaCl : UN LOGICIEL POUR RENDRE PLUS ACCESSIBLES LES JAUGEAGES PAR DILUTION AU SEL ; 2021. Consulté le 24/05/2024. SHF Hydrométrie 2021 : de la mesure à la prise de décision, Nov 2021, Montpellier, France. Available from : https://hal.inrae.fr/hal-03460773/document.

[15] de l'Environnement M. Charte qualité de l'hydrométrie. France : Ministère de l'Environnement ; 1998. Consulté le 25/05/2024.

[16] Belleudy P. Restoring flow capacity in the Loire River bed. Hydrological Processes. 2000 ;14 :2331-4. Consulté le 27/05/2024.

[17] Hauet A. Estimation de débit et mesure de vitesse en rivière par Large-Scale Particle Image Velocimetry [Hydrologie]. Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG ; 2006. Consulté le 08/05/2024.

[18] NVIDIA Corporation. VPI - Vision Programming Interface : Fisheye Example ; 2024. Consulté le 25/05/2024. Available from : https://docs.nvidia.com/vpi/sample_fisheye.html.

[19] Unknown A. Orthorectification for Multi-Sensor Imagery Data Fusion. Geospatial World. 2023. Consulté le 26/05/2024. Available from : https://www.geospatialworld.net/article/orthorectification-for-multi-sensor-imagery-data-fusion/.

[20] Debray D Grégoire ; Hay. Mesure de débit en rivière : analyse et optimisation du projet riverApp [Master's thesis]. Louvain-la-Neuve, BE ; 2023. Available at https://dial.uclouvain.be/memoire/ucl/fr/.

[21] SOARES-FRAZÃO S. Fluvial hydraulics ; 2023. Consulté le 17/03/2024. Lecture notes from LGCIV2053-Fluvial hydraulics.

[22] Name A, Name CA. Title of the Paper. In : Proceedings of the 11th Journees Hydroinformatique Conference. Location of the Conference ; 2020. p. Page numbers. Consulté le 28/05/2024. Available from : https://actesjh.ec-nantes.fr/images/11JH/Annexe/Papier03.pdf.

[23] Legout C, Esteves M, Navratil O, Evrard O. Assessment of erosion and suspended sediment transport with the dynamic rating curve approach and the sediment rating loop method. Water Resources Research. 2005 ;41(9) :W09420. Consulté le 25/05/2024. Available from : https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1029/2005WR004430.

[24] Hauet A, et al. Méthodes innovantes pour la mesure des débits fluviaux en continu : profileur Doppler fixe horizontal (H-aDcp) et analyse d'images (LSPIV). La Houille Blanche. 2009 ;3 :123-31. Consulté le 30/05/2024.

[25] L'hydrométrie en Wallonie - Débit ;. (Consulté le 02/02/2024). https://hydrometrie.wallonie.be/home/observations/debit.html?mode=announcement.

[26] Foundation PS. Tutoriel : Environnements Virtuels et Packages ; 2024. Consulté le 26/05/2024. Available from : https://docs.python.org/fr/3/tutorial/venv.html.

[27] BOMBAERT A. RiverApp : Application de mesure non-intrusive du débit des rivières basée sur l'analyse PIV d'une vidéo de l'écoulement [Master's thesis]. Louvain-la-Neuve, BE ; 2024.

[28] LATTEUR P. Structures en bois ; 2023. Consulté le 18/11/2023. Lecture notes from LGCIV2043-Structures en bois.

[29] Provost M. Comment dimensionner une colonne pour éviter le flambement ? ; 2024. Consulté le 12/03/2024. Available from : https://www.notionsstructures.be/les-notions/flambement/comprendre/.

[30] Boiten W. Hydrometry. 3rd ed. IHE Delft Lecture Note Series. CRC Press ; 2020. (Consulté le 12/04/2024).

UNIVERSITÉ CATHOLIQUE DE LOUVAIN
École polytechnique de Louvain
Rue Archimède, 1 bte L6.11.01, 1348 Louvain-la-Neuve, Belgique | **www.uclouvain.be/epl**