

Mesure du champ de vitesses superficielles en rivière à partir d'un drone

Mémoire présenté par
Tristan BIA , Harold SOMERS

en vue de l'obtention du grade de Master
Ingénieur civil des constructions et ingénieur civil en mathématiques appliquées

Promotrice
Sandra SOARES FRAZAO, Professeur et Docteur en Sciences Appliquées

Assistant
Olivier CARLIER D'ODEIGNE

Lecteurs
Sébastien GAILLEZ, Professeur Julien HENDRICKX

Année académique 2017-2018

Table des matières

1	Introduction	9
2	La Particle Image Velocimetry	11
2.1	PIV : la méthode	11
2.1.1	Ensemencement et prise d'image	12
2.1.2	Filtres	12
2.1.3	Analyse : Corrélation croisée	16
2.1.4	Améliorations de la corrélation croisée	18
2.1.5	Validation et interpolation des vecteurs	21
2.1.6	Calibration	23
2.1.7	Moyenne des champs de vecteurs	24
2.2	État de l'art	25
2.3	Logiciel : PIVLab	25
2.3.1	Généralités	25
2.3.2	Capacités	25
2.3.3	Utilisation	26
2.3.4	Adaptations apportées	26
3	Vers la LSPIV	29
3.1	Etat de l'art	29
3.1.1	Méthodologie	29
3.1.2	Justification	29
3.1.3	Challenges amenés par la LSPIV	30
3.1.4	Analyses existantes	32
3.2	Adaptation de PIVLab	32
3.2.1	Moyenne dans le temps des corrélations	33
3.2.2	Post-processing sur Signal-to-Noise Ratio	36
3.2.3	SNR weighted correlation mean	40
3.2.4	Choix couplage de frame	40
4	Vers la LSPIV mobile	42
4.1	Challenge : Stabilisation	44
4.2	Adaptation de PIVLab	47
4.2.1	Notre méthode : tracking the Ground Reference Points	47
4.2.2	Quantification d'erreur de la méthode de stabilisation	48
5	Vers la LSPIV autonome	51
5.0.1	Généralités et méthodologie	51
5.0.2	Analyses existantes	52
5.0.3	Calibration selon la hauteur et l'ouverture	52
6	Vers l'estimation du débit	54
6.1	Bathymétrie et hauteur d'eau	54
6.2	De la vitesse superficielle à la vitesse moyenne	54

7	Analyse de résultats	57
7.1	Méthodologie	57
7.2	Résultats : vitesses en surface	59
7.2.1	Analyse de graphes	59
7.2.2	Mesure de l'erreur	61
7.2.3	Sur-estimation de la vitesse	62
7.2.4	Coefficient de correction	62
7.2.5	Ensemencement	66
7.2.6	Paramétrisation	67
7.2.7	Application à Rosière : vitesses de surface et débit	69
8	Pistes d'améliorations	71
9	Conclusion	73
A	PIVlab (1.43) : utilisation	75
A.1	Importation d'images	75
A.2	Paramètres d'analyse	76
A.2.1	Délimitation de la zone d'étude : <i>Region Of Interest</i> (ROI)	76
A.2.2	Image pre-processing & PIV settings	77
A.3	Calibration	78
A.4	Vector Validation	79
A.5	Résultats	80
B	Mode d'emploi	82
C	Paramétrisation	85
D	On site checklist	88

Remerciements

Un travail de fin d'étude clôture cinq années d'apprentissage, de formation et d'ouverture au monde du travail. Par sa durée, nous avons pu suivre son évolution et ses rebondissements, fruits d'un échange équilibré entre nos observations et celles des personnes nous ayant encadré tout au long de cette aventure enrichissante.

Nous tenons à adresser nos plus sincères remerciements à notre promotrice, le Professeur Sandra Soares-Frazão, pour sa disponibilité, son écoute et la manière dont elle a su guider le plus adroitement possible la progression de ce travail. En plus de nous avoir introduit dans le monde de l'hydraulique, elle a su nous faire vivre et partager sa passion pour les rivières et le monde complexe qui en découle. Nos entretiens ensemble, toutes les deux semaines, ont chaque fois menés à des conclusions ou à des pistes d'amélioration intéressantes.

Nous remercions Olivier Carlier pour l'attention et le temps et le regard bienveillant qu'il a porté à l'évolution de ce travail, depuis son ébauche jusqu'à sa concrétisation. Nos premières mesures de terrains n'auraient pas été possible sans son aide et sa présence.

Ce mémoire a pris ses racines dans le logiciel PIVlab, créé par William Thielicke. En plus d'avoir écrit ce programme accessible gratuitement, il reste disponible et actif sur son forum pour répondre aux questions ou suggestions d'amélioration des internautes. Il consacre du temps à publier de nouvelles versions de PIVlab, chaque fois plus élaborées et performantes.

Nicolas Feltz est resté disponible et attentif à nos demandes et questions tout au long du travail. Il a également su se libérer une journée pour venir sur terrain avec nous, afin de nous montrer le fonctionnement des méthodes de jaugeage traditionnelles et nous l'en remercions vivement. Nicolas et Sébastien Gailliez travaillent au Service Public de Wallonie et concentrent leurs travaux sur les cours d'eau non-navigables. Sébastien Gailliez a notamment accepté de faire partie de notre jury de présentation finale. Nous le remercions de bien vouloir porter son regard d'expert sur notre travail, ses remarques sur le sujet ne pourrons qu'être enrichissantes.

Merci à Sébastien François, technicien agronome et responsable des emprunts de matériel, que l'on a du déranger à plusieurs reprises pour pouvoir utiliser le courantomètre de l'université.

Toutes les analyses de notre travail ont été effectuées à l'aide d'un drone. Cela n'aurait pas été possible sans le prêt du DJI Mavic Pro® de Alexandre Hurbain, à qui nous adressons un grand merci pour la confiance qu'il nous a donné. Merci également au Professeur Pierre Latteur pour nous avoir gentiment prêté des batteries supplémentaires pour le drone lorsque nous en avions besoin.

Merci au Professeur Julien Hendrickx, pour l'entretien qu'il nous a accordé et pour tous ces conseils judicieux lors de celui-ci.

Merci au Professeur Patricio Andrés Catalán, enseignant à la Universidad Técnica Federico Santa María au Chili, qui nous a conseillé au tout début de ce travail, concernant les études et documents existants sur le sujet, et la direction à adopter pour le commencement de notre travail.

Nous tenons également à remercier Samuel Laurent qui nous a épaulé lors de nos essais au canal artificiel du laboratoire génie civil de Louvain-la-Neuve.

Pour leur magnifique travail de relecture, d'assassinat de nos fautes d'orthographe et enfin pour leurs commentaires constructifs, nous remercions encore Vladimir Somers et Nathan Bertouille.

Enfin à nos chers parents, merci est un bien trop petit mot pour vous dire à quel point vos encouragements et votre soutien même durant nos heures et humeurs de blocus furent importants pour nous aider à traverser les épreuves que l'on a croisées pendant cette inoubliable aventure universitaire.

On ne pourrait pas terminer sans se remercier l'un l'autre le sourire aux lèvres pour ce travail qui, du choix du sujet à l'écriture du point final de ce rapport, s'est déroulé dans des conditions d'amitié et de complémentarité exceptionnelles. Se lancer dans un travail de fin d'étude avec un ami était un défi que nous étions prêts à relever, et parmi tous les moments que nous avons traversés, ce ne sont que les bons que l'on gardera en tête ces prochaines années. Tope là l'ami !

A vous tous, merci !

Tristan & Harold

Acronymes

- **ADCP** Acoustic Doppler Current Profiler
- **AHE** Adaptive Histogram Equalization
- **AI** Aire d'Interrogation
- **AR** Aire de Recherche
- **CLAHE** Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization (filtre)
- **DCC** Direct Cross Correlation
- **DFT** Discrete Fourier Transform
- **FFT** Fast Fourier Transform
- **HE** Histogram Equalization (filtre)
- **ICM** Image Correction Method
- **LSPIV** Large Scale Particle Image Velocimetry
- **PIV** Particle Image Velocimetry
- **PTV** Particle Tracking Velocimetry
- **ROI** Region Of Interest
- **SNR** Signal-to-Noise Ratio
- **SPW** Service Public de Wallonie
- **VCM** Vector Correction Method

Definitions

- **Bathymétrie** : science de la mesure des fonds marins (océans, lacs, fleuves, ...) afin d'en déterminer la topographie.
- **Courantomètre OTT MFPPro** : Appareil de jaugeage à induction magnétique pour la mesure de vitesses par points.
- **Courbe de tarage** : relation, propre à chaque site de mesure, entre la hauteur d'eau et le débit. Une fois calculée, elle permet d'estimer le débit en ne mesurant que la hauteur d'eau.
- **Débit** : Volume d'eau liquide traversant une section transversale de l'écoulement, par unité de temps.
- **Direct Cross-Correlation** : Mesure de similarité entre deux matrices A et B, se basant sur une fonction de corrélation $R(A, B)$
- **Echelle limnimétrique** : échelle graduée qui permet de lire les niveaux d'eau des fleuves, des étangs, rivières, plans et réserves d'eau. . .
- **Ensemencement** : insertion de particules/traceurs visibles dans l'écoulement afin de discrétiser le déplacement du fluide, qui présente une surface homogène.
- **Frame** : Groupement de deux images pour lequel on analyse le déplacement avec la méthode PIV.
- **Hydrologie** : science de la terre qui s'intéresse à la branche terrestre du cycle de l'eau, c'est-à-dire aux échanges entre l'atmosphère, la surface terrestre et son sous-sol.
- **Hydrométrie** : branche de l'hydrologie qui concerne la mesure du débit des eaux continentales, superficielles ou souterraines.
- **Image Jumping** : Nombre d'images séparant les frames qui seront analysées. Si nous choisissons un *image jumping* de 5 par exemple (avec un *image spacing* de 1), nous aurons un couplage tel que la première frame se composera des images 1 et 2, la seconde des images 5 et 6, etc.
- **Image Spacing** : Nombre d'images qui séparent les deux images d'une frame. Ceci permet d'augmenter le temps séparant deux images et par la même occasion la distance parcourue par un traceur pendant ce laps de temps. Si nous choisissons un *image spacing* de 4 par exemple, nous aurons un couplage tel que la première frame se composera des images 1 et 5, la seconde des images 2 et 6, etc.
- **Image pre-processing** : application de filtres sur les images afin d'accentuer le contraste entre les particules et le fluide, et ainsi d'augmenter leur visibilité.
- **LSPIV mobile** : La LSPIV mobile est ce que nous décrirons dans ce travail comme étant de la LSPIV par utilisation d'une caméra embarquée sur un drone.
- **Mesure non intrusive** : mesure pour laquelle l'appareil de mesure n'est pas directement en contact avec l'eau.
- **Section** d'une rivière : coupe transversale d'une rivière, pour laquelle on peut analyser les vitesses de surface et/ou le débit.

Mise en contexte

Chaque année, des milliers de personnes sont gravement touchées par des inondations et des glissements de terrain. Au mois d'août 2017, des bilans meurtriers s'élevaient encore à plus de 750 morts en Inde, au Népal et au Bangladesh suite aux fortes moussons qui s'étaient abattues ce mois-là [1]. En France, d'après le ministère de la transition écologique et solidaire, 17 millions de personnes sont exposées au risque d'inondation par des cours d'eau et 1,4 million de personnes au risque de submersion marine [2]. Bien qu'en Belgique, les inondations ne font que rarement des victimes, elles provoquent cependant des dégâts importants sur les habitations, les ouvrages d'art et sont également source de pollution. Pouvoir prédire et gérer efficacement les débits des cours d'eau est non seulement nécessaire pour pouvoir maîtriser ou atténuer les conséquences de crues, mais également pour optimiser le transport par voie fluviale, l'agriculture, les ouvrages d'art, la production d'énergie et l'alimentation en eau.

Le débit d'une rivière est défini comme étant le volume d'eau traversant une section transversale de l'écoulement, par unité de temps. Il fait donc appel à la géométrie de la section et la distribution des vitesses (non-uniformes) sur cette même section. Une inondation fait quant à elle référence au débordement temporaire d'un cours d'eau, naturel ou artificiel, sur les terrains voisins.

Si l'on ajoute les effets directs et indirects du réchauffement climatique à l'éternelle dépendance en eau des civilisations humaines, on comprend pourquoi la thématique de l'eau et de sa gestion constitue un défi très complexe. Aujourd'hui encore, l'homme reste vulnérable aux problèmes associés à des précipitations trop faibles ou trop importantes. Pour pallier à ces difficultés, les données hydrométriques (essentiellement les données sur le débit des cours d'eau, les précipitations et les eaux souterraines) sont primordiales pour comprendre les processus hydrologiques et constitue la base même pour l'élaboration de stratégies d'améliorations de gestions des rivières. Ceci constitue l'hydrométrie, science distincte et complémentaire de l'hydrologie (science de l'eau dans son environnement naturel) et de l'hydraulique (physique des écoulements) [3].

La fluctuation des débits fluviaux est le résultat complexe et combiné de multiples facteurs géographiques et climatologiques qui interagissent dans un bassin versant. Cette intégration implique que l'étude des vitesses, de la bathymétrie et de surcroît des débits constitue l'outil le plus approprié pour l'évaluation et la gestion de ressources hydriques et la conception de structures hydroélectriques, réservoirs, ponts, digues, etc [4].

Cependant, pour l'élaboration de tels édifices, des mesures sur des périodes de temps relativement étendues et continues sont nécessaires. Or, il est aujourd'hui compliqué de mesurer en permanence les débits des cours d'eau tant ces valeurs sont le fruit d'un processus mêlant plusieurs observations de terrain. En effet, les méthodes les plus couramment utilisées à l'heure actuelle sont souvent intrusives (L'appareil doit être plongé partiellement ou totalement dans le cours d'eau étudié) et offrent des résultats ponctuels, nécessitent souvent un pont ou un organe flottant lorsque la profondeur ne permet pas d'y pénétrer à pied, requièrent une main-d'oeuvre professionnelle et enfin sont relativement coûteuses. Ces derniers facteurs freinent les relevés de mesures en cas de crues.

Nous savons que l'utilité des mesures des débits est de permettre l'élaboration ou le développement des courbes de tarage d'un site. Ces dernières exposent la relation entre la hauteur d'eau lue à l'échelle et les débits mesurés. Les courbes de tarages sont néanmoins susceptibles à des variations dans le temps, et leurs extrapolations pour des débits dans des gammes vierges de jaugeages peuvent souffrir d'incertitudes relativement importantes. Pouvoir réaliser des mesures à faibles coûts, le plus souvent possible et dans des conditions plus exceptionnelles est donc nécessaire afin d'actualiser les courbes de tarages et de préciser les parties extrapolées de ces dernières. A titre d'information, les prix du matériel de jaugeage utilisé par le Service Public de Wallonie sont de 3500€ pour une station limnimétrique capable de mesurer la hauteur d'eau (durée de vie de 15 à 20 ans), 60 000€ pour un profileur acoustique mobile ADCP permettant le jaugeage des débits dans les rivières mais sensibles aux particules en suspension et aux algues (10 ans), 10 000€ pour un courantomètre pour mesurer ponctuellement des vitesses (10 ans) ou encore 150 000€ pour une camionnette équipée d'un saumon (10 ans). Pour bénéficier d'une comparaison, le drone DJI Mavic Pro® utilisé dans le cadre de ce mémoire s'achète en magasin pour moins de 1000€.

Ceci explique pourquoi une méthode non intrusive pour déterminer la vitesse superficielle d'un cours d'eau attire depuis quelques années l'attention de nombreux scientifiques : la LSPIV pour "*Large Scale Particle Image Velocimetry*". Cette méthode hydrométrique par analyse d'image consiste à filmer et suivre le déplacement de particules flottantes et d'en déterminer leurs vitesses correspondantes. Cette méthode sera détaillée dans les sections suivantes. Le but de ce travail de fin d'études est de mesurer les vitesses superficielles d'un cours d'eau à l'aide d'un drone et de la méthode LSPIV et de comparer ces résultats avec ceux obtenus par des méthodes traditionnelles.

Finalement, tout comme de nombreuses informations sur l'environnement, les données de débits revêtent d'une importance capitale pour de nombreuses études scientifiques. Sachant que le réchauffement planétaire apportera des effets inégaux sur les conditions climatiques, et donc sur les régimes d'écoulement de nos rivières, tant sur un plan spatial que temporel, la capacité éventuelle de pouvoir mesurer rapidement et à faibles coûts les conditions de débits des rivières se positionne comme élément clef pour l'interprétation, l'identification et la quantification des tendances hydrologiques. Finalement, cela participera au développement de mécanismes d'adaptation et de réactions plus efficaces à de prochains épisodes climatiques particuliers.



1

Introduction

De la nécessité éprouvée par les hydrologues de moderniser les systèmes de mesures avec la technologie grandissante et de trouver un système capable d'identifier des débits en temps réel sur des sections stratégiques de cours d'eau en période de crue, les techniques de mesure non intrusive (pour lesquelles l'appareil de mesure n'est pas directement en contact avec l'eau) ont fait l'objet de nombreuses recherches au cours des dernières années. Parmi ces techniques non intrusives, nous pouvons citer le Lidar, le radar Doppler, ou encore la PTV. Dans ce rapport, nous étudierons la *Particle Image Velocimetry* (PIV), qui utilise des images d'un l'écoulement pour étudier sa vitesse.

Son principe se base sur le *tracking* de particules visibles entre deux images successives dont on connaît le pas de temps, avec une analyse statistique. Ce principe n'est rien d'autre que l'amélioration digitale et informatisée d'une idée simple : lancer un bâton dans l'eau et observer son déplacement pour en déduire la vitesse de la rivière.

La PIV se distingue par son efficacité, sa rapidité de mise en oeuvre et son coût d'exploitation attrayant. De plus, elle permet de trouver un champ de vitesse bidimensionnel et quasi continu, contrairement aux méthodes classiques traditionnelles dont la prise de mesure est ponctuelle, et qui ne permettent d'obtenir que l'intensité de la vitesse. C'est pour ces raisons qu'elle a fait l'objet de nombreuses études approfondies depuis la fin du siècle dernier. Il y a quelques années déjà, la PIV démontrait son efficacité en laboratoire, avec des résultats encourageants. Elle a ensuite été exportée en rivière, montée sur un bras télescopique ou fixée sur la berge ou sur un pont pour pouvoir élargir son champ d'opération à des milieux naturels [5]. Avec l'arrivée rapide des drones sur le marché du grand public, il est désormais possible de mesurer avec précision des vitesses de surface, et ainsi de bénéficier d'équipements aux prix réduits par rapport à ceux actuels.

Dans la suite de ce rapport, nous allons essayer d'expliquer la possibilité actuelle d'obtenir des résultats fiables avec des équipements accessibles sur le marché public.

Concernant la structure globale de ce dernier, nous détaillerons premièrement une utilisation de la PIV dans les conditions optimales d'un laboratoire, puis chaque chapitre rebondira de manière logique vers la LSPIV mobile et autonome, mais en ajoutant également les challenges et contraintes auxquels ces méthodes font face. D'un point de vue plus pratique, la suite de ce rapport s'organisera de la sorte :

- **Chapitre 2, la Particle Image Velocimetry** : Nous développerons d'abord la **PIV**, utilisée en laboratoire, et dans des conditions optimales. Nous expliquerons la méthode en détail, ensuite nous nous attarderons sur le logiciel *PIVLab*, que nous avons utilisé durant cette étude, et enfin nous citerons des quelques fonctionnalités que nous lui avons apportées pour faciliter son utilisation.

- **Chapitre 3, vers la LSPIV** : Nous y développerons la *Large Scale Particle Image Velocimetry*, qui n'est autre que la PIV appliquée à grande échelle (en rivière), en développant toutes les contraintes et challenges que cette application comporte. Nous terminerons ensuite en détaillant les différentes fonctionnalités que nous avons ajoutées à *PIVLab* et qui peuvent permettre d'améliorer les performances de ce dernier quand il est appliqué à des écoulements plus larges.
- **Chapitre 4, vers la LSPIV mobile** : Nous développerons l'utilisation de la **LSPIV** avec un drone. Nous verrons que le principal challenge apporté par ce dispositif est la stabilité lors de la prise d'image, ce qui nous permettra de détailler les moyens existants pour limiter ce problème. Nous expliquerons ensuite les fonctionnalités ajoutées à *PIVLab* pour permettre et faciliter son utilisation avec un drone.
- **Chapitre 5, vers la LSPIV autonome** : Nous étudierons la possibilité d'automatiser toutes les étapes constituant le processus global de la LSPIV. Cette étude se fera avec la volonté de s'affranchir au maximum des contraintes matérielles lors de la prise d'image, mais également de la sélection manuelle d'une quantité non négligeable de paramètres, de filtres, de calibrations, etc.
- **Chapitre 6, vers l'estimation du débit** : Le plus gros désavantage de la *Particle Image Velocimetry*, c'est qu'elle ne permet d'étudier que les vitesses de surfaces, et non le débit. Pourtant l'étude de ces vitesses n'a pas d'application directe concernant l'hydrologie. Il est donc important de préciser que ce rapport s'inscrit dans le cadre d'une étude plus globale, ayant pour objectif d'estimer le débit exact à partir des vitesses de surface. Nous aborderons les principaux tenants et aboutissants de celle-ci dans ce chapitre.
- **Chapitre 7, analyse de résultats** : Nous expliquerons d'abord la méthodologie que nous avons appliquée pour évaluer la méthode LSPIV, ensuite nous détaillerons les résultats obtenus, et analyserons leur pertinence ainsi que les observations qualitatives que l'on peut en tirer.
- **Chapitre 8, Pistes d'améliorations** : Avant de clôturer ce rapport, nous suggérerons les pistes d'améliorations qu'il serait utile de suivre si quelqu'un venait à s'intéresser plus en profondeur à ce sujet.

2

La Particle Image Velocimetry

Dans ce chapitre, nous expliquerons la méthode PIV en détail. Il est important de préciser que la méthode PIV est une méthode développée et utilisée en laboratoire, dans des conditions optimales et que nous n'aborderons pas son application à des rivières dans ce chapitre. Nous nous attarderons ensuite sur le logiciel *PIVLab*, que nous avons utilisé durant cette étude, et enfin nous terminerons en décrivant quelques fonctionnalités que nous lui avons apportées afin de faciliter son utilisation.

2.1 PIV : la méthode

Le but de la PIV est de calculer des champs de vitesse 2D d'un écoulement, à partir d'une vidéo de celui-ci. Comme décrit précédemment, le principe de base est de détecter et quantifier le déplacement de traceurs entre deux images successives. le groupement de ces deux images sera dénommé **frame** dans la suite de ce travail.

La méthode se décompose en 6 étapes distinctes :

1. **Ensemencement** de l'écoulement et **prise d'images**
2. **Application de filtres**, pour maximiser la visibilité des traceurs sur l'image, en augmentant le contraste entre ceux-ci et la surface de l'eau.
3. **Analyse PIV**, calculant un champ de vecteurs de vitesse à partir de la **corrélation croisée**
4. **Post-treatment** : validation des vecteurs de vitesses, pour supprimer les vecteur aberrants et ensuite les remplacer.
5. **Calibration**, permettant la conversion de la vitesse en *pixels/frame* vers une vitesse en *m/s*
6. **Moyenne** des champs de vecteurs dans le temps, pour obtenir un champ de vecteurs stable et précis.

A la fin de ces 6 étapes, on obtient un champ de vecteurs de vitesses de surface permettant l'analyse du fluide. La Figure 2.1 montre un exemple de résultat d'une analyse PIV, sur une simulation numérique d'un écoulement.

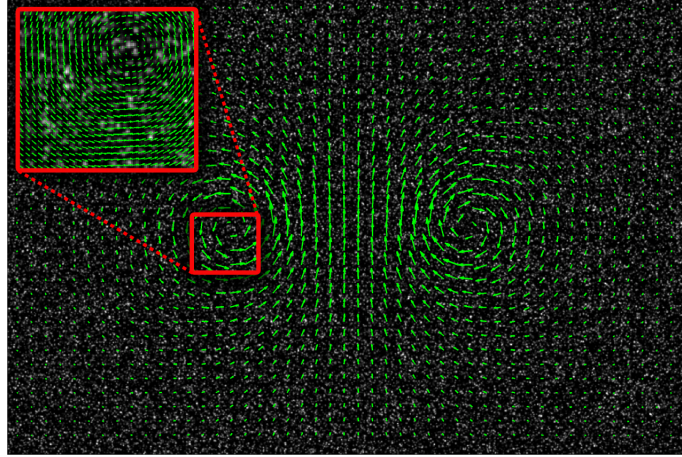


FIGURE 2.1 – Exemple de résultat d’une analyse PIV sur une simulation numérique d’un vortex. Les vecteurs vert représentent les vitesses trouvées en chaque point.

2.1.1 Ensemencement et prise d’image

Quand nous parlons d’ensemencement, il s’agit de l’insertion de particules/traceurs visibles dans l’écoulement afin de discrétiser le déplacement du fluide qui présente une surface homogène. Les particules doivent être assez grandes pour être capturées par la caméra, leur couleur/luminosité doit se démarquer de l’écoulement, leur densité doit être assez proche de celle du liquide pour que leur vitesse soit représentative de celle de l’écoulement, et enfin leur répartition doit être homogène dans l’écoulement.

La méthode PIV est utilisée en laboratoire et suppose donc des conditions optimales, notamment concernant l’ensemencement des traceurs, qui doivent être uniformément répartis et couvrir toute la zone étudiée. Dans sa thèse, W. Thielicke [6] résume les conditions optimales d’ensemencement :

- La *taille optimale* des particules est de ± 2 pixels. Des particules plus petites tendent à ne pas être repérées par l’algorithme, alors que les plus larges introduisent des imprécisions dans le résultat.
- La densité de traceurs doit être comprise entre 5 et 20 par aire d’interrogation (v.)

Les applications de la PIV sont multiples et variées, aussi la nature et la taille réelle des traceurs peuvent énormément varier. Elles seront des particules microscopiques pour l’étude de fluides dans des cellules, ou encore des billes de frigosil dans le cas d’un écoulement artificiel en laboratoire.

2.1.2 Filtres

Un fois que nous disposons d’une série d’images de l’écoulement, il s’agit d’appliquer des filtres sur les images afin d’accentuer le contraste entre les particules et le fluide, et ainsi d’augmenter leur visibilité. Les images sont d’abord converties en niveaux de gris, chacune est alors définie par une matrice, dans laquelle chaque élément représente un pixel, de 0 (pour le noir) à 255 (pour le blanc).

Afin de mettre en évidence les traceurs et favoriser leur détection, différents filtres peuvent être appliqués. Il n’y a pas de convention concernant le choix des filtres à utiliser ni concernant les paramètres qu’il faut leur attribuer. C’est pourquoi comprendre leur fonctionnement, les mécanismes mathématiques utilisés ainsi que leur utilité concrète permet de faire une sélection optimale selon la situation étudiée. Nous détaillerons ici le fonctionnement des 4 filtres implémentés par le logiciel que nous avons utilisé pour ce travail. Une image montrant un exemple d’utilisation

de chaque filtre est disponible à la Figure 2.6. Le tableau 2.1 présente un récapitulatif de ces derniers.

(a) Intensity Capping

Les reflets lumineux dans l'eau sont une source d'erreur très courante de la PIV. Le déplacement de ces reflets peut être confondu avec celui des traceurs, faussant ainsi les résultats. La luminosité de ces zones étant maximale, elles ont un poids très grand lors de l'analyse statistique des images.

Pour réduire leur impact, le filtre *intensity capping* établit une limite supérieure sur les niveaux de gris de l'image. Cette limite est définie par la médiane d'intensité de l'image, additionnée à 2 fois la déviation standard, comme représentée sur la Figure 2.2. Concrètement, les pixels blancs sont des pixels trop lumineux, le filtre va donc définir une limite et lorsque le pixel dépasse cette limite, il est remplacé par celle-ci. Cette procédure n'altère qu'une petite partie des pixels et permet donc de limiter des potentielles modifications nuisibles. Il a été prouvé [7] que ce filtre réduit significativement le nombre de vecteurs aberrants, de plus il n'y a pas de paramètre supplémentaire à introduire, ce qui rend ce filtre très facile à utiliser.

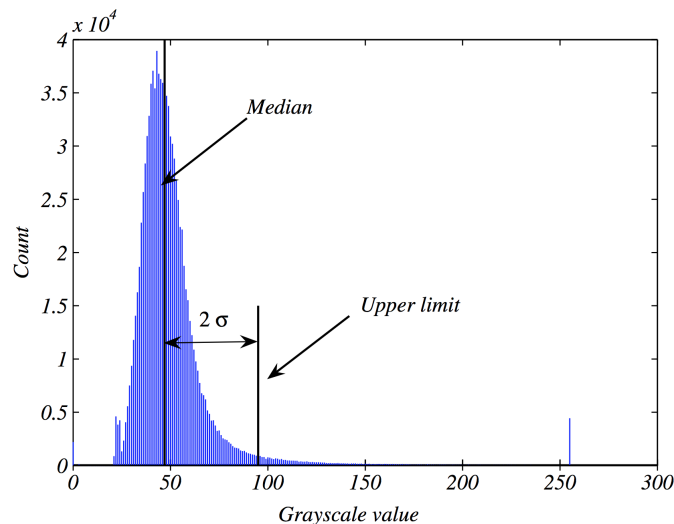


FIGURE 2.2 – Histogramme montrant la limite supérieure définie par l'*intensity capping* [7]. Dans le graphe, tous les pixels ayant une intensité supérieure à la limite seront remplacés par celle-ci.

(b) Filtre CLAHE

Le filtre CLAHE, "**Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization**" est un filtre permettant d'augmenter le contraste de l'image, afin de mettre en évidence les contours dans une image. Ce filtre permet donc d'augmenter la visibilité des traceurs en améliorant la définition de leurs contours. Pour expliquer son fonctionnement, il convient de procéder par étapes, en commençant par expliquer l'**Histogram equalization (HE)** [8], puis l'**Adaptive histogram equalization (AHE)** [9].

- l'**HE** crée un histogramme de distribution des pixels en comptant leur nombre pour chaque intensité. Il tend ensuite à aplatir cet histogramme en étalant les intensités sur l'ensemble des valeurs possibles, comme illustré sur la Figure 2.3. Cette figure montre également que la méthode tend à linéariser la distribution cumulative. On peut également s'apercevoir que le filtre est très efficace lorsque le contraste global de l'image est faible. En effet, sur la

Figure 2.3, les intensités sont réparties entre 125 et 200, ce qui permet de doubler l'étendue de l'histogramme.

Cette méthode perd cependant de son efficacité lorsque l'image contient des zones à faible et haute exposition, et que le champ des intensités est donc déjà large. Elle n'aurait aucun effet si l'histogramme de l'image avait déjà des valeurs comprises entre 0 et 255.

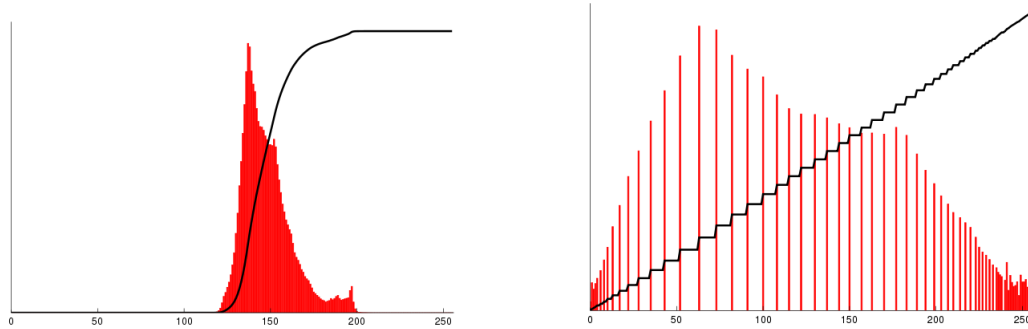


FIGURE 2.3 – Histogramme (rouge) et distribution cumulative (noir) d'une image (a) avant (b) après *HE*. L'axe des abscisses représente les valeurs de pixel, de 0 à 255. L'axe des Y représente le nombre de pixels correspondants à chaque valeur, au sein de l'image. Issu de [9]

- l'**AHE** règle ce problème en créant un histogramme pour chaque pixel, en fonction de ses voisins. L'égalisation est donc locale, ce qui permet d'augmenter le contraste localement. Cette méthode a donc besoin d'un paramètre : la taille du voisinage pour la création des histogrammes.

L'inconvénient avec l'**AHE**, c'est qu'elle a tendance à sur-amplifier le contraste dans les régions presque constantes, puisque l'histogramme y est très étroit. Il va donc mettre en évidence le bruit d'image présent dans ces zones "constantes".

C'est pour pallier à cet inconvénient que l'on utilise la *Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization* (**CLAHE**). Elle limite la hauteur des histogrammes résultants à une certaine hauteur, en redistribuant uniformément certains pixels dans l'histogramme (voir figure 2.4). Cette limite est prédéfinie et s'appelle la *clip limit*.

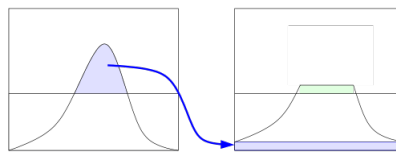


FIGURE 2.4 – Redistribution des valeurs dépassant la *clip limit*.

(c) Intensity high-pass

Le filtre *Intensity high-pass* se base sur le constat que les traceurs ont tendance à avoir une luminosité supérieure à l'eau qui les entoure. Il permet alors d'uniformiser la surface de l'eau en l'assombrissant, tout en augmentant le contraste avec les traceurs. Pour ce faire, il se décompose en 3 étapes :

1. On calcule une *convolution gaussienne* de l'image : pour chaque pixel de l'image, on calcule une moyenne locale en suivant une loi gaussienne. Le résultat de cette convolution est présenté sur la figure 2.5 (b).

2. On soustrait cette nouvelle image à l'originale : (a) - (b) sur la figure 2.5. L'eau étant la composante majoritaire de l'image, les pixels la représentant seront grandement obscurcis.
3. Cette soustraction réduit cependant également l'intensité des traceurs et diminue donc le contraste global de l'image. C'est pourquoi on multiplie tous les pixels par $\frac{255}{\max(\text{pixels})}$, afin d'augmenter le contraste et utiliser toute l'échelle de gris. Le résultat final est présenté sur la figure 2.5 (c).



FIGURE 2.5 – (a) Originale - (b) Convolution Gaussienne - (c) Intensity high-pass

(d) Wiener2 denoise filter

Le *Wiener2 denoise filter* permet de réduire le bruit dans l'image en appliquant un filtre Wiener local pour chaque pixel. Il fonctionne en 3 étapes :

1. Pour chaque pixel $p_{i,j}$, il calcule la moyenne $\mu_{i,j}$ et la variance $\sigma_{i,j}^2$ locale
2. Il estime ensuite la variance ν^2 du bruit en la considérant comme la moyenne de toutes les variances
3. Il crée un filtre par pixel en utilisant ces estimations : $b_{i,j} = \mu_{i,j} + \frac{\sigma_{i,j}^2 - \nu^2}{\sigma_{i,j}^2} (p_{i,j} - \mu_{i,j})$

Le filtre *Wiener2* est très intéressant puisqu'il tend à diminuer le bruit, grande source d'erreur. Il est toutefois à utiliser avec beaucoup de précautions, car il pourrait considérer des traceurs comme étant du bruit, ce qui réduirait la quantité d'information disponible pour l'analyse.

(e) Récapitulatif des filtres

Vous trouverez un récapitulatif des filtres disponibles sur la Table 2.1, ainsi qu'une application de chacun d'eux sur la figure 2.6. Sur cette figure, la photo (f) montre une bonne combinaison de ces filtres dans cette situation précise : un *Intensity high-pass*, suivi d'un *CLAHE*, puis d'un *Intensity capping*. On peut apercevoir que la surface de l'eau est uniforme et très sombre. Il y a également un contraste net avec les traceurs et ces derniers ont une luminosité uniforme.

Filtre	Effet	Paramètres
Intensity capping	Limiter les reflets lumineux	/
Filtre CLAHE	Augmenter le contraste	Taille de la fenêtre Clip limit
Intensity high-pass	Uniformiser et obscurcir l'eau	Taille de la fenêtre
Wiener2 denoise filter	Réduire le bruit dans l'image	Taille de la fenêtre

TABLE 2.1 – Tableau récapitulatif des filtres

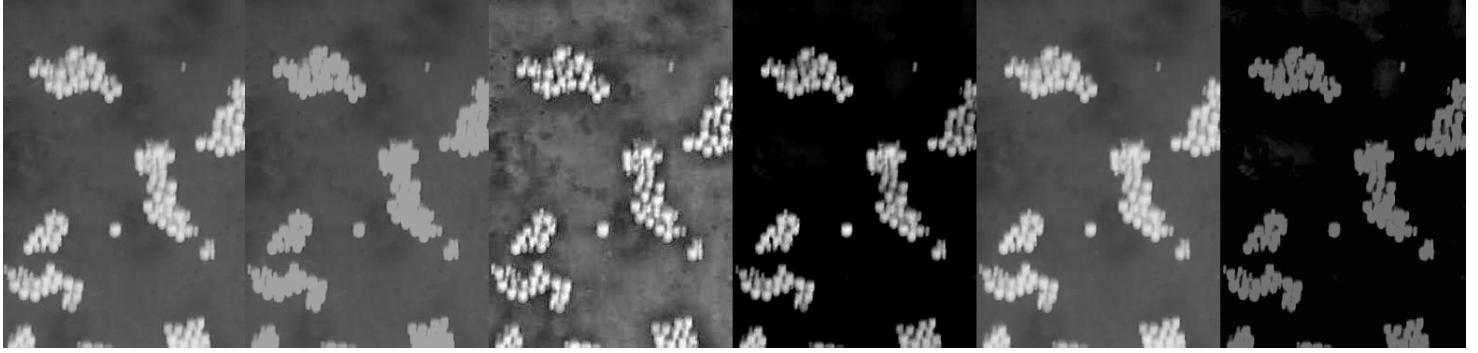


FIGURE 2.6 – Exemple d’application de différents filtres à une même image : (a) Image originale - (b) Intensity capping - (c) Filtre CLAHE - (d) Intensity high-pass - (e) Wiener2 denoise filter - (f) Optimal combination

2.1.3 Analyse : Corrélation croisée

Les images sont groupées deux à deux pour être analysées, et on appellera ce groupement une **frame**. Concrètement, on recherche ensuite le déplacement des traceurs entre les deux images, et cela permet de définir un champ de vecteurs de vitesses en **pixels/frame**.

Dans cette section, nous expliquerons l’essence de l’analyse, accompagnée de justifications intuitives. Plus de détails mathématiques peuvent être trouvés dans d’autres travaux [10]. Pour décrire précisément l’analyse, nous allons d’abord décrire les différents paramètres à choisir et qui composent cette étape, ensuite nous détaillerons les différents processus pour corrélérer des images. Nous terminerons en décrivant une méthode permettant d’obtenir des résultats de déplacement plus précis que de l’ordre du pixel.

(a) Paramètres

1. Sur l’image 1 de la figure 2.7, nous pouvons observer une **grille d’interrogation** en traits pointillés verts, définie par un **pas**, i.e. le nombre de pixels entre les différents noeuds de la grille. La méthode va calculer un vecteur de vitesse pour chaque noeud de cette grille.
2. L’**aire d’interrogation (AI)** de côté M , en trait plein, définit la surface, autour du noeud, pour laquelle nous allons essayer de trouver la meilleure correspondance sur l’image 2. Elle ne doit pas être trop grande, pour ne pas perdre des informations sur l’écoulement (puisque l’on suppose une vitesse identique pour tous les points contenus dans l’aire). Elle ne doit pas non plus être trop petite, afin de s’assurer de la présence de traceurs dans celle-ci.
3. L’**aire de recherche (AR)** de côté N , en traits pointillés, définit la surface qui limitera la zone de recherche de correspondance sur l’image 2. Elle permet donc de ne pas devoir chercher dans toute l’image, diminuant ainsi considérablement le temps de calcul. Elle dépend donc des caractéristiques de l’écoulement, ainsi que de l’espacement entre deux images, puisqu’elle suppose qu’il n’y aura pas de déplacement supérieur à la zone qu’elle limite (le déplacement dans une direction ne sera jamais supérieur à $N - M$).

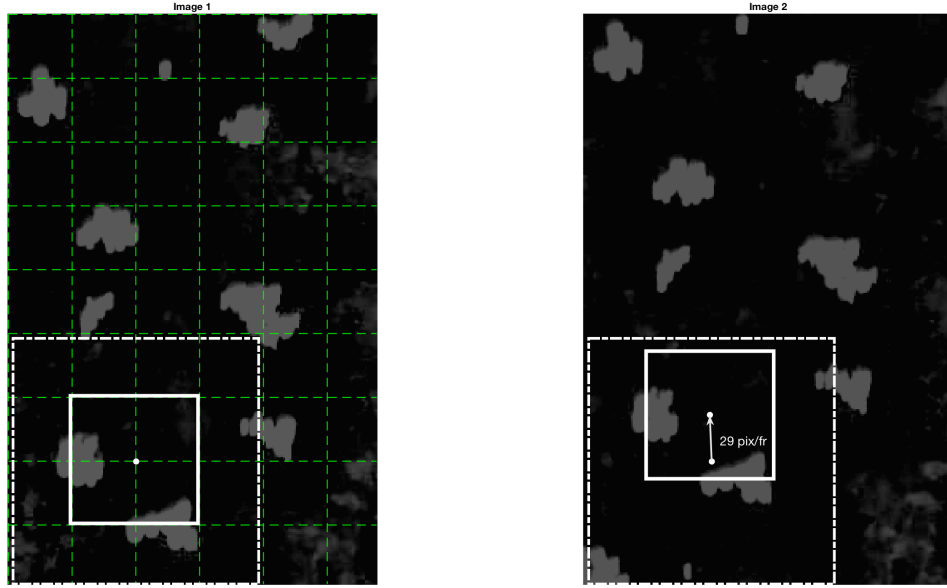


FIGURE 2.7 – Exemple de calcul d'un vecteur de vitesse avec la **DCC**. La **grille d'interrogation** est en vert, l'**aire d'interrogation** en trait plein, l'**aire de recherche** en trait pointillé. Le résultat de l'analyse est un vecteur de 29 pixels de longueur, qui correspond donc à la vitesse en pixels/frame en ce point

(b) Corrélation croisée

Nous allons maintenant expliquer la méthode de corrélation, en nous basant sur l'exemple de la figure 2.7, en nous concentrant sur la recherche du vecteur de vitesse en un noeud (au point blanc). On définit d'abord une matrice de pixels A , sur l'image 1, centrée autour du noeud, de même taille que l'**AI**. On définit ensuite une série de matrices $B_{k,l}$, sur l'image 2, de même taille que A , constituée de toutes les matrices comprises dans l'**AR**.

Pour chacune de ces matrices, on calcule un coefficient de corrélation avec A , ce qui nous permet de remplir une matrice de corrélation R :

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

où $\bar{A}$ et $\bar{B}$ sont les moyennes des matrices A et B . Cette matrice de corrélation est carrée et de côté $N - M + 1$.

La Figure 2.8 montre un exemple de calcul de cette matrice.

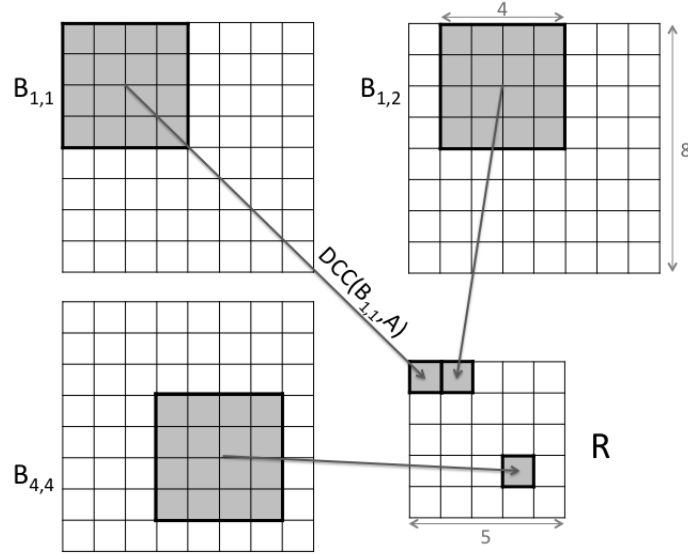


FIGURE 2.8 – Calcul de la matrice de corrélation croisée $\mathbf{R}$, de dimension 5×5 . L'aire d'interrogation et la matrice $\mathbf{A}$, sont de taille 4×4 et l'aire de recherche est de taille 8×8 . $DCC()$ est la fonction de corrélation croisée 2.1. Adapté de [6].

Cette formule de corrélation croisée, appelée *Direct Cross-Correlation (DCC)*, permet d'établir la "ressemblance" entre deux matrices, donc entre A de l'image 1 et une partie B de l'image 2. La figure 2.7 montre la matrice résultante de l'analyse du noeud de la Figure 2.7. La vitesse en ce noeud, en *pixels/frame*, est alors la distance entre le centre de la matrice, et le pic de corrélation, à savoir le maximum de la matrice.

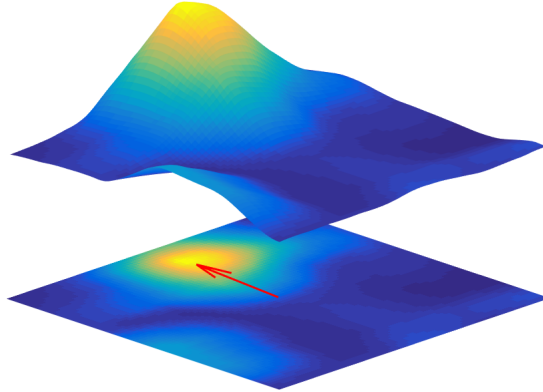


FIGURE 2.9 – Représentation graphique de la **matrice de corrélation** de la Figure 2.7. Sur l'image du haut, la hauteur et la couleur sont proportionnelles à la corrélation. L'image du bas est une projection, sur un plan, de celle du haut. Le vecteur en rouge correspond à la vitesse résultante de l'analyse, partant du centre de la matrice, vers le pic de corrélation.

2.1.4 Améliorations de la corrélation croisée

De nombreuses processus de corrélation ont été proposées pour améliorer la méthode PIV, telle que des *Recursive Local-Correlation* [11], l'utilisation de la *Minimum Quadratic Difference*

au lieu de la corrélation croisée [12], etc.

Nous nous contenterons de décrire ici les méthodes déjà implémentées dans le logiciel PIVLab que nous avons utilisé.

(a) Discrete Fourier Transform (DFT) [10]

Le problème majeur de la corrélation croisée directe (**DCC**) discutée précédemment, est son coût de calcul relativement élevé. La vitesse de calcul peut cependant être augmentée en calculant la matrice de corrélation dans le domaine fréquentiel, en utilisant la Discrete Fourier Transform (**DFT**). Les détails du calcul de la transformée de Fourier et de son utilité ne seront pas détaillés dans ce travail, cependant il est possible d’avoir une meilleure idée de ce qu’est la transformée de Fourier en regardant cette vidéo [13]. Les éléments importants de cette méthode sont les suivants :

1. Pour la **DFT**, il n’y a plus d’aire de recherche, car la comparaison de deux images ne génère pas un unique coefficient de corrélation comme dans la **DCC**, mais directement une matrice de probabilité de déplacement, comme montré à la Figure 2.10. Nous avons donc, en quelque sorte, une aire de recherche qui est égale à l’aire d’interrogation, puisqu’il n’y aura qu’une matrice **B**.
2. Concrètement, la procédure, schématisée sur la Figure 2.10, est la suivante : Les images sont transformées dans le domaine fréquentiel et complexe grâce à la Fast Fourier Transform (**FFT**) qui n’est qu’une méthode de calcul rapide de la transformée de Fourier. Ensuite, on applique une multiplication conjuguée des deux transformées. Ce résultat est alors reconverti dans le domaine réel, en utilisant une transformée de Fourier Inverse. Le résultat est une matrice de corrélation permettant d’évaluer le déplacement.
3. Étant donné que le l’AR est égale à l’AI, le déplacement ne peut en tout cas pas être supérieur à la taille de son côté, auquel cas les images n’ont plus aucune corrélation. En pratique, il est impératif que le déplacement soit inférieur à la moitié du côté, et conseillé qu’il soit inférieur au quart du côté [6]. En effet, la diminution de la taille de la fenêtre augmente le bruit dans la corrélation, jusqu’à observer une inversion de la matrice de corrélation [6], comme observée sur la Figure 2.11.

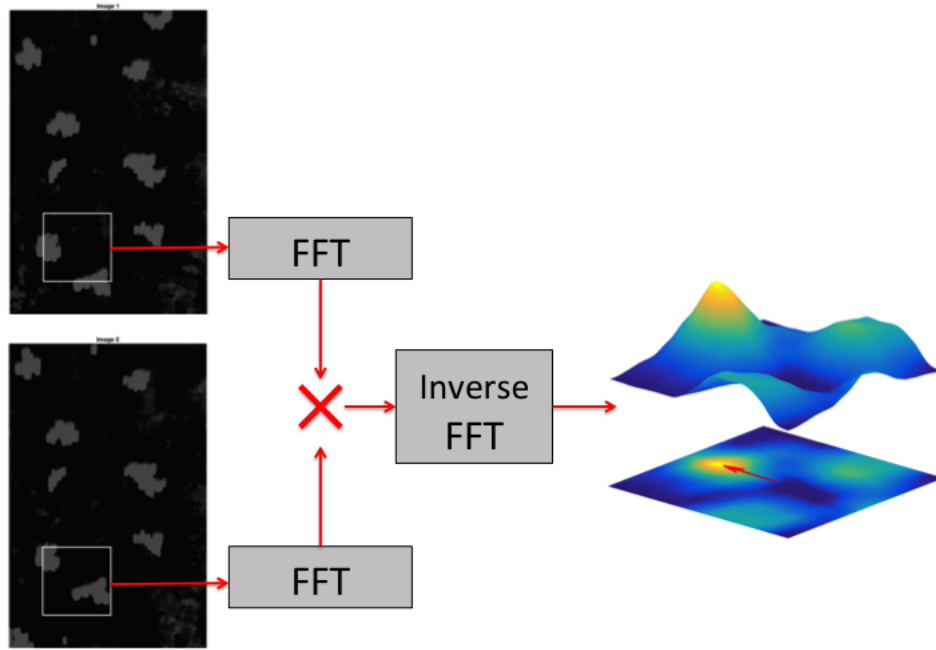


FIGURE 2.10 – Schéma de la méthode DFT, adapté de [14]

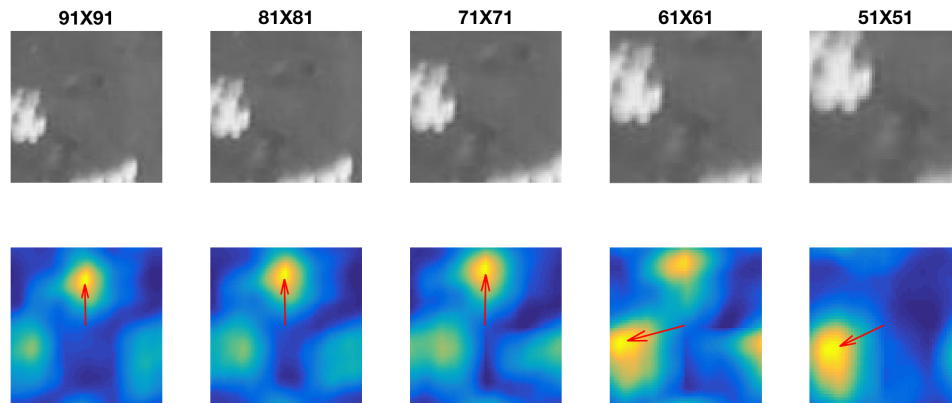


FIGURE 2.11 – Effet de la diminution de l'AI sur la matrice de corrélation. On observe une vitesse erronée à partir d'une taille de 61 pixels, soit lorsque le déplacement est égal à la moitié du côté de l'AI

(b) Repair routines [6] [14] [15]

Le problème majeur de la FFT est donc qu'augmenter la taille de l'AI au quadruple du déplacement réduit considérablement la résolution spatiale. Pour remédier à cela, il a été proposé de réaliser plusieurs *steps* d'analyse, en diminuant progressivement la taille de l'AI (de moitié [6]), tout en décalant l'AI de l'image 2 avec la vitesse trouvée à la *step* précédente. En additionnant les vitesses trouvées à chaque analyse, on obtient une vitesse avec une résolution spatiale de l'ordre de la dernière AI, tout en gardant la garantie d'un déplacement inférieur au quart de l'AI. Ainsi, les images comparées sont toujours de même dimension, mais leur taille diminue et le centre de l'image 2 est décalé.

(c) Estimation sub pixel [5]

En prenant le pic de corrélation comme mesure de déplacement, on obtient une vitesse avec une précision de l'ordre du pixel. Dans certaines applications, cette précision est acceptable. Lorsque le facteur $\frac{\text{pixel}}{\text{mètre}}$ est trop petit, cette précision n'est plus suffisante et il est donc nécessaire d'estimer un pic de corrélation à l'intérieur du pixel, comme illustré à la figure 2.12. Il s'agit d'évaluer une fonction parabolique avec l'entourage du pic de corrélation, puis de calculer son maximum, qui sera le nouveau pic de corrélation. Cette méthode permet d'atteindre une précision de l'ordre de 0.2 pixel [16].

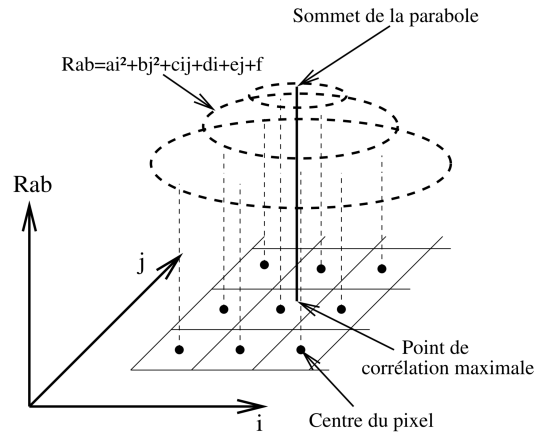


FIGURE 2.12 – Schéma explicatif de l'estimation sub pixel : une fonction parabolique est estimée à partir du voisinage du pic de corrélation. Le sommet de cette parabole définit le nouveau point de corrélation maximum, avec une précision supérieure à celle du pixel.

2.1.5 Validation et interpolation des vecteurs

Une fois que l'entière de la frame est analysée, on obtient un résultat comme celui de la figure 2.13(a). Ici, l'écoulement étant constant sur toute la section, on observe des vecteurs aberrants aux endroits où il n'y a pas assez d'ensemencement, que ce soient des vecteurs nuls ou des vecteurs avec une direction incohérente. Pour améliorer les résultats, il a été proposé [6] [5] d'appliquer des filtres afin de les repérer, de les supprimer puis de remplacer ces vecteurs manquants par des interpolations.

Il existe de nombreuses méthodes pour la **validation de vecteurs**, dont voici les 3 principales :

1. La première consiste à encadrer manuellement les limites de vitesse (pour les 2 directions) à partir du nuage de points des vitesses. Il s'agit là de choisir intuitivement un rectangle ne contenant que la partie de nuage où la concentration des points est la plus forte, et ne contenant donc pas les vecteurs incohérents.
2. Le second filtre supprime les vecteurs dont les composantes (u et v) sont trop éloignées de leurs moyennes. Il calcule d'abord, sur base de tous les vecteurs de la frame, la moyenne μ et l'écart-type σ de chaque composante. n étant un paramètre à choisir, les vecteurs qui sont plus grands ou plus petits que $\mu \pm n \cdot \sigma$ sont alors supprimés. Il se base donc sur l'hypothèse que l'écoulement est homogène en amplitude. Ce filtre est donc peu utile lorsque nous analysons un écoulement irrégulier, avec des vitesses nulles en certains endroits par exemple.
3. Le troisième filtre est un filtre qui supprime un vecteur si son amplitude est trop éloignée de la médiane des amplitudes de ses voisins. Il se base donc sur l'hypothèse qu'il y a une certaine continuité dans les champs de vecteurs. Le problème de cette méthode est que la

détection ne fonctionne pas lorsqu'il y a un amas de vecteurs aberrants , puisque localement ils peuvent se ressembler, même s'ils sont incohérents.

Tous les filtres peuvent être combinés afin d'améliorer encore les performances de détection.

Une fois ces vecteurs supprimés, il est intéressant de les **interpoler** pour conserver la continuité du champ, permettant ainsi d'analyser les dérivées numériques [6]. Plusieurs méthodes ont été étudiées et comparées pour déterminer la plus optimale [6] :

1. La moyenne des 8 voisins directs.
2. Une interpolation linéaire 2D
3. Une interpolation d'Hermite
4. Une interpolation spline 2D
5. un **boundary value solver**, qui a pour idée de résoudre un système d'équations différentielles partielles sur tout le champ de vecteurs.

Il a été prouvé [6], que la méthode des splines 2D donne les meilleurs résultats lorsque le pourcentage de vecteurs manquants est inférieur à 5%, mais que le **boundary value solver** est un interpolateur plus universel, étant donné que ses performances sont meilleures quand ce pourcentage de vecteurs manquants est supérieur à 10%. C'est d'ailleurs ce dernier qui est implémenté dans PIVLab.

Sur la figure ci-dessous, sont représentées successivement les images des résultats bruts, ceux après validation des vecteurs et ceux interpolés.

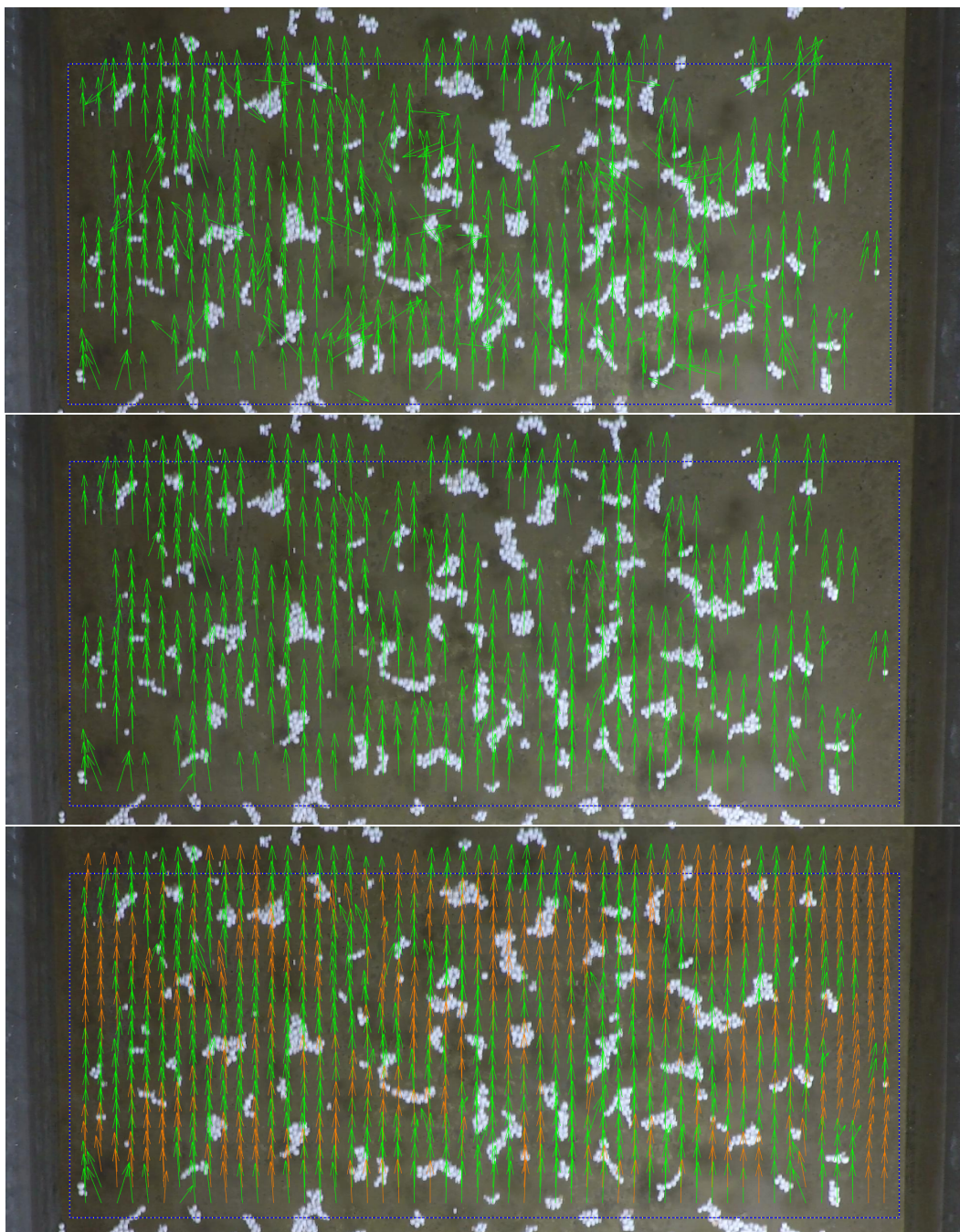


FIGURE 2.13 – Exemple de validation et d’interpolation. (a) résultats bruts avant la validation de vecteurs. - (b) résultats après validation de vecteur par la première méthode. - (c) résultats après validation de vecteur et interpolation des vecteurs manquants.

2.1.6 Calibration

Une analyse PIV calcule une vitesse sur base de l’observation d’un déplacement et de l’intervalle de temps qui sépare deux images consécutives. L’intervalle de temps dépend uniquement des paramètres de vidéo de la caméra utilisée et est souvent fixé à $41,667 \text{ millisecondes (ms)}$. Cette valeur découle d’un *Frame Rate* de la caméra de $24 \text{ fps (frame per second)}$, mais il faudra veiller à changer l’intervalle si ce dernier varie. L’observation du déplacement est, quant à elle, exprimée en nombre de pixels parcourus entre deux images successives. Pour permettre le passage de cette valeur en pixels vers une valeur métrique, il est nécessaire d’effectuer une conversion à partir

d'une distance métrique connue. Un objet ou un repère dont la taille est mesurée au préalable doit donc obligatoirement figurer sur le plan de l'image, pour étalonner la conversion des pixels vers des mesures métriques. Ces deux calibrations permettent de convertir les vitesses exprimées à la base en *pixel/frame* vers des vitesses en *mètre/seconde*.



FIGURE 2.14 – Exemple de calibration sur image de labo. Ici, la largeur du canal est connue et sert pour la calibration

2.1.7 Moyenne des champs de vecteurs

Afin d'obtenir le champ de vitesses le plus précis, la dernière étape de la méthode PIV consiste à faire une moyenne des vecteurs dans le temps. Si nous avons analysé N frames, il s'agit donc de créer un nouveau champ de vecteurs, pour lequel chaque vecteur est une moyenne de N vecteurs :

$$v_{moy}(i, j) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N v_k(i, j) \quad (2.2)$$

i, j indiquant la position du vecteur sur la **Grille d'interrogation**.

Cette étape est très importante lorsque l'ensemencement des traceurs n'est pas homogène. En effet, si toutes les zones ne sont pas correctementensemencées, chaque *frame* contiendra des vecteurs aberrants qui ne seront pas forcément détectés lors de la validation. La moyenne de toute ces *frames* permet donc d'apporter de la stabilité dans le champ de vecteurs final.

2.2 État de l'art

La méthode PIV n'est pas nouvelle, on la retrouve déjà (à notre connaissance) dans un article de Ronald J. Adrian en 1991 [17] où il décrit la PIV comme étant une technique bidimensionnelle fournissant des résultats précis et des mesures de haute qualité pour des analyses en laboratoire. Il prévoit déjà que l'évolution rapide des capacités informatiques permettra l'étude rapide de milliers d'informations. De plus, il affirme que les techniques bidimensionnelles de corrélation et de FFT (*Fast Fourier Transform*) sont déjà au point et qu'il ne faut pas s'attendre à des améliorations majeures les concernant. En 1991, Ronald J. Adrian prévoyait alors une utilisation plus répandue de la méthode PIV grâce à l'arrivée de matériel informatique et photographique beaucoup plus performant. En 2004, on peut lire dans l'article '*Validation and Extension of Image Velocimetry Capabilities for Flow Diagnostics in Hydraulic Modeling*' [18] que, moyennant une sélection judicieuse des paramètres, l'erreur de la vitesse superficielle moyenne reste inférieur à 1,5 %.

2.3 Logiciel : PIVLab

2.3.1 Généralités

PIVlab est un programme qui peut dériver des informations de vitesses à partir de données d'images, en utilisant la technique appelée "*Particle Image Velocimetry*". Ce logiciel a été créé en 2010 par Willian Thielicke, biologiste allemand et docteur en biomimétique et en dynamique des fluides. Il a initialement conçu ce logiciel dans le but d'analyser l'aérodynamique du battement d'aile des oiseaux. Ce programme, pourtant basique à sa création, s'est ensuite développé ces dernières années grâce aux améliorations apportées par la communauté et William Thielicke lui-même. Il a alors très vite été utilisé pour des objectifs beaucoup plus variés tels que l'étude des flux dans des cellules animales, ou la déformation du sable et des graviers [6]. Un forum a également été créé pour permettre à tous les utilisateurs du programme de bénéficier des questions-réponses et de l'aide de l'ensemble de la communauté. Son code "open-source" et son utilisation sur MATLAB permettent de réaliser des modifications à des fins personnelles par tout un chacun. Fudaa-LSPIV est un autre logiciel similaire, qui n'est cependant pas, à notre connaissance, accessible sur Mac OS X. C'est pour cette raison que nous nous sommes penchés pour le reste de notre mémoire sur le logiciel open-source "PIVlab".

2.3.2 Capacités

PIVlab n'est pas seulement limité au calcul de champ de vitesses superficielles par analyse d'images. Il permet également de calculer, afficher et exporter sous différents formats divers paramètres du flux étudié (vitesse d'écoulement, vorticité, vitesses verticales ou horizontales, etc.).

Afin de déterminer l'exactitude du logiciel et des résultats qui en découlent, l'auteur a réalisé des tests sur plus de 60.000 images synthétiques pour comparer ses résultats avec ceux espérés [19]. De plus, les images ont été modifiées pour permettre l'évaluation de l'influence des paramètres importants d'une analyse PIV, selon [20]. Lors de ces tests, seul un paramètre fut changé à la fois pour permettre la mise en évidence de son influence et de sa sensibilité au sein de l'algorithme d'analyse PIV. En analysant séparément chaque paramètre (densité des particules, diamètre des particules, les effets du bruit, le flou, le cisaillement, etc.) il est donc possible d'optimiser la configuration de chacun d'eux pour rendre l'algorithme le plus robuste et performant possible. Une analyse de ces résultats est détaillée dans [6]. Finalement, il est utile de remarquer la possibilité d'analyser la performance du logiciel "PIVlab" en fonction de son système d'opération en utilisant le script 'Accuracy.m' disponible dans la bibliothèque du code MATLAB.

2.3.3 Utilisation

L'utilisation facile de PIVlab, son software complet et puissant d'analyse PIV et son interface graphique 'user-friendly' sont les raisons qui expliquent que ce soit le programme open-source de PIV le plus utilisé et le plus populaire. L'annexe "*PIVlab (1.43) : utilisation*" passe en revue les étapes essentielles d'emplois du logiciel PIVlab pour une analyse PIV. De même, un tutoriel [21] détaille par le biais d'explications et de vidéos son utilisation et ses capacités d'analyse. Un forum est également disponible pour les questions et les améliorations éventuelles proposées par les utilisateurs. William Thielicke, le fondateur du programme PIVlab, prend grand soin de répondre rapidement aux différentes interventions afin de tenir son forum le plus actif possible.

On peut également lire dans le mémoire de Guillaume Rion réalisé en 2017 [22], la section 4 qui explique les paramètres d'analyses du programme et son utilisation.

2.3.4 Adaptations apportées

PIVLab est un logiciel assez fourni, qui a déjà fait ses preuves dans beaucoup d'applications et pour des domaines très variés. Son utilisation est intuitive, et il existe des tutoriels exhaustifs pour comprendre toutes les possibilités que le logiciel offre. Nous avons cependant, lors de son utilisation ainsi que lors de nos recherches, repéré des améliorations concrètes permettant de faciliter encore davantage l'utilisation du logiciel, ainsi que d'améliorer l'interprétation des résultats.

Il est à noter que les deux adaptations apportées au programme PIVlab et décrites ci-dessous sont des adaptations plus générales de PIV. D'autres modifications et améliorations liées aux challenges rencontrés tout au long de notre cheminement vers la LSPIV par drone seront expliquées dans la suite de ce rapport. Parmi les améliorations que nous avons apportées, les deux premières sont détaillées ici :

1. L'**importation** directe de **vidéos** dans le programme, pour ne pas devoir utiliser de séquenceurs hors du programme.
2. L'affichage des **vecteurs** de vitesses dans une gradation de **couleurs**, permettant une lecture plus claire et facile des champs de vitesses calculés

Vidéo import

PIVLab dispose d'un menu d'importation d'images, mais cela signifie qu'il faut passer par une étape préliminaire de séquençage de la vidéo en images. N'ayant pas trouvé de logiciel pour satisfaire cette demande simple, nous avons donc implémenté un menu permettant de sélectionner une vidéo. Celle-ci sera alors convertie en une séquence d'images, qui seront enregistrées dans un dossier portant le même nom que la vidéo.

Vecteurs de couleurs

L'affichage des vecteurs de vitesse dans PIVLab est en deux couleurs différentes :

- **Vert**, pour les vecteurs calculés et validés.
- **Orange**, pour les vecteurs interpolés lorsque les originaux ont été éliminés lors de la validation. Lorsque le champ de vecteur est une moyenne de plusieurs frames, un vecteur orange indique que plus de 50% des vecteurs ont été éliminés par la validation à cet endroit.

Ce choix de couleurs permet d'établir une distinction claire entre les deux types de vecteurs, mais il ne permet pas de se faire une idée sur l'amplitude du vecteur. Le problème majeur est que, lorsque les vitesses sont fort semblables, il est difficile d'observer clairement un changement

dans la longueur des vecteurs. Nous avons donc implémenté la possibilité d'afficher le champ de vecteurs dans une gradation de couleurs. Une comparaison des deux types d'affichage est montrée à la Figure 2.15.

Cette gradation de couleur, associée à un affichage de l'échelle de vitesses, permet d'interpréter facilement les résultats de la méthode, et de voir clairement le comportement de l'écoulement. Jusqu'à présent, pour observer cela sur PIVlab, il fallait afficher une colormap de l'intensité des vitesses, comme illustrée à la Figure 2.16. Cet affichage présente cependant l'inconvénient de cacher l'image de l'écoulement, ce qui diminue grandement la lisibilité.

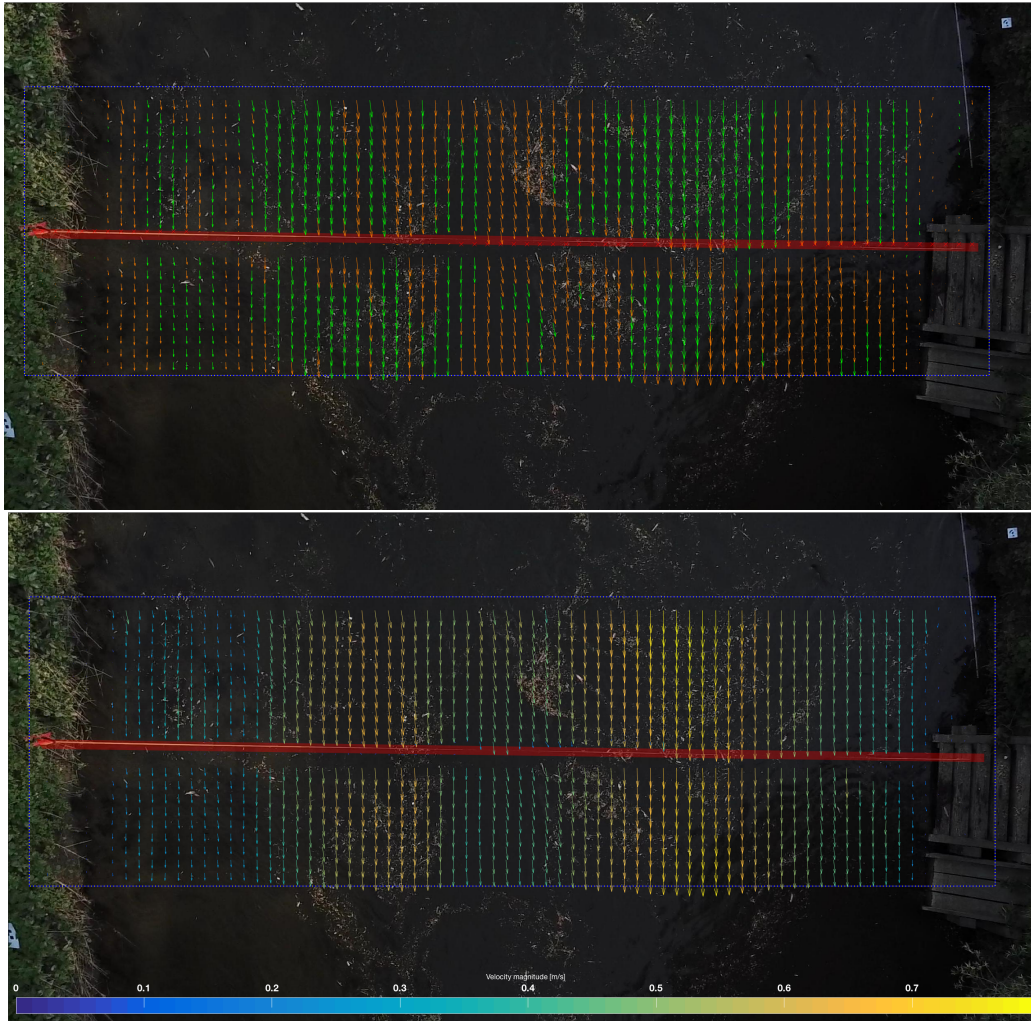


FIGURE 2.15 – Comparaison entre l'affichage par défaut de PIVlab (image supérieure) et le nouvel affichage du champ de vecteurs (image inférieure).

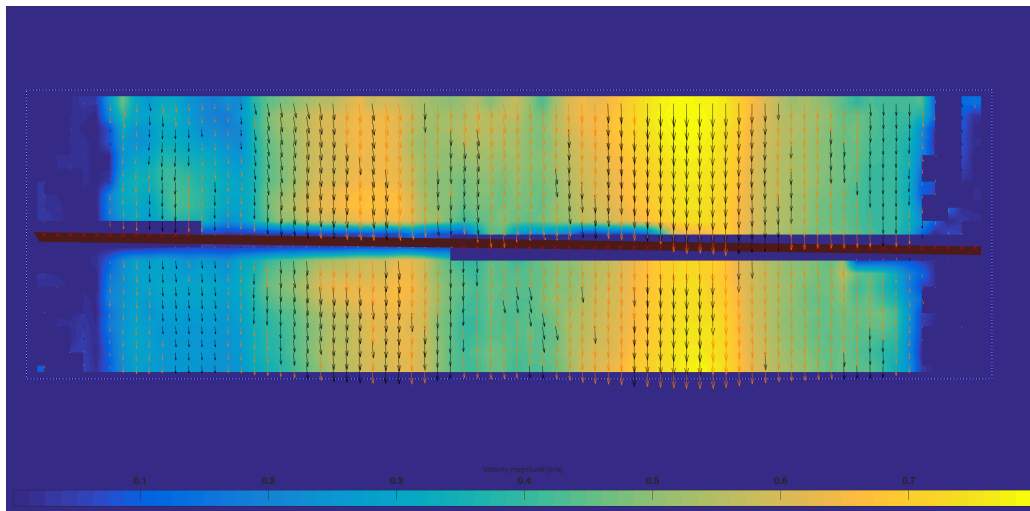


FIGURE 2.16 – Colormap d'un champ de vitesses, affichage proposé par PIVLab et qui ne permet pas de visualiser l'arrière plan de l'image étudiée.

3

Vers la LSPIV

La LSPIV, acronyme de "*Large Scale Particle Image Velocimetry*" n'est rien d'autre que de la PIV étendue à des surfaces de recherche plus importantes, comme des rivières. Pour procéder à une telle application, il faut placer la caméra sur la berge, s'équiper d'un bras télescopique ou se placer sur un pont assez élevé pour pouvoir bénéficier d'une vue perpendiculaire à l'écoulement.

Dans ce chapitre, nous développerons toutes les contraintes et challenges que cette application comporte. Nous détaillerons ensuite les performances déjà obtenues par d'autres études. Nous terminerons ensuite en détaillant les différentes fonctionnalités que nous avons ajoutées à *PIVLab* et qui peuvent permettre d'améliorer les performances de ce dernier sur des écoulements plus larges.

3.1 Etat de l'art

3.1.1 Méthodologie

Mathématiquement, la LSPIV fonctionne de la même manière que la PIV. Cependant, son extension à des milieux naturels et plus vastes nécessite quelques adaptations. La méthodologie à appliquer dans le cas de LSPIV, bien que fort similaire à celle exposée pour la PIV, se définit ainsi :

1. **Préparation** du terrain (pose des GRP's "*Ground Reference Points*")
2. **Ensemencement** du cours d'eau et **prise d'images**
3. **Application de filtres** pour maximiser la visibilité des traceurs
4. **Analyse PIV** sur des frames d'images corrigées
5. **Post-treatment** : validation des vecteurs
6. **Conversion** de la vitesse en *pixels/frame* vers une vitesse en *m/s*
7. **Moyenne** des champs de vecteur dans le temps

3.1.2 Justification

Dans ce paragraphe, on expliquera les raisons qui ont poussé les chercheurs à développer la PIV en dehors des laboratoires en la mettant aux profits d'analyse de terrains plus vastes, et les résultats qu'ils ont obtenus. Dans l'article '*Application de la méthode LSPIV pour la mesure de champs de vitesse et de débits de crue sur modèle réduit et en rivière*' [23], on peut y lire que "les mesures de vitesse et de débit de crue restent souvent impossible à réaliser avec les techniques traditionnelles de jaugeage (courantomètres, ADCP, dilution chimique), quand les fortes vitesses et les nombreux débris flottants mettent en danger les opérateurs et le matériel. De

plus, le temps de mesure inhérent à ces techniques est souvent en inadéquation avec le caractère fortement transitoire des écoulements de crue". Pour ces raisons, la LSPIV attire l'attention par son caractère rapide, non intrusif et bon marché d'analyse de vitesses. Dans ce même document, il est expliqué que les résultats présentent des erreurs allant de 10 à 20 % sur les vitesses. Cependant, la rapidité avec laquelle il est possible de les analyser par rapport aux méthodes traditionnelles permet de réaliser un plus grand nombre d'analyses et ainsi de trouver une vitesse moyenne correcte. Il est également affirmé dans l'article que l'analyse LSPIV n'est, à ce stade, pas destinée à remplacer les techniques de jaugeage traditionnelles, mais peut permettre l'élaboration des courbes de tarages pour des débits plus élevés.

3.1.3 Challenges amenés par la LSPIV

Comme expliqué précédemment, les principales différences avec l'étude PIV classique en laboratoire et la LSPIV sont la taille de l'espace étudié et les conditions de mesures, plus dépendantes du milieu. On peut citer quelques challenges qu'amène l'étude LSPIV face à une analyse PIV classique en laboratoire :

Résolution :

Plus la rivière à étudier est large plus il sera nécessaire de placer la caméra haut. De même, plus haute elle sera, plus la résolution digitale à la surface de l'eau diminuera. Ceci peut avoir des conséquences sur la capacité du programme à pouvoir suivre et observer avec précision le déplacement d'un traceur. Plus la résolution est élevée, plus la taille physique correspondante d'un pixel est faible et permet d'étudier précisément des déplacements. Il faudra de plus être vigilant à ce que le déplacement entre deux images successives soit suffisant pour pouvoir en déterminer une vitesse fiable.

Angle de prise de vue :

Le terrain d'étude en milieu naturel peut présenter des difficultés d'accès. Il peut donc s'avérer être nécessaire de filmer l'écoulement depuis la rive, et de ce fait avec un angle de vue de la caméra qui n'est pas perpendiculaire à la surface de l'eau. Ceci entraîne des relations de pixels par unités de mesure inégales entre l'avant et l'arrière-plan de l'image.

Difficulté de calibration :

On se souvient qu'il est nécessaire de connaître une distance sur l'image pour assurer la calibration (2.1.6). Le plan dans lequel se trouve la distance connue peut donc influencer énormément les résultats. Comme l'illustre la 3.1 ci-dessous, plus l'objet est proche de l'objectif, plus le nombre de pixels le composant sur une image sera élevé et inversement. Ceci signifie que si notre distance de référence sur l'image n'est pas située sur le même plan que celui de la surface de l'eau, la calibration sera affectée par ce problème de perspective et de conversion entre pixels et mesures métriques. De manière plus pratique, si les berges de la rivière ne sont pas facilement atteignables jusqu'à la surface de l'eau, on peut rencontrer quelques problèmes pour calibrer de manière fiable et exacte une distance connue sur le même plan que l'eau.

Ensemencement :

Un accès compliqué, une rivière trop large ou trop profonde peut compliquer l'ensemencement et sa bonne uniformité. Comme l'illustre la figure ci-dessous, des systèmes ont déjà été élaborés pour tenter d'ensemencer des rivières, en utilisant par exemple une tyrolienne pour répandre les traceurs [5].

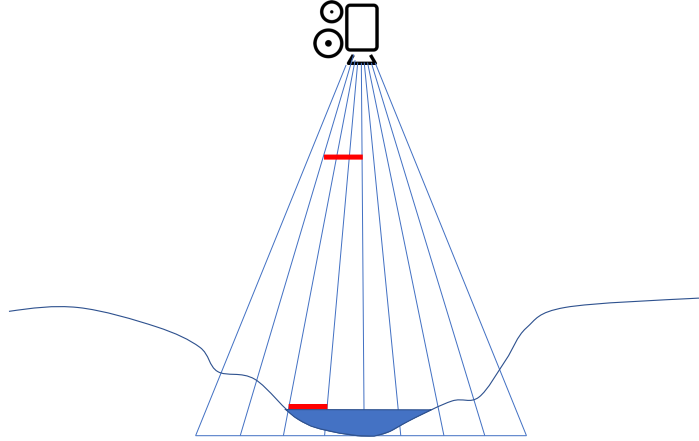


FIGURE 3.1 – Effet du plan dans lequel se trouve la mesure de référence. On observe que pour une mesure de référence identique, celle proche de l’objectif paraîtra plus grande que celle plus bas, puisqu’elle sera représentée par plus de pixels.



FIGURE 3.2 – Système de tyrolienne utilisé par A. Hauet [5] pour ensemençer la rivière.

Illumination :

Travailler en rivière signifie être dépendant des aléas climatologiques et du moment de prise de vue. L’illumination générale peut donc changer au cours d’une même prise de vue et avoir une influence sur l’efficacité du système de tracking de l’analyse PIV. En ce qui concerne les non-uniformités locales que sont les ombres et reflets, on remarque que l’analyse PIV n’est pas perturbée au sein d’une zone d’ombre contrairement aux zones de reflets. Ceci s’explique par le fait qu’un traceur garde une même distribution des intensités de pixels pendant son parcours dans cette zone d’ombre. C’est à la jonction entre la zone d’ombre et la zone illuminée que l’intensité lumineuse change brutalement et perturbe les résultats de l’analyse PIV.

Les reflets provoquent des zones de pixels saturés, où chacun prend la valeur maximale de 255. Dans ces zones, même les traceurs prennent cette valeur de saturation et on ne peut donc plus les distinguer de l’eau. A l’inverse, dans les zones d’ombres, l’intensité moyenne des pixels est localement plus faible, mais les traceurs sont néanmoins observables et dissociables. De ce fait, les zones de reflets constituent un problème beaucoup plus embêtant que les zones d’ombres. On observe également que les reflets sur l’eau sont plus prononcés à certains moments de la journée (inclinaison du soleil) et lorsque la caméra n’est pas positionnée perpendiculairement à

l'écoulement.

3.1.4 Analyses existantes

En 2014, G. Dramais, J. Le Coz, B. Camenen, A. Hauet présentaient dans leur travail scientifique "Advantages of a mobile LSPIV method for measuring flood discharges and improving stage-discharge curves" [24] le potentiel d'une analyse LSPIV mobile pour mesurer des débits et améliorer les courbes hauteurs-débits. Leur terrain de recherche se basait essentiellement sur des situations de crues ou de débits rapides, là où les courbes hauteurs-débits sont encore peu établies. En effet, partout dans le monde les équipes de jaugeages rencontrent des difficultés en cas de crues, puisque les équipements traditionnels de mesures doivent être déployés dans la rivière et sont donc vulnérables aux objets qui transitent lors d'évènements de crues. Pour ces raisons et le danger qu'elles constituent aussi bien pour le matériel que pour l'hydrologue qui les utilise, les relations hauteurs-débits dans des conditions exceptionnelles de crues sont encore souvent très mal définies.

L'équipement utilisé dans l'article [24] consiste en une caméra digitale conventionnelle (Canon MV750i) installée soit sur un trépied soit sur un mat mobile et télescopique donc la hauteur peut être ajustée entre 2 et 10 mètres de hauteur. Des traceurs blancs qui contrastent avec la couleur de l'eau ont été utilisés pour améliorer la détection de mouvements.

Estimer le débit dans des conditions de crues est un procédé complexe puisque plusieurs paramètres (les vitesses et les vitesses superficielles, la hauteur d'eau, la bathymétrie, etc.) varient simultanément et apportent chacun leurs parts d'incertitudes. Dans cette étude, ils explorent quelques-uns de ces paramètres pour tenter d'évaluer la fiabilité d'une analyse par LSPIV mobile lors de crues.

Alors que la qualité d'image utilisée pour cette étude est nettement inférieure à ce qui existe aujourd'hui (450x500 pixels après orthorectification contre 4096x2160 et plus actuellement), ils affirment que leurs résultats par LSPIV mobile sont fiables et précis, avec une déviation moyenne de plus ou moins 8% par rapport aux méthodes de mesures traditionnelles. Ils ajoutent également l'avantage d'une mesure qui dure quelques minutes dans le cas de la LSPIV alors que ces mesures peuvent prendre plus d'une heure avec les méthodes traditionnelles lors de conditions de débits importants. Ils font également part de l'étonnement en ce qui concerne leurs résultats, qui ne présentent presque pas de différence entre les échantillons ensemencés de traceurs 'Ecofoam' et ceux sans traceurs. Finalement, l'accent est mis sur l'avantage que présente l'analyse LSPIV à pouvoir améliorer l'extrapolation des courbes de tarages (hauteur-débit) pour des débits relativement importants et difficiles à mesurer via les méthodes traditionnelles.

3.2 Adaptation de PIVLab

Maintenant que nous avons clairement la méthode, les challenges et les études existantes de la LSPIV, nous développerons ici les fonctionnalités que nous avons implémentées dans *PIVLab* et qui nous ont permis d'obtenir de meilleurs résultats lors de nos analyses. Nous expliquerons d'abord une nouvelle méthode permettant d'effectuer des moyennes dans le temps, sur base d'une moyenne des matrices de corrélation. Nous nous attarderons ensuite sur une nouvelle validation de vecteur, basée sur le *Signal-to-noise ratio* (**SNR**), qui permet de quantifier la fiabilité des vecteurs, sur base des matrices de corrélation. Nous combinerons ensuite les deux idées précédentes dans une nouvelle méthode de moyenne, qui utilise le **SNR** comme poids dans la moyenne des matrices de corrélations. Nous terminerons enfin par l'apport de deux paramètres

lors de l'importation d'images : l'*image spacing* et l'*image jumping*.

3.2.1 Moyenne dans le temps des corrélations

Ce qui nous a tout de suite marqué lors de nos premières analyses LSPIV par drone, c'est que la méthode retourne des vitesses cohérentes lorsque le signal est très fort (i.e. l'ensemencement ou les irrégularités de l'eau), mais est très instable lorsque le signal est faible. Ce comportement peut s'observer sur la figure 3.3. Ces deux photos représentent une même partie de la rivière, mais à un moment différent d'une même vidéo. Nous remarquons alors tout de suite que les vitesses ne sont pas cohérentes sur la fenêtre de gauche.

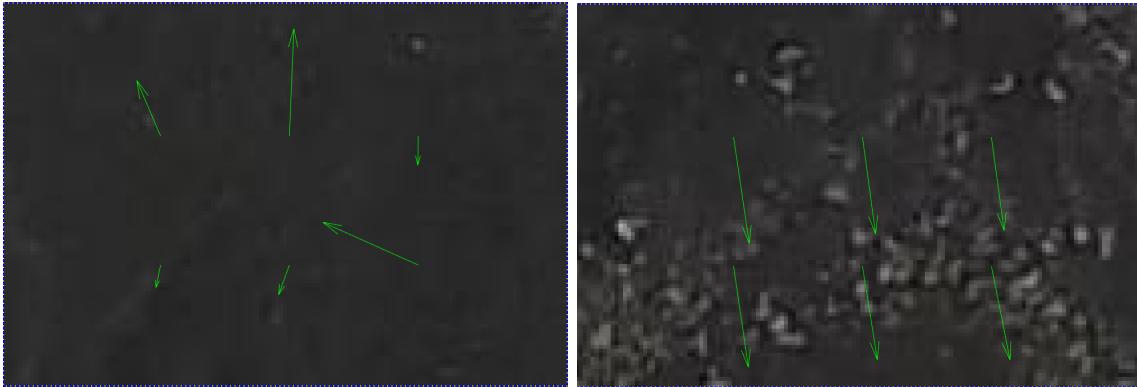


FIGURE 3.3 – Champs de vitesses sur deux *frames* différentes mais au même endroit sur la grille de recherche : (a) ensemencement faible, résultat incohérent car les vecteurs pointent dans des directions différentes (b) ensemencement élevé, résultats cohérent car les vecteurs pointent tous dans le sens du courant

Pour illustrer le raisonnement de cette section, nous continuerons à nous baser sur l'exemple de ces deux *frames*. Ici, les 6 vecteurs visibles font partie d'un immense champ de vecteurs, aussi il n'est pas garanti que nous arriverons à repérer et supprimer toutes les incohérences lors de l'étape de *vector-validation*. PIVLab propose alors de calculer une moyenne des champs de vecteurs dans le temps. Concrètement, pour chaque noeud de la grille d'interrogation (voir 2.1.3), on attribue la moyenne de tous les vecteurs calculés en ce noeud. La moyenne de ces deux *frames* 3.3 peut s'observer sur la Figure 3.4.(a). Cette moyenne est un cas extrême car nous utiliserons en général un plus grand nombre de frames, mais elle illustre bien le fait que les vecteurs incohérents ont une influence dans le résultat final, influence qu'il faut essayer de diminuer au maximum.

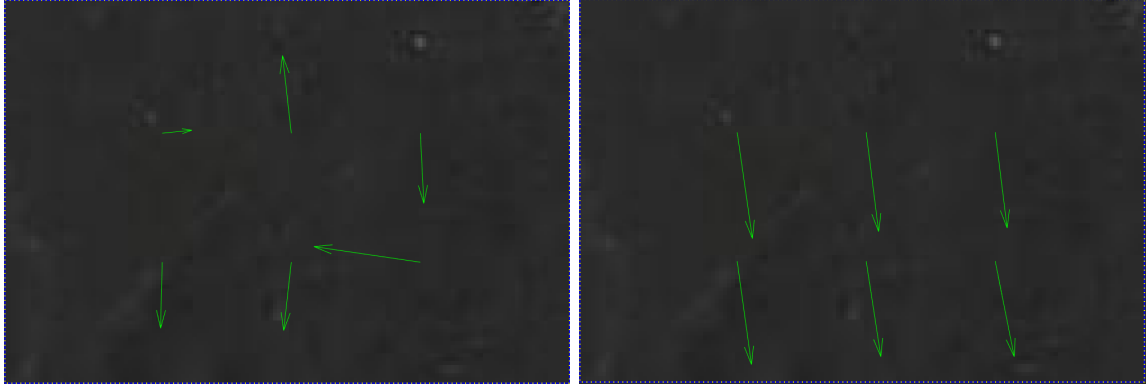


FIGURE 3.4 – Exemple d’effet des différentes moyennes, à partir des 2 *frames* de la Figure 3.3 (a) moyenne des 2 champs de vitesses - (b) champ de vitesses calculé à partir de la moyenne des corrélations

Une première solution serait d’affiner l’étape de la *vector validation*, afin d’augmenter le taux de suppression des vecteurs incohérents. Cette solution sera détaillée plus tard dans la partie Signal-to-Noise Ratio.

Une autre solution consiste à implémenter un autre type de moyenne, basée sur les corrélations, et non directement sur les vecteurs de vitesse. Cette méthode n’était pas implémentée dans PIVLab, mais il s’avère qu’elle a déjà été utilisée et vérifiée en laboratoire [25] [26]. Concrètement, pour chaque noeud de la grille d’interrogation, on attribue un vecteur qui est calculé à partir de la moyenne des matrices de corrélations. La figure 3.5 montre des schémas expliquant les deux types de moyennes dans le temps. La différence se situe dans la troisième étape, lorsqu’on moyenne les matrices de corrélations au lieu de calculer les vecteurs de vitesse.

Si nous avons N frames, nous créons un nouveau champ de vecteurs de vitesses, pour lequel chaque vecteur $v_{moy}(i, j)$ est calculé à partir d’une matrice de corrélation $R_{moy}(i, j)$:

$$R_{moy}(i, j) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N R_k(i, j) \quad (3.1)$$

où $R_k(i, j)$ est la matrice de corrélation associée au vecteur $v_k(i, j)$, correspondant à la *frame* k et à la position i, j sur la grille de recherche.

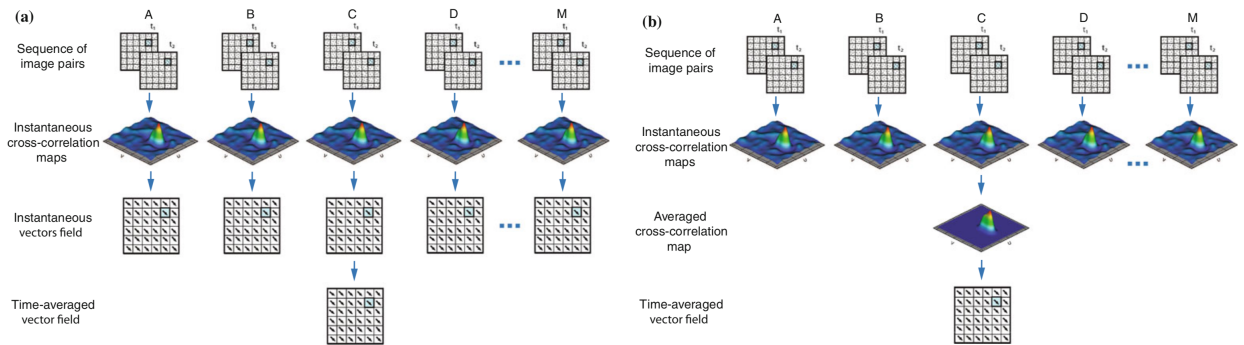


FIGURE 3.5 – Schémas expliquant les deux types de moyennes dans le temps. Les *frames* $A, B, C, \dots, M$ sont prises de la même vidéo, mais à des temps différents. (a) moyenne des vecteurs des vitesses qui donne un vecteur moyen - (b) moyenne des matrices de corrélations puis calcul d’un vecteur moyen avec la matrice résultante. Issu de [25]

La Figure 3.4(b) montre le résultat de cette méthode sur les deux *frames* que nous utilisons en exemple. Nous pouvons tout de suite remarquer l’amélioration dans la cohérence des résultats,

en comparaison avec la Figure 3.4(a).

Pour expliquer cette amélioration, il faut se référer à la Figure 3.6, qui nous montre un exemple de moyenne de matrices de corrélations, basées sur un des vecteurs de l'exemple Figure 3.3. Cette Figure présente, en haut, les 2 matrices liées à un même noeud de la grille de recherche, mais calculées sur 2 *frames* différentes. La matrice du bas représente la moyenne de ces dernières. On observe que le niveau de bruit est supérieur dans la matrice (a), car le pic de corrélation est moins net et dissocié du reste, comparé à la matrice (b). Cela nous donne l'intuition que le vecteur de vitesse résultant de (b) sera plus fiable que celui de (a) (vecteurs rouges). Le vecteur rouge en (c) représente le vecteur résultant de la moyenne des matrices de corrélation, et on observe que celui-ci est identique au vecteur rouge en (b), ce qui confirme notre première intuition. Cela démontre bien l'utilité de la moyenne des corrélations, car lorsqu'on calcule simplement la moyenne des vecteurs en (a) et (b), on obtient le vecteur bleu, qui n'est pas correct. En effet, a été vérifié sur la Figure 3.4 que le vecteur rouge en (c) a beaucoup plus de cohérence par rapport à l'écoulement.

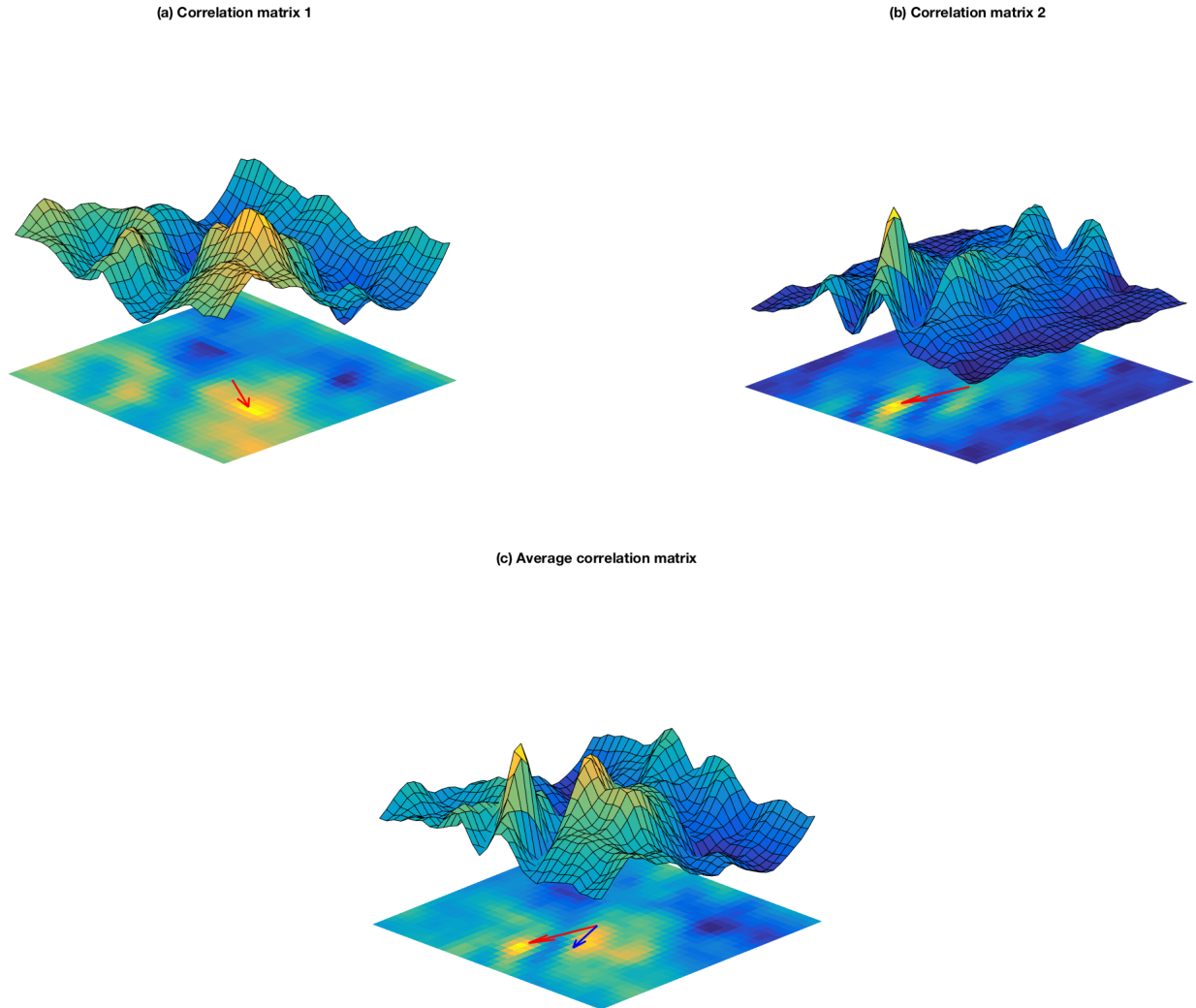


FIGURE 3.6 – Surfaces 3-D de matrices de corrélations. Sur chaque image, le plan du dessous est une projection de la surface, permettant d'observer le vecteur de vitesse résultant (en rouge). Le vecteur bleu en (c) est la moyenne des vecteurs rouges en (a) et (b).

Il a été prouvé sur des simulations numériques que la moyenne des corrélations s'avère être très avantageuse lorsque nous avons *i.* un écoulement avec un taux d'ensemencement faible, *ii.* un bruit important, perturbant le signal (i.e. l'image) [25]. Ces conclusions ont été établies dans le cadre de la PIV en laboratoire, mais elles portent à croire que la moyenne des corrélations marchera également mieux pour la LSPIV. En effet, nous travaillons sur des rivières où il est difficile d'avoir un ensemencement homogène et à densité élevée, avec de nombreuses perturbations telles que les *capillary gravity waves*, la luminosité, les mouvements de la caméra, la qualité de l'image, etc. Cette intuition sera confirmée dans le chapitre 7. Il faut toutefois noter que cette méthode fonctionne en se basant sur un postulat fort, mais obligatoire : il faut que le signal soit en moyenne plus intense que le bruit.

3.2.2 Post-processing sur Signal-to-Noise Ratio

Afin d'introduire correctement le sujet du *Signal-to-Noise Ratio* (SNR), il est important de justifier son utilisation et son utilité. Jusqu'à présent, le logiciel PIVlab permettait un *post-processing* des résultats par "Vector Validation" manuelle. Comme illustré sur la Figure 3.7, cela consiste à encadrer les vecteurs de vitesses que l'on souhaite préserver parmi l'ensemble des vecteurs de vitesses résultants de l'analyse PIV.

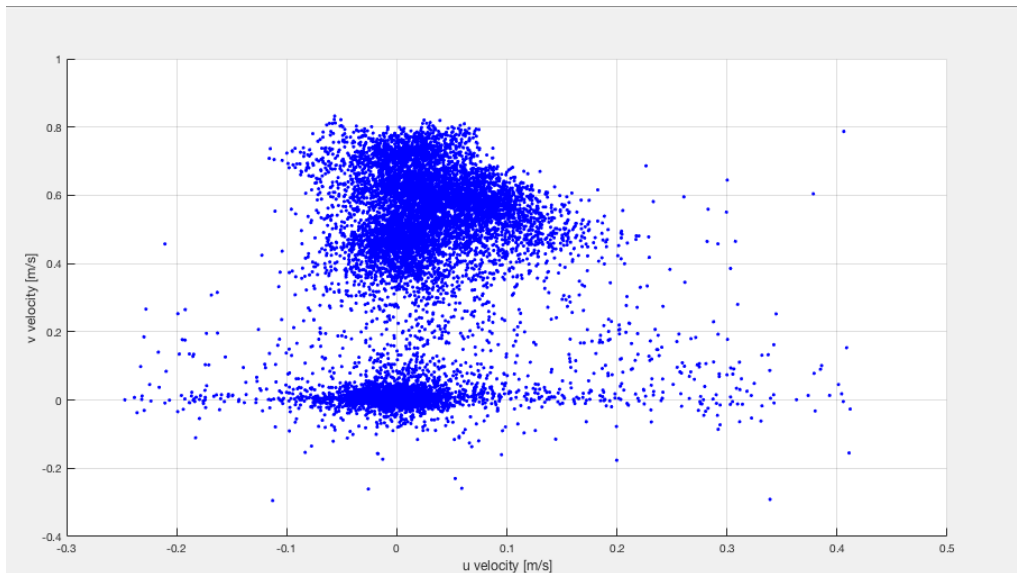


FIGURE 3.7 – Graphe représentant les vitesses trouvées lors de l'analyse PIV et la "Vector Validation" proposée dans le logiciel PIVlab, pour encadrer la zone de vecteurs de vitesse à conserver et éliminer le restant.

Le problème majeur que laisse transparaître cette méthode de post-processing manuelle est qu'elle ne permet pas de détecter toutes les erreurs de corrélation. Par exemple, si une "erreur" se produit suffisamment de fois, elle peut tromper l'utilisateur en se confondant parmi des résultats cohérents. C'est exactement le cas de la figure 3.7 où la multitude des résultats dans la gamme de vitesses proches de zéro pousse à croire que ce sont des résultats vraisemblables. Malheureusement, le cours d'eau étudié dans ce cas ne présentait pas de vitesses superficielles nulles sur sa section, et ces résultats auraient dès lors dû être exclus. Cet exemple illustre parfaitement le manque d'objectivité de cette méthodologie de "Vector Validation" manuelle.

On observe également que ce type de problème arrive fréquemment lors d'un ensemencement non homogène et qui présente des zones partiellement non ensencées sur sa section. Ceci induit bien souvent des vecteurs de vitesse nuls, impossibles à dissocier lors d'une "Vector Validation"

manuelle, des vecteurs qui pourraient réellement présenter des vitesses nulles, par exemple près des berges. Pour ces différentes raisons, il est donc nécessaire de trouver une méthode plus générale et qui fonctionne dans un plus grand nombre de cas, sans être influencée par la subjectivité de l'utilisateur, présente dans une "Vector Validation" manuelle.

C'est ici qu'intervient le *Signal-to-Noise Ratio* (SNR), qui va servir de validation de vecteurs en fonction de leurs qualités de corrélation plutôt que de leur position dans le graphe de vitesses. On définira ici le SNR comme étant le ratio qui compare la corrélation maximale par rapport au niveau moyen de bruit. Puisqu'une analyse PIV comporte une multitude de facteurs (densité, taille et répartition des traceurs, illumination, calibration, etc.) qui pourraient influencer l'exactitude des résultats, rendant l'analyse des erreurs éventuelles plus complexe que pour d'autres méthodes traditionnelles. L'avantage du SNR est qu'il fait intervenir une combinaison de toutes ces sources potentielles d'incertitudes on se basant sur la qualité de corrélation de chaque vecteur de vitesse. Pour rappel, le plan de "cross-correlation" illustre la distribution de toutes les possibilités de déplacement d'une particule ou d'un ensemble de particules entre deux images consécutives (frame). On a donc pour une matrice de corrélation R :

$$SNR(R) = \frac{\text{Valeur max de corrélation}}{\text{bruit}} = \frac{\max(R)}{\text{mean}(R)} \quad (3.2)$$

Dans cette équation, le bruit est considéré comme la moyenne des corrélations, comme représenté sur la Figure 3.8.

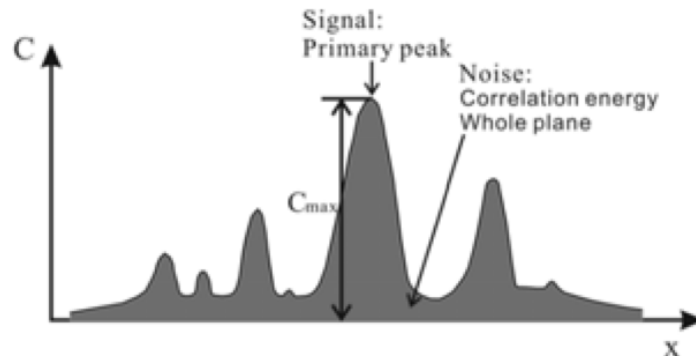


FIGURE 3.8 – Représentation par la partie grisée de ce que l'on définit dans ce rapport comme étant le bruit de corrélation, c'est-à-dire la moyenne des corrélations.[27]

Pour illustrer l'influence de ce ratio, il est judicieux d'observer les Figures 3.9 et 3.10 qui représentent d'une part un plan de corrélation très bruyant, sans *peak* se démarquant nettement du reste du signal, et à l'inverse (Figure 3.10) un plan de corrélation qui illustre bien le cas d'une corrélation fiable, car présentant un *peak* de corrélation bien plus élevée que la valeur moyenne des corrélations.

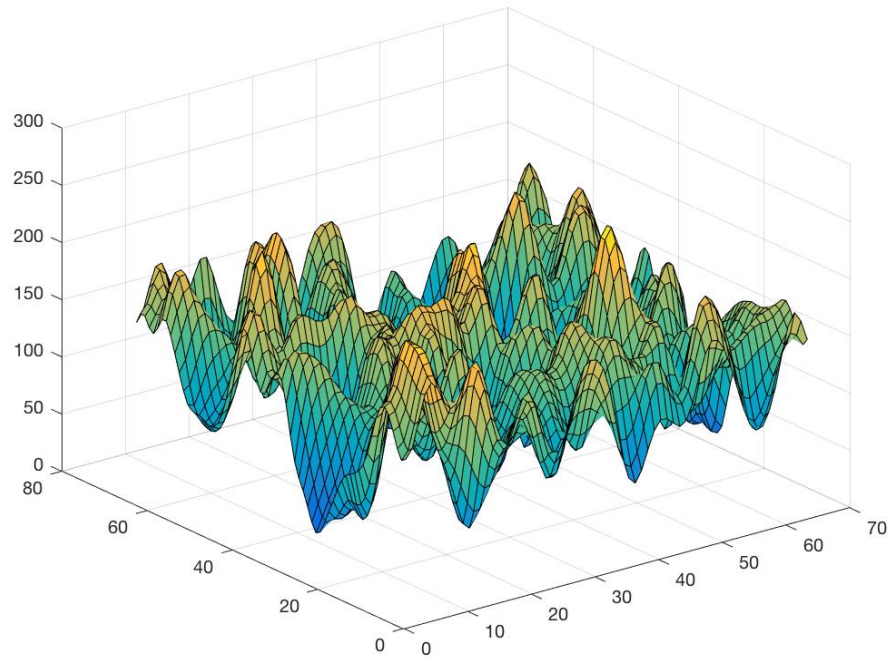


FIGURE 3.9 – Exemple d’un plan de corrélation bruyant avec un $\text{SNR}=1,8445$, sans *peak* de corrélation se démarquant fortement du reste, ce qui explique son SNR faible et par conséquent rend le vecteur de vitesse associé peu fiable.

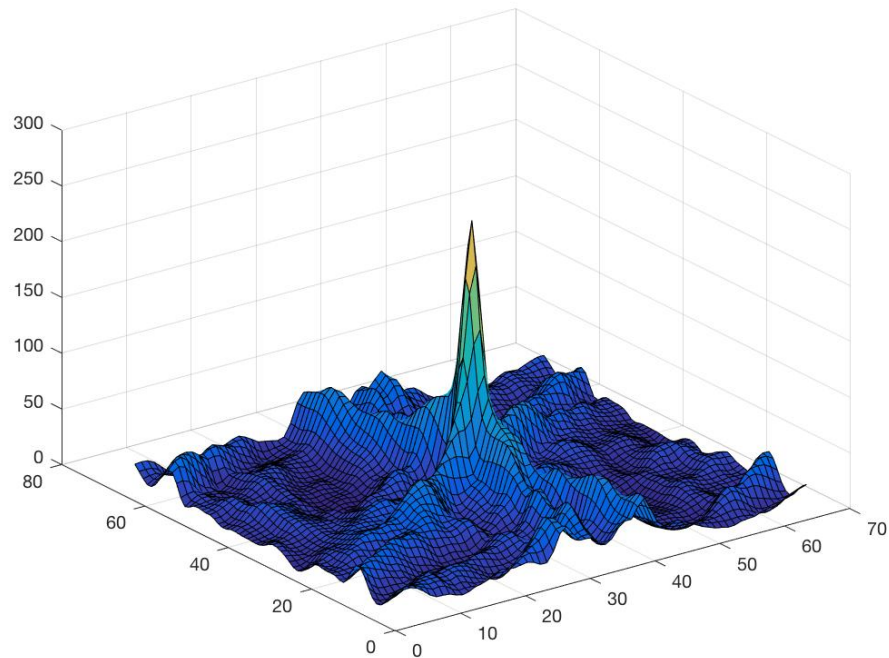


FIGURE 3.10 – Exemple d’un plan de corrélation peu bruyant, dont son $\text{SNR}= 10,4435$ avec un *peak* de corrélation se démarquant clairement du reste, ce qui explique son SNR élevé et par conséquent rend le vecteur de vitesse associé fiable.

On peut maintenant comprendre l'influence que le SNR peut avoir sur le traitement des résultats d'une analyse PIV. Nous avons donc créé une commande qui permet à l'utilisateur de choisir le seuil du *Signal-to-Noise Ratio* pour ne garder qu'une certaine qualité de corrélation et trier, de cette manière, les résultats. Pour faciliter son utilisation au sein du programme, on a converti ces valeurs de SNR sur une échelle de 0 à 1, en divisant chaque valeur de SNR par la valeur maximale de SNR trouvée sur la même *frame*. Une valeur de ce seuil de 0 correspondra donc au résultat brut, comme si aucun filtre de SNR n'avait été appliqué alors qu'une valeur de seuil de 1 correspondra au seul vecteur de vitesse détenant la corrélation maximale. On peut facilement voir l'influence que peut avoir l'activation de ce seuil de SNR sur les Figures 3.11.

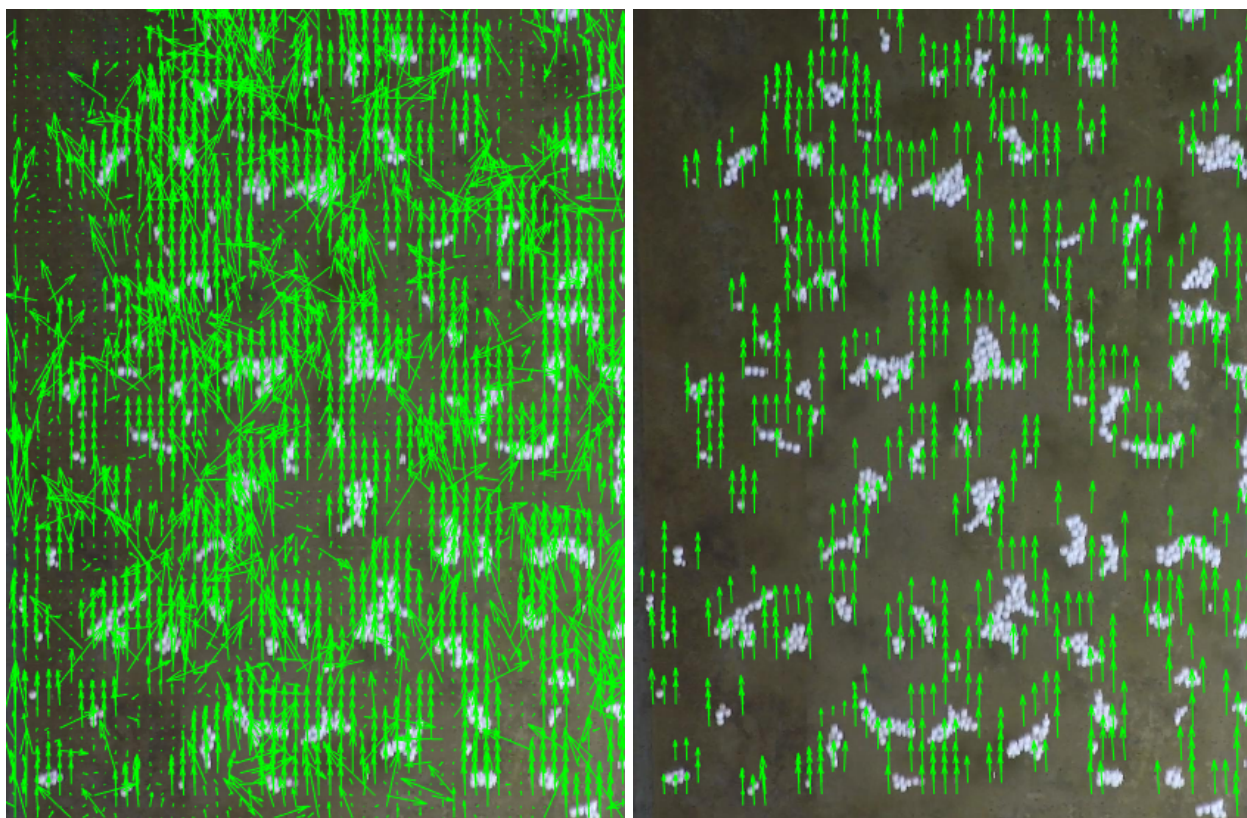


FIGURE 3.11 – Figure de gauche : résultats bruts d'une analyse PIV en laboratoire (sans post-traitement, équivalent à un $SNR_filter=0$).

Figure de droite : mêmes résultats que dans la figure de gauche, mais cette fois-ci filtrés par un $SNR_filter=0,18$.

On observe que la performance d'un filtre SNR est assez frappante. Il faudra cependant veiller à régler le seuil pour chaque analyse, car une valeur plus élevée ou plus faible peut s'avérer être nécessaire en fonction des images collectées et de la performance de l'analyse PIV.

Nous avons également implémenté une méthode permettant de calculer la moyenne des vitesses, avec la possibilité de prendre en compte uniquement les vecteurs de vitesse supérieurs au seuil (fixé par l'utilisateur) du SNR. Il est important de souligner que sans cette méthode, tous les vecteurs de vitesses auraient été pris en compte pour calculer les vitesses moyennes en une section de la rivière. Or, il est possible qu'à certains moments de l'analyse, des zones manquant d'informations traitables ou d'un bon ensemencement aient donné des vecteurs de vitesse nuls. Ces vecteurs nuls auront une influence considérable sur la vitesse moyenne, qui ne sera dès lors plus représentative de l'écoulement. A l'inverse, notre méthode ne se basera que sur les vecteurs de vitesses bénéficiant d'un SNR supérieur au seuil fixé (et par conséquent d'une corrélation élevée), et aug-

mente ainsi considérablement les chances d’avoir un résultat le plus représentatif et fiable possible.

Pour conclure, en se basant sur le niveau de corrélation d’un vecteur de vitesse, le *Signal-to-Noise Ratio* (SNR) peut influencer directement la qualité, la précision et l’incertitude d’une analyse PIV.

3.2.3 SNR weighted correlation mean

Nous avons premièrement expliqué une nouvelle méthode permettant de faire une moyenne des matrices de corrélation dans le temps, et de calculer un vecteur de vitesse à partir de la matrice résultante. Nous avons ensuite vu que le SNR d’une matrice de corrélation permet de quantifier la fiabilité de sa vitesse résultante. C’est de l’observation que le SNR est une mesure de fiabilité que nous avons décidé de l’utiliser comme poids dans la moyenne des matrices. Ainsi une matrice avec un SNR élevé aura plus d’importance dans la moyenne, ce qui représente bien le fait qu’elle soit plus fiable qu’une autre qui aurait un SNR faible.

Si nous avons N *frames*, nous créons un nouveau champ de vecteurs de vitesses, pour lequel chaque vecteur $v_{moy}(i, j)$ est calculé à partir d’une matrice de corrélation $R_{moy}(i, j)$:

$$R_{moy}(i, j) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N SNR(R_k(i, j)) \cdot R_k(i, j) \quad (3.3)$$

où SNR est la fonction de l’équation 3.2, $R_k(i, j)$ est la matrice de corrélation associée au vecteur $v_k(i, j)$, pour une *frame* k et une position i, j sur la grille de recherche.

Cette nouvelle méthode est d’une importance capitale, car elle permet de lever l’hypothèse que le bruit doit être moins présent en moyenne que le vrai pic de corrélation. Elle combine les avantages du filtre SNR et de la moyenne des corrélation, et nous verrons plus tard dans ce travail (7.2.6) que cette méthode est très efficace mais également qu’elle est très facile à utiliser et très robuste.

3.2.4 Choix couplage de frame

Image Spacing

Supposons un écoulement lent, où même une qualité d’image suffisante pour qu’un traceur ne se déplace que d’un seul pixel au sein d’un même frame (Def. ??). Ceci peut poser problème puisque le calcul du déplacement fera fortement intervenir la *sub pixel interpolation*. Si l’on reprend notre cas, filmé avec une caméra à 24 *fps* et une image de 4096 pixels de large, on se rend compte que la conversion d’un déplacement en pixels vers un déplacement en distance métrique est d’autant plus fiable que la distance parcourue est grande. Un compromis important doit néanmoins être réalisé. En effet, plus la distance séparant un traceur entre deux images est grande, plus sa conversion en distance métrique est fiable. Cependant, plus la distance parcourue entre deux images est grande, plus le risque de confondre une particule avec une autre est grand.

C’est pour pallier ce problème que nous avons implémenté le choix d’un *image spacing* lors de l’importation des images.

Definition 3.2.1 (Image Spacing). *Nombre d’images qui sépare les deux images d’une frame. Ceci permet d’augmenter le temps séparant deux images et par la même occasion la distance parcourue par un traceur pendant ce laps de temps. Si nous choisissons un image spacing de 4 par exemple, nous aurons un couplage tel que la première frame se composera des images 1 et 5, la seconde des images 2 et 6, etc.*

Il était déjà possible de choisir cet *image spacing* en sélectionnant manuellement les images à analyser, mais le travail était fastidieux, et comme expliqué ci-dessus, il est important de pouvoir tester différents espacements afin de trouver le meilleur compromis.

Image Jumping

Il est souvent difficile d'avoir un ensemencement homogène de toute la rivière sur une même série d'images. C'est pourquoi l'analyse doit s'étendre sur plusieurs secondes afin d'augmenter la probabilité que toute la section de la rivière ait été traversée par des traceurs lorsqu'on calcule le champ de vecteurs moyen. Il y a toutefois un compromis à faire entre le nombre d'images à analyser et le temps de calcul nécessaire pour effectuer l'analyse complète. Une solution consiste à augmenter le nombre d'images, mais de n'analyser que certaines paires d'images. Nous pourrions par exemple analyser un écoulement de 10 secondes (240 images), mais ne sélectionner qu'une paire d'images toutes les secondes (10 images). Nous réduisons ainsi le temps de calcul par 10, tout en gardant l'information sur l'écoulement pendant ces 10 secondes, pour laquelle nous avons plus de chance de trouver des particules en tout point. C'est pour pouvoir exploiter cette idée facilement que nous avons implémenté la possibilité d'introduire un *image jumping* lors de l'importation des images.

Definition 3.2.2 (Image Jumping). *Nombre d'images séparant les frames qui seront analysées. Si nous choisissons un image jumping de 5 par exemple (avec un image spacing de 1), nous aurons un couplage tel que la première frame se composera des images 1 et 2, la seconde des images 5 et 6, etc.*

4

Vers la LSPIV mobile

La LSPIV mobile est ce que nous décrirons dans ce travail comme étant de la LSPIV par utilisation d'une caméra embarquée sur un drone. Ce dispositif permet d'analyser des zones difficiles d'accès ou dangereuses (crues), de prendre plus facilement de la hauteur pour capturer toute la largeur de la rivière, mais également de capturer l'écoulement perpendiculairement, même lorsqu'il n'y a pas de pont à disposition. Sans cela, il faut placer la caméra sur la berge, l'angle incliné entraînant alors une relation pixels/mètre non constante suite à la perspective de l'image. Il est également possible d'utiliser un bras télescopique pour prendre de la hauteur, comme utilisé et décrit dans [5]. Cependant, un bras télescopique est utile pour prendre de la hauteur mais ne permet pas de placer le champ de vision d'une caméra perpendiculairement à l'écoulement en l'absence d'un pont. Contrairement au bras télescopique, un drone permet d'atteindre n'importe quel endroit et section du cours d'eau, à n'importe quelle hauteur, tout en orientant sa prise de vue de la manière la plus optimale possible.

La méthodologie à appliquer dans le cas de LSPIV mobile, bien que fort similaire à celle exposée pour la LSPIV, se compose des étapes suivantes :

1. **Préparation** du terrain (pose des GRP's "*Ground Reference Points*")
2. **Ensemencement (optionnel)** du cours d'eau et **prise d'image par drone**
3. **Stabilisation** de la séquence d'images
4. **Application de filtres** pour maximiser la visibilité des traceurs
5. **Analyse PIV** sur des frames d'images corrigées
6. **Post-treatment** : validation des vecteurs
7. **Conversion** de la vitesse en *pixels/frame* vers une vitesse en *m/s*
8. **Moyenne** des champs de vecteurs de vitesse dans le temps

On constate que l'unique différence avec la LSPIV traditionnelle est l'étape de stabilisation après la prise d'images. En effet, les vibrations du drone ou les mouvements influencés par le vent sur celui-ci provoquent des déplacements parasites qui perturbent la qualité des résultats d'analyses. Dans ce chapitre, nous analyserons d'abord les challenges et erreurs que peuvent amener les mouvements du drones, ensuite nous discuterons des recherches qui ont déjà été conduites à ce sujet. Nous terminerons ce chapitre en détaillant la méthode que nous avons utilisée, puis en quantifiant son efficacité.

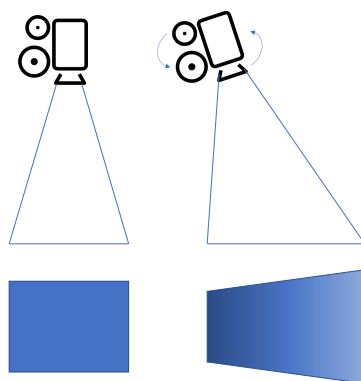


FIGURE 4.1 – Effets des vibrations ou des mouvements du drone sur la largeur de champ de prise de vue.

Effet de perspective

Avant de s'intéresser à la stabilisation, il est nécessaire de s'attarder brièvement sur la correction de l'effet "fish-eye", ainsi que de l'effet de perspective. En effet, nous craignons au début de ce travail du rendu qu'un tel effet pouvait avoir sur nos résultats. Nous avons donc cherché à mesurer si une quelconque distorsion apparaissait sur nos images. Pour ce faire, nous avons extrait des images d'une vidéo enregistrée au-dessus d'une surface parfaitement plate et horizontale (terrain de tennis) et mesurer tous les 3 mètres la distance en pixels. Ces mesures sont représentées sur la figure 4.2.

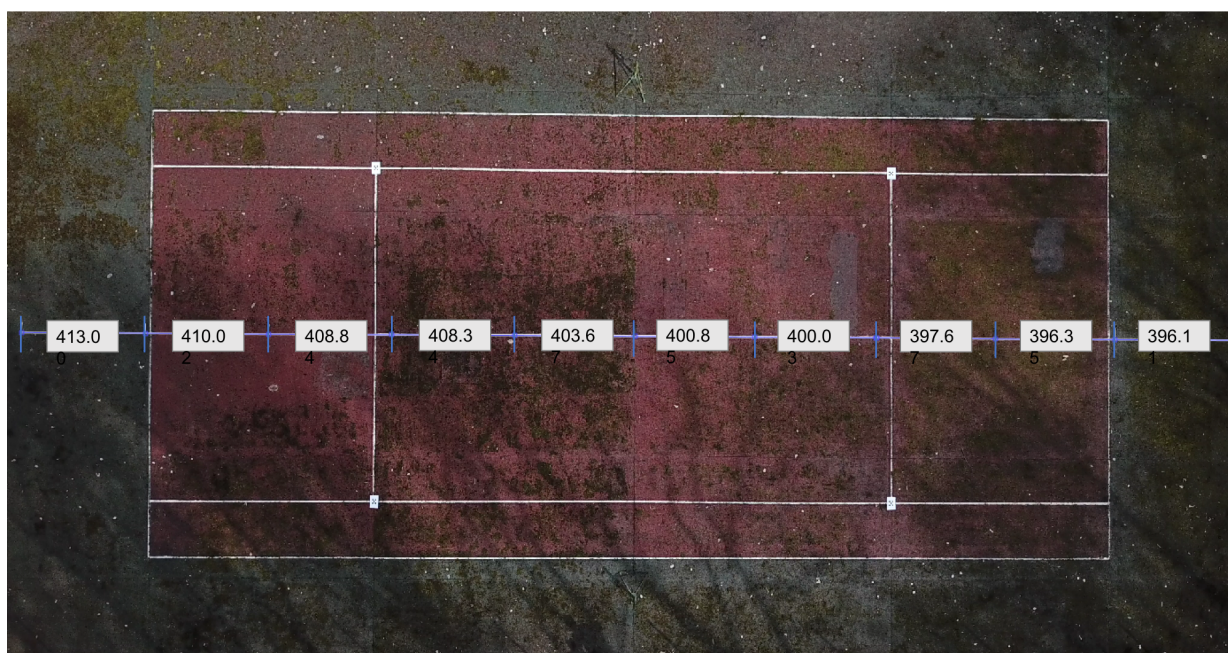


FIGURE 4.2 – Nombre de pixels représentant une distance de 3m au sol (à une altitude de 20m). Tendence décroissante de gauche à droite

On observe qu'il n'y a pas vraiment d'effet de distorsion "fish-eye", sinon le nombre de pixels définissant une longueur de 3 mètres aurait dû être plus élevé au centre que sur les bord de la photo. Or, ce qu'on remarque ici est plus une tendance décroissante de gauche à droite. C'est manifestement plus un effet tel que représenté par la figure 4.1. La figure suivante exprime donc

le pourcentage d'erreur due à la différence de pixels observée sur la figure 4.2, d'une extrémité à l'autre de l'image et exprimée en prenant le centre de l'image comme référence.

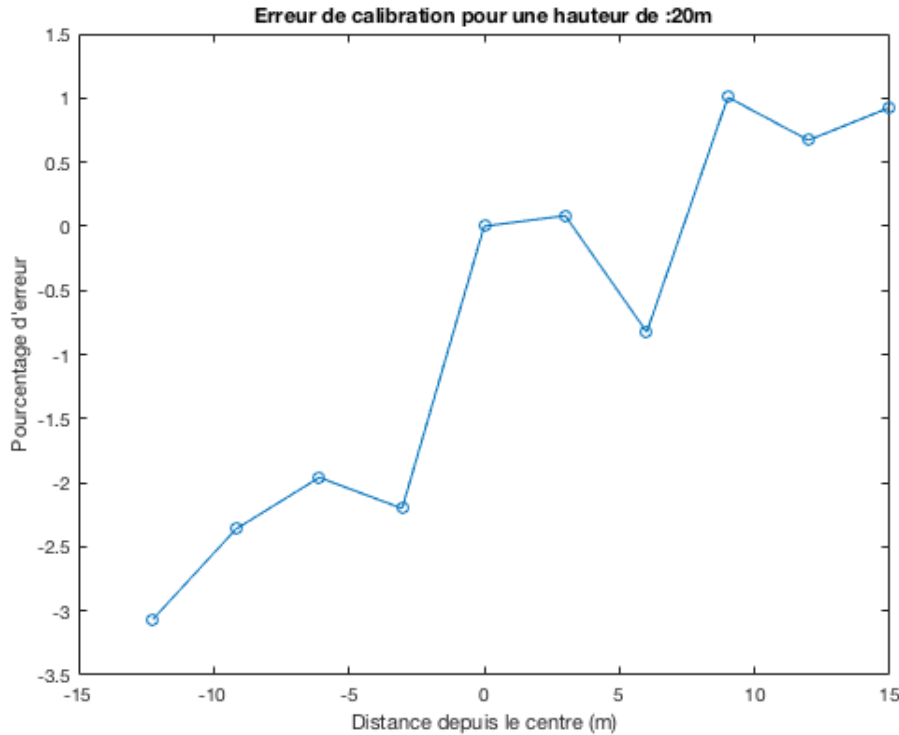


FIGURE 4.3 – Erreur, en pourcentage, du nombre de pixels représentant une distance de 3m au sol, avec la mesure du centre comme référence.

Cet effet étant minime et dépendant de la position du drone (infime mouvement dû à une perturbation) lors de l'enregistrement de la vidéo, il ne sera pas développé plus en profondeur dans la suite de ce travail.

4.1 Challenge : Stabilisation

Malgré des avantages évidents dans la facilité de déploiement, la prise de hauteur ou encore l'angle de vue, l'utilisation d'un drone apporte une très grande difficulté supplémentaire, la stabilité lors de la prise d'image. En effet, s'il y a un déplacement observable entre 2 images consécutives, les vecteurs de l'analyse résultante seront erronés, car viendra s'ajouter la "vitesse au sol" du drone. De plus, un changement d'altitude aura comme effet direct un zoom (ou inversement) de l'image, et de ce fait une incohérence de calibration lors de la conversion des pixels vers une distance métrique puisque celle-ci n'est valable que pour une hauteur définie. En effet, la longueur métrique couverte par un pixel dépend de la résolution et de la distance de la caméra par rapport à la scène capturée. Ces effets peuvent aisément être constatés sur une analyse PIV où on pourra observer des vecteurs non nuls sur les berges qui devraient être immobiles. En effet, même lors d'un vol stationnaire et sans vent, la stabilité complète d'un drone est un problème très complexe. Soumis aux contraintes extérieures de vent, il devient alors impossible d'éviter des mouvements perturbateurs. Ces phénomènes peuvent être observés sur les figures 4.4, 4.5 et 4.6 qui témoignent d'un mouvement de translation et d'une diminution de hauteur du drone.

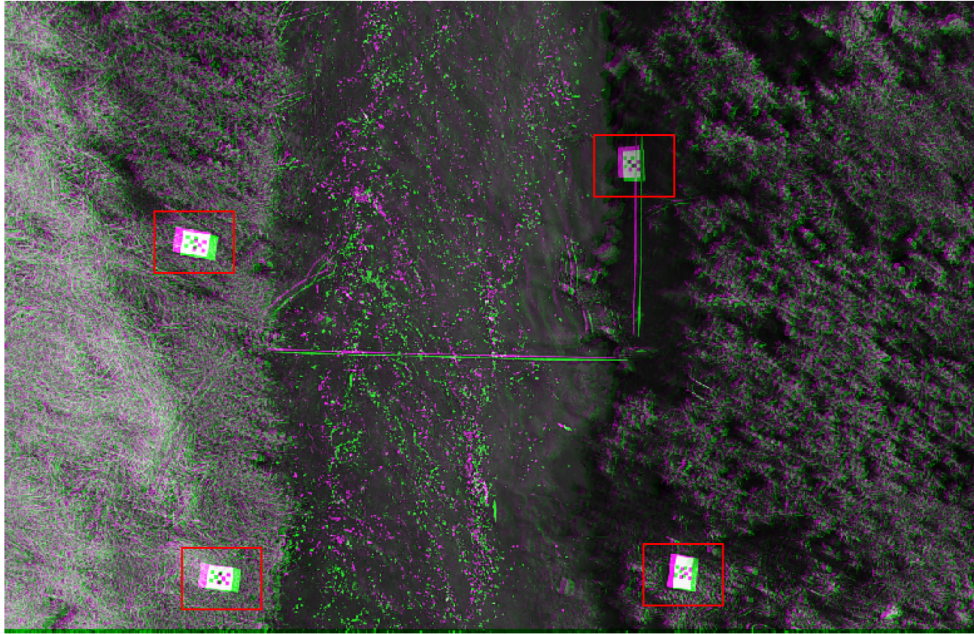


FIGURE 4.4 – Calque pour pointer le mouvement de translation entre deux images séparées d'une seconde. Dans les encadrés centrés sur les GRP's posés sur les berges, on distingue le déplacement de l'image 'verte' vers l'image 'rose'.

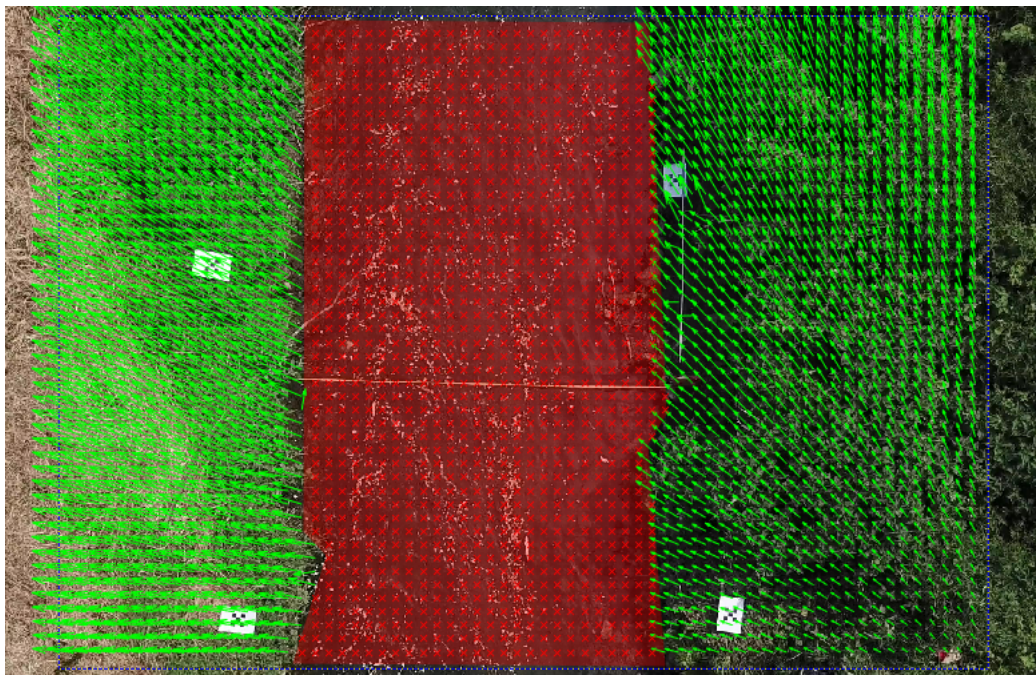


FIGURE 4.5 – Analyse PIV sur les deux images (frame) constituant la figure 4.4, qui témoigne d'une translation observée entre ces deux images non stabilisées et espacées temporellement de 1 seconde. Dans ce cas, l'analyse a intentionnellement été bloquée sur la rivière, puisque ce sont ici les mouvements perçus des berges qui nous intéressent.

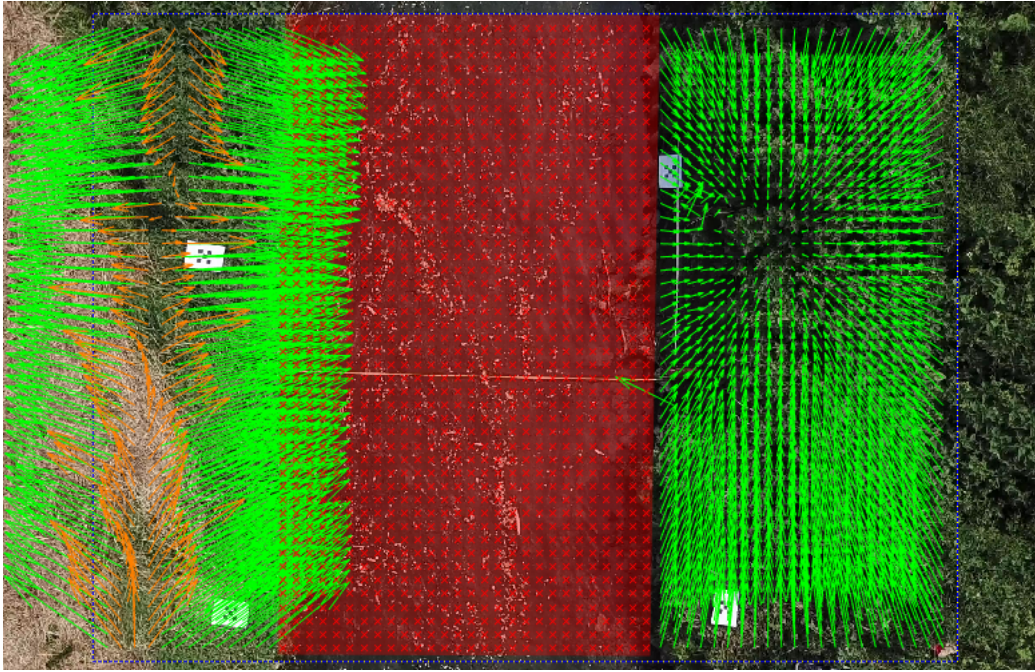


FIGURE 4.6 – Analyse similaire à celle représentée sur la figure 4.5 mais cette fois-ci sur une baisse de hauteur observée entre deux images non stabilisées et espacées temporellement de 1 seconde. Visuellement, cela peut donner l'impression d'un zoom dont le point de focal serait à côté du GRP supérieur droit.

Stabilisation active

Il existe de nombreux moyens mis en place par les constructeurs de drones pour essayer de limiter les déplacements du drone. Nous ne les détaillerons pas dans ce rapport car ils ne font pas partie du sujet de cette étude, mais nous pourrions observer, entre autres, l'utilisation d'un gps, d'un altimètre, d'une station inertielle, de caméras permettant de se repérer dans un environnement, etc. Il est également possible d'augmenter la stabilisation en accrochant la caméra à un système anti-vibration, ou un système gyroscope sur 3 axes. Tauro et al.[28] ont analysé les déplacements d'un drone équipé d'une gimbal et d'un damping system. Celui-ci s'est déplacé dans un rayon de 1m lors d'un vol de 90 secondes, montrant qu'une stabilisation active n'est pas suffisante pour une application réelle de la LSPIV mobile. Ils ont donc déplacé manuellement les images afin de faire correspondre les points fixes, mais les imprécisions de cette méthode manuelle laborieuse leur ont donné une différence de 50% des vitesses superficielles entre les résultats issus du drone et ceux issus d'une caméra fixe. Ils concluent sur la nécessité d'améliorer les systèmes de stabilisation active, tels que la précision du GPS, et l'efficacité de la gimbal, mais également sur la nécessité de créer un système de stabilisation efficace des vidéos. Ce sont de ces systèmes de stabilisation par post-traitement que nous allons discuter dans la prochaine section.

Stabilisation par post traitement

Une fois les images capturées, il est encore possible de diminuer les effets de l'instabilité du drone. Nous discuterons ici des méthodes développées et des résultats obtenus lors de différentes recherches effectuées sur la LSPIV par drone.

Comme l'explique Ichiro Fujita et Yohei Kunita [29], 2 options de stabilisation sont possibles :

- La *vector correction method* (**VCM**) pour laquelle les images sont analysées, puis les vecteurs de vitesses apparaissant aux points qui devraient être immobiles sont utilisés pour corriger les vecteurs caractérisant l'écoulement.

- *L'image correction method (ICM)*, pour laquelle on modifie directement les images en les stabilisant puis on effectue l'analyse PIV. Pour ce faire, une projection est estimée à partir du déplacement de plusieurs points dans l'image.

Dans un autre article, Tauro et al. opteront pour une VCM, en calculant la moyenne des vitesses observées sur les berges, puis en la soustrayant à chaque vitesse observée sur la rivière [30]. Ils ont alors obtenu des résultats semblables à ceux d'un courantomètre. Cette méthode, relativement simple, présente toutefois de nombreux inconvénients : les vitesses sont calculées à des hauteurs différentes, et donc des calibrations différentes. La moyenne des vitesses n'est pas toujours représentative de l'effet du déplacement du drone en chaque point, car les effets de perspective ne sont pas pris en compte. Or, cet article ne spécifie pas prendre en compte le possible changement de hauteur du drone, qui affecte la calibration. Enfin il est impossible d'effectuer des moyennes dans le temps si les images ne sont pas directement stabilisées, car cela fera correspondre des vecteurs qui ne sont pas comparables entre eux en terme de leur position dans l'écoulement.

Ichiro Fujita propose un autre type de VCM, plus avancée, et basée sur le placement de *Ground Reference Points* (GRP's) geo-référencés le long des berges du cours d'eau. Une fois l'analyse PIV effectuée, les vecteurs sont corrigés à l'aide d'une projection, estimée à partir des coordonnées des GRP's, ainsi que leur position sur chacune des images. Il obtient alors des résultats constants depuis plusieurs angles de prise d'image, mais ne quantifie pas la précision de sa méthode.

Martin Detert et Volker Weitbrecht [31], lors de leur analyse LSPIV d'une rivière à partir d'un drone, ont observé des vitesses au sol de 1.6 à 4.7 m/s , démontrant qu'une stabilisation est inévitable car elles étaient du même ordre de grandeur que la vitesse de surface de la rivière. Ils ont alors proposé une ICM, se basant sur la détection de GRP's pour calculer une projection affine, appliquée à chaque image. Leurs résultats sont très prometteurs puisqu'ils arrivent à une erreur de position des GRP de l'ordre de $\pm 0.04m$ et une vitesse au sol de 0.02-0.05 m/s . Enfin, ils ont comparé leurs analyses LSPIV avec les mesures d'un ADCP (appareil de jaugeage basé sur l'effet Doppler) sur 4 sections, et ont obtenus une moyenne de standard déviation inférieure à 10%.

4.2 Adaptation de PIVLab

4.2.1 Notre méthode : tracking the Ground Reference Points

On se rappelle des effets que les vibrations du drone peuvent avoir sur la largeur de champ de prise de vue, comme illustré par la figure 4.1. De même, les translations du drone sur ses trois axes peuvent influencer directement les résultats. Un moyen rapide et facile de conceptualiser ce phénomène est de s'imaginer une situation où le drone se déplacerait dans le sens et à la vitesse du courant. Les vitesses superficielles de la rivière paraîtraient alors nulles puisqu'il n'y aura pas de mouvement relatif de particules entre deux images consécutives (sauf sur les berges, qui paraîtraient alors avancer dans le sens contraire). C'est comme si l'on filmait sur l'autoroute une voiture depuis une autre voiture qui roulerait à la même vitesse, le déplacement relatif entre les deux voitures semblerait alors nul et c'est la route qui paraîtrait se déplacer. Pour continuer avec cet exemple simple, il s'agit donc bien de s'assurer que la vidéo soit stabilisée par rapport à l'autoroute elle-même, pour identifier les déplacements de la voiture sur l'autoroute et non l'inverse.

Comme expliqué dans le chapitre "État de l'art", il fut nécessaire d'implémenter notre propre programme de stabilisation. Pour ce faire, nous avons essayé d'exploiter au mieux ce qui se renfermait déjà dans la vaste bibliothèque Matlab. Notre méthode se base majoritairement sur une stabilisation utilisant la correspondance d'entités ponctuelles (*Point Feature Matching*) [32].

Comme expliqué dans cette ressource Matlab, l'idée est de traquer et de suivre un élément facilement identifiable et reconnaissable dans l'image et de l'utiliser comme point d'ancrage pour éliminer les quelconques mouvements qui lui seraient liés et ainsi stabiliser la vidéo. Dans le cadre de la LSPIV, on peut se permettre d'identifier des éléments reconnaissables et proches de l'eau sur les berges, une pierre, une branche ou un objet de référence déposé préalablement sur la berge.

Pour stabiliser nos vidéos, deux étapes distinctes sont nécessaires. Premièrement, identifier la déformation géométrique entre chaque frame successive. Deuxièmement, corriger les images grâce aux déformations enregistrées à la première étape pour en faire une vidéo stabilisée.

Identification des déformations

Le but ici est de trouver un système capable de reconnaître des points identifiables automatiquement pour pouvoir suivre leur évolution et leur distorsion éventuelle au fil des images afin de corriger les mouvements du drone, et de surcroît, de la caméra. Dans notre cas, nous avons utilisé des damiers de 4 cm de côté imprimé sur des feuilles A4 et qui servaient de *Ground Reference Points* (GRP's). La prochaine étape était donc d'implémenter une fonction capable d'identifier des points qu'elle pourrait ensuite reconnaître sur l'image suivante, et ainsi de suite. Pour maximiser les chances que la fonction identifie les mêmes points d'une image à l'autre, on a préféré développer notre fonction pour qu'elle détecte les coins d'éléments reconnaissables, par exemple les coins d'un carré du damier.

Une fois ces éléments repérés sur la première image, il faut pouvoir les "*traquer*" sur les suivantes pour enfin pouvoir calculer la distance qui les sépare d'une image à l'autre. Pour ce faire, nous avons utilisé une autre fonction Matlab 'vision.PointTracker System object' [33], qui traque des points sur des images en utilisant l'algorithme de Kanade-Lucas-Tomasi (KLT). Cette fonction marche particulièrement bien lorsque les objets à traquer ne changent pas de forme. Elle pourrait donc être affectée par des variations d'illumination de la scène, de rotation brusque, etc. Dans notre cas, le fait que nos images soient espacées temporellement de 41,667 ms réduit considérablement le risque qu'une variation brusque d'un de ces éléments perturbe le programme, d'autant plus que notre drone est déjà doté de systèmes de stabilisation de son vol et de sa caméra.

Correction des déformations

Lorsque les éléments ont été repérés et traqués d'une image à l'autre, leurs déplacements relatifs par rapport à la première image ont été enregistrés. La prochaine étape consiste donc à corriger ces déformations afin de stabiliser la vidéo. Pour ce faire, nous utilisons la fonction 'fitgeotrans' [34] qui estime une application projective en minimisant le déplacement des points traqués. Nous utilisons une projection affine, afin que la transformation reste cohérente, même avec des erreurs de traquage de certains points [31].

4.2.2 Quantification d'erreur de la méthode de stabilisation

Pour quantifier l'efficacité de notre méthode de stabilisation, nous pouvons effectuer une analyse PIV sur une frame de deux images séparées arbitrairement d'une seconde et comparer leurs résultats respectifs lorsque les images ne sont pas stabilisées, ou à l'inverse, lorsqu'elles le sont. Pour simuler le plus objectivement possible le cas d'une rivière, nous avons réalisé une analyse PIV sur une bâche de couleur similaire à celle des cours d'eau que nous avons étudiés pour ce travail. L'idée ici sera donc de vérifier qu'aucun mouvements ne soient détectés sur les images stabilisées.

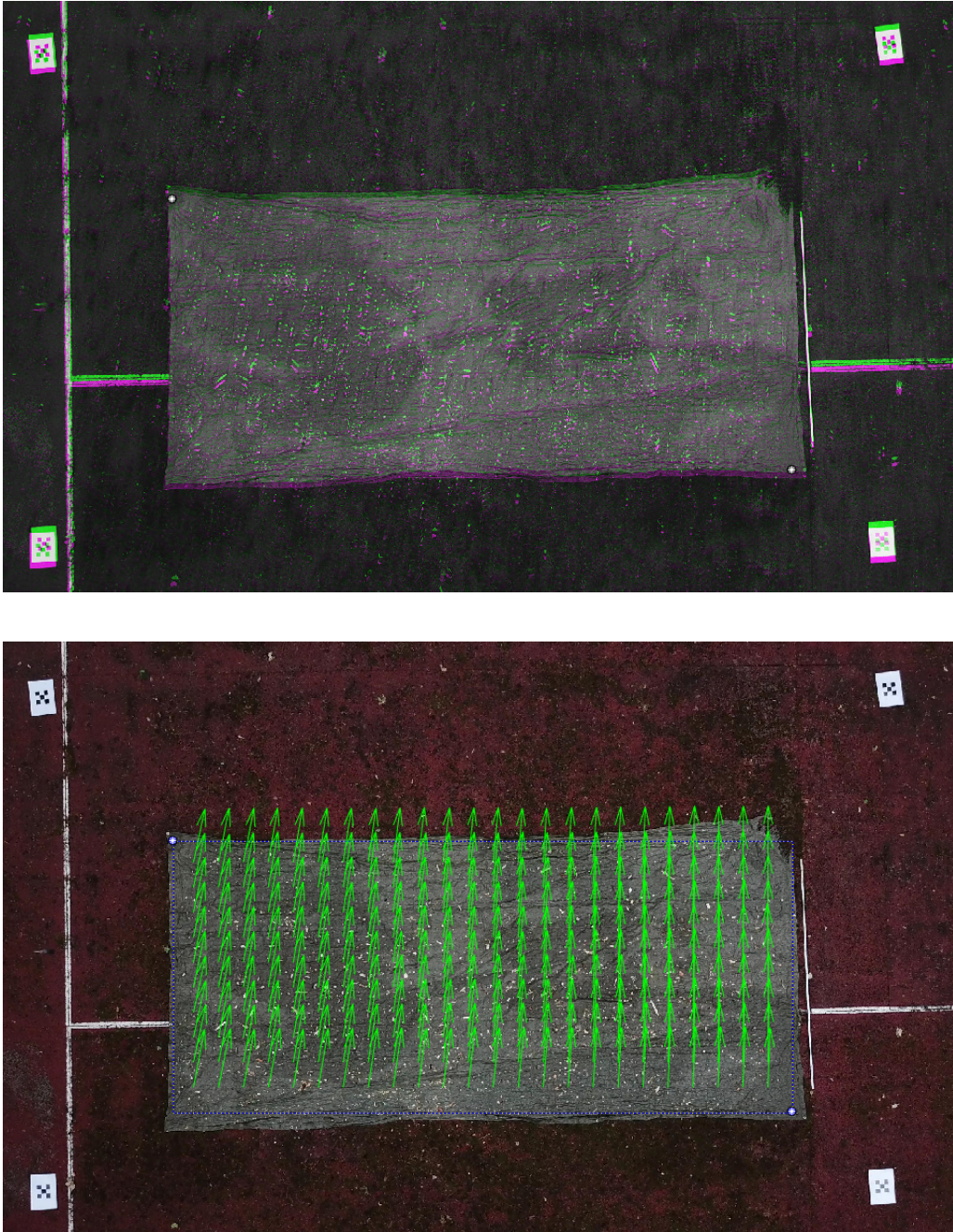


FIGURE 4.8 – Mouvements de deux images **non stabilisées**, séparées temporellement d'une seconde et leurs résultats PIV correspondants (vitesse moyenne de $0,1002 \text{ m/s}$)

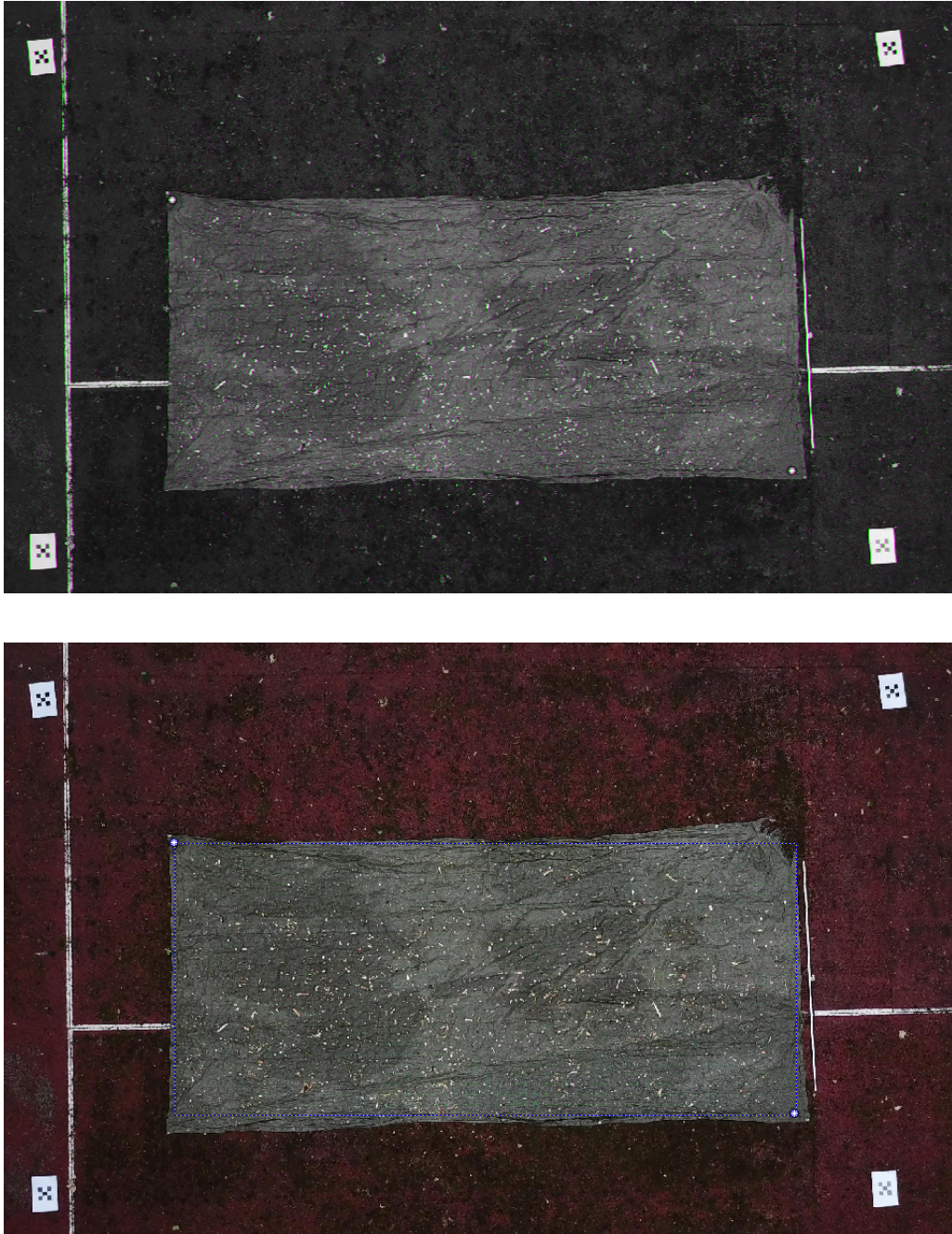


FIGURE 4.9 – Mouvements de deux images identiques à celles de la figure 4.8 mais cette fois-ci **stabilisées** et leurs résultats PIV correspondants (vitesse moyenne de $0,6 \times 10^{-3} \text{ m/s}$).

Sur la figure 4.9, l'absence (visuelle) de vecteurs de vitesse témoigne de l'efficacité de la stabilisation. En réalité, des vecteurs de vitesses existent, mais leurs magnitudes très faibles ne permettent pas de les apercevoir sur la photo. En extrayant numériquement les résultats, on observe heureusement que la vitesse moyenne correspondante n'excède pas $0,6 \times 10^{-3} \text{ m/s}$, valeur qui nous permet de négliger les mouvements du drone après stabilisation des vidéos.

5

Vers la LSPIV autonome

5.0.1 Généralités et méthodologie

Devoir jeter des traceurs dans l'eau est un peu contradictoire au caractère non-intrusif de la LSPIV mobile. On s'est donc interrogé sur la fiabilité de cette méthode si l'on analysait des séquences d'images sans traceurs.

Sans traceurs ajoutés préalablement et manuellement dans le cours d'eau, l'analyse PIV va dès lors se baser sur des éléments reconnaissables à la surface de l'eau, comme des débris de bois, des feuilles, des particules d'écumes ou encore des vaguelettes. Voici, a priori, une liste non exhaustive des problèmes que l'on pourrait rencontrer lors d'une analyse d'images qui ne comportent pas de traceurs ajoutés :

- La *taille* d'un débris flottant à la surface peut influencer l'exactitude avec laquelle il suit le cours d'eau. En effet, si l'on imagine un bout de bois d'une taille relativement importante, son inertie l'empêchera de suivre avec précision les mouvements qui s'opèrent en surface. On assistera à un décalage entre sa vitesse et sa direction avec celle de l'écoulement. Inversement, un débris trop léger ou trop petit peut subir l'influence de facteurs extérieurs comme le vent et adopter des vitesses non représentatives du cours d'eau dans lequel ils se trouvent.
- La *variabilité* temporelle des traceurs naturels perturbe l'analyse des vitesses. C'est notamment le cas de particules d'écumes qui se désagrègent dans le temps ou qui finissent par disparaître. Ceci peut mener à des incohérences d'analyse puisque, après avoir identifié une particule d'écume en surface, l'analyse PIV va tenter de suivre ses déplacements image après image. Cependant, si cette particule d'écume évolue en forme ou en taille, ou même disparaît, il est possible que le programme croie la reconnaître en la confondant avec une particule différente et plus éloignée, amenant des aberrations dans les résultats.
- Le *manque d'éléments identifiables* en surface. Si la rivière suit calmement son cours avec de faibles vitesses et une surface plane sans remous, et que simultanément aucun débris flottant ne traverse sa section, l'analyse PIV peinera à trouver des éléments sur lesquels baser sa recherche de déplacement. C'est par exemple le cas de petits cours d'eau avec de faibles vitesses, là où aucun remous n'est observable.
- Une *luminosité* trop importante qui pourrait provoquer des zones de reflets ou un contraste élevé entre des zones d'ombres et des zones éclairées, provoquant ainsi des zones d'inconnues ou erronées dans l'analyse PIV.

Voici ci-dessous les étapes à effectuer pour réaliser une analyse LSPIV que nous qualifions ici "d'autonome", c'est-à-dire une prise d'images réalisées à l'aide d'un drone et qui ne présente pas de dépendance à un ensemencement préalable du cours d'eau étudié.

1. Prise d'images par drone

2. **Identification** a posteriori d'éléments naturels (pierres, végétation, débris de bois, etc.) pouvant faire usage de GRP's (*Ground Reference Points*)
3. **Stabilisation** de la séquence d'images
4. **Application de filtres** pour maximiser la visibilité des traceurs
5. **Analyse PIV** sur des frames d'images corrigées
6. **Post-treatment** : validation des vecteurs
7. **Conversion** de la vitesse en *pixels/frame* vers une vitesse en *m/s*

Bien que fort similaire à la méthodologie utilisée dans le cas d'une analyse LSPIV conventionnelle, elle diffère par l'absence des étapes de pose des GRP's et d'ensemencement de la rivière. Il faut cependant rester attentif à la dernière étape de conversion des pixels vers leur distance métrique correspondante. En effet, afin de réaliser cette conversion, il convient de disposer d'une distance de référence connue et la plus proche possible du niveau d'eau. Cette dernière contrainte pourrait entacher le caractère tout à fait non-intrusif et autonome de cette technique, en obligeant l'utilisateur à venir déposer sur le site un objet d'une distance connue.

Dans certains cas, une analyse LSPIV sur des images qui ne comportent pas de traceurs peut donner des résultats encourageants, moyennant le cumul de quelques facteurs réunis que nous détaillerons dans le chapitre 6 : Analyse de résultats : comparaison aux méthodes traditionnelles.

5.0.2 Analyses existantes

Certains chercheurs se sont déjà penchés sur la LSPIV dans le cas d'analyse non ensemencée. On parlera dans ce paragraphe de l'article de Benetazzo, Gamba et Barbariol : "*Unseeded Large Scale PIV measurements accounting for capillary gravity waves phase speed*" ([35]). Dans cet article sont détaillés les essais menés sans ensemencement dans un canal rectiligne à section rectangulaire en béton. On peut notamment y lire que les résultats obtenus par LSPIV (après correction et post-traitement) diffèrent de 5% et de 2% par rapport aux mesures traditionnelles effectuées à l'aide de l'appareil 'Vectrino' (Nortek®), respectivement lors de la première et deuxième expérience. De plus, la direction des vecteurs de vitesses est cohérente avec celle observée dans le cas d'écoulements typiques en canal rectangulaire.

5.0.3 Calibration selon la hauteur et l'ouverture

Comme expliqué au début de ce chapitre, la dernière étape d'une analyse LSPIV doit forcément impliquer une conversion des distances (ou vitesses) en pixels vers ses homologues métriques. Or, la méthode utilisée que nous avons utilisée était de placer un objet de distance connue au niveau du plan de l'eau pour ensuite assurer la conversion. Il faudrait idéalement pouvoir réaliser cette étape automatiquement, sans forcément devoir placer un objet sur le plan d'eau. Une solution serait d'assurer la calibration grâce à la hauteur du drone. En effet, en effectuant une fois le travail de conversion de la distance métrique représentée par un pixel en fonction de la hauteur du drone on pourrait bénéficier d'une calibration échelonner pour chaque hauteur. La figure 5.1 illustre ce propos.

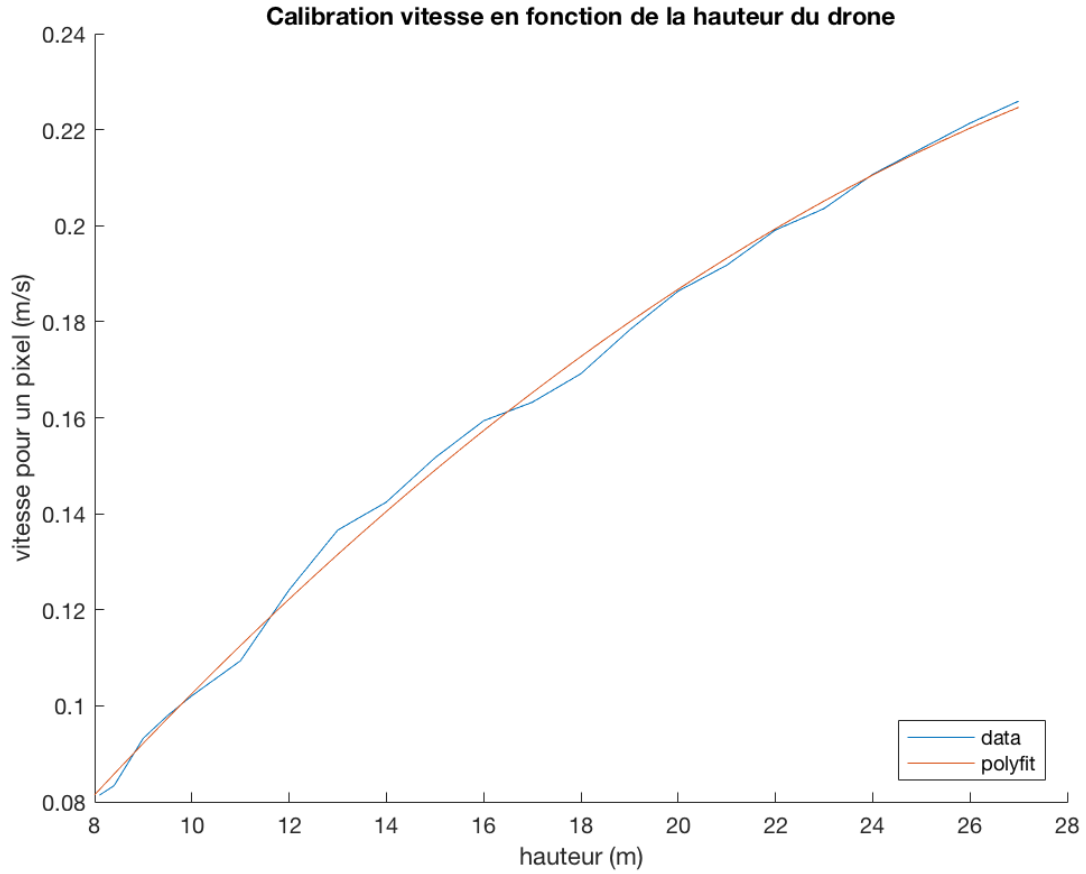


FIGURE 5.1 – Vitesse en m/s en fonction de la hauteur, et dans le cas d'un déplacement de 1 pixel entre deux images.

Cependant, le drone que nous avons utilisé (DJI Mavic Pro®) indique précisément (tous les 10 *cm*) les hauteurs jusqu'à 10 mètres, puis ne les indiquent plus que tous les mètres. De plus, il informe sur une hauteur relative par rapport à l'emplacement de décollage, peu pratique lorsque l'on aimerait connaître une hauteur basée sur la distance par rapport au plan d'eau. Ces deux éléments nous ont donc contraints à poursuivre avec une calibration basée sur un objet de référence placé au niveau du plan d'eau.

6

Vers l'estimation du débit

Ce travail se penche sur la détermination des vitesses superficielles des rivières à l'aide de vidéos prises par un drone. Cependant, dans la majorité des cas d'études en hydrologie, ce sont les vitesses moyennes sur une section d'un cours d'eau qui sont les plus utiles. En effet, si l'on dispose de ces vitesses, de la bathymétrie et de la hauteur d'eau (ces deux derniers éléments nous informent sur $A[m^2]$, l'aire de la section transversale de l'écoulement) il est dès lors possible de calculer le débit $[m^3/s]$, donnée la plus souvent recherchée dans le cadre d'études hydrauliques. Cependant, il n'est pas toujours aisé de connaître ces éléments, à savoir la bathymétrie, la hauteur d'eau et les vitesses moyennes.

6.1 Bathymétrie et hauteur d'eau

Dans le cas de rivière au lit stable, il est envisageable de calculer la géométrie qu'une seule fois par section étudiée, et disposer d'une échelle limnimétrique pour déterminer la hauteur d'eau. Connaissant ces deux données, on peut donc calculer l'aire de la section transversale de l'écoulement ($A[m^2]$).

Cependant, il serait intéressant de pouvoir rester dans la lignée "non intrusive" de la LSPIV mobile par drone et réussir à déterminer l'aire d'une section transversale de l'écoulement de manière non intrusive également. Trois étudiants de l'Université Catholique de Louvain travaillent à cet effet, parallèlement à notre mémoire. Deux d'entre eux se concentrent sur la mesure du niveau d'eau par photogrammétrie en laboratoire, alors que le troisième effectue les mêmes recherches en milieu naturel. Pour autant que l'on connaisse la bathymétrie d'une rivière (en une ou plusieurs sections de celle-ci), il serait dès lors possible de déterminer l'aire de la section lors des mesures grâce à cette hauteur d'eau calculée par photogrammétrie. Pour calculer le débit, il ne nous manque plus que les vitesses moyennes, que nous pouvons extrapolées de nos vitesses de surface.

6.2 De la vitesse superficielle à la vitesse moyenne

Comme expliqué précédemment, pour pouvoir estimer le débit de manière non intrusive, savoir passer de la vitesse en surface à la vitesse moyenne est nécessaire. Quelques recherches se sont déjà penchées sur ce sujet, avec l'élaboration d'un coefficient réducteur, appelé **index de vitesse**, pour estimer ce passage de la vitesse superficielle à la vitesse moyenne. Cependant, il faut garder à l'esprit que ces coefficients résultent des conclusions d'études empiriques, qui n'expliquent pas l'influence de la végétation, de la morphologie du lit ou de la rugosité sur

l'ensemble du périmètre mouillé, du vent et de ses effets sur la surface libre, des turbulences provoquées par des obstacles dans le cours d'eau, etc. Comme on peut l'imaginer, tous ces facteurs peuvent avoir une influence sur les vitesses résultantes, aussi bien superficielles que moyennes.

De nombreuses études arrivent toutefois à des conclusions bien semblables concernant l'**index de vitesse** qui permet le passage des vitesses superficielles aux vitesses moyennes. L'index de vitesse se définit de la sorte :

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

De nombreuses études ont été menées afin de déterminer le plus précisément possible cet index de vitesse. Alexandre Hauet fait le point sur ces études dans sa thèse "Estimation de débit et mesure de vitesse en rivière par Large-Scale Particle Image Velocimetry" [5]. Il référence notamment les travaux de recherche de Costa et al. (2000), Cheng et al. (2004) et Costa et al. (2006) qui ont conclu en une valeur empirique de l'index de vitesse α égale à 0,85. Ils affirment également que leurs valeurs convergent vers des profils verticaux de vitesses de type logarithmique, pour autant qu'il n'y ait pas de courant secondaire trop important.

Nous nous sommes donc demandé si nous pouvions trouver un index de vitesse du même ordre de grandeur. Pour ce faire, nous avons relevé trois profils verticaux de vitesses pour en comparer leur vitesse de surface et moyenne. Un profil fut mesuré à Meeffe, et deux autres en deux endroits d'une même section de la Lasne à Rosière. Comme illustré sur la Figure 6.1, on obtient un index de vitesse α égal à 0.7855, 1.0367 et 0.9166, respectivement de gauche à droite.

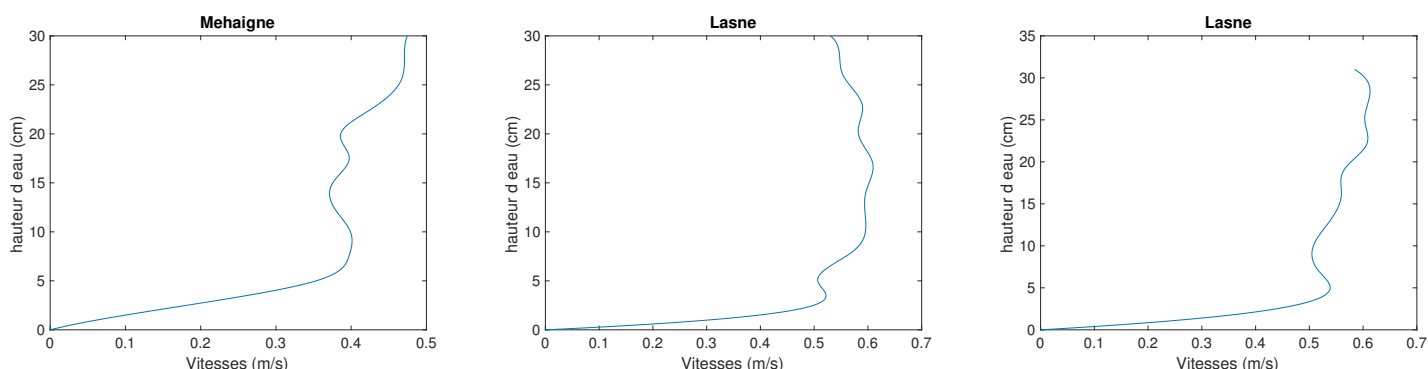


FIGURE 6.1 – Profils verticaux de vitesses de la Mehaigne à Meeffe (figure de gauche, $\alpha = 0,7855$), de la Lasne à Rosières (figure du milieu : mi-section ($\alpha = 1,0376$); figure de droite : 1,5 m de la rive gauche ($\alpha = 0,9166$))

On observe que les deux profils de la Lasne ont un **index de vitesse** élevé, qui se traduit par une vitesse moyenne plus proche et semblable à la vitesse de surface. Ceci pourrait s'expliquer par la présence d'une dalle en béton dans le fond de la section où les deux profils ont été mesurés. En effet, l'écoulement au droit de cette dalle est moins freiné par la rugosité, plus proche de celle d'un canal artificiel. A l'inverse, le profil sur la Mehaigne est plus représentatif des pierres et roches qui formaient son lit, avec une valeur de α plus faible et visuellement un profil qui témoigne des vitesses plus faibles près du lit, freinées par la morphologie du lit plus hétérogène.

Il existe un autre **index de vitesse** établissant une relation entre les vitesses d'une même section et de même hauteur, et donc inversement proportionnel à la distance aux berges. Ce coefficient témoigne dans certains cas d'un profil logarithmique horizontal, par rapport aux berges. Il est cependant extrêmement difficile de le caractériser par une valeur moyenne fixe dans le cas d'études en rivières naturelles, tant les berges et la morphologie du lit des cours d'eau

varient d'un site à l'autre. Pour visualiser plus clairement ce phénomène, la figure 6.2 représente les vitesses en fonction de leur distance à la paroi, calculées par Guillaume Rion dans un canal artificiel. On observe clairement que les vitesses sont plus faibles au plus elles sont proches des parois, mais surtout que les vitesses superficielles en sont grandement impactées.

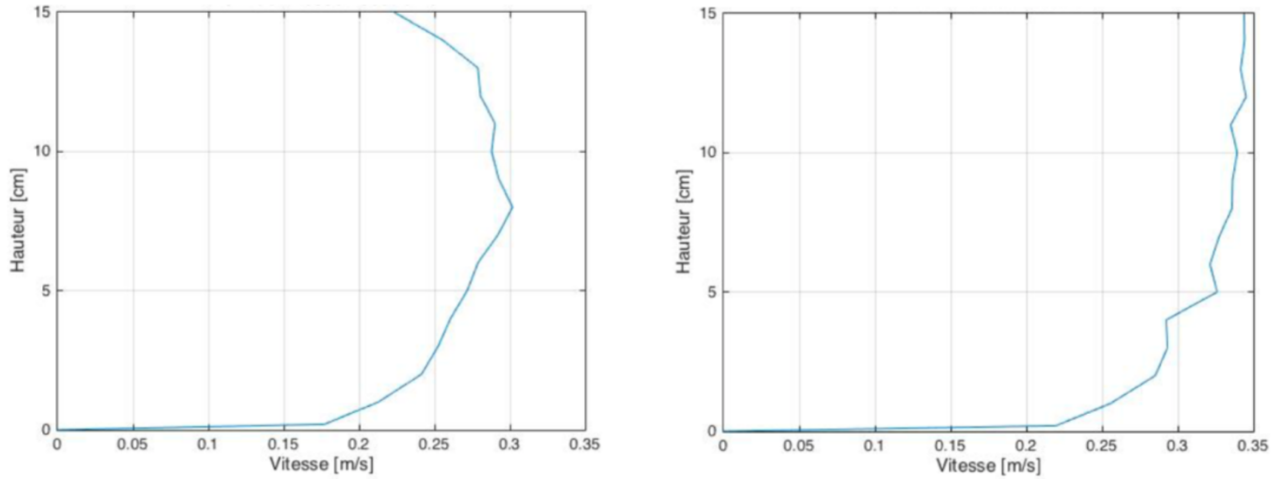


FIGURE 6.2 – Profils verticaux de vitesses en canal artificiel. A gauche : profil au bord d'une paroi (10cm) ; à droite : profil à 30cm de la paroi. [22]

Nous concluons ce chapitre en rappelant que la méthode LSPIV, qui fait l'objet de ce travail, doit se développer en parallèle d'une méthode non intrusive plus globale d'hydrométrie, dans laquelle il faut non seulement estimer les vitesses de surface, mais également la hauteur d'eau, la bathymétrie ainsi qu'un index de vitesse.

7

Analyse de résultats

7.1 Méthodologie

Déterminer les vitesses superficielles en rivière à l'aide d'images enregistrées par un drone est une chose, savoir évaluer leur fiabilité en est une autre. Grâce aux données de débits et hauteurs d'eau publiées en continu par le Service Public de Wallonie (SPW), nous pourrions comparer nos résultats de vitesses superficielles avec les débits mesurés par le SPW. Cependant, pour obtenir une mesure de débit à partir de nos résultats de vitesses en surface, il faut être en possession de la bathymétrie et de la hauteur d'eau de la section étudiée ainsi que de connaître le rapport qui lie les vitesses de surface aux vitesses moyennes. Ces trois conditions peuvent chacune apporter leur part d'incertitudes et leurs combinaisons ne permettraient pas de bénéficier d'une comparaison fiable pour nos mesures de vitesses par drone.

Dans le cadre de ce mémoire, il a donc été décidé de réaliser des mesures sur des rivières naturelles non-navigables et d'évaluer leur exactitude en les comparant à des mesures effectuées au courantomètre. L'appareil de mesure OTT MF pro est un courantomètre à induction magnétique pour la mesure de vitesse par point dans les ruisseaux, les rivières, les canaux et les canalisations. Ce système nécessitant peu de maintenance, constitué d'un capteur compact et léger et d'un dispositif de commande robuste fournit des données fiables même dans des conditions difficiles, comme on peut le lire sur le descriptif de l'appareil [36]. Il a donc été nécessaire de mesurer les vitesses de surface sur un maximum de points sur une même section, en y inscrivant leurs positions respectives à l'aide d'un mètre déroulant tendu d'un bout à l'autre de la rivière. En prenant soin de placer des objets reconnaissables pour délimiter les extrémités du mètre déroulant, on a donc pu superposer avec précision les résultats issus de l'analyse LSPIV et ceux issus du courantomètre à induction magnétique.

Pour information, les étapes à suivre pour mesurer des vitesses superficielles à l'aide de la LSPIV par drone sont détaillées dans l'annexe B.



FIGURE 7.1 – Prise de mesure à intervalles réguliers le long d'une section avec le courantomètre OTT MF Pro

Une fois l'analyse LSPIV réalisée sur le logiciel PIVlab, il est possible d'extraire les résultats d'une ligne tracée sur le programme, comme illustré sur la figure 7.2.



FIGURE 7.2 – PIVlab : menu "*Extractions*". Au centre des deux encadrés rouges se trouvent les repères placés aux extrémités des mesures effectuées avec le courantomètre, afin de comparer les résultats du courantomètre et de l'analyse PIV sur des sections de même dimension.

7.2 Résultats : vitesses en surface

Dans cette section, nous développerons et analyserons les résultats obtenus en appliquant notre méthode sur 8 rivières différentes. Nous ne présenterons ici que les résultats optimaux, et nous développerons les différents paramètres utilisés dans la section 7.2.6. Il faut toutefois préciser que nous avons utilisé les mêmes paramètres pour toutes les rivières, sans optimiser ceux-ci individuellement, afin de démontrer la robustesse de la méthode que nous avons développée.

7.2.1 Analyse de graphes

La figure 7.3 montre un exemple type de résultat, obtenu à partir de l'analyse de la Mehaigne, à Meeffe. Le graphe représente les vitesses obtenues par LSPIV et avec le MF Pro le long de la section de la rivière, représentée par la ligne mauve de sur la Figure 7.2. Nous pouvons observer plusieurs points bleus pour une même abscisse, ce qui s'explique par le fait que nous avons effectué plusieurs mesures au MF Pro en chaque point, afin d'observer également la variance de MF Pro. Pour comparer ces mesures, il est nécessaire de tracer une courbe (en bleu) qui est une interpolation linéaire à partir des moyennes des mesures à chaque distance.

Ce graphe permet donc d'évaluer qualitativement les performances de notre méthode. Nous pouvons y observer que la LSPIV tend à sur-estimer la vitesse en surface par rapport aux mesures du courantomètre.

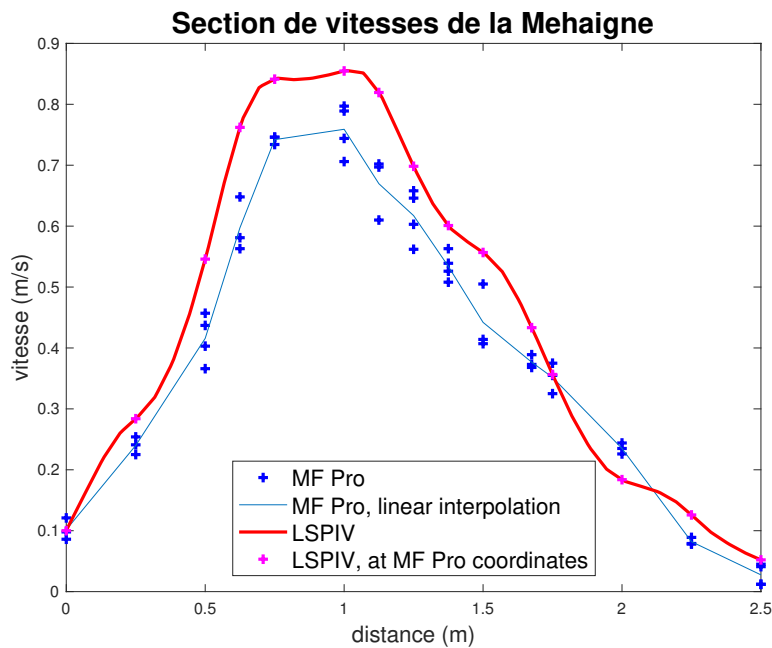


FIGURE 7.3 – Résultats de vitesses pour une section de la Mehaigne. L'axe des abscisses représente la distance entre le point de mesure et la berge gauche de la rivière. La ligne bleu représente une interpolation linéaire des vitesses du MF pro, calculée à partir des moyennes en chaque abscisse. Les croix magenta représente la vitesse calculée par la LSPIV, pour les mêmes abscisses que celles du MF pro

Cette tendance se confirme en observant les graphes de la Figure 7.4, représentant les résultats obtenus sur les 8 rivières. Il est toutefois nécessaire de quantifier cette erreur. Pour cela, nous allons d'abord étudier différentes pistes de mesure de cette dernière.

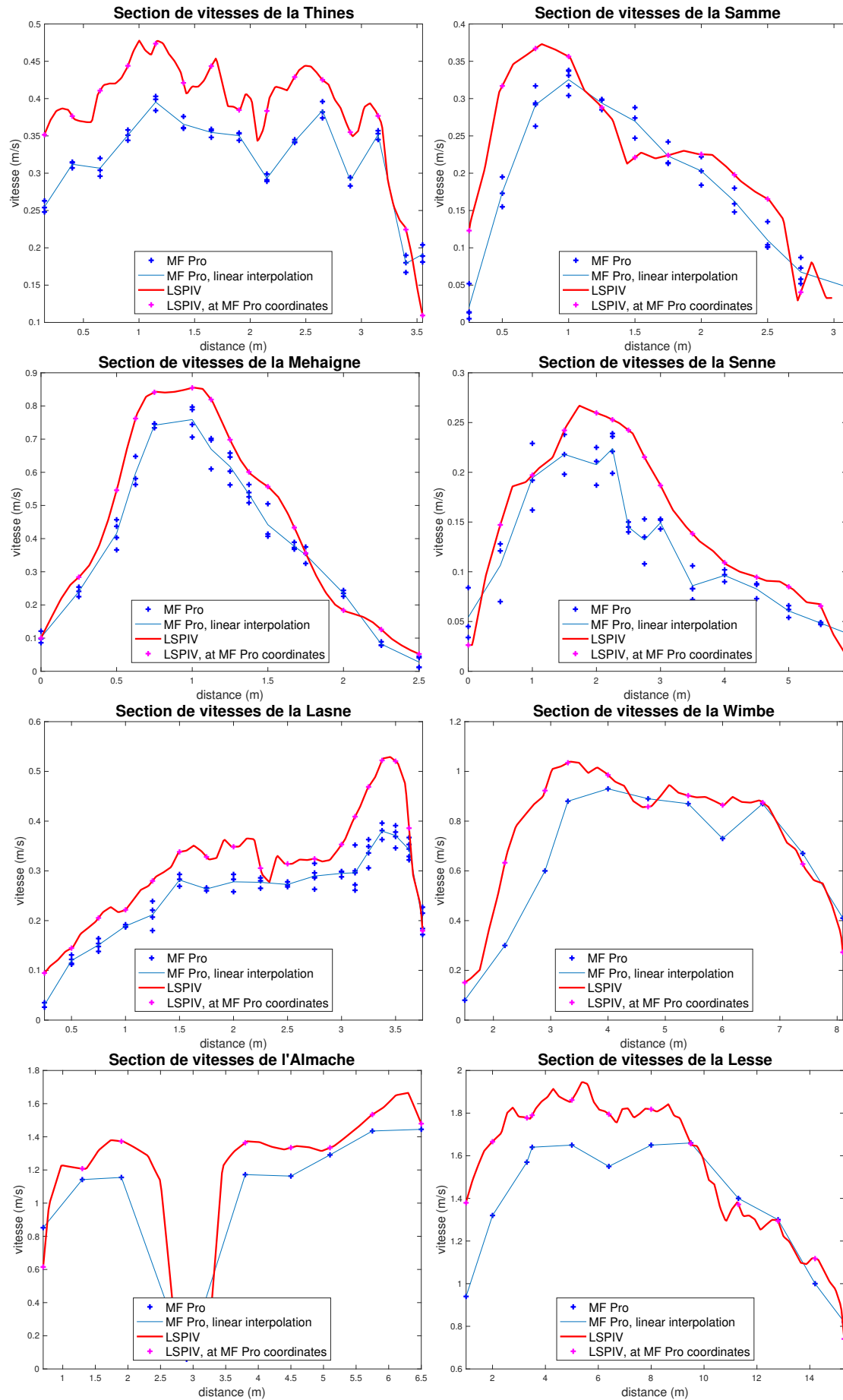


FIGURE 7.4 – Résultats obtenus pour 8 rivières, avec courantomètre MF Pro et LSPIV

7.2.2 Mesure de l'erreur

Pour quantifier l'erreur entre la courbe LSPIV et les points du MF pro, il n'existe pas de solution unique.

1. La première serait de regarder l'**erreur maximale** entre les deux courbes. L'erreur relative serait alors :

$$e_1 = \max_{\forall x \in D} \frac{|v_{LSPIV}(x) - v_{MFPro}(x)|}{v_{MFPro}(x)} \quad (7.1)$$

où D est l'ensemble des distances pour lesquelles nous avons des mesures avec le MF Pro. Toutefois, sachant que pour la conversion en débit, nous utiliserons l'ensemble des mesures de la section, cette erreur n'est pas très représentative de l'erreur que nous risquons de transposer au débit. Nous ne l'utiliserons donc pas dans la suite de cette analyse.

2. Une autre solution serait alors de calculer la **moyenne des différences** entre les deux courbes, pour toutes les distance du MF Pro. L'erreur relative serait alors :

$$e_2 = \left[\sum_{\forall x \in D} |v_{LSPIV}(x) - v_{MFPro}(x)| \right] \cdot \frac{1}{N \cdot \mu_{v_{MFPro}}} \quad (7.2)$$

où le $\mu_{v_{MFPro}}$ est la moyenne des vitesses calculées par le MF Pro et N est le nombre de distances x .

3. La troisième mesure est la **différence des moyennes**, ce qui donne en erreur relative :

$$e_3 = \frac{\mu_{v_{MFPro}} - \mu_{v_{LSPIV}}}{\mu_{v_{MFPro}}} \quad (7.3)$$

Il n'y a expressément pas de valeur absolue ici, afin que cette erreur nous montre également si la vitesse moyenne est ou dessus ou en dessous de la vitesse réelle.

4. La quatrième consiste à calculer l'aire comprise entre les deux courbes (la courbe LSPIV et l'interpolation linéaire du MF Pro), à savoir l'intégrale de la différence des deux courbes, que nous appellerons l'**erreur d'intégrale**. Ceci nous donne, en erreur relative :

$$e_4 = \frac{|\int_0^L v_{LSPIV}(x) - v_{MFPro}(x) dx|}{\int_0^L v_{MFPro}(x) dx} \quad (7.4)$$

où L est la longueur totale de la section. Cette erreur donne une idée de celle qu'on pourrait obtenir en extrapolant un débit, puisqu'elle correspond à l'erreur d'un débit obtenue sur une section avec une hauteur constante et connue.

Le tableau 7.1 présente les différentes erreurs obtenues pour chaque rivière, en pourcentage. En observant la **différence des moyennes**, nous confirmons que la méthode a bien tendance à sur-estimer les vitesses, où du moins si nous nous fions aux résultats du courantomètre comme étant ceux de référence.

Rivière	moyenne des différences	différence des moyennes	différence des intégrales
la Thines	22.23	-18.76	20.16
la Samme	25.62	-16.89	15.86
la Mehaigne	18.23	-16.53	15.30
la Senne	29.09	-23.60	23.33
la Lasne	26.07	-25.21	25.15
la Wimbe	18.26	-12.39	13.70
l'Almache	11.80	-6.92	16.60
la Lesse	12.13	-10.71	9.81
Moyenne	20.43	-16.38	17.49

TABLE 7.1 – Erreurs, en pourcentage, des différentes rivières

7.2.3 Sur-estimation de la vitesse

Dans ce paragraphe, nous développerons les hypothèses pouvant expliquer le shift observable entre les deux courbes. En effet, nous remarquons que les courbes ont toujours des formes très similaires, mais leur échelle est différente.

1. Il se pourrait que les traceurs n'aient pas la même vitesse que l'écoulement. Cela n'explique pas le comportement que nous observons car il est impossible que les copeaux aillent plus vite que l'écoulement.
2. Il pourrait y avoir un problème de calibration, cependant nous avons toujours veillé à ce que la référence métrique soit au niveau de l'eau, afin d'éviter toute approximation lors de cette étape.
3. Il se pourrait qu'il y ait une erreur dans la méthode, et qu'elle ait tendance à surestimer le nombre de pixels de déplacement. C'est pour vérifier cette possibilité que nous avons compté manuellement en terme de pixels un certain nombre de déplacement de traceurs sur chaque rivière. Nous avons à chaque fois obtenus exactement les mêmes résultats que l'analyse.
4. Le problème pourrait être que le MF Pro est moins stable en surface, et qu'il ne donne pas une vitesse de surface exacte, mais une vitesse inférieure.
5. A cause de ce manque de stabilité, il était nécessaire de placer le MF Pro un peu en dessous de la surface de l'eau, ce qui pourrait également expliquer que les vitesses ne sont pas totalement similaires.

Ce shift de vitesse devrait faire l'objet d'une étude plus détaillée pour en trouver la cause exacte, mais il est intéressant de le quantifier, car s'il est constant en toute situation, nous pouvons appliquer un **coefficient de correction** à toutes les rivières et obtenir ainsi une estimation précise des vitesses de surface.

7.2.4 Coefficient de correction

Dans ce paragraphe, nous allons estimer un coefficient de correction multipliant les vitesses de surface trouvées par LSPIV.

La Figure 7.5 représente les différentes erreurs, en pourcentage, en fonction du coefficient de correction utilisé. Il est intéressant d'y observer que les minima des trois erreurs sont proches les uns des autres, ce qui montre que les courbes ont bien une forte corrélation lorsque l'on rajoute un coefficient correcteur.

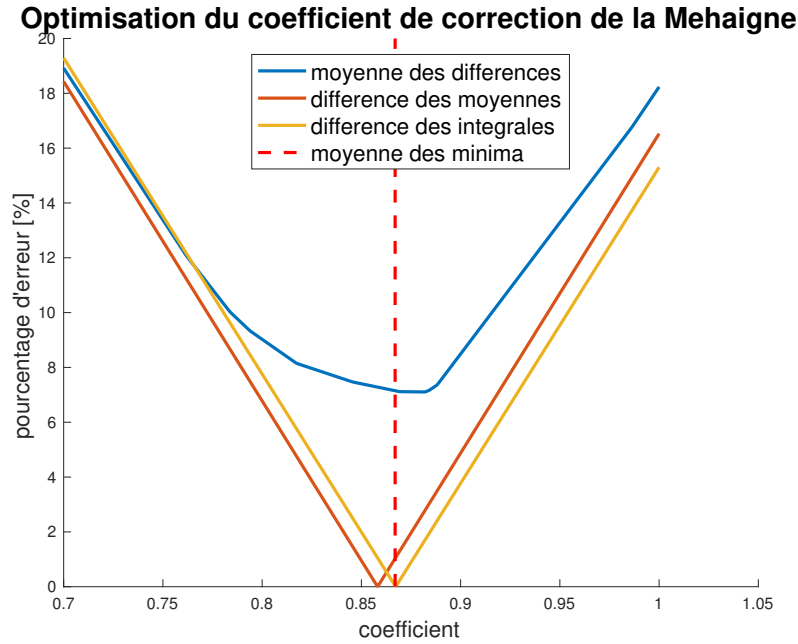


FIGURE 7.5 – Optimisation du coefficient de correction sur la Mehaigne. Pour la **différence des moyennes**, nous avons utilisé la valeur absolue de cette erreur, à savoir $\frac{|\mu_{v_{MFPro}} - \mu_{v_{LSPIV}}|}{\mu_{v_{MFPro}}}$

La Figure 7.6 montre le changement de l'erreur d'intégrale, en fonction du coefficient de correction, pour chacune des rivières. On peut y observer que les minima sont concentrés autour de 0.86. Le tableau 7.2 présente les coefficients optimaux pour chaque rivière, ainsi que le coefficient minimisant la moyenne des erreurs.

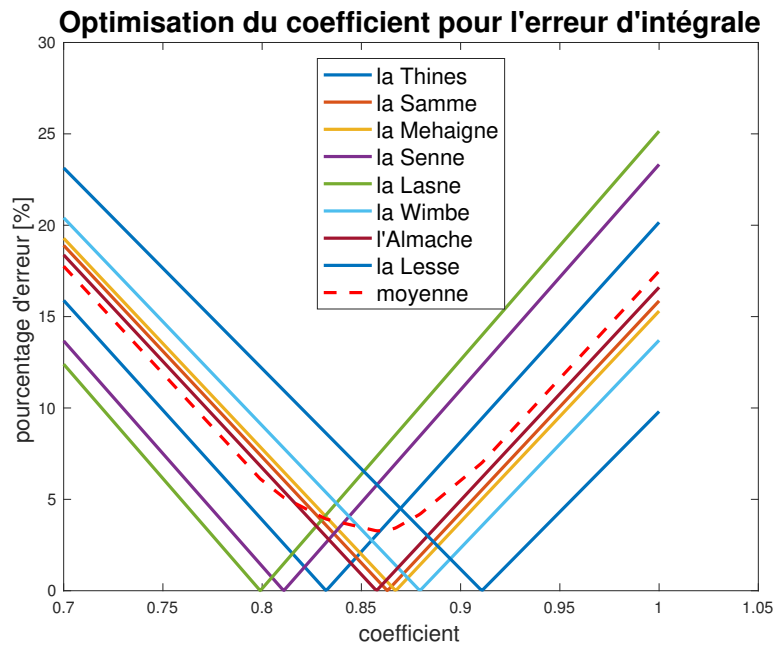


FIGURE 7.6 – **Erreur d'intégrale** en fonction du coefficient de correction, pour chacune des rivières. La courbe de moyenne de ces erreurs est en rouge pointillé.

Rivière	Thines	Samme	Mehaigne	Senne	Lasne	Wimbe	Almache	Lesse	Moyenne
Optimal	0.84	0.86	0.86	0.81	0.80	0.89	0.94	0.90	0.86

TABLE 7.2 – Coefficients optimaux de chaque rivière

Comme il convient de calculer le minimum pour les deux autres erreurs, la Figure 7.7 présente les courbes d’erreurs des trois différentes erreurs.

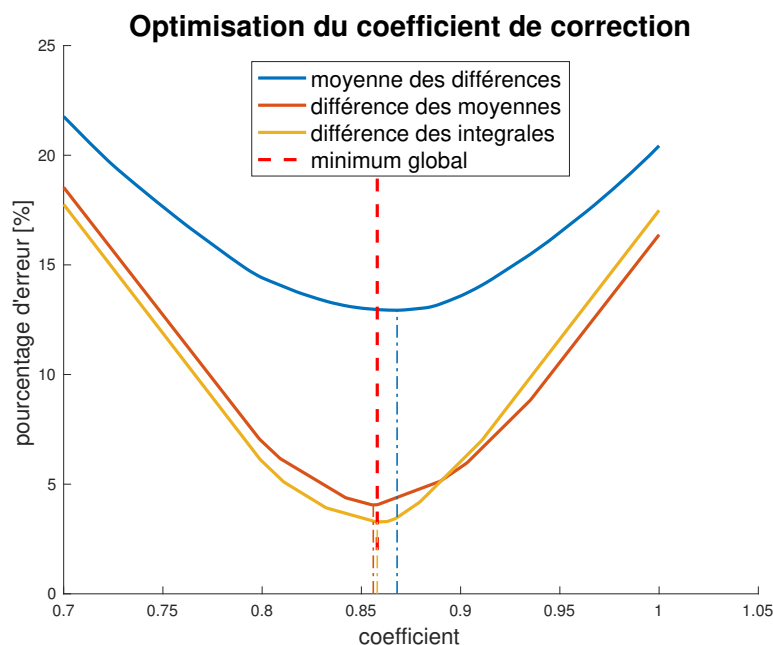


FIGURE 7.7 – Courbe représentant la moyenne des erreurs de toutes les rivières, en fonction du coefficient de correction. Les minima sont affichés en pointillé et la ligne pointillée rouge représente le minimum global de la moyenne des trois courbes

A partir de ces trois courbes, nous avons finalement pu calculer un coefficient de correction de 0.8353, nous donnant une moyenne d’erreur d’intégrale de 3.28% avec une déviation standard de 2.57%. L’ensemble des erreurs sont disponibles sur le Tableau 7.3.

La Figure 7.8 présente les graphes obtenus lorsque le coefficient de correction est appliqué.

Rivière	moyenne des différences	différence des moyennes	différence des intégrales
la Thines	9.08	-1.89	3.10
la Samme	22.07	-0.29	0.59
la Mehaigne	7.28	0.02	1.07
la Senne	17.22	-6.05	5.81
la Lasne	11.21	-7.43	7.38
la Wimbe	17.49	3.57	2.44
l’Almache	10.06	8.26	0.04
la Lesse	9.29	5.01	5.79
Moyenne	12.96	0.15	3.28
Déviati on standard	4.92	5.02	2.57

TABLE 7.3 – Erreurs, en pourcentage, des différentes rivières, lorsqu’on applique le coefficient de correction de 0.8353

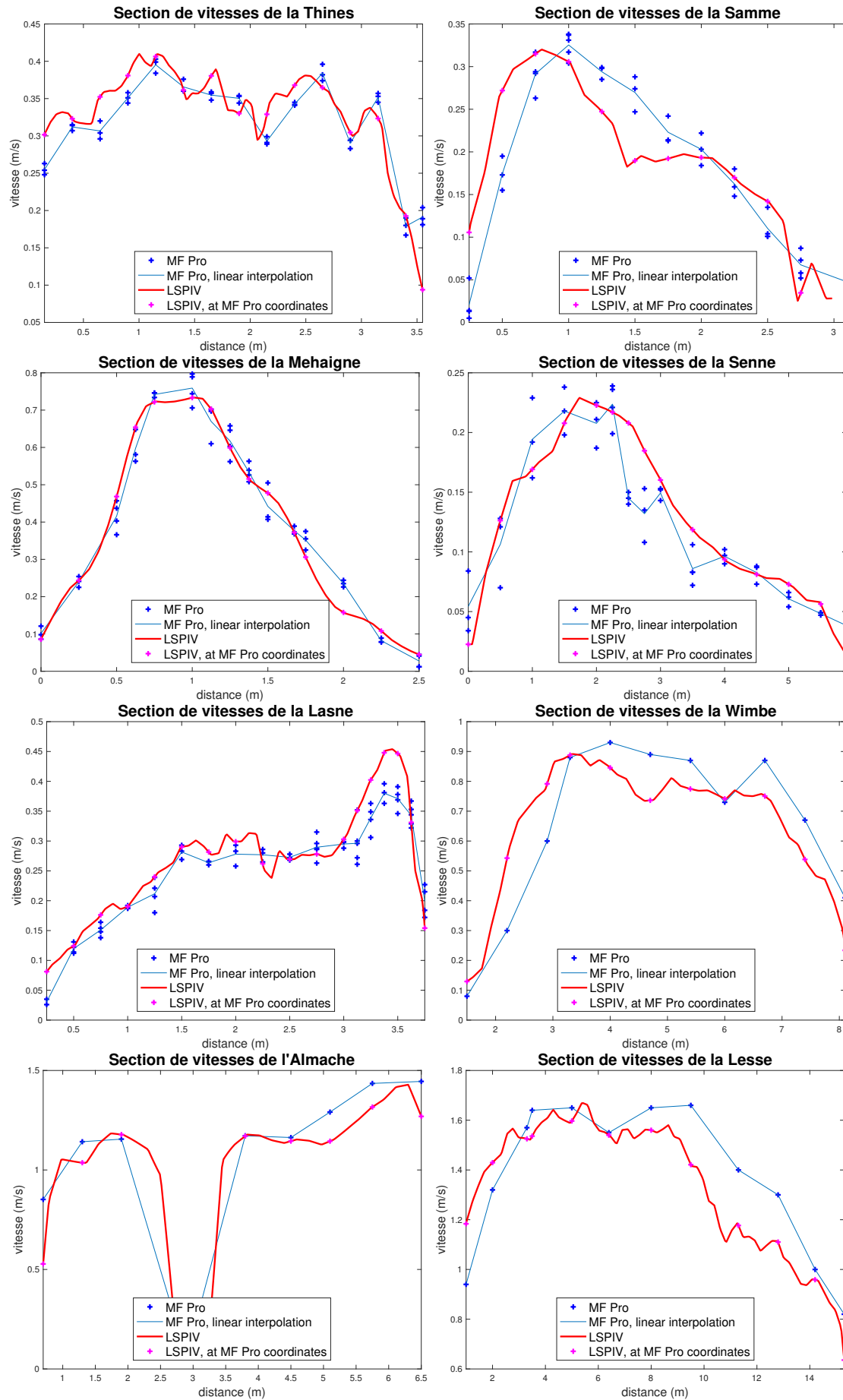


FIGURE 7.8 – Résultats obtenus pour 8 rivières, avec MF Pro et LSPIV lorsque le coefficient de correction est appliqué

7.2.5 Ensemencement

Concernant la nécessité de l'ensemencement, celui-ci est obligatoire lorsque la rivière n'est pas assez mouvementée que pour laisser apparaître des irrégularités analysables, comme représenté à la Figure 7.9. L'analyse de rivières "calmes" et sans traceurs a donné des résultats complètement incohérents, car il était impossible pour le logiciel de repérer du mouvement.

A l'inverse, l'analyse sans traceurs de la Wimbe et Eprave a donné des résultats très prometteurs, comme illustré à la Figure 7.10. Voici le tableau des résultats obtenus :

Rivière		ensemencement	sans coefficient	Integral error (%)
				avec coefficient de correction (0.8353)
Eprave		avec	18.71	0.84
		sans	15.29	3.70
Wimbe		avec	15.95	3.15
		sans	16.04	0.52

TABLE 7.4 – Comparaison des résultats obtenus pour 2 rivières, avec ou sans ensemencement et avec ou sans coefficient réducteur.

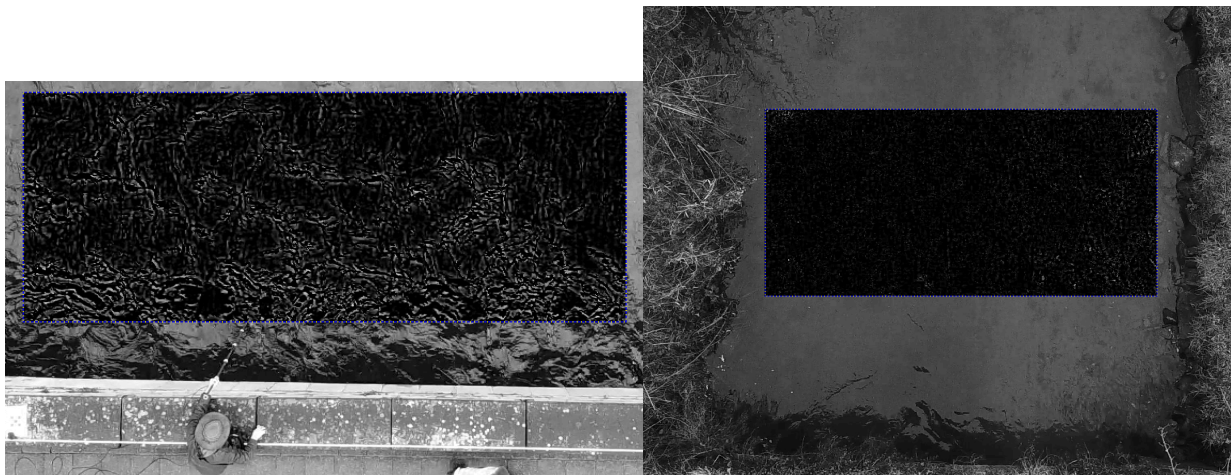


FIGURE 7.9 – Comparaison entre deux rivières après application de filtres : celle de gauche est exploitable sans ensemencement car elle présente assez d'irrégularités. Celle de droite est trop calme pour contenir de l'information exploitable sans ajouter des traceurs.

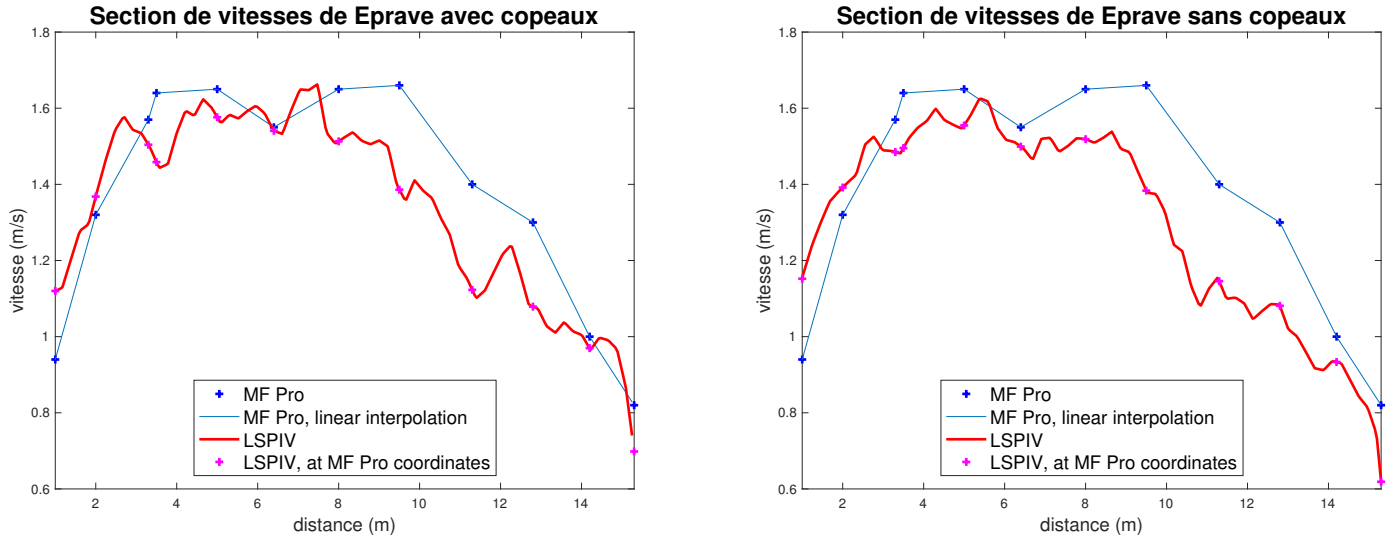


FIGURE 7.10 – Comparaison de résultats obtenus à partir de vidéos avec et sans traceurs.

7.2.6 Paramétrisation

Cette section concerne les observations qualitatives, concernant les différents paramètres de la méthode, que nous avons pu repérer lors de l'application de la LSPIV au différentes rivières que nous avons étudiées. De par son caractère exhaustif, l'analyse de tous ces paramètres peut se trouver en Annexe C. Dans cette section, nous comparerons qualitativement différents résultats obtenus à partir de différentes méthodes de validation de vecteurs et de moyennes sur la Lasne. Toute cette comparaison se rapporte aux graphes et images de la Figure C.2 :

1. En (a), nous pouvons observer les résultats obtenus à partir d'une frame. Nous apercevons une zone (cercle orange) sans traceurs, et pour laquelle les résultats ne sont pas du tout cohérents avec ceux du MF Pro. Nous remarquons également le caractère oscillatoire de la courbe, qui montre l'instabilité de la méthode sur une frame unique et démontre la nécessité d'analyser plusieurs frames pour effectuer une moyenne.
2. En (b) les champs de vecteurs de plusieurs frames sont moyennés (voir). On remarque une amélioration de la stabilité globale de la courbe, puisqu'elle oscille moins. Cependant, les vitesses dans la zone orange sont toujours sous-évaluées. Ce comportement s'explique par le fait qu'il y a beaucoup de frames pour lesquelles on ne trouve pas de traceurs dans cette zone. les vecteurs résultants sont donc une moyenne de vecteurs nuls et de vecteurs cohérents.
3. En (c), une validation de vecteur, basée sur un seuil de **SNR** (voir 3.2.2), est appliquée avant de faire une moyenne des champs de vecteurs. Cette validation permet de supprimer la plupart des vecteurs nuls de la zone orange, et améliore donc considérablement les résultats. Nous remarquons cependant des oscillations de la courbes dans cette zone, ce qui montre que la méthode n'est pas encore tout à fait robuste.
4. En (d) aucune validation de vecteur n'est effectuée, cependant une SNR wheighted correlation mean (voir 3.2.3) est appliquée. Nous observons l'élimination quasi totale des oscillations de la courbe, qui correspond parfaitement à celle du MF Pro. Ce comportement stable montre que la méthode de moyenne de corrélations, avec le signal-to-noise ratio comme poids, est très robuste et permet d'obtenir des résultats cohérents, sur des zones où il y a peu de traceurs, et sans même devoir appliqué de validation de vecteurs.

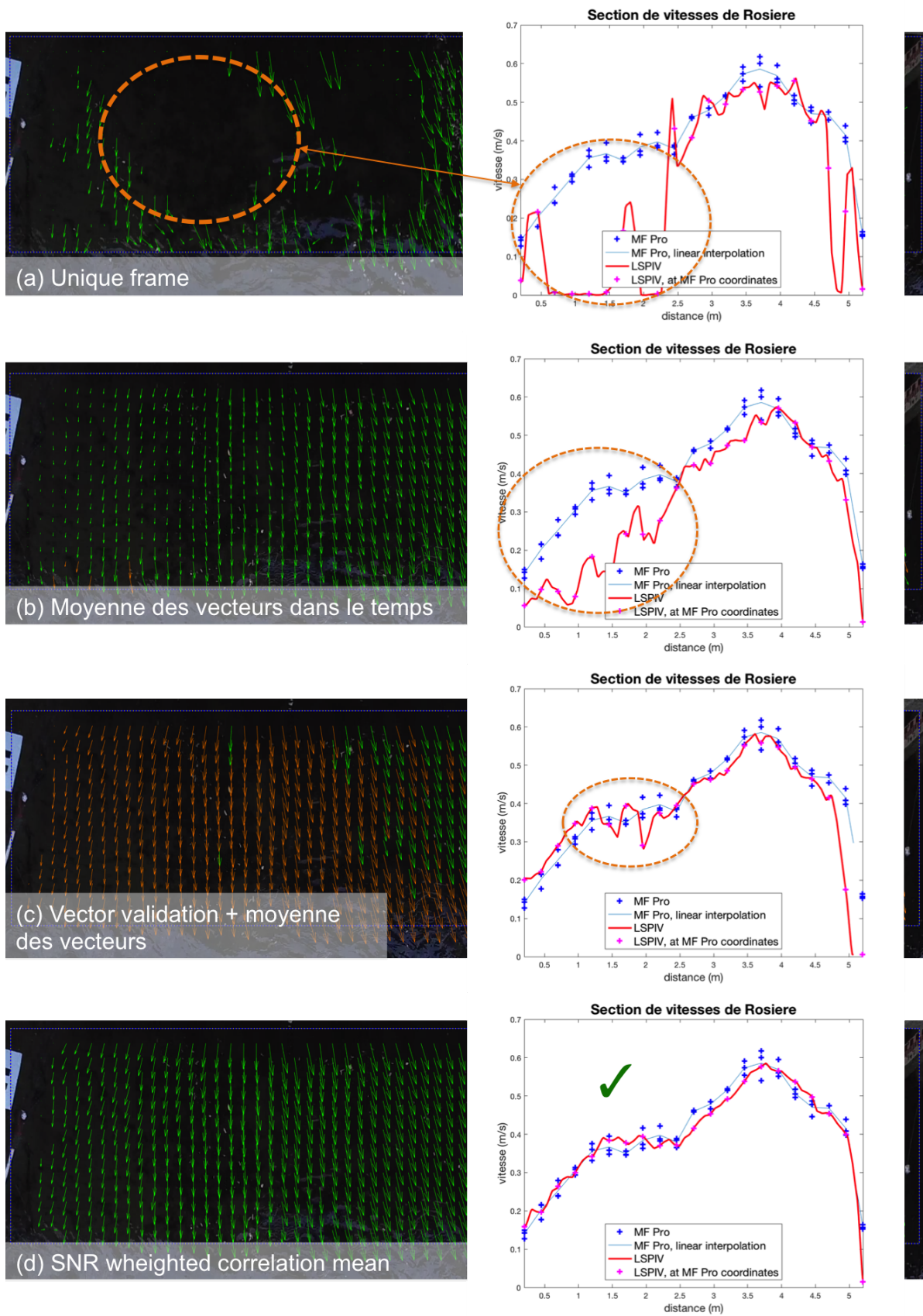


FIGURE 7.11 – Comparaison de résultats obtenus sur la Lasne à partir de différentes méthodes de moyenne.

7.2.7 Application à Rosière : vitesses de surface et débit

Après avoir calculé ce coefficient de correction, nous avons analysé une nouvelle section de la Lasne avec le drone ainsi que le MF Pro. Ayant accès aux mesures de débits de cette section, grâce au *Service Public de Wallonie*, l'objectif de ces mesures était double :

- Confirmer la véracité du coefficient de corrélation en l'appliquant à une section pour laquelle il n'a pas été optimisé.
- Tester l'efficacité de la méthode par la comparaison d'une estimation de débit avec les valeurs obtenues en temps réel par le SPW d'une part, et nos analyses LSPIV d'autre part.

Vitesses de surface

En comparant les vitesses de surfaces issues de nos mesures au courantomètre avec celles de la méthode LSPIV, multipliées par le coefficient de correction évalué précédemment, nous obtenons une erreur de 2.02% sur l'erreur d'intégrale, ce qui est extrêmement encourageant et prometteur. La Figure 7.12 montre les courbes de résultats. Cette Figure confirme la ressemblance entre les résultats des 2 méthodes lorsque l'on applique le coefficient de correction.

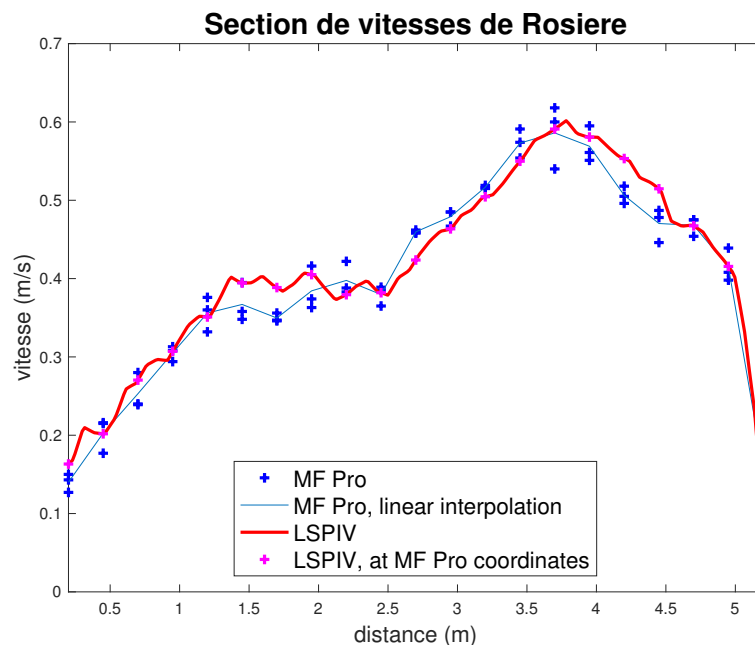


FIGURE 7.12 – Bathymétrie de la section étudiée de la Lasne.

Débit

Pour calculer le débit de cette section, nous avons premièrement mesuré sa bathymétrie. La Figure 7.13 représente cette dernière. Nous avons ensuite calculé le débit découlant des mesures de vitesse du courantomètre MF pro, avec l'*index de vitesse* 0.85, trouvé dans la littérature [5] (voir Chapitre 6). Nous obtenons alors une erreur de 2.93% par rapport au débit mesuré par le SPW, ce qui est une très bonne estimation. L'index de vitesse permettant d'avoir une estimation de débit le plus proche de celle du SPW est de 0,826 .

Nous avons ensuite calculé le débit à partir des vitesses LSPIV, multipliées par le *coefficient de correction* (7.2.4) et par l'*index de vitesse* (6.2), et avons obtenus une erreur de **4.3090 %**, ce qui est bien en dessous de seuil de précision de 10% qui a pu être observé dans d'autres recherches ([5]).

Nous concluons cette section en précisant que ce résultat peut encore être amélioré, car nous utilisons un index de vitesse général, trouvé dans la littérature. En utilisant l'index de vitesse qui permettait d'optimiser l'estimation du débit à partir des vitesses du MF Pro, nous obtenons une erreur de 1.3638 % ce qui est étonnamment bas. Elle n'est pas à prendre au pied de la lettre, puisque nous avons optimisé l'index de vitesse sur le débit et les vitesses du MF Pro de cette section. Elle rend cependant compte de la qualité de la LSPIV et du coefficient de correction, puisque ce dernier n'a pas été optimisé en prenant en compte l'étude de cette rivière.

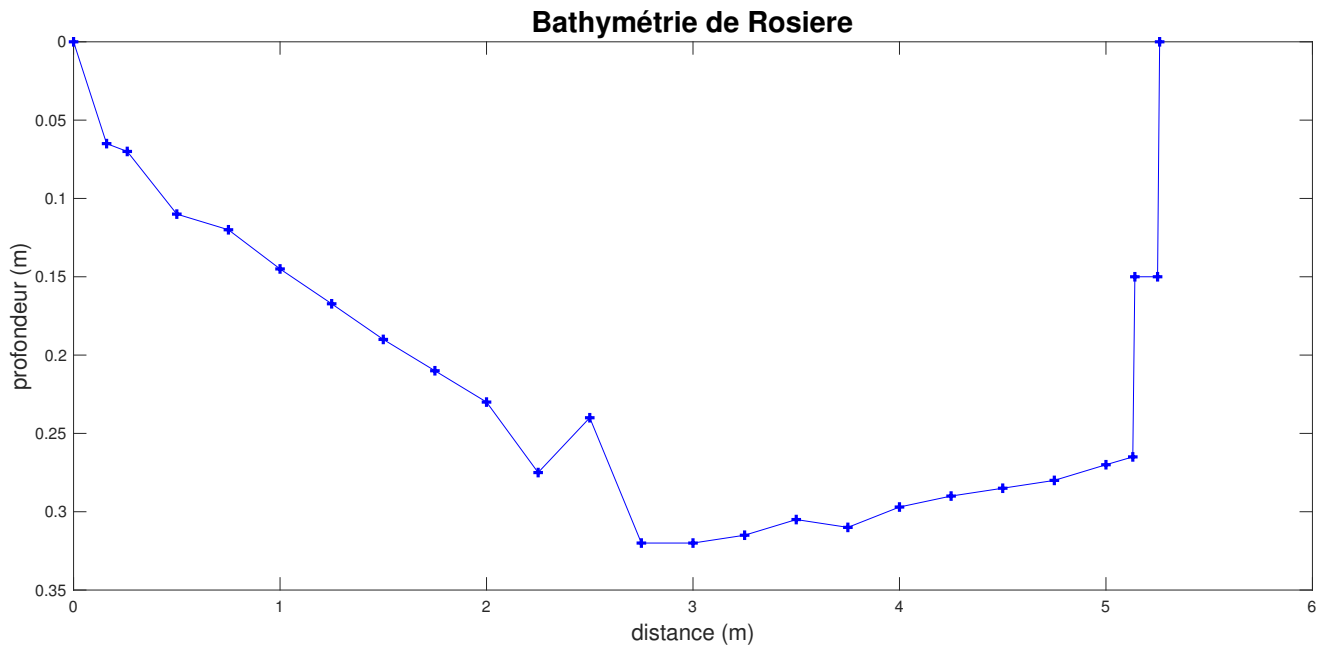


FIGURE 7.13 – Résultats obtenus pour la Lasne, avec le coefficient de correction optimal de 0,858. Les résultats sont qualitativement très similaires. De plus l'erreur d'intégrale est de 2.78%

8

Pistes d'améliorations

Bien sûr, un travail de fin d'études est le fruit d'un travail appliqué et continu tout au long d'un semestre. Il vient clôturer ces cinq dernières années d'apprentissage et d'ouverture au monde du travail. C'est aussi le travail le plus important que nous avons eu l'occasion de réaliser depuis notre rentrée à l'université. Pour des étudiants de dernière année, la richesse de ce travail réside dans le cadre où celui-ci évolue. Un cadre libre, où nous avons pu fixer nos objectifs, laisser mûrir des idées et surtout pouvoir profiter des rebondissements survenus tout au long de ces derniers mois pour façonner nos recherches.

Ce mémoire, d'une durée limitée, s'inscrit dans un cadre plus global. Ce chapitre reprend donc les idées que nous aurions aimé poursuivre, ou celles pour lesquelles nous jugeons intéressant de se pencher pour continuer ce travail.

- Comme précisé dans le chapitre sur la LSPIV mobile, il serait utile de pouvoir effectuer une calibration précise selon la hauteur du drone, par rapport à sa distance au plan d'eau. Cela augmenterait encore le caractère autonome et non intrusif qu'offrent les possibilités d'études effectuées avec un drone. Cela n'a pas été possible, à cause des données trop peu précises de la hauteur avec le drone utilisé, mais l'évolution continue de ces équipements devrait rapidement remédier à ce problème.
- Comme précisé dans le chapitre 5, il serait intéressant de s'affranchir des **GRP's**. Il serait alors judicieux de quantifier l'erreur qu'apporterait une stabilisation sans GRP's, en utilisant se basant sur des objets fixes ,tel que des pierres, des arbres.
- Continuer l'analyse de nouveaux cours d'eau, en comparant d'une part les résultats obtenus pour les vitesses de surface, afin de valider le *coefficient de correction*, et d'autre part les débits, afin de valider *l'index de vitesse*. L'analyse de cours d'eau plus larges, avec des débits plus importants, permettrait également de tester la méthode dans des conditions différentes.
- Suite au point précédent, analyser des profils de vitesses à différents points d'une section (faible, haute et moyenne profondeur) permettrait de caractériser l'index de vitesse (passage des vitesses de surface aux vitesses moyennes) sans le généraliser, mais plutôt en le détaillant par rapport à son endroit dans la section, à la morphologie et à la granulométrie du lit, à la hauteur d'eau etc.
- Si l'on reprend la Figure 7.8, on remarque que les résultats donné par le courantomètre possèdent une variance importante. Cette variance paraît peu explicable sachant que nous prenions pour chaque point au minimum 3 mesures moyennes consécutives (représentatives

de 10 secondes d'écoulement chacune) et cela toutes les dix secondes. Il serait dès lors intéressant de réaliser, à titre de comparaison, 3 analyse LSPIV par drone de 3 échantillons de 10 secondes d'images consécutives. On pourrait alors voir si l'analyse LSPIV montre une telle variance, et sans doute s'apercevoir que les résultats seraient plus stables dans le temps que ceux du courantomètre.

- Évaluer la quantité de remous nécessaire à la surface du cours d'eau pour pouvoir effectuer des analyses LSPIV sans ensemencement. Nous avons obtenu des résultats très encourageants pour des analyses non-ensemencées, mais il serait utile de pouvoir déterminer la limite entre le besoin d'ensemencement ou, à l'inverse, l'objectivité des résultats même sans ensemencement ajouté artificiellement.
- Élaborez les relations qui optimiseraient les résultats en fonction de la luminosité de la séquence d'images à étudier, du contraste entre couleur de l'eau et celle de l'ensemencement (si nécessaire) et des filtres utilisés lors de la *pré-processing*.
- Implémenter la méthode de moyenne dans le temps proposée par Samarage, Chaminda et Carberry, Josie et Fouras, Andreas et Hourigan, Kerry [25], mélangeant vector averaging et correlation averaging. Cette méthode pourrait encore améliorer la robustesse de la LSPIV, en diminuant le nombre de vecteurs incohérents.
- L'utilisation d'un drone lors de l'étude de l'efficacité de la LSPIV permet de se déployer facilement et rapidement sur de nombreuses rivières, mais il pourrait également être intéressant d'étudier plus en profondeur une rivière, sur une longue période, en temps réel, en installant un dispositif fixe.

9

Conclusion

Face à des besoins de plus en plus exigeants concernant les données hydrométriques, il apparaît clairement que les appareils de jaugeage traditionnels peinent à répondre à ces demandes et à profiter des récentes évolutions technologiques. Par leur caractère intrusif, leur difficulté de mise en oeuvre, leurs coûts et les obstacles qu'elles rencontrent lors d'évènements exceptionnels que sont les crues, il est probable que ces méthodes traditionnelles laissent leur place dans les prochaines années à la LSPIV (acronyme de *Large Scale Particle Image Velocimetry*). L'émergence de cette technique de mesure par analyses d'images, pourtant initiée au début des années 90, voit actuellement son domaine d'application évoluer aux rivières naturelles grâce aux diverses avancées technologiques dont elle fait profit.

Au début de ce rapport, nous avons parcouru la technique d'analyse PIV, expliquant sa méthode, ses capacités et son fonctionnement. Nous avons ensuite pu nous pencher sur les nombreuses analyses existantes et les conclusions qui en découlent, aussi bien de la technique PIV que de son évolution aux milieux naturels, la LSPIV. De cette analyse, il fut possible mettre en évidence les challenges amenés par l'application de cette méthode.

Face au problème d'ensemencement non homogène des rivières, nous avons amélioré les méthodes de validations des vecteurs de vitesse, grâce à une mesure de fiabilité, basée sur le *Signal-to-Noise Ratio* (SNR). Nous avons ensuite implémenté une *correlation mean*, permettant de réduire l'impact des zones à faible ensemencement. C'est en associant ces deux idées que nous avons développé une nouvelle moyenne dans le temps, utilisant le *SNR* comme poids dans la *correlation mean*. Appelée *SNR wheighted correlation mean*, cette méthode robuste permet d'obtenir un champ de vecteur fiable et stable, même lorsque l'ensemencement est faible et non homogène. Elle permet également d'obtenir facilement des résultats en s'affranchissant de la sélection de paramètres.

Nous nous sommes ensuite intéressés à l'utilisation de la LSPIV à partir d'un drone. Remarquant l'erreur générée par les mouvements du drone, nous avons développé une méthode de stabilisation automatique, permettant ainsi d'obtenir des résultats similaires à ceux de la LSPIV classique. Grâce à cette amélioration, nous avons pu obtenir une vitesse moyenne au sol de $0,6 \times 10^{-3} \text{ m/s}$, rendant rend les déplacements du drone négligeables.

Munis de ces nouvelles fonctionnalités, nous avons eu l'occasion d'appliquer notre méthode à 9 sections de rivière différentes, pour lesquelles nous avons obtenu des courbes de vitesses similaires à celles calculées avec un courantomètre classique. Celles-ci présentent toutefois une surestimation globale des intensités de vitesses, avec une différence des moyennes de 16.38%. Sans encore pouvoir déterminer avec certitude l'origine de cette différence, nous avons pu estimer un coefficient de correction de 0.8353, permettant d'obtenir une différence d'intégrale de 3.28%

en moyenne, avec une déviation standard de 2.58%. Ces résultats sont très intéressants, l'erreur d'intégrale nous donnant une bonne estimation de la précision que nous pouvons espérer atteindre lors du calcul du débit.

Nous avons également testé notre méthode sur des sections de rivière sans copeaux. Ces tests nous ont permis de conclure qu'une analyse LSPIV sans traceurs est possible lorsque la surface de l'eau présente des irrégularités (informations traitables) suffisantes. En effet, pour 2 rivières mouvementées, nous avons pu calculer des vitesses du même ordre de fiabilité que celles obtenues avec des traceurs.

Pour terminer, nous avons pu estimer le débit d'une section de la Lasne, obtenant une différence de 4.3% avec le débit mesuré par le SPW. Ce résultat est très encourageant puisqu'il se trouve en dessous du seuil de 10%, couramment retrouvé dans la littérature sur la LSPIV. Il confirme également la validité du coefficient de correction calculé précédemment et appliqué à cette rivière.

Les tests réalisés sur ces cours d'eau nous ont également permis de vérifier la robustesse de la LSPIV. En effet, il est important de rappeler que les analyses des 9 rivières ont été conduites avec la même procédure et paramètres.

Malgré près de 30 années d'utilisation en laboratoire, la technique PIV n'a été étendue vers l'étude de milieux naturels qu'au début de ce siècle. Pourtant, avec l'avancée des technologies d'imagerie, mais aussi de drone, cette méthode regorge de potentiel pour l'étude de rivières. La LSPIV, permet une précision de mesures dans des conditions variées (illumination, conditions de crues, etc.), une rapidité de mise en oeuvre et d'utilisation, un coût excessivement faible (jusqu'à 60 fois moindres que des équipements de jaugeages traditionnels), une mesure non intrusive (mettant le matériel et son utilisateur hors de danger) mais surtout la capacité de fournir un champ de vitesses bidimensionnel. Si l'on souhaite bénéficier de résultats précis, le jaugeage d'une rivière avec un courantomètre traditionnel peut prendre jusqu'à 5 minutes par mètre de rivière jaugé, alors qu'un vol de quelques secondes au-dessus d'une rivière avec un drone peut donner des résultats plus complets pour l'analyse des vitesses superficielles. Cette rapidité exceptionnelle de mise en oeuvre permet d'analyser un plus grand nombre de rivières où différentes sections clés de ces dernières. La qualité des résultats obtenus suggérerait même la capacité d'obtenir des résultats en temps réel et de manière continue en installant une caméra sur un pont où toute autre installation surplombant un cours d'eau.

A

PIVlab (1.43) : utilisation

On abordera ici les étapes essentielles d'utilisation pour réaliser une analyse PIV avec le logiciel gratuit PIVlab (<http://pivlab.blogspot.be>, [21]). Les explications ci-dessous sont basées sur la version 1.43 de PIVlab telle que publiée le 6 mars 2018.

Pour rappel, un tutoriel [21] détaille par le biais d'explications et de vidéos son utilisation et ses capacités d'analyse. Un forum est également disponible pour les questions et les améliorations éventuelles proposées par les utilisateurs. William Thielicke, le fondateur du programme PIVlab, prend grand soin de répondre rapidement aux différentes interventions afin de tenir son forum le plus actif possible.

A.1 Importation d'images

La première étape consiste tout naturellement à importer les images que l'on souhaite analyser.

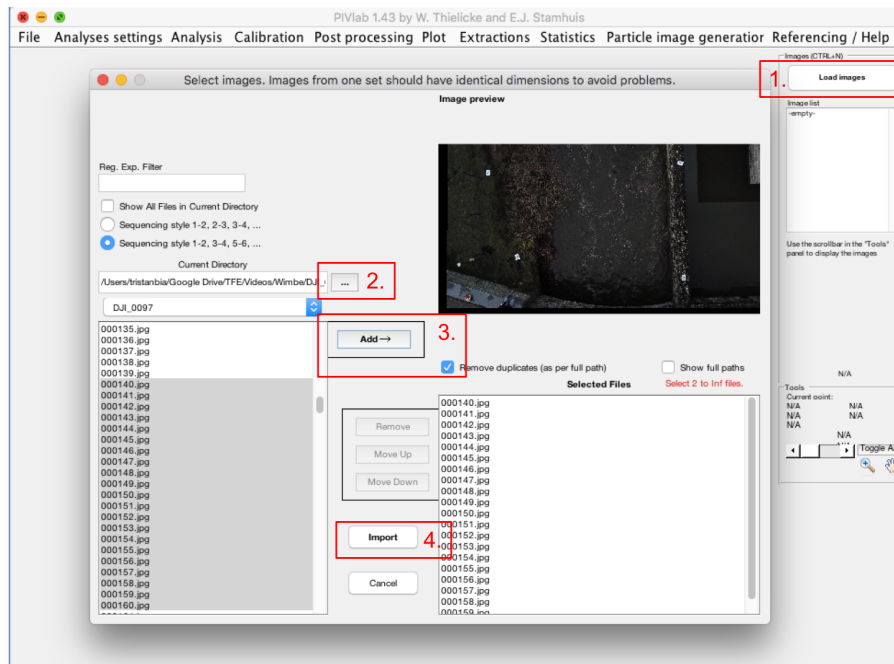


FIGURE A.1 – PIVlab (version 1.43) : menu d'importation d'images

En suivant les étapes 1 à 4 on peut, successivement, atteindre le menu d'importation d'images,

sélectionner l'emplacement des fichiers à importer, les ajouter et les importer pour l'analyse.

A.2 Paramètres d'analyse

A.2.1 Délimitation de la zone d'étude : *Region Of Interest* (ROI)

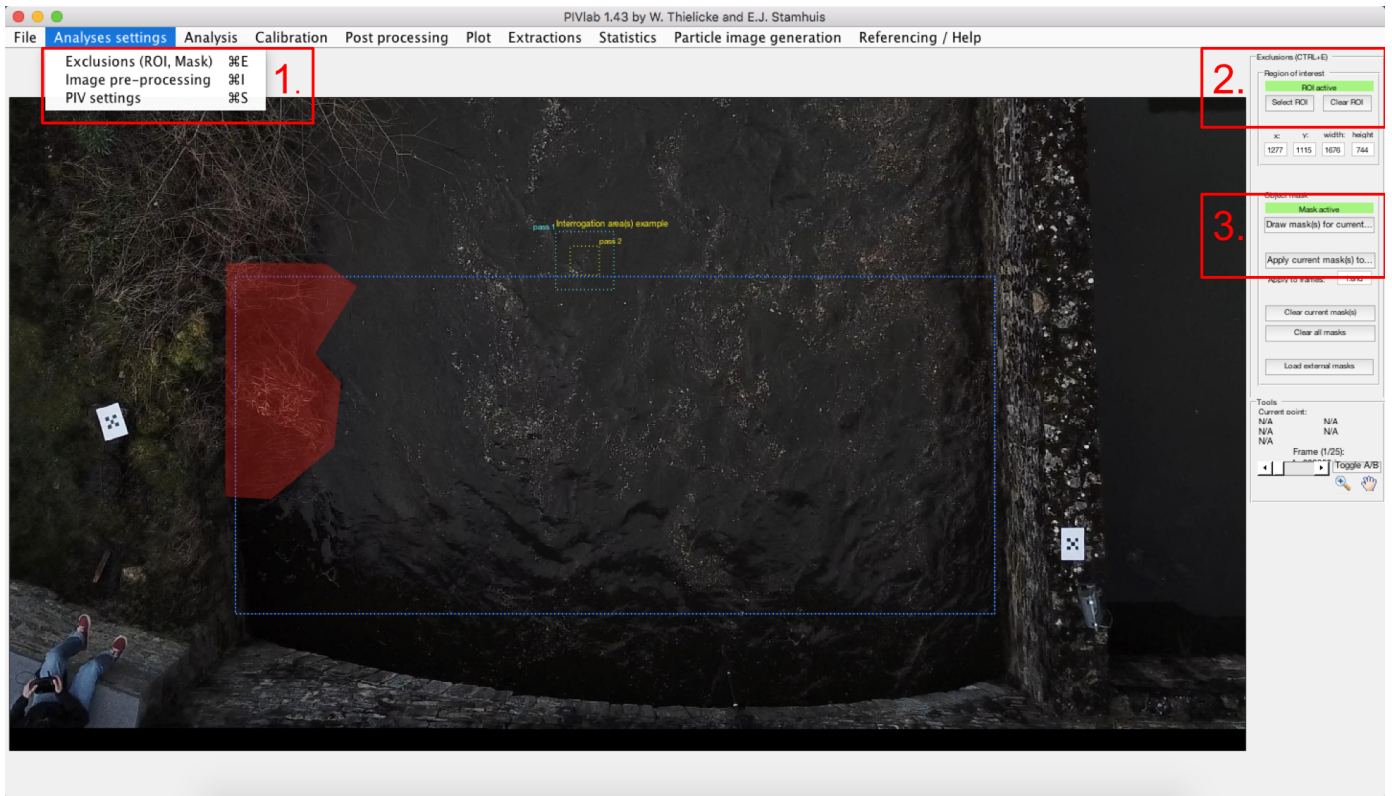


FIGURE A.2 – PIVlab (version 1.43) : *Analyse settings*

Sur ce menu, il est possible de délimiter la zone que l'on souhaite analyser (appelée *Region Of Interest* ou ROI), tout comme de placer un "*Mask*" qui permet d'exclure de cette zone d'étude des éléments qui risqueraient d'amener des erreurs (branches, rochers, etc.). Si l'on dessine un "*mask*" (comme l'élément rouge dans la figure A.4), il ne faut pas oublier de cliquer sur "*Apply to all frames*" pour garder ce masque sur chaque frame de la séquence étudiée.

A.2.2 Image pre-processing & PIV settings

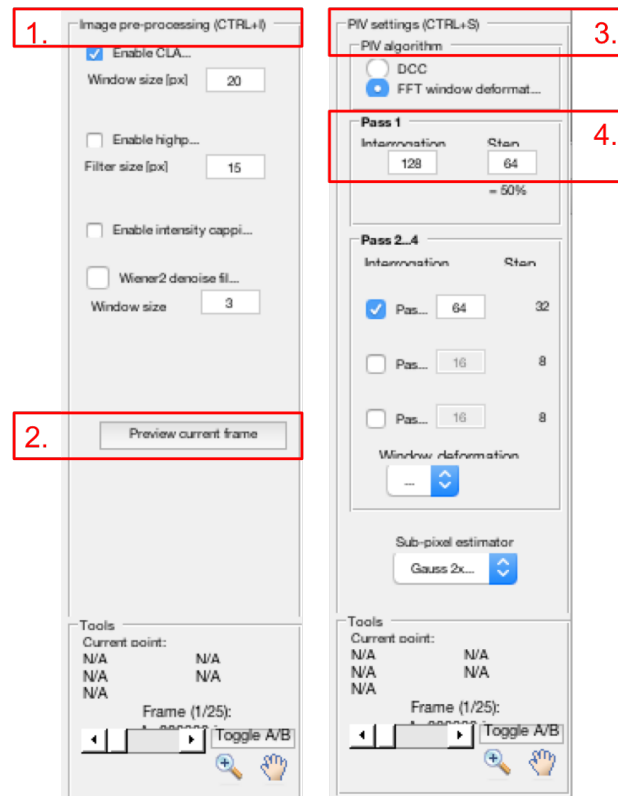


FIGURE A.3 – PIVlab (version 1.43) : *Analyse settings*

Dans la figure ci-dessus, le menu de gauche est celui que l'on découvre dans PIVlab dans la barre de menus *Analyses settings* → *Image pre-processing*. On peut y appliquer les filtres que l'on souhaite, et surtout les pré-visualiser (point 2) pour s'assurer que les filtres conviennent aux images que l'on a importées. En effet, en fonction de facteurs externes (luminosité de l'image, contraste des traceurs avec le cours d'eau, etc.) une composition de filtre ne donnera pas forcément le même résultat qu'avec un autre échantillon d'images. Pouvoir visualiser l'efficacité des filtres sur une frame est donc un outil nécessaire et très utile. Dans la figure de droite (*Analyses settings* → *PIV settings*) on peut choisir l'algorithme d'analyse et surtout la taille en pixels des aires d'interrogation.

A.3 Calibration

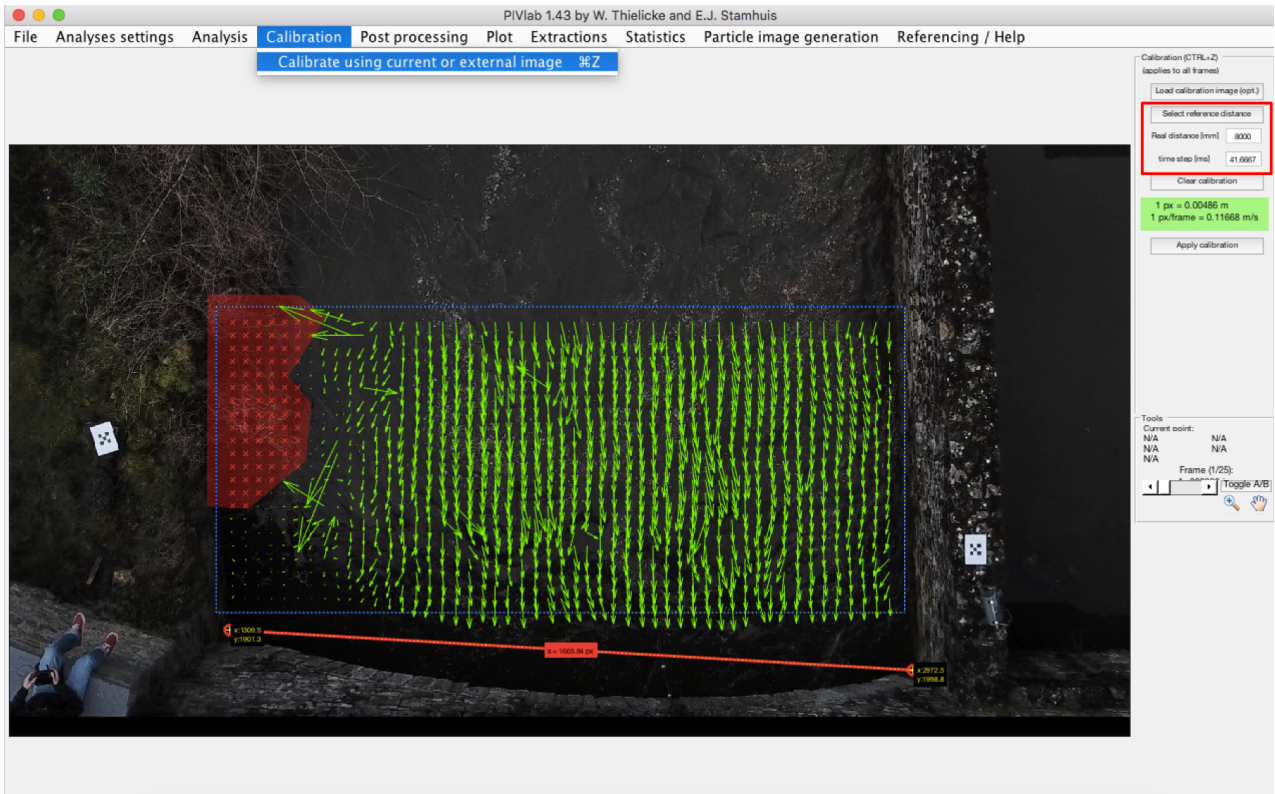


FIGURE A.4 – PIVlab (version 1.43) : *Calibration*

La calibration de l'image est indispensable puisqu'elle régit le passage d'une distance en pixels vers une distance métrique. Elle peut s'effectuer de deux manières, soit en téléchargeant une image de calibration, soit en sélectionnant des points de référence sur l'image dont on connaît la distance les séparant. Cette opération va automatiquement compter les pixels présents entre ces points de référence et, en indiquant la distance réelle qui les séparaient (en mètre), établir le ratio mètre (millimètres) par pixel. Pour clôturer la calibration, il faut indiquer le pas de temps entre deux images successives. Cette information dépend des propriétés intrinsèques de la caméra utilisée, et dans notre cas était égale à 41,667 *ms* puisque l'on filmait en 24 *fps* (*frame per second*). Cette étape va permettre de connaître la vitesse (en *m/s*) équivalente à un déplacement sur l'image d'un pixel par images successives.

A.4 Vector Validation

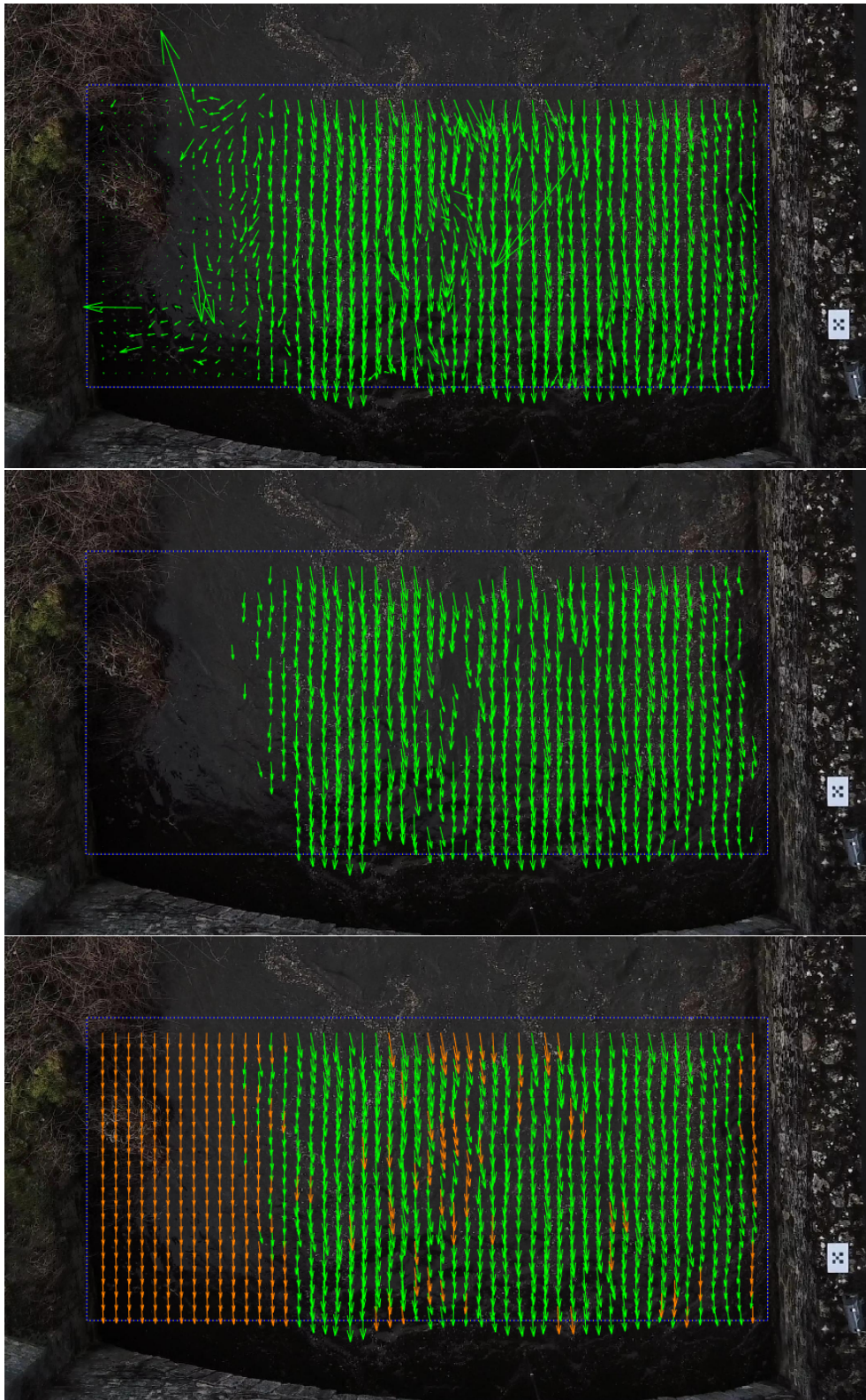


FIGURE A.5 – PIVlab (version 1.43) : *Vector Validation*. Figure du dessus : résultats bruts avant la validation de vecteurs. - Figure du milieu : résultats après validation de vecteur par la première méthode. - Figure du bas : résultats après validation de vecteur et interpolation des vecteurs manquants.

La *Vector validation* telle que proposée dans le programme comporte 4 méthodes distinctes qui peuvent être appliquée simultanément ou non, selon le choix de l'utilisateur.

La première consiste à encadrer manuellement les limites de vitesse (pour les 2 directions) à partir du nuage de points des vitesses. Il s'agit là de choisir intuitivement un rectangle ne comprenant que la partie de nuage où la concentration des points est la plus forte, et ne contenant donc pas les vecteurs incohérents. Pour ce faire, il est intéressant de sélectionner l'option *display all frames* qui affichera sur un graphe tous les vecteurs de vitesse en fonction de leurs amplitudes de vitesses verticales et horizontales.

Le second filtre supprime les vecteurs dont les composantes (u et v) sont trop éloignées de leurs moyennes. Il calcule d'abord, sur base de tous les vecteurs de la frame, la moyenne μ et l'écart-type σ de chaque composante. n étant un paramètre à choisir, les vecteurs qui sont plus grands ou plus petit que $\mu \pm n \cdot \sigma$ sont alors supprimés.

Le troisième filtre est un filtre qui supprime un vecteur si son amplitude est trop éloignée de la médiane des amplitudes des vecteurs l'entourant.

Le dernier et quatrième filtre permet de rejeter manuellement des vecteurs. Cette technique est donc plus laborieuse et peut manquer d'objectivité.

A.5 Résultats

Avant d'extraire les résultats de l'analyse PIV, il est utile de calculer la moyenne des vecteurs. Cette opération peut être trouvée dans le menu *Plot* $\rightarrow$ *Derive parameters/ modify data* $\rightarrow$ *Calculate mean vectors*. Une nouvelle frame contenant la moyenne des vecteurs va donc être créée, elle est identifiable par son encadré bleu dans la barre de visualisation des frames. Ensuite, dans *Extractions* $\rightarrow$ *parameters from poly-line*, il est possible de tracer une ligne, un cercle ou une poly-ligne et d'en extraire une série de paramètres intéressants, parmi eux :

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

Après avoir tracer une ligne à l'endroit où on aimerait extraire des données, il suffit de cliquer sur *Plot data* pour visualiser les résultats. *Save results as ASCii chart* permet d'exporter les résultats en fichier *.txt*. Sur la figure A.6, les points 1 à 4 permettent d'accéder au résultat, de dessiner la ligne (poly-ligne) souhaitée, de plotter les résultats et de les extraire en fichier *.txt*, respectivement. Les mêmes opérations sont également possibles à partir non pas d'une ligne mais d'une région (zone) délimitée dans *Extractions* $\rightarrow$ *parameters from area*.

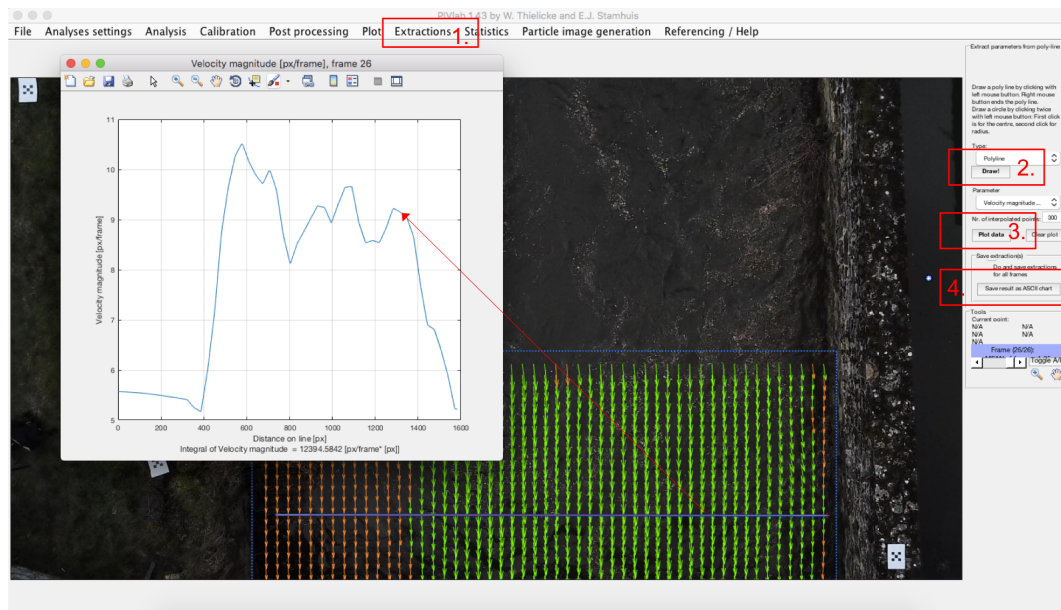


FIGURE A.6 – PIVlab (version 1.43) : *Extraction*. Plot de la *Velocity magnitude* de la ligne mauve horizontale.

B

Mode d'emploi

Dans cette annexe seront présentées les étapes essentielles à suivre pour une analyse LSPIV à l'aide d'un drone. Ce "mode d'emploi" résulte de l'expérience que nous avons acquise ces derniers mois dans le cadre de notre mémoire. Il peut servir de "guide" d'utilisation à celui qui aimerait se lancer dans le même genre de démarche, sans pour autant prétendre être la seule manière pour réaliser des analyses LSPIV à partir d'images aériennes de drone. Il convient donc d'adapter ces étapes en fonction des conditions de terrains et des conditions climatiques, des législations de vol, du personnel sur place et des drones. Il est à noter que ce mode d'emploi se base sur la version modifiée de PIVlab que nous avons développée pour répondre plus pertinemment aux attentes et objectifs de ce mémoire. Pour rappel, nous utilisons un drone DJI Mavic Pro® pour récolter nos images, et d'un courantomètre à induction magnétique OTT MF Pro® afin de disposer de comparaisons objectives avec les résultats issus de nos analyses LSPIV. Une checklist se trouve à l'annexe D, et reprend les éléments importants à emporter avec soi pour une analyse LSPIV réalisée avec des images aériennes de drone ainsi qu'aux paramètres de prise de vue.

Les étapes 1 à 7 détaillent les démarches à suivre sur le terrain, tandis que les suivantes expliquent comment procéder aux analyses.

1. Une fois la rivière et la zone à étudier choisies, repérez une zone la plus dégagée possible, de préférence sans végétation débordant sur la rivière, et minimisant les risques pour un vol sécurisé du drone.
2. Si l'accès le permet, placer les *Ground Reference Points* (GRP's) sur les berges et de préférence 2 sur chacune d'entre elles. Sinon, des éléments sur les berges (branches, pierre, etc.) peuvent aussi servir de GRP's.
3. Placer une mesure métrique connue le plus proche possible du plan d'eau. Dans notre cas, un mètre en bois (flottant) d'une longueur de 2 mètres était placé dans l'eau pour assurer la conversion des distances en pixels vers des distances métriques.
 - 3.bis - Ce point intermédiaire est destiné aux personnes qui aimeraient comparer leurs résultats à des mesures manuelles avec des appareils de mesures traditionnelles (courantomètre à induction magnétique par exemple). Il faut alors placer un décimètre sur la section, en repérant les mesures au départ et à l'arrivée de la berge opposée, relever des mesures à des points précis pour pouvoir les comparer par la suite aux valeurs enregistrées par l'analyse LSPIV.
4. Calibrer le drone et sa caméra.
5. Vérifier les paramètres de la caméra :
 - résolution
 - images par seconde

- ISO : ce dernier doit être adapté aux conditions d'illumination du site, à la morphologie de la surface de l'eau et surtout au contraste entre les traceurs utilisés et la couleur de l'eau. En effet, si l'on réalise des mesures ensemençées et que les traceurs présentent un contraste important en terme de clarté avec la couleur du cours d'eau, il est préférable de baisser l'ISO (tons plus foncés) ce qui permet de diminuer le bruit de l'image et d'augmenter l'efficacité des filtres qui seront appliqués aux images avant l'analyse. A l'inverse, si ce contraste entre les traceurs et la rivière n'est pas élevé, il est préférable de ne pas baisser excessivement l'ISO au risque de perdre une partie de l'information de l'image.
6. Vol du drone et enregistrement des vidéos par une personne qualifiée et compétente. Veillez à ce que la caméra soit positionnée à la verticale, perpendiculaire au plan d'eau.
 7. Dans le cas de mesures ensemençées, répartir les traceurs le plus uniformément possible sur la section de la rivière, plusieurs personnes sont parfois nécessaires pour le bon déroulement de cette opération. Pour information, utiliser des copeaux de bois permet d'avoir des traceurs bio dégradables, sans conséquence d'un point de vue écologique (respectueux de l'environnement) et sur l'aspect de ceux-ci lorsqu'ils s'échouent sur les berges. En plus d'être bon marché, ils présentent également l'avantage d'avoir une taille, une flottabilité et une couleur (claire) idéales pour ce type d'étude.
 8. Une fois la prise de mesures et de vidéo effectuée, on peut commencer le traitement des vidéos et l'analyse de celles-ci sur PIVlab (notre version modifiée).
 - (a) La première étape consiste donc à charger une vidéo sur PIVlab pour la séquencer en images. Par souci de facilité, ces images seront sauvegardées aux mêmes emplacements sur votre ordinateur que l'emplacement original de la vidéo. Si jamais la vidéo est déjà séquencée en images, on peut seulement se contenter de directement importer ces images.
 - (b) Ensuite, il faut stabiliser les images. Pour cela, dans le menu *Harold et Tristan* → *Stabilization* → *Select GRP* pour sélectionner les GRP (4 de préférence) et commencer la stabilisation. Les images stabilisées seront réécrites dans le fichier des images séquencées, comme celui mentionné à l'étape précédente.
 - (c) Dans le menu *Analyses settings*, désignez la *Region of Interest* qui correspondra à la zone analysée par le logiciel et dessinez les masques éventuels. Ensuite, effectuez successivement les réglages des filtres requis, de l'algorithme d'analyse et de la taille des *pass* des aires d'interrogation.
 - (d) Analysez la séquence d'images.
 - (e) Calibrez l'image. Notez que cette étape peut être inter-changée avec la 8d.
 - (f) Procédez à la validation des vecteurs. Dans le menu *Vector validation*, on retrouve les différentes méthodes de validation présentées dans l'annexe A. Parmi celles-ci, on conseille d'utiliser la SNR qui fournit un résultat purement basé sur la qualité des corrélations de chaque vecteur plutôt que de la subjectivité de l'utilisateur.
 - (g) On peut maintenant calculer la moyenne. Pour ce faire, deux méthodes sont disponibles. La première est celle qu'on retrouve dans la version originale (1.43) de PIVlab en suivant le menu *Plot* → *Derive parameters/modify data*. La seconde méthode a été implémentée dans le cadre de ce travail dans le menu *Harold et Tristan* → *Correlation mean*. Son fonctionnement et ses avantages sont présentés dans la section 3.2.3 de ce rapport.
 - (h) Afin de bénéficier d'une visualisation et d'une compréhension optimale, vous trouverez dans le menu *Harold et Tristan* → *Colored vectors field* la possibilité d'afficher le champ de vecteurs sur une échelle de couleurs.

- (i) Pour finaliser cette étape d'analyse, vous pouvez vous rendre dans le menu *Extractions* qui vous permettra d'extraire les données souhaitées à partir d'une ligne ou d'une aire tracée sur la zone analysée. Ces données peuvent également être exportées en fichier *.txt*. Le menu *Statistics* offre la possibilité d'afficher les histogrammes des vitesses horizontales, des vitesses verticales et de l'amplitude des vitesses.

Ceci clôture le mode d'emploi, tel que nous l'avons utilisé ces derniers mois dans le cadre de notre mémoire. Il faut donc veiller à l'adapter en fonction du sujet de recherche de l'utilisateur, tout en restant attentif aux modifications et améliorations régulières qui sont apportées au programme par William Thielicke et l'ensemble de la communauté.

C

Paramétrisation

Cette section présente les observations qualitatives, concernant les différents paramètres de la méthode, que nous avons pu repérer lors de l'application de la LSPIV aux différentes rivières que nous avons étudiées.

Ensemencement Concernant le choix de traceurs, nous avons eu l'occasion de travailler avec plusieurs types de copeaux de bois, comme présenté à la Figure C.1. Nous avons pu observer que la taille de ces derniers n'a pas une importance significative sur les résultats de la méthode. Leur taille variait entre 2 et 8 pixels sur les images. Cependant, l'ensemencement était beaucoup plus efficace avec les copeaux de taille (c), car leur poids permettait de les lancer plus loin et donc d'atteindre plus facilement toutes les zones étudiées.



FIGURE C.1 – Comparaison des copeaux utilisés, (a) (b) (c).

Choix couplage de frame Comme expliqué dans la section , il y a deux paramètres à prendre en compte lors de l'analyse, dont nous discutons ici du choix optimal :

1. *Image Jumping* : Lorsque nous travaillons sur des rivières, il est certain que l'ensemencement n'est pas toujours homogène. Augmenter l'intervalle de temps sur lequel on analyse est alors une solution pour s'assurer que des traceurs sont passés au moins une fois dans toutes les zones de l'écoulement. Nous avons remarqué qu'une période d'environ **10 secondes** assure un ensemencement global de la rivière. Toutefois, cette durée augmente considérablement le nombre d'images (± 240), donc le temps d'analyse et la mémoire utilisée. Nous avons alors remarqué qu'avoir un *image jumping* de **10** (amenant alors à 24 frames) permet de garder un temps d'analyse raisonnable, tout en conservant un ensemencement complet.
2. *Image spacing* : Choisir le l'espacement entre deux images d'une même frame permet de contrôler le nombre la taille en pixel du déplacement. Si l'image spacing est multiplié par deux, le déplacement en pixel est alors multiplié par deux également. Comme nous l'avons précédemment expliqué, augmenter ce déplacement améliore la précision du déplacement,

puisque l'interpolation sub pixels aura moins d'importance comparée au déplacement. Cependant, il s'agit de trouver un compromis, car au plus grand est l'espacement, au plus grand est le risque d'un changement dans la configuration des traceurs, ou la disparition d'irrégularités. Nous avons eu de bons résultats avec des déplacements allant de 6 à 15 pixels entre deux images, obtenues avec un **image spacing** variant entre **1** et **2**.

Filtres Concernant le choix des filtres, nous avons principalement utilisé 2 filtres : le *Intensity high-pass* et le *Wiener2 denoise filter*.

Le *CLAHE* est un filtre efficace lorsque l'ensemencement est homogène, mais lorsque il y a des zones sans traceurs, il fait apparaître les irrégularités de l'eau avec autant d'intensité de les traceurs. Sur la Figure C.2, on peut observer que l'utilisation d'un filtre CLAHE fait apparaître des vagues qui ne vont pas dans le sens de l'écoulement, ce qui va perturber les résultats. Nous avons toutefois profité de ce comportement lors de nos analyses de rivières sans ensemencement, où nous l'avons utilisé en plus des deux précédents.

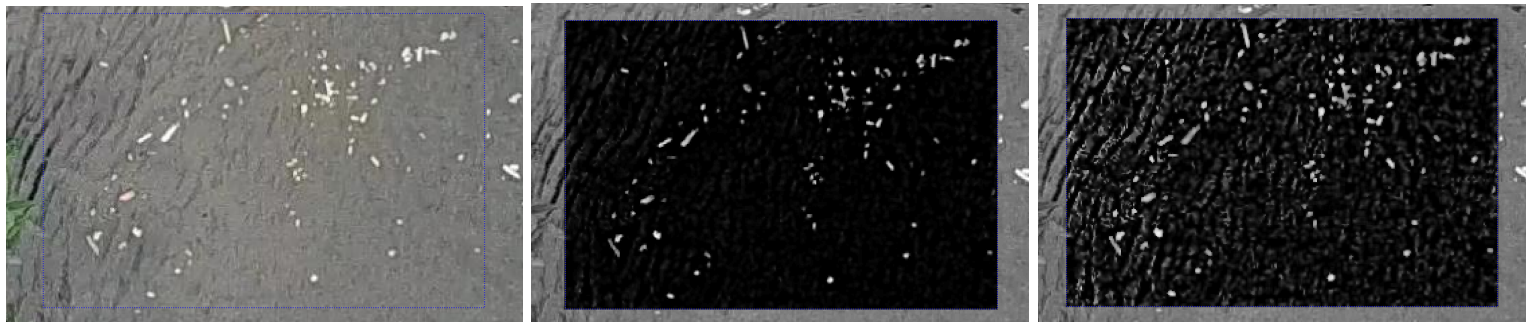


FIGURE C.2 – Comparaison de filtres sur la Lasne : (a) image originale (b) *Intensity high-pass* + *Wiener2 denoise filter* (c) + *CLAHE*.

Paramètres PIV

1. **DCC** ou **FFT** : Les résultats trouvés par les deux méthodes sont cohérents, il est donc difficile de prouver laquelle est la meilleure, sachant qu'il y a beaucoup d'incertitude quant à la comparaison aux données du MF Pro. Nous avons donc utilisé le FFT, pour la simple raison que le temps de calcul est alors réduit.
2. **taille de l'aire d'interrogation** : la calibration de nos prises d'images tournait en général autour de $3,5 \text{ mm/pixel}$. En choisissant, une **AI** de **64 pixels**, cela nous donne donc une résolution spatiale d'environ 22 cm, ce qui est largement acceptable pour les rivières que nous avons analysées.
3. **taille de l'aire de recherche** : Ayant sélectionné la méthode FFT, l'**AR** est obligatoirement égale à l'**AI**.
4. Le **nombre de passes** : Avec la FFT, il est suggéré que le déplacement ne dépasse pas le quart de l'**AI**. Comme les déplacements dans les rivières n'ont jamais excédé les 15 pixels, nous n'avons pas eu recours à l'utilisation de plusieurs passes, étant donné que le déplacement maximal conseillé pour une **AI** de 64 est de 16 pixels.

Vector validation et Moyenne dans le temps Dans ce paragraphe, nous allons comparer qualitativement différents résultats obtenus à partir de différentes méthodes de validation de vecteurs et de moyennes, sur la Lasne. Les résultats de cette comparaison sont présentés à la Figure C.2 :

1. En (a), nous pouvons observer les résultats obtenus à partir d'une frame. Nous nous apercevons d'une zone (cercle orange) sans traceurs, et pour laquelle les résultats ne sont

pas du tout cohérents avec ceux du MF Pro. Nous remarquons également que le caractère oscillatoire de la courbe, qui montre l'instabilité de la méthode sur une frame unique, et démontre l'utilité des moyennes.

2. En **(b)** les champs de vecteurs de plusieurs frames sont moyennés. On remarque une amélioration de la stabilité globale de la courbe, puisqu'elle oscille moins. Cependant, les vitesses dans la zone orange sont toujours sous-évaluées. Ce comportement s'explique par le fait qu'il y a beaucoup de frames pour lesquels on ne trouve pas de traceurs dans cette zone. les vecteurs résultants sont donc une moyenne de vecteurs nuls et de vecteurs cohérents.
3. en **(c)**, une validation de vecteur, basée sur un seuil de **SNR** (voir section 3.2.2), est appliquée avant de faire une moyenne champs de vecteurs. Cette validation permet de supprimer la plupart des vecteurs nuls de la zone orange, et améliore donc considérablement les résultats. Nous remarquons cependant des oscillations de la courbe dans cette zone, ce qui montre que la méthode n'est pas encore tout à fait robuste.
4. en **(d)** aucune validation de vecteur n'est effectuée, cependant une SNR wheighted correlation mean est appliquée. Nous observons l'élimination quasi totale des oscillations de la courbe, qui correspond parfaitement à celle du MF Pro. Ce comporte stable montre que la méthode de moyenne de corrélations, avec le signal-to-noise ratio comme poids, est très robuste et permet d'obtenir des résultats cohérents, sur des zones où il y a peu de traceurs, et sans même devoir appliqué de validation de vecteurs.

D

On site checklist

LSPIV with drones - Guidelines

Preparation checklist

S'assurer d'emporter :

- ☐ GRP's
- ☐ Traceurs (copeaux de bois)
- ☐ Drone + télécommande chargés
- ☐ Carte SD
- ☐ Câble de connexion télécommande
- ☐ Décamètre
- ☐ Courantomètre + canne d'immersion
- ☐ Fil à plomb
- ☐ Bottes en caoutchouc

On site checklist

Vérifier :

- ☐ GRP's positionnés de manière à maximiser la surface d'étude
- ☐ De préférence 2 GRP's sur chaque rives
- ☐ Mesure métrique connue sur le même plan que celui de l'eau
- ☐ Sécurité lors du vol du drone

Camera

Contrôler :

- ☐ Dimension du film 4K (4096 × 2160)
- ☐ 24 fps
- ☐ Calibration de la caméra
- ☐ Preset ISO adapté aux conditions d'illumination

Shooting

S'assurer :

- ☐ Les 4 GRP's restent dans le champ de vision de la caméra
- ☐ Éviter les zones d'ombres et de reflets
- ☐ Vidéo stable
- ☐ Visibilité de la zone d'étude (pas de branches ou de zones d'exclusion)
- ☐ Ensemencement uniforme et suffisamment éloigné de la zone d'étude pour que les traceurs adoptent la vitesse d'écoulement
- ☐ Angle de vue perpendiculaire à l'écoulement



Bibliographie

- [1] L. Monde, “Asie du sud : le bilan des morts dues aux moussons grimpe à au moins 750,” 2017.
- [2] F. Planète, “Les causes des inondations,”
- [3] C. Lallement, “Hydrométrie : mesurer les débits d’une rivière, pourquoi et comment ?,” *Encyclopédie de l’Environnement*, 2018.
- [4] N. R. F. Archive, “The need for river flow measurement,”
- [5] A. Hauet, “Discharge estimation and surface velocity measurement in river using Large-Scale Particle Image Velocimetry,” Nov. 2006.
- [6] W. Thielicke, *The flapping flight of birds : Analysis and application*. PhD thesis, University of Groningen, 2014.
- [7] U. Shavit, R. J. Lowe, and J. V. Steinbuck, “Intensity capping : a simple method to improve cross-correlation piv results,” *Experiments in Fluids*, vol. 42, pp. 225–240, Feb 2007.
- [8] Wikipedia, “Histogram equalization — Wikipedia, the free encyclopedia,” 2017. [Online; accessed 12-april-2018].
- [9] Wikipedia, “Adaptive histogram equalization — Wikipedia, the free encyclopedia,” 2018. [Online; accessed 12-april-2018].
- [10] S. T. W. J. K. Markus Raffel, Christian E. Willert, *Particle image velocimetry : a practical guide*.
- [11] D. P. Hart, “Super-resolution piv by recursive local-correlation,” *Journal of Visualization*, vol. 3, 06 2000.
- [12] L. C. G. W. Merzkirch, “A method of tracking ensembles of particle images,” *Experiments in Fluids*, vol. 21, 1996.
- [13] 3Blue1Brown, “But what is the fourier transform ? a visual introduction.” <https://www.youtube.com/watch?v=spUNpyF58BY>.
- [14] E. J. Stamhuis, “Basics and principles of particle image velocimetry (piv) for mapping biogenic and biologically relevant flows,” *Aquatic Ecology*, vol. 40, 12 2006.
- [15] J. Westerweel, “Fundamentals of digital particle image velocimetry,” *Measurement Science and Technology*, vol. 8, 12 1997.
- [16] D. J. F. P. J. S. K. Debatin, “Bias and precision errors of digital particle image velocimetry,” *Experiments in Fluids*, vol. 28, 05 2000.
- [17] R. J. Adrian, “Particle-imaging techniques for experimental fluid mechanics,” 1991.
- [18] M. Muste, Z. Xiong, J. Schöne, and Z. Li, “Validation and extension of image velocimetry capabilities for flow diagnostics in hydraulic modeling,” *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 130, no. 3, pp. 175–185, 2004.
- [19] W. Thielicke and E. J. Stamhuis, “Pivlab – towards user-friendly, affordable and accurate digital particle image velocimetry in matlab,” vol. 2, 10 2014.

- [20] R. Markus, W. Christian, S. Fulvio, K. Christian, W. Steve, and K. Jürgen, “Particle image velocimetry || piv uncertainty and measurement accuracy,” vol. 10.1007/978-3-319-68852-7, 2018.
- [21] “Pivlab - time-resolved digital particle image velocimetry tool for matlab.”
- [22] G. Rion, “Vitesse moyenne d’un écoulement à surface libre à partir de mesures des vitesses de surface par une méthode lspiv,” 2017.
- [23] A. Hauet, M. Jodeau, J. Le Coz, B. Marchand, A. Die Moran, R. Le Boursicaud, and G. Dramais, “Application of the LSPIV method for the measurement of velocity fields and flood discharges in reduced scale model and in rivers,” *La Houille Blanche - Revue internationale de l’eau*, vol. 3, pp. 16–22, 2014.
- [24] G. Dramais, J. Le Coz, B. Camenen, and A. Hauet, “Advantages of a mobile LSPIV method for measuring flood discharges and improving stage-discharge curves,” *Journal of Hydro-environment Research*, vol. 5, no. 4, pp. p. 301 – p. 312, 2011.
- [25] C. R. Samarage, J. Carberry, K. Hourigan, and A. Fouras, “Optimisation of temporal averaging processes in piv,” *Experiments in Fluids*, vol. 52, pp. 617–631, Mar 2012.
- [26] C. V. N. A. F. J. Carberry, “Improvement of measurement accuracy in micro piv by image overlapping,” *Experiments in Fluids*, vol. 49, 09 2010.
- [27] Z. Xue, J. Charonko, and P. Vlachos, “Particle image velocimetry correlation signal-to-noise ratio metrics and measurement uncertainty quantification,” *Measurement Science and Technology*, vol. 25, no. 11, p. 115301, 2014.
- [28] F. Tauro, C. Pagano, P. Phamduy, S. Grimaldi, and M. Porfiri, “Large-scale particle image velocimetry from an unmanned aerial vehicle,” vol. 20, pp. 1–7, 08 2015.
- [29] I. Fujita and Y. Kunita, “Application of aerial lspiv to the 2002 flood of the yodo river using a helicopter mounted high density video camera,” *Journal of Hydro-environment Research*, vol. 5, no. 4, pp. 323 – 331, 2011. IMAGE VELOCIMETRY.
- [30] F. Tauro, A. Petroselli, and E. Arcangeletti, “Assessment of drone-based surface flow observations,” vol. 30, 10 2015.
- [31] M. Detert and V. Weitbrecht, “A low-cost airborne velocimetry system : proof of concept,” *Journal of Hydraulic Research*, vol. 53, no. 4, pp. 532–539, 2015.
- [32] “Video stabilization using point feature matching.” The MathWorks, Natick, MA, USA.
- [33] “Matlab vision.pointtracker system object.” The MathWorks, Natick, MA, USA.
- [34] “Matlab fit geometric transformation to control point pairs (fitgeotrans).” The MathWorks, Natick, MA, USA.
- [35] Benetazzo, A., Gamba, M., Barbariol, and F, “Unseeded Large Scale PIV measurements accounting for capillary-gravity waves phase speed,” *ArXiv e-prints*, July 2016.
- [36] “Courantomètre à induction magnétique ott mf pro : description.”