

Vitesse moyenne d'un écoulement à surface libre à partir de mesures des vitesses de surface par une méthode LSPIV

Mémoire présenté par
Guillaume Rion

en vue de l'obtention du grade de master en
Ingénieur civil en construction

Promotrice
Professeur Sandra Soares-Frazão Ir

Lecteurs
Olivier Carlier d'Odeigne Ir, Pierre-Yves Bolly Ir

Année académique 2016-2017

Remerciements

Un mémoire est l'aboutissement d'un cycle d'études et un travail de longue haleine pour lequel un soutien efficace est indispensable.

En tout premier lieu je souhaite adresser mes plus vifs remerciements à ma promotrice, le Professeur Sandra Soares-Frazão, pour son suivi - patient - durant l'année, son dévouement à transmettre son savoir et ses précieux conseils. Je mesure la chance qui m'a été offerte de bénéficier de cet encadrement exceptionnel et remarquable.

Je tiens aussi à remercier Olivier Carlier pour sa disponibilité, son soutien et ses multiples explications supplémentaires toujours éclairées. Sans lui j'aurais certainement eu peine à élucider diverses zones d'ombre rencontrées durant mes essais et recherches.

Un grand merci également à toute l'équipe du laboratoire de génie civil pour leur accueil. J'ai pu apprécier au cours de mes expériences l'excellente ambiance qui y régnait, rendant les travaux au laboratoire plus qu'agréables. Au sein de cette belle équipe, je tiens à remercier particulièrement Samuel Laurent pour sa disponibilité, sa gentillesse et pour m'avoir plus qu'assisté dans l'installation des différents appareils de mesure, restant toujours très calme et souriant, malgré les nombreuses questions : une belle rencontre !

A Monsieur Pierre-Yves Bolly, j'adresse bien sûr un grand merci pour avoir accepté de relire ce travail.

Enfin, je tiens à remercier chaleureusement mes chers parents et Laura pour leur indéfectible soutien durant ces cinq années d'études : merci pour votre relecture, merci pour les petites touches apportées à la rédaction de ce travail et merci pour vos attentions durant les heures parfois longues et difficiles.

TABLE DES MATIERES

1	Mise en contexte	5
2	Etat de l'art	7
2.1	Techniques de mesure intrusives	7
2.1.1	Le moulinet	7
2.1.2	La méthode volumétrique	7
2.1.3	La méthode des flotteurs	8
2.1.4	La méthode par dilution	8
2.1.5	Courantomètre électromagnétique : ADC	8
2.1.6	Profileurs acoustiques par effet Doppler : ADCP	8
2.1.7	La méthode hydraulique	9
2.1.8	Tube de Pitot	9
2.1.9	Hotwire	10
2.1.10	Conclusion sur les méthodes intrusives	10
2.2	Techniques de mesures non-intrusives	10
2.2.1	Le Lidar et le radar Doppler	11
2.2.2	Les mesures depuis l'espace	11
2.2.3	L'hydrométrie par analyse d'images	12
3	La LSPIV	16
3.1	Description de la méthode	16
3.2	Sources d'erreurs	22
3.2.1	Ensemencement	22
3.2.2	Illumination	22
3.2.3	Enregistrement	23
3.2.4	Transformations d'images	23
3.2.5	L'analyse PIV	24
3.2.6	Post-processing	25
4	PIVlab	26
4.1	Introduction	26
4.2	Importation des images	26
4.3	Paramètres d'analyse	27
4.3.1	Zones d'exclusion	27
4.3.2	Prétraitement des images	28
4.3.3	Paramètres PIV	30
4.4	Calibration	31
4.5	Analyse	32
4.6	Validation des vecteurs	33
4.7	Présentation des résultats	34
5	Mesures en canal	36
6	Résultats	45
6.1	Influence des paramètres et quantification d'erreurs	45
6.1.1	Densité de traceurs	45
6.1.2	Reflets lumineux	47
6.1.3	Flou de mouvement	49
6.1.4	Rectification des effets de distorsion	50
6.1.5	Filtres	53
6.1.6	Taille de la fenêtre d'interrogation	54

6.2	Précision de la méthode	56
6.2.1	Pour différents débits.....	56
6.2.2	Pour différents traceurs.....	61
7	Lien entre vitesse de surface et vitesse moyenne	64
7.1	Relations existantes.....	64
7.2	Détermination expérimentale du coefficient alpha	66
8	Conclusion et perspectives	70
9	Bibliographie	72
10	Annexes	75
10.1	Mode d'emploi.....	75
10.2	Codes Matlab.....	77
10.2.1	Extraction des images d'une vidéo.....	77
10.2.2	Passage des images en niveaux de gris	77
10.2.3	Rectification des effets de distorsion de l'objectif	77
10.2.4	Rectification et passage en niveaux de gris.....	81

1 Mise en contexte

Si notre Terre porte le nom de planète bleue, c'est parce que sa surface est recouverte à plus de 70% par les océans, les rivières et autres réseaux hydrographiques.

Malgré cette quasi omniprésence de l'eau, la complexité des voies d'eau en fait une entité dynamique en perpétuelle évolution, passant par une succession d'états d'équilibre partiels, qu'il est difficile de caractériser avec précision.

Parmi les caractéristiques principales de ces cours d'eau, le débit en est une qui fournit un bon nombre d'informations sur l'utilisation que l'Homme peut en faire.

Citons par exemple, la détermination du volume d'eau disponible pour alimenter une turbine hydroélectrique, pour irriguer des cultures, pour permettre la navigation des bateaux, ...

Mais la connaissance du débit nous permet également de prévenir et d'évaluer les risques d'inondation évitant par là des catastrophes naturelles.

Ces événements, bien souvent catastrophiques en terme de dégâts matériels et humains, représentaient à eux seuls plus d'un tiers des catastrophes naturelles dans le monde entre 1990 et 2007.

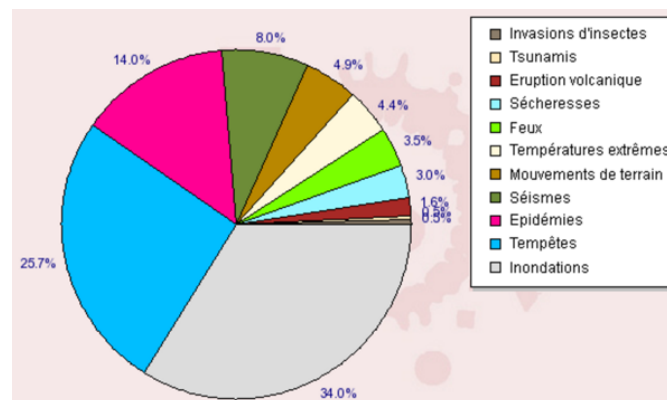


Figure 1 : type de catastrophes survenues dans le monde entre 1990 et 2007

Une inondation découle de la submersion des terrains avoisinants le lit mineur d'un cours d'eau suite à une augmentation souvent brutale du débit.

Le débit d'une rivière est quant à lui défini comme la quantité d'eau passant au travers d'une section transversale en un certain temps. Il dépend donc à la fois de la géométrie de la section considérée mais également de la distribution des vitesses sur cette même section.

De nombreuses techniques ont vu le jour ces dernières années afin de déterminer avec la plus grande précision possible la bathymétrie d'un cours d'eau.

Les mesures Lidar, un exemple parmi d'autres, consistent en une émission/réception d'une impulsion laser. La bathymétrie est alors déduite sur base du temps d'aller-retour de l'impulsion du capteur aux cibles.

En ce qui concerne la vitesse moyenne d'écoulement, il existe également de nombreux moyens permettant de la déterminer comme nous le verrons dans la section suivante.

Parmi ces méthodes, l'une d'elle, non-intrusive, fera l'objet de ce travail de fin d'études : la « LSPIV » pour « Large Scale Particle Image Velocimetry ».

2 Etat de l'art

Il existe de nombreuses techniques de mesure de débit en rivière. Le choix de l'une ou l'autre méthode se fera en fonction de divers critères à savoir :

- La précision souhaitée
- L'ordre de grandeur du débit
- La configuration du site et les conditions d'écoulement
- Le matériel de mesure et le temps de mesure disponibles

Parmi ces méthodes, on distingue deux grandes catégories : les méthodes intrusives et les méthodes non-intrusives.

La suite du rapport vise à décrire brièvement ces différentes techniques.

2.1 Techniques de mesure intrusives

Cette catégorie regroupe, comme son nom l'indique, les techniques pour lesquelles l'instrument de mesure est directement introduit dans le cours d'eau.

2.1.1 Le moulinet

C'est certainement l'appareil le plus utilisé aujourd'hui pour la mesure de vitesse ponctuelle. Celui-ci est composé d'une partie appelée « corps du moulinet » comportant un axe horizontal sur lequel tourne une hélice.

C'est à partir de la rotation de cette hélice que la vitesse du courant est déduite.

Le principal inconvénient de cette technique réside dans le fait que les mesures doivent être répétées en plusieurs points situés sur une même verticale, nécessitant un temps de mesure relativement important.



Figure 2 : Moulinet hydrométrique

2.1.2 La méthode volumétrique

Cette méthode, relativement simple, consiste à mesurer le temps de remplissage d'un volume connu. Le débit en est ensuite directement déduit.

Le matériel nécessaire pour réaliser cette mesure est évidemment peu coûteux mais le degré de précision atteint est faible. De plus, cette méthode ne s'applique qu'aux écoulements à faible débit.

2.1.3 La méthode des flotteurs

La vitesse de surface est ici déduite sur base du temps mis par une série de flotteurs, répartis à la surface du cours d'eau, pour parcourir une distance connue.

Ces flotteurs peuvent être artificiels ou naturels. La vitesse moyenne de l'écoulement est déduite en multipliant la moyenne des vitesses de surface obtenues lors de plusieurs essais par un coefficient approprié.

Evidemment, la précision maximale espérée d'une telle méthode ne dépasse pas les 10% mais sa simplicité et sa rapidité de mise en œuvre fournissent une bonne première approximation.

2.1.4 La méthode par dilution

C'est une méthode physique, nécessitant très peu de matériel, basée sur la variation de concentration d'un traceur dans l'eau, permettant sous certaines conditions, d'obtenir un degré de précision satisfaisant (de l'ordre de 5%).

Le débit est ensuite déduit sur base de la relation suivante :

$$Q = k \left(\frac{C_1}{C_2} \right)$$

dans laquelle :

- k est un coefficient adimensionnel de débit inférieur ou égal à l'unité
- C_1 est la concentration du traceur au point d'injection
- C_2 est la concentration du traceur à l'aval du point d'injection

2.1.5 Courantomètre électromagnétique : ADC

Cette méthode qui permet également la mesure de la vitesse en un point, se base sur un principe physique : l'eau, en se déplaçant dans un champ électromagnétique généré par la sonde du courantomètre, produit une force induite proportionnelle à la vitesse d'écoulement.

L'avantage principal de ce matériel est qu'il permet la mesure de vitesses sur une gamme étendue (de 0,1m/s à 6m/s) et qu'il n'est pas gêné notamment par les herbes aquatiques.

2.1.6 Profileurs acoustiques par effet Doppler : ADCP

Cette technique se base sur la réflexion d'ondes acoustiques afin d'effectuer une mesure de vitesse.

L'ADCP émet, depuis la surface libre et vers le fond de la rivière, une série d'ondes sonores à une fréquence connue. Ces ondes sonores sont ensuite réfléchies par les particules en suspension dans le cours d'eau qui se déplacent à la même vitesse que l'écoulement.

La vitesse est alors déduite de la différence de fréquence entre l'onde émise et l'onde réfléchie.

La réflexion acoustique dans les zones situées près du fond et près de la surface libre ne permet cependant pas la mesure de vitesse sur la totalité de la section.



Figure 3 : Profileur acoustique sur flotteurs

2.1.7 La méthode hydraulique

La méthode hydraulique est une méthode dynamique pour laquelle la mesure de débit est obtenue à partir, notamment, de la mesure de la hauteur d'eau à l'amont d'un ouvrage de structure bien déterminée.

Elle consiste donc à implanter, dans l'écoulement, une section de contrôle artificielle, permettant d'obtenir un régime critique, c'est-à-dire une relation univoque entre le débit et la hauteur d'eau :

$$Q = KCh^n$$

dans laquelle

- K est un coefficient de débit lié à h
- C et n sont des paramètres dépendant des caractéristiques de l'ouvrage

Le niveau de précision atteint par cette méthode dépend comme toujours du soin apporté dans la réalisation des mesures mais également de la qualité de l'étalonnage préalable et du choix des paramètres caractéristiques de l'ouvrage.

2.1.8 Tube de Pitot

Un tube de Pitot est constitué de deux tubes coudés dont les orifices doivent être en contact avec le fluide dont on veut mesurer la vitesse.

L'orifice du tube extérieur est ouvert perpendiculairement à l'écoulement et permet une mesure de la pression statique. L'orifice du tube intérieur est quant à lui parallèle à l'écoulement. La pression mesurée par ce second tube est donc la pression totale, c'est-à-dire la somme de la pression dynamique et de la pression statique.

La différence entre les deux mesures correspond donc à la pression dynamique dont on peut, sur base de l'équation de Bernoulli, déduire la vitesse d'écoulement du fluide autour du tube de Pitot.

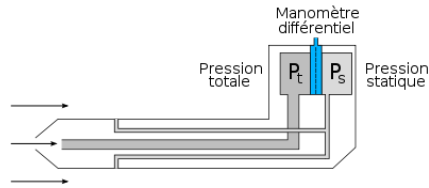


Figure 4 : Représentation schématique d'un tube de Pitot

2.1.9 Hotwire

Cette méthode utilise la convection pour déduire une vitesse d'écoulement.

L'anémomètre est ici constitué d'un fin fil métallique chauffé électriquement et plongé dans le fluide dont on souhaite mesurer la vitesse. La vitesse du fluide peut être déduite sur base de l'incrément de puissance à fournir afin de maintenir le fil à température constante.

Cet appareil est pour le moment principalement utilisé pour mesurer la vitesse de l'air mais tend à se développer également pour des mesures d'écoulements liquides.

2.1.10 Conclusion sur les méthodes intrusives

Les méthodes intrusives citées précédemment fournissent, pour la plupart, des résultats relativement satisfaisants pour des conditions « normales » d'écoulement.

Elles ne sont cependant pas adaptées aux mesures en période de crue et étiage.

En effet, une crue est souvent associée à un transport de matériaux solides, d'origine humaine (déchets en plastique) ou non (morceaux de bois) mettant en danger les opérateurs et les équipements utilisés. De plus, le débit variant rapidement sur de courtes périodes lors de ces événements, les résultats fournis par ces méthodes intrusives qui nécessitent généralement un temps important de mesures sont souvent entachés d'erreurs.

En période d'étiage, les faibles profondeurs rencontrées ne permettent pas une immersion suffisante des instruments tels que l'ADCP et le moulinet.

Ces constatations ont dès lors poussé les hydrologues à développer de nouvelles techniques de mesures dites « non-intrusives ».

2.2 Techniques de mesures non-intrusives

Contrairement aux techniques de mesure intrusives, les techniques reprises ci-dessous permettent d'obtenir une mesure de vitesse en surface seulement.

En réalité, la distribution des vitesses le long d'une verticale est de type logarithmique avec un maximum situé légèrement en dessous de la surface libre (point M) comme l'illustre la figure ci-dessous.

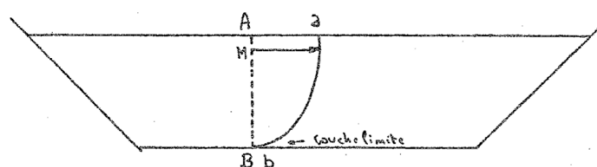


Figure 5 : Distribution des vitesses sur une verticale [Zech, 2008]

Sur base de ce profil, nous pouvons également constater que la vitesse moyenne d'un écoulement ne correspond pas à la vitesse de surface, cette dernière étant proche de la vitesse maximale d'écoulement.

Un lien devra donc être établi entre ces deux vitesses afin de pouvoir estimer un débit à partir d'une mesure non-intrusive.

Nous nous sommes intéressés de plus près à ce lien dans la section 7 de ce rapport.

Les techniques de mesure non-intrusives présentent cependant l'avantage de ne pas modifier l'écoulement par l'immersion d'un appareil de mesure dans celui-ci et sont bien souvent, comme la LSPIV, rapides à mettre en œuvre sans nécessairement nécessiter l'utilisation de matériel imposant.

2.2.1 Le Lidar et le radar Doppler

La technique est ici identique à celle décrite dans les mesures intrusives.

La différence provient du fait que l'appareil de mesure n'est plus immergé dans l'eau mais embarqué à bord d'un hélicoptère ou d'un autre moyen de survoler la zone d'étude.

Ici, l'onde est cependant ici réfléchi par les rugosités de la surface de la rivière. Celles-ci peuvent être créées par la turbulence, par l'effet du vent ou par une combinaison des deux.

Les vitesses ainsi obtenues correspondent à des vitesses de surface à partir desquelles il est possible, à l'aide d'un coefficient multiplicateur judicieusement choisi, d'obtenir une vitesse moyenne. Cette démarche introduit cependant une nouvelle source d'erreur.

Il a été démontré que cette technique permettait d'obtenir des résultats relativement précis, avec une erreur maximale de 10%, dans les meilleures conditions, sur l'estimation du débit.

Des études sont en cours afin de déterminer plus précisément l'influence des effets du vent sur les résultats obtenus.

2.2.2 Les mesures depuis l'espace

Peu d'informations sont actuellement disponibles sur cette technique.

Les instruments de mesure sont ici embarqués dans un satellite mais il est nécessaire de connaître au préalable une relation hydraulique permettant de faire un lien entre le débit et les caractéristiques de la rivière observables depuis l'espace. C'est sur base de celles-ci qu'une estimation du débit pourra être faite.

Ces caractéristiques peuvent être la hauteur d'eau (par altimétrie radar), la largeur et la morphologie de la rivière et potentiellement, la vitesse de surface via un radar ou Lidar Doppler.

Les limitations principales de cette méthode proviennent de la précision et de la résolution spatiale. En outre, la largeur de la rivière doit être au minimum de 200 mètres pour permettre une estimation de la hauteur d'eau et la vitesse en surface ne pourra être déterminée seulement sur deux ou trois points d'une section transversale.

2.2.3 L'hydrométrie par analyse d'images

Au cours des 30 dernières années, l'évolution rapide des logiciels de traitement d'image, des appareils photo et caméras a permis d'utiliser ces technologies afin de déterminer les vitesses d'écoulement de fluide en surface.

L'avantage principal de ces techniques réside dans leur facilité de mise en œuvre. Leur principe de base est de suivre le déplacement de particules visibles à la surface de l'eau, sur une série d'images pour lesquelles le pas de temps est connu. Connaissant ainsi un déplacement et un pas de temps, il est possible de déduire une vitesse de surface.

Il existe actuellement deux techniques d'hydrométrie par analyse d'images : la PTV (Particle Tracking Velocimetry) et la LSPIV (Large Scale Particle Image Velocimetry) qui est issue de la PIV (Particle Image Velocimetry) mais appliquée à de plus grandes surfaces.

La PTV, comme son nom l'indique, consiste à identifier le déplacement de particules individuelles. Actuellement, trois algorithmes permettent une analyse PTV [Tzu-Yin, 2016] :

- *Nearest tracking*

Cet algorithme se base sur l'hypothèse que les particules les plus proches sur une série d'images successives constituent en réalité une et une seule même particule qui se déplace.

Le vecteur vitesse est alors déduit en soustrayant les coordonnées de la particule sur deux images successives pour lesquelles le pas de temps est connu.

- *Pattern tracking*

L'algorithme est ici basé sur l'hypothèse qu'un modèle local formé par des particules voisines - qui peut être décrit par un diagramme de Voronoï - gardera une structure identique sur un certain nombre d'images successives. En suivant le déplacement de ces structures semblables sur plusieurs séries d'images, une vitesse de surface pourra être déduite.

- *Path tracking*

Ce troisième algorithme possible (à ce jour) pour une mesure PTV se base à nouveau sur une hypothèse qui est cette fois de considérer la trajectoire d'une particule comme lisse et inertielle. Cette supposée trajectoire permet ainsi d'identifier une même particule sur deux images successives et d'en déduire une vitesse.

Cette hypothèse n'est cependant pas toujours vérifiée, qui plus est, en surface, là où les effets du vent et de la turbulence induisent des trajectoires souvent totalement aléatoires.

Enfin, pour conclure sur les techniques d'hydrométrie, venons-en à la méthode qui sera le sujet de ce travail : la LSPIV.

Le principe de cette méthode sera développé plus en profondeur dans le chapitre qui lui est consacré mais, comme la PTV, cette méthode consiste à suivre le déplacement, sur une séquence d'images pour laquelle le pas de temps est connu, de particules visibles (dites traceurs) pouvant être présentes naturellement à la surface de l'eau (écume par exemple) ou ajoutées par l'observateur (billes de frigolite, copeaux de bois, ...) dans le but de réaliser ses mesures.

Il existe plusieurs moyens d'acquérir une série d'images d'un cours d'eau.

Citons par exemple l'utilisation d'un bras télescopique monté sur un support depuis la berge [Hauet, 2014] ou encore l'utilisation de drones. Ces derniers connaissent des progrès technologiques ultra rapides ces dernières années et permettent de limiter le matériel nécessaire à l'acquisition d'images.

De plus, ils présentent l'avantage d'être facilement utilisables, moyennant quelques heures de formation et peuvent être utilisés même en période de crue depuis une zone totalement sûre limitant ainsi les risques encourus par l'hydrologue.

De récentes études menées en 2015 ont tenté d'évaluer la faisabilité d'une mesure LSPIV à l'aide d'un drone [Tauro et al., 2015]. Ce drone était équipé d'une caméra positionnée sur une verticale, au-dessus du cours d'eau, permettant ainsi de s'affranchir d'une éventuelle orthorectification d'images nécessaire à l'obtention de résultats précis dans le cas d'une prise d'images avec un certain angle de vue oblique. Une série de points de contrôle étaient cependant répartis sur le sol afin de calibrer les images avec précision et de permettre la détermination du facteur de conversion entre pixels et mètres.

L'équipe en charge de ce projet est arrivée à la conclusion que le drone était un excellent moyen d'acquisition d'images en vue d'une analyse PIV, fournissant des résultats précis. Cependant des études supplémentaires doivent être réalisées afin de quantifier précisément les effets du vent et des vibrations de la caméra sur la précision des résultats.

En plus d'essais réalisés afin de déterminer les différentes contraintes et sources d'erreurs principales de la méthode - qui seront détaillées dans le chapitre suivant consacré à la LSPIV - des tests ont également été menés afin de déterminer l'influence de certains paramètres « clés » de l'analyse sur les résultats. Ceux-ci sont au repris ci-dessous :

- Influence de l'ensemencement (quantité et répartition)
- Influence de l'angle de prise de vue des photos
- Influence du nombre de Froude

Les conclusions de ces essais sont importantes afin d'effectuer des mesures précises.

En ce qui concerne l'ensemencement, les essais ont été réalisés pour plusieurs densités de traceurs répartis de manière uniforme à la surface de l'eau [Weitbrecht et al., 2002]. Ces densités correspondaient à une quantité de 1 à 5 traceurs (représentés par un pixel sur l'image) par zone d'interrogation. Ces zones sont en fait des fenêtres centrées successivement, au cours de l'analyse PIV, sur des points adjacents de l'image et pour lesquelles une corrélation est faite afin de déduire un déplacement de traceurs. Nous reviendrons sur ce point dans la description de la LSPIV. Les conclusions qui ont abouti des ces études est que la densité optimale de traceurs se situe entre 3 et 5 traceurs par fenêtre d'interrogation. Il a cependant été remarqué que lorsque la quantité de traceurs devenait trop importante et pour des écoulements

subcritiques, ceux-ci avaient tendance à s'agglomérer pour former un ensemble de particules pouvant tourner sur lui-même, faussant ainsi également les résultats. D'où l'importance d'une répartition la plus homogène possible des traceurs.

Pour ce faire, un appareil (figure 6) permettant de répartir les traceurs sur une section transversale a été mis au point.

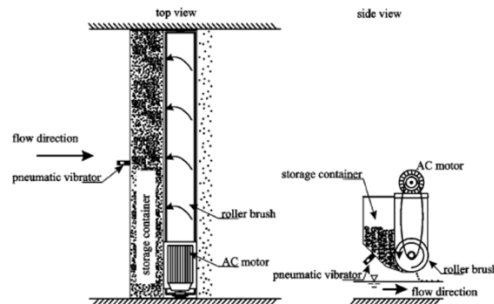


Figure 6 : Ensemencement mécanique de traceurs [Weitbrecht et al., 2002]

Pour l'angle de prise de vue des photos, les essais ont été réalisés avec un angle oblique de la caméra respectivement de 0° , 15° , 30° et 45° [Tauro et al., 2015]. Il a été constaté qu'au plus la caméra était positionnée de manière oblique, au plus l'erreur produite dans l'orthorectification des images était importante surtout au-delà de 30° .

Cependant, il a également été constaté une sous-estimation du débit pour un angle de 0° (pour lequel l'ortho-rectification n'est pas nécessaire) et pour des valeurs élevées du nombre de Froude. Cette perte de précision s'explique par le fait que pour ce type d'écoulement, de nombreuses vaguelettes apparaissent à la surface de l'eau créant un mouvement tridimensionnel qui ne peut être visualisé à partir d'une caméra positionnée perpendiculairement à la surface de l'eau. Il a donc été recommandé d'utiliser un angle de 15° à 30° pour les écoulements à nombre de Froude élevé.

Des tests ont également été réalisés sur la rivière Iowa (USA) afin d'évaluer le débit du cours d'eau en temps réel [Hauet, 2006]. Ceux-ci ont fourni de bonnes estimations du débit, en comparaison avec les résultats fournis par d'autres instruments de mesure intrusifs. Cependant, ces résultats présentaient une forte dispersion due principalement aux non-uniformités locales d'illumination (reflets de lumière sur l'eau), du vent et de la densité de traceurs affectant ainsi l'estimation continue du débit.

Un algorithme qui permet la détection automatique des non-uniformités locales d'illumination a été mis au point avec comme objectif le fait de pouvoir s'affranchir de cette source d'erreur dans les mesures réalisées à toute heure de la journée.

La LSPIV a également été utilisée pour tenter d'établir un lien entre la bathymétrie d'une rivière et les vitesses de surface rencontrées [Polatel, 2006]. Les dunes, anti-dunes et autres formes de fond générant des structures hydrauliques en surface. Les résultats ainsi obtenus sont encourageants mais présentent certaines limitations. Les mesures ont en effet été réalisées en canal rectangulaire où l'écoulement et les formes de fond sont beaucoup plus simples qu'en rivière naturelle.

Un autre cas d'utilisation consiste en la mesure de vitesse d'écoulement de ruissellement sur un versant, là où les hauteurs d'eau sont trop faibles (de l'ordre de quelques millimètres) que pour permettre une mesure à l'aide d'un appareil intrusif [Bouchenafa et al., 2016].

Encore une fois, les résultats obtenus étaient encourageants et présentaient une erreur relative du même ordre de grandeur que celle obtenue à l'aide d'instruments de mesure ayant déjà prouvé leur précision.

Là où d'autres études doivent encore être menées concernent les cas pour lesquels la géométrie de la rivière ou de l'ouvrage en question est complexe et engendre des structures hydrauliques difficilement identifiables.

Il existe de nombreux logiciels open source disponibles pour effectuer une analyse PIV.

Citons entre autres PIV analyser, PIV plugin, OpenPIV, PIVlab, JPIV et Fudaa-LSPIV, ce dernier présentant l'avantage de permettre une ortho-rectification des photos prises avec un grand-angle depuis la berge d'un cours d'eau par exemple.

PIVlab a cependant été le logiciel que nous avons décidé d'utiliser pour réaliser nos essais. Celui-ci fonctionne en effet via Matlab et présente les avantages d'offrir de nombreuses fonctionnalités, un temps de calcul relativement faible, d'une exportation possible des résultats, d'un forum alimenté en questions/réponses et enfin, d'être gratuit (hormis la licence Matlab). Un chapitre sera consacré à l'utilisation de PIVlab.

Remarquons enfin qu'il existe également une application LSPIV pour smartphone.

Nous avons pu tester celle-ci mais malheureusement, lorsqu'elle ne bloquait pas, les résultats obtenus étaient totalement aberrants ...

En conclusion, la LSPIV fait encore l'objet de nombreuses études destinées à évaluer sa précision mais également afin d'améliorer son efficacité et sa robustesse dans diverses situations d'écoulement se rapprochant le plus possible des cas rencontrés en rivières naturelles.

3 La LSPIV

La LSPIV est une technique de mesure, par analyse d'images, de champ en deux dimensions de vitesse instantanée de surface pouvant couvrir des zones allant jusqu'à l'hectare. Elle est dérivée de la PIV s'appliquant en laboratoire uniquement. Les algorithmes utilisés par les deux méthodes sont cependant identiques mais la LSPIV nécessite une série d'étapes supplémentaires pour obtenir des résultats précis.

Les premières mesures en milieu fluvial ont été réalisées en 1994, au Japon, par Fujita et Komura mais depuis, trop peu d'études ont été menées sur le sujet.

3.1 Description de la méthode

Concrètement, une analyse LSPIV ne requiert que peu de matériel :

- Une caméra (pouvant être montée sur un drone ou un bras télescopique par exemple)
- Des traceurs qui peuvent être d'origine naturelle (écume, copeaux de bois, ...) ou non (billes de frigolite)
- Un ordinateur et logiciel permettant l'analyse des images
- Un écoulement de fluide, bien évidemment

L'analyse se déroule en plusieurs étapes distinctes.

La première étape consiste à ensemençer la rivière à l'aide de traceurs si celle-ci ne présente pas de formes naturelles dont le déplacement est visible à sa surface.

Cette première étape est primordiale car une trop faible quantité de traceurs répartis de manière non-uniforme peut avoir une grande influence sur les résultats de la méthode. De même, une trop grande concentration de traceurs induira également un certain nombre de vecteurs erronés. Cette contrainte sera analysée plus en profondeur dans la suite du travail.

La deuxième étape est l'enregistrement d'une vidéo ou d'une série d'images horodatées dont l'intervalle de temps est suffisamment court pour que les traceurs soient visibles sur deux images successives et suffisamment long pour qu'un déplacement significatif soit identifiable. Un autre paramètre à prendre en compte lors de l'enregistrement concerne l'illumination de la zone d'étude. Celle-ci est primordiale puisqu'elle permet d'obtenir un certain contraste entre les particules à la surface de l'eau et le fond de la rivière ou du canal.

Néanmoins, ce contraste n'est pas toujours suffisant pour permettre l'analyse PIV et donc la détection des vecteurs représentatifs de la vitesse d'écoulement en surface.

De plus, la présence de zones d'ombre ou de zones pour lesquelles un fort reflet lumineux est observable - ce qui peut être le cas notamment lorsque la source lumineuse, naturelle ou artificielle, n'est pas bien orientée - peuvent entraîner respectivement une absence de détection de déplacement résultant en une sous-estimation de la vitesse moyenne de surface ou au contraire des déplacements dus au mouvement des reflets lumineux engendrés par les ondulations de la surface de l'eau.

C'est pourquoi la troisième étape consiste en un traitement des images ainsi obtenues, à l'aide de différents filtres. Ces filtres peuvent permettre de supprimer les signaux d'arrière-plan ou encore d'améliorer le contraste entre les traceurs et le fond du cours d'eau permettant de supprimer ou du moins d'atténuer les différentes sources d'erreur liées à l'éclairage. Ces filtres fonctionnent en modifiant les intensités des différents pixels composant une image. Les principaux seront détaillés dans la partie consacrée au logiciel PIVlab.

L'étape suivante, la quatrième, concerne à nouveau la modification des images mais cette fois-ci d'un point de vue géométrique.

Deux types de distorsions sont à corriger afin de permettre une analyse PIV précise.

La première concerne l'angle de prise de vue de la zone d'étude.

Ce premier type de distorsion a pour conséquence qu'en fonction de leurs positions sur une image, certains sujets peuvent sembler inclinés et les droites peuvent devenir courbes comme l'illustre bien la figure suivante.

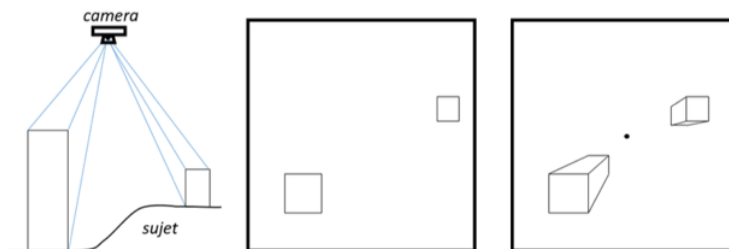


Figure 7 : Illustration de l'effet de l'ortho-rectification : la figure de gauche illustre la scène photographiée, celle du centre représente une ortho-photo de la scène, celle de droite correspond à une photographie non rectifiée [Macq, 2016]

Une ortho-photo peut être obtenue à l'aide de points de contrôles disposés de manière homogène sur la zone d'étude. Les coordonnées de ces points de contrôle ou GRP (Ground Reference Point) doivent être préalablement déterminées avec précision sous peine d'introduire une source d'erreur dans l'analyse PIV. Le résultat correspond alors à une image superposable à une carte, obtenue par projection orthogonale. La taille réelle d'un pixel est alors identique quelle que soit la zone considérée de l'ortho-photo.

Remarquons le fait que le logiciel Fudaa-LPSIV permet cette ortho-rectification au contraire des autres logiciels d'analyse PIV cités précédemment.

Lors de nos essais, la caméra se trouvait toujours perpendiculaire à la zone d'étude. Nous n'avons donc pas eu recours à l'ortho-rectification d'image à l'aide de GRP.

Cependant, le deuxième type de distorsion, évoqué plus haut, a bien dû être corrigé pour permettre l'analyse PIV. Ce type de distorsion correspond à ce que l'on nomme souvent l'effet « fish-eye » ou encore distorsion en barillet et apparaît lorsque l'on utilise des objectifs grand-angles à courte focale. Il est donc lié à une distorsion de l'objectif de la caméra utilisée et se caractérise par une tendance à incurver les droites vers l'extérieur de l'image comme représenté sur la figure 8.

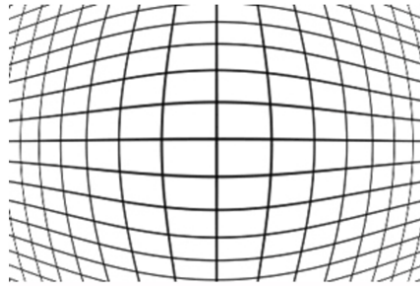


Figure 8 : Distorsion radiale en barillet

Enfin, remarquons que de nombreux logiciels permettent de s'affranchir de cette distorsion moyennant la connaissance de certaines caractéristiques de l'appareil utilisé.

Les images ainsi obtenues doivent encore être converties en niveaux de gris, l'analyse PIV utilisant en effet les variations de niveaux de gris des pixels d'une image à l'autre.

Intéressons-nous à présent de plus près à cette analyse statistique : une image numérique est, par définition une carte d'intensité de pixels, chaque pixel ayant sa propre intensité. L'analyse statistique effectue alors une corrélation croisée entre deux aires d'interrogation pour identifier les déplacements de traceurs. Remarquons qu'il existe d'autres méthodes, la corrélation croisée étant la plus utilisée, notamment par les différents logiciels PIV que nous avons cités précédemment.

La corrélation croisée consiste à évaluer un coefficient de corrélation entre une aire d'interrogation (AI), centrée sur un point a_{ij} de la grille de calcul d'une image « 1 » prise à un temps « t », et une aire d'interrogation centrée en n'importe quel point dans une aire de recherche autour de a_{ij} sur une image « 2 » prise à un temps « t+dt » (centrée en b_{ij}).

L'illustration suivante a pour objectif de mieux visualiser les différentes zones venant d'être définies :

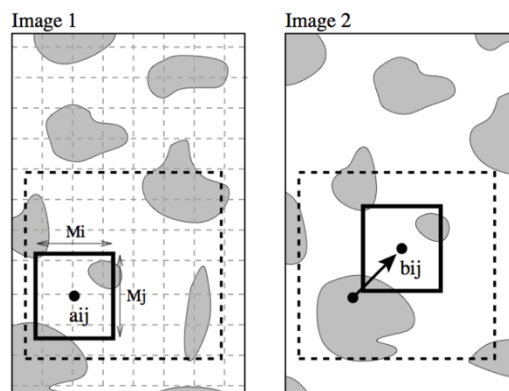


Figure 9 : Grille d'interrogation, aire de recherche et aire d'interrogation [Hauet, 2006]

Sur celles-ci, les petits carrés en pointillés de l'image 1 représentent la grille de calcul, c'est-à-dire les différentes zones pour lesquelles un vecteur vitesse est calculé.

L'aire d'interrogation (AI) est représentée par les carrés en traits pleins, présents sur les images 1 et 2 et centrés respectivement en a_{ij} et b_{ij} . Sa taille doit être suffisamment petite pour préserver l'échelle de l'écoulement et suffisamment grande pour inclure des traceurs.

Enfin, l'aire de recherche (AR) est représentée par les deux grands carrés en traits pointillés observables sur les deux images. Sa taille définit la zone pour laquelle différents coefficients de corrélation seront calculés entre une AI de l'image 1 et plusieurs AI de l'image 2.

Les différentes étapes citées précédemment peuvent donc être résumées de la sorte :

- 1) On fixe une aire d'interrogation dans l'aire de recherche de l'image 1
- 2) On évalue la carte d'intensité de pixels de cette aire d'interrogation
- 3) On évalue un coefficient de corrélation entre l'aire d'interrogation de l'image 1 et plusieurs aires d'interrogations couvrant l'aire de recherche de l'image 2.

Le coefficient de corrélation est calculé via la relation suivante (*Fujita et. al, 1998*) :

$$R_{a_{ij}b_{ij}} = \frac{\sum_{i=1}^{M_i} \sum_{j=1}^{M_j} [(A_{ij} - \overline{A_{ij}})(B_{ij} - \overline{B_{ij}})]}{\left[\sum_{i=1}^{M_i} \sum_{j=1}^{M_j} (A_{ij} - \overline{A_{ij}})^2 \sum_{i=1}^{M_i} \sum_{j=1}^{M_j} (B_{ij} - \overline{B_{ij}})^2 \right]^{\frac{1}{2}}}$$

Dans cette relation :

- M_i et M_j correspondent aux tailles des fenêtres d'interrogation des images 1 et 2, exprimées en pixel.
- A_{ij} et B_{ij} sont les distributions des intensités des pixels en niveau de gris, c'est-à-dire compris entre 0 et 255 (pour une image 8bits/pixel), dans les deux fenêtres d'interrogation.
- $\overline{A_{ij}}$ et $\overline{B_{ij}}$ indiquent la valeur moyenne des intensités des pixels pour les fenêtres d'interrogation.

Pour chaque déplacement de la fenêtre d'interrogation dans l'image 2, un coefficient de corrélation est donc calculé. Le résultat obtenu correspond donc à une matrice contenant un ensemble de coefficients de corrélation.

Dans cette matrice, le coefficient de corrélation le plus élevé indiquera le déplacement le plus probable du traceur à la surface de l'eau. En divisant ensuite ce déplacement par le temps séparant les images 1 et 2, une vitesse en pixels par seconde peut alors être déterminée.

Un problème de précision apparaît cependant sur ce qui a été dit précédemment : la taille de la matrice des coefficients de corrélation correspond à une taille s'exprimant en pixel. Le pic de corrélation recherché ne peut par conséquent pas être trouvé avec une précision supérieure à celle d'un pixel, d'où l'importance de la qualité des images de l'écoulement obtenues. Plusieurs méthodes d'interpolation sub-pixels ont cependant été mises au point afin de remédier à ce manque de précision. Cette interpolation peut être réalisée à l'aide d'une fonction parabolique

ou gaussienne par exemple mais toutes font l'hypothèse d'une continuité du champ des corrélations.

Deux exemples proposés par PIVlab sont représentés sur les figures 10 et 11 (sur la première, un seul axe est représenté). Sur la première figure, l'estimation sub-pixel prend uniquement en considération les valeurs de chaque pixel adjacent au pixel correspondant au pic de corrélation pour en déduire ensuite une fonction gaussienne dans chaque direction, permettant ainsi de trouver un second pic de corrélation avec une précision de l'ordre de 0,2 pixel.

Sur la seconde, proposée par Fujita et Komura, une fonction parabolique est introduite sur les valeurs de corrélation aux alentours de la position du pic de corrélation.

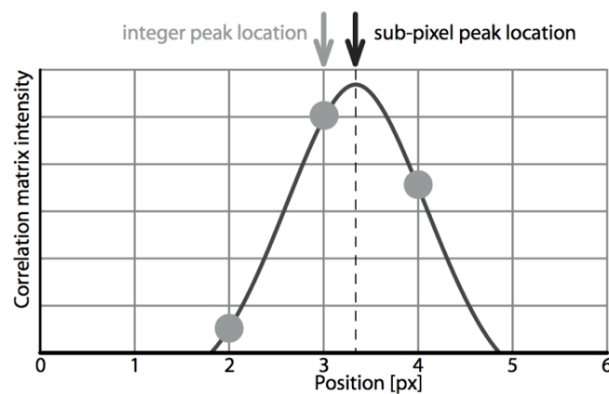


Figure 10 : Estimation sub-pixel "2x3-point fit" (source). Un seul axe est représenté. [Nakad, 2016]

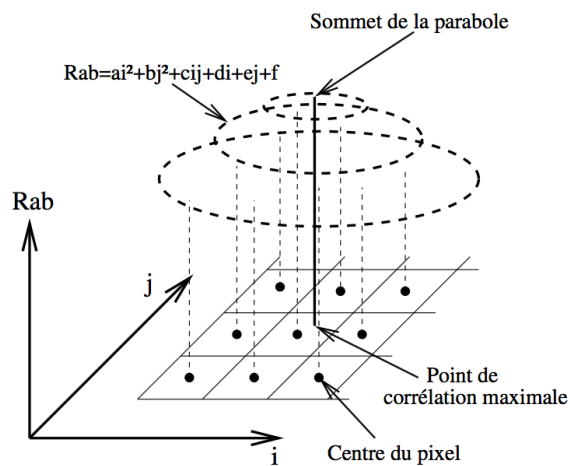


Figure 11 : Utilisation d'une fonction parabolique sur les valeurs de corrélation aux alentours de la position du maximum de corrélation [Haut, 2006]

Signalons également le fait qu'il existe deux méthodes permettant le calcul de la matrice des coefficients de corrélation. Ces deux méthodes sont toutes les deux proposées par PIVlab.

La première est la DCC pour « direct cross-correlation », la seconde est la FFT pour « fast Fourier transform ». La DCC a l'avantage de fournir des résultats plus précis, comme nous le

démontrerons lors de la présentation de nos résultats, mais elle nécessite un temps de calculs plus important.

Le principe de la DCC consiste à évaluer la matrice des coefficients de corrélation à l'aide de la définition mathématique du coefficient de corrélation dans le domaine spatial.

L'exemple suivant illustre le principe de fonctionnement de cette méthode. Dans celui-ci, le carré de taille 4x4 (pixels) représente la zone d'interrogation de l'image 1 pour laquelle la valeur des intensités de pixel est connue. Cette zone d'interrogation se déplace dans l'aire de recherche de taille 8x8 (pixels) de l'image 2. Pour chaque déplacement de la zone d'interrogation, un coefficient de corrélation est calculé, remplissant ainsi la matrice de corrélation.

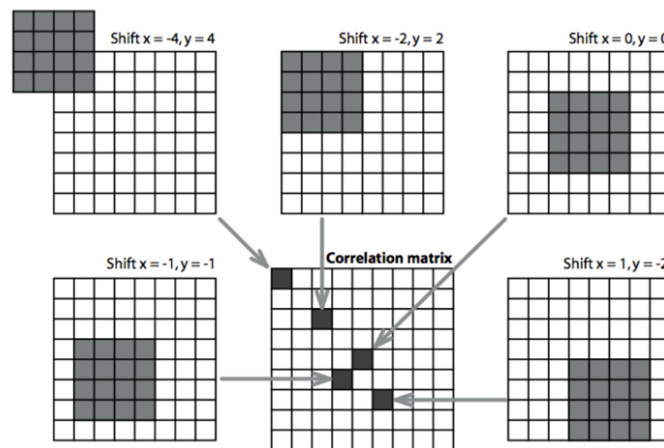


Figure 12 : Evaluation de la matrice des coefficients de corrélation [Nakad, 2016]

La FFT est donc une alternative à la DCC permettant une réduction du temps de calculs.

La différence entre les deux méthodes provient du fait que la matrice de corrélation est calculée dans le domaine fréquentiel. La taille de l'aire d'interrogation de l'image 1 doit ici être identique à celle de l'aire de recherche de l'image 2. Il faut donc impérativement choisir une AI de taille suffisamment grande pour que l'AR permette l'identification d'un déplacement de traceurs. Mais le choix d'une AI trop grande induit également une perte de précision (voir section PIVlab). Afin de remédier à ce problème, un système en plusieurs passes est souvent proposé par les logiciels d'analyse PIV.

La première passe est réalisée à l'aide d'une grande aire d'interrogation, permettant ainsi l'identification d'un déplacement. Ce résultat est alors utilisé pour décaler la zone d'interrogation dans la seconde passe et ainsi de suite.

Nous nous retrouvons donc maintenant, quelle que soit la méthode utilisée, avec une carte de vecteurs plus ou moins représentatifs de l'écoulement en fonction des paramètres utilisés.

Ces vecteurs représentent une vitesse exprimée alors en px/s. L'étape suivante consiste donc à évaluer la distance représentée par un pixel, en mètre. Cette étape porte le nom de calibration. Elle dépend des paramètres intrinsèques et extrinsèques de la caméra.

Les paramètres intrinsèques correspondent aux caractéristiques physiques de l'objectif, de la chambre et du système d'acquisition d'images interne à la caméra.

Les paramètres extrinsèques décrivent la position géométrique et l'orientation de la caméra dans l'espace. Ils peuvent être calculés à l'aide de points de contrôles dont les coordonnées dans le repère de l'image et dans le repère métrique sont connues.

Une fois ces paramètres déterminés, il est possible de calculer le déplacement des traceurs dans le repère métrique et d'ainsi obtenir des vitesses exprimées en mètres par seconde.

Enfin, la dernière étape d'une analyse PIV consiste à évaluer la précision des résultats et à éliminer ainsi les vecteurs erronés.

3.2 Sources d'erreurs

Les sources d'erreurs d'une analyse PIV sont nombreuses et concernent chacune des étapes de la méthode. Rappelons également que celle-ci se base sur une analyse statistique et non physique. Par conséquent, un pic de corrélation sera toujours trouvé, même s'il ne correspond pas au déplacement du traceur, pouvant parfois mener à des résultats totalement ridicules.

Les sources d'erreur sont de deux types :

- Les erreurs globales qui sont constantes durant toute l'analyse et qui affectent tous les vecteurs vitesses calculés.
- Les erreurs locales qui varient d'une zone d'interrogation à une autre

Nous allons ici citer ces différentes sources d'erreur, sans les quantifier [Aberle et al., 2017] :

3.2.1 Ensemencement

- Certains traceurs peuvent s'agglomérer à la surface de l'eau pour former un ensemble de particules. Cette agglomération peut se produire entre deux images successives de l'analyse. Il en résulte un déplacement indépendant de l'écoulement.
- Dépendant des traceurs utilisés et de leur résistance à une mise en mouvement, il arrive que certains traceurs ne se déplacent pas à la même vitesse que le cours d'eau. Les vitesses ainsi mesurées ne sont alors pas représentatives de la situation réelle. De plus, le déplacement de ces particules peut également être influencé par des facteurs externes tels que le vent ou autres facteurs agissant à la surface libre.

3.2.2 Illumination

- L'illumination globale d'une mesure LSPIV provient de conditions naturelles. Ces conditions ont un impact sur la mesure de vitesse puisqu'elles jouent un rôle sur le contraste possible entre les traceurs et le fond du cours d'eau.
- Les non-uniformités locales d'illumination peuvent apparaître à la surface de l'eau par exemple à cause de la présence d'arbres ou de végétation. Ces non-uniformités peuvent

correspondre à des reflets stationnaires de lumière pouvant légèrement « onduler » à la surface de l'eau et être ainsi interprétées comme des déplacements de particules.

3.2.3 Enregistrement

- La résolution des images acquises influence considérablement sur la qualité des mesures puisque plus la qualité est importante, plus l'image contiendra des informations détaillées des déplacements à la surface de l'eau.
- L'intervalle de temps entre deux images est primordial puisque celui-ci permet le passage d'un déplacement à une vitesse. La connaissance précise de l'intervalle entre deux est donc indispensable. Il faut cependant faire attention que certaines caméras utilisées de nos jours ont recours à des algorithmes permettant de compresser et de transférer les images. Ces algorithmes ont parfois la mauvaise tendance de modifier le pas de temps entre plusieurs images d'un même enregistrement.
- La durée totale d'enregistrement : plus l'échantillon est long, plus le nombre d'images disponibles pour l'analyse est important et plus l'analyse fournira des résultats représentatifs de l'écoulement.
- Les mouvements de la caméra (particulièrement dans le cas de l'utilisation d'un drone) peuvent influencer considérablement la précision des résultats puisqu'ils peuvent être interprétés erronément comme des mouvements de traceurs sur les images.

3.2.4 Transformations d'images

- Erreur lors de l'évaluation de la distance entre la zone d'étude et la position de la caméra. Cette erreur peut être due à un manque de précision des instruments de mesures ou tout simplement être le résultat d'une mauvaise manipulation de l'opérateur.
- Erreur de précision lors de l'identification et l'enregistrement des points de contrôle nécessaires à l'ortho-rectification de l'image résultant en un coefficient de transformation peu précis.
- Lorsque l'image est modifiée afin d'éliminer notamment l'effet fish-eye décrit dans le chapitre précédent, la luminosité de chaque pixel est réévaluée en utilisant une interpolation cubique (par exemple). Il se peut alors que la valeur de l'intensité de certains pixels soit différente dans l'image non distordue.
- L'étape de calibration est une étape cruciale pouvant influencer l'erreur globale d'une mesure, celle-ci permettant le passage d'un déplacement exprimé en pixels à un déplacement exprimé en mètres. Une erreur dans le calcul du coefficient liant le système

de coordonnées de l'image au système de coordonnées physiques a donc un impact important sur la précision de l'analyse.

3.2.5 L'analyse PIV

- Erreur globale dans l'algorithme permettant la détection du pic de corrélation mais également sur l'utilisation d'une fonction parabolique ou gaussienne introduite sur les valeurs de corrélation aux alentours de la position du pic permettant l'estimation sub-pixel.
- Le processus d'enregistrement de l'image engendre inévitablement un bruit d'arrière-plan rendant celui-ci non-uniforme. Ce bruit peut être dû à la présence d'une source de lumière et résulte en une détérioration du contraste entre les traceurs et l'arrière-plan.
- La taille de la fenêtre d'interrogation doit être déterminée sur base de la taille des traceurs. Si celle-ci n'est pas assez large que pour identifier un traceur, une erreur de mesure est plus que probable.
- La taille des fenêtres de recherche est également primordiale. Celle-ci doit être proportionnelle au déplacement attendu des traceurs pour permettre le calcul de vecteurs de vitesse corrects. Si elle est plus petite que le déplacement des particules, la recherche du pic de corrélation sera erronée.
- Les mouvements hors du plan formé par la surface de l'eau ne peuvent pas toujours être identifiés surtout lorsque la caméra est orientée perpendiculairement à celui-ci. Il en résulte une perte d'informations.
- Incertitude concernant la quantification des images : cette erreur est générée par la variation des niveaux de quantification de l'image qui représente le ratio bit/pixels. Dans le cas d'une analyse PIV, les images utilisées doivent être de 8 bits/pixel.
- La concentration des particules à la surface de l'eau forme une sorte de modèle qui est alors utilisé dans l'analyse PIV pour permettre l'évaluation du coefficient de corrélation entre deux images successives. La concentration de ces particules a donc une influence sur les modèles engendrés. Cette concentration est définie comme le nombre de pixels représentant des traceurs et le nombre total de pixels.
- La taille des particules utilisées dans l'analyse PIV est liée indirectement à la résolution des images. Dès lors, deux particules ayant une même taille physique n'auront pas nécessairement une même taille dans plusieurs images (en pixel) de qualité différente, impactant ainsi la qualité des résultats.

- Le contraste d'une image est défini comme la différence d'intensité de luminosité en plusieurs points de celle-ci et est, dans le cas d'une méthode LSPIV, directement dépendante de la luminosité et de la couleur des particules en comparaison avec l'arrière-plan. Un bon contraste dans une même image favorisera l'identification du déplacement d'une même particule durant l'analyse PIV.

3.2.6 Post-processing

- Au vu des nombreuses sources d'erreur possibles énoncées précédemment, il est presque inévitable que le champ de vecteurs établi contiendra une part plus ou moins grande de vecteurs erronés. C'est pourquoi les logiciels d'analyse PIV permettent l'utilisation d'une série de filtres à appliquer sur ces vecteurs vitesse. Le choix de ces filtres étant relativement subjectif, il introduira une certaine source d'incertitude.
- La vitesse moyenne d'une zone d'écoulement est calculée en effectuant une moyenne sur l'ensemble des vecteurs vitesses résultant de l'analyse. Or, certains de ces vecteurs ont été déterminés sur base d'un pic de corrélation relativement faible. A nouveau, les logiciels d'analyse PIV proposent souvent de fixer une valeur minimale à ce pic de corrélation introduisant ainsi une source supplémentaire d'incertitude.

4 PIVlab

4.1 Introduction

PIVlab fait donc partie des quelques logiciels open-source disponibles gratuitement sur internet et permettant d'effectuer une analyse PIV d'un écoulement.

Il a été écrit en 2010 par William Thielicke, un biologiste qui a réalisé un doctorat sur la dynamique des fluides. Celui-ci continue cependant à mettre à jour régulièrement son application afin d'en améliorer ses performances.

PIVlab qui propose de nombreuses fonctionnalités, est réputé pour sa capacité à fournir des résultats de qualité et est utilisé par un bon nombre de chercheurs ou autres. Il compte d'ailleurs plus de 450 téléchargements par mois et dispose d'un forum de questions réponses bien alimenté. Ce dernier a d'ailleurs été bien utile pour répondre aux différentes questions que nous avons dû résoudre durant nos analyses.

On déplorera cependant l'absence d'une fonction permettant l'ortho-rectification d'images ainsi que d'une possibilité d'évaluer la qualité des résultats fournis par le logiciel.

PIVlab est une application qui fonctionne sur Matlab et qui nécessite une toolbox supplémentaire : « Image processing toolbox » comprise dans les licences étudiantes.

Une dernière remarque avant de détailler les différentes fonctionnalités et étapes d'analyse proposées par PIVlab : un problème d'affichage est à signaler lorsque l'application est utilisée sous OSX (Apple).

Afin de remédier à ce problème, une seule ligne de code est à entrer dans la console Matlab : « `set(0, 'ScreenPixelsPerInch', 96)` ».

4.2 Importation des images

La première étape de l'analyse concerne tout logiquement en l'importation des images. Il n'y a pas de limite concernant le nombre d'images importées mais plus ce nombre est grand, plus la vitesse de surface estimée sera représentative et fidèle de l'écoulement étudié.

PIVlab prend en charge les principaux formats d'images tels que jpg, png, bmp, ...

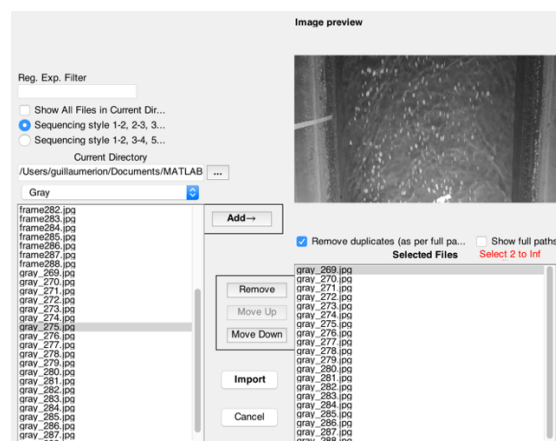


Figure 13 : Importation des images dans PIVlab

PIVlab propose également deux types d'analyse de ces images.

Soit l'analyse se fait en considérant des paires d'images distinctes successives (« Sequencing style 1-2, 3-4, 5-6, ... ») soit elle se fait en réutilisant à chaque fois la seconde image de chaque paire (« Sequencing style 1-2, 2-3, 3-4, ... »). Cette seconde option a été utilisée lors de nos essais puisqu'elle permet, à partir d'un même nombre d'images, d'obtenir une vitesse de surface moyennée sur un plus grand nombre de résultats intermédiaires.

Un peu de vocabulaire relatif à PIVlab avant de continuer :

- Un « frame » correspond à une paire d'images. La première image de chaque paire sera appelée image A, la seconde B.
- Une analyse « simple » = une paire d'images + résultats
- Une analyse « résolue dans le temps » = plusieurs paires d'images + résultats
- Une session correspond à une collection de « frames » comprenant également les différents paramètres de l'analyse enregistrés par l'utilisateur. Ces sessions peuvent être sauvegardées et rechargées ultérieurement dans PIVlab.

4.3 Paramètres d'analyse

4.3.1 Zones d'exclusion

PIVlab permet à l'utilisateur de définir la zone d'intérêt de deux manières.

La première consiste à sélectionner la « Region Of Interest » ou « ROI » représentée par le grand rectangle en pointillés sur la figure 14. Cette sélection peut se faire à l'aide de la souris ou de manière plus précise en encodant les pixels constituant la ROI.

La seconde permet d'exclure des zones de l'analyse PIV. Cette fonctionnalité, appelée masque (rectangle rouge sur la figure 14), peut se révéler bien pratique surtout dans le cas d'une présence de reflets lumineux ou d'une zone d'ombre à la surface de l'eau résultant par exemple d'une mauvaise illumination de la zone d'études. Il est ensuite possible d'appliquer ce masque sur l'ensemble des images ou seulement sur une partie de celles-ci.

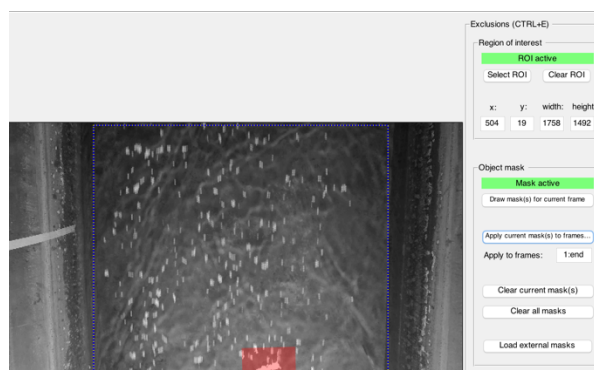


Figure 14 : Région d'intérêt et zones d'exclusion

4.3.2 Prétraitement des images

Afin d'obtenir des résultats de qualité, le contraste entre les traceurs et l'arrière-plan de l'image doit être suffisamment prononcé, les bruits de fond doivent être atténués, etc.... Pour ce faire, PIVlab propose quatre filtres différents que nous allons détailler par la suite en illustrant à chaque fois leurs effets sur une image non modifiée. Cette première image doit être préalablement passée en niveaux de gris comme expliqué dans la section consacrée à la description de la LSPIV.

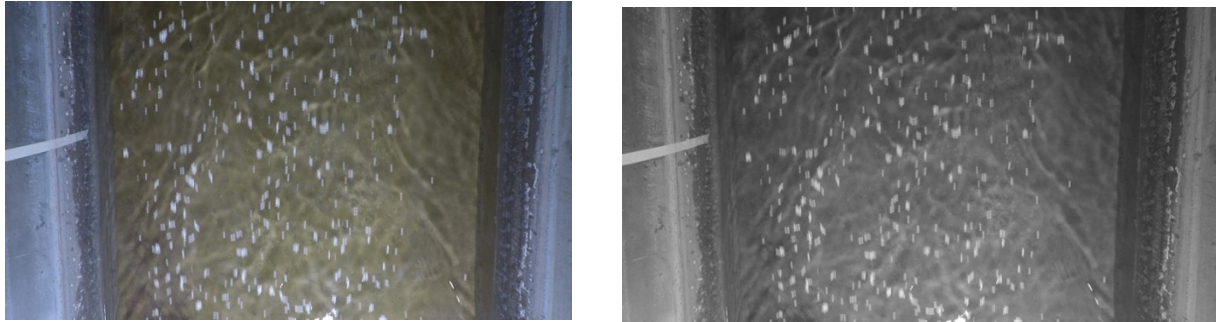


Figure 15 : Passage d'une image initiale (à gauche) en niveaux de gris (à droite)

- *Filtre « CLAHE »*

CLAHE est l'acronyme de « Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization ». Ce filtre a été initialement mis au point pour augmenter la lisibilité des données d'une image dans le domaine de l'imagerie médicale. Il fonctionne sur de petites zones appelées carreaux. Chaque carreau est constitué d'un ensemble de pixels et chaque pixel contient une valeur d'intensité comprise entre 0 et 255 pour une image représentée en 8 bits/pixel. Un pixel ayant une intensité égale à 0 sera noir alors qu'un pixel ayant une intensité égale à 255 sera blanc.

Le principe du filtre consiste à remplacer les intensités de certains pixels par les intensités les plus fréquentes de l'histogramme des intensités de pixels de l'image. Les régions à forte et à faible exposition sont alors optimisées de manière indépendante.

L'effet de ce filtre est illustré sur la figure ci-dessous. Pour cet exemple, la taille du carreau a été prise égale à 20 pixels soit un peu plus d'un centimètre de côté pour la résolution de l'image.

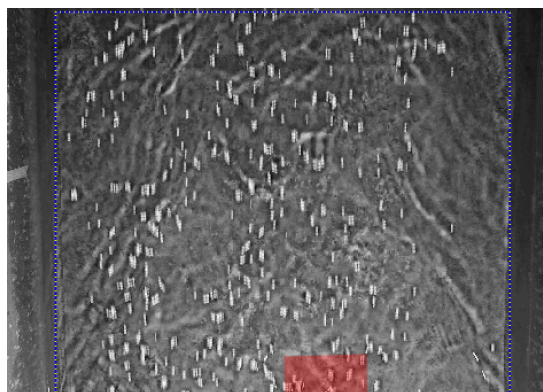


Figure 16 : Application du filtre CLAHE

- *Intensity high-pass*

Ce filtre passe-haut est utilisé pour rendre une image plus nette en mettant l'accent sur ses détails fins. Il permet également de diminuer le signal d'arrière-plan.

Pour ce faire, il utilise un noyau de convolution (de type gaussien dans le cas de PIVlab).

Une convolution est un algorithme qui consiste à recalculer la valeur d'un pixel en fonction de sa propre valeur et des intensités des pixels voisins, pondérée par un coefficient dépendant du noyau de convolution. PIVlab permet d'introduire une valeur, en pixel, pour définir la taille de ce noyau de convolution.

L'image ci-dessous vise à présenter l'effet d'un tel filtre. Elle est obtenue à partir de l'image initiale, en niveaux de gris, et pour un noyau de convolution de taille équivalente à 20 pixels à nouveau.

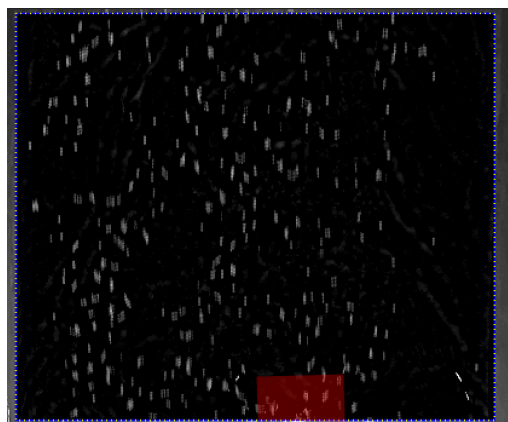


Figure 17 : Application du filtre "Intensity High-Pass"

- *Intensity capping*

Ce prétraitement a pour objectif d'uniformiser les intensités des différents traceurs pour que ceux-ci participent de manière plus ou moins égale à l'évaluation des coefficients de corrélation de l'analyse PIV.

Un plafond d'intensité est défini dans le code de PIVlab et tous les pixels le dépassant voient leur intensité réduite à ce même plafond. Ce filtre peut s'avérer très utile, principalement dans le cas d'une illumination non homogène de la zone d'étude.

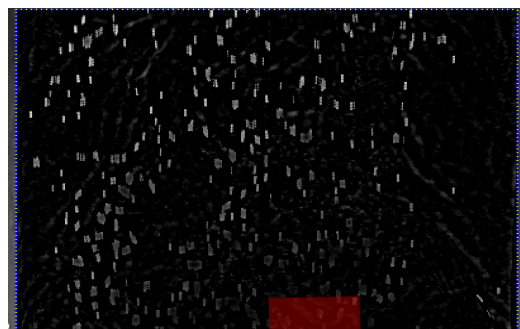


Figure 18 : Application de "Intensity Capping" (à partir de la figure 17)

- *Wiener2 denoise filter*

Le bruit en photographie correspond à de petits points parasites faisant perdre de la netteté dans les détails et apparaissant principalement dans les zones plus sombres. Il s'ajoute de façon aléatoire et est de plus en plus présent lorsque la sensibilité ISO d'un appareil photo augmente. La sensibilité ISO est définie comme la sensibilité à la lumière des capteurs numériques. Une photographie est correctement exposée lorsque la surface sensible de l'appareil photo reçoit la bonne quantité de lumière, c'est-à-dire celle qui permet d'avoir une image ni trop sombre ni trop claire. La sensibilité ISO permet d'obtenir une information sur cette quantité optimale de lumière.

Le filtre Wiener utilise à nouveau un noyau de convolution, cette fois-ci avec un autre algorithme, permettant de supprimer ou du moins d'atténuer ce bruit. Son effet est présenté sur la figure suivante, obtenue à partir de la figure 18.

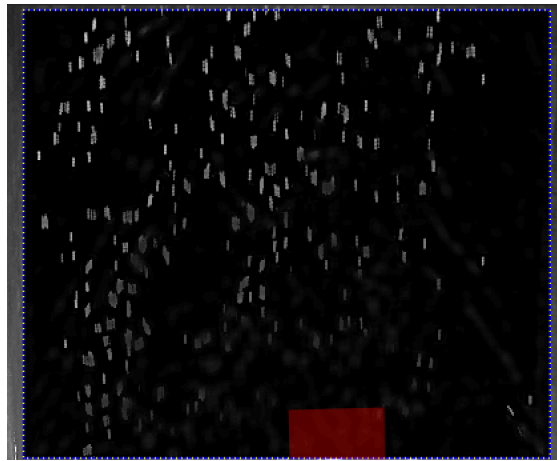


Figure 19 : Application du filtre "Wiener2 denoise"

4.3.3 Paramètres PIV

PIVlab propose deux algorithmes différents permettant d'estimer une vitesse de surface. Ces deux algorithmes correspondent à la DCC et à la FFT, présentés précédemment dans la description de la LSPIV.

Il est possible, pour les deux méthodes, d'introduire les tailles des fenêtres d'interrogation (en pixels). Les tailles des aires de recherche sont quant à elles imposées et valent le double des tailles des fenêtres d'interrogation pour la DCC ($AR = 2 \cdot AI$) tandis qu'elles sont de tailles identiques à celles des fenêtres d'interrogation pour la FFT ($AR = AI$).

Il est également possible, pour les deux méthodes, d'introduire une distance (step), toujours en pixels, séparant le centre de deux fenêtres d'interrogation successives.

Remarquons également la possibilité de choisir un nombre d'itérations pour la FFT.

Enfin, PIVlab met à disposition deux méthodes d'estimation sub-pixel : la *2D Gauss* et la *Gauss 2*3-points*. Cette dernière qui permet une estimation plus précise de la vitesse de surface a été également présentée précédemment. Le fonctionnement de la 2D Gauss est identique si ce n'est

qu'elle s'applique dans seulement deux dimensions. Plusieurs essais ont été réalisés pour déterminer l'influence de l'une ou de l'autre. Celle-ci étant minime, nos essais se sont limités à une utilisation de l'estimation sub-pixel *Gauss 2*3-points*.

4.4 Calibration

Cette étape peut se réaliser avant ou après l'analyse PIV. Dans le premier cas, les résultats obtenus seront exprimés en [pixel/frame]. Dans le second ils seront exprimés en [m/s].

Pour calibrer les résultats, deux valeurs sont à déterminer.

La première est tout simplement l'intervalle de temps entre deux images successives, exprimé en milliseconde. Celui-ci dépend des paramètres utilisés lors de l'acquisition des images ou de la vidéo de l'écoulement.

La seconde correspond au facteur de conversion pour passer des coordonnées de l'image - c'est-à-dire des pixels - aux coordonnées physiques, c'est-à-dire des mètres.

La méthode que nous avons suivie pour permettre cette conversion consiste tout d'abord à mesurer la distance séparant la caméra du plan d'eau.

Une fois cette distance obtenue, nous avons pris la photo d'un damier pour lequel la dimension des différents carrés le constituant était connue (2 cm) et ce, à une même distance que celle séparant la caméra du plan d'eau et pour les mêmes paramètres (résolution d'image) que ceux utilisés lors de l'enregistrement de l'écoulement étudié.

En mesurant ensuite la distance en pixel représentée par chacun de ces carrés, il est possible d'obtenir un facteur de conversion de pixels à mètres.

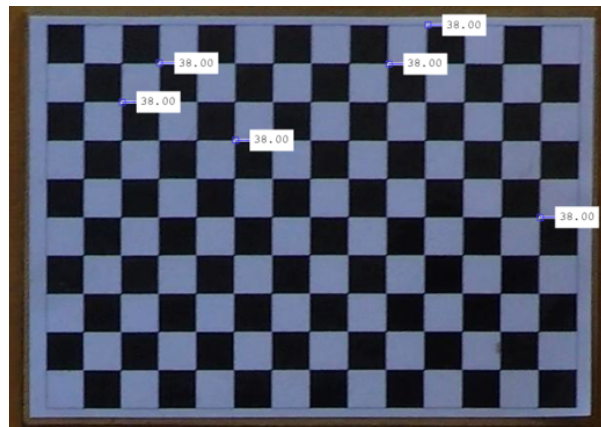


Figure 20 : Dimensions en pixels de différents carrés du damier

Dans cet exemple, les carrés mesurent 2cm de côté. Ceux-ci étant représentés par 38pixels ; une simple règle de trois nous permet d'obtenir le facteur de conversion.

Celui-ci étant maintenant connu, il nous reste à obtenir le même facteur de conversion dans PIVlab.

Pour ce faire, il faut sélectionner une distance (ligne rouge sur la figure suivante) dans PIVlab qui affiche alors sa longueur en pixels et ensuite entrer sa valeur correspondante en millimètre, à l'aide du coefficient de conversion précédemment calculé.

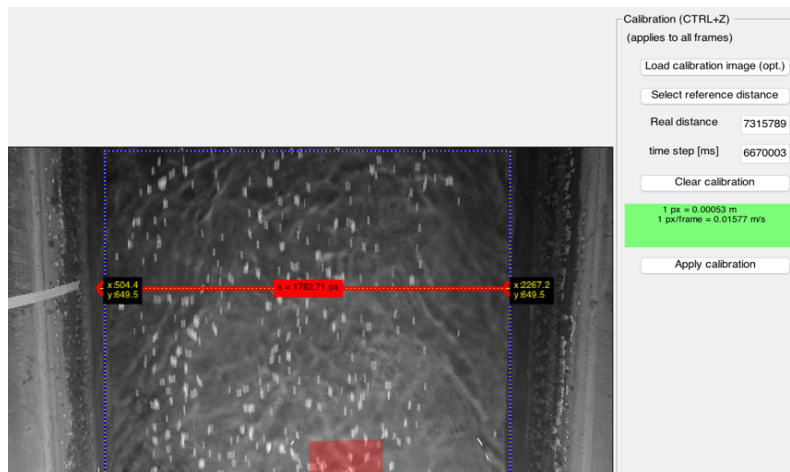


Figure 21 : Etape de calibration dans PIVlab. La droite rouge représente la distance en pixels entre deux points

PIVlab affiche alors les conversions entre [pixel] et [mètre] et entre [px/frame] et [m/s] (rectangle vert sur la figure précédente).

Une autre façon de procéder, plus simple, consiste à placer un objet, tracer une marque, ... etc. de dimensions connues à proximité de l'écoulement et d'entrer sa valeur directement en [mm] dans PIVlab. N'ayant pas beaucoup d'espace sur le canal pour procéder de la sorte, nous nous sommes limités à la première méthode.

Enfin, remarquons l'importance d'effectuer ces calibrations sur des images pour lesquelles les effets de distorsion ont été supprimés. En effet, si ce n'était pas le cas, la distance représentée par un pixel au centre de l'image ne serait pas la même que celle représentée par un pixel situé sur les bords de celle-ci, engendrant ainsi non pas un mais bien une multitude de facteurs de conversion pour chaque zone de l'image, rendant dès lors la mesure impossible.

4.5 Analyse

Nous pouvons alors enfin passer à l'étape de l'analyse PIV. Durant celle-ci, PIVlab affiche le temps restant avant la fin de l'analyse, le pourcentage de progression entre deux images successives ainsi que l'avancement total (en % également).

Notons également le fait qu'il est possible d'analyser soit la totalité des images importées soit seulement un « frame », c'est-à-dire deux images successives. Cette deuxième possibilité peut s'avérer bien utile lorsque les paramètres d'analyse tels que la taille des fenêtres d'interrogation ne sont pas encore déterminés définitivement. Elle permet alors de procéder par essai erreur sans devoir attendre inutilement que l'analyse complète ne soit terminée.

Une fois que celle-ci est achevée, les champs de vitesses (vecteurs verts) calculés sont affichés sur chacune des images. En cliquant sur un vecteur, PIVlab affiche alors ses coordonnées ainsi que son amplitude dans chacune des deux directions du plan.

L'origine du repère étant située dans le coin supérieur gauche de chaque image, un vecteur vitesse orienté vers le haut aura une composante verticale négative.

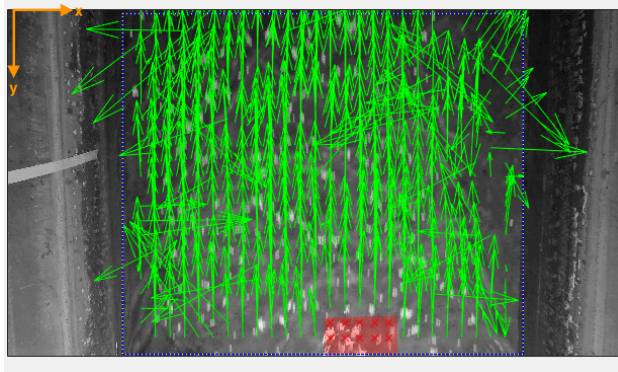


Figure 22 : Champ de vecteurs vitesse généré par PIVlab. L'origine du repère se trouve en haut à gauche.

4.6 Validation des vecteurs

Comme on peut le voir sur la figure 22, PIVlab a détecté certains vecteurs qui ne semblent pas, a priori, être représentatifs de l'écoulement étudié.

Afin de résoudre ce problème, 4 filtres sont disponibles.

Le premier consiste à sélectionner graphiquement les limites en termes d'amplitude des vitesses dans les deux directions (u correspond à l'amplitude de vitesse dans la direction x , v représente celle dans la direction y), sur un nuage de points représentant l'ensemble des amplitudes calculées sur une « frame » ou sur l'ensemble des « frames ».

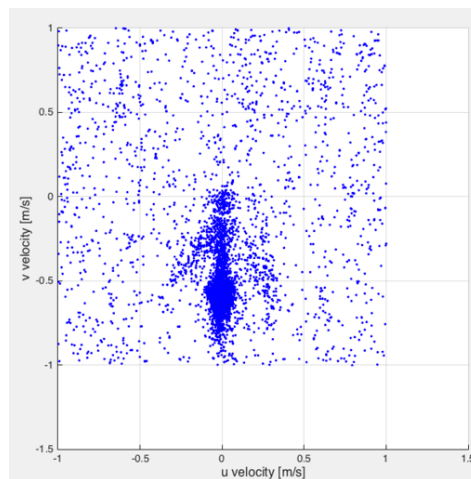


Figure 23 : Sélection graphique des limites de vitesse dans les directions x et y . Le nuage de point représente l'amplitude des vitesses dans chacune des directions.

Le second filtre se base sur la valeur de l'écart-type des deux amplitudes (u et v) des vecteurs. L'utilisateur doit entrer une valeur n et selon cette valeur, tous les vecteurs dont l'amplitude dépasse l'amplitude moyenne augmentée ou diminuée de n fois l'écart-type seront supprimés.

Le troisième filtre est un filtre fonctionnant de façon locale se basant sur le test de la moyenne normalisée.

Le quatrième et dernier filtre consiste simplement à rejeter manuellement les vecteurs à l'aide du curseur de la souris. Ce filtre nécessite un certain temps et présente l'inconvénient d'être peu précis, surtout lorsque de nombreux vecteurs sont affichés dans les résultats.

Après avoir appliqué une partie ou la totalité de ces filtres à une partie ou à la totalité des différentes images, PIVlab affiche alors le résultat ainsi obtenu et pour lequel les vecteurs qui ont été supprimés par l'application des filtres sont interpolés sur base des vecteurs voisins et représentés par des flèches orange visibles sur la figure 24.

4.7 Présentation des résultats

L'analyse PIV étant maintenant finie, PIVlab propose plusieurs modes de présentation des résultats obtenus.

Il est tout d'abord possible via l'onglet « *extraction* » d'obtenir la moyenne des composantes u et v ou encore de la norme de la vitesse, sur une aire (figure 24) ou sur une droite tracée par l'utilisateur. Ce second cas est utile pour représenter le profil de vitesse en travers de la section du canal.

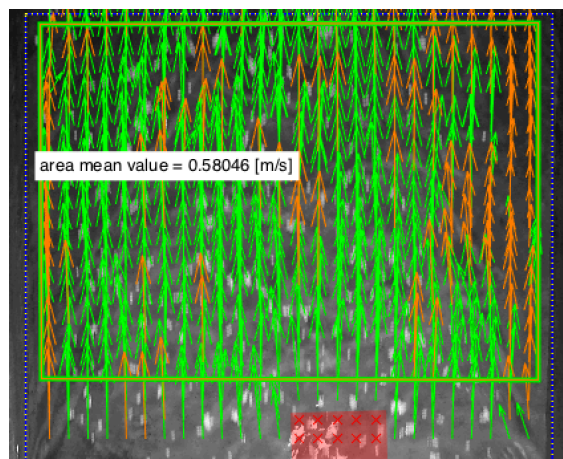


Figure 24 : Vitesse moyenne de surface sur une aire délimitée par l'utilisateur

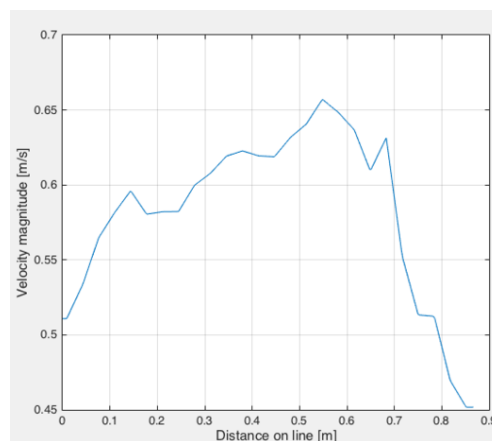


Figure 25 : Profil de vitesse en travers d'une section du canal

L'onglet « *Statistics* » permet d'obtenir des histogrammes à nouveau de u , v ou de la norme tandis que l'onglet « *plot* » offre la possibilité de représenter la moyenne des vecteurs de tous les frames sur une nouvelle image ou encore de représenter les résultats sous forme d'une carte de couleurs (figure 26).

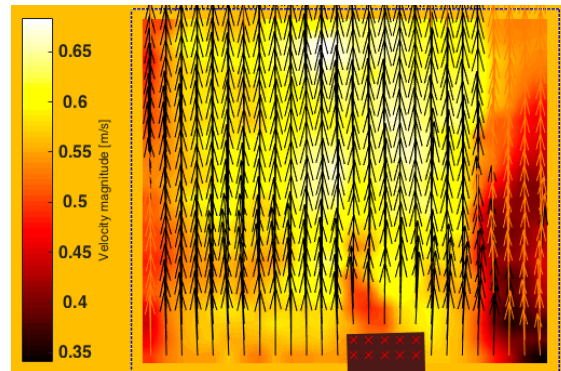


Figure 26 : Carte de couleurs des amplitudes de vitesse

Enfin, signalons également qu'il est possible d'extraire tous les résultats sous la forme d'un fichier *.txt*, *.mat*, ...

5 Mesures en canal

Cette nouvelle section vise à présenter le mode opératoire suivi au laboratoire afin d'obtenir des mesures de vitesse provenant d'un tube de Pitot et d'un débitmètre. Ce sont ces mesures qui ont ensuite été comparées aux résultats obtenus via PIVlab.

La comparaison de celles-ci sera réalisée dans la section suivante.

C'est au sous-sol des laboratoires de génie civil à Louvain-La-Neuve que se sont déroulés les essais.

Cet espace est aménagé en un canal d'environ 40m de longueur et d'un peu plus d'un mètre de large. Il est possible d'y faire circuler un débit d'eau à l'aide d'une pompe qui est installée en aval de ce canal. Il est équipé d'un chariot monté sur un rail permettant de fixer divers instruments de mesures et de les déplacer dans le sens de la longueur et de la largeur du canal. Un profilé Bosch a été monté sur celui-ci afin de fixer la caméra permettant l'enregistrement de vidéos de l'écoulement sur lequel étaient préalablement répartis les traceurs.

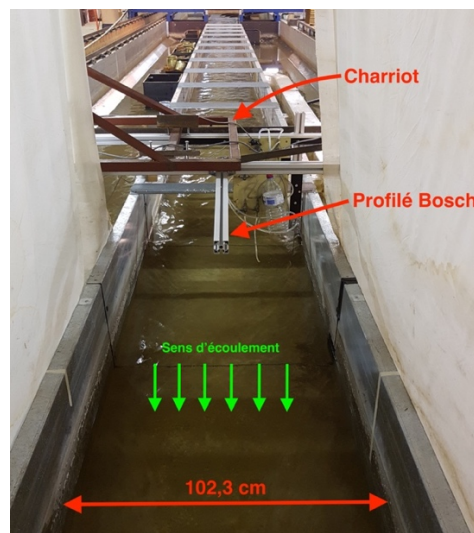


Figure 27 : Photographie de la zone où les essais ont été réalisés

Les traceurs ont été répartis manuellement, en essayant de couvrir un maximum la section transversale et en les répartissant de façon la plus homogène possible. Tous étaient disposés à proximité de la position de la caméra afin d'éviter qu'ils (principalement les billes de frigolite) n'aient le temps de s'agglomérer, formant ainsi de « gros paquets » pouvant introduire une part d'erreur dans les mesures PIV.

Les instruments de mesure utilisés sont des sondes Baumer (5), un tube de Pitot et un débitmètre.

Les sondes Baumer permettent d'obtenir une mesure précise de la hauteur d'eau dans le canal. Elles ont été réparties sur toute la section, à des intervalles réguliers.

Leurs zérotages ont été réalisés en mesurant la hauteur d'eau à l'aide d'un trusquin et pour un débit nul, en dessous de chacune des Baumer, le fond du canal n'étant pas parfaitement plat sur une transversale.

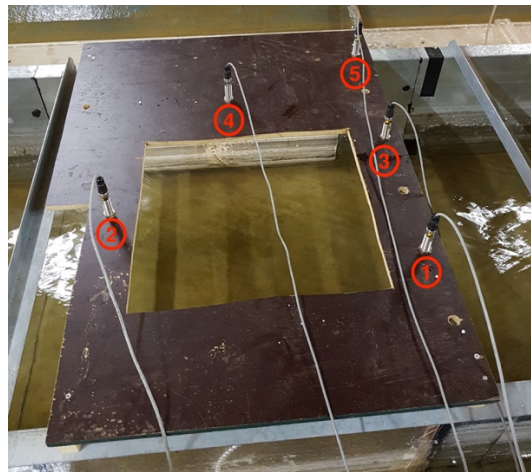


Figure 28 : Répartition des sondes Baumer

Le débitmètre a quant à lui été relié à une carte d'acquisition permettant ainsi d'enregistrer des mesures - à la fréquence d'un enregistrement toutes les secondes - plus précises du débit et d'évaluer une quelconque variation anormale de celui-ci. Il a d'ailleurs permis d'identifier, au début des essais, une variation de la condition aval de l'écoulement. En effet, un grillage était initialement placé en fin de canal afin de récupérer les différents traceurs utilisés pour les mesures. Certains de ces traceurs passaient aléatoirement au travers de ce grillage, modifiant ainsi les conditions d'écoulement et entraînant une faible variation du débit. Ce grillage a donc été retiré, les traceurs étant récupérés ensuite à l'aide d'une épuisette.

Le troisième instrument de mesure utilisé est le tube de Pitot. Son mode de fonctionnement a été brièvement décrit dans la mise en contexte de ce document.

L'instrument est un tube concentrique de 4mm de diamètre à partir duquel la vitesse d'écoulement est déduite sur base de la différence entre les pressions dynamique p_d et statique

$$p_s \text{ via la relation suivante : } U = \phi \sqrt{\frac{2(p_d - p_s)}{\rho}}.$$

Dans cette relation, ρ correspond à la masse volumique du fluide tandis que ϕ est un facteur de correction tenant compte des pertes de charge résultant de la différence entre les lignes de courant réelles et idéalisées, autour du tube de Pitot. Sa valeur a été déterminée expérimentalement par comparaison entre le débit donné par un débitmètre électromagnétique et celui estimé par intégration sur la section des vitesses mesurées. Elle vaut environ 0,9.

La mesure de la différence de pression s'effectue au moyen d'un capteur de pression différentiel (figure 29) ayant une plage de mesure allant de -10 à 10 mbar avec une précision de 0,1%.



Figure 29 : Capteur de pression différentiel du tube de Pitot

La calibration de ce dernier a nécessité une attention particulière afin d'éviter que toute bulle d'air ne soit présente dans les différents tuyaux, faussant ainsi les résultats. Pour ce faire, un système de purge est possible via les deux vannes situées au bas de la plaque sur laquelle est fixé le capteur, à côté de celui-ci.

Deux marques ont été placées sur le bord du canal, servant de repère pour que les mesures réalisées à l'aide du tube de Pitot puissent être comparées avec les résultats obtenus à l'aide de PIVlab sur une section transversale identique. Le canal présentant une pente de fond nulle, les profils de vitesse sur deux sections transversales successives ne sont pas parfaitement identiques à cause des pertes de charge.

Le tube de Pitot a également été utilisé en début d'essais pour confirmer le profil logarithmique des vitesses sur plusieurs verticales. Les mesures ont donc été réalisées sur cinq verticales comme on peut le constater sur la figure suivante, représentant une coupe transversale du canal.

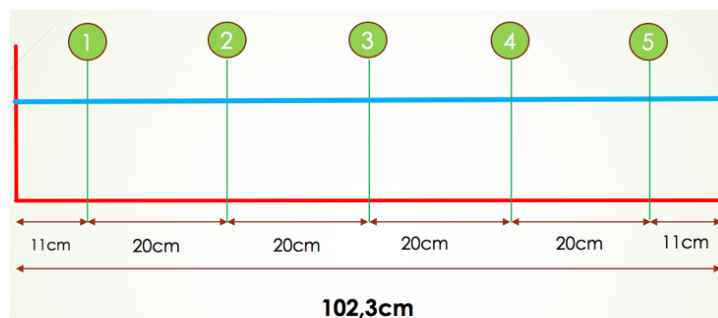


Figure 30 : Représentation schématique des verticales sur lesquelles les mesures ont été réalisées

Sur chacune des verticales, les enregistrements ont été réalisés tous les centimètres et pour des durées de 30 secondes. Les profils ont ensuite été établis sur base des moyennes des acquisitions sur chaque hauteur. Les différents profils de vitesse ainsi obtenus pour chaque verticale et les variations temporelles des vitesses durant les enregistrements, sur chacune des hauteurs, sont présentés ici sous forme de « boîte à moustache ».

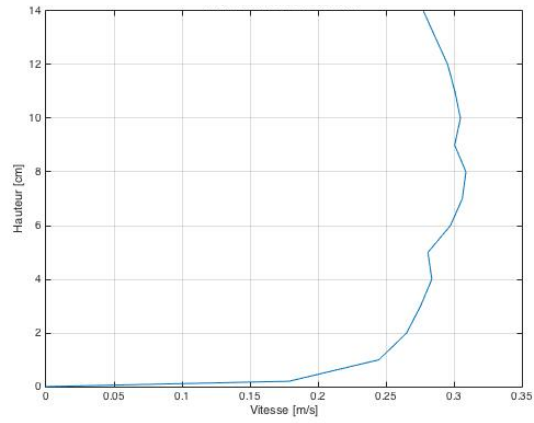


Figure 31 : Profil de vitesse (section 1)

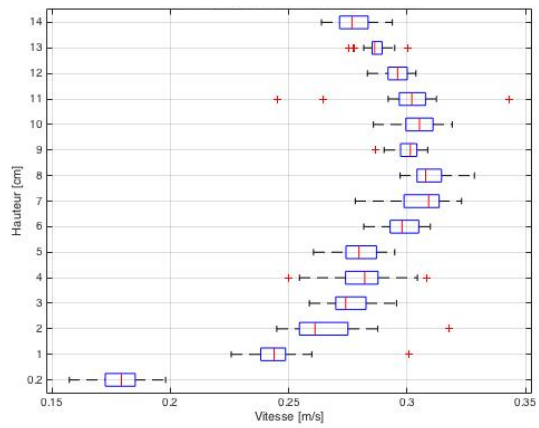


Figure 32 : Variation temporelle des vitesses (section 1)

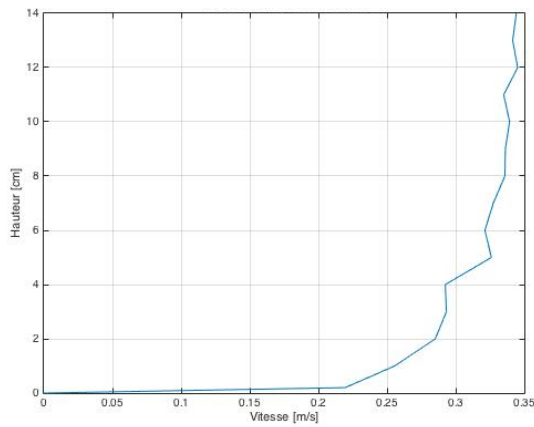


Figure 33 : Profil de vitesse (section 2)

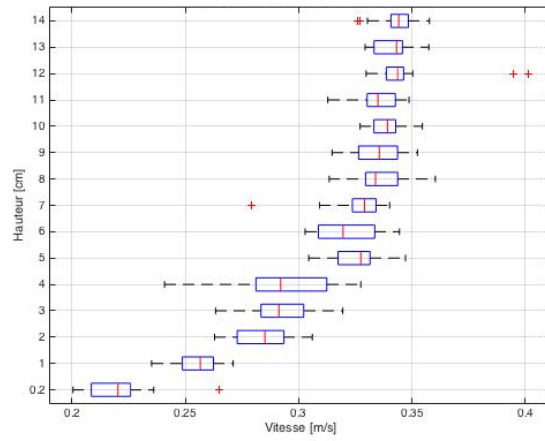


Figure 34 : Variation temporelle des vitesses (section 2)

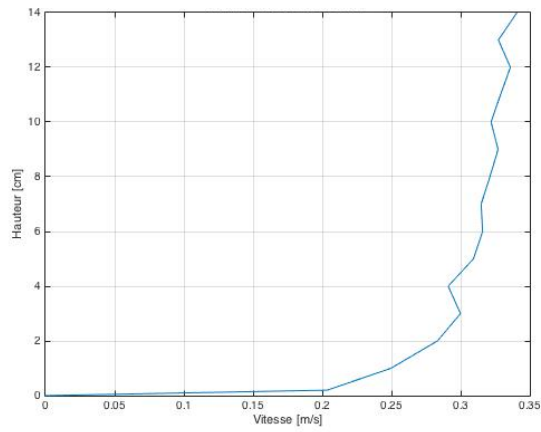


Figure 35 : Profil de vitesse (section 3)

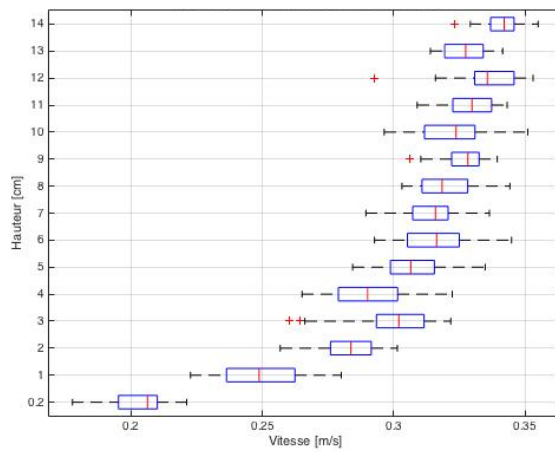


Figure 36 : Variation temporelle des vitesses (section 3)

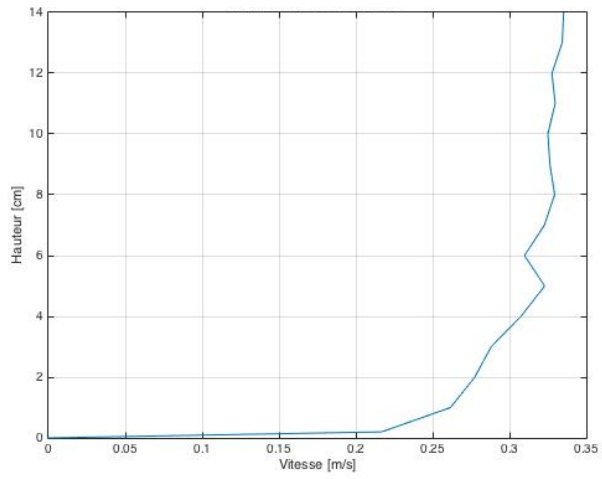


Figure 37 : Profil de vitesse (section 4)

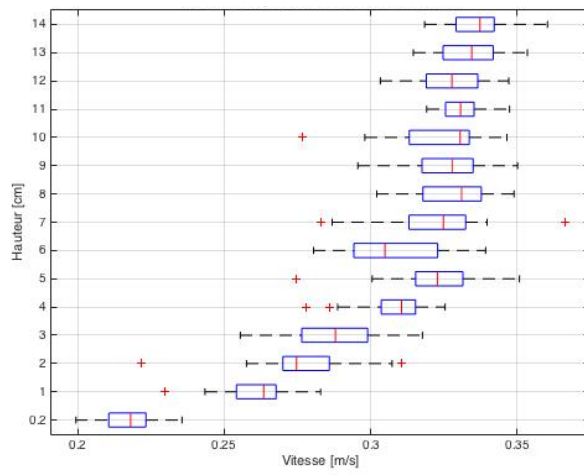


Figure 38 : Variation temporelle des vitesses (section 4)

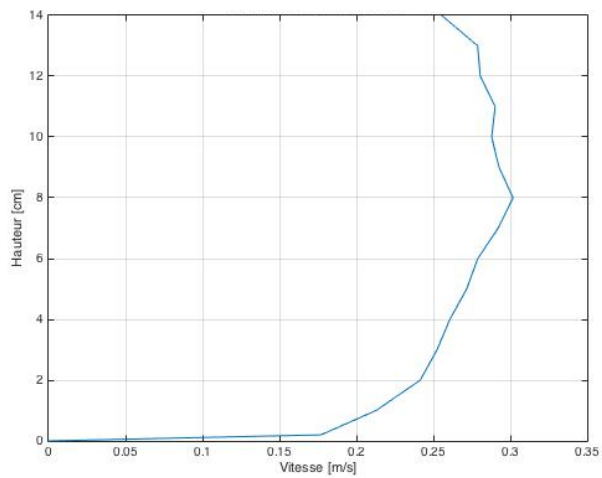


Figure 39 : Profil de vitesse (section 5)

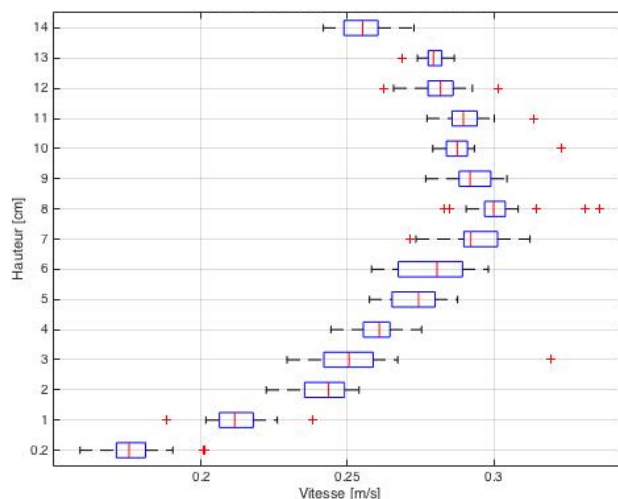


Figure 40 : Variation temporelle des vitesses (section 5)

Ces mesures ont été réalisées pour un seul débit de 52 [l/s], constant dans le temps et pour lequel les Baumer ont donné une hauteur d'eau d'environ 15 cm. Le tube de Pitot ne pouvant être situé au-dessus de la surface libre pour éviter toute intrusion de bulle d'air dans le système, les mesures ont été effectuées jusqu'à 14 cm de hauteur.

Ces différents graphes permettent de constater que le profil de vitesse est bien de type logarithmique sur chacune des sections mais également que les vitesses ne varient pas énormément sur chaque hauteur. Ces variations étant généralement de l'ordre de 0,01 [m/s].

Enfin, une vitesse moyenne a été déduite de ces mesures réalisées avec le tube de Pitot pour la comparer avec la vitesse moyenne obtenue à l'aide du débitmètre.

Pour le débitmètre, le calcul s'est basé sur les mesures suivantes :

- Hauteur d'eau moyenne : 15,38 [cm]
- Largeur canal : 102,3 [cm]
- Débit moyen : 52,6 [l/s]

Ces différentes valeurs permettent d'obtenir une vitesse moyenne de 0,33 [m/s].

La détermination de la vitesse moyenne à l'aide du tube de Pitot s'est déroulée comme suit : Nous avons tout d'abord tracé le profil transversal à partir des vitesses moyennes sur chacune des verticales en imposant une vitesse nulle aux parois (figure 41).

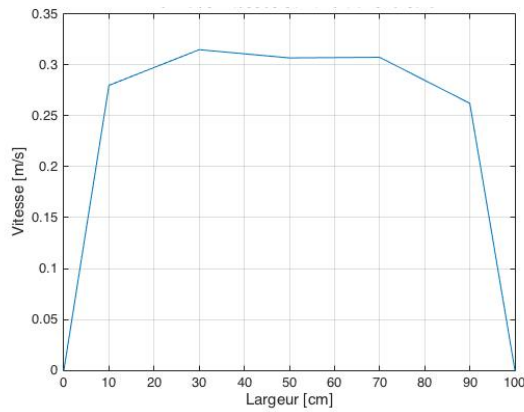


Figure 41 : Profil des vitesses sur une transversale

En intégrant ensuite ce profil à l'aide de Matlab, la vitesse moyenne obtenue est de 0,26 [m/s]. La différence entre l'estimation de la vitesse moyenne réalisée à l'aide des deux instruments de mesure provient en partie du fait que cette vitesse ne diminue pas aussi rapidement sur les 10 derniers centimètres situés de part et d'autre de la section comme représentée sur la figure ci-dessus.

Afin de résoudre en partie cette différence, un nouveau profil transversal a été établi en considérant une fonction logarithmique sur les 10 derniers centimètres de part et d'autre du canal. Le profil ainsi obtenu est le suivant :

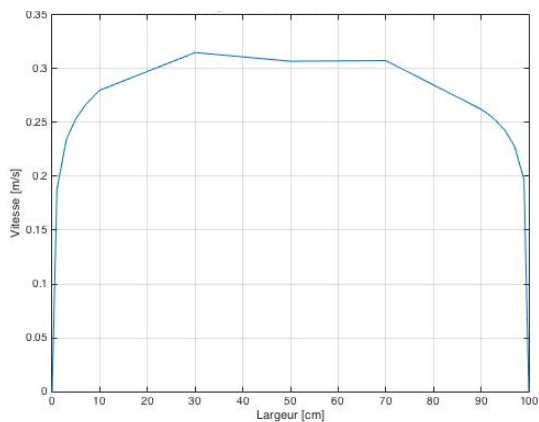


Figure 42 : Profil corrigé des vitesses sur une transversale

Bien que ce profil soit plus représentatif de la situation rencontrée au canal, la vitesse moyenne obtenue est de 0,29 [m/s] et diffère donc toujours de celle issue du débitmètre.

L'évaluation de la précision de la méthode LSPIV à l'aide de nos résultats devra par conséquent s'effectuer en gardant toujours un esprit critique, les mesures effectuées à l'aide du tube de Pitot et du débitmètre n'étant pas fiables à cent pour cent.

Il aurait été judicieux d'effectuer d'autres mesures de vitesse à l'aide d'un instrument plus précis mais malheureusement, cela n'a pu être réalisé.

Un dernier élément a dû être installé avant de pouvoir effectuer les mesures PIV. Comme expliqué dans la description des sources d'erreur de la LPSIV, l'illumination de la zone d'étude peut jouer une grande influence sur les résultats.

La lumière doit être diffusée de la manière la plus uniforme possible, sans apparition de zones à forts reflets lumineux ou zones d'ombre.

Pour ce faire, nous avons disposé deux grands draps blancs ainsi qu'un panneau réfléchissant sur le contour de la zone d'étude, créant ainsi une « ambiance homogène ».

Un spot à LEDs a été positionné sur le chariot éclairant la zone d'étude en accordant une attention particulière aux contraintes locales liées à l'illumination évoquées précédemment.



Figure 43 : Amélioration de l'illumination de la zone d'étude à l'aide d'un panneau et de draps réfléchissants

6 Résultats

Cette partie a pour objectif d'illustrer, à l'aide de PIVlab et de plusieurs essais réalisés au canal, l'influence de différents paramètres d'une part propres à l'analyse tels que la taille de la fenêtre d'interrogation, le nombre de passes réalisées avec la méthode FFT, ... et d'autre part, relatifs au matériel utilisé pour l'étude et aux conditions extérieures telles qu'une zone à forte illumination, une zone d'ombre, ... Une partie des sources d'erreur, présentées précédemment seront par conséquent abordées et parfois quantifiées dans cette section.

Dans un second temps, une étude de la précision de la LSPIV sera réalisée par comparaison de profils de vitesse obtenus à l'aide de PIVlab et du tube de Pitot et ce, pour différents débits et différents types de traceurs.

6.1 Influence des paramètres et quantification d'erreurs

6.1.1 Densité de traceurs

Afin d'illustrer l'influence de la densité de traceurs sur une analyse PIV, deux suites d'images, enregistrées en des temps différents, pour un même débit et présentant des densités différentes de traceurs ont été analysées à l'aide de PIVlab.

Les deux images suivantes représentent la situation analysée. Sur chacune d'elles, une série de filtres ont été appliqués afin d'augmenter le contraste entre les traceurs et le fond du canal permettant ainsi une meilleure visualisation de la différence de densité. La première image (figure 44) représente la situation pour laquelle la densité de traceurs est faible, la seconde (figure 45) correspond à une densité plus élevée, les traceurs couvrant presque la totalité de la zone d'intérêt.

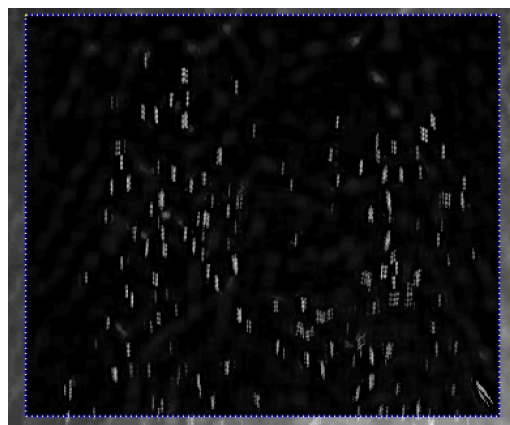


Figure 44 : Densité faible de traceurs

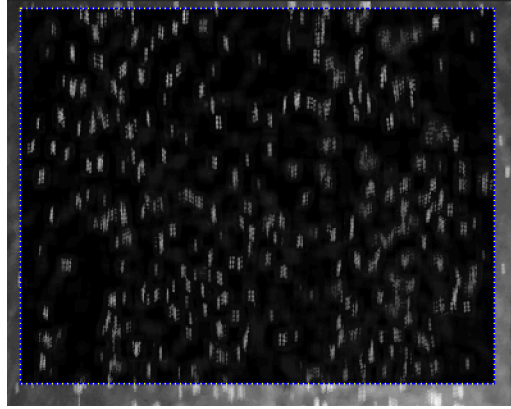


Figure 45 : Densité plus élevée de traceurs (en comparaison avec la figure 44)

L'analyse PIV a ensuite été réalisée en fixant les mêmes paramètres pour les deux séries d'images à savoir :

- Algorithme : DCC
- Taille de fenêtre d'interrogation : 128 [px] (environ 6,7 [cm])
- Distance entre les centres de deux fenêtres d'interrogation successives : 64 [px] (environ 3,4 [cm])
- Estimateur sub-pixel : Gauss 2x3-points

Le champ de vecteurs généré alors par PIVlab montre clairement une influence de la densité de traceurs comme on peut le voir sur les figures suivantes :

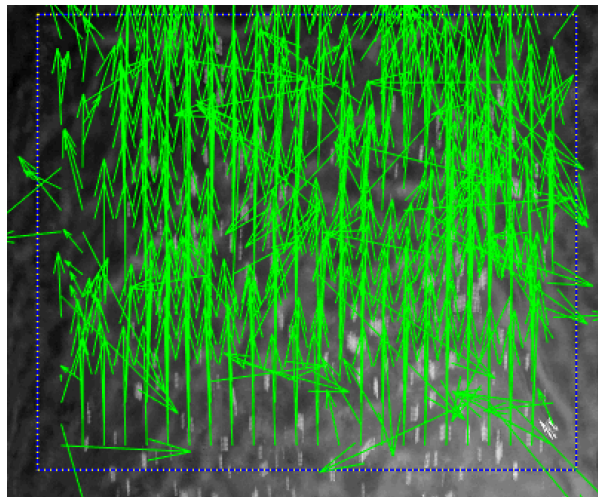


Figure 46 : Champ de vecteurs obtenu pour la densité faible de traceurs

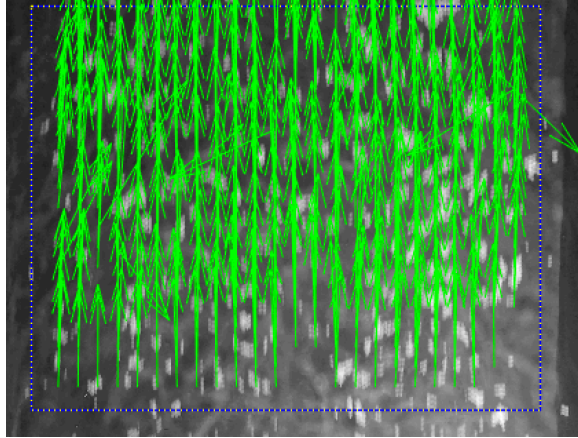


Figure 47 : Champ de vecteurs obtenu pour la densité plus élevée de traceurs

La figure de droite qui correspond à la densité élevée de traceurs, semble bien plus représentative des conditions réelles d'écoulement rencontrées au canal. Celle de gauche, correspondant à la faible densité de traceurs, présente des vecteurs d'intensité et de direction bien plus aléatoires. Les déplacements identifiés, dont découlent ces vecteurs vitesse aléatoires, ont a priori été établis sur base de faibles valeurs du pic de corrélation résultant en des déplacements peu probables suite à une absence de traceurs.

Une solution afin d'éviter ce genre de résultats consisterait à fixer un seuil pour la valeur minimum du pic de corrélation.

6.1.2 Reflets lumineux

Les reflets lumineux constituent des non-uniformités locales d'illumination.

Comme il a été mentionné dans la partie abordant les sources d'erreur possibles de la LPSIV, ces reflets peuvent être interprétés comme des déplacements de particules à la surface de l'eau résultant en un champ de vecteurs totalement aberrant.

Ces reflets forment en fait, sur l'image, des zones pour lesquelles l'intensité des pixels est complètement saturée. Dans ces zones, l'identification individuelle de traceurs est donc impossible. Afin d'illustrer ce phénomène, une vidéo, sur laquelle un fort reflet lumineux dû à l'éclairage est présent, a été enregistrée. Une image extraite de cette vidéo est présentée ci-dessous.



Figure 48 : Reflets lumineux visibles à la surface de l'écoulement

La région d'intérêt a été fixée sur une zone reprenant d'une part le reflet lumineux situé au centre de la figure 48 et d'autre part, le déplacement de traceurs en condition normale d'illumination (figure 49). La séquence d'images ainsi déterminée a d'abord été transformée en niveaux de gris et certains filtres lui ont été appliqués. Comme on peut le constater, les reflets lumineux ne sont pas supprimés par ces filtres.

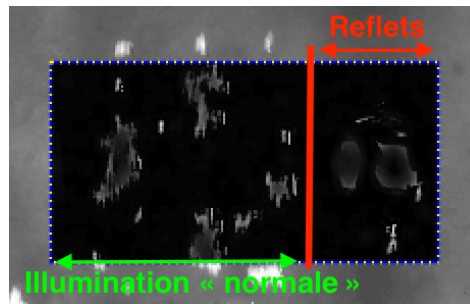


Figure 49 : Zone d'étude délimitée par le rectangle en pointillé

Après l'analyse PIV, une nette variation de vitesses, dans la zone présentant les reflets lumineux est observable sur la carte de couleurs (figure 50) et sur le profil de vitesse en une section transversale (figure 51) prise au milieu de la ROI. Les reflets ont été interprétés comme des déplacements de traceurs à la surface de l'eau. Une forte présence de ceux-ci pourrait par conséquent mener à une mesure de vitesse de surface totalement incohérente avec l'écoulement étudié.

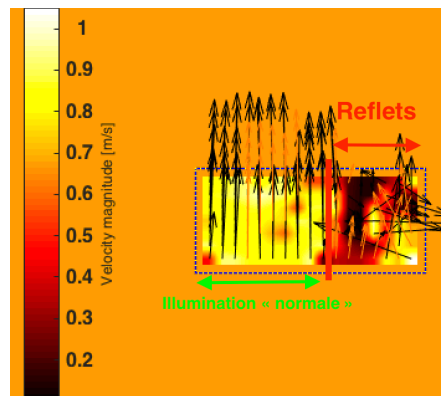


Figure 50 : Carte de couleurs des amplitudes de vitesse obtenues

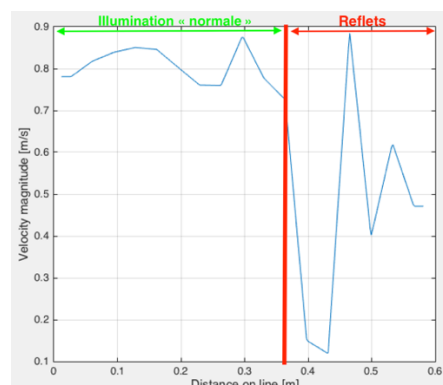


Figure 51 : Profil de vitesse sur une section transversale. La ligne rouge représente la séparation entre la zone illuminée normalement et celle présentant les reflets

6.1.3 Flou de mouvement

Le flou de mouvement ou flou cinétique est dû au mouvement rapide des traceurs photographiés ou saisi durant un long temps de pose. Il ne doit pas être confondu au flou de bougé qui est quant à lui dû à l'instabilité de l'appareil photographique durant la prise de vue. La caméra étant fixée sur le chariot durant nos essais, ce second flou n'est pas présent.

Le temps de pose correspond à l'intervalle de temps durant lequel l'obturateur de la caméra laisse passer la lumière. Si celui-ci est trop grand et que le déplacement des traceurs est important durant cet intervalle de temps, le flou sera plus prononcé et le contour des traceurs ne sera pas net. Chaque image est en fait une intégration de toutes les positions des traceurs durant le temps de pose c'est pourquoi les traceurs apparaissent sous la forme d'une traînée dans la direction de l'écoulement.

Les deux images suivantes illustrent bien ce phénomène. La première a été prise pour un débit de 10 [l/s] tandis que la seconde correspond à un débit de 130 [l/s].



Figure 52 : Illustration du flou de mouvement : pour cette image, le débit étant faible, les traceurs apparaissent comme des billes bien nettes



Figure 53 : Illustration du flou de mouvement : pour cette image, le débit étant élevé, les traceurs apparaissent comme des billes floues

Malheureusement, ce flou induit un impact significatif sur la précision de la LSPIV. Pour quantifier cet impact, imaginons deux photos A et B séparées d'un intervalle de temps Δt .

Imaginons que sur la photo A, une fenêtre d'interrogation est définie et centrée sur un certain traceur. Supposons ensuite que cette fenêtre d'interrogation soit identifiée sur la photo B et que son centre ne soit plus situé exactement sur le traceur de la fenêtre d'interrogation de la photo A, mais dans la traînée de celui-ci, due au flou de mouvement qui n'est pas identique d'une image à l'autre. Il en résulte une imprécision de mesure équivalente à la longueur de la traînée du traceur. Nous avons tenté – difficilement - d'estimer cette longueur pour la figure 54, à l'aide de Matlab. Sur la figure suivante, les valeurs affichées (en pixel) correspondent à une mesure approximative de la longueur de traînée de trois traceurs « collés » l'un à l'autre. Elles permettent d'estimer, de façon grossière, l'erreur d'estimation de vitesse due au flou de mouvement.



Figure 54 : Estimation approximative de la traînée des traceurs (en pixels)

Pour cet exemple, une longueur de 5 pixels correspond à 3 millimètres. L'intervalle de temps entre deux images étant de 33 millisecondes, il en résulte une erreur de l'ordre de 0,1 [m/s].

6.1.4 Rectification des effets de distorsion

Afin de se faire une idée de l'effet de la correction de la distorsion de l'objectif sur les résultats d'une analyse PIV, deux tests ont été réalisés pour une même séquence d'images enregistrée via la GoPro pour un champ de vision « moyen ».

Pour le premier test, aucune rectification ne sera appliquée sur les images. Pour le second, les images ont été rectifiées avant de passer à l'analyse PIV.

La procédure suivie afin de corriger les effets de distorsion est décrite dans la section « Mode d'emploi » en annexe.

Enfin, les paramètres (taille de fenêtre d'interrogation, filtres, ...) utilisés pour les différentes analyses PIV sont identiques.

Les résultats indiquent une forte influence de la rectification sur les vitesses estimées :

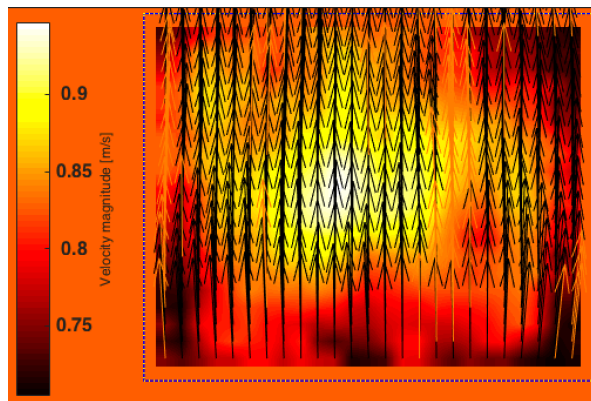


Figure 55 : Cartes de couleurs du champ de vecteurs de vitesse évalué pour les images non rectifiées

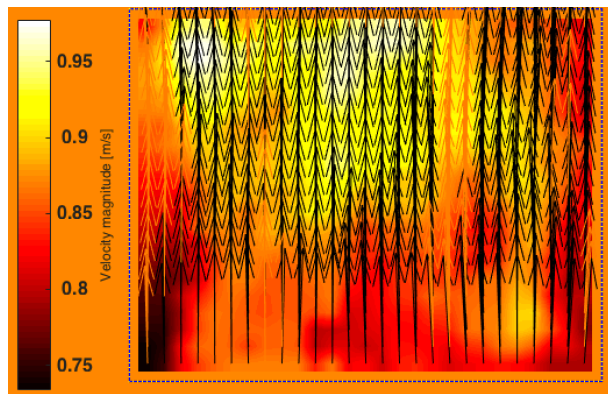


Figure 56 : Cartes de couleurs du champ de vecteurs de vitesse évalué pour les images rectifiées

Pour rappel, la distorsion en barillet a pour effet de produire une image plus grande de la partie centrale du sujet. Les lignes droites de celui-ci sont donc incurvées vers l'extérieur. Cette distorsion se mesure en pour cent. Pour ce faire, on prend l'image d'une ligne droite parallèle à un grand bord de la photo de manière à ce que cette ligne droite touche ce bord en son centre. On calcule ensuite le rapport entre l'écartement maximal de l'image de la ligne droite par rapport au bord de la photo, et la longueur de ce bord comme représenté sur la figure suivante.

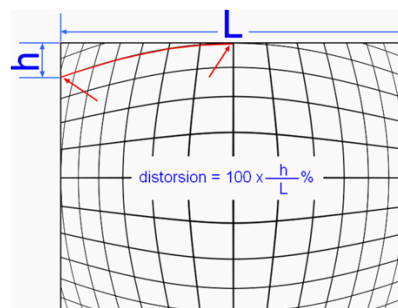


Figure 57 : Evaluation de la distorsion en barillet

Une vidéo d'un damier a été enregistrée, en utilisant également un champ de vision « moyen » afin d'évaluer la différence de longueur, en pixel, de plusieurs carrés de celui-ci. Ci-dessous est

présentée l'une des images composant cette vidéo avec les longueurs en pixels de carrés - faisant 2cm de côté - pris expressément en des endroits où l'effet de distorsion est bien visible.

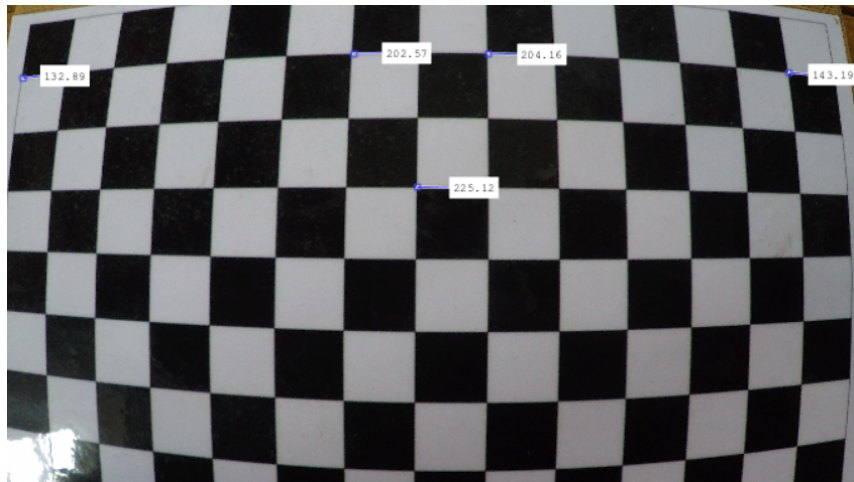


Figure 58 : Variation des longueurs en pixels des différents carrés composant le damier

Comme on peut s'en rendre compte, des différences pouvant aller jusqu'à environ 120 pixels entre différents carrés pris en des positions différentes de l'image - pour une même longueur physique de 2cm - apparaissent.

Supposons que notre écoulement en canal soit totalement constant d'une section transversale à une autre. Un déplacement de 2cm pour un traceur situé au centre de l'image sera représenté par une distance de 225 pixels tandis que pour un traceur situé en haut de l'image, il sera représenté par 200 pixels.

Le facteur de conversion permettant le passage des coordonnées de l'image aux coordonnées physiques étant déterminé de manière unique, le déplacement du traceur situé au centre sera plus important que celui du traceur situé en haut de l'image alors qu'ils se sont tout deux déplacés de la même distance physique.

Remarquons que les distances ici choisies ne sont pas du tout représentatives de la situation réelle et ont été choisies aléatoirement en guise d'exemple.

Pour en revenir à notre situation réelle, reprenons la carte de couleurs obtenue pour la série d'images non rectifiées. Comme on peut s'y attendre, les vitesses sont plus élevées au centre de celle-ci que sur les bords.

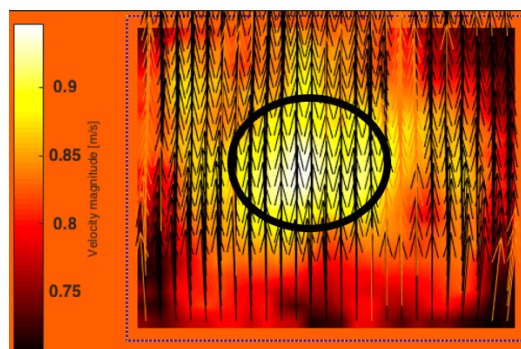


Figure 59 : Illustration de l'impact de la distorsion en barillet sur les mesures de vitesses

Bien évidemment, les vitesses sont également plus faibles à proximité des parois du canal à cause du frottement du fluide sur celles-ci (zones gauche et droite de l'image) mais la comparaison des deux cartes de couleur pour les cas rectifié et non rectifié permet de se rendre compte de l'influence d'une rectification des effets de distorsion sur l'estimation des vitesses de surface.

6.1.5 Filtres

L'objectif des filtres est clair : ils permettent d'une part d'améliorer le contraste entre les traceurs et le fond du canal résultant en une détection plus précise des déplacements les plus probables et d'autre part, ils permettent d'éliminer les bruits de fond pouvant être interprétés comme des mouvements de traceurs.

Afin d'illustrer l'effet de ces filtres sur l'analyse PIV, une même séquence d'images a été traitée deux fois. Pour la première passe, aucun filtre n'a été appliqué. Pour la seconde, les filtres « CLAHE » (taille de fenêtre : 20 [px]), « High-pass » (taille de fenêtre : 60 [px]) et « Wiener » (taille de fenêtre : 50 [px]) ont été appliqués. Les résultats affichés ci-dessous n'ont pas subi de validation de vecteurs et sont donc présentés tels que PIVlab le propose, après l'analyse.

- Aucun filtre appliqué :

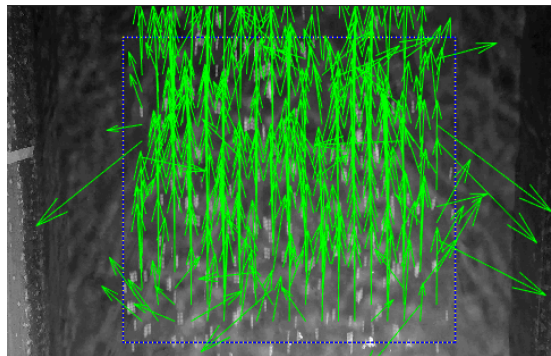


Figure 60 : Champ de vecteurs obtenu à partir d'images non filtrées

- Filtres « CLAHE », « High-pass » et « Wiener » appliqués :

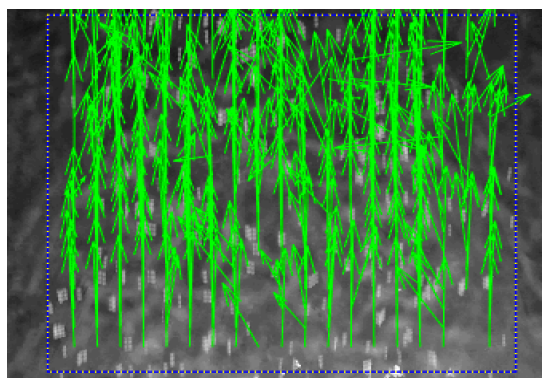


Figure 61 : Champ de vecteurs obtenu à partir des images filtrées

Comme on peut le constater, l'application des filtres permet de limiter la détection de vecteurs erronés bien que ceux-ci soient toujours présents. Cependant, les tests sont ici réalisés dans des conditions d'éclairage artificiel qui permettent d'obtenir un bon contraste initial, c'est-à-dire sans même avoir appliqué de filtre. L'expérience devrait être répétée dans le cas d'un faible éclairage afin de permettre une meilleure visualisation de l'effet de ces filtres sur les résultats de l'analyse PIV.

6.1.6 Taille de la fenêtre d'interrogation

Ce paramètre est l'un des plus critiques dans l'ensemble de l'analyse PIV : il permet de définir la résolution spatiale des mesures. La taille de cette fenêtre doit être déterminée sur base de deux critères :

- La densité moyenne des traceurs
- Le déplacement moyen des traceurs

Le premier critère dépend de l'opérateur tandis que le second dépendra des conditions d'écoulement. La densité optimale de traceurs devra donc être établie sur base du déplacement moyen. La première étape pour déterminer la taille de la fenêtre d'interrogation consiste donc à évaluer approximativement le déplacement - mesuré en pixels - des traceurs relevé entre deux images successives. Dans notre cas, cet ordre de grandeur est obtenu à l'aide du débitmètre et des Baumer. Pour l'exemple présenté ci-dessous, une vitesse moyenne de surface de 0,5 [m/s] a été mesurée en choisissant un index de vitesse équivalent) 0,88. Lors de l'étape de calibration de la caméra, il avait été établi que 38 pixels correspondaient à une distance physique d'environ 2 [cm]. Connaissant également l'intervalle de temps entre deux images successives (0,033 [s]), un déplacement moyen des traceurs en surface, entre ces images, de l'ordre de 32 pixels a été déterminé.

Pour éviter une perte de corrélation due à un déplacement excessif dans le plan, Richard D. Keane et Ronald J. Adrian (1990) ont établi que la taille de la fenêtre d'interrogation devait être supérieure à quatre fois le déplacement moyen des traceurs dans l'écoulement. Cette constatation a été par la suite appelée « one-quarter rule ».

Afin de vérifier cette règle, nous avons réalisé plusieurs analyses PIV sur base d'une même séquence d'images. Le seul paramètre qui a varié entre ces différentes analyses concerne donc la taille de la fenêtre d'interrogation, en démarrant à une valeur de 32 pixels correspondant au déplacement moyen des traceurs. Cette valeur a ensuite été multipliée par deux entre les différents essais jusqu'à une taille de 256 pixels.

Notons également que le recouvrement entre les fenêtres d'interrogation a été fixé à une valeur de 50% pour les différents essais.

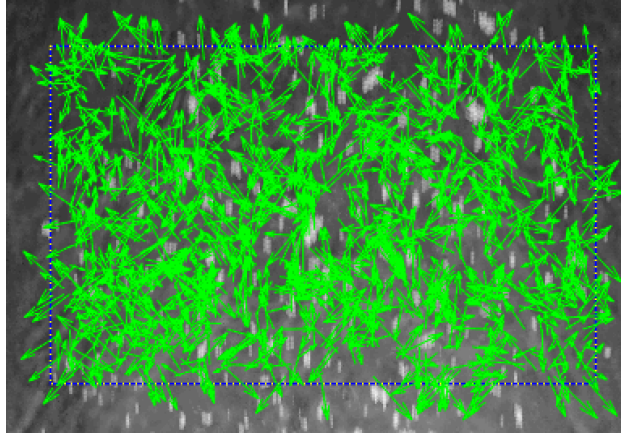


Figure 62 : Champ de vecteurs de vitesse pour une taille d'AI de 32 pixels

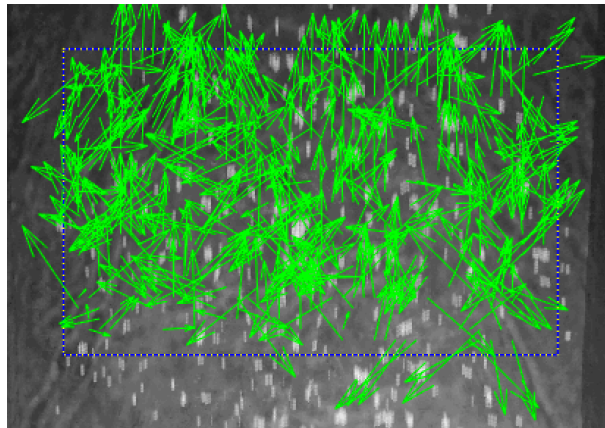


Figure 63 : Champ de vecteurs de vitesse pour une taille d'AI de 64 pixels

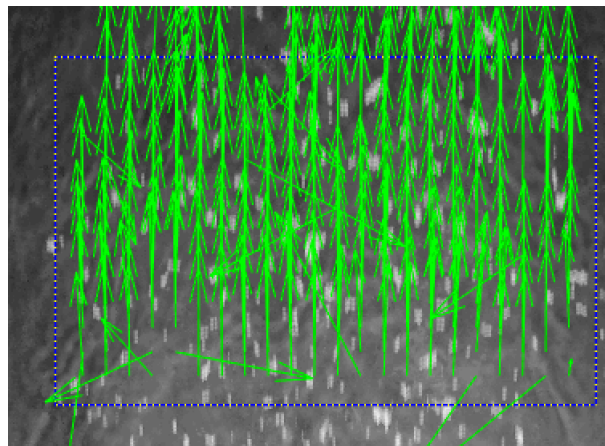


Figure 64 : Champ de vecteurs de vitesse pour une taille d'AI de 128 pixels

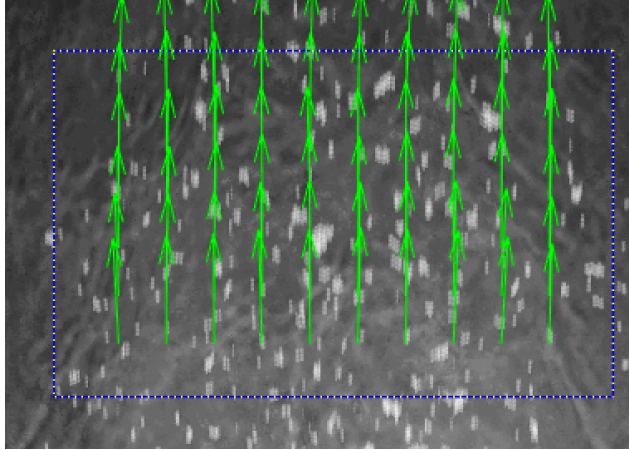


Figure 65 : Champ de vecteurs de vitesse pour une taille d'AI de 256 pixels

Comme on peut le constater sur ces différentes figures, la détection de vecteurs erronés diminue avec l'augmentation des tailles de fenêtre d'interrogation.

Les résultats les plus représentatifs de l'écoulement sont obtenus pour des tailles de fenêtres correspondant à 4 et 8 fois le déplacement moyen des traceurs entre deux images successives. Néanmoins, la résolution spatiale logiquement supérieure obtenue pour des tailles de fenêtres de 128 pixels permet de confirmer « la règle du quart » établie par Richard D. Keane et Ronald J. Adrian.

6.2 Précision de la méthode

La précision de la LSPIV va ici être évaluée en se basant uniquement sur les mesures réalisées à l'aide du tube de Pitot. Une comparaison des vitesses basée sur la vitesse moyenne issue du débitmètre et des Baumer aurait en effet peu de sens puisqu'elle devrait être convertie en une vitesse de surface à l'aide de l'index de vitesse qui est déjà à lui seul une source d'incertitude. Ce dernier point sera abordé dans la section 7.

6.2.1 Pour différents débits

L'analyse suivante s'est effectuée sur base de cinq débits différents. Pour chacun d'eux, un temps d'attente d'environ 30 minutes était respecté afin que les caractéristiques de l'écoulement se stabilisent.

Les variations temporelles du débit et des hauteurs des différentes sondes Baumer sont présentées ici afin d'évaluer la stabilité de ces caractéristiques dans le temps.

Pour chacun de ces débits, les variations temporelles des vitesses de surface ont également été mesurées à l'aide du tube de Pitot. Celui-ci était placé à environ un centimètre sous la surface libre et était ensuite déplacé par pas de 10cm, sur une même transversale, en partant de la paroi. La durée des enregistrements des variations de vitesse de surface en chacun de ces points est d'environ 30 secondes. La moyenne effectuée sur les 30 secondes d'enregistrement en chacun des points a ensuite permis de tracer un profil transversal de vitesses de surface.

La comparaison entre les vitesses de surface obtenues via le tube de Pitot et PIVlab s'est ensuite faite sur une même section transversale, un repère ayant été préalablement placé sur les parois du canal.

Enfin, les traceurs utilisés pour ces différents débits sont des billes de frigolite tandis que les tailles des fenêtres d'interrogation sont de 128 pixels (environ 6,75 [cm]) en utilisant la DCC.

- *Débit 1 :*

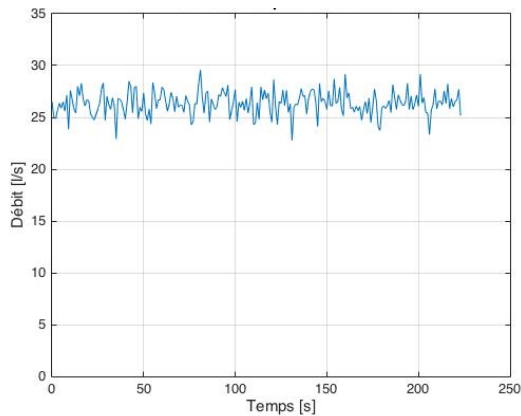


Figure 67 : Variation temporelle du débit (écart-type : 1,15 [l/s], moyenne : 26,4 [l/s])

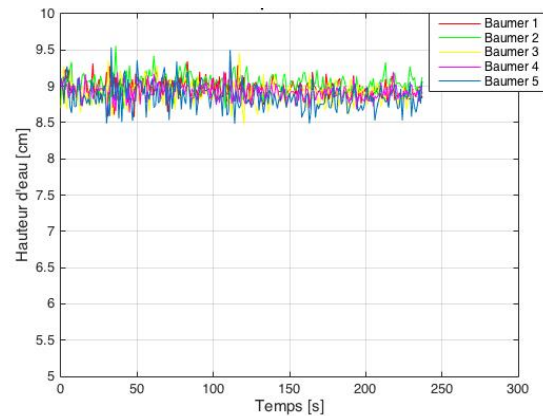


Figure 66 : Variation temporelle de la hauteur d'eau

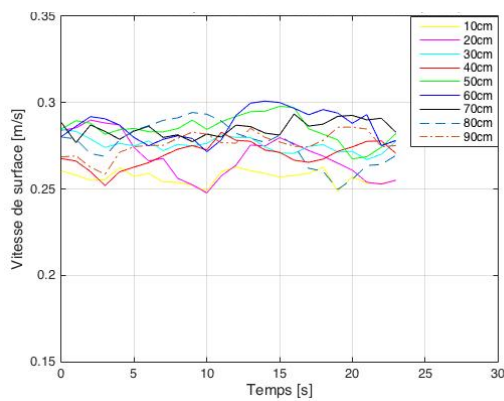


Figure 68 : Variation temporelle des vitesses de surface (Pitot)

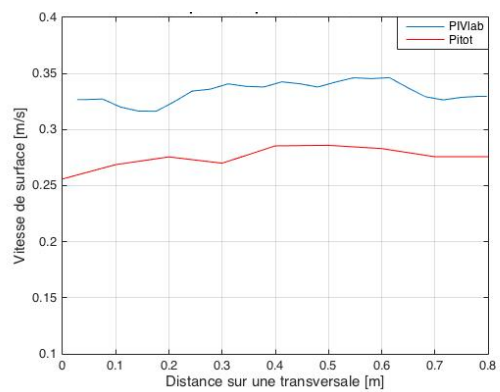


Figure 69 : Comparaison des profils PIVlab - Pitot

- *Débit 2 :*

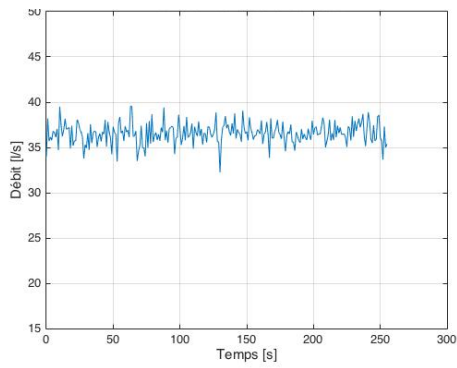


Figure 71 : Variation temporelle du débit (écart-type : 1,16 [l/s], moyenne : 36,6 [l/s])

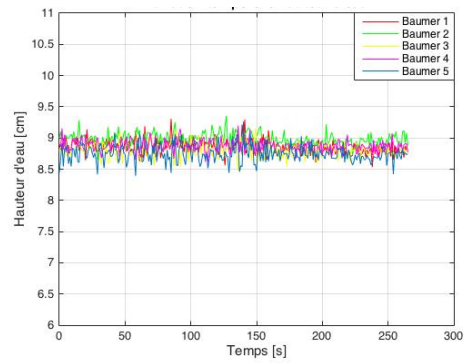


Figure 72 : Variation temporelle de la hauteur d'eau

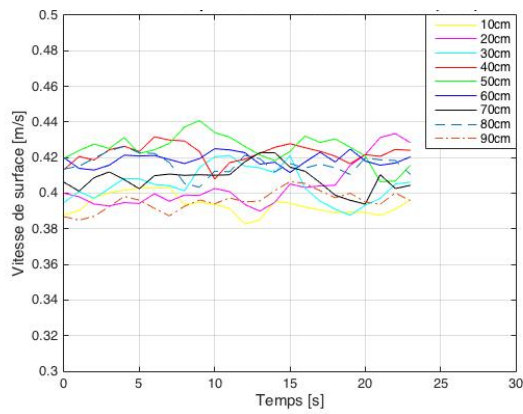


Figure 70 : Variation temporelle des vitesses de surface (Pitot)

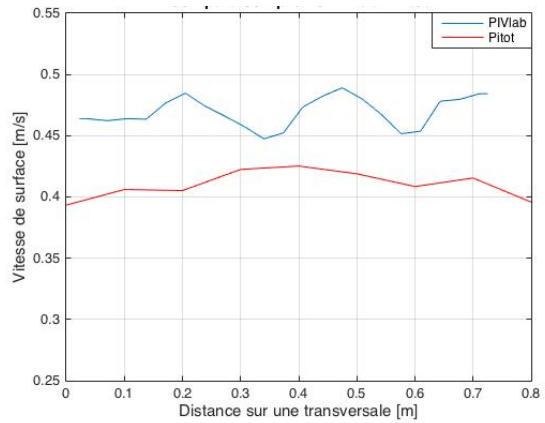


Figure 73 : Comparaison des profils PIVlab - Pitot

- *Débit 3 :*

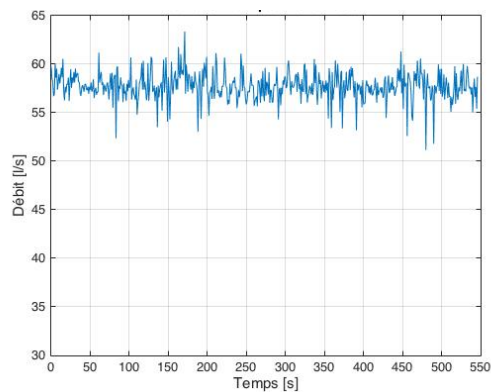


Figure 74 : Variation temporelle du débit (écart-type : 1,43 [l/s], moyenne : 57,7 [l/s])

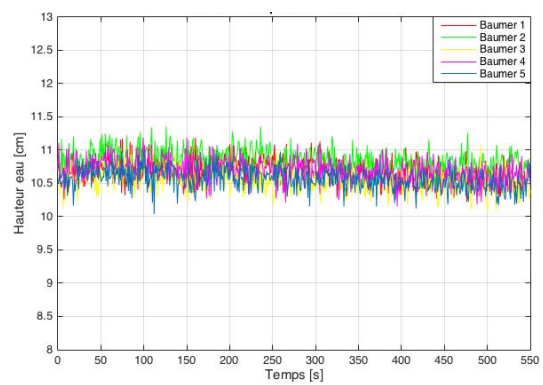


Figure 75 : Variation temporelle de la hauteur d'eau

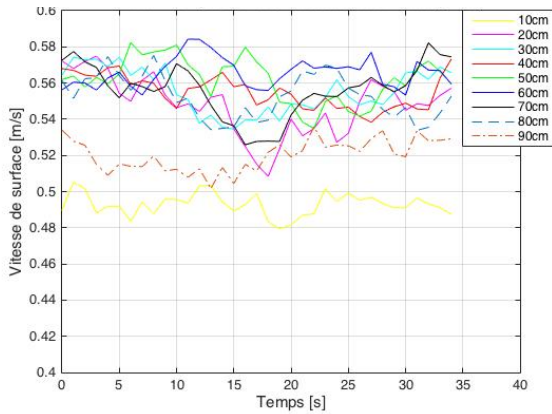


Figure 76 : Variation temporelle des vitesses de surface (Pitot)

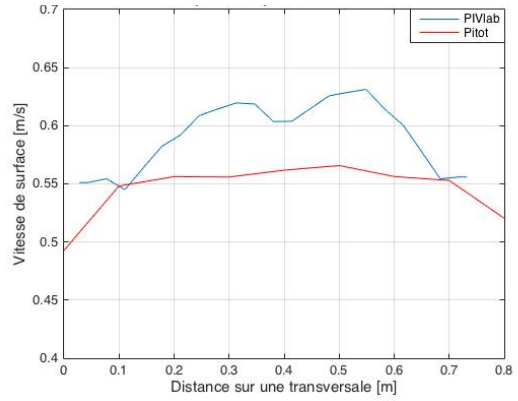


Figure 77 : Comparaison des profils PIVlab - Pitot

- Débit 4 :

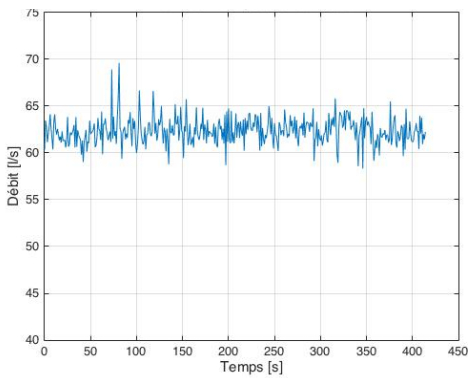


Figure 78 : Variation temporelle du débit (écart-type : 1,40 [l/s], moyenne : 62,4 [l/s])

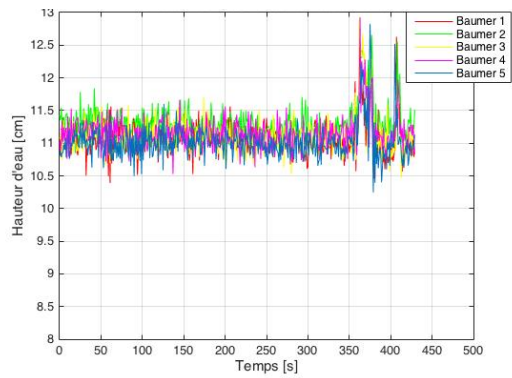


Figure 79 : Variation temporelle de la hauteur d'eau

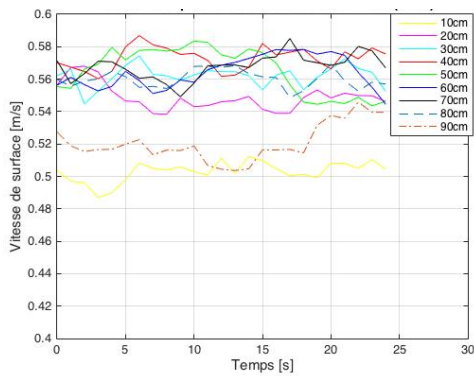


Figure 80 : Variation temporelle des vitesses de surface (Pitot)

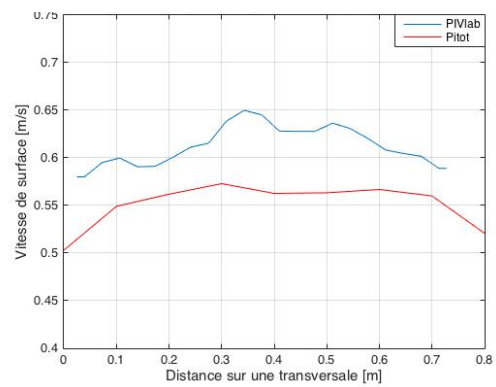


Figure 81 : Comparaison des profils PIVlab - Pitot

- *Débit 5 :*

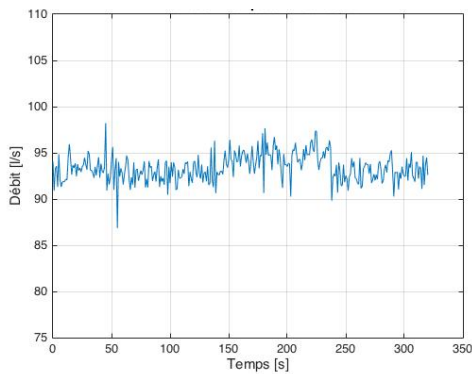


Figure 82 : Variation temporelle du débit (écart-type : 1,49 [l/s], moyenne : 93,4 [l/s])

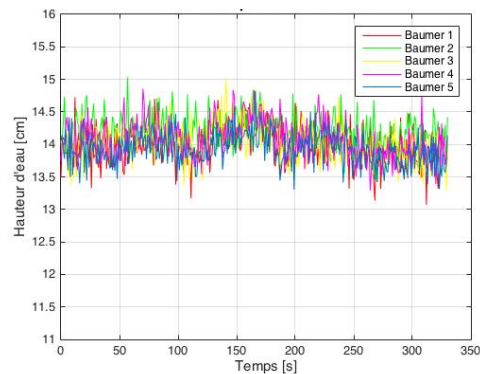


Figure 83 : Variation temporelle de la hauteur d'eau

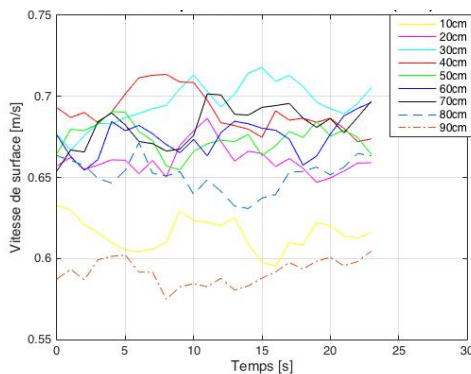


Figure 84 : Variation temporelle des vitesses de surface (Pitot)

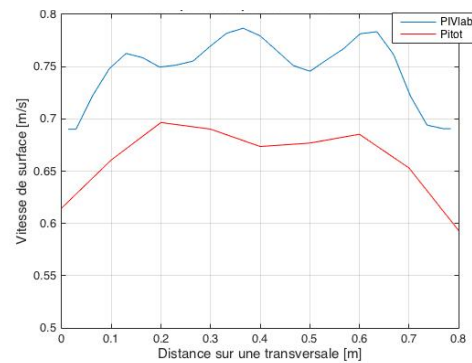


Figure 85 : Comparaison des profils PIVlab - Pitot

Ces différentes figures permettent de se rendre compte que les débits et les hauteurs d'eau sont plus moins constants pour chaque mesure si ce n'est pour le cinquième débit pour lequel de légères variations sont observables. Pour le quatrième débit, des pics de hauteur d'eau ont été enregistrés après environ 350 secondes. L'origine de ceux-ci nous est inconnue.

Les variations de vitesse déduites du tube de Pitot ont quant à elles des valeurs qui semblent coïncider avec la réalité, à savoir des vitesses plus faibles à proximité des parois (valeurs à 10 et 90 cm).

Enfin, les comparaisons des profils obtenus à l'aide de PIVlab et du tube de Pitot ne permettent pas de déduire grand chose de la précision de la LSPIV car, comme expliqué dans la section relative aux mesures en canal, la précision du tube de Pitot n'est pas elle-même totalement confirmée. On remarquera cependant que les deux profils semblent relativement proches avec à chaque fois des valeurs légèrement inférieures pour les vitesses déduites du tube de Pitot. Cette constatation pourrait être due au fait que ce dernier n'ait pas été placé exactement à la surface libre mais bien environ un centimètre en dessous de celle-ci.

Dans de futures évaluations de la précision de la LSPIV, l'utilisation d'un instrument de haute précision pourrait dès lors s'avérer très utile.

6.2.2 Pour différents traceurs

Plusieurs traceurs ont été testés au canal afin d'évaluer la possibilité de les utiliser lors d'une prochaine étude LSPIV sur une rivière naturelle. L'avantage de ces traceurs est qu'ils sont naturels et peuvent donc être laissés sur l'écoulement lorsque la mesure est réalisée sans risquer de polluer celui-ci.

Les différents traceurs utilisés sont repris sur l'illustration ci-dessous. On y distingue des pelures d'orange et de pamplemousse, qui ont été préalablement découpées en morceaux d'environ 1cm de côté, des copeaux de bois ainsi que des pétales de rose.



Figure 86 : Différents traceurs utilisés

Ces essais ont été réalisés pour le premier des débits présentés dans la précédente.

Pour rappel, celui-ci était de 57,7 [l/s] tandis que les Baumer indiquaient une hauteur d'eau moyenne de 10,67 [cm] permettant de déduire une vitesse moyenne d'écoulement de 0,53 [m/s].

Ne disposant que d'une faible quantité de pelures de pamplemousse, la densité d'ensemencement n'était pas optimale. Les tailles des fenêtres d'interrogation ont par conséquent été fixées à des dimensions deux fois plus grandes que pour les autres traceurs. Cette taille est de 256 pixels de côté soit environ 13,5 [cm]. La vitesse moyenne de surface sur une aire ainsi que la comparaison entre les profils de vitesse de surface obtenus à l'aide du tube de Pitot et de PIVlab, sur une même section transversale (représentée par la ligne rouge sur les figures de gauche suivantes), sont présentés ci-dessous. Les mêmes comparaisons seront faites pour chacun des traceurs utilisés.

- Pelures de pampleousse (*taille de l'IA : 256 [px] soit environ 13,5 [cm]*) :

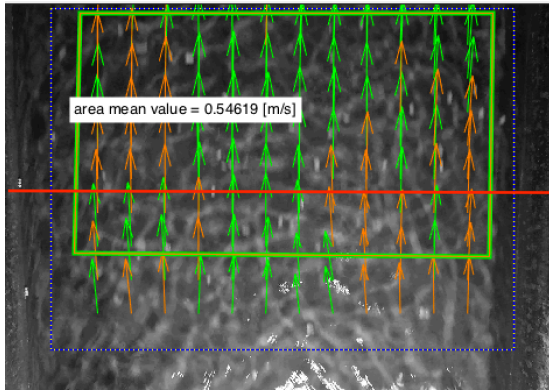


Figure 87 : Vitesse moyenne de surface sur une aire

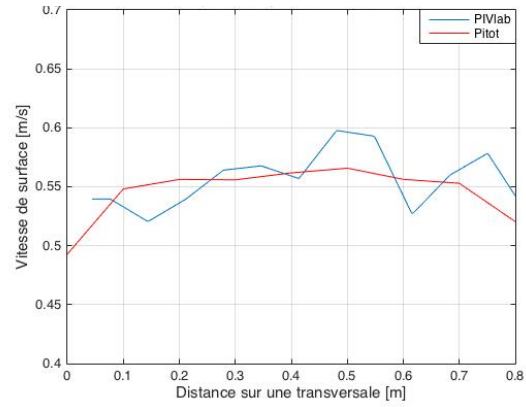


Figure 88 : Comparaison des profils obtenus via PIVlab et Pitot

- Pelures d'orange (*taille de l'IA : 128 [px] soit environ 6,75 [cm]*) :

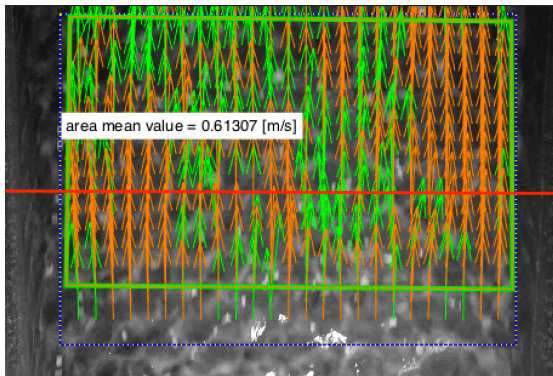


Figure 89 : Vitesse moyenne de surface sur une aire

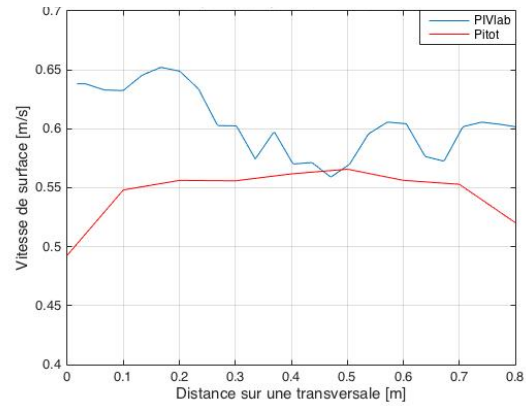


Figure 90 : Comparaison des profils obtenus via PIVlab et Pitot

- Copeaux de bois (*taille de l'IA : 128 [px]*) :

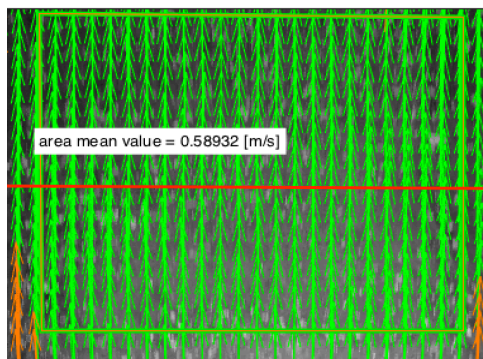


Figure 91 : Vitesse moyenne de surface sur une aire

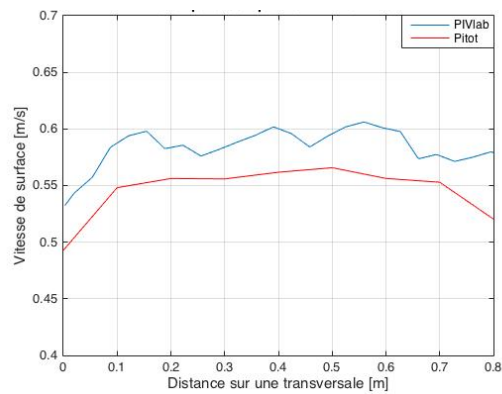


Figure 92 : Comparaison des profils obtenus via PIVlab et Pitot

- Pétales de rose (taille de l'IA : 128 [px]) :

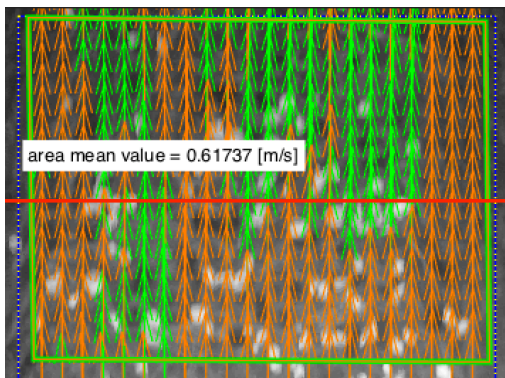


Figure 93 : Vitesse moyenne de surface sur une aire

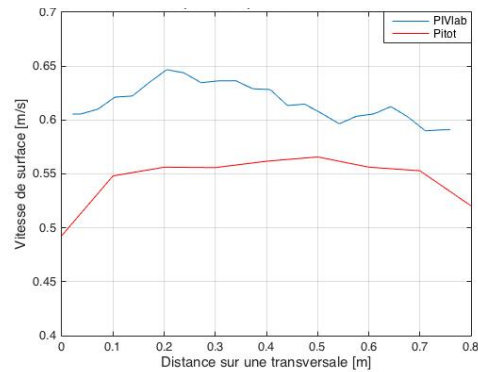


Figure 94 : Comparaison des profils obtenus via PIVlab et Pitot

Comme on peut le constater sur ces différentes figures, les profils de vitesse de surface obtenus à l'aide du tube de Pitot et de PIVlab ne sont pas trop différents l'un de l'autre, principalement pour les pelures de pamplemousse et pour les copeaux de bois. Pour ces derniers, l'allure des deux courbes est d'ailleurs relativement semblable avec des valeurs légèrement inférieures pour le tube de Pitot. Cette légère différence peut être en partie expliquée par le fait que, comme mentionné dans la partie précédente, le tube de Pitot était placé légèrement en dessous de la surface libre afin d'y éviter la pénétration de bulles d'air.

En ce qui concerne les vitesses moyennes de surface, présentées sur les figures de gauche, celles-ci ne sont pas non plus trop éloignées de la vitesse moyenne de surface déduite du débitmètre (= 0,595 [m/s]). Pour l'obtenir, la vitesse moyenne issue du débitmètre et des Baumer est divisée par l'index de vitesse pour lequel une valeur de 0,89 a été choisie. La justification de cette valeur est faite dans la section suivante.

Enfin, on remarquera que pour les copeaux de bois, peu de vecteurs ont été interpolés (vecteurs orange). Cette constatation s'explique par le fait que ces copeaux - qui se rapprochent plus de sciures de bois - couvraient la totalité de la surface d'analyse avec une relativement grande densité comme on peut le constater sur la figure suivante.

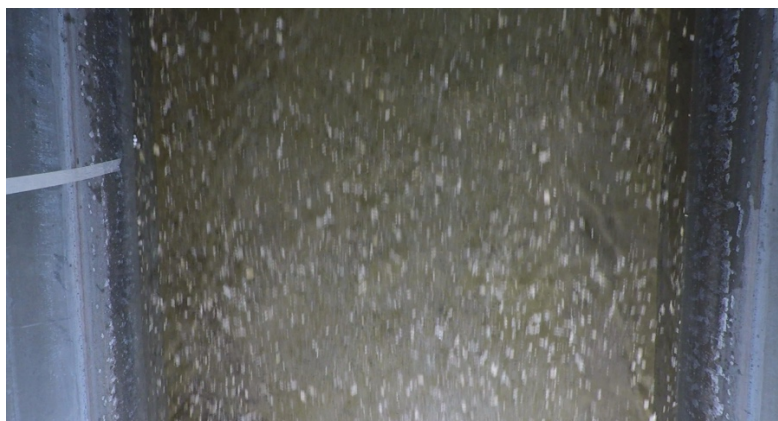


Figure 95 : Ensemencement réalisé à l'aide de copeaux de bois

7 Lien entre vitesse de surface et vitesse moyenne

La LSPIV permet d'obtenir des vitesses de surface plus ou moins précises en fonction des différents paramètres d'analyse utilisés ainsi que d'autres facteurs tels que l'ensemencement ou l'illumination.

Cependant, ce n'est pas tant la vitesse de surface qui intéressera les hydrologues puisqu'ils ne peuvent pas en tirer des conclusions pour prédire une possible crue ou toute autre caractéristique propre à la rivière. Pour ce faire, la variable d'intérêt est le débit qui s'écoule en une certaine section.

On le sait, celui-ci résulte du produit de la vitesse moyenne du cours d'eau par l'aire de la section considérée. Une relation permettant de déduire une vitesse moyenne à partir d'une vitesse de surface constituerait par conséquent un outil très utile pour les hydrologues.

C'est ce que nous avons tenté de déterminer, dans la suite de ce rapport, après avoir parcouru les différentes études déjà publiées sur le sujet.

7.1 Relations existantes

De nombreuses études ont été menées afin de pouvoir estimer une vitesse moyenne à partir d'une mesure unique en surface et pour une configuration de lit donnée. Ces études ont été réalisées à l'aide d'instruments de mesure tels que l'ADCP permettant d'établir le profil de vitesse complet sur une verticale pour ensuite comparer la vitesse moyenne déduite de ce profil à la vitesse en surface.

On définit l'index de vitesse α de la manière suivante :

$$\alpha = \frac{\text{vitesse moyenne issue du débitmètre}}{\text{vitesse moyenne de surface issue de PIVlab}}$$

Pour un profil de vitesse logarithmique, ce qui est le cas de la situation rencontrée dans le canal où nos différents essais ont été réalisés, l'index de vitesse peut être considéré égal à une valeur comprise entre 0,85 et 0,86 dans un canal naturel.

Dans le cas d'un canal artificiel et à faible rugosité, celui-ci doit être pris égal à 0,9 au centre d'une section transversale. Sur les bords par contre, ces valeurs peuvent varier de manière significative. Ces variations s'expliquent par le fait que des courants secondaires se forment près des parois, modifiant ainsi le profil de vitesse qui ne suit dès lors plus une loi logarithmique. Il en résulte une vitesse maximale qui n'est plus observée à la surface libre (ou légèrement en dessous) et un coefficient α pouvant même être supérieur à l'unité. Dans ce cas, Rantz et al. (1982, p.137) recommandent de se référer à la figure 96 pour la valeur de l'index de vitesse à considérer

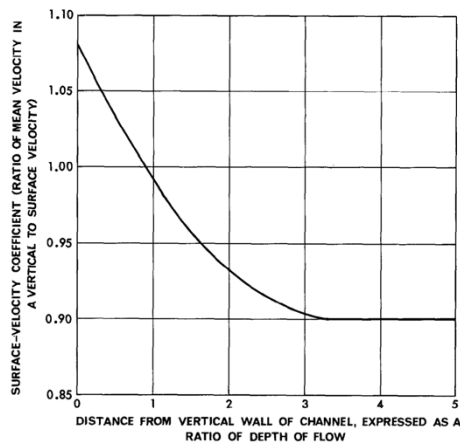


Figure 96 : Valeur de l'index de vitesse en fonction de la distance par rapport à une paroi verticale [Rantz et al., 1982, p.137]

La détermination d'une valeur unique pour le coefficient α n'est donc pas possible. Cette constatation résulte du fait que les profils de vitesse d'une verticale à l'autre ou encore d'une rivière à l'autre ne sont jamais identiques puisqu'ils dépendent de plusieurs facteurs, notamment de la rugosité du lit. Considérer un index de vitesse équivalent à 0.85 en canal naturel est donc une valeur acceptable qui peut être utilisée par défaut mais elle peut mener à une sous-estimation du débit dans le cas d'une faible rugosité relative, c'est-à-dire inférieure à 0,001, et à une surestimation de celui-ci dans le cas d'une importante rugosité relative (supérieure à 0,05).

Cependant, la plupart des écoulements rencontrés en rivière naturelle peuvent être qualifiés de turbulents. Il en résulte que les vitesses instantanées sont affectées de variations importantes dans le temps mais que, grâce au mélange constant dû à la turbulence, la structure du profil vertical de vitesse moyenné dans le temps est prévisible et de type logarithmique. Les plages de valeurs décrites précédemment peuvent donc être considérées comme de bonnes approximations permettant de faire un lien entre vitesses de surface et moyenne mais il faudra néanmoins les utiliser avec prudence en s'adaptant aux cas rencontrés.

Moramarco et al. (2017) ont quant à eux tenté d'identifier une quelconque dépendance du coefficient α en fonction du site naturel étudié. Pour ce faire, ils ont comparé les vitesses de surface aux vitesses moyennes, enregistrées sur une certaine période, de cinq sites différents, tous équipés de station de mesure.

Leurs études ont permis de mettre en avant une certaine influence du rapport entre la largeur de la rivière (W) et la profondeur de celle-ci (D) sur l'index de vitesse (exprimé par la lettre « k ») comme représenté sur la figure suivante.

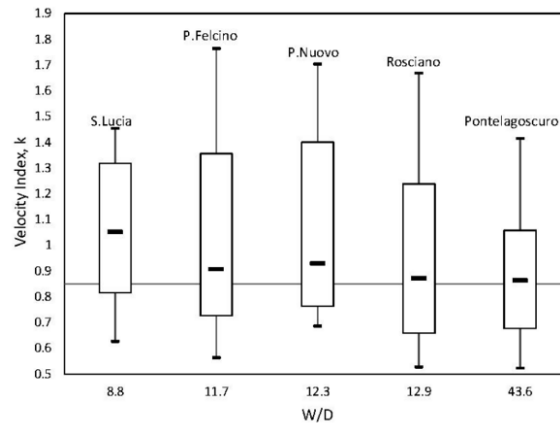


Figure 97 : Box-plot des valeurs de l'index de vitesse en fonction du ratio W/D, pour cinq sites d'étude [Moramarco et al., 2017]

Comme on peut le constater, les valeurs de l'index de vitesse varient fortement alors que les valeurs moyennes de celui-ci pour les cinq sites sont inversement proportionnelles au ratio W/D. On constate également que plus ce ratio augmente, plus la variabilité des résultats diminue et plus l'index de vitesse tend vers la valeur de 0,85 recommandée en première estimation. Ces recherches récentes ne permettent cependant pas de déduire une relation solide puisqu'elles se basent seulement sur cinq sites. Les auteurs estiment par ailleurs qu'avec le développement de techniques rapides et ne nécessitant que peu de matériel telles que la LSPIV, de nombreux nouveaux sites d'étude vont pouvoir être exploités afin de déterminer une relation empirique entre l'index de vitesse et des caractéristiques propres au cours d'eau.

7.2 Détermination expérimentale du coefficient alpha

Afin de déterminer expérimentalement l'index de vitesse, plusieurs essais ont été réalisés sur un canal artificiel.

Ces essais consistaient à réaliser des mesures LSPIV pour plusieurs débits. Pour ces mesures, les traceurs utilisés étaient des billes de frigolite. Les débits sont répartis sur une plage allant de plus ou moins 10 [l/s] à 140 [l/s] par pas d'environ une dizaine de litres par seconde. Ces pas n'ont pas pu être plus précis, la consigne de la pompe étant manuelle et très sensible. Des valeurs supérieures de débit n'ont en outre pu être évaluées car une nette diminution du niveau d'eau dans la fosse, lieu d'aspiration de la pompe, était déjà observable pour un débit de 140 [l/s].

Afin de ne pas causer de dégâts importants au niveau de la pompe, nous nous sommes donc limités à cette valeur de débit. Enfin, pour chacun de ces débits, un temps d'attente d'environ une vingtaine de minutes, avant l'ensemencement et l'enregistrement d'une vidéo de l'écoulement, a été respecté permettant une stabilisation du niveau d'eau dans le canal.

Durant l'ensemencement, les valeurs du débitmètre et des cinq sondes Baumer étaient enregistrées afin de déduire une vitesse moyenne d'écoulement. Cette vitesse moyenne correspond par conséquent à la composante verticale de vitesse, c'est-à-dire dirigée parallèlement à l'axe du canal, puisque c'est cette dernière qui participe au débit.

Afin d'être cohérent dans l'évaluation de l'index de vitesse, c'est également la composante verticale de la vitesse, obtenue à l'aide de PIVlab, qui devra être comparée à celle issue du débit.

Le tableau suivant est un récapitulatif des différentes valeurs obtenues pour chaque débit. Les valeurs mentionnées dans la colonne « débit » sont celles obtenues à l'aide du débitmètre. Les deux colonnes suivantes reprennent successivement les valeurs des vitesses moyennes découlant du débitmètre et les valeurs moyennes sur une aire des composantes verticales des vitesses de surface obtenues via PIVlab.

La dernière colonne reprend les valeurs de l'index de vitesse, pour les différents débits, c'est-à-dire le rapport entre les deux colonnes précédentes :

$$\alpha = \frac{\text{vitesse moyenne issue du débitmètre}}{\text{vitesse moyenne de surface issue de PIVlab}}$$

N ^{os} essai	Débit [l/s]	Vitesses moyennes (débitmètre) [m/s]	Vitesses moyennes surface (PIVlab) [m/s]	Index de vitesse (α) [-]
1	11.8	0.126	0.149	0.84
2	26.4	0.288	0.332	0.87
3	36.6	0.404	0.471	0.86
4	42.2	0.454	0.506	0.89
5	57.7	0.529	0.592	0.89
6	62.4	0.547	0.618	0.89
7	71.9	0.585	0.647	0.90
8	81.3	0.616	0.683	0.90
9	93.4	0.650	0.751	0.87
10	101.7	0.682	0.768	0.89
11	114.4	0.762	0.832	0.92
12	128.9	0.782	0.863	0.90
13	136.4	0.792	0.875	0.91

Tableau 1 : Détermination de l'index de vitesse sur base de plusieurs débits

Comme nous pouvons le remarquer, les valeurs de l'index de vitesse varient de 0.84 à 0.92 et ont pour valeur moyenne 0.89. Cette plage de valeurs ainsi que cette moyenne sont cohérentes avec les valeurs recommandées et issues d'autres mesures, comme présentées dans la partie précédente de ce chapitre. Pour rappel, les études antérieures recommandaient d'utiliser une valeur de 0.9 au centre d'un canal artificiel de faible rugosité.

Deux points doivent cependant être soulignés concernant cette valeur d'index de vitesse :

- Le fond du canal utilisé lors de nos essais est construit en béton alors que les bords sont en acier. Bien que l'acier présente une rugosité relative assez faible, ce n'est pas le cas

du béton dont les valeurs de rugosité relative peuvent prendre des valeurs plus élevées. De ce fait, la valeur de 0.9 prise comme index de vitesse pour un canal artificiel de faible rugosité doit être revue légèrement à la baisse dans notre cas.

- Les vitesses de surface obtenues à l'aide de PIVlab sont le résultat d'une moyenne des différents vecteurs sur une aire couvrant toute la largeur du canal. Or, sur les bords, le profil de vitesse n'est pas identique à celui au centre. Les vitesses de surface étant plus faibles aux extrémités, les moyennes obtenues (4^{ème} colonne du tableau 1) seraient donc logiquement plus élevées sans considérer les vitesses de surface aux extrémités, résultant donc en un index de vitesse légèrement inférieur à ceux calculés (dernière colonne du tableau 1).

Ces deux points vont donc dans le même sens.

Afin de pousser un peu plus loin la détermination de la valeur de l'index de vitesse, une seconde comparaison a été réalisée. Celle-ci se base cette fois uniquement sur les acquisitions issues du tube de Pitot, présentées dans relative aux mesures en canal. Ces acquisitions ont, pour rappel, été réalisées en plaçant le tube sur des verticales, d'une même section transversale, distantes de 10cm, 30cm, 50cm, 70cm et 90cm de l'extrémité gauche du canal en prenant le sens d'écoulement comme référence. Enfin, le tube était déplacé sur chaque verticale par pas de 1cm depuis le fond jusqu'à environ un centimètre en dessous de la surface libre. Par conséquent, une vitesse de surface (ou sub-surface) était ainsi obtenue tandis que le profil de vitesse permettait de déduire une vitesse moyenne.

Ce sont ces deux vitesses qui ont été comparées dans le tableau suivant, afin de déterminer d'autres valeurs de l'index de vitesse et d'illustrer l'influence des parois sur celui-ci.

Distances paroi	Vitesses moyennes sur la verticale [m/s]	Vitesses de surface [m/s]	Index de vitesse (α) [-]
10cm	0.280	0.274	1.02
30cm	0.315	0.344	0.91
50cm	0.307	0.342	0.90
70cm	0.308	0.335	0.92
90cm	0.262	0.223	1.17

Tableau 2 : Détermination de l'index de vitesse sur plusieurs verticales

A nouveau, on peut observer que les valeurs obtenues restent proches de celles recommandées dans les recherches antérieures. On constate également une valeur de α supérieure à l'unité dans les zones proches paroi due à une légère modification du profil de vitesse qui présente des valeurs de vitesse de plus en plus faibles lorsque l'on s'approche de la surface libre.

Afin d'illustrer cette variation de profil, nous avons repris ici deux des profils présentés dans la section consacrée aux mesures en canal.

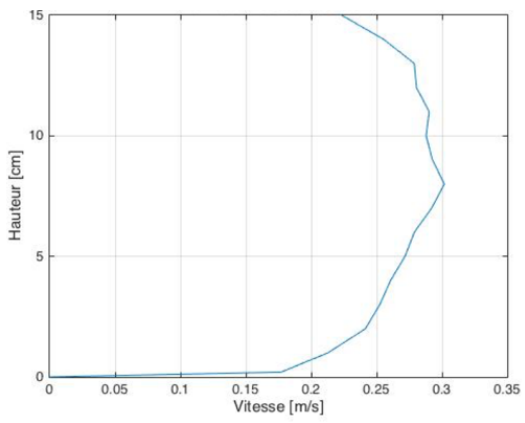


Figure 98 : Profil de vitesse sur une verticale située à 10 cm de la paroi

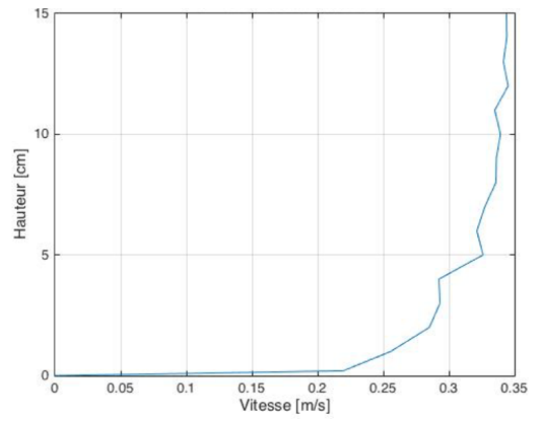


Figure 99 : Profil de vitesse sur une verticale située à 30 cm de la paroi

8 Conclusion et perspectives

La LSPIV semble très clairement constituer une technique très prometteuse de mesure de vitesse de surface dans des situations extrêmes (crues et étiages) voire normales.

Outre sa rapidité et sa facilité de mise en œuvre, elle permet une mesure de la vitesse de surface à une certaine distance du cours d'eau, évitant ainsi notamment la mise en danger de l'opérateur et ce, pour un coût relativement réduit en comparaison avec d'autres techniques de mesure.

Son côté quasiment non-intrusif permet également de déterminer des vitesses d'écoulement dans de nombreuses situations comme rencontrées par exemple pour de faibles hauteurs d'eau, là où il n'est tout simplement pas possible de mettre en œuvre d'autres techniques de mesure.

Les résultats que nous avons pu obtenir au cours de ce travail semblent cohérents avec les résultats proposés dans des études précédentes, à savoir une erreur relative inférieure à 10%. Nous regrettons cependant de ne pas avoir pu challenger la précision de la LSPIV avec d'autres instruments de mesure disponibles au laboratoire : le débitmètre couplé avec les sondes Baumer et les vitesses mesurées à l'aide du tube de Pitot fournissant des valeurs trop différentes. Ces comparaisons devraient faire le sujet d'une étude ultérieure, sur base de ce travail qui, nous l'espérons, pourra servir de support pour permettre à un futur chercheur de faire l'impasse sur une série de questions et de problèmes que l'on peut se poser lors d'une initiation à la LSPIV.

Un autre point devrait selon nous faire l'objet d'investigations plus en profondeur : l'index de vitesse permettant le passage d'une vitesse de surface, déduite de l'analyse PIV, à une vitesse moyenne nécessaire à la détermination du débit. Comme nous avons pu le constater, cet index de vitesse dépend essentiellement du profil de vitesse sur une verticale qui dépend lui-même de caractéristiques physiques de la rivière telles que la rugosité du lit : dunes, fond plat et autres modifient la distribution verticale des vitesses.

C. Polatel (2006) a proposé d'estimer ces formes de fond en analysant la topographie de la surface libre d'un écoulement, sur base d'une série d'images, mises en évidence par un jeu d'éclairage.

Bien qu'il n'ait pas pu établir une méthode lui permettant d'atteindre son objectif, l'idée est intéressante et nécessiterait de plus amples recherches. Elle permettrait en effet de pouvoir déduire des caractéristiques supplémentaires du cours d'eau sur base uniquement de l'analyse d'images.

Au vu des nombreuses sources d'erreur identifiées dans ce rapport, les résultats des mesures LPSIV peuvent présenter une grande variabilité et être par conséquent entachés de nombreuses imprécisions : on se rappellera de l'ensemencement, de l'illumination, de l'enregistrement, de la rectification d'images, de l'analyse PIV et du post-traitement. Il serait par conséquent très utile de pouvoir disposer d'une méthode permettant de déterminer la fourchette de l'erreur totale qui entache les résultats. L'influence des différents paramètres de l'analyse pourrait également être plus facilement mise en évidence de la sorte, pour différentes conditions

d'écoulement. Parmi ces paramètres, nous avons pu remarquer que la taille de la fenêtre d'interrogation jouait une influence prépondérante sur l'estimation des vitesses. Plus elle était choisie petite par rapport au déplacement moyen des traceurs, plus la résolution spatiale était élevée mais plus les vecteurs vitesses résultant de l'analyse présentaient des orientations et des amplitudes non représentatives de la situation observée. La taille de fenêtre d'interrogation permettant le meilleur compromis entre résolution spatiale et précision de la méthode correspondait à la situation pour laquelle elle était choisie comme quatre fois supérieure au déplacement moyen des traceurs entre deux images successives, confirmant ainsi les conclusions de Richard D. Keane et Ronald J. Adrian (1990).

Bien qu'il semble logique qu'une trop petite taille de fenêtre d'interrogation puisse donner des résultats concluants, nous n'avons pu trouver d'explications pertinentes concernant la « règle du quart ». Il nous semble donc opportun que de plus amples recherches soient réalisées sur le sujet.

Au cours de nos essais, différents traceurs naturels ont été utilisés : les pelures d'orange et de pamplemousse, des pétales de rose et autres copeaux de bois. Bien que tous présentaient des résultats prometteurs, ils n'ont été testés que pour un seul débit et dans des conditions d'écoulement idéalisées. L'avantage principal qu'ils offrent de par leur nature, en font des traceurs idéaux pour l'environnement même s'il en existe pléthore d'autres. L'une des pistes prometteuses est l'écume naturellement présente à la surface de l'eau et pour laquelle il serait intéressant de réaliser des essais lorsqu'elle sera visible dans de prochaines études en écoulement naturel.

Enfin, insistons sur le fait que les différentes simulations menées au canal étaient réalisées dans des conditions idéales d'écoulement et d'illumination. En rivière naturelle, la surface libre de l'écoulement présente bien souvent des structures hydrauliques particulières telles que des tourbillons.

Bien que plusieurs travaux ont déjà été réalisés dans ces conditions, peu nombreux sont ceux qui ont été menés à l'aide de drones. Aujourd'hui, ces aéronefs constituent pour beaucoup une source de progrès techniques – et économiques - dans des domaines très variés qui ne se limitent évidemment pas à l'hydraulique (livraison, construction, ...). Il serait regrettable de ne pas s'en servir pour l'acquisition de séquences d'images à grande échelle avec tous les effets qu'ils induisent sur les résultats d'une mesure LSPIV. Leur utilisation devrait donc tout logiquement faire partie du futur de l'hydrométrie par analyse d'images mais les travaux indispensables à mener pour déterminer l'influence des mouvements du drone résultant par exemple des vibrations des moteurs ou encore de l'effet du vent font défaut et méritent que l'on s'y intéresse plus en profondeur.

9 Bibliographie

- Aberle, J., Rennie, C., Admiraal, D., & Muste, M. (Eds.). (2017). *Experimental Hydraulics: Methods, Instrumentation, Data Processing and Management: Volume II: Instrumentation and Measurement Techniques*. CRC Press.
- Bouchenafa, W., Boucher, O., Mouhous-Voyneau, N., & Sergent, P. (2016). Mesure des champs de vitesse et débit d'écoulement par la méthode LSPIV : application sur un modèle réduit d'une bouche de métro. *XIV èmes Journées Nationales Génie Côtier – Génie Civil*, 14, 325-332. En ligne <http://studylibfr.com/doc/2785594/mesure-des-champs-de-vitesse-et-d%C3%A9bit-d-%C3%A9coulement-par-la>.
- Caltrans Division of Research, Innovation and System Information. (2017). *Flood Flow Estimation using Large Scale Particle Image Velocimetry (LSPIV)*. En ligne http://www.dot.ca.gov/newtech/researchreports/preliminary_investigations/docs/flood_flow_pi_020817.pdf.
- Harpold, A. A., Mostaghimi, S., Vlachos, P. P., Brannan, K., & Dillaha, T. (2006). Stream discharge measurement using a large-scale particle image velocimetry (LSPIV) prototype. *Transactions of the ASABE*, 49(6), 1791-1805. En ligne <https://vtechworks.lib.vt.edu/bitstream/handle/10919/48203/SW6409.pdf?sequence=1>.
- Hauet, A. (2006). *Estimation de débit et mesure de vitesse en rivière par Large-Scale Particle Image Velocimetry*. Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, Grenoble.
- Hauet, A., Jodeau, M., Le Coz, J., Marchand, B., die Moran, A., Le Boursicaud, R., & Dramais, G. (2014). Application de la méthode LSPIV pour la mesure de champs de vitesse et de débits de crue sur modèle réduit et en rivière. *La Houille Blanche*, (3), 16-22. En ligne <https://hal-enpc.archives-ouvertes.fr/hal-01118478/document>.
- Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer. (2006). *Mesure du débit*. En ligne <http://www.ifremer.fr/cycleau/cycleau/resultats/debit.htm>, consulté le 11 juillet 2017.
- Keane, R. D., & Adrian, R. J. (1990). Optimization of particle image velocimeters. Part I. Double pulsed systems. *Measurement Science and Technology*, 1(11), 1202-1215.
- Kim, Y., Muste, M., Hauet, A., Krajewski, W. F., Kruger, A., & Bradley, A. (2008). Stream discharge using mobile large-scale particle image velocimetry: A proof of concept. *Water Resources Research*, 44(9). En ligne <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2006WR005441/full>.
- Lefèvre, T. (2013). *La répartition de l'eau sur la Terre*. En ligne sur le site Planète viable <http://planeteviable.org/repartition-eau-sur-terre/>, consulté le 08 juillet 2017.

- Macq, J-F. (2016). *Mesures topographiques par photogrammétrie à partir d'un drone : application à la rivière Cavaillon en Haïti*. Mémoire de Master en Ingénieur civil des constructions non publié, Université catholique de Louvain, Louvain-La-Neuve.
- Mallet, C. (2010). *LIDAR aéroportés topographiques & bathymétriques*. Laboratoire MATIS - Institut Géographique National, Saint-Mandé. En ligne https://www.umn-cnrm.fr/ecole_lidar/IMG/pdf/Mallet-Topo_Bathy_Veget.pdf.
- Mediterranean Hydrological Cycle Observing System. (s.d.). *Mesure de débits*. En ligne <http://medhycos.mpl.ird.fr/fr/data/hyd/Drobot/5C.htm>, consulté le 11 juillet 2017.
- Moramarco, T., Barbeta, S., & Tarpanelli, A. (2017). From Surface Flow Velocity Measurements to Discharge Assessment by the Entropy Theory. *Water*, 9(2), 120.
- Muste, M., Kim, W., & Fulford, J. M. (2008). Techniques hydrométriques: perfectionnement des instruments pour la cartographie hydrodynamique des cours d'eau. *Bulletin de l'Organisation Météorologique Mondiale*, 57(3), 163-169. En ligne https://ane4bf-datap1.s3-eu-west-1.amazonaws.com/wmocms/s3fs-public/article_bulletin/related_docs/57_3_muste_fr.pdf?EZht74CHDMV8VtNrbIOulXPUYkSxDzNo.
- Nakad, S. (2016). *Mesures courantométriques sur modèle réduit par imagerie digitale*. Mémoire de Master en Ingénieur civil des constructions non publié, Université catholique de Louvain, Louvain-La-Neuve.
- National Instruments. (2011). *Spatial filtering*. En ligne http://zone.ni.com/reference/en-XX/help/372916L-01/nivisionconcepts/spatial_filtering/, consulté le 22 juillet 2017.
- Notre-planete.info. (2017). *Statistiques sur les catastrophes naturelles*. En ligne https://www.notre-planete.info/terre/risques_naturels/catastrophes_naturelles.php, consulté le 02 juillet 2017.
- Polatel, C. (2006). *Large-scale roughness effect on free-surface and bulk flow characteristics in open-channels flows*. Thèse de Doctorat, The University of Iowa, Iowa City, IA, USA.
- Raffel, M., Willert, C. E., Wereley, S., & Kompenhans, J. (2013). *Particle image velocimetry: a practical guide*. Springer.
- Rantz, S. E. (1982). Measurement and computation of streamflow: volume 1, Measurement of Stage and Discharge. *US Geological Survey Water Supply Paper*, 2175. En ligne https://pubs.usgs.gov/wsp/wsp2175/pdf/WSP2175_vol1a.pdf.
- Roud, T. (2009). *Mais au fait, comment ça marche une sonde Pitot*. En ligne <http://tomroud.cafe-sciences.org/2009/06/10/mais-au-fait-comment-ca-marche-une-sonde-pitot/>, consulté le 15 juillet 2017.

- Soares Frazão, S. (2015). *Hydraulique fluviale*. Université catholique de Louvain : Louvain-La-Neuve.
- Tauro, F., Pagano, C., Phamduy, P., Grimaldi, S., & Porfiri, M. (2015). Large-scale particle image velocimetry from an unmanned aerial vehicle. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, 20(6), 3269-3275. En ligne https://www.researchgate.net/publication/283006259_Large-Scale_Particle_Image_Velocimetry_From_an_Unmanned_Aerial_Vehicle.
- Tzu-Yin, C. (2016). *Scouring at the interface between fixed and erodible bed*. Institute of Mechanics, Materials and Civil Engineering, Université catholique de Louvain, Louvain-La-Neuve.
- Weitbrecht, V., Kühn, G., & Jirka, G. H. (2002). Large scale PIV-measurements at the surface of shallow water flows. *Flow Measurement and Instrumentation*, 13, 237-245. En ligne https://www.researchgate.net/publication/222668483_Large_scale_PIV-measurements_at_the_surface_of_shallow_water_flows.
- Welber, M., Le Coz, J., Laronne, J. B., Zolezzi, G., Zamler, D., Dramais, G., Hauet, A., & Salvaro, M. (2016). Field assessment of noncontact stream gauging using portable surface velocity radars (SVR). *Water Resources Research*, 52(2), 1108-1126. En ligne <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01501577/>.
- Wikhydro. (2015). *Mesures de débit*. En ligne http://wikhydro.developpement-durable.gouv.fr/index.php/Mesures_de_d%C3%A9bit, consulté le 08 juillet 2017.
- Wikipédia. (2017). *Hydrométrie*. En ligne https://fr.wikipedia.org/wiki/Hydrom%C3%A9trie#Les_diff.C3.A9rentes_m.C3.A9thodes_de_mesure_du_d.C3.A9bit, consulté le 10 juillet 2017.
- Zech, Y. (2008). *Hydraulique appliquée*. Syllabus, Université catholique de Louvain, Diffusion Universitaire CIACO.
- Zhang, J. (2015). *Informatics, Networking and Intelligent Computing: Proceedings of the 2014 International Conference on Informatics, Networking and Intelligent Computing (INIC 2014), 16-17 November 2014, Shenzhen, China*. CRC Press.

10 Annexes

10.1 Mode d'emploi

Cette sous-section présente les différentes étapes, sous forme d'un mode d'emploi, qui permettent de réaliser une mesure LSPIV. Elles doivent bien évidemment être adaptées à la situation étudiée.

1. Repérer une zone d'étude présentant de bonnes conditions d'illumination et absente de structures hydrauliques de surface particulières identifiables à l'œil nu.
2. Positionner la caméra perpendiculairement au plan d'eau et régler ses paramètres d'enregistrement (résolution, nombre d'images par seconde, ...).
3. Mesurer la distance séparant la caméra du plan d'eau afin de la calibrer par après à l'aide d'un damier ou, si l'espace le permet, placer un objet de dimensions connues dans le champ de vision de la caméra afin de permettre une future calibration dans PIVlab.
4. Lancer l'enregistrement d'une vidéo.
5. Répartir les traceurs : ceux-ci doivent couvrir un maximum la zone d'étude et doivent être répartis de manière homogène. Si des traceurs artificiels sont utilisés, il faut avoir préalablement placé un système permettant de retenir ces traceurs.
6. Transférer la vidéo ainsi obtenue sur un ordinateur.
7. Décomposer cette vidéo en une séquence d'images à l'aide de la fonction Matlab « ExtractedFrames » en annexe. VLC permet également de réaliser cette décomposition mais il a été remarqué que certaines images de la vidéo n'étaient pas enregistrées engendrant ainsi des erreurs d'estimation de vitesse de surface par après.

Si la caméra utilisée permet l'utilisation d'un champ de vision linéaire (comme le propose la GoPro Hero 4) il n'y a pas besoin de corriger les effets de distorsion de l'objectif. Dans ce cas, il suffit de passer les images extraites à l'étape 6 en niveaux de gris à l'aide de la fonction Matlab « gray_scale » également en annexe. S'il n'y a pas de possibilité d'utiliser un champ de vision linéaire alors les images obtenues seront distordues. Dans ce cas, il faut utiliser la fonction Matlab « lensdistort » (en annexe) afin de rectifier ces distorsions. Cette fonction prend en argument plusieurs paramètres qui sont décrits en commentaires dans le corps de la fonction. A titre d'exemple, les arguments utilisés pour la GoPro HERO 4 (champ de vision moyen) étaient les suivants :

```
lensdistort(1,0.195,'bordertype','crop','interpolation','cubic','padmethod','replicate','ftype',3)
```

La procédure suivie pour obtenir ces paramètres consiste à photographier un damier de dimensions connues et ensuite, par essais erreurs, mesurer les dimensions en pixel des différents carrés de ce damier à plusieurs endroits (principalement les bords, là où la distorsion est la plus visible) à l'aide de la fonction « imtool » fournie dans la licence étudiante Matlab. Lorsque les distances, en pixel, ainsi mesurées ne diffèrent pas d'un carré du damier à un autre, alors l'image est correctement rectifiée.

La fonction « ortho_loop2 » permet d'effectuer cette rectification et le passage en

niveaux de gris en une seule étape.

8. Démarrer PIVlab via Matlab (attention en cas d'utilisation d'OSX, régler préalablement l'affichage de PIVlab en tapant la ligne de code suivante dans la console : `set(0,'ScreenPixelsPerInch',96)`).
9. Importer les images en niveaux de gris (et rectifiées si nécessaire) et choisissez le séquençage de celles-ci (1-2,2-3,3-4, ... ou 1-2,3-4,5-6, ...).
10. Régler les paramètres d'analyse (se référer à la 4.3 pour plus d'informations sur cette étape).
11. Lancer l'analyse de la série d'images importées.
12. Calibrer les images (cette étape peut être réalisée avant l'analyse au point 11) à l'aide du facteur de conversion obtenu au point 3 ou en introduisant les dimensions de l'objet de dimensions connues positionné lors de l'enregistrement de la vidéo. Attention, les dimensions sont exprimées en [mm] et le pas de temps en [ms]. Pour ce pas de temps, il ne correspond souvent pas exactement à ce qui est annoncé par la caméra. Afin d'obtenir une valeur plus précise, on peut entrer les lignes de code suivantes dans Matlab :

```
a = VideoReader('calib.mp4');  
get(a)
```

13. Valider les vecteurs obtenus (les différentes options de validation sont présentées dans la 4.6)
14. Exporter, tracer, obtenir des statistiques de ces résultats via les différents onglets suivants de PIVlab.

10.2 Codes Matlab

10.2.1 Extraction des images d'une vidéo

```
a = VideoReader('Nom_De_La_Video.mp4');

cnt = 0;
while hasFrame(a)
    cnt = cnt + 1;
    frame = readFrame(a);
    filename = strcat('frame',num2str(cnt),'.jpg');
    imwrite(frame,filename);
    fprintf('Extracting frame %d\n',cnt);
end

return;
```

10.2.2 Passage des images en niveaux de gris

```
tic;
disp('Begin Grayscale...');
for i = 269:288
    str = ['frame' num2str(i) '.jpg'];
    I1=imread(str);
    I = rgb2gray(I1);
    str2 = ['gray_' num2str(i) '.jpg'];
    imwrite(I,str2);
end

disp('Grayscale done');

toc;
```

10.2.3 Rectification des effets de distorsion de l'objectif

```
function I2 = lensdistort(I, k, varargin)
%LENSDISTORT corrects for barrel and pincushion lens aberrations
% I = LENSDISTORT(I, k)corrects for radially symmetric distortions, where
% I is the input image and k is the distortion parameter. lens distortion
% can be one of two types: barrel distortion and pincushion distortion.
% In "barrel distortion", image magnification decreases with
% distance from the optical axis. The apparent effect is that of an image
% which has been mapped around a sphere (or barrel). In "pincushion
% distortion", image magnification increases with the distance from the
% optical axis. The visible effect is that lines that do not go through the
% centre of the image are bowed inwards, towards the centre of the image,
% like a pincushion [1].
%
```

```

% I = LENSDDISTORT(...,PARAM1,VAL1,PARAM2,VAL2,...) creates a new image image,
% specifying parameters and corresponding values that control various aspects
% of the image distortion correction. Parameter names case does not matter.
%
% Parameters include:
%
% 'bordertype'      String that controls the treatment of the image
%                   edges. Valid strings are 'fit' and 'crop'. By
%                   default, 'bordertype' is set to 'crop'.
%
% 'interpolation'   String that specifies the interpolating kernel
%                   that the separable resampler uses. Valid
%                   strings are 'cubic', 'linear' and 'nearest'. By
%                   default, the 'interpolation' is set to 'cubic'
%
% 'padmethod'       string that controls how the resampler
%                   interpolates or assigns values to output elements
%                   that map close to or outside the edge of the input
%                   array. Valid strings are 'bound', 'circular',
%                   'fill', 'replicate', and 'symmetric'. By
%                   default, the 'padmethod' is set to 'fill'
%
% 'ftype'           Integer between 1 and 4 that specifies the
%                   distortion model to be used. The models
%                   available are
%
%                   'ftype' = 1:   $s = r./(1+k.*r);$ 
%
%                   'ftype' = 2:   $s = r./(1+k.*(r.^2));$ 
%
%                   'ftype' = 3:   $s = r.*(1+k.*r);$ 
%
%                   'ftype' = 4:   $s = r.*(1+k.*(r.^2));$ 
%
%                   By default, the 'ftype' is set to 4.
%
% Class Support
% -----
% An input intensity image can be uint8, int8, uint16, int16, uint32,
% int32, single, double, or logical. An input indexed image can be uint8,
% uint16, single, double, or logical.
%
% Examples
% -----
%   % read image
%   I = imread('cameraman.tif');
%
%   % Distort Image
%   I2 = lensddistort(I, 0.1);
%
%   % Display both images
%   imshow(I), figure, imshow(I2)
%

```

```

% References
% -----
% [1] http://en.wikipedia.org/wiki/Distortion\_\(optics\), August 2012.
%
% [2] Harri Ojanen, "Automatic Correction of Lens Distortion by Using
%   Digital Image Processing," July 10, 1999.
%
% [3] G.Vassy and T.Perlaki, "Applying and removing lens distortion in post
%   production," year???
%
% [4] http://www.mathworks.com/products/demos/image/...
%   create_gallery/tform.html#34594, August 2012.
%
% Created by Jaap de Vries, 8/31/2012
% jpdvrs@yahoo.com
%
%-----%

%-----
% This part of the codes creates variable input parameters using the input
% parser object
p = inputParser;
% Make input string case independant
p.CaseSensitive = false;

% Specifies the required inputs
addRequired(p,'f',@isnumeric);
addRequired(p,'k',@isnumeric);

% Sets the default values for the optional parameters
defaultFtype = 4;
defaultBorder = 'crop';
defaultInterpolation = 'cubic';
defaultPadmethod = 'fill';

% Specifies valid strings for the optional parameters
validBorder = {'fit','crop'};
validInterpolation = {'cubic','linear','nearest'};
validPadmethod = {'bound','circular','fill','replicate','symmetric'};

% Funtion handles to determine wheter a proper input string has been used
checkBorder = @(x) any(validatestring(x,validBorder));
checkInterpolation = @(x) any(validatestring(x,validInterpolation));
checkPadmethod = @(x) any(validatestring(x,validPadmethod));

% Create optional inputs
addParamValue(p,'bordertype',defaultBorder,checkBorder);
addParamValue(p,'interpolation',defaultInterpolation,checkInterpolation);
addParamValue(p,'padmethod',defaultPadmethod,checkPadmethod);
addParamValue(p,'ftype',defaultFtype,@isnumeric);

```

```

% Pass all parameters and input to the parse method
parse(p,I,k,varargin{:});

%-----
% This determines whether its a color (M,N,3) or gray scale (M,N,1) image
if ndims(I) == 3
    for i=1:3
        I2(:, :, i) = imdistcorrect(I(:, :, i),k);
    end
elseif ismatrix(I)
    I2 = imdistcorrect(I,k);
else
    error('Unknown image dimensions')
end

%-----
% Nested function that performs the transformation
function I3 = imdistcorrect(I,k)
% Determine the size of the image to be distorted
[M N]=size(I);
center = [round(N/2) round(M/2)];
% Creates N x M (#pixels) x-y points
[xi,yi] = meshgrid(1:N,1:M);
% Converts convert the mesh into a column vector of coordinates relative to
% the center
xt = xi(:) - center(1);
yt = yi(:) - center(2);
% Converts the x-y coordinates to polar coordinates
[theta,r] = cart2pol(xt,yt);
% Calculate the maximum vector (image center to image corner) to be used
% for normalization
R = sqrt(center(1)^2 + center(2)^2);
% Normalize the polar coordinate r to range between 0 and 1
r = r/R;
% Apply the r-based transformation
s = distortfun(r,k,p.Results.ftype);
% un-normalize s
s2 = s * R;
% Find a scaling parameter based on selected border type
brcor = bordercorrect(r,s,k, center, R);

s2 = s2 * brcor;

% Convert back to cartesian coordinates
[ut,vt] = pol2cart(theta,s2);

u = reshape(ut,size(xi)) + center(1);
v = reshape(vt,size(yi)) + center(2);
tmap_B = cat(3,u,v);
resamp = makesampler(p.Results.interpolation, p.Results.padmeth);

```

```

I3 = tformarray(I,[],resamp,[2 1],[1 2],[],tmap_B,255);
end

%-----
% Nested function that creates a scaling parameter based on the
% 'bordertype' selected
function x = bordercorrect(r,s,k,center, R)
    if k < 0
        if strcmp(p.Results.bordertype, 'fit')
            x = r(1)/s(1);
        end
        if strcmp(p.Results.bordertype, 'crop')
            x = 1/(1 + k*(min(center)/R)^2);
        end
    elseif k > 0
        if strcmp(p.Results.bordertype, 'fit')
            x = 1/(1 + k*(min(center)/R)^2);
        end
        if strcmp(p.Results.bordertype, 'crop')
            x = r(1)/s(1);
        end
    end
end

%-----
% Nested function that pics the model type to be used
function s = distortfun(r,k,fnum)
    switch fnum
    case(1)
        s = r.*(1./(1+k.*r));
    case(2)
        s = r.*(1./(1+k.*(r.^2)));
    case(3)
        s = r.*(1+k.*r);
    case(4)
        s = r.*(1+k.*(r.^2));
    end
end

end

```

10.2.4 Rectification et passage en niveaux de gris

```

tic;
disp('Begin Rectification + Passage niveaux de gris...');
for i = 10:15
    str = ['frame' num2str(i) '.jpg'];
    I1=imread(str);
    I = rgb2gray(I1);

```

```
I2 = lensdistort(I,-0.242,'bordertype','crop','interpolation','cubic','padmethod','replicate','ftype',3);  
str2 = ['ortho_' num2str(i) '.jpg'];  
imwrite(I2,str2);  
end  
  
disp('Rectification + Passage niveaux de gris done');  
  
toc;
```

