

UNIVERSITE DE SHERBROOKE
DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL ET GENIE DU BATIMENT

**ANALYSE DE LA PRECISION ET DE L'INCERTITUDE DES MESURES DE
DEBITS PRISES PAR LA METHODE LSPIV (LARGE-SCALE PARTICLE IMAGE
VELOCIMETRY)**

RAPPORT FINAL

FEVRIER 2024



Équipe de réalisation

Rédaction :

Mélanie Trudel, ing. PhD

Professeur agrégé, Département de génie civil et de génie du bâtiment, Université de Sherbrooke

Jay Lacey, ing. PhD

Professeur agrégé, Département de génie civil et de génie du bâtiment, Université de Sherbrooke

Antoine Pruneau, MSc

Agent à la recherche, Département de génie civil et de génie du bâtiment, Université de Sherbrooke

Victoria Litalien, MSc

Agent à la recherche, Département de génie civil et de génie du bâtiment, Université de Sherbrooke

Imène Ben Nasr, PhD

Stagiaire Post-Doctoral, Département de génie civil et de génie du bâtiment, Université de Sherbrooke

Réalisation des analyses :

Antoine Pruneau

Victoria Litalien

Imène Ben Nasr

Mélanie Trudel

Marine Bunder

Comité de suivi

Nouaili Arbi, *Hydro-Québec*

Alexandrine Bissaillon, *Ouranos*

Guy Bouchard, *Hydro-Québec*

Claudine Fortier, *Ministère de l'Environnement, de la Lutte Contre les Changements Climatiques, de la Faune et des Parcs*

Jérôme Le Coz, *INREA Lyon*

Rémi Potvin, *Hydro-Québec*

Gabriel Rondeau-Genesse, *Ouranos*

Richard Turcotte, *Ministère de l'Environnement, de la Lutte Contre les Changements Climatiques, de la Faune et des Parcs*

Sommaire

Les débits sont une information essentielle à la gestion de l'eau. Les méthodes traditionnellement utilisées pour estimer le débit ont des limites, particulièrement pour les forts débits. La méthode LSPIV pourrait venir compléter la stratégie de mesures afin de répondre aux lacunes des méthodes déjà utilisées. L'objectif de ce projet est d'analyser la performance (précision et incertitude) de la méthode LSPIV pour la mesure du débit dans des rivières au Québec. Des données ont été acquises sur huit sites répartis sur sept cours d'eau situés en Estrie (largeur variant de 10 m à 105 m ; débits variant de 1,20 m³/s à 420 m³/s). Lors de la campagne terrain, les images ont été acquises à l'aide de drones et une mesure de débit de référence a été acquise à l'aide d'un ADCP ou provenait d'une station hydrométrique. Au total, 51 mesures (prises entre novembre 2021 et juillet 2023) ont été traitées dans le logiciel Fudaa-LSPIV. 32 mesures ont permis d'obtenir un débit ayant un écart de moins de 10 % avec la mesure de référence, dont 24 mesures ayant un écart de moins de 5%. Ces bons résultats sont regroupés sur certaines rivières soient la rivière Eaton (10 sur 12), la rivière Aux Saumons (5 sur 7) et le ruisseau Kee (4 sur 4). L'impact de plusieurs sources d'incertitude lors de l'acquisition des données a été évalué. Sur les 32 mesures où de bons résultats ont été obtenus, 24 d'entre elles avaient une présence élevée de traceurs, cinq d'entre elles avaient une présence modérée de traceurs et trois d'entre elles avaient peu ou pas de traceurs. Une grande quantité de traceurs semble donc un indicateur de succès pour la méthode LSPIV. L'impact de la précision de la section bathymétrique choisie (entre 0,5% et 17%) et de son positionnement sur l'image lors du traitement ont été analysés (< 1,24% pour un écoulement uniforme et de 10 à 77% pour un écoulement non uniforme). Selon les résultats, une précision de ± 10 cm de la mesure de niveau d'eau est suffisante pour obtenir de bons résultats. Les paramètres de traitement des données ayant la plus grande influence sur les résultats sont le coefficient de vitesse (paramètre α), la taille de l'aire d'interrogation et la taille de l'aire de recherche. Peu importe la rivière et le débit, la variation du paramètre α entre 0,80 et 0,90 a engendré des écarts d'environ 12% dans les débits calculés. De plus, pour certains sites, il a été noté que le paramètre α semble varier dans le temps (d'une année à l'autre), ce qui indique qu'il devrait être calibré chaque année. De son côté, la variation de l'aire d'interrogation et de l'aire de recherche engendre aussi des différences importantes dans les débits calculés. Dans de prochaines recherches, il serait intéressant d'explorer le rôle des caractéristiques des traceurs (taille, forme, distribution, quantité) dans la détermination des tailles de l'aire de recherche et de l'aire d'interrogation. La détermination et la variation du paramètre α dans le temps devraient également être davantage étudiées.

Table des matières

Sommaire	iii
Table des matières.....	iv
Liste des figures	vi
Liste des tableaux.....	vii
1. Contexte et objectifs	1
2. État de l’art.....	2
2.1. Développement du PIV au LSPIV	2
2.2. Évaluation des sources d’erreur de la méthode LSPIV.....	6
2.2.1. Prise de données terrain	7
2.2.1.1. <i>Visibilité des traceurs</i>	7
2.2.1.2. <i>Plateforme et capteur</i>	9
2.2.1.3. <i>Bathymétrie et niveau d’eau</i>	12
2.2.2. Traitement des données.....	14
2.2.2.1. <i>Paramètres de traitement</i>	14
2.2.2.2. <i>Coefficient de vitesse (paramètre α)</i>	15
2.3. Exemples d’application de la méthode LSPIV	17
2.3.1. Application en crues.....	17
2.3.2. Application en eau peu profonde	22
2.4. Sommaire de l’état de l’art.....	23
3. Sites d’étude.....	24
4. Méthodologie	33
4.1. Acquisition des données.....	33
4.2. Sélection d’un site.....	34
4.3. Traitement des données.....	35
5. Résultats.....	38
5.1. Sommaire des résultats.....	38
5.2. Rivière Au Saumon	41
5.3. Rivière Aux Saumons	41
5.4. Rivière Coaticook	42
5.5. Rivière Eaton	42
5.6. Ruisseau Kee.....	43
5.7. Rivière Massawippi.....	43
5.8. Rivière Saint-François.....	44
6. Discussion	45
6.1. Prise de données terrain	45

6.1.1.	Visibilité des traceurs.....	45
6.1.2.	Plateforme.....	53
6.1.3.	Bathymétrie et niveau d'eau.....	55
6.2.	Traitement de données.....	59
6.2.1.	Coefficient de vitesse (paramètre α).....	59
6.2.2.	Aire de recherche et aire d'interrogation.....	60
6.3.	Autres sources d'incertitude.....	61
7.	Recommandations sur l'acquisition et le traitement des données.....	63
8.	Activité de transfert de connaissance.....	65
9.	Conclusion.....	66
	Références.....	68
	Annexes.....	72

Liste des figures

Figure 1 : Schéma des principales composantes d'une installation PIV typique (Raffle et al. 2007).	3
Figure 2 : Calcul du débit à partir des données de jaugeage des cours d'eau (Mays, 2011)	4
Figure 3 : Procédure LSPIV afin d'obtenir le débit (traduit de Muste et al., 2008).....	4
Figure 4 : Post-traitement d'image pour améliorer la visibilité des traceurs. (a) Image originale et (b) image après le post-traitement (Wen-Cheng et al., 2021).....	9
Figure 5 : Effet de l'erreur associée au niveau d'eau sur l'image orthorectifiée et donc sur les vitesses de surface (traduit de Dramais et al., 2014)	13
Figure 6 : Influence de l'intervalle de temps sur la précision des résultats. Les trois lignes de couleurs représentent les différentes vitesses (pixels/secondes) (traduit de Chen et al., 2021).....	15
Figure 7 : Systèmes de mesures fixe et mobile. (a) Caméra fixée (b) à la station de jaugeage. (c) Exemple d'image enregistrée où l'on voit un opérateur acquérir la position des points de contrôle au sol. (d) Système mobile constitué d'une caméra montée sur un trépied télescopique (Le Coz et al., 2010)	19
Figure 8 : Exemple de stations fixes LSPIV (traduit de Hautet, 2016).....	21
Figure 9 : Système automatique de calcul du débit composé de deux caméras dans des étuis étanches (Huang et al., 2018)	21
Figure 10 : Localisation des sites d'étude en Estrie.....	24
Figure 11 : Site de prise de mesure sur la rivière Au Saumon à Lingwick en Estrie.....	26
Figure 12 : Site de prise de mesure sur la rivière Aux Saumons à Huntingville en Estrie	27
Figure 13 : Site de prise de mesure sur la rivière Coaticook à Waterville en Estrie.....	28
Figure 14 : Site de prise de mesure sur la rivière Eaton à Cookshire-Eaton en Estrie.....	29
Figure 15 : Site de prise de mesure sur le ruisseau Kee à Sherbrooke en Estrie.....	30
Figure 16 : Site de prise de mesure sur la rivière Massawippi à Hatley en Estrie	31
Figure 17 : Site de prise de mesure sur la rivière Saint-François à Weedon en Estrie.....	32
Figure 18 : Site de prise de mesure sur la rivière Saint-François à Ascot-Corner en Estrie	33
Figure 19 : Organigramme de la chaîne de traitement dans Fudaa-LSPIV	36
Figure 20 : Distribution de l'écart entre le débit mesuré (ADCP ou station) et le débit calculé avec la méthode LSPIV	39
Figure 21 : Comparaison de l'écart entre le débit mesuré (ADCP ou station) et calculé par la méthode LSPIV	40
Figure 22 : Comparaison de l'écart entre le débit mesuré et calculé avec la méthode LSPIV en fonction du débit mesuré	40
Figure 23 : Écarts entre les débits calculés avec la méthode LSPIV et les débits mesurés (ADCP ou station) selon la présence de traceurs	46
Figure 24 : Écarts entre les débits calculés avec la méthode LSPIV et les débits mesurés (ADCP ou station) selon le type de traceurs	48
Figure 25 : Écarts entre les débits calculés avec la méthode LSPIV et les débits mesurés (ADCP ou station) selon l'illumination	49
Figure 26 : Écarts entre les débits calculés avec la méthode LSPIV et les débits mesurés (ADCP ou station) selon la répartition des traceurs.....	50
Figure 27 : Interpolation des vitesses (flèches orange) sous les arbres et vecteurs de vitesse absents sous les fils électriques sur la rivière Massawippi	51
Figure 28 : Vecteur de vitesse calculé dans Fudaa-LSPIV montrant un écoulement vers l'amont le 12 mai 2023 sur la rivière Saint-François à Weedon	52
Figure 29 : Impact de la présence de précipitation sous forme de neige sur les vecteurs de vitesses pour le vol du 19 avril 2023 sur la rivière Saint-François à Weedon.....	53

Figure 30 : Comparaison des profils de la section transversale acquise au GNSS et de celle interpolée pour le vol du 12 avril 2023 sur la rivière Coaticook	56
Figure 31 : Vecteur de vitesses en situation d'inondation sur la rivière Coaticook le 11 juillet 2023..	62
Figure 32 : Vecteur de vitesses en situation d'inondation sur la rivière Massawippi le 11 juillet 2023	63

Liste des tableaux

Tableau 1 : Exemple de valeur commune du coefficient de vitesse selon certaines caractéristiques d'écoulements (inspiré de Vigoureux et al., 2022).....	17
Tableau 2 : Études ayant effectuées calculés des débits en période de crues à l'aide de la méthode LSPIV	18
Tableau 3 : Résumé des caractéristiques des sites d'étude	25
Tableau 4 : Résultats des calculs de débit sur la rivière Au Saumon.....	41
Tableau 5 : Résultats des calculs de débit sur la rivière Aux Saumons	41
Tableau 6 : Résultats des calculs de débit sur la rivière Coaticook	42
Tableau 7 : Résultats des calculs de débit sur la rivière Eaton	43
Tableau 8 : Résultats des calculs de débit sur le ruisseau Kee.....	43
Tableau 9 : Résultats des calculs de débit sur la rivière Massawippi	44
Tableau 10 : Résultats des calculs de débit sur la rivière Saint-François à Weedon	44
Tableau 11 : Résultats des calculs de débit sur la rivière Saint-François à Ascot-Corner.....	45
Tableau 12 : Impact du choix de type de données bathymétrique sur la rivière Coaticook.....	57
Tableau 13 : Évaluation de l'impact de l'emplacement de la section bathymétrique sur le profil de vitesse.....	57
Tableau 14 : Comparaison du débit calculé avec deux sections transversales différents pour la même date.....	58
Tableau 15 : Analyse de l'impact de la précision du niveau d'eau sur le calcul du débit.....	59
Tableau 16 : Comparaison des débits et des écarts obtenus en utilisant différentes aires d'interrogation et de recherche	61

1. Contexte et objectifs

L'information sur les débits en rivières est essentielle à la gestion de l'eau. En effet, les débits sont, entre autres, utilisés pour le calage des modèles hydrologiques et hydrauliques, pour l'estimation des probabilités de dépassement annuel et pour les systèmes de prévision des inondations en temps réel. Ils sont donc importants pour la sécurité civile et la délimitation des zones inondables. Les débits sont habituellement obtenus grâce à des courbes de tarage, c'est-à-dire une relation entre le niveau d'eau (mesuré en continu) et le débit. Les courbes de tarage sont générées et actualisées grâce à des mesures de débit et de niveau d'eau prises sur le terrain. Les mesures terrain ponctuelles sont généralement faites à l'aide d'instrument tel que le courantomètre à effet Doppler (ADCP) qui mesure la vitesse et la profondeur de la rivière en simultané (Meselhe *et al.*, 2004). Une fois la courbe de tarage construite, il suffit d'obtenir le niveau d'eau pour estimer le débit d'un cours d'eau.

Lors d'événements extrêmes, qui sont généralement de courte durée, la prise de mesure terrain peut être dangereuse pour les personnes et pour les instruments. Il peut également être fastidieux de couvrir plusieurs rivières dans un court laps de temps en situation de crue. Les forts débits sont alors rarement caractérisés. En considérant que les changements climatiques augmenteront la fréquence de tels événements, une meilleure caractérisation est nécessaire. La méthode LSPIV (*Large Scale Particle Image Velocimetry*) est une méthode d'estimation du débit sans contact. Cette dernière est une alternative intéressante aux instruments traditionnels venant compléter une stratégie de mesures globale (Muste *et al.*, 2008). L'utilisation de cette technique sécuritaire et plus rapide permettrait d'améliorer la courbe de tarage (Dramais *et al.*, 2014; Lewis *et al.*, 2018). Certaines questions quant à cette méthode restent cependant à être répondues. Par exemple, les sources d'erreurs et d'incertitudes et les champs d'application doivent être mieux définis.

Le présent projet est en collaboration avec le ministère de l'Environnement, de la Lutte contre les changements climatiques, de la Faune et des Parcs (MELCCFP) et Ouranos. Il vise à analyser la performance (précision et incertitude) de la méthode LSPIV pour des mesures de débits par LSPIV prises au Québec. Il vise également à fournir des recommandations quant à l'acquisition et le traitement des données LSPIV pour une éventuelle mise en application. De 2021 à 2023, des campagnes de mesures terrain ont été réalisées sur sept sites en Estrie à proximité de stations hydrométriques existantes et présentant des conditions hydrauliques et morphologiques différentes. Plusieurs mesures ont été acquises à l'aide de drone sur chacun

des sites. Conjointement à l'acquisition des données LSPIV, des mesures prises à l'aide d'un ADCP ont été effectuées afin de comparer les résultats des débits obtenus. Dans certains cas, les débits aux stations hydrométriques ont été utilisés comme référence. Des relevés bathymétriques ont également été réalisés à l'aide de GNSS (*Global navigation satellite system*) et d'ADCP. Une comparaison entre les logiciels Fudaa-LSPIV et RIVeR a d'abord été effectuée et il a été décidé de réaliser les traitements LSPIV à l'aide du logiciel Fudaa-LSPIV. Les résultats ont par la suite été analysés afin de quantifier la précision de la méthode et les sources d'incertitudes. Ce rapport présente d'abord une revue de littérature sur la méthode LSPIV. Par la suite, les sites à l'étude, la méthodologie, les résultats et la discussion sont présentés. Finalement, des recommandations sont émises.

2. État de l'art

Cette section présente une revue de littérature de la méthode LSPIV pour le calcul des débits en rivières. Le développement du PIV (*Particle Image Velocimetry*) au LSPIV est d'abord abordé dans la section 2.1. Par la suite, l'évaluation de la méthode LSPIV selon les sources d'erreurs associées à la prise de données et aux traitements des images est discutée dans la section 2.2. Différentes applications en crues et en eaux peu profondes sont ensuite présentées dans la section 2.3. Finalement, les grands constats issus de la revue de littérature sont exposés dans la section 2.4.

2.1. Développement du PIV au LSPIV

La vélocimétrie par image (*Particle Image Velocimetry*, PIV) est une technique non intrusive permettant d'étudier l'écoulement d'un fluide. En hydraulique, cette technique est largement utilisée depuis plusieurs décennies dans le cadre d'expérience en laboratoire (Adrian, 1991; Muste *et al.*, 2014; Chang *et al.*, 2016; Johnson et Cowen, 2017; Akbarpour *et al.*, 2020). Lors des expériences PIV, des traceurs sont ajoutés à l'eau et l'écoulement est illuminé par un laser (Figure 1). Les images sont captées à l'aide d'une ou plusieurs caméras, avec un taux d'échantillonnage élevé. Grâce à l'analyse d'images consécutives, les mouvements des particules sont décelés à l'intérieur d'une zone d'interrogation spécifique par un algorithme. Les schémas de déplacements des groupes de particules sont alors utilisés pour générer des vecteurs de vitesses et des statistiques de turbulence (Adrian, 1991).

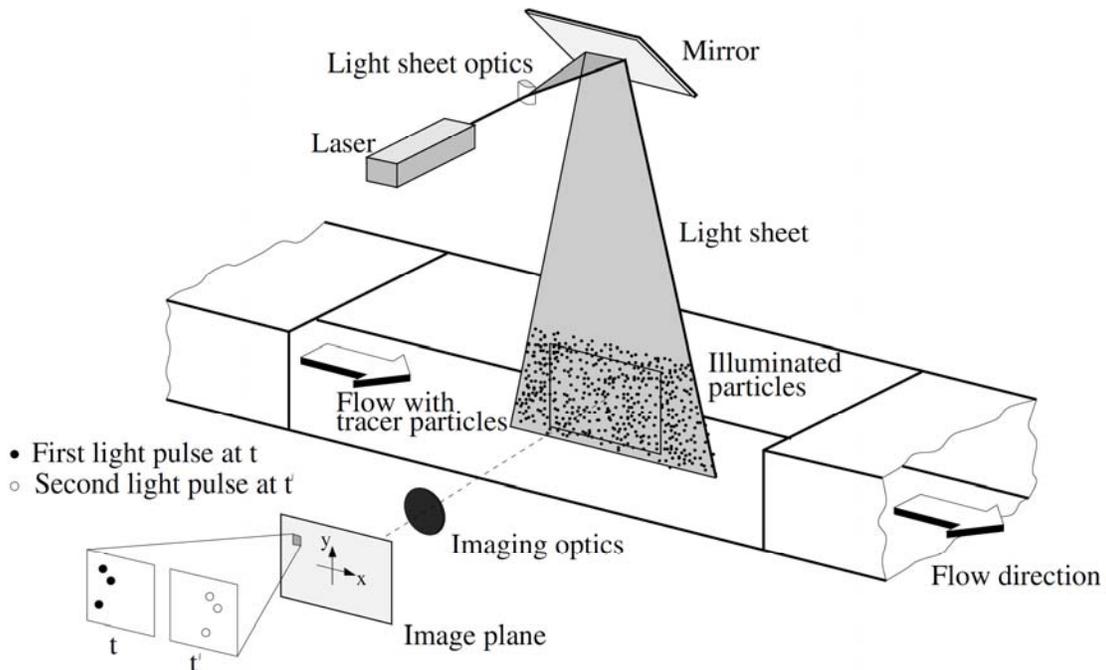


Figure 1 : Schéma des principales composantes d'une installation PIV typique (Raffle et al. 2007).

Dans les années 1990, plusieurs chercheurs ont tenté d'adapter la méthode PIV afin de l'appliquer sur des rivières et d'obtenir des mesures de vitesses de surface. L'application du PIV à plus grande échelle est nommée LSPIV (*Large-Scale Particle Image Velocimetry*). Les premières mesures LSPIV prises en rivière ont été effectuées au Japon dans les années 1990 (Aya *et al.*, 1995; Fujita *et al.*, 1997). Depuis, plusieurs études ont été effectuées à travers le monde (Deng *et al.*, 2019; Koutalakis *et al.*, 2019; Zhu et Lipeme Kouyi, 2019; Legleiter et Kinzel, 2020).

Des chercheurs étudient également la possibilité d'utiliser les vecteurs de vitesse générés par la méthode LSPIV afin d'obtenir des mesures de débits (Le Coz *et al.*, 2010; Hauet, 2016; Huang *et al.*, 2018; Naldzhiyan et Tsarev, 2021; Vigoureux *et al.*, 2022). Pour obtenir des débits avec la méthode LSPIV, les vecteurs de vitesses de surface sont convertis en vitesse moyenne en profondeur et ensuite multipliés par l'aire d'une section représentative. Ceci est similaire à la méthode de prédiction de débit par jaugeage où, en supposant un profil logarithmique de vitesse, la moyenne se retrouve à 0,4 de la profondeur par section unitaire. Pour des écoulements plus complexes la moyenne de deux points (à 0,2 et 0,8 de la profondeur) est utilisée (Figure 2).

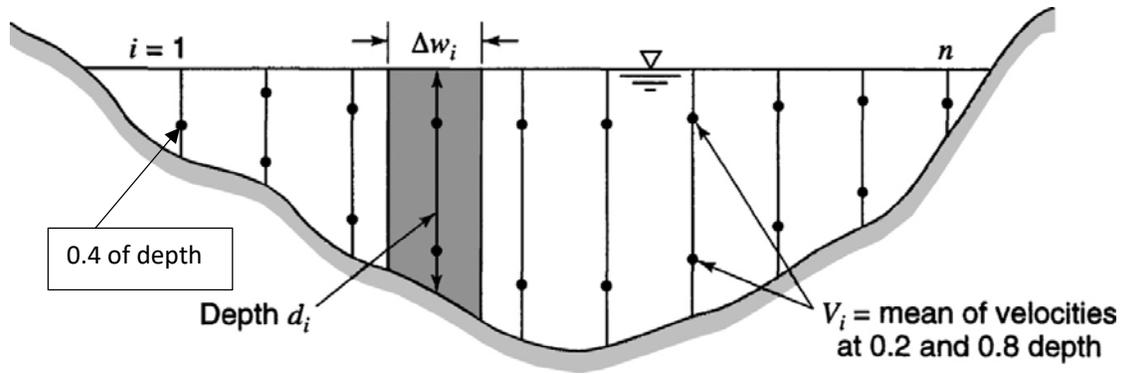


Figure 2 : Calcul du débit à partir des données de jaugeage des cours d'eau (Mays, 2011)

La conversion de la vitesse de surface (prise par LSPIV) à une vitesse moyenne par section unitaire peut se faire à l'aide de relation ou de coefficient connus, telle que le paramètre α . L'utilisation du paramètre α est la technique de conversion la plus courante. Dans la littérature, la valeur par défaut du paramètre α pour les écoulements fluviaux est de 0,85 (Muste *et al.*, 2008). Par contre, la valeur du paramètre α est influencée par plusieurs conditions spécifiques à chaque site (Le Coz *et al.*, 2010; Johnson et Cowen, 2017) comme le vent, la géométrie de la section transversale et la complexité de l'écoulement. L'utilisation de la valeur de $\alpha = 0,85$ par défaut peut donc constituer une source d'erreur (section 2.2.2.2). Suite à la conversion des vitesses de surface en vitesses moyennes sur la colonne d'eau, le débit peut être calculé en utilisant des données bathymétriques d'une section transversale de la rivière (Figure 3) (Muste *et al.* 2008).

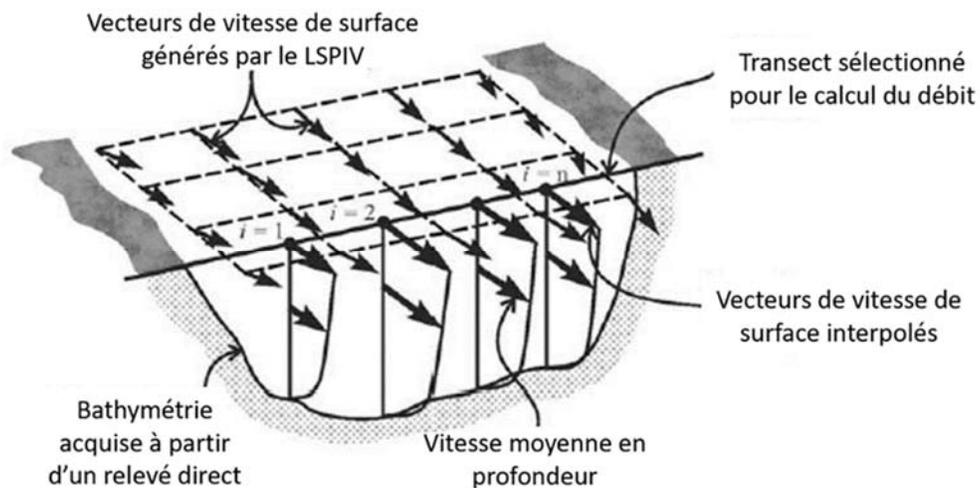


Figure 3 : Procédure LSPIV afin d'obtenir le débit (traduit de Muste et al., 2008)

Les acquisitions d'images, tant pour l'obtention des vitesses de surface et des débits, se font à l'aide d'une caméra traditionnelle (Le Coz et al., 2010; Dramais *et al.*, 2014; Hauet *et al.*, 2014; Huang *et al.*, 2018; Naldzhiyan et Tsarev, 2021), d'un cellulaire (Vigoureux *et al.*, 2022), d'un drone (Deng *et al.*, 2019; Kinzel et Legleiter, 2019; Ioli *et al.*, 2020; Chen *et al.*, 2021) ou même d'un hélicoptère (Fujita *et al.*, 2018; Legleiter et Kinzel, 2020). Les capteurs optiques sont de loin les plus communément utilisés, mais quelques études ont utilisé des capteurs thermiques (Legleiter *et al.*, 2017; Tauro et Grimaldi, 2017; Kinzel et Legleiter, 2019). Avant de procéder au traitement, les images doivent être orthorectifiées (Muste *et al.*, 2008). La procédure d'orthorectification peut être plus ou moins complexe selon le choix et le positionnement de la plateforme d'acquisition (section 2.2.1.2). Si les images sont acquises avec un drone, il y aura un léger décalage horizontal entre chaque image, causé par le mouvement du drone. Dans ce cas, les images doivent être stabilisées. De plus, lors de l'acquisition de mesures sur le terrain, il a été noté que la méthode LSPIV se distingue par certaines complexités associées aux conditions environnementales non contrôlées. Par exemple, en se fiant seulement sur la lumière naturelle, l'illumination de l'écoulement peut être trop faible ou trop élevée dégradant ainsi la qualité de l'image (Hauet *et al.*, 2008). Les sources d'erreurs associées aux caractéristiques et conditions des sites d'étude sont plus détaillées à la section 2.2.1.

Dans les dernières années, afin de faciliter les traitements nécessaires à la méthode LSPIV, des logiciels ont été conçus. Deux d'entre eux les plus utilisés sont Fudaa-LSPIV¹ (Le Coz *et al.*, 2014) et RIVeR² (Patalano *et al.*, 2017). Fudaa-LSPIV est le produit d'une collaboration entre Électricité de France (EDF) et l'Institut français de recherche sur l'environnement (Irstea). Ce logiciel est une interface graphique Java gratuite et accessible à tous. Les traitements principaux offerts par le logiciel sont les suivants : stabilisation des images, orthorectification des images, corrélation des déplacements et post-traitement des vitesses (Le Coz *et al.*, 2014). De son côté, RIVeR a été développé en Argentine au Centre de recherche et de technologie de l'eau (*Center for Water Research and Technology, CETA*) de l'Université nationale de Cordoba en 2013 (Patalano *et al.*, 2017). RIVeR a été conçu en Matlab. Il est également gratuit, accessible à tous et offre sensiblement les mêmes traitements que Fudaa. Ioli *et al.* ont comparé certains logiciels entre eux, dont Fudaa-LSPIV et RIVeR. Fudaa-LSPIV est ressortie comme la meilleure alternative pour les applications professionnelles, entre autres, pour son interface

¹ <https://forge.irstea.fr/projects/fudaa-lspiv/files>

² <https://riverdischarge.blogspot.com/p/download.html>

graphique conviviale et sa documentation complète. Il a été noté que l'ensemble des étapes nécessaires au calcul du débit sont disponibles directement dans le logiciel et qu'elles sont faciles à réaliser. Par contre, le code source n'est pas accessible et certains outils complémentaires sont manquants. Une équipe d'Environnement et Changement Climatique Canada (ECCC) a également effectué une comparaison entre différents logiciels (DischargeLab, Fudaa-LSPIV, HydroSTIV, RIVeR). Les logiciels Fudaa-LSPIV et RIVeR possédait les médianes des erreurs relatives les moins élevées, soient -3,3% et 1,5% respectivement. Il a été noté que Fudaa-LSPIV se distinguait grâce à son accès gratuit, son grand nombre d'utilisateurs et la possibilité d'inclure plusieurs sections transversales dans un même traitement. RIVeR s'est aussi distingué pour son accès gratuit en plus de son flux de travail clair et son caractère multiplateforme (E. Jamieson, communication personnelle).

Il existe d'autres méthodes d'estimation des débits par champs de vitesse telles que la méthode LSPTV (*Large-Scale Particle Tracking Velocimetry*). La méthode LSPTV se distingue de la méthode LSPIV par son approche lagrangienne. L'algorithme du LSPTV suit individuellement, dans le temps et l'espace, les traceurs pour calculer leur vitesse. Un vecteur de vitesse est donc créé pour chacun des traceurs présents dans l'écoulement. Cette technique permet donc de générer des vitesses pour un endroit et un moment précis. De son côté, le LSPIV a une approche eulérienne, pertinente pour une grande superficie et période de temps. Le champ de vitesse de l'écoulement est calculé à partir d'une grille. Pour chaque section de cette grille, un vecteur de vitesse sera généré à partir de la vitesse moyenne des particules présentes dans celle-ci. Comparativement au LSPTV, le LSPIV est donc moins sensible à la transformation des traceurs individuels (changement de forme, de taille ou disparition d'une image à l'autre), mais nécessite une plus grande densité de ceux-ci pour générer de bons résultats (Jolley *et al.*, 2021).

2.2. Évaluation des sources d'erreur de la méthode LSPIV

Lorsque les conditions nécessaires sont réunies, la méthode LSPIV permet d'obtenir des mesures des vitesses et de débits précises comparables aux approches traditionnellement utilisées. Par exemple, certains auteurs ont obtenu une différence de 10% et moins entre les mesures de débits provenant d'un ADCP et de la méthode LSPIV (Le Coz *et al.*, 2010; Muste *et al.*, 2011; Dramais *et al.*, 2014; Lewis *et al.*, 2018). Il a été noté que la méthode LSPIV avait tendance à sous-estimer les débits (Tauro *et al.*, 2017). Lors d'une analyse de sensibilité de la méthode LSPIV pour le calcul du débit, Kim (2006) a identifié un total de 27 sources d'erreur

pouvant affecter les résultats. Les sources d'erreur les plus importantes, dans l'ordre, sont les suivantes : la densité des traceurs, l'identification de points de contrôle au sol (*Ground Control Points*, GCP) pour l'orthorectification, la précision du suivi du déplacement des particules et le temps d'échantillonnage des images. Les paragraphes suivants présentent différentes sources d'erreur notées dans la littérature. Elles sont présentées selon deux sections principales : les sources d'erreurs associées à la prise de données terrain et celles associées aux traitements des données.

2.2.1. Prise de données terrain

Lors de la prise de données terrain, plusieurs éléments sont à considérer puisqu'ils peuvent venir influencer les résultats de l'analyse LSPIV. Tout d'abord, le choix du site doit se faire en fonction de plusieurs critères. Engel *et al.* (2023) ont déterminés des lignes directrices pour le choix du site. Celles-ci comprenaient l'évaluation des perturbations de l'écoulement et de la stabilité du lit de la rivière. Le critère le plus important lors de la sélection d'un site est la présence de traceurs dans l'écoulement. Effectivement, la visibilité des traceurs est un des facteurs premiers de réussite des traitements. Il est aussi nécessaire de sélectionner la plateforme et les capteurs d'acquisitions des images selon les besoins du projet. Ce choix influence les étapes terrain et de traitements à réaliser. Finalement, pour générer le débit, le niveau d'eau et une section transversale de bathymétrie doivent être connus. La précision de ces données peut influencer les débits obtenus.

2.2.1.1. Visibilité des traceurs

La présence de traceurs dans l'écoulement est essentielle à la réussite des mesures LSPIV. L'algorithme doit aussi être en mesure de bien les discerner. En fait, il est dit que l'œil humain doit être en mesure de percevoir le mouvement de l'eau pour que la méthode LSPIV puisse fonctionner (Muste *et al.*, 2008). Dal Sasso *et al.* (2020) affirme que la densité, la distribution, la dimension et la forme des traceurs influencent les résultats de la méthode LSPIV. En connaissant ces éléments, il est possible d'évaluer le potentiel des données. Il est aussi important que les traceurs contrastent avec l'arrière-plan et que les conditions d'illumination soient bonnes. La réflexion du soleil sur l'eau et les ombres à la surface peuvent diminuer la clarté du schéma de déplacement des traceurs. Cela peut engendrer des vecteurs de vitesses erronés ou tout simplement l'absence de vecteurs (Dal Sasso *et al.*, 2020). Une lumière diffuse ou des enregistrements en milieu de journée sont donc recommandés (Muste *et al.*, 2008). Le vent peut également affecter la visibilité des traceurs. Par exemple, Muste *et al.* (2011) ont

utilisé les ondulations naturelles de l'eau comme traceurs et, lors de périodes de fort vent, les vagues en surface semblaient se diriger vers l'amont rendant l'analyse impossible.

Il est possible d'utiliser les traceurs naturels d'un site, bien qu'il soit rare que la densité et la distribution des traceurs soient constantes et uniformes particulièrement lorsque l'écoulement est faible (Dal Sasso *et al.*, 2020). Dans les rivières, les traceurs naturels le plus communs, comme la mousse ou les ondulations de l'eau, ne sont pas rigides. Puisqu'ils sont facilement déformables, il est plus difficile pour l'algorithme de prédire leur mouvement et ainsi trouver la correspondance des traceurs sur les différentes images (Li et Yan, 2022). Dans le but de contourner cette limite, des auteurs ontensemencé leurs rivières à l'étude avec des traceurs artificiels (Lewis et Rhoads, 2015; Tauro *et al.*, 2017; Tauro et Grimaldi, 2017; Wen-Cheng *et al.*, 2021). Par contre, disperser des traceurs de manière constante et uniforme tout au long de l'acquisition d'images demande un effort considérable (Lewis et Rhoads, 2015; Li et Yan, 2022). De plus en plus, l'utilisation de traceurs naturels devient donc la norme pour faciliter le suivi à long terme des rivières (Li et Yan, 2022). D'ailleurs, des auteurs ont noté que dans les cas d'inondations, aucun ajout de traceurs artificiels n'est nécessaire puisque les traceurs naturels sont présents en quantité suffisante (Le Coz *et al.*, 2010, 2014).

Pour optimiser les données et réduire les erreurs associées aux traceurs, il est possible d'accentuer le contraste entre l'arrière-plan à l'aide de techniques d'amélioration des images (Figure 4) (Wen-Cheng *et al.*, 2021). Les vecteurs de vitesses peuvent également être filtrés lors du post-traitement afin d'éliminer les vecteurs erronés (Dal Sasso *et al.*, 2020). Il est aussi recommandé de prendre des vidéos de plus longue durée afin de pouvoir sélectionner les images optimales aux traitements (Dal Sasso *et al.*, 2020). Une vidéo de plus longue durée aide également à avoir de meilleurs résultats lorsque la densité des traceurs est très faible (Pumo *et al.*, 2021). Cela permet d'acquérir plus d'information sur le mouvement des traceurs et ainsi d'améliorer la capacité de l'algorithme à estimer le champ de vitesse de la région d'intérêt (Pumo *et al.*, 2021). Finalement, pour contourner les difficultés liées aux traceurs, il est possible d'utiliser un capteur thermique plutôt qu'optique lors de l'acquisition des données. Kinzel et Legleiter (2019) ont utilisé un drone muni d'un capteur infrarouge thermique afin d'acquérir des images de la rivière Bleue au Colorado. Aucun traceur flottant (mousse, débris) pouvant être détecté par une caméra optique n'était présent à la surface de l'eau. La caméra thermique a permis de capter le mouvement de l'écoulement grâce aux petites variations thermiques présentes à la surface de l'eau. Plus de détails sur les types de plateformes et de capteurs sont présentés à la section 2.2.1.2.

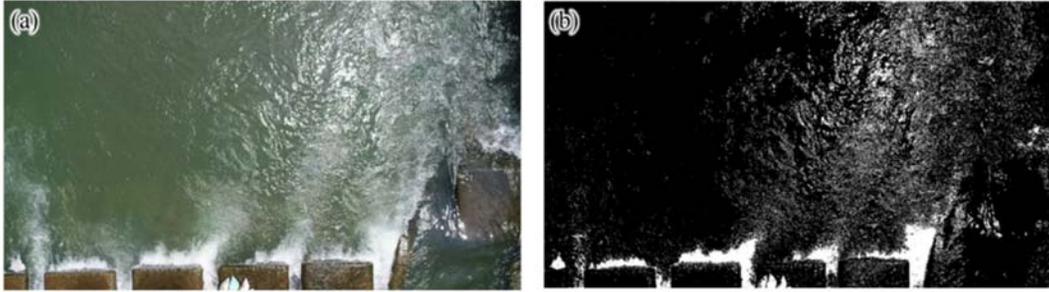


Figure 4 : Post-traitement d'image pour améliorer la visibilité des traceurs. (a) Image originale et (b) image après le post-traitement (Wen-Cheng et al., 2021)

2.2.1.2. Plateforme et capteur

La plateforme la plus utilisée dans la littérature est la caméra traditionnelle, suivie par le drone. Dans les dernières années, les avancées technologiques liées aux drones ont augmenté tandis que leur prix a diminué. L'utilisation de cette technologie pour le suivi de l'écoulement risque d'augmenter dans le futur (Wen-Cheng *et al.*, 2021). Une des différences majeures entre ces deux types de plateformes est les angles de vues offerts par celles-ci. Idéalement, la plateforme doit être assez élevée pour voir l'entièreté de l'écoulement et la prise de vue doit être perpendiculaire à celui-ci. Kim *et al.* (2008) ont estimé que l'angle d'inclinaison de la caméra ne devrait pas dépasser 10 degrés. Une caméra traditionnelle a généralement une vue oblique sur la rivière puisque les images sont prises d'un pont ou des berges. Les images provenant de ce type de plateforme ont donc des déformations géométriques importantes qu'il faut corriger. Pour procéder à l'orthorectification des images, un minimum de six GCPs (trois sur chaque berge) installés dans la zone d'intérêt est nécessaire lors de l'acquisition des données (Muste *et al.*, 2008). En connaissant les coordonnées des GCPs apparaissant dans l'image, une projection de plan à plan peut être réalisée et ainsi obtenir une image sans distorsion géométrique. Wen-Cheng *et al.* (2023) ont analysé l'incertitude liée aux GCPs. L'étude s'est effectuée au ruisseau Yufeng (35 m de large au site d'étude) au nord de Taiwan et les images ont été acquises à l'aide de caméras en rive. L'effet sur les mesures de débits de trois erreurs standard (30 mm, 10 mm et 3 mm) liées à la position des 29 GCPs a été évalué. Plus la position des GCPs était précise, plus les mesures de débits étaient semblables aux mesures obtenues à l'aide d'un courantomètre. Dans leur cas, il a été conclu que les résultats par la méthode LSPIV étaient satisfaisants si l'erreur standard de la position des GCPs n'excédait pas 10 mm. Pour obtenir une telle précision, les auteurs ont mesuré trois fois la position de chaque GCPs avec

une station totale. Les auteurs recommandent donc cette méthode afin de réduire les erreurs standards.

De leur côté, en s'assurant que le capteur soit dirigé complètement vers le bas, il est facile pour les drones d'acquérir des images ayant une vue au nadir. L'utilisation de ce type d'images facilite grandement les processus d'acquisition et de prétraitement. Puisque l'on suppose que la surface de l'eau est presque plate, la distorsion topographique peut être ignorée et les GCPs ne sont pas nécessaires. Par contre, si la surface de l'eau est en pente ou si le drone est très proche de l'eau des distorsions topographiques peuvent affecter la précision des résultats du LSPIV (Lewis et Rhoads, 2018). De plus, il est tout de même nécessaire de localiser deux points d'intérêt sur l'image et de connaître la distance entre ceux-ci afin de procéder ultérieurement à la mise à l'échelle de l'image (Hauet *et al.*, 2022).

Une autre source d'erreur potentielle est la stabilité de la plateforme d'acquisition. Dans le cas des drones, le vent peut causer des oscillations. Les supports à trois axes (*three axis gimbal*) des drones peuvent tout de même éliminer une partie de l'influence du vent (Wen-Cheng *et al.*, 2021). Le vent peut aussi s'avérer problématique lorsque les caméras traditionnelles ne sont pas fixées à une installation rigide (Lewis et Rhoads, 2015). Les mouvements de la plateforme d'acquisition peuvent venir causer des vecteurs de vitesses erronés. Lewis et Rhoads (2018) ont comparé les vecteurs de vitesses de surface obtenus à l'aide d'un drone à ceux obtenus à l'aide d'un ADV configuré en mode laboratoire à 25 Hz. L'ADV a été monté sur un bâton fabriqué sur mesure. Ce dernier a été fixé à un câble en acier tendu entre deux poteaux situés de chaque côté de la section transversale. Pour certaines mesures, l'ADV a été configuré pour être orienté vers le haut. Cela a permis de détecter des vitesses à un ou deux centimètres de la surface. Pour d'autres mesures, l'ADV avait une configuration plus traditionnelle et les vitesses ont été mesurées à environ 6 cm sous la surface de l'eau. La magnitude des vecteurs générés par les images acquises par drone était généralement à moins de 5% de celle acquise par l'ADV. Pour ce qui est de l'orientation des vecteurs, les résultats des deux méthodes présentaient une différence de 10% et moins. Pour minimiser les impacts du mouvement de la plateforme, il est possible de procéder à la stabilisation des images (Wen-Cheng *et al.*, 2021). Les logiciels RiVER et Fudaa-LSPIV fournissent des outils pour le faire. Des algorithmes tels que *Speeded-Up Robust Features* (SURF) peuvent être utilisés (Chen *et al.*, 2021). Cet algorithme effectue la stabilisation en identifiant des points d'intérêts et en les associant sur les différentes images. Lorsque le logiciel Fudaa-LSPIV est utilisé, il est nécessaire d'inclure les deux berges dans la

prise de vue (50% de berges et 50% d'écoulement recommandé) afin d'avoir assez de points d'intérêts statiques pour procéder à la stabilisation (Hauet *et al.*, 2022).

Des études ont comparé directement les résultats issus d'images acquises par caméras fixes aux résultats issus d'images acquises par drone. Lewis *et al.* (2018) ont acquis des données à l'aide des deux types de plateformes sur dix sites répartis sur huit ruisseaux et petites rivières aux États-Unis (largeur variant de 4 à 30 m). Lewis *et al.* (2018) ont conclu que la différence moyenne entre les débits obtenus à l'aide d'images acquises par drone et par caméra fixe s'élevait à 10%. Bref, tout en fournissant des résultats similaires, les drones sont plus flexibles, permettent d'acquérir des images dans des zones plus grandes et variées et facilitent les post-traitements. Par contre, avec les installations nécessaires, les caméras traditionnelles permettent de faire un suivi en continu et automatique, ce que ne permettent pas de faire les drones pour le moment.

Lewis *et al.* (2018) avancent également que les différences notées, dans le cadre de l'étude, entre les valeurs de débits générées avec la méthode LSPIV et les valeurs de débits de référence (ADCP, courantomètre et station de jaugeage) ne sont pas liées à la largeur du site d'étude. Ils ont toutefois noté qu'il pourrait s'agir d'un paramètre limitant. Dans le cas d'une rivière de bonne envergure, il serait nécessaire de positionner le capteur à haute altitude afin de voir l'entièreté de l'écoulement. Cela diminuerait la résolution de l'image et rendrait possiblement les traceurs inidentifiables. Pour un même site, les auteurs ont d'ailleurs étudié l'impact de la hauteur de vol du drone sur les traitements LSPIV. Cinq hauteurs de vol (9,4 m; 13,7 m; 19,8 m; 27,4 m et 35 m au-dessus de la surface de l'eau) ont été testées à quelques minutes d'intervalle. Les données acquises lors du vol à plus haute altitude ont généré une vitesse de surface plus élevée que les autres. En plus de diminuer la résolution spatiale de l'image, les auteurs ont noté qu'une haute altitude de vol augmente l'effet du mouvement de la caméra. La taille de l'aire d'interrogation (discutée à la section 2.2.2.1) pourrait aussi être à ajuster selon la hauteur de vol. Plus la hauteur est élevée, plus de particules sont incluses dans une aire d'interrogation. L'influence relative d'une particule sur l'estimation de la vitesse diminue alors.

La grande majorité des études consultées ont utilisé un capteur optique pour l'acquisition de leurs images. Certains ont utilisé un capteur thermique infrarouge (Legleiter *et al.*, 2017; Kinzel et Legleiter, 2019). Comme discuté à la section 2.2.1.1, les capteurs thermiques sont particulièrement intéressants lorsqu'aucun traceur n'est présent dans l'écoulement. Contrairement aux capteurs optiques, les capteurs thermiques peuvent détecter les faibles

différences de températures à la surface de l'eau créées par la turbulence de celle-ci. Lorsqu'une certaine turbulence est présente, la fine couche d'eau froide à la surface de la rivière peut être mélangée à l'eau plus chaude du dessous ou vice versa en période plus chaude. Les variations de températures à la surface sont alors advectées et déformées par les courants de surface. Le capteur thermique est en mesure de discerner ces mouvements et il est alors possible d'utiliser les images pour une analyse LSPIV (Legleiter *et al.*, 2017). Legleiter *et al.* (2017) ont acquis des données LSPIV à l'aide de drone et de capteur thermique sur cinq rivières en Alaska (22 m à 127 m de largeur). Les mesures de débits générées par la méthode LSPIV se situaient dans un écart de 15% par rapport aux débits de référence (ADCP). Kinzel et Legleiter (2019) ont comparé les vitesses qu'ils ont obtenues à l'aide d'un capteur thermique à celles obtenues à l'aide d'un ADCP. Les mesures ont été effectuées sur deux sections transversales de la rivière Bleue au Colorado. La comparaison des deux techniques a donné des résultats différents pour chacune des sections transversales (R de 0.82 et de 0.64). Les auteurs ont noté que le taux d'acquisition d'images assez bas (0,5 Hz) des capteurs thermiques pourrait être une limitation. Le taux d'acquisition habituel des capteurs utilisés pour la méthode LSPIV est généralement de 25-30 Hz. Puisque l'écoulement était relativement lent lors de la prise de données, cela n'a pas affecté les résultats de Kinzel et Legleiter (2019). Par contre, le bas taux d'acquisition des capteurs thermiques pourrait être problématique pour l'analyse d'un écoulement rapide. L'intervalle de temps entre chaque image est plus élevé et cela pourrait engendrer un trop grand déplacement des traceurs entre chaque image. Ceux-ci doivent rester dans l'aire d de recherche (discuté à la section 2.2.2.1) pour la bonne estimation de vitesse.

2.2.1.3. *Bathymétrie et niveau d'eau*

Pour compléter les traitements LSPIV et obtenir un débit à l'aide de cette méthode, il est nécessaire de connaître le niveau d'eau au moment de la prise des mesures. Il est également nécessaire d'avoir au moins une section transversale bathymétrique dans la zone à l'étude. Ces mesures peuvent causer des erreurs, bien que leur influence soit considérée comme faible (Dramais *et al.*, 2014).

Un niveau d'eau imprécis peut avoir un impact sur le résultat de l'orthorectification des images et donc sur les vitesses de surface générées par la méthode LSPIV (Dramais *et al.*, 2014). Comme illustré à la Figure 5, un niveau d'eau sous-estimé entraîne l'exagération des distances horizontales, ce qui a comme conséquence de surestimer les vitesses de surface. Le contraire se produit lorsque le niveau est surestimé.

La précision du niveau d'eau peut aussi avoir un impact sur le profil bathymétrique et donc sur le calcul du débit. Lors du calcul du débit en inondation sur la rivière Ardèche, Dramais *et al.* (2014), ont conclu qu'un niveau d'eau avec une précision de 10 cm engendrait une erreur de moins de 5% sur les mesures. Un niveau d'eau possédant une précision de 50 cm engendrait une erreur de 18% et serait alors une source d'erreur importante. À la connaissance des auteurs de ce rapport, l'impact de la précision du niveau d'eau sur les résultats d'une analyse LSPIV effectuée à partir d'images acquises par drone n'a pas encore été étudié.

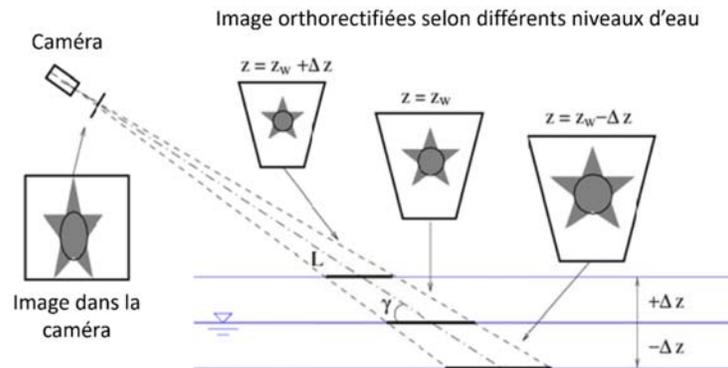


Figure 5 : Effet de l'erreur associée au niveau d'eau sur l'image orthorectifiée et donc sur les vitesses de surface (traduit de Dramais *et al.*, 2014)

Lors de traitement LSPIV, au moins une section transversale de bathymétrie doit être connue. Lors de leurs traitements LSPIV, Dramais *et al.* (2014) ont testé différentes sections transversales pour un même site et une même journée. Ils ont eu une faible variation entre les résultats des débits ($< 5\%$). Il est important de noter que lors d'évènements hydrologiques extrêmes, la bathymétrie de la rivière peut changer significativement. Puisque les changements bathymétriques affectent les résultats de débit, Hauet *et al.* (2016) conseille d'aller reprendre les données bathymétriques après chaque évènement extrême.

Dans le but de faciliter l'acquisition de la bathymétrie pour les traitements LSPIV, certains auteurs se sont intéressés à la télédétection. Kinzel et Legleiter (2019), ont acquis des mesures de bathymétries à l'aide de drone muni d'un LiDAR bathymétrique (à 532 nm, ce qui permet au signal de pénétrer la colonne d'eau). Les mesures bathymétriques issues de cette méthode ont été comparées à celles acquises avec un RTK-GNSS (*Real Time Kinematic Global Navigation Satellite System*). Pour une des deux sections transversales à l'étude, la moins profonde, les résultats des deux méthodes étaient très semblables ($R^2 = 0,95$). Pour la seconde section transversale, plus profonde, la concordance des résultats était moins forte ($R^2 = 0,61$).

De leur côté, Vigoureux *et al.* (2022) ont extrait des sections transversales bathymétriques de modèles numériques de surface (MNS). Les auteurs ont généré les MNS en traitant des images optiques acquises par drone dans un logiciel photogrammétrique. Les images ont été acquises lorsque le niveau d'eau était bas. Bien que des informations bathymétriques ont pu être tirées de cette méthode, les auteurs ont noté qu'elle peut mener à la sous-estimation de l'écoulement. Par définition, les MNS donnent une information sur l'altitude de surface. Ainsi, lorsque de la végétation est présente, les MNSs fournissent de l'information sur l'altitude de celle-ci et non du sol.

2.2.2. Traitement des données

Suite à l'acquisition des images, plusieurs traitements sont nécessaires afin d'arriver à une mesure de débits. Certaines étapes de traitement comme l'orthorectification des images, le choix de l'intervalle de temps entre les images, la taille de l'aire d'interrogation et de l'aire de recherche et le choix du coefficient de vitesse ont des impacts sur le résultat de l'analyse LSPIV. Ces éléments sont discutés dans les paragraphes suivants, mis à part l'orthorectification qui est déjà discutée à la section 2.2.1.

2.2.2.1. Paramètres de traitement

L'algorithme du LSPIV est sensible aux choix de certains paramètres, soit 1) l'intervalle de temps entre les images sélectionnées, 2) la taille de l'aire d'interrogation et 3) la taille de l'aire de recherche. L'aire d'interrogation est une zone dont la taille est définie en pixel. Elle est utilisée pour identifier les traceurs à la surface de l'eau qui doivent être retrouvés dans l'image suivante. L'aire de recherche, également définie en pixel, est la zone où les traceurs identifiés par l'aire d'interrogation devraient se trouver dans l'image suivante. Une relation directe existe entre ces trois paramètres (Pearce *et al.*, 2020). Si l'intervalle de temps entre les images est trop long, les traceurs sortiraient de la zone de recherche et si l'intervalle de temps est trop court, les traceurs n'auraient pas effectué un assez grand déplacement. Dans les deux cas, il est probable que le mouvement ne soit pas détecté par l'algorithme (Chen *et al.*, 2021). L'intervalle de temps, la taille de l'aire de recherche et de l'aire d'interrogation sont définis par l'utilisateur et dépendent de plusieurs facteurs tels que la vitesse de l'écoulement et les caractéristiques des traceurs (Pearce *et al.*, 2020). Par exemple, pour un écoulement rapide, l'intervalle de temps entre les images sera plus court que pour un écoulement lent. Selon Pumo *et al.* (2021), entre chaque image, les traceurs devraient effectuer un déplacement équivalent à 15% de la dimension de l'aire d'interrogation le long de l'écoulement. Bref, ces paramètres devraient être

choisis prudemment afin de réduire les erreurs liées aux mesures de vitesse de surface (Wen-Cheng *et al.*, 2021).

Lors d'une expérience en laboratoire, Chen *et al.* (2021) ont utilisé une plateforme rotative afin d'imiter le mouvement de l'eau. Cette plateforme a été utilisée afin de déterminer l'influence de l'intervalle de temps sur les résultats. À la Figure 6, il est possible de voir la variation de l'écart type relatif des résultats de trois vitesses différentes (1,37 pixel/seconde, 4,67 pixels/seconde et 5,95 pixels/seconde) selon l'intervalle de temps choisis. L'écart type relatif est plus élevé lorsque l'intervalle de temps est très court ou très long. Lorsque l'intervalle de temps est très court, l'écart type relatif le plus élevé est associé à la vitesse la plus faible. Par contre, lorsque l'intervalle de temps est très long, l'écart type relatif le plus élevé est associé à la vitesse la plus élevée.

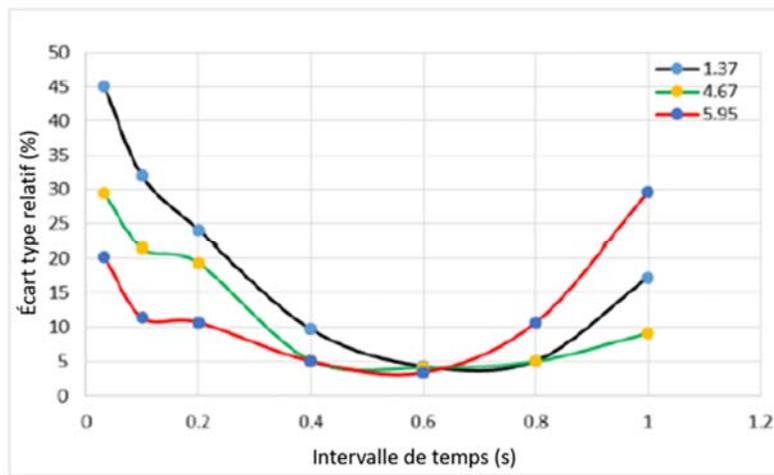


Figure 6 : Influence de l'intervalle de temps sur la précision des résultats. Les trois lignes de couleurs représentent les différentes vitesses (pixels/seconde) (traduit de Chen *et al.*, 2021)

2.2.2.2. Coefficient de vitesse (paramètre α)

Une fois les vecteurs de vitesses de surface générées par l'algorithme, il est nécessaire de les convertir en vitesse moyenne en profondeur. La méthode de conversion la plus courante est l'utilisation du coefficient de vitesse, soit le paramètre α . La valeur par défaut du paramètre α acceptée par la communauté de chercheurs en hydraulique est de 0,85 (Akbarpour *et al.*, 2020). Il a cependant été démontré que le paramètre α est spécifique à chaque site et qu'il peut varier localement lors d'un changement de conditions (Johnson et Cowen, 2017). Le paramètre α varie en fonction du nombre de Reynolds ($Re_h = U_b h / \nu$ où U_b est la vitesse moyenne en profondeur, h est la profondeur de l'écoulement et ν est la viscosité cinématique), de la

profondeur de l'écoulement, du rapport hauteur/largeur du canal, du type de rugosité du lit et de la rugosité relative, des conditions locales de bathymétrie et des conditions de végétation (Johnson et Cowen, 2017). Le vent peut aussi influencer le paramètre α .

Akbarpour *et al.* (2020) ont étudié, en laboratoire, la variation du paramètre α pour un lit escarpé et rugueux en fonction des conditions de submersion relative (faible et supercritique). Les champs de vitesses de surface ont tout d'abord été obtenus à l'aide de la méthode LSPIV. Par la suite, pour les différentes expériences, une carte de vitesse bidimensionnelle moyennée dans le temps a été produite. De cette carte, la double moyenne de surface a été obtenue. À partir de la vitesse moyenne de surface et de la vitesse moyenne de la section transversale, les paramètres α des différentes expériences ont pu être calculés. Les paramètres α obtenus pour les différentes conditions de submersion relative variaient entre 0,61 et 0,78 (moyenne de 0,7). Les auteurs avancent donc que le paramètre α dépend de la submersion relative. Ils suggèrent qu'en diminuant la profondeur de l'écoulement, l'écart entre la vitesse de surface et la vitesse moyenne en profondeur augmente. En laboratoire, sur un lit lisse, Johnson et Cowen (2016) ont fait varier systématiquement le nombre de Reynolds pour étudier son effet sur le paramètre α . La variation du nombre de Reynolds entre 4950 et 73,800 a résulté en une variation du paramètre α de 0,82 à 0,93. La variation du paramètre α a été fortement corrélée au rapport entre l'épaisseur de déplacement (portion de la colonne d'eau ralentie par le lit) et la profondeur de l'écoulement ($R^2 = 0,96$). Cela démontre que les changements engendrés par les variations du nombre de Reynolds dans le profil de vitesses moyennes influencent la vitesse moyenne en profondeur et donc le paramètre α .

Dramais *et al.* (2014) ont effectué des mesures LSPIV sur la rivière Ardèche en France (lit de gravier) lors d'une inondation. Ils affirment que les erreurs causées par le paramètre α a été une source majeure d'erreur dans le cadre de leur étude. Ils estiment que la variabilité du paramètre α peut venir fausser les résultats de 10% à 15%. Le Coz *et al.* (2010) affirme également que le paramètre α cause une erreur multiplicative et systématique dans les estimations de débits issus de la méthode LSPIV. Ils recommandent donc d'établir la valeur du paramètre α du site à l'étude à partir de mesures de la structure complète de l'écoulement. Ils mentionnent aussi l'intérêt d'évaluer la variation du paramètre α pour un même site. C'est d'ailleurs ce que les auteurs ont fait dans le cadre de leur étude. Des mesures des profils de vitesse effectués à l'aide d'ADCP et de courantomètre ont été réalisées sur la rivière Ardèche en France à la station de jaugeage Sauze-Saint Martin. À la suite de l'analyse de ces données, il a été conclu que la variabilité du paramètre α pour ce site était acceptable ($\sigma = 0,04$ à travers une même section et

$\sigma = 0,05$ pour les débits variant de 30 à 1 600 m³/s). Les valeurs moyennes issues des données d'ADCP et de courantomètre étaient toutes proches du même paramètre α (0,90). Par contre, plus de mesures sont nécessaires pour affirmer avec certitude que le paramètre α reste constant même dans des conditions de débits élevés (plus de 700 m³/s).

Le Tableau 1 présente des exemples de valeurs communes pour le paramètre α selon certaines caractéristiques du site à l'étude. Des auteurs ont mentionné l'importance de se pencher davantage sur la question de la détermination du paramètre α dans le futur (Le Coz *et al.*, 2010; Lewis et Rhoads, 2018).

Tableau 1 : Exemple de valeur commune du coefficient de vitesse selon certaines caractéristiques d'écoulements (inspiré de Vigoureux et al., 2022)

Caractéristiques d'écoulements	Coefficient de vitesse (paramètre α)
Écoulement non uniforme, torrents	0,60
Écoulement uniforme, rugosité du lit moyenne	0,85
Écoulement rugueux : bas niveau d'eau, lit rugueux, rivière en pied de montagne	0,80
Écoulement lisse : haut niveau d'eau, lit lisse, canal en béton, rivière large	0,91
Écoulement non uniforme influencé par une structure	1,20

2.3. Exemples d'application de la méthode LSPIV

Dans la littérature, la méthode LSPIV a été utilisée pour obtenir le débit des rivières en périodes de crues. Parmi ces auteurs, certains ont également effectué des suivis automatiques avec des installations permanentes permettant une réponse quasi instantanée des événements rapides tels que les crues éclairs. Quelques articles se penchent aussi sur l'utilisation de la méthode LSPIV en eau peu profonde. Dans les applications présentées, les auteurs ont tous utilisé des caméras traditionnelles ou des cellulaires comme plateforme d'acquisition. Les articles présentant des utilisations de drones portent plutôt sur l'évaluation de ce type de plateforme et sont alors discutés dans la 2.2.1.2.

2.3.1. Application en crues

En période de crues, il peut être dangereux, autant pour les personnes que pour les instruments, d'effectuer des mesures de débits *in situ*. L'utilisation de la méthode LSPIV s'avère donc particulièrement utile dans de telles situations puisqu'elle permet le calcul du débit à moindre

risque. L'acquisition des mesures LSPIV en crues pourrait apporter plus d'information sur les périodes de forts débits et ainsi améliorer la courbe de tarage (Dramais *et al.*, 2014). Des études ayant effectué des mesures de débits en période de crues avec la méthode LSPIV sont présentées au Tableau 2Tableau 2.

Tableau 2 : Études ayant effectuées calculés des débits en période de crues à l'aide de la méthode LSPIV

Auteurs	Rivière	Débits	Précision	Coefficient de vitesse	Système de mesure
Le Coz <i>et al.</i> , 2010	Rivière Ardèche (50 m)*, France	a. 331 à 825 m ³ /s	Pour les débits de moins de 300 m ³ /s : écart de 10% avec l'ADCP	0,90	a. Caméra vidéo optique sur un trépied (prise de vue et hauteur ajustable).
		b. 113 à 240 m ³ /s	Pour les débits de 300 à 2500 m ³ /s : écart de < 20% avec la courbe de tarage		b. Caméra optique fixe installée à la station de jaugeage.
Dramais <i>et al.</i> , 2014	Rivière L'Arc (40 m)**, France	Jusqu'à 467 m ³ /s	Conditions défavorables : écart de 30-80% Incertitude globale de < 10%	0,72 à 0,79	Caméra vidéo optique sur un trépied (prise de vue et hauteur ajustable).
Hauet <i>et al.</i> , 2014	Rivière la Volane (15 m)*, France	Jusqu'à 74 m ³ /s	-	-	Caméra optique fixe d'une station LSPIV
Hauet, 2016	Rivière Morge (5 m)*, France	Jusqu'à 17 m ³ /s	Incertitude globale estimée à 15%	0,72	Caméra optique fixe d'une station LSPIV
Huang <i>et al.</i> , 2018	Ruisseau Yufeng (15-30 m)**, Taiwan	Jusqu'à environ 650 m ³ /s	NRMSE*** = 7,96% (en comparaison avec l'ADCP)	0.737	Deux caméras vidéo optiques sur trépied d'une station LSPIV
Vigoureux <i>et al.</i> , 2022	Rivière Brague (20 m)** et son tributaire Valmasque (10 m)***, France	Jusqu'à 140 m ³ /s	Résultats cohérents avec les observations disponibles	0,8 ; 0,85 ; 0,9 et 1,0	Caméra vidéo optique de cellulaire

* Largeur de la rivière au site d'étude estimée sur *Google Earth*

** Largeur de la rivière au site d'étude obtenue dans l'article

*** Erreur quadratique moyenne normalisée (*Normalized Root Mean Square Error*, NRMSE)

Dans le cadre de leur étude, Le Coz *et al.* (2010) ont étudié trois inondations survenues sur la rivière Ardèche en France à l'aide de la méthode LSPIV. Les données ont été acquises à l'aide de deux plateformes (Figure 7). Une d'entre elles consistait en une caméra vidéo installée sur un trépied mobile ajustable (hauteur entre 2 et 10 m). Les angles de vues ainsi que l'allumage de la caméra pouvaient être contrôlés du sol. L'autre plateforme était constituée d'une caméra installée sur une station de jaugeage. La caméra était reliée à un ordinateur industriel muni d'une alimentation électrique autonome et externe. Les images ont pu être orthorectifiées à

l'aide des 20 GCPs installés sur les sites d'acquisition (10 sur chaque berge). Le coefficient de vitesse utilisée (0,90) pour obtenir les débits a été calculé à partir des données d'un ADCP. Les débits calculés avec la méthode LSPIV de moins 300 m³/s ont pu être comparés avec des données d'ADCP. L'écart entre les résultats des deux méthodes s'élevait à ±10%. Les débits de plus de 300 m³/s à 2 500 m³/s ont été comparés avec la courbe de tarage. L'écart de moins de 20% a été jugé comme acceptable par les auteurs. Par contre, lorsque les conditions d'acquisition des images n'étaient pas favorables ou que l'écoulement était instable, des écarts de 30% à 80% ont été observés.

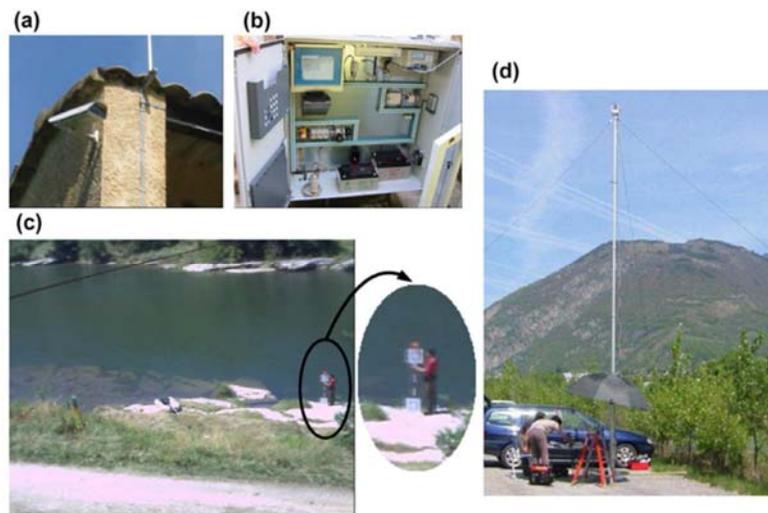


Figure 7 : Systèmes de mesures fixe et mobile. (a) Caméra fixée (b) à la station de jaugeage. (c) Exemple d'image enregistrée où l'on voit un opérateur acquérir la position des points de contrôle au sol. (d) Système mobile constitué d'une caméra montée sur un trépied télescopique (Le Coz et al., 2010)

Dramais *et al.* (2014) ont étudié le potentiel du LSPIV pour estimer les débits durant des épisodes de crues éclair. Des mesures ont été acquises sur la rivière L'Arc, une rivière avec un lit en gravier, lors de deux événements extrêmes. Le premier événement s'est produit en mai 2008 et il s'agissait d'une inondation plus importante qu'une inondation de récurrence 10 ans. Le deuxième événement est la libération pour le rinçage d'un réservoir en juin 2009. Les mesures ont été acquises avec une caméra optique montée sur un mât télescopique mobile. Des GCPs ont été installés sur les sites d'études et leur position a été acquise à l'aide d'une station totale. Le coefficient de vitesse a été choisi à l'aide des profils de vitesses verticales d'un courantomètre. Il est à noter que pendant les pics d'inondations, aucune mesure *in situ* n'a pu être effectuée à cause de l'écoulement de surface rapide (7 m/s) et de la présence de gros objets flottant dans la rivière. La méthode LSPIV était donc la seule méthode de jaugeage possible. Grâce à l'analyse de 36 séquences d'images des deux événements, les débits ont pu être estimés

avec une incertitude globale de moins de 10%. La source d'erreur la plus importante, selon les auteurs, était la variabilité du coefficient de vitesse.

Afin de suivre les crues, particulièrement les crues éclairs, l'Institut français de recherche sur l'environnement (Irstea) ont installé des stations LSPIV fixes dans le bassin de l'Ardèche en France. Ces stations sont équipées d'une caméra reliée à un ordinateur possédant une liaison numérique sur ligne d'abonné à débit asymétrique (*Asymmetric Digital Subscriber Line*, ADSL). Cela permet de définir les paramètres d'acquisition et d'effectuer le transfert des données à distance. Les stations sont également munies d'un système de mesure de niveau d'eau relié à l'ordinateur. Plusieurs sections bathymétriques ont été acquises à chaque station et des tests de sensibilités ont été effectués pour déterminer certains paramètres spécifiques aux stations (ex. : taille de l'aire d'interrogation). Une des stations, installée sur la rivière Volane, a permis d'acquérir des données d'une crue de novembre 2010. Il a alors été possible de mesurer un débit de $74 \text{ m}^3/\text{s}$ alors que le maximum jaugé à cet endroit par les méthodes traditionnelles atteignait seulement $43 \text{ m}^3/\text{s}$ (Hauet *et al.*, 2014).

EDF ont également développé des stations LSPIV fixes (Figure 8). Ces stations sont munies d'une caméra reliée à un ordinateur. Un script permet l'acquisition d'images automatique à la fréquence désirée. Les images sont enregistrées dans l'ordinateur et dans un disque dur externe. Une connexion à distance à l'ordinateur permet de transmettre et de télécharger les données. Les stations LSPIV sont également connectées à la station hydrométrique (enregistreur de données et niveau d'eau). Grâce à la station installée sur la rivière Morge, Hauet (2016) a pu effectuer le suivi d'une inondation de récurrence 20 ans survenue le 29 juillet 2014. Lors de l'inondation, 20 séquences d'images LSPIV ont été acquises (intervalle de 30 minutes). À l'installation de la station, le coefficient de vitesse du site avait été déterminé à 0,72. Ce coefficient et plusieurs sections bathymétriques connues ont été utilisés dans le logiciel Fudaa-LSPIV pour réduire l'incertitude liée à la mesure du débit (estimée à 15 %). L'auteur avance que les mesures LSPIV permettent de réduire considérablement la partie extrapolée de la courbe de tarage et son incertitude. Les analyses LSPIV du 29 juillet 2014 ont permis de réduire l'incertitude de l'hydrogramme de cet événement de 20% à 12%. De plus, l'incertitude quant au volume de l'inondation a diminué de 34% à 17%.

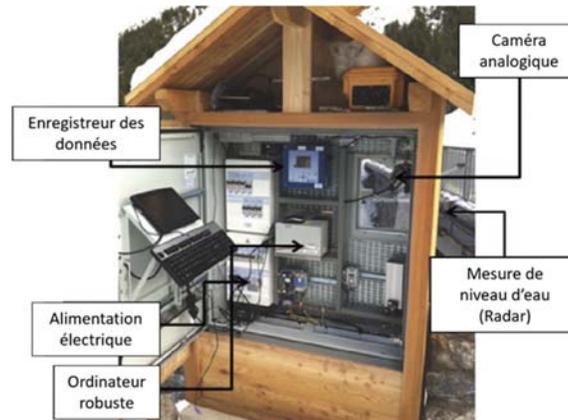


Figure 8 : Exemple de stations fixes LSPIV (traduit de Hauet, 2016)

Huang *et al.* (2018) ont développé un système automatique pour mesurer le débit lors des crues éclair du ruisseau Yufeng. Le lit de ce ruisseau est composé de gravier et de pierre. La section à l'étude est d'une largeur approximative de 15 à 30 m et la profondeur est normalement de 1,5 m. Le système est composé des deux caméras installées dans des étuis étanches permettant d'enregistrer des images de la surface de loin et de proche (Figure 9). Des ajustements en temps réels de certains paramètres (ex. : vitesse d'obturation) peuvent être apportés à distance à partir d'un ordinateur de la station de jaugeage à proximité. Les images acquises sont directement transférées à l'ordinateur et 44 GCPs ont également été installés sur le site d'étude. Leur position a été mesurée à l'aide d'une station totale. Le système a tout d'abord été testé dans des conditions de débits moyen, puis lors d'un typhon survenu en août 2015. Le coefficient de vitesse utilisé pour calculer le débit (0,737) a été obtenu à partir des mesures d'ADCP. Les débits obtenus à l'aide du LSPIV ont été comparés à ceux obtenus à l'aide d'un ADCP et l'erreur quadratique moyenne normalisée s'élève à 7,96%.



Figure 9 : Système automatique de calcul du débit composé de deux caméras dans des étuis étanches (Huang et al., 2018)

Pour étudier l'inondation historique du 2 octobre 2015, Vigoureux *et al.* (2022) ont analysé des vidéos de la rivière Brague en France et d'un de ses tributaires (Valmasque). Les vidéos ont été acquises à l'aide de téléphones cellulaires. En 2020, des images optiques des sites d'intérêt ont été acquises par drone lors d'un étiage. Les images ont été traitées dans un logiciel de photogrammétrie afin d'obtenir des modèles numériques de surface (MNS) et des orthomosaïques. Les GCPs utilisés pour l'orthorectification des images et les sections bathymétriques utilisés pour le calcul du débit ont été extraits de ces MNS. Pour leur part, les orthomosaïques ont permis d'étudier les caractéristiques du lit des sites à l'étude et ainsi déterminer le coefficient de vitesse. Plusieurs coefficients de vitesse ont été testés (0,8 ; 0,85 ; 0,9 et 1,0) et un coefficient de 0,9 a été utilisé pour les estimations finales. Deux logiciels ont été utilisés, soit Fudaa-LSPIV et OpyFlow. Les résultats ont été comparés à une station de jaugeage de la rivière Brague et aux résultats de la modélisation du ruissellement pluvial et de la modélisation hydraulique effectués par les auteurs. Selon ces derniers, tous ces éléments sont cohérents.

2.3.2. Application en eau peu profonde

Les écoulements caractérisés par de faibles vitesses et des eaux peu profondes peuvent également être difficiles à mesurer. En effet, les instruments de mesure traditionnels ont une précision limitée lorsque les vitesses sont basses. De plus, les ADCPs ont besoin d'un minimum de 0,25 m d'eau pour prendre leurs mesures correctement (Meselhe *et al.*, 2004). La méthode LSPIV est considérée comme une bonne alternative pour prendre des mesures dans de telles conditions. Cependant, sa performance dans ce type de conditions a été beaucoup moins étudiée qu'en période de crue ou d'écoulement moyen (Muste *et al.*, 2014).

Meselhe *et al.* (2004) ont réalisé des mesures en laboratoire afin d'étudier la performance de la méthode LSPIV pour l'analyse des écoulements peu profonds à faible vitesse. Un canal de verre de 1,5 m de largeur a été utilisé. Trois profondeurs d'eau ont été testées (0,116 ; 0,098 et 0,065 m). Ils ont conclu que si l'ensemencement est suffisant et que l'intervalle de temps entre les images est adéquat, la méthode LSPIV peut produire de bons résultats jusqu'à ce que l'écoulement se réduise à 0,015 m/s, ce qui est très petit en rivière. Muste *et al.* (2014) ont également obtenu de bons résultats en utilisant la méthode LSPIV pour caractériser les écoulements peu profonds à faible vitesse (près de zéro) en laboratoire. Dans le cadre de cette étude, des tests ont été effectués sur des profondeurs variant de 0,05 à 0,31 m. De leur côté, Sun *et al.* (2010) ont effectué des mesures LSPIV pour générer des débits sur la rivière

Blackwater au Royaume-Unis. La profondeur de la rivière était d'environ 0,90 m. En comparant les résultats de la méthode LSPIV aux résultats d'un ADV, un écart de -5% à 7% a été obtenu. Les débits mesurés par l'ADV variaient d'environ 0,90 m³/s à 3,40 m³/s.

2.4. Sommaire de l'état de l'art

La méthode LSPIV permet d'obtenir des mesures des vitesses et de débits précises comparables aux approches traditionnellement utilisées lorsque certaines conditions terrain sont présentes. Les diverses applications présentées démontrent que l'utilisation de la méthode LSPIV permet d'améliorer la compréhension des périodes de forts débits et ainsi améliorer la courbe de tarage. Les applications en eau peu profonde sont plus rares, mais la méthode LSPIV reste tout de même une technique prometteuse dans cette situation. La méthode LSPIV doit être considérée comme une alternative permettant d'acquérir des informations sur l'écoulement et le débit des rivières venant compléter une stratégie de mesures globale. Les grands constats réalisés suite à la revue de littérature sont listés ci-dessous.

1. La visibilité des traceurs est un des facteurs premiers de réussite des traitements LSPIV. Malgré les limites qui y sont associées, les traceurs naturels des rivières sont de plus en plus utilisés. L'ensemencement artificiel des rivières n'est pas pratique pour le suivi à long terme puisqu'il demande beaucoup d'énergie et de ressources.
2. Dans les dernières années, la caméra traditionnelle a été le type de plateforme le plus couramment utilisée. Par contre, avec le développement et le faible coût des drones, l'utilisation de ces derniers va probablement être privilégiée. Ce type de plateforme permet d'obtenir une vue perpendiculaire à l'écoulement et vient donc faciliter l'orthorectification des images. Les drones sont aussi plus flexibles et permettent d'acquérir des images dans des zones plus grandes et plus variées. Cependant, avec les installations nécessaires, les caméras traditionnelles permettent un suivi en continu, automatique et à distance des rivières, ce que ne permettent pas les drones pour le moment. Ce type de suivi permet, entre autres, de réagir rapidement lors d'évènements soudains comme les inondations éclairs.
3. Le capteur optique est le capteur le plus utilisé. Le capteur thermique a également été utilisé dans quelques études, mais présente des limites liées au taux d'acquisition des images. Ce type de capteur est particulièrement intéressant lorsqu'aucun traceur flottant n'est présent dans l'écoulement puisqu'il détecte les différences subtiles de températures à la surface de l'eau.

4. La précision du niveau d'eau et de la bathymétrie ont une faible influence sur les résultats de la méthode LSPIV.
5. L'algorithme du LSPIV est sensible au choix des paramètres de l'intervalle de temps entre les images sélectionnées, de la taille de l'aire d'interrogation et de la taille de l'aire de recherche. Ces trois paramètres sont interreliés et doivent être choisis en fonction de l'écoulement et des caractéristiques des traceurs.
6. Les résultats de la méthode LSPIV sont très sensibles au coefficient de vitesse utilisé. Bien que la valeur par défaut soit de 0,85, le coefficient de vitesse est considéré comme spécifique à chaque site. Il varie, entre autres, selon le type de lit et le type d'écoulement. Dans la littérature des coefficients entre 0,6 et 1,2 ont été utilisés.
7. Le logiciel Fudaa-LSPIV est adapté aux applications professionnelles grâce à sa plateforme conviviale permettant d'effectuer les étapes essentielles au calcul du débit et à sa documentation claire et accessible.

3. Sites d'étude

Dans le cadre du projet, huit sites situés sur sept cours d'eau ont été sélectionnés (Figure 10). Les sites sont situés en Estrie et présentent différentes caractéristiques. Une large gamme de débits et largeurs de rivière ont été observés lors des acquisitions (Tableau 3). Chacun des sites est détaillé dans cette section.

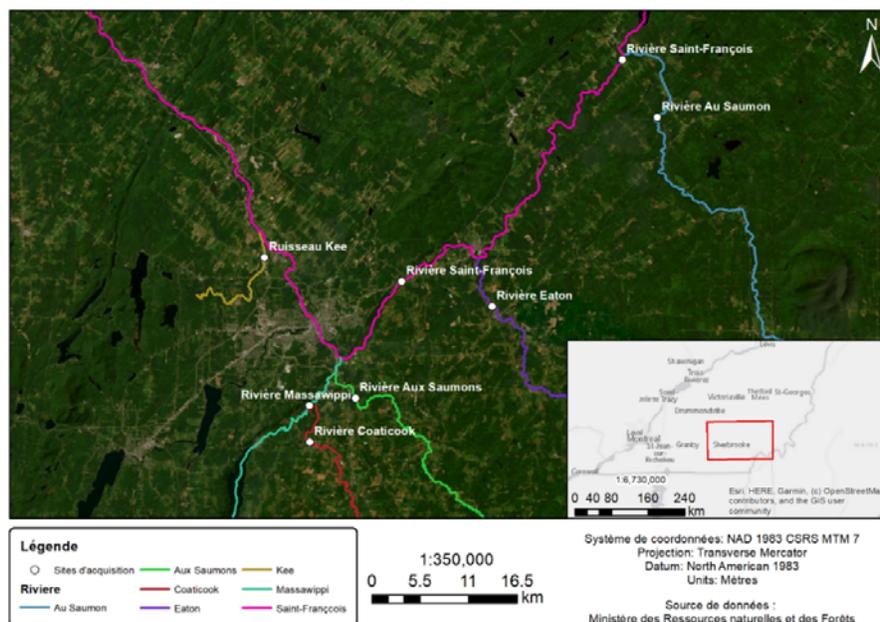


Figure 10 : Localisation des sites d'étude en Estrie

Tableau 3 : Résumé des caractéristiques des sites d'étude

Rivière	Largeur (m)	Accessibilité des berges	Végétation	Présence de traceurs	Pente (m/m)	Débit de récurrence 2 ans (m ³ /s)	Taille du bassin versant (km ²)
Au Saumon	55	Possible	Faible	Peu	0,0016	220*	845
Coaticook	40	Possible	Modérée	Oui	0,0016	110*	524
Eaton	40	Oui	Modérée	Oui	0,0017	162*	609
Kee	10	Oui	Faible	Oui	0,0080	28*	130
Massawippi	45	Oui	Fort	Oui	0,0008	160*	1176
Aux Saumons	30	Oui	Faible	Oui	0,0011	125*	480
Saint-François (Ascot-Corner)	100	Oui	Faible	Oui	0,0004	475**	4128
Saint-François (Weedon)	80 et 105	Oui	Faible	Non	0,0001	335**	2 934

*Débit au 50^{ème} percentile. Information tirée de l'Atlas Hydroclimatique.

** Calculé à l'aide d'une analyse fréquentielle locale

Le site de la rivière Au Saumon se situe à Lingwick (Figure 11). Le site a été sélectionné en raison d'une présence faible de végétation et de traceurs. Les traceurs visibles sont généralement déformables (vaguelettes et mousse) et pour une des mesures, les traceurs étaient sous forme de frasil. L'accessibilité des berges est possible, mais un peu complexe. Les trois mesures ont été prises légèrement en amont du pont de la route 257 près du pont couvert McVetty-McKenzie. La station hydrométrique la plus proche est la station 030282 et se situe à 5,5 km en amont du site. Tous les débits utilisés pour valider les résultats proviennent de la station puisqu'il a été trop complexe de prendre des mesures ADCP. La pente de la rivière est de 0,0016 m/m à cet endroit et la rivière a une largeur d'environ 55 mètres. Les débits mesurés lors des acquisitions variaient de 17 à 47 m³/s. Le débit de récurrence deux ans est de 220 m³/s.



Figure 11 : Site de prise de mesure sur la rivière Au Saumon à Lingwick en Estrie

Le site situé sur la rivière Aux Saumons se trouve à Huntingville près du chemin Bowers (Figure 12). Les mesures ont été acquises majoritairement en amont du pont, mais certaines en aval. Aucune végétation n’empiète sur la rivière et le site présente généralement une présence importante de traceurs déformables (vaguelettes et mousse). L’une des berges est facilement accessible. Une petite partie de la rivière était gelée pour une des dates d’acquisition. La rivière a une largeur d’environ 30 mètres à cet endroit et présente une pente de 0,0011 m/m. La station hydrométrique 0302A1 se situe à environ 3,5 km en aval du site. Tous les débits servant à la validation ont été mesurés avec un ADCP. Sept mesures ont été acquises sur la rivière Aux Saumons. Pour ce site, les débits variaient de 10 à 72 m³/s lors des prises de mesures. Le débit de récurrence deux ans est de 125 m³/s.



Figure 12 : Site de prise de mesure sur la rivière Aux Saumons à Huntingville en Estrie

Le site choisi sur la rivière Coaticook se trouve à Waterville sur la rue Dominion, près du barrage sur la rue Principale (Figure 13). Certaines sections de la rivière dans cette zone présentent peu de végétation au-dessus de la rivière et d'autres sections ont quelques arbres qui empiètent sur la visibilité de la rivière. Une forte présence de traceurs, généralement déformables (vaguelettes et mousse) en raison de la turbulence, est observable sur ce site. Il est possible d'accéder à l'une des berges, mais le terrain est un peu complexe. La station hydrométrique 030215 est située à environ 250 mètres en amont du site. Tous les débits utilisés pour la validation proviennent de cette station hydrométrique puisqu'une seule berge était accessible. À cet endroit, la rivière a une largeur d'environ 40 mètres et la pente est de 0,0016 m/m. Cinq mesures ont été acquises à cet endroit avec un débit variant de 15 à 80 m³/s et le débit de récurrence deux ans est de 110 m³/s.

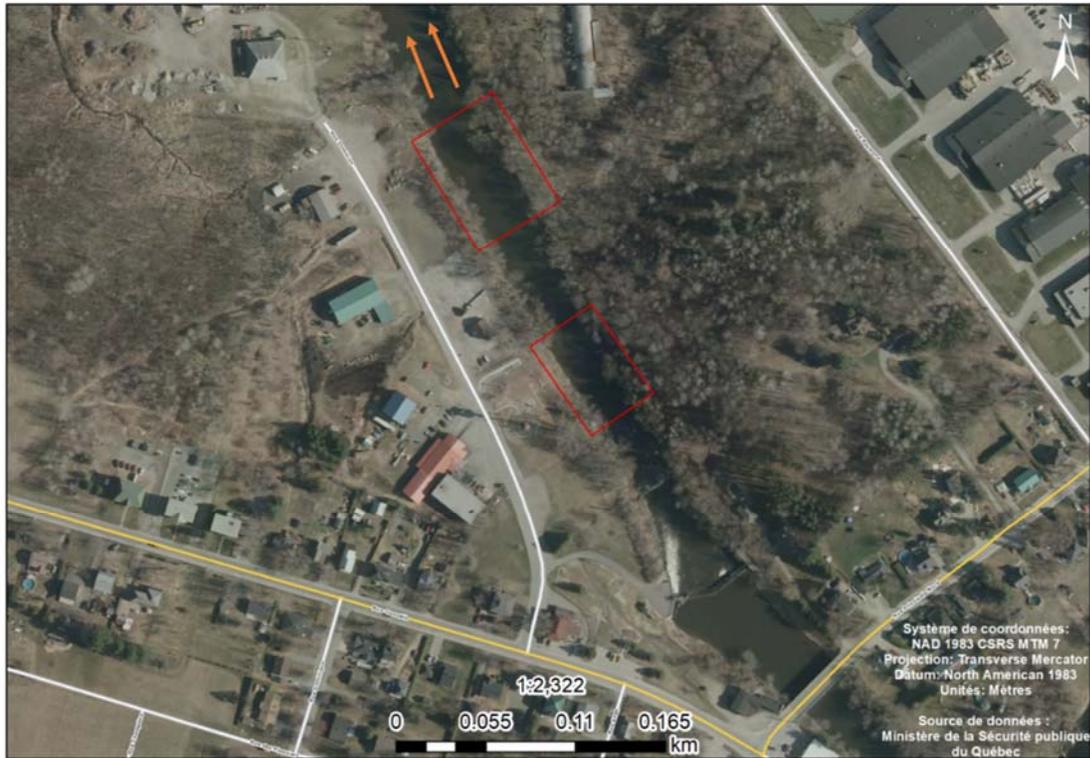


Figure 13 : Site de prise de mesure sur la rivière Coaticook à Waterville en Estrie

Le site choisi sur la rivière Eaton se trouve à Cookshire-Eaton sur le chemin du Bassin (Figure 14). Une couverture végétale faible est observée pour ce site. La rivière Eaton présente une forte présence de traceurs à cet endroit, bien qu'ils soient localisés. Les traceurs sont généralement sous forme de mousse et sont déformables. L'une des berges est facilement accessible. Tous ces éléments rendent le site intéressant pour les mesures LSPIV. Pour neuf des 12 acquisitions LSPIV, une mesure d'ADCP a été prise au même moment. Pour les trois autres mesures, les débits utilisés pour valider les résultats proviennent de la station hydrométrique 030234 située à un peu plus de 6 km en aval du croisement entre le chemin du Bassin et la rivière Eaton. La rivière a une largeur d'environ 40 mètres à cet endroit et la pente est de 0,0017 m/m. Les débits au moment des acquisitions se situaient entre 3 et 101 m³/s. Le débit de récurrence deux ans est 162 m³/s.



Figure 14 : Site de prise de mesure sur la rivière Eaton à Cookshire-Eaton en Estrie

Un site sur le ruisseau Kee a aussi été sélectionné. L'endroit des prises de mesures se situe proche du croisement entre l'autoroute 55 et le chemin de la Rivière à Sherbrooke (Figure 15). Le ruisseau Kee a été sélectionné notamment en raison de sa largeur plus restreinte (10 mètres) et de son écoulement plus torrentiel. Une forte présence de traceur déformable (vaguelettes et mousse) et une faible présence de végétation sont observables. L'accès aux berges est relativement facile dans ce cas-ci. Le réseau cellulaire était assez faible, il était donc parfois plus difficile d'avoir une bonne précision pour le niveau d'eau. Aucune station hydrométrique active n'est située à proximité du site de prise de mesure et donc, les débits servant à la validation proviennent de mesures effectuées à l'ADCP. La pente est de 0,008 m/m à cet endroit. Les quatre mesures ont été acquises à des débits se situant entre 1 et 4 m³/s. Le débit de récurrence deux ans est de 28 m³/s.



Figure 15 : Site de prise de mesure sur le ruisseau Kee à Sherbrooke en Estrie

Le site sélectionné sur la rivière Massawippi se situe sur la limite entre les municipalités de Waterville et de Hatley sur le chemin Capelton (Figure 16). Les mesures ont été prises en aval du pont de la route 108. Ce site montre une présence élevée de végétation au-dessus de la rivière ainsi que des fils électriques qui traversent la rivière à cet endroit. La quantité et le type de traceur sont variables. L'une des berges est relativement facile d'accès. Bien qu'à priori la présence de végétation et de fils électriques ne semble pas idéale, ce site a été conservé afin d'évaluer l'impact de ces éléments sur le calcul de débit. La rivière a une largeur d'environ 45 mètres à cet endroit et une pente de 0,0008 m/m. Des mesures ADCP ont été faites pour chaque mesure LSPIV. Tout comme le ruisseau Kee, il ne s'agit pas d'un site où des mesures ADCP sont traditionnellement acquises pour le jaugeage d'une station hydrométrique. Ce site a été sectionné pour ses caractéristiques hydrauliques. Sept mesures ont été acquises sur le site et les débits variaient de 4 à 122 m³/s. Le débit de récurrence deux ans est de 160 m³/s.



Figure 16 : Site de prise de mesure sur la rivière Massawippi à Hatley en Estrie

Deux sites sur la rivière Saint-François ont été choisis. Le premier se trouve au pont de la route 257 à Weedon (Figure 17). La station hydrométrique 030284 se trouve à environ 2,5 km en aval du pont. Cependant, celle-ci se trouve en aval d'un barrage. Des mesures LSPIV ont été acquises à deux endroits. Le premier est situé tout juste en aval du pont où la largeur de la rivière est de 80 mètres. Des fils électriques traversent la rivière à cet endroit. Le deuxième endroit se situe à environ 250 mètres en amont du pont, à la marina de Weedon. Aucune végétation n'obstrue la visibilité de la rivière aux deux endroits, mais aucun traceur n'est visible pour cette section de la rivière autre que les vaguelettes. Dans les deux cas, un accès à au moins une berge est facile. Le site a tout de même été conservé afin d'évaluer l'impact de l'absence de traceur sur le calcul du débit ainsi que la possibilité de faire des mesures sur une rivière très large. Les débits servant à la validation proviennent d'un ADCP pour cinq des six acquisitions et pour une des mesures, cette valeur provient de la station hydrométrique. La rivière est légèrement plus large au deuxième site avec une largeur d'environ 105 mètres. En plus d'éviter les fils électriques, ce site est plus accessible et permet de tester la méthode sur une portion plus large de la rivière. Notons que le débit a été mesuré au pont de la route 257 pour les deux

sites. Les débits des six acquisitions variaient entre 31 et 177 m³/s. Le débit de récurrence deux ans est de 335 m³/s. Finalement, la pente est de 0,0001 m/m à l'endroit des deux sites.



Figure 17 : Site de prise de mesure sur la rivière Saint-François à Weedon en Estrie

Un deuxième endroit sur la rivière Saint-François a aussi été choisi. Ce deuxième site est situé à Ascot-Corner au pont de la route 112 (Figure 18). Les données ont été acquises légèrement en amont du pont de la route 112. Une présence de traceur est généralement observée et ces derniers sont localisés près de l'une des berges. Aucune végétation affectant la visibilité n'est présente et un parc à proximité permet un accès facile à la rivière. Le site est notamment intéressant puisque des traceurs déformables (vaguelettes et mousse) sont présents et que c'est une rivière large. La station hydrométrique 030206 est située légèrement en amont du pont. Les débits utilisés pour la validation ont tous été mesurés avec un ADCP. La rivière a une largeur d'environ 100 mètres à cet endroit. La pente de la rivière sur ce site est de 0,0004 m/m. Pour les sept mesures effectuées, le débit minimum observé lors de l'acquisition était de 93 m³/s et le débit maximum était de 418 m³/s. Le débit de récurrence deux ans est de 475 m³/s.

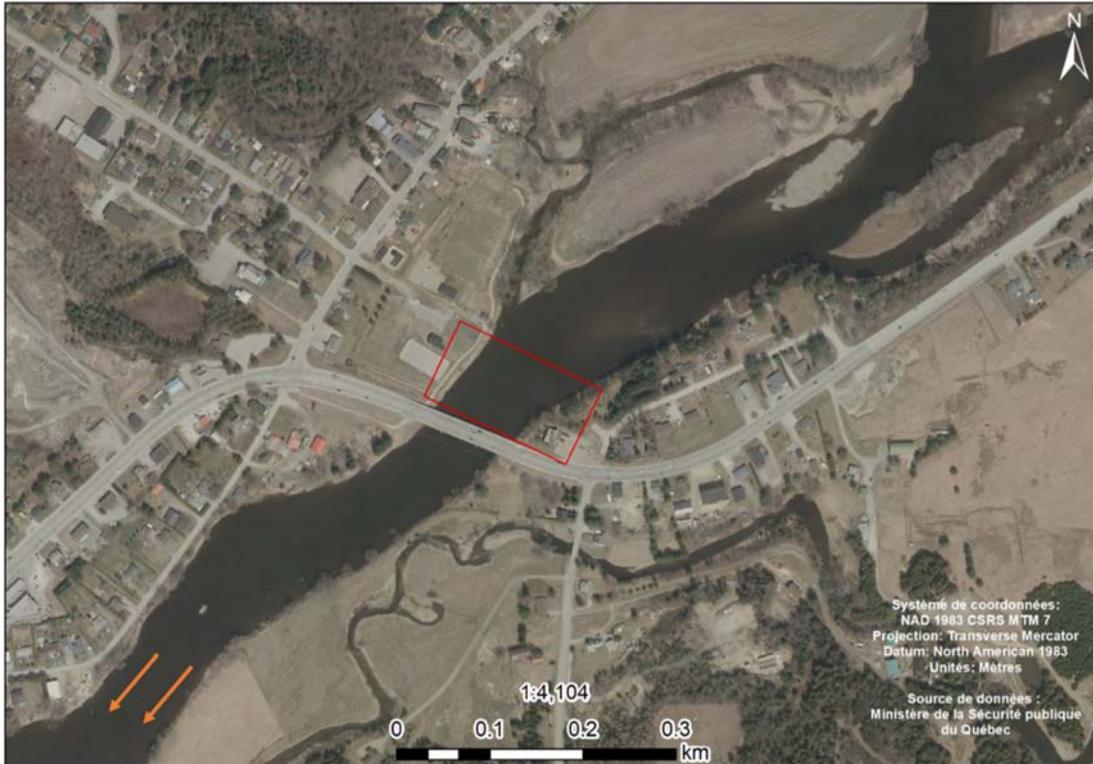


Figure 18 : Site de prise de mesure sur la rivière Saint-François à Ascot-Corner en Estrie

4. Méthodologie

La méthode d'acquisition des données, la sélection d'un site, le traitement des données ainsi que la méthode de validation sont présentés dans les sections suivantes.

4.1. Acquisition des données

Des tests ont d'abord été réalisés à l'aide d'une caméra optique à partir de ponts et d'une caméra optique installée sur un drone. Il a été décidé que l'option sur drone s'avérait plus avantageuse. D'abord, l'acquisition à l'aide d'une caméra en rive ou à partir d'un pont demande six points de contrôles au sol situés près de la rivière. Les vols au nadir permettent de mettre à l'échelle les images et d'éviter de faire une orthorectification complète. Ensuite, il est nécessaire de voir les deux berges, ce qui demande parfois d'installer la caméra en hauteur à partir du pont. Les vols ont été effectués au nadir au-dessus de la rivière en s'assurant d'avoir environ 25% de berges de chaque côté et 50% d'écoulement. Enfin, le drone a l'avantage de pouvoir se déplacer facilement pour sélectionner un site avec plus de traceurs. Toutefois, la caméra en rive ou au

pont permettrait l'acquisition de vidéos à distance sans avoir besoin de se rendre sur le site, mais cette option était en dehors du cadre de la présente étude.

Les drones utilisés sont des DJI Mavic 2, DJI Mavic 3 et DJI Mavic 3 RTK multispectral. Deux points de repère sont nécessaires sur la vidéo. Dans le cadre du projet, deux cibles ou deux cônes étaient placés sur les berges près du cours d'eau. La distance était mesurée directement sur le terrain à l'aide d'un ruban à mesurer ou les coordonnées des points étaient acquises à l'aide d'un GNSS (Géolocalisation et Navigation par un Système de Satellites) et la distance était mesurée par la suite dans un système d'information géographique (SIG). Pour les acquisitions de 2023, une corde de huit mètres était placée entre deux cônes ce qui permettait d'avoir une distance constante et connue pour tous les traitements. Ensuite, un niveau d'eau était acquis à l'aide d'un GNSS. Finalement, une mesure de débit était ensuite prise à l'aide d'un ADCP afin de valider les débits résultants de la méthode LSPIV. Dans certains cas, les débits servant de validation provenaient d'une station hydrométrique à proximité du site d'acquisition.

4.2. Sélection d'un site

La sélection des sites a été faite à partir de plusieurs critères. Étant donné la méthode d'acquisition des images, soit par drone, le premier critère porte sur la possibilité de faire voler un drone dans la zone d'intérêt. En effet, la présence d'aéroport, les règlements municipaux ou encore la présence de personnes à proximité du site doivent tous être pris en considération afin de s'assurer de la sécurité et la légalité de l'acquisition. Ensuite, trois autres critères portaient sur l'accessibilité du site. Puisque des mesures de débits devaient être réalisées au moment des acquisitions afin de valider les résultats de la méthode, un pont devait être présent au site. Notons que la présence d'un pont n'est pas nécessaire pour une mesure LSPIV, mais pour les besoins du projet, c'était un élément recherché. Ensuite, l'accessibilité des berges est aussi un élément important. En effet, la méthode nécessite une mise à l'échelle des images et donc, au minimum, une distance entre deux points de repère sur les images. Aussi, un niveau d'eau doit être mesuré dépendamment de la méthode d'intégration de la bathymétrie. Ensuite, la présence de réseau cellulaire est aussi préférable dans le cas où un niveau d'eau doit être mesuré afin de simplifier l'acquisition des données GNSS en mode RTK (*Real Time Kinematic*). Une analyse de la présence de végétation doit aussi être faite afin de s'assurer qu'il n'y a pas ou peu de végétation qui empiète au-dessus de la rivière. Une présence de traceur facilite grandement les calculs de débits par la méthode LSPIV. Il est donc préférable que le site soit propice à la

présence de traceurs tels que des bulles, de l'écume ou encore des feuilles. Finalement, la largeur de la rivière est aussi importante. Une rivière large nécessite de voler le drone à plus haute altitude réduisant la visibilité des traceurs et compliquant l'acquisition.

4.3. Traitement des données

Deux logiciels ont d'abord été testés pour le traitement des images par LSPIV, soit Fudaa-LSPIV (Le Coz *et al.*, 2014) et RIVeR (Patalano *et al.*, 2017). Les deux logiciels permettent de réaliser les différentes étapes de l'analyse LSPIV à partir d'un même programme. Afin de déterminer l'alternative la mieux adaptée aux besoins du projet, des données ont été traitées dans les deux logiciels et les résultats ont été comparés. Il a été conclu qu'il était possible d'avoir de bons résultats avec RIVeR lorsque des conditions terrain idéales étaient présentes (ex. : aucun ombrage sur l'écoulement, présence élevée de traceurs, faible vent). De son côté, Fudaa-LSPIV permettait de bons résultats malgré des conditions terrain moins optimales comme une plus faible présence de traceurs. Il a aussi été noté que RIVeR effectue l'orthorectification des images après le calcul des champs de vitesses tandis que Fudaa-LSPIV effectue l'orthorectification des images avant le calcul des champs de vitesse. L'équipe a tenté de contacter les concepteurs de RIVeR pour mieux comprendre le processus de traitement, mais est demeurée sans réponse. Du côté de Fudaa-LSPIV, une assistance technique des concepteurs a été fournie au courant du projet. Finalement, l'équipe a trouvé que l'utilisation du logiciel Fudaa-LSPIV était plus aisée, particulièrement pour l'intégration de la section bathymétrique nécessaire au calcul du débit.

Le traitement des données présenté dans ce rapport a donc été effectué à l'aide du logiciel Fudaa-LSPIV qui a été développé par EDF et Irstea. Deux versions du logiciel ont été utilisées, soit la version 1.8.3. et la version 1.9.2. Les données traitées en début de projet ont été faites avec la version plus ancienne et le changement a été effectué après la publication de la version 1.9.2 vers la fin de l'année 2022.

La chaîne de traitement est constituée de six grandes étapes (Figure 19). Le détail des étapes réalisées dans le logiciel est présenté dans le cahier des participants fournis lors de la formation donnée au MELCCFP (Annexe).

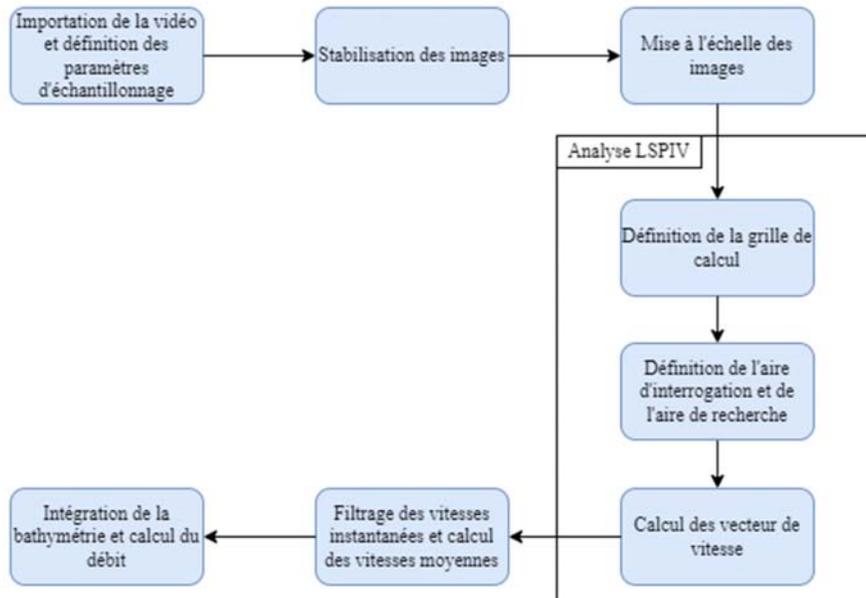


Figure 19 : Organigramme de la chaîne de traitement dans Fudaa-LSPIV

La première étape consiste à importer la vidéo et définir les paramètres d'échantillonnage de la vidéo telle que le nombre d'images par seconde qui sont conservées pour le traitement et la séquence de la vidéo où les images sont conservées. Généralement, une image sur deux ou trois est conservée et un intervalle de temps variant entre 45 secondes et 1 minutes est choisi. La deuxième étape consiste en la stabilisation des images notamment en définissant la zone d'écoulement, permettant au logiciel d'utiliser des points fixes sur les berges afin de stabiliser chaque image. La troisième étape consiste en la mise à échelle des images à l'aide d'un minimum de deux points dont la distance entre les deux est connue. À partir de cette distance, le logiciel peut calculer la résolution des images en mètre par pixel. La quatrième étape consiste à l'analyse LSPIV. Cette étape consiste à définir une grille de points dans la zone d'écoulement où les vitesses d'écoulement sont calculées en chaque point et ce à partir d'un traceur, d'une aire d'interrogation et d'une aire de recherche. Pour chaque séquence d'images consécutives, un vecteur de vitesse est calculé en chaque point. Notons qu'une valeur par défaut de l'aire d'interrogation a été sélectionnée, soit 30 pixels, à partir des recommandations du guide du logiciel. La taille de l'aire de recherche est de taille similaire, mais sa position est décalée dans le sens de l'écoulement. Une analyse visuelle du déplacement d'un traceur entre deux images a été faite afin de déterminer si la taille de ces aires était convenable pour chaque mesure. Notons que le logiciel suggère une aire d'interrogation se situant entre 12 et 40 pixels. Il n'y a cependant pas de limite en ce qui concerne la taille de l'aire de recherche. L'impact de la taille

de ces deux paramètres a été évalué dans le cadre de l'étude des sources d'erreur de la méthode. La cinquième partie du traitement consiste au filtrage des données afin d'éliminer les valeurs de vitesses de surfaces aberrantes ainsi que d'éliminer les vitesses négatives, soit les vecteurs de vitesse allant en direction inverse de l'écoulement. À cette étape, des filtres de corrélation et de vitesse d'écoulement sont appliqués en fonction des caractéristiques des traceurs. Les valeurs des filtres peuvent varier entre 0,4 et 0,98. Selon les recommandations du guide de Fudaa-LSPIV, les filtres de corrélation situés entre 0,7 et 0,9 sont utilisés pour les traceurs non déformables alors que des corrélations plus faibles situés entre 0,4 et 0,9 sont utilisés pour des traceurs plus déformables. La dernière étape consiste en l'intégration de la bathymétrie pour le calcul du débit. Au moins 20 points, le long d'une section transversale où une profondeur est connue, sont nécessaires pour le calcul du débit. Les sections transversales utilisées pour le calcul du débit proviennent soit de mesures GNSS prises à faible niveau d'eau ou à l'aide d'un ADCP monté d'un GNSS. Pour certaines rivières, plusieurs sections transversales ont été acquises afin de comparer l'effet du choix de la section sur le calcul du débit dans Fudaa-LSPIV. Une fois la bathymétrie intégrée, une valeur du paramètre α est déterminée pour la section. Pour chaque point de la section transversale, une zone tampon est ensuite créée. La taille de cette zone est définie de façon à inclure au moins trois vecteurs. Le logiciel calcule une moyenne des vitesses des trois vecteurs, situés dans la zone, les plus proches. Dans le cadre de l'étude, trois valeurs du paramètre α ont été testées soit 0,8, 0,85 et 0,9, afin de faire une analyse de sensibilité. Le calcul du débit est ensuite lancé et le rapport de jaugeage est finalement exporté.

Afin de valider les résultats et d'effectuer des analyses de sensibilité, plusieurs éléments ont été testés. La première étape de validation consiste à comparer le débit calculé avec le débit mesuré pendant l'acquisition. Un débit calculé se trouvant dans un écart relatif de 10% du débit mesuré était considéré comme acceptable et ceux se trouvant dans un écart relatif de moins de 5% étaient considérés comme bons. Ces seuils ont été validés avec le MELCCFP. Afin d'améliorer les résultats du calcul et de faire une analyse de sensibilité, une légère variation des filtres de corrélation est appliquée, en ajustant la corrélation minimum à 0,65 pour les traceurs non-déformables par exemple, puis le calcul du débit est refait. Généralement, cela n'avait pas un grand impact sur le calcul du débit. Ensuite, la taille de l'aire d'interrogation et de l'aire de recherche est modifiée à 20 pixels puis 40 pixels et le calcul du débit est refait avec ces nouveaux paramètres. La valeur de débit ayant le plus petit écart est ensuite retenue comme étant le résultat final du calcul.

5. Résultats

5.1. Sommaire des résultats

Un total de 51 mesures a été traité s'étendant de novembre 2021 à juillet 2023. Ces mesures ont été prises sur sept cours d'eau réparties sur huit sites. Notons que les résultats sur la rivière Saint-François à Weedon ne sont pas concluants pour les six dates d'acquisition. Les débits lors des prises de mesures variaient entre 1 et 418 m³/s. De la glace était présente sur les rivières Eaton, Aux Saumons et Saint-François (Weedon) pour une mesure chacune. Sur l'ensemble des mesures, une forte présence de traceurs est observée sur 34 mesures et une présence modérée sur 10 mesures. Une absence ou une faible présence de traceurs a été observée pour sept mesures. Sur les 51 mesures LSPIV acquises, le calcul de débits sur 32 mesures a permis d'obtenir un écart de moins de 10 % dont 24 mesures avaient un écart de moins de 5%. Les bons résultats sont regroupés sur certaines rivières, soit la rivière Eaton (10 sur 12), Aux Saumons (5 sur 7) et le ruisseau Kee (4 sur 4). Pour les rivières Au Saumon et Saint-François à Weedon, dans la plupart des cas, les résultats obtenus par la méthode présentaient des valeurs de débits en dehors du seuil de 10% par rapport aux valeurs de débits mesurés. Sur les 32 mesures où de bons résultats ont été obtenus, 29 d'entre elles étaient en forte présence ou en présence modérée de traceurs alors que trois d'entre elles présentaient peu de traceurs. Sur les 51 mesures, 26 des débits calculés ont été sous-estimés par rapport au débit mesuré, représentant 52% des mesures, ne montrant donc pas de biais systématique important (Figure 20). Des auteurs avaient d'ailleurs noté la tendance du LSPIV à sous-estimé les débits (Tauro *et al.*, 2017). Notons qu'une mesure a été exclue de la Figure 20 puisqu'il s'agit d'une valeur extrême avec un écart de 181% entre le débit mesuré et le débit calculé.

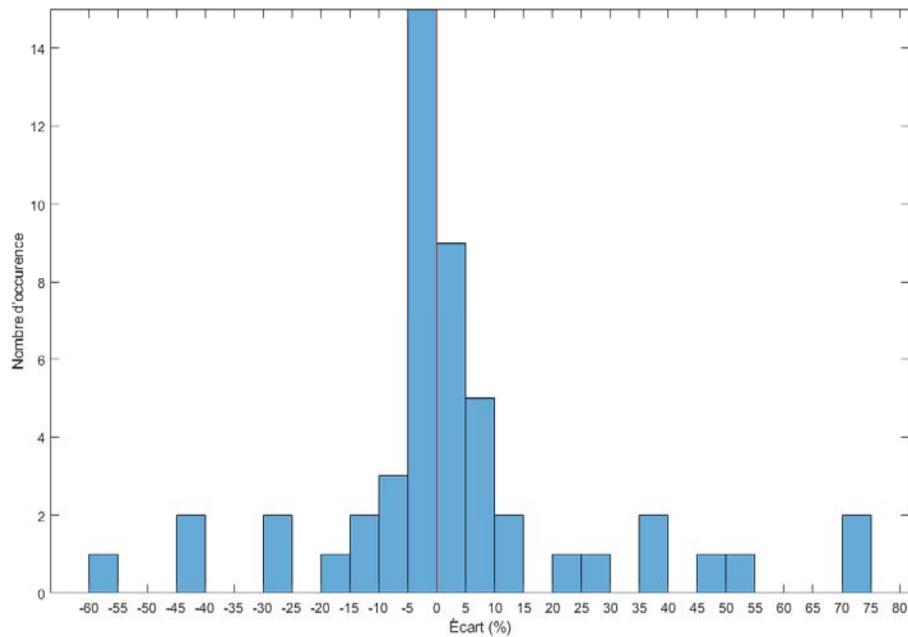


Figure 20 : Distribution de l'écart entre le débit mesuré (ADCP ou station) et le débit calculé avec la méthode LSPIV

Le débit mesuré (ADCP ou station) est comparé à celui calculé avec la méthode LSPIV dans la Figure 21. La figure montre que la majorité des débits calculés se trouve dans l'écart de plus ou moins 10% (ligne pointillée noire) avec les débits mesurés. Il est possible d'observer que l'écart entre le débit mesuré et calculé est souvent plus grand lorsque le débit calculé est surestimé que lorsqu'il est sous-estimé. Trois de six mesures où le débit calculé a un écart de plus de 30 % ont été acquises sur la rivière Saint-François à Weedon. Seulement trois débits calculés avaient un écart sous-estimé à plus de 30%.

L'écart entre le débit mesuré (ADCP ou station) et calculé avec la méthode LSPIV a été comparé au débit mesuré lors de l'acquisition (Figure 22). Il ne semble pas avoir un lien entre le débit mesuré et l'écart entre les débits. Notons que la mesure ayant un écart de 181% a aussi été exclue de la Figure 22. Cependant, à de plus faibles débits, une petite différence de débit (m^3/s) donne un grand écart en pourcentage par rapport aux plus grands débits. Il est donc difficile de déterminer si un faible ou un fort débit a un effet sur la précision du calcul. Il y a aussi peu de mesure avec des débits élevés.

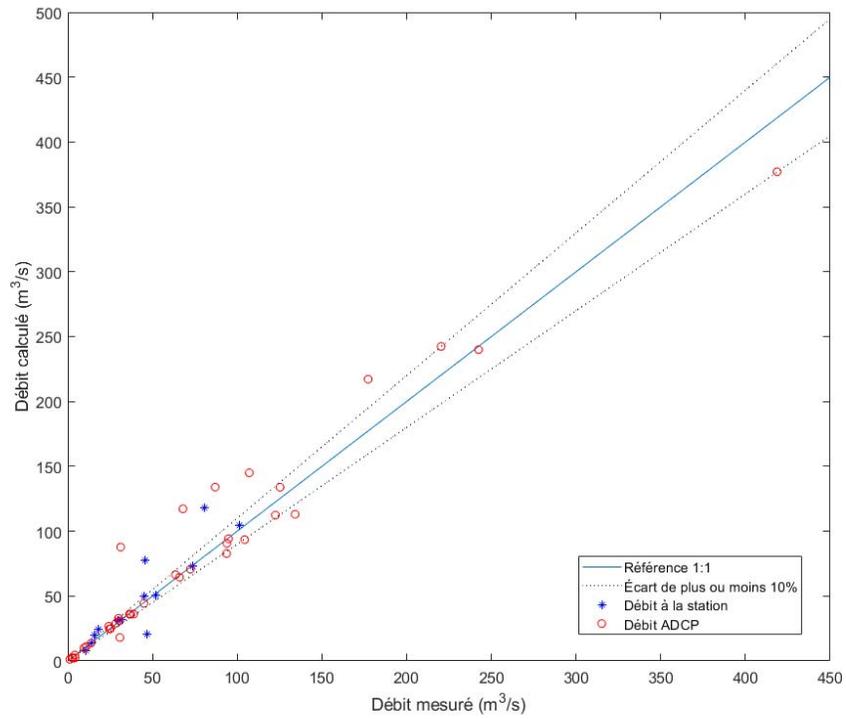


Figure 21 : Comparaison de l'écart entre le débit mesuré (ADCP ou station) et calculé par la méthode LSPIV

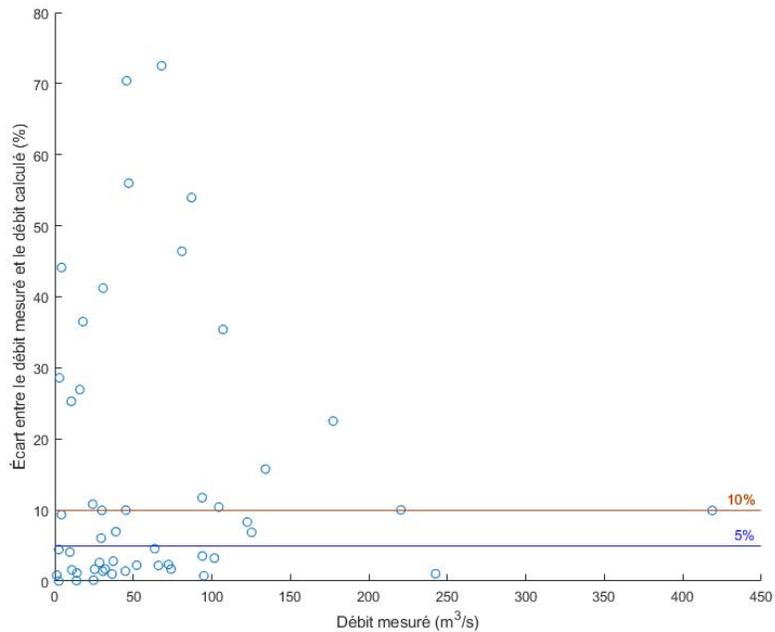


Figure 22 : Comparaison de l'écart entre le débit mesuré et calculé avec la méthode LSPIV en fonction du débit mesuré

5.2. Rivière Au Saumon

Trois mesures LSPIV ont été acquises sur la rivière Au Saumon (Tableau 1). Deux résultats de la méthode LSPIV ont montré de très grands écarts avec le débit mesuré. La valeur du paramètre α qui est revenu le plus souvent est 0,8, mais l'échantillon est trop faible pour déterminer une valeur α constante pour ce site. Pour les mesures du 4 avril 2022 et du 11 avril 2022, il y avait très peu de traceur. Pour la mesure du 29 mars 2022, les traceurs étaient sous forme de frasil et une partie des berges étaient gelées.

Tableau 4 : Résultats des calculs de débit sur la rivière Au Saumon

Date	Débit calculé (m ³ /s)	Débit mesuré (m ³ /s)	Écart (%)	α
29/3/2022	24,4	17,9	+36,5	0,8
4/4/2022	31,2	29,4	+6,0	0,8
11/4/2022	20,7	47,0	-56,0	0,9

5.3. Rivière Aux Saumons

De bons résultats ont été obtenus pour les mesures acquises sur la rivière Aux Saumons (Tableau 5). Sept mesures ont été effectuées sur ce site et cinq de celles-ci présentent de bons résultats. Un écart de débit légèrement au-dessus du seuil de 10% a été calculé pour le vol du 21 juillet 2023 et un écart de plus de 40 % a été calculé pour la mesure du 30 mars 2022. Le paramètre α semble se situer entre 0,85 et 0,9. Le site est caractérisé par des traceurs sous forme de bulles d'air et ceux-ci étaient visibles sur l'ensemble des mesures à l'exception du vol du 18 novembre 2021 où peu de traceurs étaient visibles.

Tableau 5 : Résultats des calculs de débit sur la rivière Aux Saumons

Date	Débit calculé (m ³ /s)	Débit mesuré (m ³ /s)	Écart (%)	α
18/11/2021	11,0	10,8	+1,6	0,9
30/3/2022	18,0	30,7	-41,2	0,9
1/4/2022	44,3	44,9	-1,4	0,9
6/4/2022	13,7	13,7	+0,1	0,85
6/4/2023	70,7	72,4	-2,3	0,85
12/4/2023	36,0	36,4	-1,0	0,85
21/7/2023	26,7	24,1	+10,8	0,8

5.4. Rivière Coaticook

Les calculs de débit par la méthode LSPIV sur la rivière Coaticook montrent de bons et de mauvais résultats (Tableau 6). Tout d'abord, les vols du 1 avril 2022 et du 6 avril 2023 montrent de bons résultats avec des débits calculés ayant un écart de moins de 2 % dans les deux cas. Le vol du 12 avril 2023 montre un résultat tout juste en dehors du seuil de 10% avec un écart de 11% alors que les résultats du 30 mars 2022 montrent un écart de plus de 29%. Finalement, les résultats du vol acquis en juillet 2023 montrent un écart important par rapport au débit mesuré avec un écart de 46% (voir section 6.3). Ce vol a été effectué en situation d'inondation. Une forte présence de traceur bien réparti sur l'ensemble de la rivière est généralement observée à l'exception du vol du 30 mars 2022 qui présente une faible présence de traceurs. Finalement, la valeur du paramètre α pour le site semble être 0,8 puisque quatre des cinq meilleurs résultats ont été obtenus avec cette valeur. Pour le 1 avril 2022 (valeur de $\alpha = 0,85$), le débit calculé avec un α de 0,8 se retrouve aussi dans un écart de moins de 10% avec le débit mesuré.

Tableau 6 : Résultats des calculs de débit sur la rivière Coaticook

Date	Débit calculé (m3/s)	Débit mesuré (m3/s)	Écart (%)	α
30/3/2022	20,4	15,9	+28,8	0,8
1/4/2022	31,5	32,1	-1,7	0,85
6/4/2023	72,7	74,0	-1,7	0,8
12/4/2023	49,9	45,2	+10,5	0,8
11/7/2023	118,4	80,9	+46,4	0,8

5.5. Rivière Eaton

Les mesures LSPIV sur la rivière Eaton ont donné de bons résultats pour la plupart des acquisitions (Tableau 7). En effet 8 des 12 calculs de débits avaient un écart de moins de 5% avec les débits mesurés. Le débit calculé pour le 22 juin 2023 et 24 juillet 2023 montre les écarts relatifs les plus élevés avec 28 et 25 % respectivement. Les débits mesurés pour ces deux dates sont dans les plus faibles avec 3 et 10 m³/s. Ensuite, les valeurs de débit ont été sous-estimées pour huit des 12 mesures. Une valeur du paramètre α se situant entre 0,8 et 0,85 semble être idéale pour ce site. En effet, sur les 12 mesures, le débit le plus proche du débit mesuré a été calculé avec des valeurs α de 0,8 et 0,85 dans 8 cas alors que pour quatre des mesures, le débit calculé était le plus proche de valeur mesurée avec un paramètre α de 0,9. Notons que c'est quatre mesures proviennent de données acquises en 2023 et que l'autre mesure acquise en 2023 a été réalisée en amont du pont plutôt qu'en aval (voir section 6.2.1).

Tableau 7 : Résultats des calculs de débit sur la rivière Eaton

Date	Débit calculé (m ³ /s)	Débit mesuré (m ³ /s)	Écart (%)	α
1/11/2021	30,9	30,5	+1,4	0,85
16/11/2021	9,9	9,6	+4,1	0,8
21/3/2022	66,5	63,6	+4,6	0,8
22/3/2022	32,9	29,9	+10,0	0,8
30/3/2022	13,8	14,0	-1,1	0,85
6/4/2022	24,9	25,3	-1,7	0,85
27/9/2022	24,5	24,6	-0,1	0,8
6/4/2023*	104,9	101,6	+3,2	0,8
12/4/2023	50,9	52,1	-2,2	0,9
22/6/2023	2,1	2,9	-28,6	0,9
12/7/2023	36,1	38,8	-7,0	0,9
24/7/2023	7,8	10,4	-25,3	0,9

*mesure acquise en amont du pont, alors que les autres mesures ont été acquises en aval du pont

5.6. Ruisseau Kee

De bons résultats ont été obtenus pour le ruisseau Kee (Tableau 8). En effet, tous les débits calculés ont un écart relatif de moins de 10% dont trois mesures sur quatre ont un écart de moins de 5%. Les valeurs du paramètre α pour ce site se situaient entre 0,6 et 0,75. La littérature démontre que dans le cas d'un écoulement non uniforme, comme le ruisseau Kee, les valeurs moins élevées de α permettent d'obtenir de meilleurs résultats. Les valeurs par défaut semblent se situer entre 0,6 et 0,65.

Tableau 8 : Résultats des calculs de débit sur le ruisseau Kee

Date	Débit calculé (m ³ /s)	Débit mesuré (m ³ /s)	Écart (%)	α
20/4/2023	2,5	2,5	+0,0	0,75
21/4/2023	1,2	1,2	-0,8	0,65
26/4/2023	4,6	4,2	+9,3	0,6
28/4/2023	2,6	2,5	+4,4	0,6

5.7. Rivière Massawippi

Les résultats des calculs de débit par la méthode LSPIV pour le site de la rivière Massawippi sont plus mitigés (Tableau 9). Un écart de moins de 10% a été calculé pour quatre des sept mesures. Cependant, un seul des débits, soit le 30 mai 2023, présente un gros écart avec le débit calculé. Les calculs de débit pour les 12 avril 2023 et 11 juillet 2023 présentent un écart

légèrement en dehors du seuil déterminant la validité de la mesure avec 11,7 % et 10,4 % respectivement. Dans la plupart des cas, les débits calculés ont été sous-estimés. La valeur du paramètre α est relativement constante et se situe entre 0,85 et 0,9. Notons que la présence de traceurs est inconstante sur ce site, mais ils sont facilement identifiables.

Tableau 9 : Résultats des calculs de débit sur la rivière Massawippi

Date	Débit calculé (m ³ /s)	Débit mesuré (m ³ /s)	Écart (%)	α
22/3/2022	64,5	65,9	+5,8	0,85
6/4/2022	36,1	37,2	-0,6	0,85
10/6/2022	29,1	28,4	-3,2	0,85
6/4/2023	112,4	122,6	-8,3	0,9
12/4/2023	82,7	93,8	-11,7	0,9
30/5/2023	2,4	4,3	-44,1	0,9
11/7/2023	93,5	104,4	-10,4	0,9

5.8. Rivière Saint-François

Les résultats ne sont pas concluants pour le site de la rivière Saint-François à Weedon (Tableau 10). En effet, le calcul de débit a été satisfaisant pour une seule acquisition. Les écarts relatifs entre les débits calculés et mesurés variaient entre 22 et 181 % pour ces cinq mesures et les débits sont largement surestimés. Notons que six autres mesures ont été faites à ce site, mais que la présence de vent en sens contraire de l'écoulement ne permettait de traiter les données convenablement. Ce site est aussi caractérisé par une absence de traceur. Il s'agit également du site avec la plus faible pente (0,0001 m/m).

Tableau 10 : Résultats des calculs de débit sur la rivière Saint-François à Weedon

Date	Débit calculé (m ³ /s)	Débit mesuré (m ³ /s)	Écart (%)	α
23/3/2022	133,9	125,3	+6,8	0,8
29/3/2022	133,9	87,0	+54,0	0,8
4/4/2022	117,2	67,9	+72,5	0,8
11/4/2022	217,1	177,2	+22,5	0,8
5/5/2023	77,8	45,7	+70,4	0,8
8/5/2023	87,7	31,2	+181,0	0,8

En ce qui concerne le site sur la rivière Saint-François à Ascot-Corner, quatre des sept mesures ont permis d'obtenir de bons calculs de débit (Tableau 11). Pour l'acquisition du 11 avril 2022, de bons résultats ont été obtenus cependant, un filtre limitant les vitesses de surface à 5 m³/s a dû être appliqué. Sans filtre, les débits calculés par le logiciel se situaient dans l'ordre de 500 m³/s ce qui représente environ le double du débit mesuré. Pour le vol du 1 avril 2022, les écarts

de débit calculés sont légèrement plus élevés que le seuil fixé. Les vidéos acquises à ce moment avaient un filtre polarisant ce qui obscurcissait la surface de l'eau et limitait la visibilité des traceurs, dans ce cas-ci, des vagues à la surface de l'eau. La valeur par défaut du paramètre α se situe entre 0,85 et 0,9.

Tableau 11 : Résultats des calculs de débit sur la rivière Saint-François à Ascot-Corner

Date	Débit calculé (m ³ /s)	Débit mesuré (m ³ /s)	Écart (%)	α
1/4/2022	242,4	220,3	+10,0	0,8
11/4/2022	239,9	242,5	-1,0	0,85
20/4/2023	145,0	107,1	+35,4	0,9
21/4/2023	94,2	94,9	-0,7	0,85
26/4/2023	113,0	134,2	-15,8	0,9
28/4/2023	90,6	93,9	-3,5	0,9
12/7/2023	377,1	418,7	-9,9	0,9

6. Discussion

Plusieurs facteurs peuvent influencer la qualité des résultats. Les résultats sont analysés selon la prise de données terrain, ainsi que selon le traitement des données. Les autres sources d'incertitudes sont également présentées.

6.1. Prise de données terrain

6.1.1. Visibilité des traceurs

Tout d'abord, lors de l'acquisition des images, la présence de traceurs est un élément déterminant. La quantité de traceur, leur répartition de même que leur type (déformable ou non déformable) peuvent venir affecter les résultats (Dal Sasso *et al.*, 2020; Li et Yan, 2022). De plus, l'illumination des traceurs, la présence de vent ou d'obstacles (arbre, fils électriques, neige/pluie) peuvent affecter la visibilité des traceurs (Muste *et al.*, 2008, 2011; Dal Sasso, 2020). Une analyse visuelle de chacune des vidéos a été effectuée afin d'analyser l'impact de la quantité de traceurs, du type de traceurs, de l'illumination et de la répartition des traceurs sur les résultats. La quantité de traceurs a été classée en trois catégories pour chaque mesure, soit forte, modérée, faible. Le type de traceurs a aussi été noté pour chaque mesure selon quatre catégories (vaguelette et mousse, vaguelette, mousse et non-déformable). L'illumination a été divisée en trois catégories (faible, modérée et forte). Il en va de même pour la répartition des traceurs (bien répartis, concentré d'un côté et ponctuel). Notons que la mesure du 8 mai 2023 à Weedon a été retirée des figures suivantes en raison d'un écart de 181% entre le débit mesuré et le débit calculé. Cet écart peut être expliqué en partie par les traceurs sous forme de

vaguelette et possiblement la présence de vent ou d'une perturbation de l'eau (comme un bateau) qui pourrait avoir accéléré l'écoulement en surface.

Sur les 32 mesures où de bons résultats ont été obtenus, 24 d'entre elles avaient une présence élevée de traceurs, cinq d'entre elles avaient une présence modérée de traceurs et trois d'entre elles avaient peu ou pas de traceurs. La Figure 23 présente un diagramme à moustache, soit la médiane en rouge, la boîte présentant les 25^e et 75^e quartiles (Q25 et Q75), les valeurs maximales limitées par $1,5*(Q75-Q25)$ en noir, et les valeurs aberrantes par les croix rouges. Bien que les médianes des trois catégories soient semblables, la dispersion des données ne l'est pas. Lorsque la présence de traceurs est forte, 50% des débits calculés avec la méthode LSPIV ont un écart entre $-2,6\%$ et $5,8\%$ avec les débits mesurés. L'écart entre les moustaches du graphique ($1,5*(Q75-Q25)$) est aussi moins élevé que pour les autres catégories. Les points aberrants potentiels (situés à l'extérieur des moustaches) peuvent être expliqués par d'autres facteurs comme le type de traceurs présents ou la présence de précipitations sous forme de neige. De leur côté, la majorité des mesures classées comme ayant une présence modérée de traceurs ont des écarts entre $-25,3\%$ et $6,8\%$. La majorité des mesures ayant été classées comme ayant une faible présence de traceurs ont des écarts entre $-2,3\%$ et $43,0\%$. À noter que la dispersion peut être affectée par le nombre de mesure qui est plus élevée pour la catégorie avec forte présence de traceur.

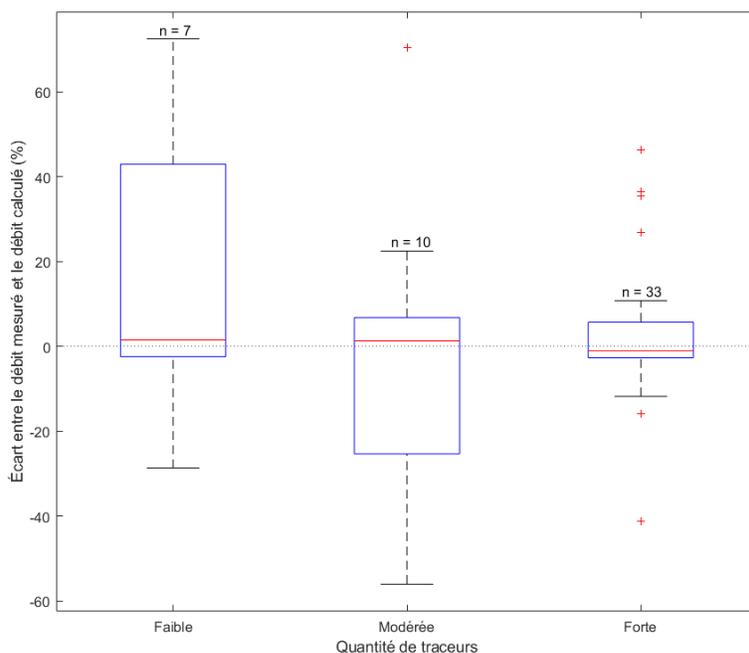


Figure 23 : Écarts entre les débits calculés avec la méthode LSPIV et les débits mesurés (ADCP ou station) selon la présence de traceurs

La Figure 24 compare l'écart entre les débits calculés avec la méthode LSPIV et les débits mesurés (ADCP ou station) en fonction du type de traceurs présents. Une distinction a été faite pour les différents types de traceurs déformables. Lors de l'analyse des vidéos, il a été noté que certains d'entre eux présentaient seulement de la mousse, seulement des vaguelettes ou une combinaison des deux. Il a semblé important de faire la distinction entre ces trois catégories puisque les vaguelettes sont des traceurs ayant un schéma de déplacement moins clair que la mousse et peuvent être plus affectées par le vent. En ce qui concerne les traceurs non déformables, aucune sous-catégorie n'a été établie. Selon la Figure 24, le scénario idéal semble être la combinaison de vaguelette et de mousse. La médiane s'approche de 0% et la moitié des débits calculés ont un écart entre -2,9% et 6,9% par rapport au débit mesuré. Il est toutefois important de noter qu'il semble avoir une corrélation entre le type de traceurs et la quantité de traceurs. Lorsque les traceurs sont uniquement composés de vaguelettes, la dispersion des données est plus grande, la moitié d'entre elles se situant entre -1,5% et 22,7%. En effet, le cas de la rivière Saint-François à Weedon est le site où la présence de traceur était la plus limitée et aussi le site où la méthode LSPIV a le moins bien fonctionné. Pour les mesures du 4 et 11 avril 2022, les résultats montrent un écart de 72 et 22 % respectivement avec le débit mesuré par un ADCP. Ces résultats peuvent en partie être expliqués par le type de traceur, soit des vaguelettes qui sont induites par le vent. Notons d'ailleurs que l'acquisition du 23 mars 2022 a bien fonctionné avec un débit calculé ayant une différence d'environ 7 % avec le débit réel. Des obstacles au fond de l'eau influençaient alors l'écoulement en surface et permettaient la création de quelques traceurs. Pour ce qui est des traceurs composés uniquement de mousse, l'échantillon est trop faible ($n = 2$) pour faire des conclusions. Malgré le fait que les traceurs non déformables ont un schéma de déplacement plus facile à prédire pour l'algorithme (Dal Sasso *et al.*, 2020; Deter, 2021; Li et Yan, 2022), les écarts entre les débits calculés et mesurés sont plus élevés (la moitié entre -2,2% et 36,5%). Les traceurs non déformables sont toutefois généralement présents en faible quantité et seulement à des endroits localisés dans la rivière, ce qui pourrait expliquer les écarts plus élevés. En effet, la densité et la distribution des traceurs font partie des facteurs les plus critiques à la réussite des traitements LSPIV (Dal Sasso *et al.*, 2020).

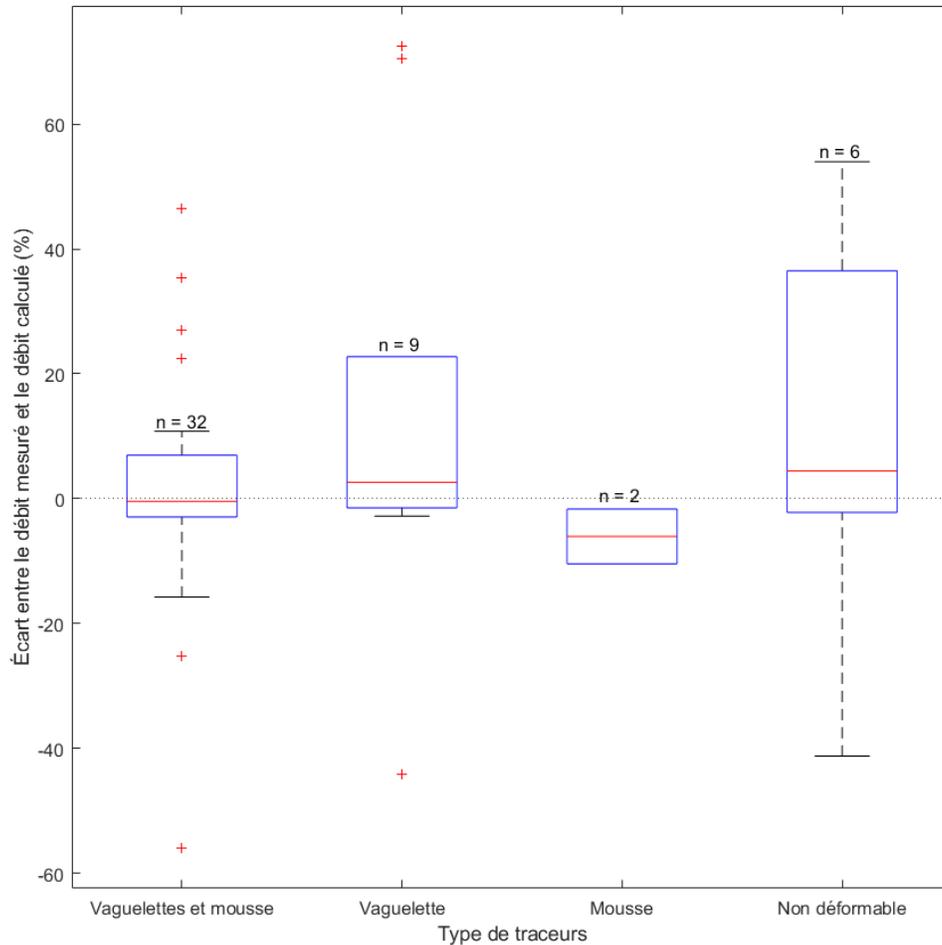


Figure 24 : Écarts entre les débits calculés avec la méthode LSPIV et les débits mesurés (ADCP ou station) selon le type de traceurs

L'écart entre le débit mesuré avec la méthode LSPIV et le débit calculé (ADCP ou station) a aussi été comparé avec l'illumination de la rivière lors de la prise de mesure (Figure 25). Les zones d'ombre ou les zones surexposées à la lumière sont aussi des éléments à considérer lors des acquisitions et le traitement des données. Elles peuvent affecter la visibilité des traceurs et ainsi affecter la capacité du logiciel à effectuer de bonnes correspondances entre les traceurs sur les images consécutives (Tauro *et al.*, 2016; Dal Sasso *et al.*, 2020). Dans le cadre du projet, lors du calcul des vecteurs de vitesse à la surface de l'eau, les zones plus éclairées ou très sombres ont généralement des vitesses plus ou moins élevées et dans la plupart des cas, les traceurs à la surface de l'eau sont moins visibles. C'est d'ailleurs ce qui est observé dans la Figure 25. Sur les 51 mesures, neuf des mesures avaient une illumination faible, 20 une illumination modérée et 22 une illumination forte. Il est possible d'observer que les vidéos

ayant une illumination forte montrent une plus grande répartition de l'écart. Dans la moitié des cas où la mesure était faite en présence d'une illumination faible, les écarts se situaient entre -1,9 et 10,2 %. Bien que le nombre de mesures acquises dans ces conditions soit faible, il semble que les débits calculés soient surestimés. Une luminosité modérée montre une plus faible répartition de l'écart notamment 50% des mesures se situant entre -7,3 et 4,2%. Muste et al. (2008) recommandent justement une lumière diffuse lors de l'acquisition des données. Les débits calculés dans des conditions de plus forte illumination, semblent être généralement sous-estimés. La moitié des débits calculés ont un écart se situant entre -14,4 et 6,2%. Finalement, pour six mesures, soit une sur la rivière Eaton, deux sur la rivière Au Saumon, deux sur la rivière Saint-François à Weedon et une sur la rivière Saint-François à Ascot-Corner, les vidéos ont été acquises avec un filtre polarisant. Bien que trois de ces acquisitions ont obtenu des résultats satisfaisants, le filtre assombrit beaucoup les images, réduisant la visibilité des traceurs.

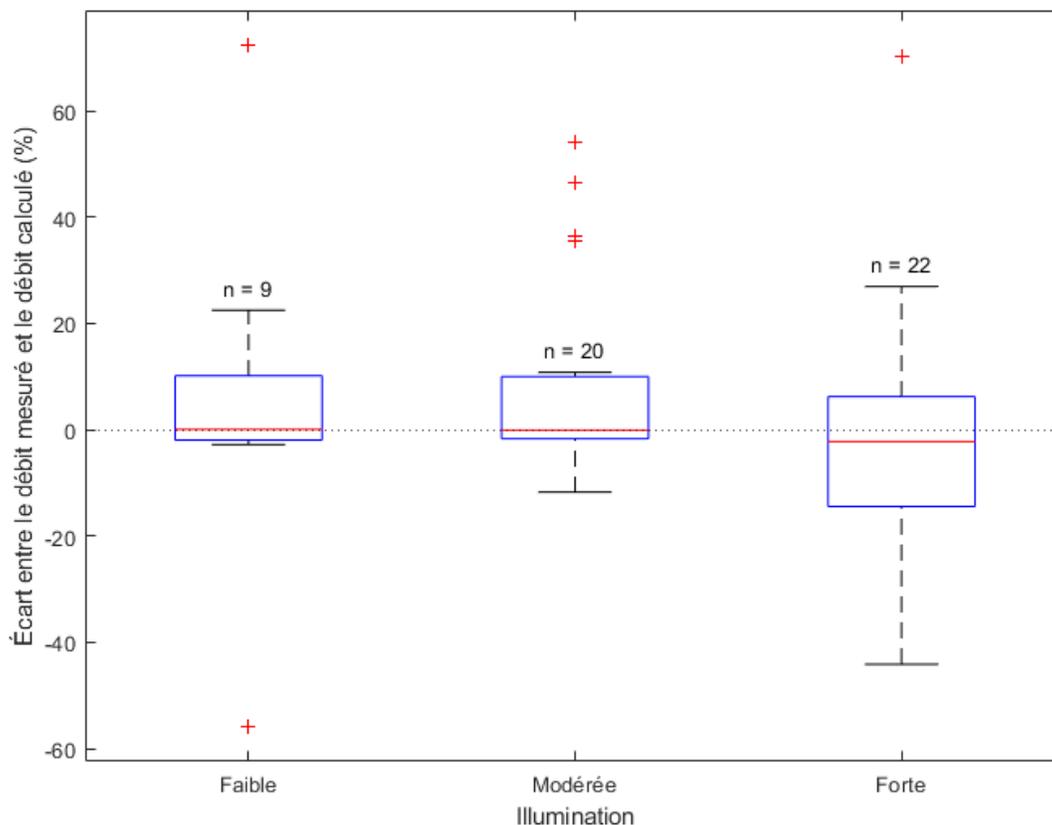


Figure 25 : Écarts entre les débits calculés avec la méthode LSPIV et les débits mesurés (ADCP ou station) selon l'illumination

Le dernier élément qui a été analysé en ce qui concerne les traceurs est l'impact de la répartition de ceux-ci sur le calcul du débit. La Figure 26 montre l'écart entre le débit calculé avec la méthode LSPIV et le débit mesuré (ADCP ou station) en fonction de trois catégories, soit les acquisitions où les traceurs étaient bien répartis sur l'ensemble de la rivière, celles où les traceurs étaient généralement concentrés à un endroit en particulier et finalement, celles où les traceurs étaient présents de façon ponctuelle. Lorsque les traceurs sont bien répartis ou concentrés d'un côté de la rivière, les écarts entre les débits mesuré et calculé sont relativement regroupés et il ne semble pas y avoir de biais. Dans le premier cas, la moitié des mesures ont un écart se situant entre $-1,7$ et $10,0\%$ et dans le deuxième, l'écart se situe plutôt entre $-7,3$ et $4,2\%$. Les écarts dans le cas où les traceurs sont présents de façon ponctuelle semblent montrer que les débits sont généralement surestimés. La moitié des écarts entre le débit mesuré et le débit calculé se situent entre $-2,6$ et $19,6\%$. Donc, la répartition des traceurs ne semble pas avoir beaucoup d'influence sur le calcul de débit s'ils sont en concentration suffisante.

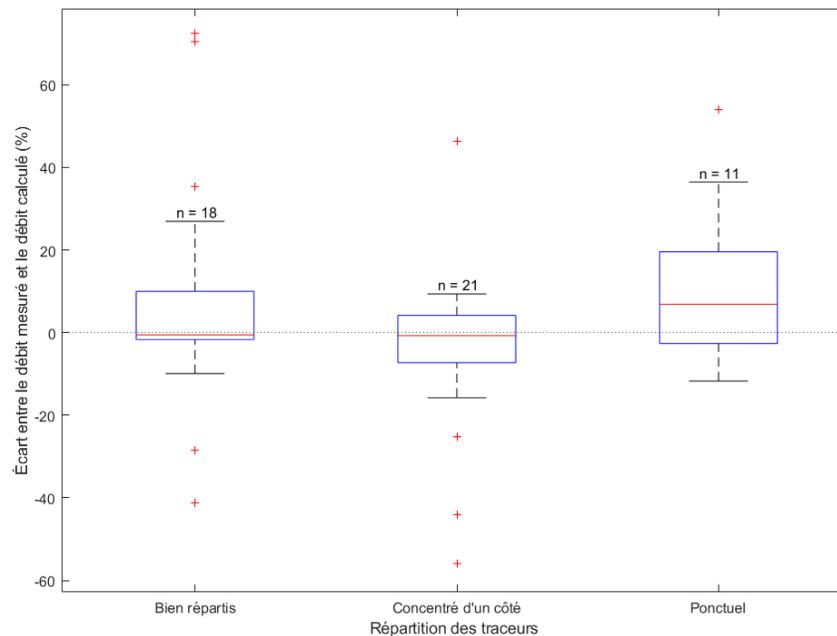


Figure 26 : Écarts entre les débits calculés avec la méthode LSPIV et les débits mesurés (ADCP ou station) selon la répartition des traceurs.

La présence d'arbre et d'autres obstacles au-dessus de la rivière peuvent aussi affecter les résultats du calcul du débit par la méthode LSPIV. En effet, puisque le débit est notamment calculé à partir des vecteurs de vitesse en surface, une interpolation doit être effectuée par le

logiciel lorsque les arbres ou d'autres obstacles empêchent la visibilité complète de la rivière, augmentant donc l'incertitude sur les calculs de débits. Dans le cas de la rivière Massawippi, des arbres se trouvent au-dessus de la rivière à l'endroit de prise de mesure. En été, il est difficile de voir une partie de la rivière en raison des branches de plusieurs arbres. Bien qu'au printemps et à l'automne la rivière est visible sous les branches, il n'est pas possible de calculer les vitesses de surface représentative de l'écoulement sous les arbres. Donc, la zone où les vecteurs de vitesse sont générés doit être limitée à la zone sans obstruction, ce qui nécessite une interpolation des vecteurs de vitesse dans les zones non-visible, augmentant l'incertitude du calcul du débit. De plus, dépendamment du positionnement du drone, la section transversale disponible est située à proximité de fils électriques passant au-dessus de la rivière. Considérant que les vecteurs de vitesses calculés sous les fils électriques peuvent être erronés, la section transversale doit être déplacée en amont ou en aval des fils électriques (Figure 27). Ces éléments ne permettent pas d'obtenir des vecteurs de vitesse cohérents avec l'écoulement sur l'ensemble de la rivière ce qui rend le calcul du débit plus difficile pour ce site. Il est donc recommandé d'éviter le plus possible les zones obstruées pour les mesures LSPIV.



Figure 27 : Interpolation des vitesses (flèches orange) sous les arbres et vecteurs de vitesse absents sous les fils électriques sur la rivière Massawippi

Le vent peut aussi influencer les vitesses de surface (Muste *et al*, 2011; Lewis et Rhoads, 2015, 2018) et donc, avoir un impact non négligeable dans certains cas. Dans le cas de la rivière Saint-François à Weedon, plusieurs vols ont été effectués alors que le vent était en direction opposée de l'écoulement (Figure 28). Cinq vols effectués en mai 2023 n'ont donc pas été traités. Les vitesses de surfaces peuvent aussi être accélérées par le vent dans le cas où le vent va dans le même sens que l'écoulement. C'est d'ailleurs potentiellement le cas du 8 mai 2023 où l'écart entre le débit calculé et le débit mesuré est de 181%. La vitesse et la direction du vent n'ont pas été mesurées lors des prises de mesures, mais restent des éléments importants à

considérer. Les mesures de vitesse et direction du vent varie entre la berge, le pont et la surface de la rivière. Il serait donc intéressant de développer un instrument pouvant mesurer la vitesse du vent à la surface de la rivière à l'aide d'un drone.

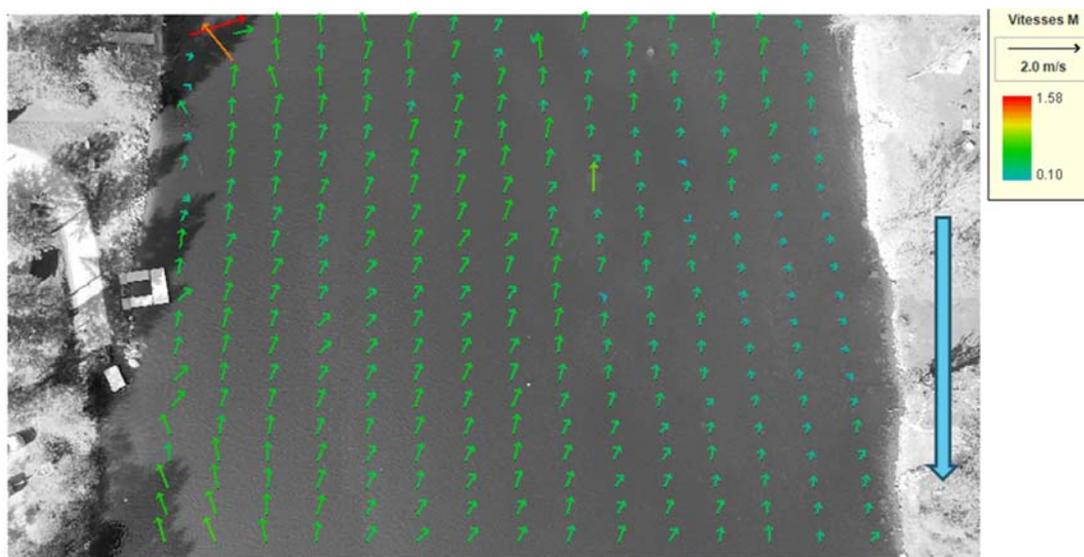


Figure 28 : Vecteur de vitesse calculé dans Fudaa-LSPIV montrant un écoulement vers l'amont le 12 mai 2023 sur la rivière Saint-François à Weedon

Les précipitations ont aussi un effet sur les résultats des calculs de débits par la méthode LSPIV. Deux des vidéos traitées étaient en présence de précipitation. Une vidéo prise le 21 mars 2022 sur la rivière Eaton montre une présence légère de flocons de neige ou de goutte de pluie passant devant la caméra. De bons résultats ont quand même été obtenus dans ce cas-ci avec un écart de moins de 5% avec la mesure de débit de l'ADCP. Les vidéos acquises le 19 avril 2023 sur la rivière Saint-François à Ascot-Corner montrent une présence accrue de flocons passant devant la caméra du drone. Dans ce cas-ci, une grande partie des vecteurs de vitesse ont été influencés par le passage des flocons (Figure 29). Une partie des vecteurs semble cependant être représentative de l'écoulement. Cette zone présente notamment une forte présence de traceurs. Les valeurs de débits obtenues étaient largement surestimées avec une valeur de $348 \text{ m}^3/\text{s}$ ($\alpha = 0,85$) par rapport à la valeur mesurée par ADCP qui était de $193 \text{ m}^3/\text{s}$. Cependant, bien que le calcul du débit ne soit pas satisfaisant dans ce cas-ci, les vecteurs de vitesse dans la zone où des traceurs sont présents semblent suggérer qu'un calcul de débit serait possible, si des traceurs sont présents sur l'ensemble de la zone d'écoulement.

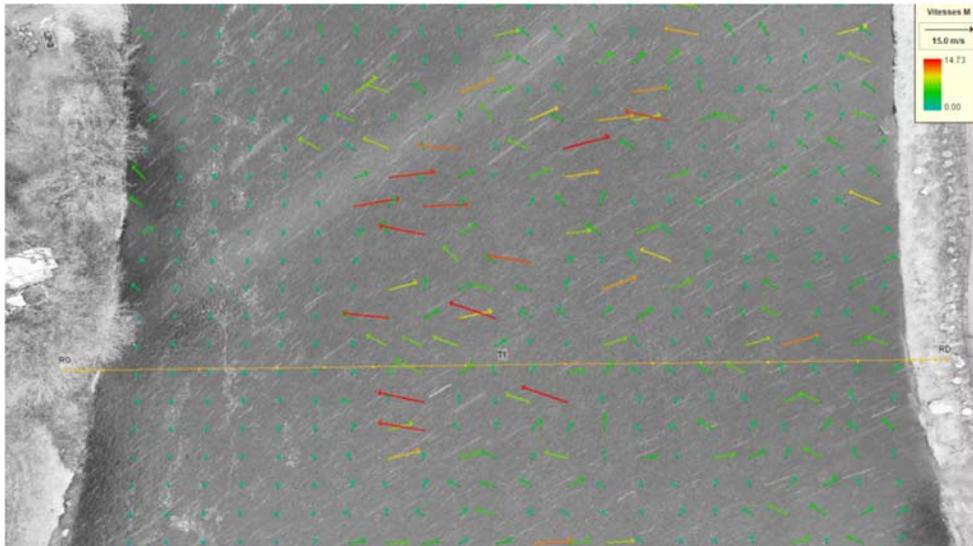


Figure 29 : Impact de la présence de précipitation sous forme de neige sur les vecteurs de vitesses pour le vol du 19 avril 2023 sur la rivière Saint-François à Weedon

6.1.2. Plateforme

Le choix de la plateforme peut avoir un impact sur le processus de calcul du débit. Une simple vidéo à l'aide d'une caméra peut être utilisée. Cependant, ce type d'acquisition nécessite une orthorectification complète de la vidéo. L'orthorectification complète d'une vidéo nécessite au moins six points de repère dont les distances entre eux sont connues (Muste *et al.*, 2008). L'accès aux deux berges est aussi nécessaire puisqu'au moins deux points de repère sur chaque berge sont nécessaires. Ce dernier élément complique beaucoup l'acquisition notamment puisque l'accès aux berges pour se rendre à proximité du cours d'eau est difficile pour plusieurs sites. L'acquisition par drone permet notamment de faire une simple mise à l'échelle, nécessitant seulement deux points de repère rapprochés de quelques mètres (Hauet *et al.*, 2022) et donc l'accès à seulement une berge est nécessaire. Le drone permet aussi plus de possibilités en ce qui concerne la localisation de la prise de vidéo. En effet, le drone permet de se déplacer aux endroits plus propices aux acquisitions (Lewis *et al.*, 2018). Cela permet entre autres d'éviter la végétation et de se déplacer à des endroits où des traceurs sont visibles. C'est pour ces multiples raisons que le drone a été choisi pour les acquisitions dans le cadre du projet.

Les données LSPIV permettent notamment de calculer le débit d'une rivière en réduisant le plus possible les contacts avec le cours d'eau. Cependant, dans certains cas, comme en situation d'inondation, les berges peuvent être difficilement accessibles de façon sécuritaire. L'accès à au moins une berge est notamment nécessaire pour le placement de cible et pour prendre une mesure de niveau d'eau. Dans le cadre du projet, une méthode a été testée afin d'éliminer le

besoin d'accès à une berge. Cette méthode consiste à utiliser un drone RTK permettant de prendre à la fois les vidéos pour la méthode LSPIV, mais aussi de générer rapidement une orthomosaïque et un modèle numérique de terrain (MNT). La résolution de l'orthomosaïque est de l'ordre centimétrique pour des vols effectués à une altitude d'environ 50 mètres. Cette résolution est suffisante pour la mise à l'échelle. L'orthomosaïque permet notamment de retrouver deux points fixes reconnaissables sur les vidéos et de mesurer la distance entre ceux-ci sur l'orthomosaïque afin d'effectuer la mise à l'échelle nécessaire lors du traitement. Le MNT peut être utilisée afin d'obtenir un niveau d'eau sans avoir à s'approcher du cours d'eau. Les tests ont permis de déterminer que l'utilisation d'une orthomosaïque permet d'éliminer l'utilisation de cible sur les berges si assez de points reconnaissables sont visibles sur l'orthomosaïque et dans la vidéo. En effet, lors des tests, deux cônes ont été placés à une distance de 8 mètres sur les berges pendant l'acquisition des images. Une fois les données traitées, l'orthomosaïque a été importée dans un système d'information géographique (SIG) et la distance mesurée entre les deux cônes était bien de huit mètres. Quatre vols ont ensuite été traités en utilisant des points de repère provenant de l'orthomosaïque prise au moment de l'acquisition (sans installation de cônes). Aucun problème n'a été rencontré lors de la mise à l'échelle et de l'intégration de la bathymétrie, qui dépend notamment de la mise à l'échelle.

Pour ce qui est du niveau d'eau, les résultats sont moins concluants. En effet, une comparaison entre l'élévation mesurée avec un capteur GNSS, les élévations du MNT et celles du modèle numérique de surface (MNS) a été effectuée pour les données du 24 juillet 2023 sur la rivière Eaton. Une différence de 60 et 70 cm a été observée avec les données GNSS. Notons que les berges sont assez escarpées à l'endroit de prise de mesure. Pour ce même site, les données du 21 juillet 2023 montrent une différence de 14 à 17 cm. La prise de mesure a été effectuée un peu plus en amont, dans une zone moins escarpée. Pour le vol du 21 juillet 2023 sur la rivière Aux Saumons, l'écart d'élévation était d'environ 15 cm entre les données GNSS ainsi que le MNT et MNS. Dans ce cas-ci, la berge où le niveau d'eau a été acquis est peu escarpée. Finalement, pour le vol du 30 mai 2023 sur la rivière Massawippi, deux traitements ont été effectués. Aucun point de contrôle n'a été utilisé pour le premier vol alors que des points de contrôle ont été considérés afin d'améliorer le traitement. Les points de contrôle étaient situés sur le lit de la rivière en raison du très faible débit. Dans le premier cas, l'écart est d'environ 60 centimètres entre les données GNSS et le MNT ainsi que le MNS alors que dans le deuxième cas, la différence est d'environ un centimètre. Suite à ces analyses, il est possible d'observer que la précision du drone RTK sans l'utilisation de points de contrôles afin de déterminer le

niveau d'eau n'est pas suffisante pour la méthode LSPIV. En effet, Dramais *et al.* (2014) avancent qu'un niveau d'eau d'une précision de 50 cm engendre une erreur de 18%. Pour avoir une erreur de moins de 5% liée au niveau d'eau, une précision de 10 cm est nécessaire, ce qui n'a pas été atteint avec la méthode proposée. L'utilisation de points de contrôle pourrait potentiellement permettre d'obtenir un niveau d'eau à partir de la photogrammétrie, mais l'utilisation d'un GNSS est nécessaire. Il est donc préférable de prendre directement une mesure de niveau d'eau au GNSS, si le terrain le permet.

Plusieurs éléments pourraient être testés dans le futur. Tout d'abord, lorsque possible, le vol de drone pourrait être effectué directement à la station hydrométrique qui mesure le niveau d'eau à l'aide d'une sonde. Ainsi, il ne serait pas nécessaire de mesurer le niveau d'eau avec un GNSS. Une mesure préalable de la bathymétrie serait nécessaire. En utilisant un drone RTK, il n'y aurait aucun contact avec la rivière, et aucunement besoin d'un GNSS. L'utilisation d'un drone RTK demande toutefois une connexion internet et un abonnement à un réseau de stations de bases GNSS.

Ensuite, la performance des capteurs thermiques pourrait être évaluée, notamment sur des rivières où peu de traceurs sont visibles comme l'ont démontré les études de Legleiter *et al.* (2017) et Kinzel et Legleiter, (2019). Aussi, les nouveaux drones DJI Mavic 3M permettent l'acquisition de données avec un capteur optique et un capteur multispectral. Une analyse visuelle rapide de certaines vidéos acquises en 2023 avec ce nouveau drone a permis d'observer facilement les traceurs, ce qui permet de supposer que la méthode LSPIV serait applicable sur ce type de vidéo. Cependant, une analyse complète serait nécessaire afin de valider l'utilisation des vidéos multispectrales.

6.1.3. Bathymétrie et niveau d'eau

La qualité de la donnée bathymétrique peut aussi affecter les résultats. Le choix de la section transversale, la position de la section transversale sur l'image lors du traitement des données ainsi que la qualité des données bathymétriques peuvent tous avoir un impact sur le calcul du débit dans Fudaa-LSPIV. Ici, l'utilisation du terme « donnée bathymétrique » fait référence à la ligne de fond alors que la section transversale fait référence à la position de la bathymétrie sur les images lors du traitement des données. Aussi, pour des raisons techniques, la section transversale n'est pas toujours positionnée à l'endroit exact où les données bathymétriques sont disponibles. C'est pour cette raison que l'impact de la position de la section transversale a été évalué.

Une analyse a été réalisée sur la rivière Coaticook afin d'étudier l'impact de la précision des données bathymétriques. Pour ce site, deux sources étaient disponibles. La première provenait de données prises au GNSS directement aux sections transversales et le deuxième jeu de données provenait d'une interpolation faite à partir de donnée GNSS prise à des sections transversales plus éloignées. Afin de comparer les résultats du calcul du débit avec les deux sources de données, les élévations des données interpolées ont été extraites pour chaque point des données bathymétriques provenant du GNSS. La Figure 30 montre les différences dans la bathymétrie entre les deux sources de données. Il est possible d'observer une différence de près de 50 centimètres entre les deux sources de bathymétrie à un certain endroit mais que la forme de la section est relativement semblable. Un biais est toutefois présent. Notons que les deux sections transversales situées en amont et en aval du secteur qui ont été utilisées pour effectuer l'interpolation étaient à une distance de plus de 600 mètres l'une de l'autre. La grande distance qui les sépare apporte un certain niveau d'incertitude en ce qui concerne la qualité de la bathymétrie interpolée.

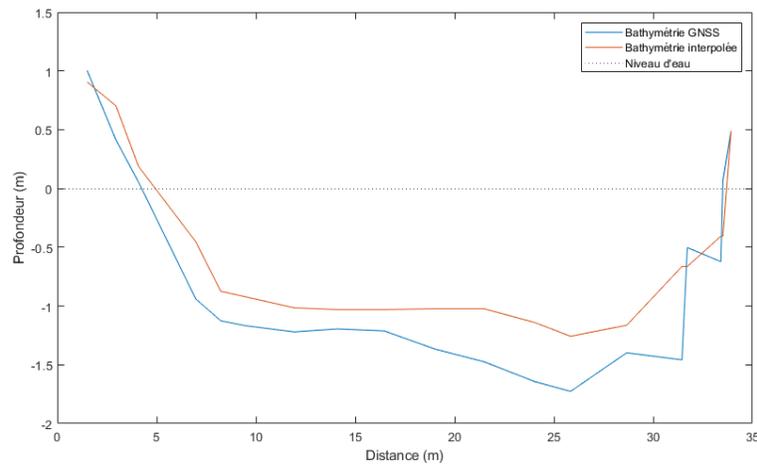


Figure 30 : Comparaison des profils de la section transversale acquise au GNSS et de celle interpolée pour le vol du 12 avril 2023 sur la rivière Coaticook

Ensuite, dans Fudaa-LSPIV, une nouvelle section transversale a été générée le plus près possible de la section transversale utilisée pour le traitement des données. Un nouveau traitement a ensuite été effectué avec les mêmes paramètres de calcul et les débits ont été comparés. Dans 4 des 5 cas sur la rivière Coaticook, les résultats provenant de la bathymétrie interpolée montrent des débits plus faibles et généralement plus éloignés du débit réel (Tableau 12). L'écart entre le débit calculé à l'aide des données bathymétriques prises au GNSS et ceux de la bathymétrie interpolée se trouve entre 10 et 21% pour 4 des 5 cas de cette rivière. Bien

que plus de données seraient nécessaires pour confirmer cette observation, les données bathymétriques interpolées ne semblent pas convenir à ce genre d'application.

Tableau 12 : Impact du choix de type de données bathymétrique sur la rivière Coaticook

Date	Débit réel (m ³ /s)	Débit (m ³ /s) - Bathymétrie GNSS	Débit (m ³ /s) - Bathymétrie interpolée	Écart relatif (%) entre les débits calculés	α
30/3/2022	15,3	20,4	15,3	+20,9	0,8
1/4/2022	32,1	31,5	34,7	+1,8	0,85
6/4/2023	74,0	72,7	54,7	+14,2	0,8
12/4/2023	45,2	49,9	36,3	+15,8	0,8
11/7/2023	80,9	129,9	161,6	+10,9	0,8

Ensuite, afin de tester l'impact de l'emplacement de la section transversale, le débit a été calculé avec le même bathymétrie, mais à différents endroits du profil de vitesse pour 4 prises de mesure sur la rivière Eaton. Les résultats présentés dans le Tableau 13 montrent très peu de variation entre le débit calculé à l'emplacement réel de la section transversale et le débit calculé avec la même bathymétrie, mais avec un profil de vitesse différent. Cette analyse a aussi été réalisée avec les mesures acquises au ruisseau Kee. Les écarts de débits sont beaucoup moins élevés dans le cas de la rivière Eaton. En effet, les écarts ne dépassent pas 1,2% pour la rivière Eaton alors que dans le cas du ruisseau Kee, les écarts varient entre 10 et 77%. Cette analyse a été faite sur ces deux cours d'eau puisque nous sommes en présence de deux types d'écoulement différents qui pourraient possiblement expliquer les différences entre les résultats. Dans le cas de la rivière Eaton, l'écoulement est relativement uniforme sur l'ensemble de la surface alors que dans le cas du ruisseau Kee, l'écoulement est non-uniforme, ce qui pourrait expliquer le grand écart dans le deuxième cas.

Tableau 13 : Évaluation de l'impact de l'emplacement de la section bathymétrique sur le profil de vitesse

Cours d'eau	Date	Débit à l'emplacement original (m ³ /s)	Deuxième emplacement		α
			Débit (m ³ /s)	Écart (%)	
Eaton	21/3/2022	66,5	66,6	+0,3	0,8
	6/4/2022	29,8	30,1	+1,2	0,8
	12/4/2023	50,9	50,4	-0,9	0,9
Kee	20/4/2023	2,5	2,2	-10,4	0,75
	21/4/2023	1,2	2,1	+76,7	0,65
	26/4/2023	4,6	3,9	-14,2	0,6

Finalement, pour certains vols effectués sur les rivières Eaton et Coaticook, des données bathymétriques ont été mesurées pour deux sections transversales se trouvant dans les mêmes vidéos. Le débit a donc été calculé avec les données de bathymétrie des deux sections transversales (Tableau 14). Dans le cas de la rivière Eaton, l'écart relatif entre les débits varie entre 7 et 17% alors que dans le cas de la rivière Coaticook, les écarts relatifs varient entre moins de 1 % et 8%. Cependant, l'écart de 8% pourrait provenir du fait que la deuxième section transversale utilisée est située légèrement en dehors de la vidéo. Les écarts plus élevés pour la rivière Eaton pourraient provenir de la méthode d'acquisition des données bathymétriques. Le premier traitement a été effectué dans la majorité des cas avec des données prises aux GNSS alors que généralement, les données utilisées pour le calcul avec une autre section bathymétrique ont été acquises à l'aide d'un ADCP monté d'un GNSS. En raison de la précision du GNSS utilisé dans le deuxième cas, un biais a dû être corrigé. Cela pourrait en partie expliquer les plus grands écarts de débits calculés entre les deux sections pour la rivière Eaton. Une autre hypothèse serait que le paramètre alpha pourrait varier en fonction de la section transversale utilisée.

Tableau 14 : Comparaison du débit calculé avec deux sections transversales différents pour la même date

Rivière	Date	Section originale	Autre section		α
		Débit (m ³ /s)	Débit (m ³ /s)	Écart (%)	
Eaton	6/4/2022	29,8	27,4	-7,9	0,8
	12/4/2023	50,9	57,2	+12,4	0,9
	21/3/2022	66,5	73,5	+10,6	0,8
	27/9/2022	24,5	20,5	-16,5	0,8
Coaticook	30/3/2022	20,4	19,6	-4,2	0,8
	6/4/2023	72,7	78,8	+8,3	0,8
	12/4/2023	49,9	49,7	-0,4	0,8

Afin d'évaluer la sensibilité du calcul par rapport au niveau d'eau et la profondeur d'eau, 5 centimètres ont été ajoutés et soustraits du niveau d'eau mesuré pour quelques vols sur la rivière Eaton et la rivière Aux Saumons (Tableau 15). Les calculs de débits pour la rivière Eaton montrent un écart maximum de 5,5% par rapport à la valeur de débits calculés. Pour la rivière Aux Saumons, l'écart relatif le plus élevé est de 3,6%. Cela montre qu'une précision du niveau d'eau de plus ou moins 10 centimètres est suffisante pour obtenir de bons résultats, tel que mentionné par Dramais *et al.* (2014). Notons qu'une distinction doit être faite entre la précision du niveau d'eau nécessaire pour la méthode LSPIV et celle nécessaire pour une courbe de

tarage. La méthode LSPIV utilise les vitesses de surfaces et la bathymétrie pour le calcul du débit alors que la courbe de tarage est une relation directe entre le niveau d'eau et le débit. Donc une plus grande précision du niveau d'eau est nécessaire pour la courbe de tarage. L'erreur induite par la précision du niveau d'eau pour la méthode LSPIV serait plutôt comparable l'erreur due à un décalage vertical d'un ADCP lors d'une prise de mesure.

Tableau 15 : Analyse de l'impact de la précision du niveau d'eau sur le calcul du débit

Rivière	Date	Débit calculé (m ³ /s)	Ajout de 5 cm		Soustraction de 5 cm		α
			Débit (m ³ /s)	Écart (%)	Débit (m ³ /s)	Écart (%)	
Eaton	21/3/2022	66,5	68,5	3,1	64,4	-3,2	0,8
	6/4/2022	29,8	31,1	4,4	28,8	-3,4	0,8
	27/9/2022	24,5	25,1	2,5	23,2	-5,5	0,8
	12/4/2023	50,9	53,2	4,5	50,2	-1,3	0,9
Aux Saumons	1/4/2022	44,3	45,9	3,6	42,7	-3,6	0,9
	6/4/2022	70,7	72,8	2,9	68,6	-3,0	0,85
	12/4/2023	36,0	37,3	3,5	34,8	-3,6	0,85

6.2. Traitement de données

6.2.1. Coefficient de vitesse (paramètre α)

La sensibilité du paramètre α a été analysée pour tous les calculs effectués. La valeur par défaut du paramètre α est de 0,85, mais il est spécifique à chaque site et peut varier localement si un changement de conditions survient (Jonhson et Cowen, 2017). La variation de ce paramètre a été identifiée comme une source d'incertitude majeure dans la littérature (Le Coz *et al.*, 2010; Dramais *et al.*, 2014). Trois débits ont donc été calculés pour chaque mesure en utilisant des valeurs du paramètre α de 0,8, 0,85 et 0,9. L'analyse des données montre que la valeur du débit calculé varie d'environ 12% entre le débit calculé avec un paramètre α de 0,8 et celui calculé avec un paramètre α de 0,9, et ce peu importe le débit (fort ou faible) ou la rivière. Cet écart correspond notamment à ce que Dramais *et al.* (2014) ont déterminé. Pour le ruisseau Kee, les valeurs du paramètre α étaient plus petites (entre 0,6 et 0,75). Comme mentionné au Tableau 1, un paramètre α de 0,6 est recommandé pour les écoulements non uniformes. Les débits calculés avec un paramètre α de 0,6 et de 0,7 varient d'environ 14%. La valeur du paramètre α peut donc avoir une influence importante sur le calcul du débit. Pour la plupart des sites, il est possible de cibler une ou deux valeurs α qui semblent être les plus appropriées.

Pour les rivières Eaton (Tableau 7), Massawippi (Tableau 9) et Saint-François à Ascot-Corner (Tableau 11), les valeurs du paramètre α varient partiellement en fonction des années d'acquisition laissant supposer que le paramètre α pourrait varier dans le temps. Des acquisitions sur plusieurs années permettraient de valider ou de rejeter cette hypothèse.

Le paramètre α ne semble pas dépendre du débit de la rivière puisque plusieurs des meilleurs résultats obtenus avaient des débits similaires, mais des valeurs de α différents comme dans le cas de la rivière Eaton. Notons que dans certains cas, les débits calculés pour une même date mais avec différentes valeurs de α se retrouvaient toutes dans un écart de 10% avec la valeur de débit mesuré.

6.2.2. Aire de recherche et aire d'interrogation

La revue de la littérature à relever que le choix de la taille de l'aire d'interrogation et de l'aire de recherche peut avoir un impact important sur le calcul du débit (Pearce *et al.*, 2020; Pumo *et al.*, 2021, Wen-Cheng *et al.*, 2021). L'aire d'interrogation et de recherche choisies par défaut dans le cadre du projet est de 30 pixels, comme suggérer dans le guide de Fudaa-LSPIV. Cependant, lorsque le débit calculé ne se trouvait pas dans un écart de plus ou moins 10 % du débit mesuré, le calcul des vitesses de surfaces était refait en utilisant une aire d'interrogation et une aire de recherche de 20 pixels puis 40 pixels. Les débits calculés avec les trois tailles différentes ont servi à faire une analyse de sensibilité de l'aire d'interrogation et de recherche. Les résultats présentés dans le Tableau 16 montrent l'écart entre les calculs de débit à 30 pixels et les calculs à 20 et 40 pixels. Il est possible d'observer qu'une variation de la taille des aires d'interrogation et de recherche peut avoir un gros impact sur le calcul du débit. Une variation de 32% entre un débit calculé avec une taille de 30 pixels et un débit calculé avec une taille 20 pixels a été observée pour le vol du 11 juillet 2023 sur la rivière Massawippi. En utilisant les mêmes paramètres, 27 % de différence a été observé pour le vol du 6 avril 2022 sur la rivière Eaton. Aussi, notons que certains résultats pour la rivière Saint-François à Weedon ont été améliorés, en termes de pourcentage d'écart, sans toutefois réduire l'écart à moins de 10% du débit mesuré.

Un élément qui pourrait être analysé éventuellement est l'impact des caractéristiques des traceurs, tel que la forme, la taille, la densité, la distribution et la vitesse, ainsi que de l'altitude de vol sur l'aire d'interrogation et de recherche. Une analyse plus détaillée des vitesses en pixels par seconde devrait être effectuée. En effet, malgré l'analyse visuelle effectuée pour

déterminer l'aire d'interrogation et de recherche, un impact a été remarqué sur le calcul du débit lorsque les tailles de ces aires étaient modifiées.

Tableau 16 : Comparaison des débits et des écarts obtenus en utilisant différentes aires d'interrogation et de recherche

Rivière	Date	Débit mesuré (m ³ /s)	30 pixels	20 pixels		40 pixels		α
			Débit (m ³ /s)	Débit (m ³ /s)	Écart (%)	Débit (m ³ /s)	Écart (%)	
Eaton	30/3/2022	14,0	15,9	13,8	-13,1	18,4	+13,8	0,85
	6/4/2022	25,3	24,9	31,7	27,5	23,0	-8,2	0,85
	12/7/2023	38,8	30,7	36,1	17,5	26,7	-15,1	0,9
	24/7/2023	10,4	7,1	7,8	8,8	6,7	-5,9	0,9
Coaticook	30/3/2022	15,9	20,4	22,6	10,8	20,2	-1,4	0,8
	12/4/2023	45,2	49,9	50,3	0,8	49,7	-0,5	0,8
	11/7/2023	80,9	130,0	120,2	-7,5	118,4	-9,8	0,8
Saint-François (Weedon)	29/3/2022	87,0	133,9	144,5	7,8	134,9	+0,7	0,8
	11/4/2022	177,2	258,1	233,3	-9,6	217,1	-18,8	0,8
	8/5/2023	31,2	88,1	91,7	4,0	89,1	+1,1	0,8
Massawippi	12/4/2023	93,8	69,2	82,7	19,6	68,4	-1,2	0,9
	11/7/2023	104,4	70,7	93,5	32,1	64,5	-9,6	0,9

6.3. Autres sources d'incertitude

Deux mesures ont été prises en situation d'inondation au mois de juillet 2023. Notons que seulement les données où la rivière était sortie de son lit ont été considérées comme étant des mesures en situation d'inondation. Le 11 juillet 2023, le débit mesuré sur la rivière Massawippi était de 104 m³/s et la rivière était sortie de son lit. Les résultats du traitement montrent un débit de 93 m³/s, ce qui représente un écart légèrement supérieur à 10%. La mesure sur la rivière Coaticook pour la même date montre un écart plus important avec 46 % d'écart entre le débit mesuré de 81 m³/s et un débit calculé de 118 m³/s. Ces deux mesures semblent indiquer que le calcul du débit est complexe dans ces situations. Cependant, les données GNSS des berges ainsi que la visibilité du cours d'eau pourraient en partie expliquer les résultats. Premièrement, les données sur l'élévation des berges ne couvraient pas l'ensemble de la zone inondée. Afin d'obtenir l'élévation de l'ensemble de la zone inondée, les données LiDAR du MFFP ont été utilisées. Ces données ont une résolution plus grossière que les données GNSS et pourraient

avoir influencé les résultats. Aussi, dans le cas de la rivière Coaticook, une grande partie de la zone inondée n'était pas visible sur les vidéos en raison d'arbres situés sur l'une des rives. Cela a généré deux sources d'incertitude. La première provient de l'interpolation nécessaire pour faire le calcul du débit dans Fudaa-LSPIV puisque les vitesses de surface ne pouvaient pas être calculés en dehors du lit pour un côté de la rivière (Figure 31). La deuxième provient de la difficulté à valider si les données de la section transversale contenant les données bathymétriques sont bien situées. En effet, puisqu'une grande partie de l'écoulement n'est pas visible, il est difficile de savoir si la section transversale est trop longue ou trop courte et si les profondeurs semblent cohérentes. Du côté de la rivière Massawippi, en raison de la végétation, les vecteurs de vitesses ont seulement été calculés pour le lit de la rivière (Figure 32). Le débit pour cette mesure a été sous-estimé, ce qui pourrait en partie être expliqué par une surface presque spéculaire pour une partie de l'écoulement, ce qui a généré des vitesses très basses à certains endroits. Pour conclure, comme le montre le cas de la rivière Massawippi où un débit légèrement en dehors du seuil de validité, la méthode pourrait permettre une mesure de débit même en situation d'inondation. Cependant, les données bathymétriques complètes et des conditions favorables restent nécessaires pour obtenir de bons résultats.

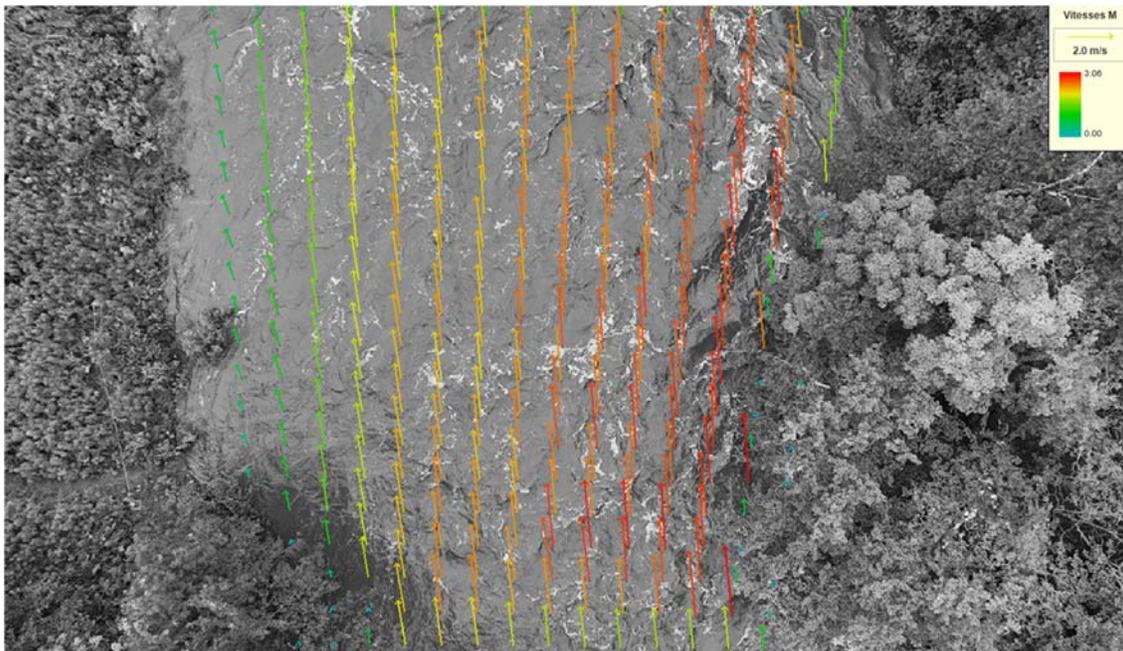


Figure 31 : Vecteur de vitesses en situation d'inondation sur la rivière Coaticook le 11 juillet 2023

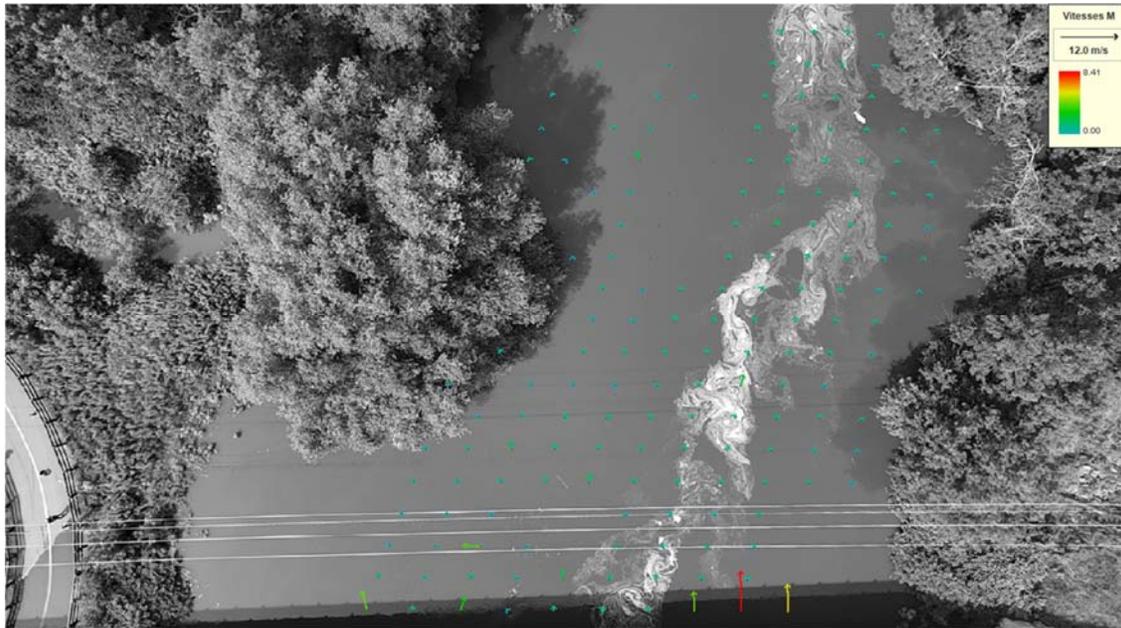


Figure 32 : Vecteur de vitesses en situation d'inondation sur la rivière Massawippi le 11 juillet 2023

La largeur de la rivière introduit aussi une certaine incertitude sur la mesure. Premièrement, pour une rivière d'une centaine de mètre de largeur, l'altitude de vol nécessaire pour voir suffisamment de berges pour le traitement est élevée. Dans le cas de la rivière Saint-François à Weedon, l'altitude de vol pouvait atteindre une centaine de mètres. Les vents sont généralement plus forts, ce qui introduit un mouvement plus intense du drone et donc de la vidéo. Aussi, l'altitude nécessaire réduit la visibilité des traceurs et la résolution de la vidéo.

La pente de la rivière est aussi un élément qui pourrait influencer indirectement le calcul du débit par la méthode LSPIV. La pente est notamment associée à la turbulence d'une rivière. La présence de turbulence est généralement associée à la présence de bulle d'air et de mousse sur la surface de l'eau. La rivière Saint-François à Weedon a une pente très faible (0,0001 m/m), ce qui pourrait expliquer en partie l'absence de traceurs autres que des vaguelettes.

7. Recommandations sur l'acquisition et le traitement des données

Différentes méthodes d'acquisition ont été testées lors de l'étude et quelques éléments facilitant l'acquisition et le traitement des données sont ressortis.

Tout d'abord, l'utilisation d'un drone est recommandée notamment en raison de la plus grande flexibilité en ce qui concerne le choix de l'emplacement de la mesure et nécessite seulement deux points de repère lorsque la caméra est au nadir. Ensuite, le placement des points de repère

à une distance constante pour l'ensemble des mesures facilite notamment le partage des données et accélère l'acquisition en évitant de devoir mesurer la distance ou encore de prendre des points GNSS. Aussi, un drone RTK permet l'acquisition rapide d'une orthomosaïque du site d'acquisition. L'orthomosaïque permet notamment d'avoir une image du site au moment de l'acquisition et d'éviter le placement de point de repère. En ce qui concerne la caméra choisie, un filtre polarisant n'est pas recommandé puisque la surface de l'eau est assombrie et limite la visibilité des traceurs. Pour le niveau d'eau, une précision d'au moins 10 centimètres est nécessaire afin d'obtenir de bons résultats. Le positionnement de la section bathymétrique est important surtout dans le cas d'un écoulement où les vitesses varient beaucoup spatialement. Il est donc important de s'assurer que l'emplacement des sections bathymétriques se trouve dans les vidéos. Une bathymétrie de qualité, comme des sections transversales acquises au GNSS, est aussi recommandée puisqu'une grande variation entre la bathymétrie utilisée et la bathymétrie réelle peut affecter le résultat.

Suite aux analyses des résultats, plusieurs éléments concernant le choix de site ressortent. Tout d'abord, la présence de traceurs est le principal facteur permettant d'obtenir de bons résultats. En effet, une forte présence de traceur favorise l'obtention de bons résultats tout comme une illumination plus diffuse. La répartition des traceurs est peu importante s'ils sont en forte concentration. Les traceurs sous forme de mousse (ou bulles d'air) semblent être les plus adéquats pour le calcul du débit par la méthode LSPIV. La simple présence de vaguelette ne semble pas être de bons traceurs même en grande quantité. Il est possible d'observer que les traceurs sont en faible quantité lorsque le cours d'eau a une pente faible. Une analyse du lien entre la présence de traceurs et la pente serait intéressante pour déterminer le potentiel d'un site pour les mesures LSPIV. Ensuite, la présence de végétation et d'autres obstacles complique généralement le calcul du débit par la méthode LSPIV. L'acquisition n'est généralement pas problématique dans ces conditions. Toutefois, le positionnement de la section bathymétrique dans l'image est généralement plus complexe. Selon la position de celle-ci, une interpolation du débit le long de la section transversale est nécessaire, induisant une plus grande incertitude de la mesure. Cet élément est donc important à prendre en compte lors de la sélection d'un site. L'accès à une berge est aussi nécessaire afin de prendre un niveau d'eau et, si nécessaire, placer des points de repère au sol. La largeur de la rivière est aussi importante à prendre en compte. Une rivière très large nécessite de voler plus haut et les traceurs peuvent être plus difficilement observés. Finalement, la présence de vent peut modifier l'écoulement de surface. Il est donc

recommandé d'éviter les journées venteuses ou de prendre en considération son impact sur le calcul.

En ce qui concerne le traitement des données, la méthode LSPIV doit être testée et validée pour chaque site. Quelques mesures devraient être effectuées afin déterminer si la méthode fonctionne pour un site. En effet, comme le montre le cas de la rivière Saint-François à Weedon, la méthode ne fonctionne tout simplement pas sur certains sites et fonctionne très bien sur d'autres, telle que la rivière Eaton à Cookshire-Eaton. De plus, valider la méthode sur un site permet de tester différentes valeurs du paramètre α et d'observer si une valeur constante peut être utilisée. Idéalement, la valeur α devrait être déterminée chaque année. La taille de l'aire d'interrogation et de recherche a un impact sur le calcul du débit, mais une taille de 30 pixels semble convenir à la plupart des sites. Ce paramètre devrait tout de même être ajusté en fonction de l'écoulement si nécessaire.

Il est important de retenir que la méthode LSPIV permet de compléter les prises de mesures et ne remplace pas les méthodes de mesures traditionnelles.

Des nouvelles versions du logiciel Fudaa-LSPIV sont en cours de développement et plusieurs améliorations faciliteront le traitement des données. La version 1.10 permettra l'utilisation de point de repère situé au-dessus de la rivière, comme sur un pont notamment, si l'altitude du drone et des points de repères est connue ainsi que la définition de plusieurs zones d'écoulement. La version 1.11 permettra notamment un paramétrage automatique de l'aire de recherche à partir de vitesse défini manuellement. Cette version inclura aussi différents filtres, développé par Bodart (2023), permettant de mieux filtrer les vitesses de surfaces t augmentant ainsi la précision des résultats.

8. Activité de transfert de connaissance

Deux activités de transferts de connaissance ont été réalisées dans le cadre du projet. La première s'est déroulée en septembre 2022 en présence de deux hydrologues du MELCCFP. La rencontre a eu lieu à Sherbrooke et le site de la rivière Eaton a été sélectionné pour l'activité de transfert de connaissance. Le traitement dans le logiciel Fudaa-LSPIV a été réalisé avec les ingénieurs du MELCCFP. Le cahier du participant mis à jour se trouve en annexe. La deuxième activité a eu lieu en août 2023 où 6 participants du MELCCFP étaient présents. Cette activité était divisée en deux parties, soit une partie portant sur l'acquisition des données pour la méthode LSPIV et une partie portant sur le traitement des données dans Fudaa-LSPIV. La

partie terrain a eu lieu sur la rivière Bras-Du-Nord à Saint-Raymond alors que la partie portant sur le traitement des données a eu lieu aux bureaux du MELCCFP à Québec. La présentation donnée lors du traitement des données se trouve en annexe.

9. Conclusion

L'objectif du projet était d'analyser la performance (précision et incertitude) de la méthode LSPIV pour la mesure du débit dans des rivières au Québec. Les débits sont une information essentielle utilisée par la communauté scientifique et par différentes instances gouvernementales, entre autres, pour le calage des modèles hydrauliques et hydrologiques. Les débits sont également utilisés pour estimer les probabilités de dépassement annuel lors de la caractérisation des zones inondables et pour la prévision des inondations en temps réel. Les méthodes traditionnellement utilisées pour estimer le débit ont des limites, particulièrement pour les forts débits. La méthode LSPIV pourrait venir compléter la stratégie de mesures afin de répondre aux lacunes des méthodes déjà utilisées. Une revue de littérature a été réalisée afin de cibler les sources d'erreurs de la méthode LSPIV. La visibilité des traceurs est ressortie comme un facteur principal pour la réussite de l'analyse LSPIV. Il a également été noté que l'algorithme LSPIV est sensible aux choix de l'intervalle de temps entre les images, la taille de l'aire d'interrogation et la taille de l'aire de recherche. La revue de littérature a aussi fait ressortir la grande sensibilité des résultats au choix du coefficient de vitesse (paramètre α).

Dans le cadre du projet, des données ont été acquises sur huit sites répartis sur sept cours d'eau situés en Estrie. Les sites présentaient des caractéristiques différentes, un bon domaine de débits (1,2 m³/s à 420 m³/s) et de largeur de rivière (10 m à 105 m) a donc pu être inclus dans le projet. Lors des sorties terrain, les vidéos avec une caméra optique ont été acquises à l'aide de drones. Dans la majorité des cas, une mesure de débit de référence a également été acquise à l'aide d'un ADCP (sinon, les données à la station hydrométrique ont été utilisées). Au total, 51 mesures (prises entre novembre 2021 et juillet 2023) ont été traitées dans le logiciel Fudaa-LSPIV. 32 mesures ont permis d'obtenir un débit ayant un écart de moins de 10 % avec la mesure de référence, dont 24 mesures ayant un écart de moins de 5%. Ces bons résultats sont regroupés sur certaines rivières soient la rivière Eaton (10 sur 12), la rivière Aux Saumons (5 sur 7) et le ruisseau Kee (4 sur 4). Sur les 32 mesures où de bons résultats ont été obtenus, 24 d'entre elles avaient une présence élevée de traceurs, cinq d'entre elles avaient une présence modérée de traceurs et trois d'entre elles avaient peu ou pas de traceurs. Il a donc été déduit que la quantité de traceurs est un facteur déterminant à l'obtention de bons résultats. De plus,

si les traceurs sont en forte concentration, leur répartition semble peu importante. La mousse est un type de traceur qui semble adéquat, ce qui n'est pas le cas pour les vaguelettes. Même lorsqu'elles sont présentes en grande quantité, elles ne semblent pas suffisantes pour fournir de bons résultats.

L'impact de plusieurs éléments sur les résultats a été évalué. Des tests ont été réalisés sur les données bathymétriques et les niveaux d'eau. L'impact du choix de la section bathymétrique est difficile à évaluer puisque des instruments avec des précisions différentes ont été utilisés pour mesurer les sections. Selon la section utilisée, des écarts relatifs entre 0,5 % et 17% ont été observés. L'impact du positionnement de la section sur l'image semble varier en fonction du type d'écoulement. Pour un écoulement uniforme, l'impact est faible ($< 1,3\%$) tandis que pour un écoulement non uniforme, l'impact est élevé (10 à 77%). L'utilisation de données bathymétriques interpolées a été testée, mais sans succès. Leur précision ne semble pas assez élevée. En ce qui concerne le niveau d'eau, il a été conclu qu'une précision de plus ou moins 10 centimètres est suffisante pour obtenir de bons résultats.

Une analyse de la sensibilité de paramètre α a également été effectuée. Trois débits ont été calculés pour chaque mesure en utilisant des valeurs du paramètre α de 0,8, 0,85 et 0,9 (sauf pour le ruisseau Kee où des valeurs de 0,6, 0,65 et 0,70 ont été utilisées). Peu importe le débit ou la rivière, des écarts d'environ 12% ont été observés entre les débits calculés avec $\alpha = 0,8$ et $\alpha = 0,9$. Pour une même rivière, la valeur du paramètre α peut aussi varier dans le temps. Le paramètre α devrait donc être calibré chaque année pour chacune des rivières. Finalement, pour certaines vidéos, trois tailles d'aire de recherche et d'aire d'interrogation ont été testées (20, 30 et 40 pixels). La variation de ces paramètres a généré des différences importantes dans les débits calculés. Des analyses supplémentaires sont nécessaires pour relier les tailles d'aire de recherche et d'interrogation avec des caractéristiques de l'écoulement (en particulier la vitesse en pixel /seconde).

Au fur et à mesure du projet, des activités de transferts de connaissance ont été organisées avec les partenaires. Une première activité s'est déroulée en septembre 2022 avec deux hydrologues du MELCCFP. Une deuxième activité a eu lieu en août 2023 avec six participants du MELCCFP.

En ce qui concerne la suite des travaux, plusieurs éléments pourraient être explorés. Une analyse de l'impact du vent et la manière optimale de corriger ce dernier pourraient être faites.

Cela impliquerait toutefois probablement la conception d'un nouvel instrument puisqu'aucun instrument disponible ne permet de répondre au besoin d'un tel projet (mesurer la vitesse du vent à la surface de l'eau). Pour faciliter l'identification des sites propices au LSPIV, la relation entre l'hydraulique (ex. : pente) et la présence de traceurs pourrait aussi être explorée. Il serait aussi intéressant de réaliser plus d'acquisitions en période d'inondation, car peu de ces évènements se sont produits pendant cette étude. En tenant compte de leur grande influence sur les résultats, l'évolution du paramètre α dans le temps et la définition de la taille de l'aire d'interrogation et de recherche devrait davantage être étudiée. Finalement, une étude sur l'impact de l'inclusion des données LSPIV dans les courbes de tarage devrait être réalisée.

Références

- Adrian, R. J., 1991. Particle-Imaging Techniques for Experimental Fluid Mechanics. Annual Review of Fluid Mechanics, 23(1), 261-304. <https://doi.org/10.1146/annurev.fl.23.010191.001401>
- Akbarpour, F., Fathi-Moghadam, M., & Schneider, J., 2020. Application of LSPIV to measure supercritical flow in steep channels with low relative submergence. Flow Measurement and Instrumentation, 72. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2020.101718>
- Aya, S., Fujita, I., & Yagyu, M., 1995. Field-Observation of Flood in a River by Video Image Analysis. Proceedings of hydraulic engineering, 39, 447-452. <https://doi.org/10.2208/prohe.39.447>
- Bodart, G. 2023. Évaluation et amélioration des méthodes de détermination des vitesses en surface d'écoulement par analyse de séquence d'images. Hydrologie. Université Grenoble Alpes. <https://theses.hal.science/tel-04160787>
- Chang, W.-Y., Lin, F., Tsai, W.-F., Lai, J.-S., Loh, C.-H., & Kang, S.-C., 2016. Portable Particle Image Velocimetry Measurement Using a Laser-Based Technique. Journal of Hydraulic Engineering, 142(9). [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HY.1943-7900.0001158](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HY.1943-7900.0001158)
- Chen, C., Liang, D., Wang, X., & Li, Z., 2021. Application of UAV-based PIV to Rivers, 2021. 7th International Conference on Hydraulic and Civil Engineering & Smart Water Conservancy and Intelligent Disaster Reduction Forum (ICHCE & SWIDR), 1707-1712. <https://doi.org/10.1109/ICHCESWIDR54323.2021.9656476>
- Dal Sasso, S. F., Pizarro, A., & Manfreda, S., 2020. Metrics for the Quantification of Seeding Characteristics to Enhance Image Velocimetry Performance in Rivers. Remote Sensing, 12(11), 1789. <https://doi.org/10.3390/rs12111789>
- Deng, S., Mei, J. Y., Zhou, B., Zuo, J., & Zhang, T. (2019). Research on hydrological emergency monitoring scheme and technology of Barrier Lake. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 344(1), 012102. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/344/1/012102>

- Detert, M., 2021. How to Avoid and Correct Biased Riverine Surface Image Velocimetry. *Water Resources Research*, 57(2). <https://doi.org/10.1029/2020WR027833>
- Dramais, G., Le Coz, J., Camenen, B., & Hauet, A., 2014. Advantages of a mobile LSPIV method for measuring flood discharges and improving stage–discharge curves. *Journal of Hydro-Environment Research*, 5(4), 301-312. <https://doi.org/10.1016/j.jher.2010.12.005>
- Engel, F., Jamieson, E., Marcelo Garcia, C., 2023. Hand-Held LSPIV Guidelines – On site Checklist. 2023 Technical Workshop, New Zealand Hydrological Society.
- Fujita, I., Aya, S., & Deguchi, T., 1997. Surface velocity measurement of river flow using video images of an oblique angle. *Proceedings of Congress of International Association for Hydraulic Research*, 27th (B Vol.1), 227-232.
- Fujita, I., Notoya, Y., & Furuta, T., 2018. Measurement of inundating flow from a broken embankment by using video images shoot from a media helicopter. *E3S Web of Conferences*, 40 (4), 06001. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20184006001>
- Hauet, A., 2016. Monitoring river flood using fixed image-based stations : Experience feedback from 3 rivers in France. *River Flow 2016*, 541-547. <https://doi.org/10.1201/9781315644479-87>
- Hauet, A., Jodeau, M., Le Coz, J., Bodart, G., Faure, J-B., Marchand, B., 2022. Fudaa-LSPIV Version 1.9.2, User Manual.
- Hauet, A., Jodeau, M., Le Coz, J., Marchand, B., Die Moran, A., Le Boursicaud, R., & Dramais, G., 2014. Application de la méthode LSPIV pour la mesure de champs de vitesse et de débits de crue sur modèle réduit et en rivière. *La Houille Blanche*, 100(3), 16-22. <https://doi.org/10.1051/lhb/2014024>
- Hauet, A., Kruger, A., Krajewski, W. F., Bradley, A., Muste, M., Creutin, J.-D., & Wilson, M., 2008. Experimental System for Real-Time Discharge Estimation Using an Image-Based Method. *Journal of Hydrologic Engineering*, 13(2), 105-110. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2008\)13:2\(105\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2008)13:2(105))
- Huang, W.-C., Young, C.-C., & Liu, W.-C., 2018. Application of an Automated Discharge Imaging System and LSPIV during Typhoon Events in Taiwan. *Water*, 10(3), 280. <https://doi.org/10.3390/w10030280>
- Ioli, F., Pinto, L., Passoni, D., Nova, V., & Detert, M., 2020. Evaluation of airborne image velocimetry approaches using low-cost uavs in riverine environments. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLIII-B2-2020, 597-604. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLIII-B2-2020-597-2020>
- Johnson, E. D., & Cowen, E. A., 2016. Remote monitoring of volumetric discharge employing bathymetry determined from surface turbulence metrics, *Water Resour. Res.*, 52, 2178–2193, <https://doi.org/10.1002/2015WR017736>
- Johnson, E. D., & Cowen, E. A., 2017. Remote determination of the velocity index and mean streamwise velocity profiles. *Water Resources Research*, 53(9), 7521-7535. <https://doi.org/10.1002/2017WR020504>

- Jolley, M. J., Russell, A. J., Quinn, P. F., & Perks, M. T. (2021). Considerations When Applying Large-Scale PIV and PTV for Determining River Flow Velocity. *Frontiers in Water*, 3. <https://doi.org/10.3389/frwa.2021.709269>
- Kim, Y., 2006. Uncertainty analysis for non-intrusive measurement of river discharge using image velocimetry [Ph.D., The University of Iowa]. <https://www.proquest.com/docview/305340848/abstract/F3D3FBC7C6B64B25PQ/1>
- Kim, Y., Muste, M., Hauet, A., Krajewski, W. F., Kruger, A., & Bradley, A., 2008. Stream discharge using mobile large-scale particle image velocimetry : A proof of concept. *Water Resources Research*, 44(9). <https://doi.org/10.1029/2006WR005441>
- Kinzel, P., & Legleiter, C., 2019. sUAS-Based Remote Sensing of River Discharge Using Thermal Particle Image Velocimetry and Bathymetric Lidar. *Remote Sensing*, 11(19), 2317. <https://doi.org/10.3390/rs11192317>
- Koutalakis, P., Tzoraki, O., & Zaimes, G., 2019. UAVs for Hydrologic Scopes : Application of a Low-Cost UAV to Estimate Surface Water Velocity by Using Three Different Image-Based Methods. *Drones*, 3(1), 14. <https://doi.org/10.3390/drones3010014>
- Le Coz, J., Hauet, A., Pierrefeu, G., Dramais, G., & Camenen, B., 2010. Performance of image-based velocimetry (LSPIV) applied to flash-flood discharge measurements in Mediterranean rivers. *Journal of Hydrology*, 394(1-2), 42-52. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2010.05.049>
- Le Coz, J., Jodeau, M., Hauet, A., Marchand, B., & Boursicaud, R., 2014. Image-based velocity and discharge measurements in field and laboratory river engineering studies using the free Fudaa-lspiv software. *Proceedings of the International Conference on Fluvial Hydraulics, River flow 2014, 1961-1967*. <https://doi.org/10.1201/b17133-262>
- Legleiter, C. J., & Kinzel, P. J., 2020. Inferring Surface Flow Velocities in Sediment-Laden Alaskan Rivers from Optical Image Sequences Acquired from a Helicopter. *Remote Sensing*, 12(8), 1282. <https://doi.org/10.3390/rs12081282>
- Legleiter, C. J., Kinzel, P. J., & Nelson, J. M., 2017. Remote measurement of river discharge using thermal particle image velocimetry (PIV) and various sources of bathymetric information. *Journal of Hydrology*, 554, 490-506. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.09.004>
- Lewis, Q. W., Lindroth, E. M., & Rhoads, B. L., 2018. Integrating unmanned aerial systems and LSPIV for rapid, cost-effective stream gauging. *Journal of Hydrology*, 560, 230-246. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.03.008>
- Lewis, Q. W., & Rhoads, B. L., 2015. Resolving two-dimensional flow structure in rivers using large-scale particle image velocimetry : An example from a stream confluence. *Water Resources Research*, 51(10), 7977-7994. <https://doi.org/10.1002/2015WR017783>
- Lewis, Q. W., & Rhoads, B. L., 2018. LSPIV Measurements of Two-Dimensional Flow Structure in Streams Using Small Unmanned Aerial Systems : 1. Accuracy Assessment Based on Comparison With Stationary Camera Platforms and In-Stream Velocity Measurements. *Water Resources Research*, 54(10), 8000-8018. <https://doi.org/10.1029/2018WR022550>

- Li, L., & Yan, H., 2022. A robust filtering algorithm based on the estimation of tracer visibility and stability for large scale particle image velocimetry. *Flow Measurement and Instrumentation*, 87, 102204. <https://doi.org/10.1016/j.flowmeasinst.2022.102204>
- Mays, L. W. (2011). *Water resources engineering*, 2nd ed. John Wiley.
- Meselhe, E. A., Peeva, T., & Muste, M., 2004. Large Scale Particle Image Velocimetry for Low Velocity and Shallow Water Flows. *Journal of Hydraulic Engineering*, 130(9), 937-940. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(2004\)130:9\(937\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(2004)130:9(937))
- Muste, M., Fujita, I., & Hauet, A. (2008). Large-scale particle image velocimetry for measurements in riverine environments. *Water Resources Research*, 44(4). <https://doi.org/10.1029/2008WR006950>
- Muste, M., Hauet, A., Fujita, I., Legout, C., & Ho, H.-C., 2014. Capabilities of Large-scale Particle Image Velocimetry to characterize shallow free-surface flows. *Advances in Water Resources*, 70, 160-171. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2014.04.004>
- Muste, M., Ho, H.-C., & Kim, D., 2011. Considerations on direct stream flow measurements using video imagery : Outlook and research needs. *Journal of Hydro-Environment Research*, 5(4), 289-300. <https://doi.org/10.1016/j.jher.2010.11.002>
- Naldzhiyan, A., & Tsarev, P. (2021). Remote measurement of the river flow surface velocity at high water with large scale particle image velocimetry method. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference*, 21(2.1) 599-606. <https://doi.org/10.5593/sgem2021/2.1/s10.72>
- Patalano, A., García, C. M., & Rodríguez, A., 2017. Rectification of Image Velocity Results (RIVeR) : A simple and user-friendly toolbox for large scale water surface Particle Image Velocimetry (PIV) and Particle Tracking Velocimetry (PTV). *Computers & Geosciences*, 109, 323-330. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2017.07.009>
- Pearce, S., Ljubičić, R., Peña-Haro, S., Perks, M., Tauro, F., Pizarro, A., Dal Sasso, S., Strelnikova, D., Grimaldi, S., Maddock, I., Paulus, G., Plavšić, J., Prodanović, D., & Manfreda, S., 2020. An Evaluation of Image Velocimetry Techniques under Low Flow Conditions and High Seeding Densities Using Unmanned Aerial Systems. *Remote Sensing*, 12(2), 232. <https://doi.org/10.3390/rs12020232>
- Raffel, M., Willert, C. E., Scarano, F., Kähler, C. J., Wereley, S. T., & Kompenhans, J., 2007. *Particle Image Velocimetry : A Practical Guide*, 2nd ed. Springer International Publishing. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-68852-7>
- Sun, X., Shiono, K., Chandler, J. H., Rameshwaran, P., Sellin, R. H. J., & Fujita, I., 2010. Discharge estimation in small irregular river using LSPIV. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Water Management*, 163(5), 247-254. <https://doi.org/10.1680/wama.2010.163.5.247>
- Tauro, F., Porfiri, M., & Grimaldi, S., 2016. Surface flow measurements from drones. *Journal of Hydrology*, 540, 240-245. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.06.012>

<https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.06.012>Tauro, F., & Grimaldi, S., 2017. Ice dices for monitoring stream surface velocity. *Journal of Hydro-Environment Research*, 14, 143-149. <https://doi.org/10.1016/j.jher.2016.09.001>

Tauro, F., Piscopia, R., & Grimaldi, S., 2017. Streamflow Observations From Cameras : Large-Scale Particle Image Velocimetry or Particle Tracking Velocimetry? *Water Resources Research*, 53(12), 10374-10394. <https://doi.org/10.1002/2017WR020848>

Vigoureux, S., Liebard, L.-L., Chonoski, A., Robert, E., Torchet, L., Poveda, V., Leclerc, F., Billant, J., Dumasdelage, R., Rousseau, G., Delestre, O., & Brigode, P., 2022. Comparison of Streamflow Estimated by Image Analysis (LSPIV) and by Hydrologic and Hydraulic Modelling on the French Riviera During November 2019 Flood. *In* P. Gourbesville & G. Caignaert (Éd.), *Advances in Hydroinformatics* (p. 255-273). Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-19-1600-7_16

Wen-Cheng, L., Chien-Hsing, L., & Wei-Che, H., 2021. Large-Scale Particle Image Velocimetry to Measure Streamflow from Videos Recorded from Unmanned Aerial Vehicle and Fixed Imaging System. *Remote Sensing*, 13(14), 2661. <https://doi.org/10.3390/rs13142661>

Wen-Cheng, L., Wei-Che, H., & Chih-Chieh, Y., 2023. Uncertainty Analysis for Image-Based Streamflow Measurement : The Influence of Ground Control Points. *Water*, 15(1), 123. <https://doi.org/10.3390/w15010123>

Zhu, X., & Lipeme Kouyi, G., 2019. An Analysis of LSPIV-Based Surface Velocity Measurement Techniques for Stormwater Detention Basin Management. *Water Resources Research*, 55(2), 888-903. <https://doi.org/10.1029/2018WR023813>

Annexes

Voir fichiers joints