

École polytechnique de Louvain

Détermination expérimentale du lien entre la vitesse de surface et la vitesse moyenne dans un écoulement à surface libre

Auteur: **Vincent VELDEMAN**
Promoteur: **Sandra SOARES FRAZAO**
Lecteurs: **Didier BOUSMAR, Robin MEURICE**
Année académique 2019–2020
Master [120] : ingénieur civil des constructions

Remerciements

Ce mémoire est l'accomplissement de mon cursus universitaire. Il s'agit d'un travail conséquent qui nécessite beaucoup de soutien et d'aide afin d'être réalisé au mieux.

Mes premiers remerciements sont pour ma promotrice, le Professeur Sandra Soares-Frazão, pour le suivi remarquable qui m'a été offert tout au long de l'année. J'ai eu la chance d'être parfaitement guidé, soutenu et conseillé durant l'entièreté de mon travail. Merci aussi de m'avoir fait découvrir un domaine aussi vaste et passionnant que l'hydraulique fluviale.

Je remercie l'équipe du LEMSC, Antoine et plus particulièrement Samuel pour leur accueil et leur aide dans la mise en place de mes expériences. Le (trop) peu de temps que j'ai passé en laboratoire était vraiment plaisant de par l'ambiance de travail qui y régnait.

Un tout grand merci à ma maman pour les nombreuses heures passées à relire ce travail ainsi qu'à l'entièreté de ma famille pour le soutien offert au quotidien durant toutes mes études.

Je me dois aussi de remercier Till, Oli et Elise ainsi que toute la pépicoque pour ces nombreuses heures de rédaction que j'ai passé en votre compagnie.

Enfin merci à toutes celles et ceux que j'ai pu côtoyer durant mes études et qui m'ont toujours fait aller de l'avant. Je pense ici particulièrement au Support, à l'Organe, aux Eperviers ainsi qu'à la troisième. Toutes ces personnes m'ont fait grandir et prendre des responsabilités qui font de moi ce que je suis aujourd'hui.

Vincent Veldeman

Table des matières

1	Introduction	3
2	État de l'art	5
2.1	Techniques de mesure du débit dans les cours d'eau	5
2.1.1	Principaux outils actuels	5
2.1.2	La LSPIV	9
2.2	Généralités des écoulements à surface libre	11
2.2.1	Écoulements laminaires et écoulements turbulents	11
2.2.2	Écoulements lisses et écoulements rugueux	12
2.3	Profil de vitesse vertical	13
2.3.1	Loi universelle logarithmique de vitesse	14
2.3.2	Phénomène de plongée et loi de sillage	18
2.3.3	Lien entre vitesse moyenne et vitesse de surface	19
2.4	Outils utilisés au laboratoire	21
2.4.1	Grand Canal	21
2.4.2	Sonde Baumer	21
2.4.3	Tube de Pitot	21
2.4.4	Débitmètre	22
2.4.5	Caméra	22
3	Analyse de données	23
3.1	Données de Guillaume Rion - Profil logarithmique	23
3.1.1	Mise en contexte	23

3.1.2	Recherche du profil théorique	25
3.1.3	Calcul de l'erreur	27
3.2	Données de Stephen Louis - Profil logarithmique avec loi de sillage	29
3.2.1	Mise en contexte	29
3.2.2	Modèle logarithmique modifié avec le phénomène de plongée	29
3.2.3	Reproduction du modèle de Guo aux données de Louis	31
3.2.4	Analyse des paramètres du modèle de Guo	31
3.3	Données de Guillaume Rion - Profil logarithmique avec loi de sillage	34
3.3.1	Mise en contexte	34
3.3.2	Recherche du profil théorique	34
3.3.3	Remarques	34
3.4	Données de Paul Asselberghs et Brieuc Peeters - Cours d'eau naturel	36
3.4.1	Mise en contexte	36
3.4.2	Recherche des profils théoriques	36
3.4.3	Analyse des profils théoriques	38
4	Résultats	41
4.1	Méthode	41
4.2	Résultats issus des données en laboratoire	42
4.3	Résultats issus des données en canal	45
4.4	Résultats issus des données en rivière naturelle	46
4.4.1	Index de vitesse	46
4.4.2	LSPIV	47
5	Conclusion et perspectives	49

Symboles

α	Index de vitesse	[-]
A	Aire mouillée	[m ²]
d	Diamètre des grains	[m]
δ	Position absolue du phénomène de plongée	[m]
δ_v	Epaisseur de la sous-couche laminaire	[m]
γ	Poids volumique ($=\rho g$)	[N/m ²]
g	Accélération de la pesanteur	[m ² /s]
h	Profondeur d'eau	[m]
η	Profondeur d'eau relative ($=z/h$)	[-]
K	Coefficient de rugosité de Strickler ($=1/n$)	[m ^{1/3} /s]
κ	Constante de von Karman	[-]
k_s	Rugosité équivalente au sable de Nikuradse	[m]
λ	Paramètre de Guo tenant compte du phénomène de plongée	[-]
L	Longueur	[m]
μ	Viscosité dynamique	[kg/ms]
n	Coefficient de rugosité de Manning ($=1/K$)	[s/m ^{1/3}]
ν	Viscosité cinématique ($=\mu/\rho$)	[m ² /s]
P	Périmètre mouillé	[m]
Π	Paramètre de sillage de Coles	[-]
Q	Débit	[m ³ /s]
ρ	Masse volumique	[kg/m ³]
R	Rayon hydraulique ($=A/P$)	[m]
Re	Nombre de Reynolds	[-]
Re_*	Nombre de Reynolds d'aspérité	[-]
S_0	Pente de fond	[-]
S_f	Pente de la ligne d'énergie	[-]
τ_0	Contrainte de cisaillement le long du lit, force tractrice	[N/m ²]
u	vitesse locale absolue	[m/s]
u_*	Vitesse de cisaillement sur le lit	[m/s]
u_*/κ	Pente expérimentale issue d'un profil vertical de vitesse	[m/s]
V	Volume	[m ³]
x	Coordonnée selon l'axe longitudinal de l'écoulement	[m]
y	Coordonnée selon l'axe transversal de l'écoulement	[m]
z	Coordonnée selon l'axe vertical de l'écoulement	[m]
z_0	Hauteur à laquelle la vitesse locale u s'annule au fond	[m]

Mise en contexte

Le réchauffement climatique est un sujet sérieux dont tout le monde entend parler actuellement. Qui reste indifférent face aux milliers de manifestants qui se mobilisent en Belgique, en Europe et même dans le monde ? Ces personnes qui défilent dans la rue, afin de manifester leur peur quant à l'avenir de la planète est interpellant pour chacun de nous.

Si les causes du réchauffement climatique sont encore incomprises ou du moins discutables au sein de la communauté scientifique, celui-ci est une réalité. En effet, la planète Terre se réchauffe indéniablement au fil des décennies. C'est ce que nous laissent croire ces différents indicateurs [1] :

- L'augmentation de la température de surface sur la Terre
- L'augmentation de la température des océans
- La réduction de la surface des glaces océaniques arctiques
- Le recul des glaciers continentaux
- La diminution des calottes polaires de l'Antarctique et du Groenland
- La hausse du niveau moyen des océans
- Différents indicateurs biologiques

Plus la Terre se réchauffe, plus nous connaissons d'événements climatiques extrêmes tels que les feux de forêt, les ouragans, les typhons, les sécheresses ou encore les inondations. Ainsi, l'Homme cherche de nouveaux moyens pour prédire ces catastrophes afin de pouvoir s'en protéger. Une panoplie de sciences se développe partout dans le monde afin de mieux connaître tous ces phénomènes extrêmes. Parmi elles, nous pouvons citer l'hydraulique, une science qui étudie nos cours d'eau et leur comportement.

Une des caractéristiques principales d'un cours d'eau est son débit. Le débit mesure le volume d'eau passant chaque seconde au travers d'une section. Le débit naturel d'un cours d'eau varie dans l'année. Lors de certaines périodes, le débit sera faible. On parle alors de débit d'étiage. Et à contrario, pour d'autres périodes, le débit sera très important. Dans ce cas-ci, on parle de débit de crue. Ces deux situations peuvent être problématiques si elles sont mal gérées. On peut citer par exemple une incapacité de naviguer, des problèmes pour l'approvisionnement d'eau potable, d'eau pour les agriculteurs ou encore d'inondations.

Bien connaître le débit des cours d'eau est donc primordial. D'autant plus que l'on s'attend à une augmentation des débits extrêmes dans les années futures. De plus, connaître nos cours d'eau nous permet aussi :

- Une gestion optimale des barrages
- De dimensionner de nouveaux ouvrages. Par exemple des barrages ou des centrales hydro-électriques
- De protéger la population efficacement
- De gérer au mieux les ressources en eau

Cependant, connaître le débit exact d'une rivière à un endroit et un temps donnés n'est pas quelque chose de simple. A l'heure actuelle, une multitude de techniques existent. Parmi elles on peut citer le moulinet, les traceurs, les sondes à effet Doppler ou encore le courantomètre. Il existe un point commun entre ces différentes techniques, à savoir qu'elles sont dites "intrusives". On parle de techniques intrusives lorsque pour mesurer le débit de la rivière, l'opérateur ou le matériel doit être immergé dans l'eau. Généralement cela ne pose pas de problème, mais lorsqu'une rivière est en crue ces techniques deviennent inutilisables. En effet, cela devient trop dangereux ou tout simplement impossible techniquement. C'est pourquoi nous avons besoin d'une méthode de mesure dite "non-intrusive".

Une des méthodes non-intrusive actuellement en voie de développement est la "Large Scale Particle Image Velocimetry" abrégée "LSPIV". Cette technique consiste à mesurer la vitesse de l'eau à sa surface à l'aide d'une caméra et de traceurs. Cependant, la vitesse de surface ne correspond pas à la vitesse moyenne d'un cours d'eau. Ainsi, il est primordial de connaître le lien existant entre la vitesse de surface et la vitesse moyenne pour pouvoir mesurer le débit.

Ce travail s'inscrit dans une longue lignée de travaux précédents à l'UCLouvain visant à développer la LSPIV.

Chapitre 1

Introduction

De nos jours la technologie évolue plus rapidement qu'à n'importe quelle autre période de l'histoire de l'humanité. L'avancée technologique fait désormais partie de notre quotidien. Tous les jours de nouvelles choses sont découvertes et nous permettent d'aller de plus en plus loin dans la science. Tous les jours l'ingénierie est poussée un peu plus loin.

Les hydrologues ont à l'heure actuelle des moyens de mesurer le débit nécessitant une présence humaine ou matérielle dans l'eau. Cependant, avec l'avènement de nouvelles technologies, de nouvelles méthodes de mesure dites "non intrusives" sont envisageables. On pense notamment au Lidar nous renseignant sur la bathymétrie d'un cours d'eau, aux sondes à ultrason qui placées sur une conduite peuvent déterminer le débit qui y passe ou encore la "particle tracking velocimetry" (PTV) qui suit des particules afin de déterminer la vitesse locale d'un écoulement. C'est ce sur quoi travaillent certains chercheurs aux quatre coins du monde.

La "particle image velocimetry" (PIV) est une autre méthode non intrusive visant à mesurer la vitesse de surface d'un cours d'eau non pas en suivant le mouvement d'une particule mais en observant des particules se déplaçant au travers d'une section de contrôle. La PIV est une méthode utilisée en laboratoire, là où les conditions de mesures sont optimales. L'objectif de cette méthode est de développer la "large scale particle image velocimetry" (LSPIV) qui est basée sur les même principe mais qui est développée pour effectuer des mesures en milieu naturel.

Les technologies non-intrusives se développent petit à petit afin de pouvoir nous fournir de plus en plus de données de plus en plus vite sur les cours d'eau. Ce qui nous intéresse le plus sont les données de débit de crues et c'est précisément pour obtenir ces données qu'il est nécessaire de continuer de développer des technologie non-intrusives.

L'objectif de ce travail est d'améliorer la précision de la PIV et de la LSPIV en déterminant le lien entre la vitesse de surface et la vitesse moyenne dans un écoulement à surface libre. La PIV et la LSPIV "large scale particle image velocimetry" nous renseignent sur la vitesse de surface des cours d'eau. En connaissant le lien liant vitesse de surface et vitesse moyenne, il est possible de déterminer le débit.

Ce rapport est construit comme suit :

- **Chapitre 2 : État de l'art** : L'objectif de ce chapitre est d'une part de présenter les outils de mesures de débits existant. D'autre part, de réaliser un résumé de ce qui a déjà été effectué comme travail sur les écoulement à surface libre et plus particulièrement sur le lien entre

vitesse de surface et vitesse moyenne.

- **Chapitre 3 : Analyse de données** : Dans ce chapitre, l'objectif est d'établir un modèle continu nous permettant de modéliser les données expérimentales, qui sont elles discrètes. Une fois ce modèle déterminé, il sera appliqué à des mesures en laboratoire, à des mesures en canal et enfin à des mesures en rivière naturelle.
- **Chapitre 4 : Résultats** : Ce chapitre est consacré à la détermination du lien entre vitesse de surface et vitesse moyenne sur base des données modélisées dans le chapitre 3.

Il est important de préciser que ce travail a été réalisé en partie pendant la crise sanitaire liée au Covid-19. De ce fait, l'accès aux différents laboratoires de l'UCLouvain a été interdit. Il ne m'a donc malheureusement pas été possible de réaliser de mesures, bien que tout le matériel ait été installé. C'est pourquoi l'intégralité des données analysées dans ce travail proviennent de sources extérieurs.

Chapitre 2

État de l'art

2.1 Techniques de mesure du débit dans les cours d'eau

Connaître le débit d'un cours d'eau est primordial pour plusieurs raisons déjà explicitées dans la mise en contexte de ce travail. A l'heure actuelle plusieurs outils de mesure existent et ils ont chacun leurs avantages et leurs inconvénients. Cette section a pour but de les recenser.

2.1.1 Principaux outils actuels

Courbe de tarage et échelle limnimétrique

L'équation de Manning régit les écoulements uniformes :

$$S_f = \frac{u^2 n^2}{R^{\frac{4}{3}}} \iff Q = A \cdot u = \frac{A R^{\frac{2}{3}} S_0^{\frac{1}{2}}}{n} \quad (2.1)$$

Dans cette équation, on observe un lien entre le débit Q et la hauteur d'eau h (au travers de $R=A/P$). Ce lien est simple pour un écoulement uniforme, mais dans la nature, un tel écoulement ne se rencontre presque jamais. En effet, dans un canal de pente constante et de section transversale invariable (canal cylindrique ou prismatique), l'écoulement est uniforme si [2] :

- La profondeur (maximale ou moyenne), la section mouillée, la vitesse moyenne restent constantes d'une section à l'autre du canal
- la ligne de charge, la surface libre et le fond du canal sont parallèles

Le but d'une courbe de tarage (figure 2.2) est donc de calibrer une courbe (Q - h) ayant une allure du même type que celle de l'écoulement uniforme correspondant. Cette courbe est calculée sur base de plusieurs points mesurés au préalable. Il est important de noter qu'une courbe de tarage évolue au fil du temps et qu'il faut par conséquent la mettre à jour régulièrement.

Une échelle limnimétrique (figure 2.1) est un outil fixe placé dans le cours d'eau. Il s'agit d'une règle qui nous permet de lire la hauteur d'eau à l'endroit où elle est située. Par conséquent, regar-

der la hauteur d'eau indiquée sur une échelle limnimétrique et la référer sur la courbe de tarage, correspondant à cette échelle permet de connaître le débit d'une rivière.

Cette méthode nous renseigne donc très rapidement mais elle peut cependant être imprécise surtout lorsque l'on observe un niveau d'eau supérieur au plus haut point de la calibration.



FIGURE 2.1 – Échelle limnimétrique (Moselle)¹

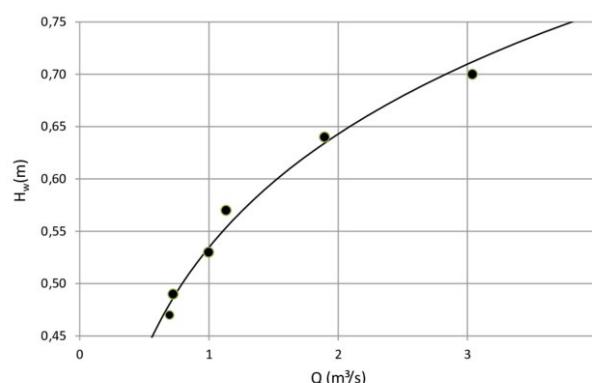


FIGURE 2.2 – Courbe de tarage²

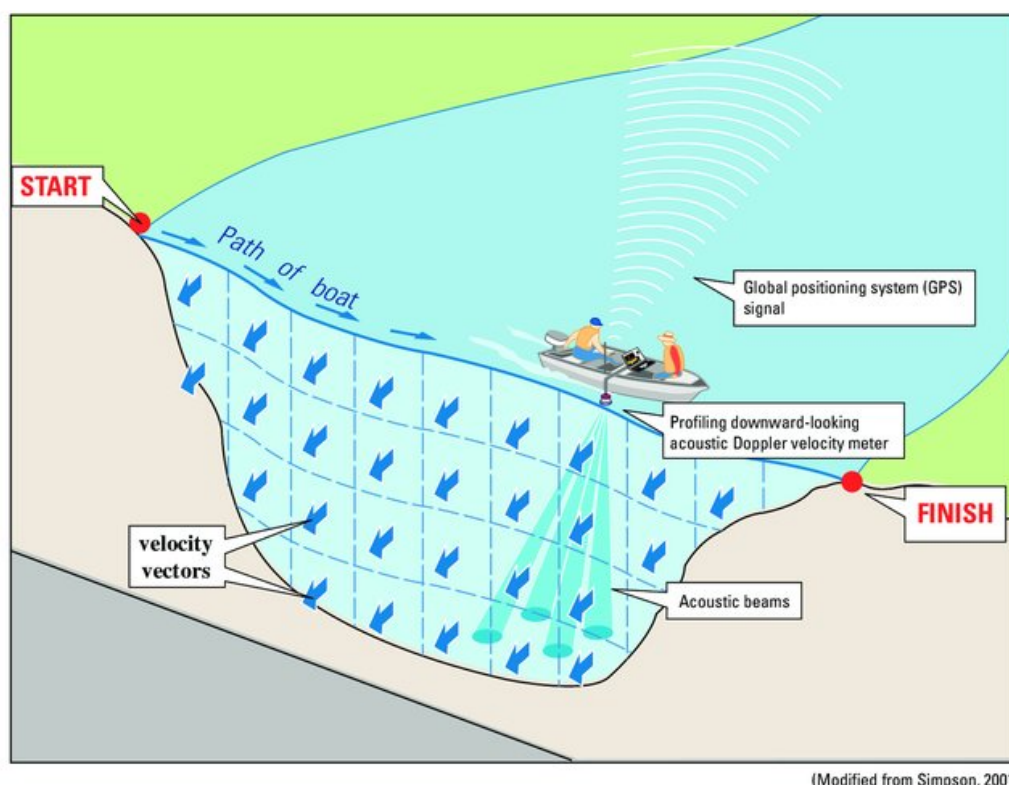
Profileur de courant à effet Doppler - ADCP

L'ADCP (figure 2.3) est un outil qui, comme son nom l'indique, se base sur l'effet Doppler pour mesurer la vitesse de l'eau. Il s'agit d'une sonde émettant des ondes acoustiques depuis la surface de l'eau. Ces ondes sont ensuite réfléchies par les sédiments et les particules très fines en suspension dans l'eau et reviennent vers la sonde. L'ADCP mesure la différence de fréquence entre l'onde émise et l'onde réfléchiée puis calcule localement la vitesse de l'eau grâce à l'effet Doppler. Cet outil nous permet donc de mesurer la vitesse des sédiments et des particules très fines en suspension et non la vitesse de l'eau. Par conséquent, on émet ici l'hypothèse que les sédiments en suspension ont la même vitesse que l'eau.

Pour connaître le débit à l'aide d'un ADCP, il faut donc que la sonde mesure la vitesse sur toute la section d'un cours d'eau. [3]

2. https://fr.wikipedia.org/wiki/Échelle_limnimétrique#/media/Fichier:Muselpegel_11_03_2006.jpg

2. https://www.researchgate.net/publication/316231524_Suivi_des_rivieres_du_bassin_versant_de_la_riviere_Saint-Charles_Campagne_2015/figures Sonia Behmel

FIGURE 2.3 – Schéma fonctionnel d'un ADCP³

Méthode de traçage

La méthode de traçage permet de calculer le débit d'un écoulement sans pour autant en mesurer sa vitesse et sa bathymétrie. Le principe du traçage par injection instantanée consiste à effectuer un bilan de masse.

La première étape est d'injecter un traceur (un traceur chimique ou coloré par exemple) en amont de l'endroit dont on veut mesurer le débit. La seconde étape consiste à mesurer la masse de traceur en aval qui doit être égale à la masse de traceur injectée en amont, et cela en mesurant la concentration $C(t)$ en traceur après dilution dans l'écoulement et propagation dans le tronçon.[4]

Courantomètre à hélice

Le courantomètre à hélice, ou moulinet (figure 2.4), est un appareil permettant de calculer la vitesse de l'eau en un point précis. Il fonctionne sur un principe simple, le moulinet est plongé dans l'eau, l'hélice face au courant. La pression de l'eau va faire que l'hélice va tourner sur elle-même. Au plus la vitesse de l'eau est importante, au plus l'hélice tournera vite. Ainsi, il est possible d'établir un lien entre la vitesse de l'eau et la vitesse de l'hélice.

En prenant des mesures en plusieurs points situés sur une même section, il est possible de déduire la vitesse sur toute cette section et par conséquent de calculer le débit du cours d'eau.

3. https://www.researchgate.net/publication/237792831_Investigation_of_Hydroacoustic_Flow_Monitoring_Alternatives_at_the_Sacramento_River_at_Freeport_California_Results_of_the_2002-2004_Pilot_Study/figures?lo=1

4. <https://www.hellopro.fr/courantometre-a-helice-2002960-5726135-produit.html>

FIGURE 2.4 – Courantomètre à hélice ⁴

Autres méthodes de mesure

Il existe d'autres méthodes de mesure du débit mais celles-ci sont moins utilisées. Parmi ces méthodes on peut citer :

- La méthode volumétrique : La méthode volumétrique est très simple mais ne fonctionne que pour les écoulements à très faible débit. Le but de cette méthode est de dévier le cours d'eau afin de remplir un récipient de volume V connu. Cela prendra un certain temps t . Le débit sera alors simplement obtenu en effectuant le calcul suivant : $Q = V/t$
- La méthode des flotteurs : Le débit est mesuré à l'aide de flotteurs. Pour ce faire, on mesure le temps que différents flotteurs mettent pour parcourir une distance connue. Si on connaît la section, il est possible de mesurer le débit en multipliant la vitesse du flotteur par l'aire de la section moyennant un coefficient de correction. Cette méthode est peu précise mais ne nécessite que peu de matériel et permet de donner une première indication quant au débit. [5]
- La méthode hydraulique : Le débit est mesuré via la mesure de niveau et des dispositifs hydrauliques tels que déversoirs Venturi ou encore par le biais de deux niveaux parallèles. Le calcul s'effectue à partir des géométries connues ainsi que des connaissances hydrauliques spéciales en tenant compte de certaines normes. [6]

Conclusion

Les outils actuels ont, comme présenté, des applications différentes en fonction de leurs qualités et de leurs défauts. Cependant, nous pouvons noter un point commun à toutes ces méthodes. Il s'agit de méthodes où l'opérateur et/ou le matériel doivent être dans l'eau. On dit de ces méthodes qu'elles sont intrusives. Pour des débits modérés, ces méthodes fonctionnent très bien. Cependant, les débits les plus intéressants à observer sont les débits extrêmes. En période sèche, les mesures sont très imprécises mais ce n'est pas grave car il n'y a pas de vrai risque. En période de crue, les méthodes intrusives ne sont plus utilisables. En effet, lorsqu'un cours d'eau est en crue, son débit (et donc la vitesse de l'eau) est beaucoup plus important. De nombreux débris (pierres, branches, arbres) sont donc emportés par le courant et par conséquent, placer du matériel ou un opérateur dans l'eau n'est pas envisageable.

Une méthode non-intrusive serait la bienvenue pour pouvoir mesurer le débit facilement en période de crue.

2.1.2 La LSPIV

La LSPIV, Large Scale Particle Image Velocimetry, est une méthode en cours de développement visant à mesurer le débit d'un cours d'eau à l'aide d'une caméra filmant sa surface. Cette méthode est dérivée de la PIV, Particle Image Velocimetry, qui consiste aussi à mesurer la vitesse de surface d'un écoulement mais cette fois-ci en laboratoire.

La différence entre ces deux méthodes peut sembler faible mais ce n'est pas le cas. En effet, en laboratoire, il est possible de fixer certains paramètres (par exemple le débit, la hauteur d'eau, la rugosité ou encore la bathymétrie) pour bien comprendre l'implication de chacun de ceux-ci dans l'écoulement. Dans un cours d'eau naturel cela s'avère très compliqué voire impossible à réaliser.

Méthode de mesure

Dans ses travaux, G.Rion [7] définit les différentes étapes de la LSPIV comme suit.

La première étape de la LSPIV est de lâcher des traceurs à la surface du cours d'eau en amont de l'endroit où on veut effectuer la mesure. Ces traceurs doivent répondre à plusieurs critères :

- La quantité de traceurs doit être suffisante afin qu'ils se répartissent partout à la surface de l'eau sans pour autant s'agglutiner entre eux car trop nombreux.
- Les traceurs ne peuvent pas être trop lourds afin que leur vitesse de déplacement puisse être considérée comme étant la même que la vitesse de surface de l'eau.
- Les traceurs doivent flotter afin que l'on mesure bien la vitesse de surface de l'écoulement.

La seconde étape est la prise de vidéo. Cette étape consiste à filmer la surface de l'eau et les traceurs qui y sont. Durant cette étape, il y a deux paramètres à respecter.

- La résolution doit être suffisante afin que l'on puisse voir les traceurs sur l'image.
- Le temps entre chaque image doit être suffisamment lent pour que les mouvements des traceurs soient visibles mais il ne peut pas être trop long sinon les mouvements des traceurs ne sont plus identifiables.

La troisième étape de la LSPIV est le traitement de l'image. Durant cette étape, chaque image est traitée afin de faire ressortir les traceurs et les vaguelettes de la surface de l'eau. Cette étape est importante car c'est à partir de ces images que l'on va pouvoir mesurer le déplacement de chaque traceur entre deux images. Il faut donc que les filtres soient le plus efficaces possible.

La quatrième étape consiste en la modification de l'image pour l'ajuster d'un point de vue géométrique. En effet, il existe deux phénomènes qui expliquent que l'échelle n'est pas égale partout sur l'image :

- La distorsion due à la position de la caméra
- La distorsion due à l'effet fish-eye de la caméra

La cinquième étape (figure 2.5) consiste à utiliser un algorithme statistique qui va identifier le déplacement des traceurs et par conséquent définir leur vitesse.

Enfin, la sixième et dernière étape (figure 2.6) consiste à analyser les résultats et à supprimer les vecteurs de vitesse incohérents. La LSPIV nous permet alors d'obtenir un champ de vitesse sur toute la surface de l'image.

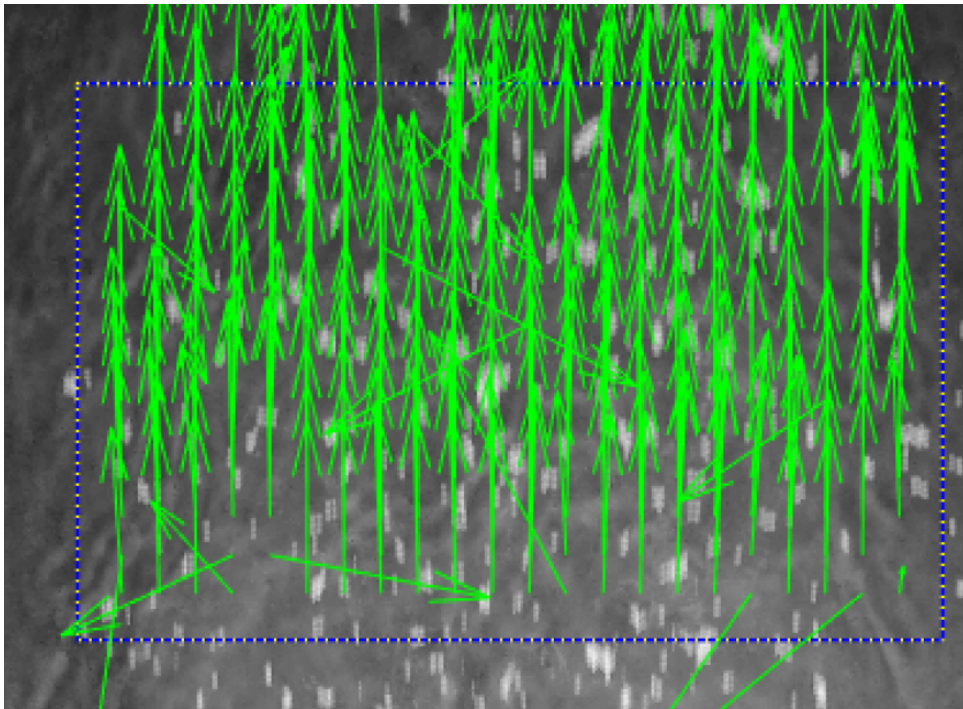


FIGURE 2.5 – Champ de vitesse calculé par méthode LSPIV après l'étape 5 [7]

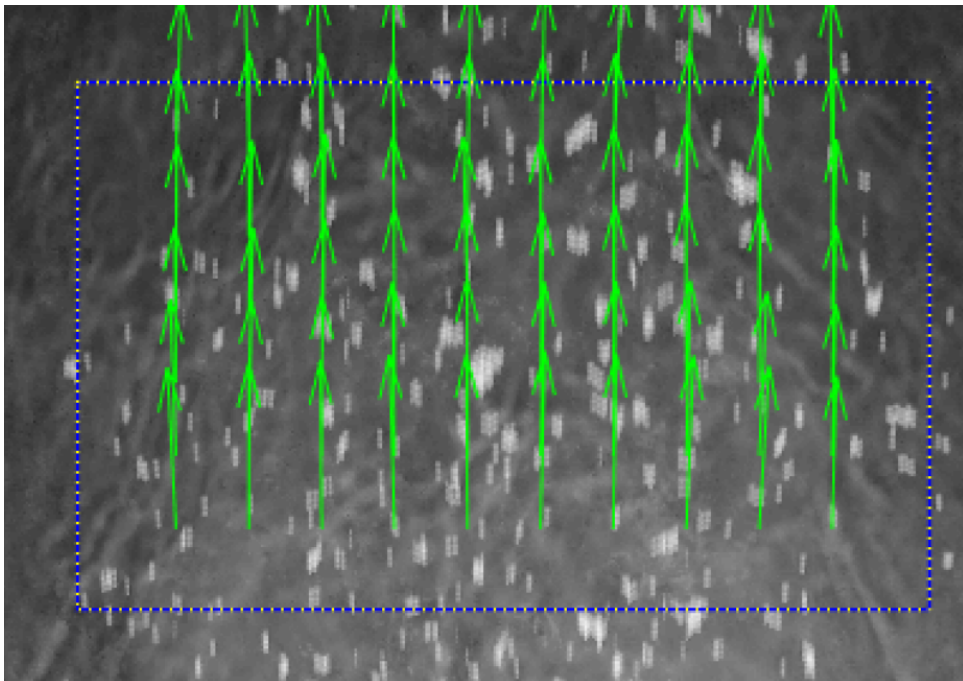


FIGURE 2.6 – Champ de vitesse final calculé par méthode LSPIV [7]

2.2 Généralités des écoulements à surface libre

Un écoulement à surface libre est un écoulement pour lequel la surface se trouve à l'air libre en opposition à l'écoulement en conduite (ou écoulement en charge). Les rivières, fleuves ou encore les canaux sont des écoulements à surface libre.



FIGURE 2.7 – Écoulement en conduite (à gauche)⁵ vs un écoulement à surface libre (à droite)⁶

2.2.1 Écoulements laminaires et écoulements turbulents

Un écoulement est défini comme étant turbulent si :

$$\text{Re} \triangleq \frac{V \cdot L}{\nu} > 2000 \quad (2.2)$$

où :

- V = vitesse de l'écoulement [m/s]
- L = Longueur spécifique [m]
- ν = viscosité cinématique [m²/s]

Si ce n'est pas le cas, l'écoulement est défini comme étant laminaire.

Dans un écoulement laminaire permanent, toutes les vitesses sont constantes dans le temps, tandis que dans un écoulement turbulent, même permanent, les vitesses fluctuent dans le temps, et on définit :

$$u = u_{\text{moy}} + u' \quad (2.3)$$

où :

- u_{moy} : la vitesse moyenne sur un temps T [m/s]
- u' : La fluctuation de vitesse [m/s]

6. Pixabay

6. http://www4.ac-nancy-metz.fr/physique/ancien_site/Tp-phys/Term/Reynolds/Reynolds3.htm

Dans le cas d'un écoulement naturel pour une rivière ou un fleuve, l'écoulement est la plupart du temps turbulent. Par exemple pour un petit cours d'eau de 0,5 [m] de haut ayant une vitesse de 0,5 [m/s] le nombre de Reynolds est bien au dessus de 2000 :

$$\text{Re} = \frac{V \cdot L}{\nu} = \frac{0,5 \cdot 0,5}{10^{-6}} = 250000 \gg 2000 \quad (2.4)$$

Ce sera aussi le cas pour les mesures utilisées dans le cadre de ce travail où celles-ci seront systématiquement issues d'écoulements turbulents

2.2.2 Écoulements lisses et écoulements rugueux

Les écoulements turbulents peuvent être définis comme étant lisses ou rugueux. Cela dépend de la rugosité de la paroi. Raudkivi[8] distingue même trois types d'écoulements en fonction du nombre de Reynolds d'aspérité Re_* :

$$\text{Re}_* \triangleq \frac{k_s u_*}{\nu} \quad (2.5)$$

où :

- k_s = rugosité équivalente au sable de Nikuradse [m]
- u_* = vitesse de cisaillement [m/s]
- ν = viscosité cinématique [m²/s]

Si :

1. $\text{Re}_* < 4$: L'écoulement est à paroi lisse. Cela correspond à la partie décroissante sur la courbe de Shields (figure 2.8)
2. $4 < \text{Re}_* < 70$: L'écoulement est intermédiaire
3. $\text{Re}_* > 70$: L'écoulement est à paroi rugueuse. Cela correspond à la partie constante sur la courbe de Shields (figure 2.8)

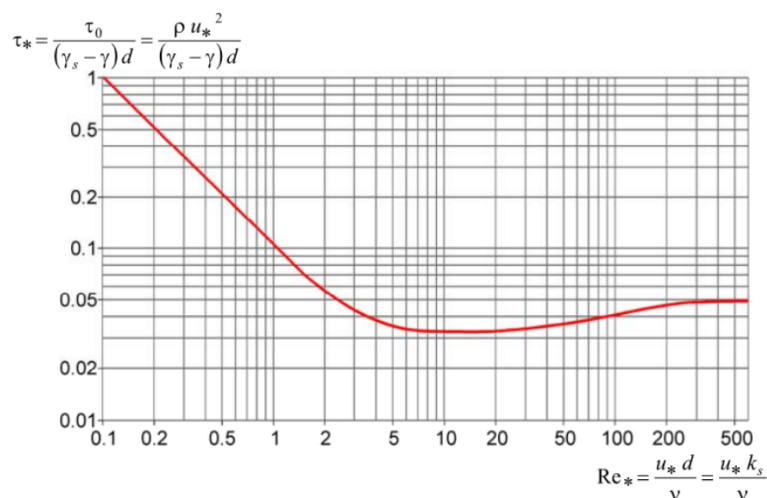


FIGURE 2.8 – Courbe de Shields [9] : La zone sous cette courbe désigne la zone où les sédiments de la rivière ne bougent pas. Le dessus de la courbe est la zone où les sédiments sont transportés et donc en mouvement.

2.3 Profil de vitesse vertical

Etant donné que les écoulements en rivière sont des écoulements turbulents, on peut calculer leur profil de vitesse vertical à partir des équations de Navier-Stokes-Boussinesq [10]. Ces équations mettent en évidence le terme des contraintes turbulentes qui dans le cas présent est très important. On les obtient à l'aide des équations de Navier-Stokes en y ajoutant les hypothèses que l'écoulement est :

- incompressible
- à surface libre

Physiquement, ces équations correspondent au bilan de masse (équation 2.6) et au bilan de quantité de mouvement (équation 2.7). Elles régissent le modèle de l'écoulement turbulent.

$$\nabla \cdot (\vec{u}) = 0 \quad (2.6)$$

$$\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} = X - \left(\bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} \right) + \nu \left(\frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2} \right) - \left(\frac{\partial \overline{u'u'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial z} \right) \quad (2.7)$$

où :

- $\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} = X - \left(\bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{v} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \bar{w} \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} + \frac{\partial \bar{u}}{\partial t} \right)$ = Modèle du liquide parfait
- $\nu \left(\frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial z^2} \right)$ = Modèle du liquide visqueux
- $\left(\frac{\partial \overline{u'u'}}{\partial x} + \frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial y} + \frac{\partial \overline{u'w'}}{\partial z} \right)$ = Modèle du liquide turbulent

2.3.1 Loi universelle logarithmique de vitesse

Dans le cadre de ce travail, nous avons besoin de connaître le profil vertical théorique de vitesse d'un écoulement à surface libre pour pouvoir le faire correspondre à des mesures expérimentales. Dès que le profil théorique colle aux mesures, il est possible de déterminer certains paramètres de l'écoulement. Le développement suivant a été réalisé par Zech [9] dans le cadre du cours d'hydraulique fluviale.

La première étape pour trouver le profil de vitesse logarithmique est de trouver une relation qui nous permette de calculer la contrainte de cisaillement τ . Pour faire cela, on définit tout d'abord τ sur base des équations simplifiées des contraintes visqueuses et turbulentes de Navier-Stokes [11] :

$$\frac{\tau}{\rho} = -\overline{u'w'} + v \frac{\partial u}{\partial z} = u_*^2 \left(1 - \frac{z}{h}\right) \quad (2.8)$$

Pour des écoulements à haut nombre de Reynolds (ce qui est le cas des rivières), les contraintes turbulentes sont bien plus grandes que les contraintes visqueuses :

$$-\overline{u'w'} \gg v \frac{\partial u}{\partial z} \quad (2.9)$$

Les contraintes visqueuses sont donc négligeables et donc l'équation (2.8) peut s'écrire

$$\frac{\tau}{\rho} = -\overline{u'w'} = u_*^2 \left(1 - \frac{z}{h}\right) \quad (2.10)$$

$$\frac{\tau}{\rho u_*^2} = \left(1 - \frac{z}{h}\right) = \frac{1}{u_*^2} \cdot \overline{u'w'} \quad (2.11)$$

La représentation graphique (figure 2.9) de $\frac{z}{h}$ en fonction de $\overline{u'w'}$ permet d'obtenir une valeur pour $-\frac{1}{u_*^2}$. Ainsi, proche du fond, on obtient que :

$$\tau = \tau_0 = -\rho \overline{u'w'} = \rho u_*^2 \quad (2.12)$$

La deuxième étape est d'utiliser le formalisme de Prandtl [13] qui lie les contraintes turbulentes $-\overline{u'w'}$ au gradient vertical de vitesse $\frac{\partial u}{\partial z}$:

$$-\overline{u'w'} = l^2 \left(\frac{\partial u}{\partial z}\right)^2 \quad (2.13)$$

où l est la longueur de mélange qui selon l'hypothèse de Prandtl [13] est proportionnelle à la distance au fond z :

$$l = \kappa z \quad (2.14)$$

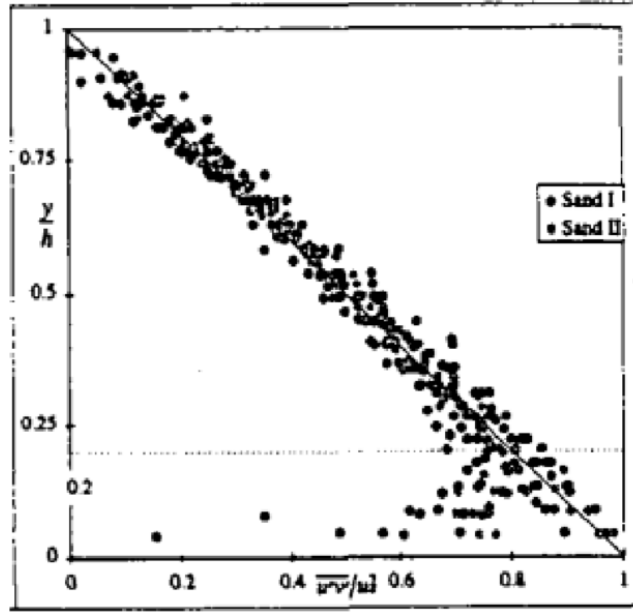


FIGURE 2.9 – Exemple de contraintes de Reynolds extrapolées jusqu'au lit [12]

En injectant l'équation (2.14) dans (2.13) puis dans (2.12), on obtient que :

$$\frac{\tau_0}{\rho} = -\overline{u'w'} = -\kappa^2 z^2 \left(\frac{\partial u}{\partial z} \right) = u_*^2 \quad (2.15)$$

En découle la loi de Prandtl [13] pour le gradient de vitesse :

$$\frac{\partial u}{\partial z} = \frac{u_*}{\kappa z} = \frac{1}{\kappa} \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} \frac{1}{z} \quad (2.16)$$

On peut intégrer cette relation en définissant z_0 tel que $u(z_0) = 0$:

$$\int_{z_0}^z \frac{\partial u}{\partial z} dz = \frac{u_*}{\kappa} \int_{z_0}^z \frac{1}{z} dz \quad (2.17)$$

On obtient ainsi la loi universelle logarithmique de vitesse :

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \frac{z}{z_0} \quad (2.18)$$

où :

- u = la vitesse absolue à la profondeur z [m/s]
- u_* = la vitesse de cisaillement [m/s]
- κ = Constante de von Karman [-]
- z_0 = la hauteur à laquelle u s'annule par rapport au fond [m]

On constate cependant qu'il reste un problème. En effet, pour $z < z_0$, on a une vitesse négative, ce qui n'est pas possible. De plus en $z=0$, le profil est non défini. Ici il faut séparer les cas hydrauliquement lisses et hydrauliquement rugueux (voir section 2.2.2).

Dans le cas hydrauliquement lisse (figure 2.10), on a la présence d'une sous-couche laminaire où les contraintes visqueuses sont beaucoup plus importantes que les contraintes turbulentes. A partir de l'équation (2.8), on peut donc écrire que :

$$\tau = \tau_{xy} = \rho \nu \frac{\partial u}{\partial z} \quad (2.19)$$

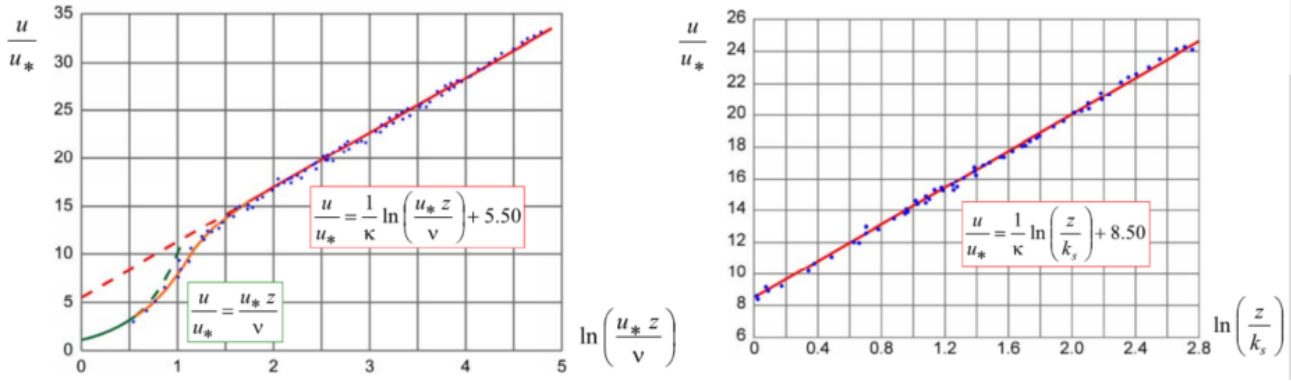


FIGURE 2.10 – A gauche, on observe un régime turbulent lisse avec une sous couche laminaire proche du bord. A droite, on observe un écoulement turbulent rugueux [10]

Etant donné qu'en écoulement laminaire, la contrainte de cisaillement est constante, $\frac{\partial u}{\partial z}$ est aussi constant et en intégrant on peut écrire que :

$$\frac{u}{u_*} = \frac{u_* z}{\nu} = z^+ \quad (2.20)$$

Cette dernière équation exprime donc une distribution linéaire de vitesse proche de la paroi (quand $z < \delta_v$) et ce pour un écoulement turbulent lisse.

Graphiquement, il est possible de calculer l'épaisseur de cette sous-couche laminaire, δ_v . Selon Zech on a [9] :

$$\delta_v = \frac{11,6\nu}{u_*} \quad (2.21)$$

En injectant ce résultat dans l'équation (2.5) on obtient au final :

$$\text{Re}_* = 11,6 \frac{k_s}{\delta_v} \quad (2.22)$$

Expérimentalement, Nikuradse a déterminé que la distribution de vitesse pour un écoulement turbulent lisse correspondait à :

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{u_* z}{\nu} \right) + 5,5 \quad (2.23)$$

Dans le cas hydrauliquement rugueux (figure 2.10), les aspérités de la paroi ne laissent pas la possibilité à la couche laminaire de se développer (puisque les aspérités sont plus grandes que la

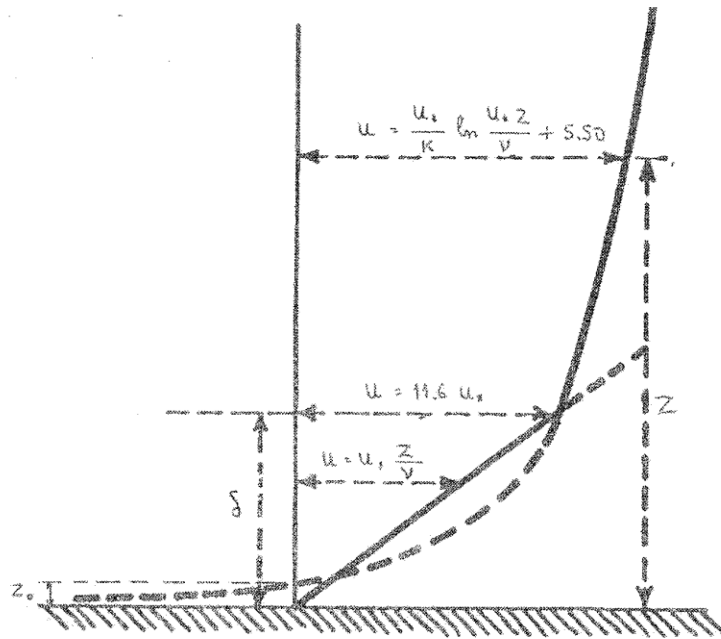


FIGURE 2.11 – Profil théorique de vitesse pour un écoulement turbulent lisse [9]

couche laminaire). Par conséquent on considère que la hauteur z_0 est directement liée à la dimension des aspérités du fond et donc au paramètre k_s .

Expérimentalement, Nikuradse a déterminé que :

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{30z}{k_s} \right) = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{z}{k_s} \right) + 8,5 \quad (2.24)$$

Ce qui donne pour un écoulement turbulent rugueux :

$$z_0 = \frac{k_s}{30} \quad (2.25)$$

2.3.2 Phénomène de plongée et loi de sillage

Le profil logarithmique n'est pas valable partout dans l'écoulement. En effet, sur les bords, le gradient de pression varie dû au fait que $\tau_{xy} \neq \tau_0$ [14]. Ce phénomène provoque une diminution de la vitesse lorsque l'on s'approche de la surface de l'écoulement (figure 2.12). Il est donc nécessaire d'ajuster la loi de vitesse logarithmique afin d'obtenir une loi valable aussi sur les bords. On appelle cela le phénomène de plongée (ou "dip phenomenon" en Anglais).

Pour modéliser le phénomène de plongée, Coles [15] propose d'ajouter un terme à la loi logarithmique que l'on appelle la fonction de sillage, notée $w\left(\frac{z}{h}\right)$, :

$$\frac{u}{u_*} = f\left(\frac{yu_*}{\nu}\right) + w\left(\frac{z}{h}\right) \quad (2.26)$$

avec :

$$w\left(\frac{z}{h}\right) = \frac{2\Pi}{\kappa} \sin^2\left(\frac{\pi z}{2h}\right) \quad (2.27)$$

où :

- Π est le paramètre de sillage de Coles et dépend du gradient de pression. Pour un écoulement à l'équilibre, ce paramètre est constant
- $w\left(\frac{y}{\delta}\right)$ est la fonction de sillage de Coles

On appelle ce type de modèle "Dip-modified-log-wake-law" (DMLWL) puisqu'il s'agit d'une modification de la loi logarithmique pour y incorporer le phénomène de plongée. Cependant, la fonction de sillage de Coles a certaines limites et d'autres scientifiques ont tenté de mieux modéliser ce phénomène dont Guo [16] (voir section 3.2.2).

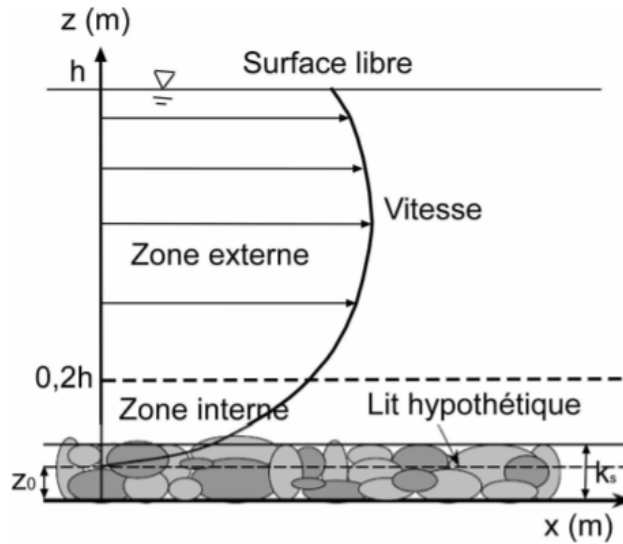


FIGURE 2.12 – Profil de vitesse vertical d'un écoulement turbulent⁷

7. H. Bonakardi et al, profil de vitesses dans les couches limites turbulentes

2.3.3 Lien entre vitesse moyenne et vitesse de surface

La LSPIV est une technologie permettant de mesurer la vitesse de surface d'un écoulement à surface libre. Cependant, la vitesse de surface est, pour les hydrologues, peu intéressante car elle ne permet pas d'étudier les crues. En effet, le paramètre principal de l'écoulement d'une rivière est son débit, Q , que l'on peut exprimer comme étant :

$$Q = \frac{V_{moyenne}}{A} \quad (2.28)$$

Dans un écoulement, la vitesse de surface n'est pas la même que la vitesse moyenne. Par conséquent, la LSPIV ne nous permet pas de calculer le débit d'une rivière. Cependant, certains travaux ont été réalisés afin de connaître le lien entre la vitesse moyenne et la vitesse de surface. Ceci afin de pouvoir déterminer le débit d'un écoulement (et donc d'un cours d'eau) à l'aide de méthode telle que la LSPIV.

L'index de vitesse, α , est défini comme étant [17] :

$$\alpha = \frac{\text{vitesse moyenne issue du débitmètre}}{\text{vitesse moyenne de surface}} \quad (2.29)$$

L'index de vitesse est donc un coefficient à appliquer partout sur la surface. Il est le même proche des bords et au centre de l'écoulement.

Hauet [17] estime que la valeur de ce coefficient est de 0,85 - 0,86 dans un canal naturel. Rion [7] a trouvé les mêmes valeurs dans ses travaux. Cependant, dans un canal artificiel de faible rugosité du type de celui utilisé dans le cadre de ce travail (section 2.4.1), Rion a trouvé que la valeur de ce coefficient α est plutôt de 0,9 (figure 2.13).

N°s 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

FIGURE 2.13 – Tableau reprenant les résultats des mesures expérimentales de Rion

Il n'est cependant pas facile de définir une valeur unique pour l'index de vitesse. En effet, selon Rantz et al[18], celui-ci est affecté par les effets de bords et les courants secondaires qui s'y créent. Ainsi, proche des bords, la valeur d' α augmente très fortement. Cela s'explique car la vitesse de surface d'un écoulement proche du bord est inférieure à la vitesse de surface en son milieu. La figure (2.14) nous montre bien l'augmentation de l'index de vitesse lorsque l'on se rapproche des bords de l'écoulement.

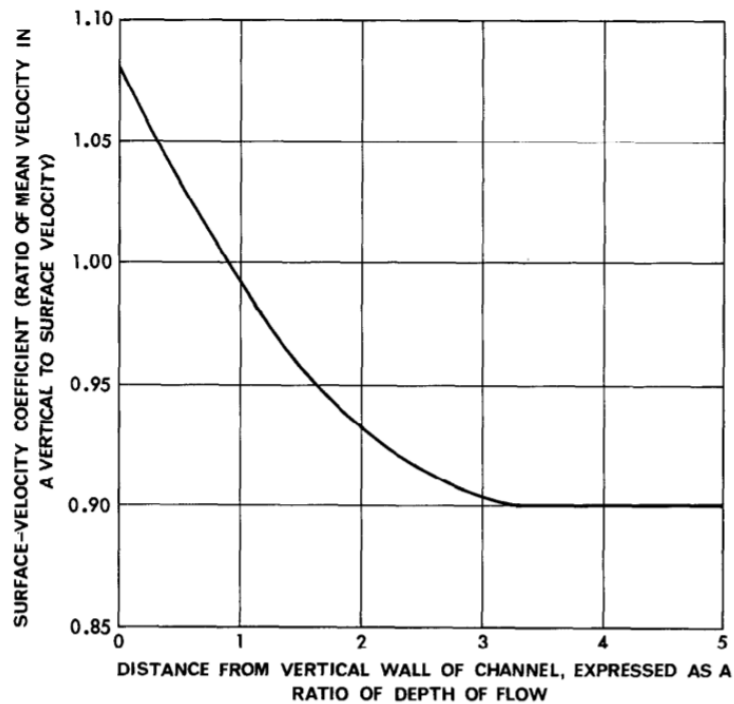


FIGURE 2.14 – Influence du bord sur la valeur de l'index de vitesse ([18] page 137)

2.4 Outils utilisés au laboratoire

2.4.1 Grand Canal

Dans le cadre de ce travail, des mesures auraient dû être réalisées dans le canal (figure 2.15) situé au LEMSC (Laboratoire d'essais mécaniques, structure et génie civil) à Louvain-la-Neuve. Ce canal mesure environ 40m de longueur et de 1,023m de largeur. Il fonctionne grâce à une pompe située à l'aval du canal et qui remonte l'eau en amont au travers de tuyaux. Il est important de noter que le canal possède un débitmètre électromagnétique nous permettant de connaître le débit s'écoulant dans le canal au cours du temps. Les parois de ce canal sont en acier tandis que le fond est lui en béton.

Les mesures effectuées par Rion, analysées dans la suite de ce rapport, ont été effectuées dans ce canal.



FIGURE 2.15 – Grand canal du LEMSC

2.4.2 Sonde Baumer

La sonde Baumer est une sonde permettant de mesurer la distance entre deux points à l'aide d'ultrasons. Dans le cas présent, cette sonde est utilisée pour connaître la hauteur d'eau dans le canal. Pour ce faire, la sonde est placée au dessus du canal lorsque le canal est vide de telle sorte qu'elle puisse mesurer la distance la séparant du fond du canal. Par la suite, lorsque l'eau monte dans le canal la sonde nous donnera la distance la séparant de la surface. On peut ainsi déduire la hauteur d'eau présente sous notre sonde :

$$h_{\text{eau}} = \text{distance}_{\text{sonde-fond du canal}} - \text{distance}_{\text{sonde-eau}} \quad (2.30)$$

2.4.3 Tube de Pitot

Le tube de Pitot (figure 2.16) est un outil servant à mesurer la pression au sein du fluide dans lequel il est immergé. Celui-ci est composé de deux tubes concentriques en forme de coude. Le tube

intérieur est simplement ouvert en son bout de telle sorte que l'ouverture soit parallèle à l'écoulement. Tandis que le tube extérieur possède une ouverture latérale. Celle-ci sera donc perpendiculaire à l'écoulement.

Le tube intérieur nous permet de mesurer la pression totale, $p_t = p_{statique} + p_{dynamique}$ alors que le tube extérieur nous permet de mesurer la pression statique.

Via l'équation de Bernoulli, pour un fluide incompressible, il est possible de calculer la vitesse de l'écoulement [19] :

$$\frac{1}{2}\rho v^2 + p_s = 0 + p_t \quad (2.31)$$

$$v = \sqrt{\frac{2(p_t - p_s)}{\rho}} \quad (2.32)$$

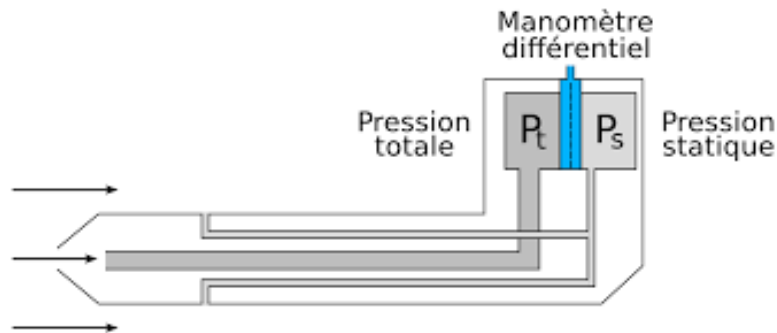


FIGURE 2.16 – Schéma fonctionnel d'un tube de Pitot[20]

2.4.4 Débitmètre

Le grand canal du LEMSC possède un débitmètre (figure 2.15). Ce débitmètre est placé dans le tuyau qui remonte l'eau de la fosse aval à la fosse amont et il mesure donc le débit d'eau passant par ce tuyau. Par conséquent, il est important de noter que le débit dans le canal n'est pas obligatoirement le même que le débit dans le tuyau à chaque instant.

Pour que le débit dans le tuyau soit le même que le débit passant dans le canal, il faut impérativement que l'écoulement soit établi. On ne peut donc pas prendre de mesure juste après avoir enclenché la pompe du canal.

2.4.5 Caméra

La caméra est utilisée comme outil de mesure de la vitesse de surface grâce à la méthode PIV (voir section 2.1.2).

Chapitre 3

Analyse de données

Ce travail étant en partie réalisé durant la crise sanitaire mondiale due au Covid-19, il ne m'a pas été possible de prendre de mesures en laboratoire. C'est pourquoi les données utilisées ici proviennent toutes de différentes sources.

Dans ce chapitre, j'analyserai des données de profils de vitesse verticaux dans le but d'y faire correspondre une courbe théorique. A partir de cette courbe théorique, il sera ensuite possible d'évaluer le coefficient liant la vitesse de surface et la vitesse moyenne de l'écoulement. Pour ce faire, je procéderai en quatre étapes :

1. L'analyse des données de Guillaume Rion où le sillage n'est pas présent. Cette partie me permettra de calibrer les différents paramètres théoriques de la loi logarithmique.
2. L'analyse des données de Stephen Louis où le sillage est présent. Cette partie me permettra de d'établir les paramètres de la loi de sillage.
3. L'analyse des données de Guillaume Rion où le sillage est présent. Cette partie me permettra d'établir les paramètres de la loi de sillage dans le canal du LEMSC.
4. L'analyse des données de Paul Asselberghs et de Brieuc Peeters en cours d'eau naturel.

3.1 Données de Guillaume Rion - Profil logarithmique

3.1.1 Mise en contexte

Dans ses travaux, Guillaume Rion [7] a effectué des mesures de profils de vitesse verticaux. Ces mesures ont été réalisées au LEMSC (laboratoire d'essais mécanique, structure et génie civil situé à Louvain-la-Neuve) sur le grand canal (voir section 2.4.1). Le matériel qu'il a utilisé est le même que le matériel décrit dans la section (2.4) à savoir un tube de Pitot, une caméra, le débitmètre du canal ainsi que des sondes Baumer.

Dans ce sous-point, l'analyse des données est concentrée sur des verticales suffisamment loin des bords tels que la loi de sillage ne s'applique pas. Par conséquent, le modèle logarithmique universel suffit à décrire ces données.

Premièrement, il faut savoir quelle loi appliquer et donc savoir si l'écoulement est turbulent ou laminaire. Pour rappel, un écoulement est défini comme étant laminaire si le nombre de Reynolds

qui lui est associé est inférieur à 2000 [21]. Le cas échéant, il est défini comme étant turbulent.

$$\text{Re} = \frac{v \cdot L}{\nu} = \frac{0,3 \cdot 1}{10^{-6}} = 3 \cdot 10^5 > 2000 \quad (3.1)$$

Deuxièmement, il nous faut savoir si l'écoulement est lisse ou rugueux. Pour cela, on calcule le nombre de Reynolds d'aspérité (voir section 2.2.2). Si ce nombre est plus grand que 70, alors l'écoulement est défini comme étant rugueux.

Rappelons que pour un écoulement turbulent rugueux (voir 2.24), le profil théorique est :

$$u = u_* \left(\frac{1}{\kappa} \cdot \ln \left(\frac{z}{k_s} \right) + 8,5 \right) \quad (3.2)$$

Afin de faire coller notre courbe à nos données empiriques, nous pouvons donc jouer sur trois paramètres :

1. κ , la constante de von Kármán : Il s'agit d'une constante dont la valeur est estimée entre 0,35 et 0,42 [22]. La valeur de cette constante est en effet encore fortement sujette à débat au sein de la communauté scientifique.
2. k_s , la rugosité équivalente aux sables de Nikuradse qui correspond à un diamètre équivalent de grains [m]
3. n , le coefficient de Manning (= inverse du coefficient de Strickler). Étant donné que le canal possède un sol en béton et des parois en acier galvanisé, on peut estimer sa valeur aux alentours de $0,014 [s/m^{1/3}]$ ¹

Il est important de noter que le coefficient "8,5" de l'équation (3.2) est issu des hypothèses d'un écoulement turbulent ET rugueux. En effet, ce coefficient provient de la simplification de l'équation (2.25) :

$$z_0 = \frac{k_s}{30} \iff \ln \left(\frac{1}{z_0} \right) = \ln \left(\frac{30}{k_s} \right) = \ln \left(\frac{1}{k_s} \right) + 8,5 \quad (3.3)$$

Si l'écoulement n'est pas totalement turbulent et rugueux, ce coefficient peut diminuer. Il est donc possible que ce coefficient varie lui aussi.

On peut comprendre pourquoi ce coefficient varie en utilisant l'équation du profil unifié de vitesse [9]. Comme son nom l'indique, cette équation a pour but d'unifier les profils de vitesse turbulent lisse et turbulent rugueux :

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{z}{k_s} \right) + 8,5 + \left(\frac{1}{\kappa} \ln(\text{Re}_*) - 3 \right) e^{-0,217(\ln(\text{Re}_*))^2} \quad (3.4)$$

Dans cette équation :

- Lorsque $\text{Re}_* \simeq 0$ on retombe bien sur l'équation 2.23 et donc le coefficient "8,5" diminue pour valoir 5,5
- Lorsque $\text{Re}_* \gg 70$ on retombe sur l'équation 2.24 et le coefficient "8,5" reste tel quel.

1. https://sites.uclouvain.be/didacticiel-hydraulique/Lecons/Lecon_II_1/Tableau_n.htm

3.1.2 Recherche du profil théorique

Les mesures de Rion [7] se présentent sous forme de tableau. Ces mesures ont été prises à l'aide d'un tube de Pitot (et sont donc des mesures de pression en [mBar]) sur plusieurs verticales d'une même section du canal. Pour chacune de ces verticales, les mesures sont prises tous les centimètres en partant du fond. Des mesures de débit (via le débitmètre intégré du canal) et de hauteur d'eau (via une sonde Baumer) sont également disponibles.

Afin de traiter ces données, la première étape est de transformer les données de pression [mBar] mesurées par le tube de Pitot en vitesse [m/s]. Pour ce faire, on utilise successivement que $1 \text{ [Bar]} = 100\,000 \text{ [Pa]}$ puis l'équation (2.32).

Une fois que nous avons des données exprimées en [m/s], la deuxième étape consiste à les représenter via deux graphiques :

- un premier graphique (u, z)
- un second graphique semi-logarithmique $\left(\ln\left(\frac{z}{k_s}\right), \frac{u}{u_*}\right)$

La troisième étape est de coller notre courbe théorique basée sur l'équation (3.2) à l'aide de ces deux graphiques.

Pour réaliser cette courbe théorique, il nous faut connaître plusieurs relations. En effet, dans l'équation (3.2) on voit apparaître la vitesse de cisaillement sur le lit, u_* , que l'on ne connaît pas.

A partir de l'équation (2.12), on peut écrire :

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho}} \quad (3.5)$$

Or par définition, la force tractrice est le produit du poids spécifique γ de l'eau par le rayon hydraulique R et par la pente hydraulique S_f [9] :

$$\tau_0 = \gamma R S_f \quad (3.6)$$

Dans cette dernière équation on connaît le rayon hydraulique R :

$$R = \frac{A}{P} \quad (3.7)$$

où :

- A = Aire mouillée [m^2]
- P = Périmètre mouillé [m]

Pour connaître la pente hydraulique S_f , il nous faut utiliser l'équation de Manning [9] :

$$S_f = \frac{u^2 n^2}{R^{\frac{4}{3}}} \quad (3.8)$$

Dans cette équation, on voit apparaître la vitesse u qui correspond à la vitesse moyenne sur la section. On peut donc écrire que :

$$u = \overline{u_{obs}} \quad (3.9)$$

On peut désormais utiliser ces différentes relations pour calculer u_* :

$$u_* = \sqrt{\frac{\gamma R S_f}{\rho}} = \sqrt{g \cdot R \cdot \frac{\overline{u_{obs}}^2 n^2}{R^{\frac{4}{3}}}} = \sqrt{\frac{g \cdot \overline{u_{obs}}^2 \cdot n^2}{R^{\frac{1}{3}}}} \quad (3.10)$$

A l'aide des équations (2.24) et (3.10) il est désormais possible de calibrer graphiquement notre courbe théorique

En effectuant ce travail pour différents profils de vitesse, mesurés à 30 cm du bord, on obtient les courbes visibles sur les figures (3.2) et (3.3). Ces figures comportent chacune un graphique (u - z/h) ainsi que le même graphique mais en échelle semi-logarithmique. Ce type de graphique est plus adapté car le profil de vitesse y est représenté sous la forme d'une droite. Il est donc plus facile d'y déceler un éventuel effet de sillage.

Les valeurs des paramètres utilisées pour tracer ces courbes (voir tableau 3.1) semblent tout à fait satisfaisantes. En effet, étant donné que notre canal est composé d'un lit en béton en bon état et de parois en acier, des valeurs de $0,012 \text{ [s/m}^{\frac{1}{3}}]$ pour le coefficient de Manning et de $0,0013 \text{ [m]}$ pour k_s sont tout à fait plausibles.

Paramètres	
n	0,012 s/m ^{1/3}
kappa	0,4
k_s	0,0013 m

FIGURE 3.1 – Paramètres utilisés pour calibrer la loi universelle logarithmique aux données de Rion

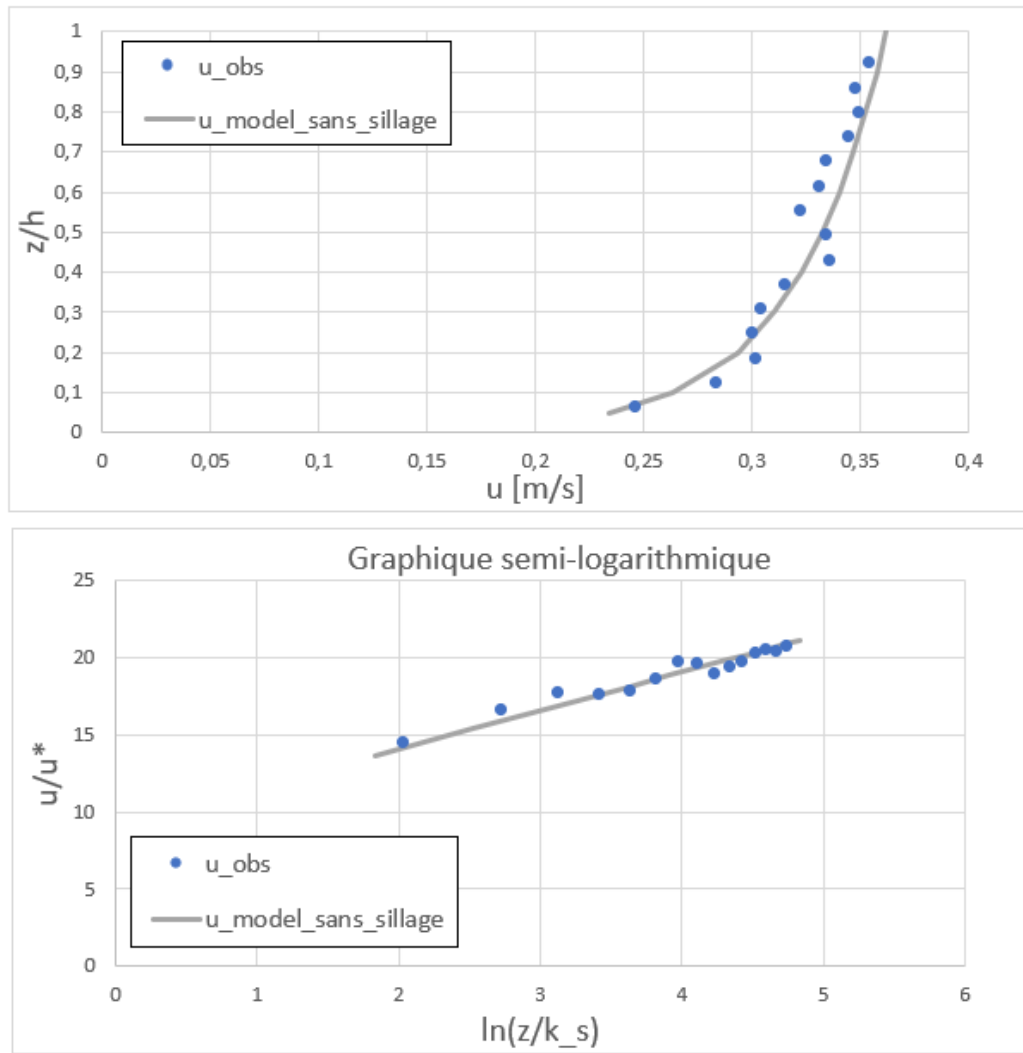


FIGURE 3.2 – Profil de vitesse mesuré à 30cm du bord - première série

3.1.3 Calcul de l'erreur

Après avoir fait correspondre notre modèle aux mesures expérimentales, il nous reste une dernière étape. Il faut en effet vérifier que notre modèle soit correct. Pour ce faire, nous pouvons utiliser un test r^2 . Ce test mesure la qualité de l'ajustement linéaire de notre modèle et est défini comme étant la proportion de variance expliquée [23] :

$$r^2 = \frac{SSR}{SST} = 1 - \frac{SSE}{SST} \quad (3.11)$$

avec :

$$SSR = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2 \quad (3.12)$$

$$SSE = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (3.13)$$

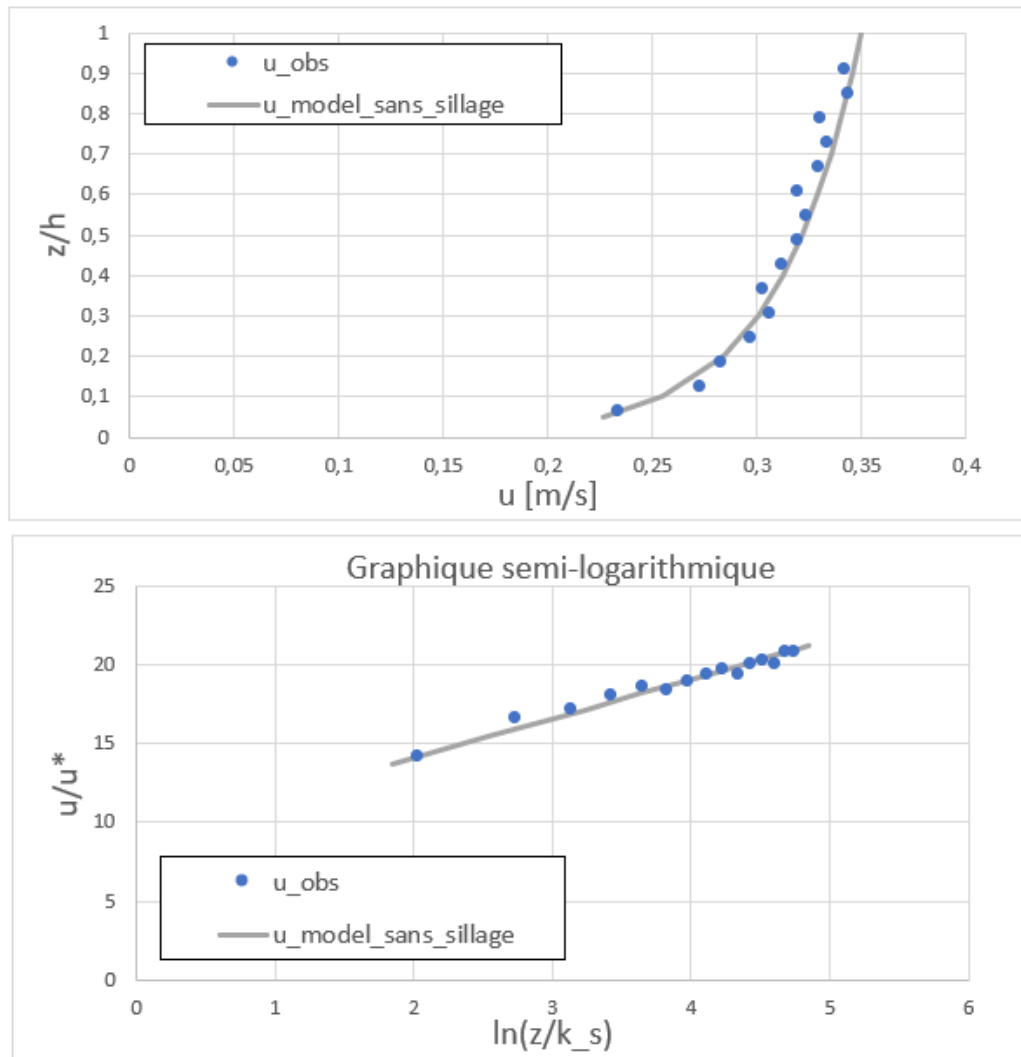


FIGURE 3.3 – Profil de vitesse mesuré à 30cm du bord - deuxième série

$$SST = SSR + SSE = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (3.14)$$

où :

- SSR = regression sum of squares = variance expliquée par la régression
- SSE = error sum of squares = variance résiduelle ou inexpliquée
- SST = total sum of squares = variance totale de régression
- r^2 = coefficient de détermination
- y_i = variables observées
- $\bar{y}$ = moyenne des observations
- $\hat{y}_i$ = variables dépendantes estimées

Plus le coefficient de détermination s'approche de 1, plus la courbe théorique estimée correspond bien aux données observées.

Pour les profils analysés nous obtenons respectivement des valeurs de r^2 de :

- 0,922 pour le profil de la figure (3.2)
- 0,965 pour le profil de la figure (3.3)

Ces résultats sont satisfaisants au vu de la dispersion des données expérimentales.

3.2 Données de Stephen Louis - Profil logarithmique avec loi de sillage

3.2.1 Mise en contexte

Stephen Louis a réalisé une thèse de doctorat à l'université libre de Bruxelles [11]. Pour la réalisation de cette thèse, différentes mesures ont été prises dans un canal d'irrigation situé en Haïti, le canal fossé Naboth-Est (CFNE). (figure 3.4). Les mesures qui nous intéressent dans le cadre de ce travail sont les mesures de profil de vitesse et ce pour deux raisons :

- Avoir de nouvelles données à analyser, puisqu'il ne m'a pas été possible d'en mesurer personnellement vu la crise sanitaire liée au Covid-19.
- Tenter de comprendre comment Louis a modélisé le phénomène de plongée afin de pouvoir utiliser un modèle comparable aux données de Rion.

Les données de profils verticaux de vitesse présentes dans le travail de Louis ont été prises pour différentes hauteurs allant de 0,12 [m] à 1,23 [m] à l'aide d'un courantomètre à induction magnétique de type MFPro². Elles sont représentées sous forme de graphique ($u - z/h$).



FIGURE 3.4 – Station de mesure des expériences de Stephen Louis

3.2.2 Modèle logarithmique modifié avec le phénomène de plongée

Dans ses travaux, Louis explique que la loi de sillage de Coles (voir équation 2.26) est insuffisante pour modéliser l'effet de plongée. Selon les recherches de Wang [24], cette loi est en fait seulement valable pour modéliser un profil jusqu'à la hauteur δ (hauteur pour laquelle la vitesse est maximale). La figure (3.5) illustre parfaitement cela.

Étant donné que la fonction de Coles est insuffisante pour modéliser le phénomène de plongée, Louis a comparé différentes lois de Coles modifiées afin de définir laquelle est la meilleure (figure 3.6). Comme vu dans la section (2.3.2), on appelle ces modèles "Dip-modified-log-wake-law" (DMLWL).

2. <https://www.ott.com/fr-fr/produits/le-debit-deau-70/ott-mf-pro-177/>

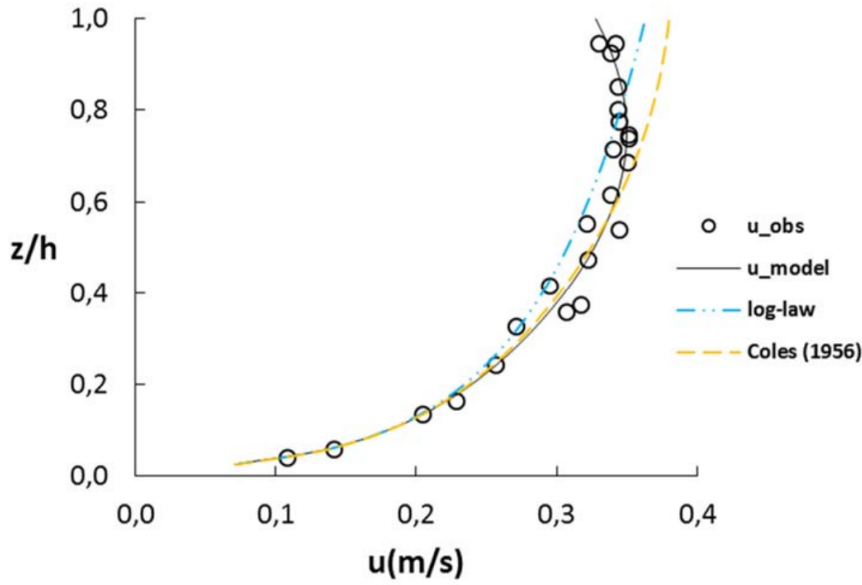


FIGURE 3.5 – Mise en évidence de l’insuffisance de la loi de Coles [11]

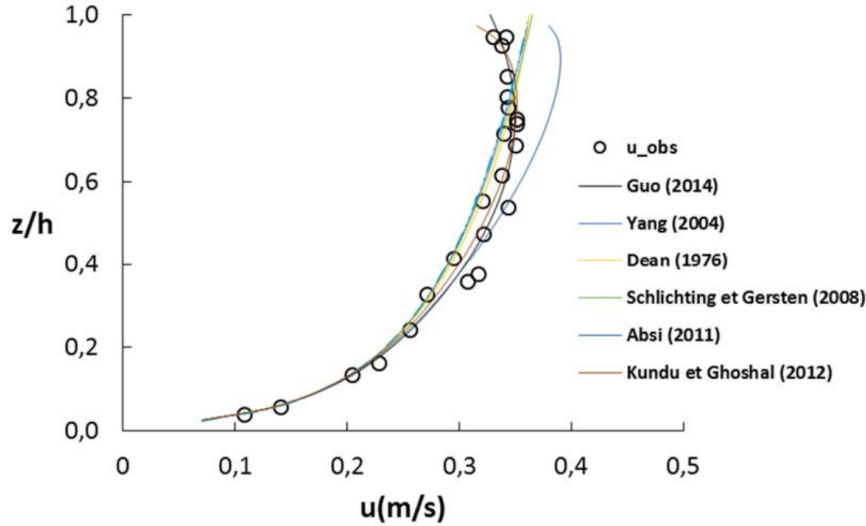


FIGURE 3.6 – Comparaison de différents DMLWL [11]

Louis a ainsi déterminé que le meilleur DMLW pour la zone externe du profil vertical de vitesse ($z/h > 0,2$) est celui de Guo [16] :

$$\frac{u(z)}{u_*} = \frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) - \frac{1}{3\kappa} \left(\frac{z}{\delta} \right)^3 + \frac{2\Pi(1 + \sqrt{\lambda})}{\kappa} \sin^2 \left(\frac{\pi z}{2\delta} \right) \quad (3.15)$$

Où :

- Π = Paramètre de sillage de Coles [-]
- λ = Paramètre de Guo tenant compte du phénomène de plongée [-]

Dans cette équation on identifie bien le premier terme correspondant à la loi universelle logarithmique et les deuxième et troisième termes comme étant la modification de cette loi pour prendre en compte le phénomène de plongée.

3.2.3 Reproduction du modèle de Guo aux données de Louis

Louis a réalisé des mesures de profil de vitesse verticaux et pour certains d'entre-eux, y a collé un profil de vitesse théorique à l'aide du modèle de Guo (voir équation (3.15)).

L'objectif de cette section est, tout d'abord, de reproduire ce que Stephen Louis a réalisé afin de comprendre comment il s'y est pris et d'ensuite être capable d'utiliser sa méthode sur d'autres jeux de données.

Afin de reproduire une courbe de Louis, la première étape est d'extraire les différents points des mesures qu'il a prises. En effet, les données brutes ne sont pas accessibles. Voulant être le plus précis possible, j'ai décidé d'utiliser le logiciel Bluebeam Revu³ qui permet de mesurer précisément une distance sur un fichier PDF (ce programme est payant mais j'ai obtenu une licence pour étudiant lors de mon stage). De cette manière, les erreurs dues aux mesures sont donc minimales.

La seconde étape a été d'implémenter la loi de Guo sur un fichier Excel et d'y incorporer les valeurs des paramètres renseignées par Louis, paramètres disponibles pour certaines courbes seulement.

Prenons pour exemple le graphique issu des mesures sur le canal fossé Naboth-Est pour une hauteur d'eau de 0,38 [m] présenté sur la figure (3.5). En appliquant le modèle de Guo et en incorporant les paramètres fournis par le tableau (figure 3.7) on obtient, comme attendu, des résultats identiques à ceux obtenus par Louis. Ces résultats sont visibles sur la figure

h	u^*/κ	Π	k_s_model	λ	δ/h	r^2	E_r
[m]	[m/s]	[-]	[m]	[-]	[-]	[-]	[-]
0,12	0,0021	0,237	0,006	0,991	0,502	0,963	2,7%
0,38	0,083	0,040	0,116	0,261	0,793	0,984	2,9%
0,94	0,102	-0,026	0,018	0,935	0,517	0,998	1,0%
1,00	0,121	-0,016	0,196	0,722	0,581	0,999	1,0%
1,07	0,125	-0,015	0,187	1,000	0,500	0,957	2,5%
1,10	0,121	-0,035	0,137	0,790	0,558	0,995	1,1%
1,23	0,061	0,205	0,016	0,746	0,573	0,994	2,3%

FIGURE 3.7 – Paramètres de calage pour le canal fossé Naboth-Est fourni par Louis [11]

3.2.4 Analyse des paramètres du modèle de Guo

Une fois que le modèle est correctement implémenté, il est possible d'observer graphiquement l'impact de chaque paramètre présent dans le modèle de Guo :

- κ , constante de Von Karman. La valeur de la constante de Von Karman est dans le cadre de ce travail fixée à 0,4. Cependant, dans la littérature, on trouve que cette constante peut valoir entre 0,37 et 0,42. Lorsque l'on augmente la valeur de cette constante, on observe un shift de la courbe vers la gauche (figure 3.9).

3. <https://www.bluebeam.com/fr/solutions/revu>

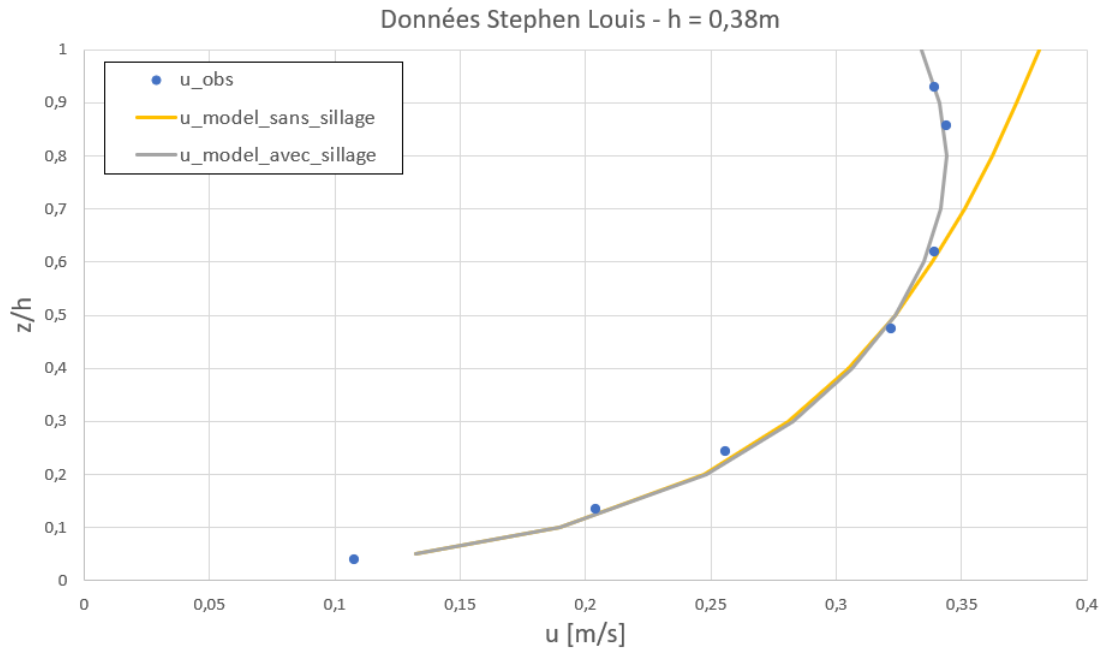


FIGURE 3.8 – Reproduction du modèle de Louis pour des mesures prises sur le canal fossé Naboth-Est pour une hauteur d'eau de 0,38 [m]

- Π , paramètre de sillage de Coles. Lorsque l'on augmente la valeur de ce paramètre, on observe un shift de la courbe vers la droite. L'ampleur de ce shift varie fortement en fonction de z . En effet, pour des valeurs de z élevées le shift sera beaucoup plus important que pour des valeurs de z faibles où le shift est quasi négligeable (figure 3.11).
- k_s , la rugosité équivalente au sable de Nikuradse. Lorsque l'on augmente la valeur de ce paramètre, on observe un shift de la courbe vers la gauche. Cette observation est logique. En effet, la valeur de k_s est directement proportionnelle au diamètre des grains constituant le fond de l'écoulement. Par conséquent, si k_s augmente, la rugosité augmente aussi et la vitesse de l'écoulement diminue (figure 3.10).
- λ , Paramètre de Guo tenant compte du phénomène de plongée. Ce paramètre influence directement l'importance du phénomène de plongée. En effet, lorsque l'on augmente la valeur de ce paramètre, on observe un léger shift de la courbe aux alentours de $z=\delta$ (figure 3.12).
- n , le coefficient de Manning. On n'observe pas immédiatement la présence de n dans le modèle de Guo. Cependant, au travers de l'équation (3.10), on remarque que le coefficient de Manning influence la valeur de la vitesse de cisaillement du lit, u_* . Lorsque la valeur de ce paramètre augmente, on remarque un shift de la courbe vers la droite. Une nouvelle fois, ce résultat paraît logique. En effet, le coefficient de Manning est inversement proportionnel à la rugosité. Par conséquent, lorsque n augmente, la rugosité diminue et la vitesse de l'écoulement augmente (figure 3.13).

La courbe de référence des différents graphiques présentés a été tracée à l'aide des paramètres suivants :

- $\kappa = 0,4$ [-]
- $\Pi = 0,15$ [-]
- $k_s = 0,0013$ [m]
- $\lambda = 0,1$ [-]
- $n = 0,012$ [$\text{s/m}^{\frac{1}{3}}$]

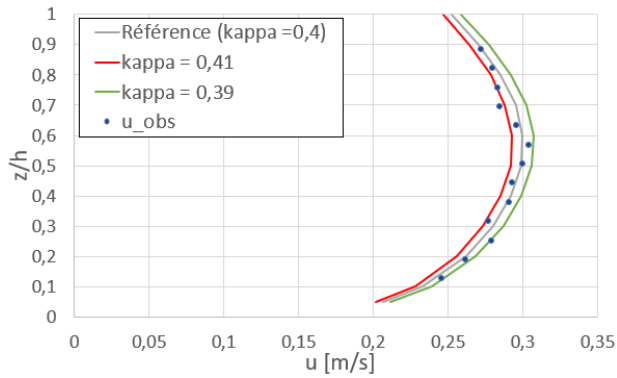


FIGURE 3.9 – Influence de la constante de Von Karman sur le modèle de Guo

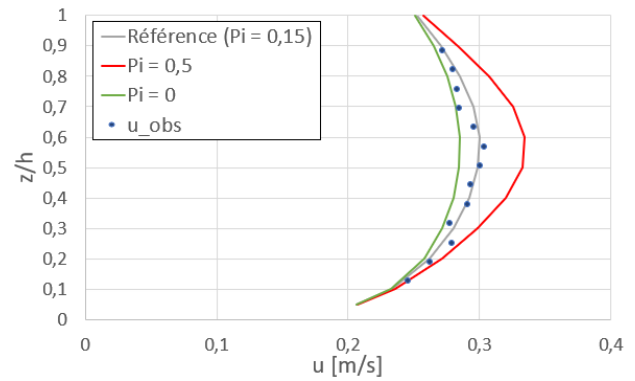


FIGURE 3.11 – Influence du paramètre de Coles sur le modèle de Guo

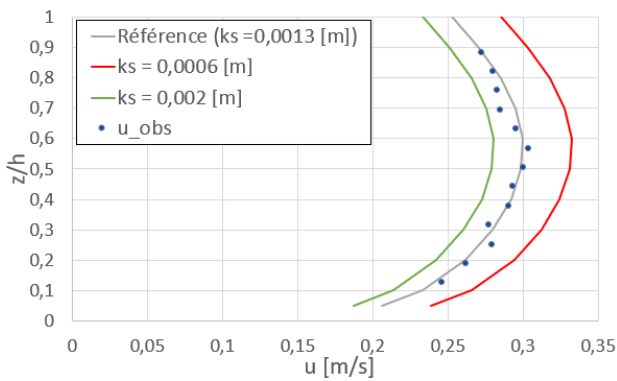


FIGURE 3.10 – Influence de la rugosité équivalente sur le modèle de Guo

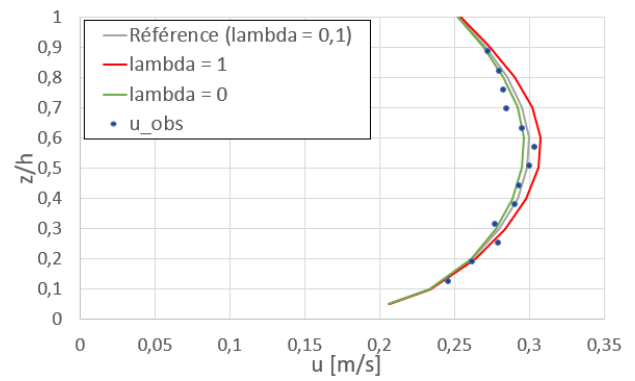


FIGURE 3.12 – Influence du paramètre de Guo sur le modèle de Guo

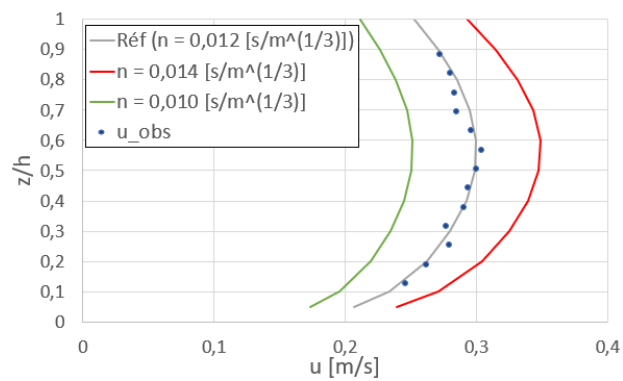


FIGURE 3.13 – Influence du paramètre de Coles sur le modèle de Guo

3.3 Données de Guillaume Rion - Profil logarithmique avec loi de sillage

3.3.1 Mise en contexte

Dans cette section, l'objectif est d'appliquer le modèle de Guo [16] développé précédemment (section 3.2) aux mesures de Rion. Comme discuté dans la section (3.1), ces mesures proviennent du grand canal du LEMSC à Louvain-la-Neuve (section 2.4.1).

Jusqu'à présent, les profils de vitesse mesurés par Rion analysés dans ce travail ne présentaient pas de phénomène de plongée. En effet, seuls les profils suffisamment loin du bord ont été analysés. On a donc pu les modéliser à l'aide de la loi universelle logarithmique. Cependant, proche des bords, il n'est plus possible d'utiliser la loi universelle logarithmique car, comme vu précédemment, celle-ci ne prend pas en compte le phénomène de plongée.

3.3.2 Recherche du profil théorique

Pour trouver le profil théorique des mesures faites par Rion, il nous faut utiliser le modèle de Guo (équation 3.15). Pour rappel, ce modèle comporte plusieurs paramètres :

- n , le coefficient de Manning
- κ , la constante de von Karman
- k_s , la rugosité équivalente au sable de Nikuradse
- Π , le paramètre de sillage de Coles
- λ , le paramètre de Guo
- le coefficient "8,5", qui peut diminuer si l'écoulement n'est pas 100% rugueux

Étant donné que les mesures analysées dans cette section ont été prises dans les mêmes conditions que celles de la section (3.1), les paramètres que l'on y a déterminés devraient rester les mêmes. Ainsi, on peut déjà déterminer sur base du tableau (3.1) que l'on a :

- $n = 0,012 \text{ [s/m}^{\frac{1}{3}}\text{]}$
- $\kappa = 0,4$
- $k_s = 0,0013 \text{ [m]}$

Graphiquement, on peut déterminer les autres paramètres. Pour ce faire, on essaie de faire correspondre au mieux la courbe théorique aux mesures expérimentales. Mathématiquement, cela revient à essayer d'obtenir un r^2 le plus proche possible de 1 (voir section 3.1.3).

En appliquant cela au profil de vitesse de Rion mesuré à 10 [cm] du bord du canal du LEMSC, on obtient une valeur de r^2 de 0,903 pour les paramètres présentés sur le tableau (figure 3.14). Cette valeur est satisfaisante au vu de la dispersion des mesures expérimentales.

3.3.3 Remarques

Cette section ne se base que sur deux jeux de mesures prises au même endroit (au canal du LEMSC) dans les mêmes conditions (même débit et même hauteur d'eau) par Rion. Par conséquent, il est difficile de pouvoir en tirer de réelles conclusions. D'autres mesures peuvent être envisagées dans les années futures pour compléter ce travail mais avec la situation due au Covid-19, il ne m'a

malheureusement pas été permis de les réaliser personnellement.

Paramètres	
n	0,012 s/m ^{1/3}
kappa	0,4
PI	0,15
k_s	0,0013 m
lambda	0,1
Coef "8,5"	8,5

FIGURE 3.14 – Paramètres utilisés pour calibrer le modèle de Guo sur les mesures de Rion

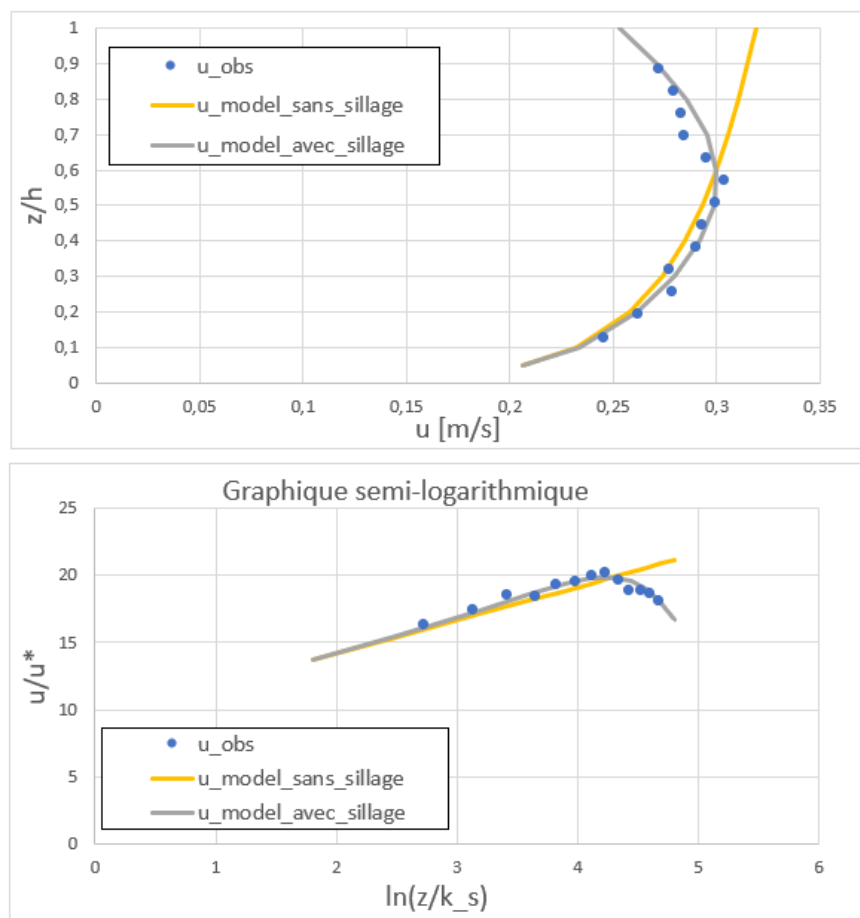


FIGURE 3.15 – Profil de vitesse mesuré à 10cm du bord

3.4 Données de Paul Asselberghs et Briec Peeters - Cours d'eau naturel

3.4.1 Mise en contexte

Asselberghs et Peeters [25] ont réalisé un travail sur la PIV et la LSPIV en 2019 à l'UCLouvain. Pour cela, ils ont pris différentes mesures de profil de vitesse verticaux en rivière naturelle à l'aide d'un MFPro. Ces mesures sont couplées à des mesures de vitesse de surface à l'aide d'une caméra Go Pro et de la méthode LSPIV. Les traceurs utilisés pour ces mesures sont des copeaux de bois.

Les mesures que nous allons utiliser sont des mesures qui ont été prises sur la Ligne à Saint-Martin (figure 3.16).



FIGURE 3.16 – Photo de la Ligne à Saint Martin [25]

3.4.2 Recherche des profils théoriques

La Ligne est une rivière d'environ 2,50 mètres de large et 0,4 mètre de profondeur. Asselberghs et Peeters ont pris leurs mesures à l'aide d'un MFPro. Cet instrument permet de mesurer la vitesse localement dans le cours d'eau. Leur objectif était d'estimer le débit de la Ligne à Saint Martin. Pour ce faire, ils ont réalisé des mesures de vitesse sur différentes verticales (tous les 0,25 mètre environ) en 3 ou 5 points. La figure (3.17) nous renseigne sur la bathymétrie de la Ligne à l'endroit de leurs mesures.

Dans ce rapport, seuls les profils verticaux en 5 points seront analysés, à savoir les profils de 4 à 10 (points rouges sur la figure (3.17)). En effet, faire correspondre une courbe théorique à seulement 3 points est compliqué mais surtout imprécis.

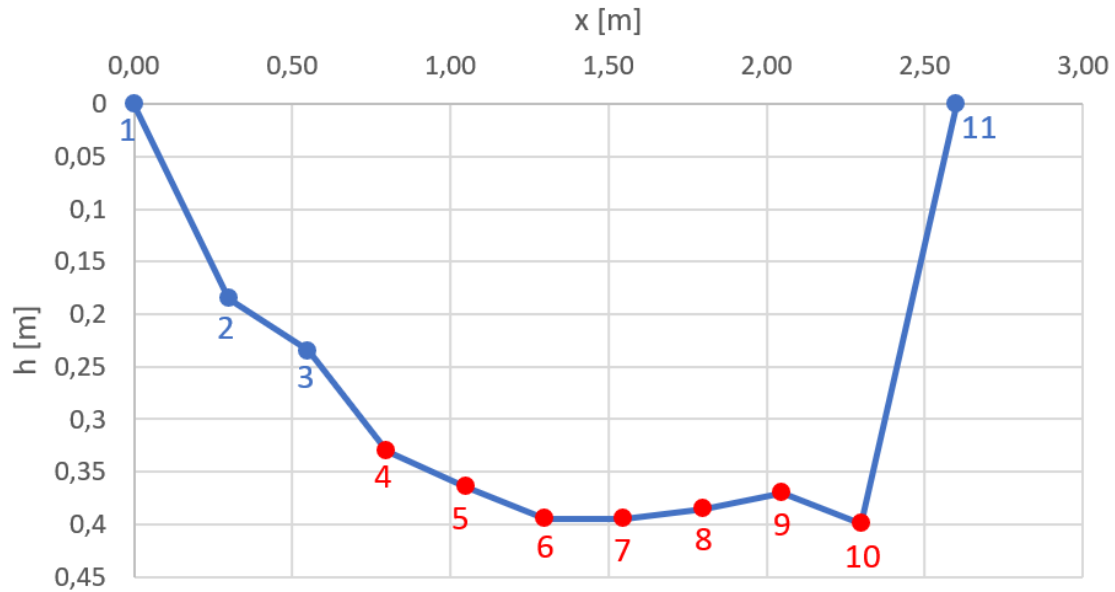


FIGURE 3.17 – Bathymétrie de la Ligne à Saint-Martin mesurée par Asselberghs et Peeters, à l’aide d’un MFPro. Les points rouges représentent les verticales où l’on a 5 mesures de vitesse

Pour analyser ces données, la première chose à faire est de superposer les différents profils de vitesse verticaux afin de pouvoir les comparer. Grâce à cela, on peut déterminer une première tendance. C’est ce qui est représenté sur la figure (3.18).

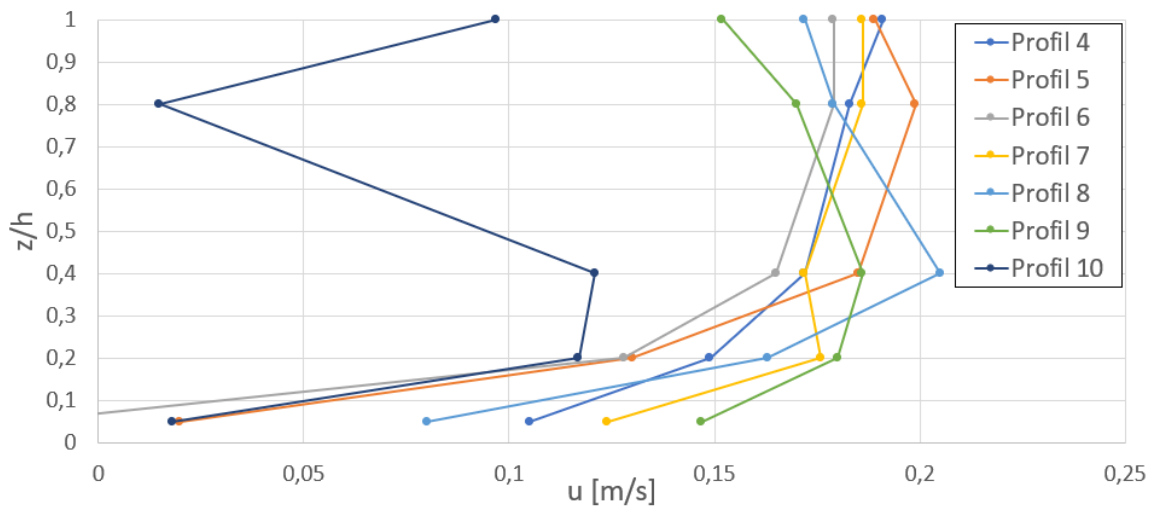


FIGURE 3.18 – Superposition des profils verticaux 4 à 10

Sur cette figure on peut constater plusieurs choses :

- Le profil 10 n’est pas exploitable.
- Le profil 6 comporte un point non exploitable. Cependant, ce point est le moins important et par conséquent, ce profil reste exploitable.
- Les profils 5, 6, 7, 8 et 9 présentent un effet de sillage plus ou moins important
- Les profil 4 correspond à un profil purement logarithmique
- Les profils ne se superposent pas. Cela veut dire que les paramètres du modèle de Guo vont être différents pour chacun des profils.

Il est désormais possible d’appliquer notre modèle aux données de la Ligne pour les profils 4 à

10. En effectuant cela, on trouve les valeurs présentées sur la figure (3.19).

Paramètres	n [s/m ^{1/3}]	κ [-]	Π [-]	k_s [m]	λ [-]
Profil 4	0,017	0,4	-	0,01	-
Profil 5	0,017	0,4	0,45	0,01	0,5
Profil 6	0,024	0,4	0,1	0,03	1
Profil 7	0,017	0,4	0	0,01	0,1
Profil 8	0,017	0,4	0,1	0,01	0
Profil 9	0,018	0,4	-0,035	0,01	0

FIGURE 3.19 – Paramètres utilisés pour calibrer le modèle de Guo aux mesures d’Asselberghs et Peeters

3.4.3 Analyse des profils théoriques

Le premier constat que l’on peut faire à l’aide du tableau (figure 3.19) est, qu’à l’exception du profil 6, on trouve des paramètres assez similaires pour la Ligne :

- $n \simeq 0,017$ [s/m^{1/3}]
- $k_s = 0,01$ [m]

Les valeurs de paramètre utilisées pour calibrer le profil 6 sont quant à elles totalement différentes. On peut donc penser qu’il y a une singularité à cet endroit là de l’écoulement. Malheureusement, il n’est plus possible de le vérifier. Calibrer le profil 6 avec les mêmes paramètres que ceux des autres profils donne la courbe de la figure (3.26).

Étant donnée que, excepté pour le profil 6, les valeurs de n et de k_s sont semblables pour tous les autres profils, on peut dire qu’il s’agit probablement des paramètres intrinsèques du cours d’eau. Malheureusement, Asselberghs et Peeters ne nous donnent pas d’informations quant à la nature de sol de la Ligne à l’endroit de leurs mesures et ces valeurs ne sont par conséquent pas vérifiables.

Un deuxième constat possible en observant les différents profils est que la méthode LSPIV nous donne systématiquement une valeur de vitesse de surface bien plus importante que les valeurs mesurées au MFPro. L’hypothèse la plus vraisemblable pour justifier cette différence est que la caméra utilisée n’a pas la même fréquence de rafraîchissement que celle utilisée par le programme PIVLab, programme qui permet de traiter les vidéos dans le cadre des méthodes PIV et LSPIV. Par conséquent, le temps réel entre deux images prises par la caméra et le temps utilisé par PIVLab pour calculer la vitesse d’une particule filmée ne sont pas les mêmes et cela engendre donc une erreur.

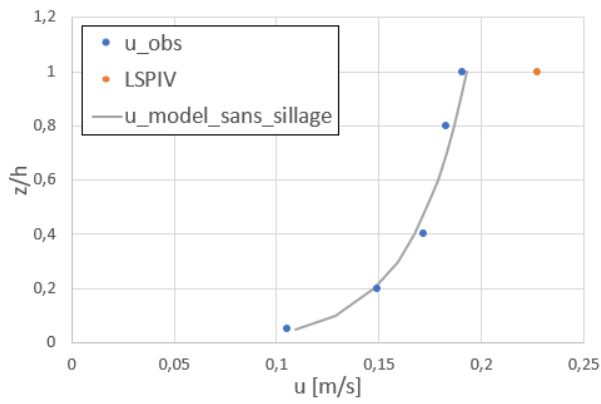


FIGURE 3.20 – Profil de vitesse 4

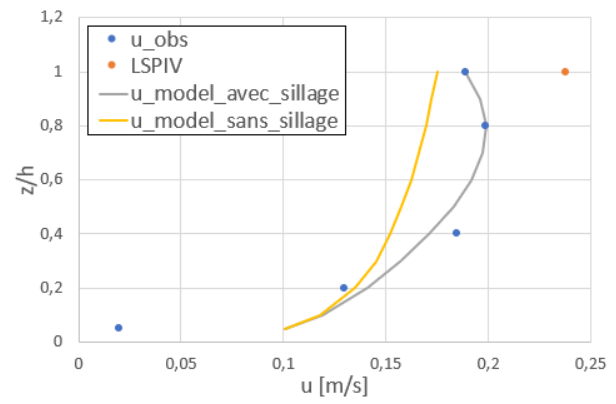


FIGURE 3.23 – Profil de vitesse 5

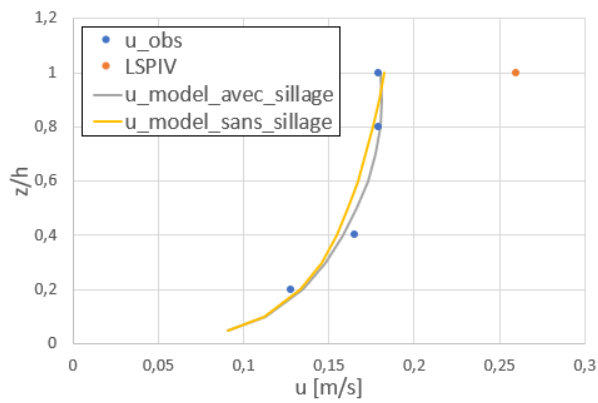


FIGURE 3.21 – Profil de vitesse 6

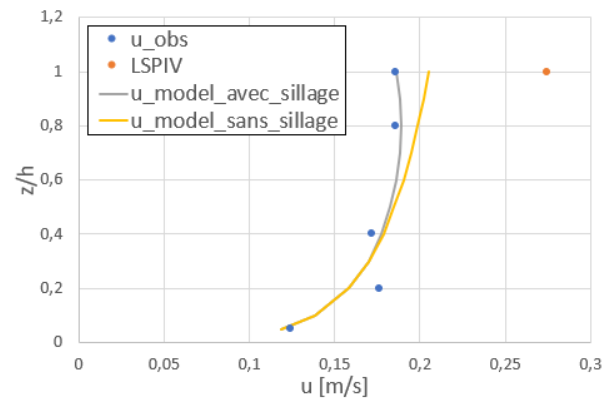


FIGURE 3.24 – Profil de vitesse 7

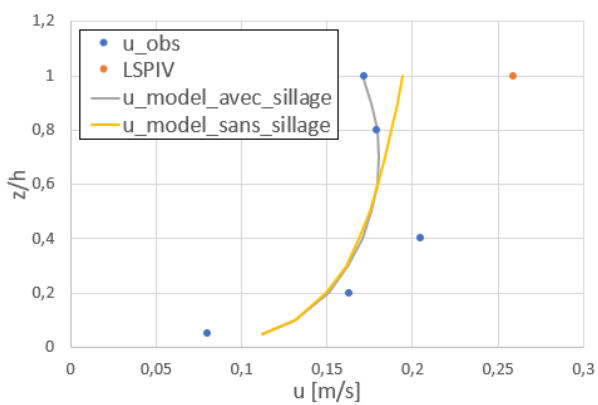


FIGURE 3.22 – Profil de vitesse 8

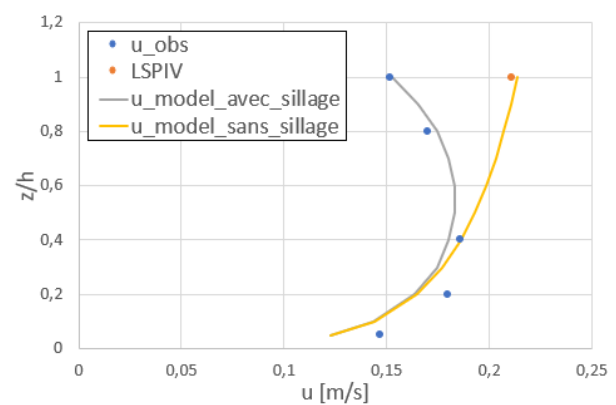


FIGURE 3.25 – Profil de vitesse 9

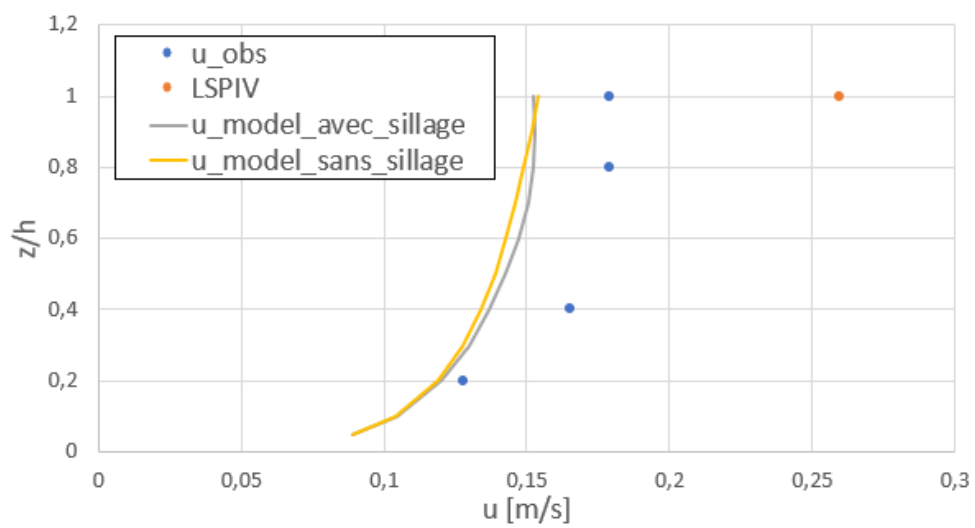


FIGURE 3.26 – Profil de vitesse 6 avec les valeurs des autres profils de vitesse à savoir $n = 0,017 \text{ [s/m}^{\frac{1}{3}}]$ et $k_s = 0,01 \text{ [m]}$

Chapitre 4

Résultats

4.1 Méthode

L'objectif de ce travail est d'établir un lien entre la vitesse moyenne et la vitesse de surface dans un écoulement à surface libre. Pour ce faire, on utilise l'index de vitesse α qui, pour rappel, est défini comme étant (section (2.3.3)) :

$$\alpha = \frac{\text{vitesse moyenne (issue du débitmètre)}}{\text{vitesse moyenne de surface}} \quad (4.1)$$

L'index de vitesse est donc un coefficient global que l'on applique à l'entièreté d'un écoulement à surface libre. Par exemple, pour connaître le débit dans le cas d'une analyse LSPIV (section 2.1.2), on calcule la vitesse moyenne de surface que l'on multiplie par un index de vitesse global.

Dans le cadre de ce travail, l'index de vitesse est calculé différemment. En effet, il est intéressant de pouvoir calculer un indice de vitesse local (c'est à dire pour une verticale) afin de comprendre comment celui-ci évolue en fonction de son éloignement des bords. On peut définir cet index de vitesse local comme étant :

$$\alpha_{loc} = \frac{\text{vitesse moyenne de la verticale}}{\text{vitesse de surface de la verticale}} \quad (4.2)$$

Dans le cas d'un écoulement parfaitement uniforme, l'index de vitesse et l'index de vitesse local sont bien évidemment liés. Dans ce cas là, on peut écrire que :

$$\alpha = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n \alpha_{loc,i} \quad (4.3)$$

où :

- $\alpha_{loc,i}$ = l'ensemble des index de vitesse locaux mesurés sur une section du cours d'eau
- n = nombre de mesures de profil de vitesse

Il est important de noter que plus n est important, plus la valeur de α sera précise

Pour calculer l'index de vitesse local, il faut donc deux valeurs :

- vitesse de surface de la verticale
- vitesse moyenne de la verticale

Ces deux valeurs se calculent grâce au travail effectué dans le chapitre 3. En effet, pour que les mesures expérimentales soient utilisables, il faut qu'elles soient modélisées. Dans ce cas-ci les modèles utilisés sont :

- Le modèle logarithmique universel si le profil n'est pas sujet au phénomène de plongée
- Le modèle de Guo sinon

Ainsi, la vitesse de surface de la verticale est définie comme étant :

$$u_{\text{surface}} = u_{\text{modèle}} \left(\frac{z}{h} = 1 \right) \quad (4.4)$$

Le calcul de la vitesse moyenne de la verticale est lui effectué à l'aide d'une discrétisation en n points de notre modèle. Donc :

$$u_{\text{moyen}} = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^n u_{\text{modèle},i} \quad (4.5)$$

Au plus n est grand, au plus la précision de u_{moyen} sera importante.

4.2 Résultats issus des données en laboratoire

Les mesures prises en laboratoire ont toutes été réalisées par Rion dans le grand canal du LEMSC (2.4.1). Malheureusement, seules trois mesures distinctes de profils de vitesse ont été réalisées là-bas. Il aurait été intéressant d'avoir des mesures sur plus de verticales ainsi que pour différents débits et hauteurs d'eau. Vu la crise sanitaire liée au Covid-19, il n'a pas été possible de prendre plus de mesures bien que tout le matériel ait été préparé.

Dans les mesures de Rion, nous pouvons distinguer deux cas :

1. Les mesures au centre du canal où il n'y a pas de phénomène de plongée
2. Les mesures proches du bord avec phénomène de plongée

Les mesures ne présentant pas de phénomènes de plongée correspondent aux données analysées dans la section (3.1). Pour rappel, les principaux paramètres de ces mesures sont :

- $Q = 54,5 \text{ [m}^3\text{]}$
- $h = 0,165 \text{ [m]}$
- $L = 1,023 \text{ [m]}$

Les paramètres de calibrations sont eux (voir figure (3.1)) :

- $n = 0,012 \text{ [s/m}^{\frac{1}{3}}\text{]}$
- $\kappa = 0,4 \text{ [-]}$
- $k_s = 0,0013 \text{ [m]}$

Lorsque l'on effectue la méthode décrite dans la section (4.1) on obtient des valeurs pour l'index de vitesse local d'environ 0,89 (voir tableaux de la figure (4.1)). Pour ces calculs, le nombre de points n utilisé pour la discrétisation du modèle est 20 (de $z/h = 0,05$ à $z/h = 1$ tous les 0,05).

Profil 30 cm du bord - première série		Profil 2 - 30cm du bord - deuxième série	
Vitesse de surface	0,3621 m/s	Vitesse de surface	0,3499 m/s
Vitesse moyenne	0,3245 m/s	Vitesse moyenne	0,3137 m/s
alpha local	0,8962 -	alpha local	0,8965 -

FIGURE 4.1 – Tableaux récapitulatifs des index de vitesse locaux pour les deux séries de données prises à 30cm des bords du canal

Un index de vitesse de 0,89 est de l'ordre de ce que l'on attendait pour des profils ne présentant pas de phénomène de plongée, si on se réfère aux résultats présentés par Rantz et al [18] sur la figure (2.14). En effet au centre du canal on peut s'attendre à une valeur de l'index de vitesse de 0,9.

Graphiquement les résultats obtenus sont présentés sur les figures (4.2) et 4.3)

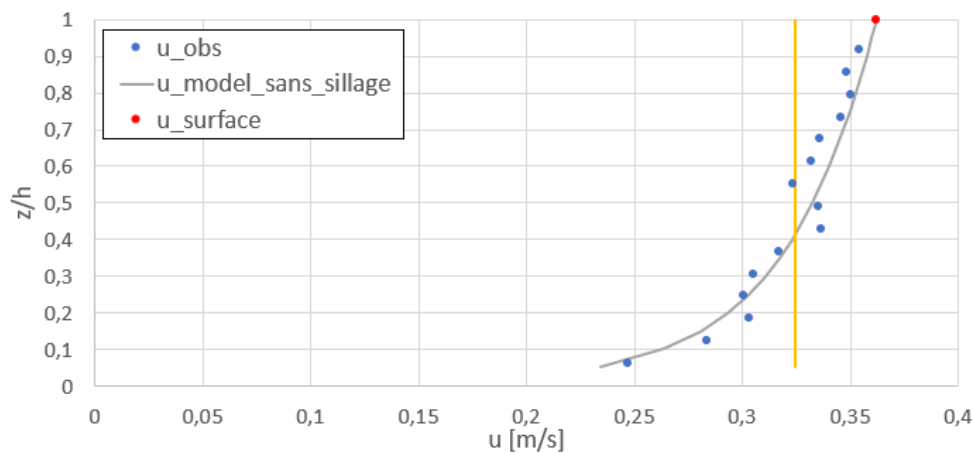


FIGURE 4.2 – Profil de vitesse mesuré à 30cm du bord - première série

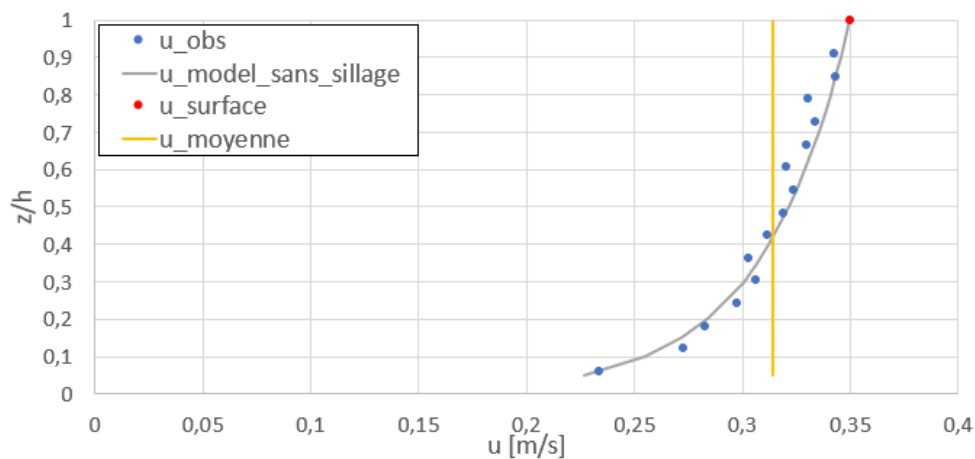


FIGURE 4.3 – Profil de vitesse mesuré à 30cm du bord - deuxième série

Les mesures de Rion ne présentant pas de phénomène de plongée ont été prises à 10cm du bord du canal. Pour ces mesures, on obtient une valeur de l'index de vitesse local de 1,07. La vitesse de surface est donc plus faible que la vitesse moyenne. Cela met en évidence que le phénomène de plongée peut fortement influencer la valeur de l'index de vitesse.

Les résultats chiffrés sont visibles sur la figure (4.4) et les résultats graphiques sur la figure (4.5).

Profil à 10cm du bord	
Vitesse de surface	0,2527 m/s
Vitesse moyenne	0,2705 m/s
alpha	1,0705 -

FIGURE 4.4 – Tableau récapitulatif de l'index de vitesse pour les données prises à 10cm du bord du canal

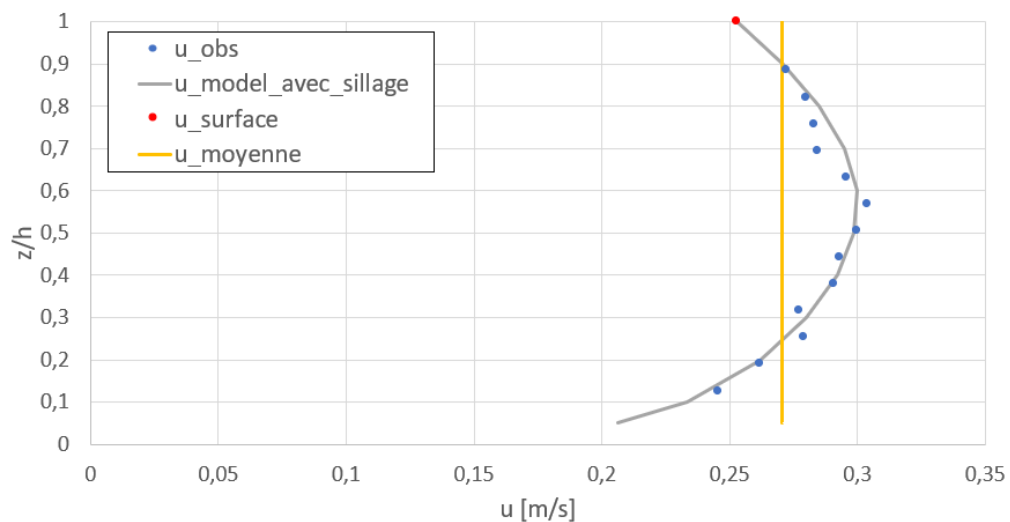


FIGURE 4.5 – Profil de vitesse mesuré à 10cm du bord

4.3 Résultats issus des données en canal

Les mesures réalisées en canal proviennent de Louis [11]. Pour rappel, elles ont été réalisées dans le canal fossé Naboth-Est en Haïti à l'aide d'un MFPro. Louis a réalisé ses mesures pour différentes hauteurs d'eau allant de 0,12 [m] à 1,23 [m]. Pour chacune de ces hauteurs, toutes les mesures sont situées sur une seule verticale. La distance de chacune de ces verticales par rapport au bord est malheureusement inconnue.

Dans ses travaux, Louis a déjà calculé les paramètres pour calibrer le modèle de Guo à chacun de ses profils expérimentaux. De ce fait, il est possible de réutiliser ces paramètres pour ensuite calculer l'index de vitesse local. C'est ce qui est fait dans le tableau de la figure (4.6).

On constate dans ce tableau que les index de vitesse sont très variables et atteignent des valeurs allant jusqu'à 1,41. Ces résultats sont intéressants car on ne s'attend pas à une valeur aussi élevée. En effet, la valeur maximale attendue de l'index de vitesse local est aux alentours de 1,08 [18]. Cela peut vouloir dire deux choses :

- Il y a une erreur dans les données
- Le phénomène de plongée peut être plus important que ce que l'on pense dans certaines situations

La première hypothèse peut être vérifiée en allant refaire des mesures sur le canal fossé Naboth-Est afin de confirmer (ou d'infirmer) les mesures fournies par Louis. Si les données sont correctes et que la seconde hypothèse est valable, il serait intéressant de comprendre dans quel cas on peut observer un tel effet de plongée pour pouvoir mieux calibrer la LSPIV. En effet, la LSPIV surestime souvent la vitesse de surface (et donc le débit) des rivières [25]. Une raison possible de cela peut donc être une sous estimation de du phénomène de plongée.

Paramètres de calage issus du DMLWL au CFNE						
h	u_*/k	Pi	k_s	lambda	delta/h	alpha_loc
[m]	[m/s]	[-]	[m]	[-]	[-]	[-]
0,12	0,021	0,237	0,006	0,991	0,502	1,40
0,38	0,083	0,04	0,116	0,261	0,793	0,89
0,94	0,102	-0,026	0,018	0,935	0,517	1,17
1,00	0,121	-0,016	0,196	0,722	0,581	1,10
1,07	0,125	-0,015	0,187	1	0,5	1,41
1,10	0,121	-0,035	0,137	0,79	0,558	1,13
1,23	0,061	0,205	0,016	0,746	0,573	1,12

FIGURE 4.6 – Paramètres de calage issus du DMLWL au CFNE avec l'index de vitesse local

4.4 Résultats issus des données en rivière naturelle

4.4.1 Index de vitesse

Les mesures réalisées en cours d'eau naturel ont été effectuées par Asselberghs et Peeters. Il s'agit de mesures prises sur la Ligne à Saint-Martin dans la province de Namur en Belgique. L'analyse de ces mesures est détaillée dans la section (3.4).

Pour rappel, les données de Asselberghs et Peeters traitées dans ce travail sont uniquement des données mesurées à l'aide d'un MFPro via une méthode en 5 points. Les données mesurées en 3 points ne permettent malheureusement pas de calibrer un modèle de manière suffisamment précise.

La méthode en 5 points est utilisée lorsque les hauteurs d'eau sont assez importantes. Pour un cours d'eau, sur un tronçon droit (donc pas dans un méandre), les grandes profondeurs sont situées au milieu de ce cours d'eau. C'est le cas pour la Ligne comme en témoigne la bathymétrie (voir figure 4.8). Malheureusement, cela veut dire que proche des bords, nous n'avons aucune mesure en 5 points. En effet, les verticales 2 et 3 sont mesurées en 3 points et la verticale 10 est inutilisable, dû à une erreur de mesure.

L'entièreté des mesures que l'on peut utiliser dans ce travail sont donc des mesures situées au centre du cours d'eau. Les effets de bords ne peuvent donc pas être quantifiés.

Asselberghs et Peeters ont estimé sur base de leurs mesures au MFPro que le débit de la Ligne à Saint-Martin le jour de leurs mesures était de $0,11 \text{ [m}^3\text{]}$. La hauteur d'eau est elle située aux alentours de $0,35\text{-}0,4 \text{ [m]}$ pour les verticales les plus profondes.

En appliquant la méthode décrite dans la section (4.1), on obtient les résultats du tableau (4.7) visibles sur les figures (4.12) à (4.13). On constate que pour cette section, les valeurs des α_{loc} sont assez variables. Pour les profils 4, 5, 6 et 7, cette valeur varie autour de 0,9, soit la valeur attendue pour α_{loc} lorsque l'on est loin des bords et qu'il n'y a pas d'effet de plongée. Les valeurs pour les profils 8 et 9 sont quant à elles plus importantes. Cela est dû au fait que l'écoulement n'est pas du tout uniforme sur cette section. Par conséquent, on observe des effets de plongée importants et donc une forte réduction de la vitesse de surface et une augmentation de l'index de vitesse local.

Paramètres	v_surf [m/s]	v_moy [m/s]	alpha_loc
Profil 4	0,193	0,168	0,873
Profil 5	0,189	0,172	0,911
Profil 6	0,180	0,159	0,881
Profil 7	0,186	0,174	0,937
Profil 8	0,171	0,166	0,972
Profil 9	0,153	0,169	1,107

FIGURE 4.7 – Tableau récapitulatif de l'index de vitesse pour les données de Asselberghs et Peeters

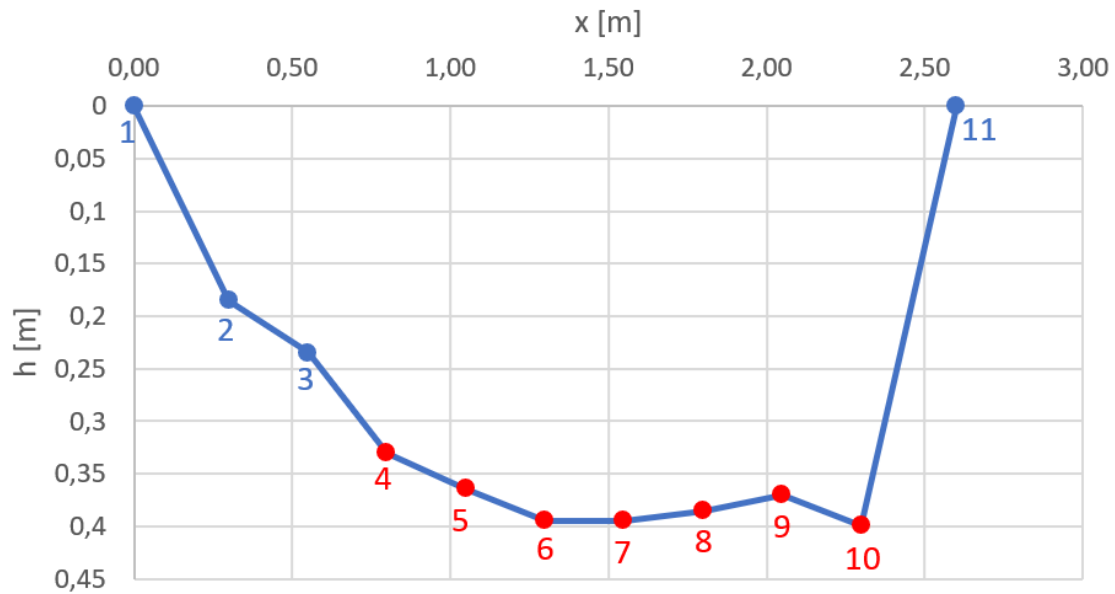


FIGURE 4.8 – Bathymétrie de la Ligne à Saint-Martin mesuré par Asselberghs et Peeters à l’aide d’un MFPro. Les points rouges représentent les verticales où l’on a 5 mesures de vitesse

Paramètres	u_surf_modèle [m/s]	u_surf_LSPIV [m/s]	ratio
Profil 4	0,193	0,227	0,848
Profil 5	0,189	0,238	0,794
Profil 6	0,180	0,260	0,695
Profil 7	0,186	0,275	0,678
Profil 8	0,171	0,259	0,659
Profil 9	0,153	0,211	0,725

FIGURE 4.9 – Comparaison des vitesses de surface obtenues via une modélisation avec celles obtenues via la LSPIV

4.4.2 LSPIV

Les données mesurées par Asselberghs et Peeters au MFPro sont complétées par une mesure LSPIV réalisée à l’aide d’une caméra Go Pro. Cette mesure de la vitesse de surface permet de mesurer le ratio entre les valeurs du modèle et de la LSPIV. C’est ce qui est fait sur la figure (4.9). On remarque que pour les profils 6-7-8, cette valeur est d’environ 0,7. Tandis que pour les profils 4 et 5, le ratio est plus de 0,82.

Une hypothèse à cet écart plus ou moins constant entre la vitesse de surface issue du modèle et celle issue de la LSPIV est que la vitesse de rafraîchissement d’image de la caméra n’est pas la même que celle utilisée pour effectuer les calculs de vitesse sur le programme de traitement de donnée de la LSPIV, PIVLab. Par exemple, si la caméra filme à 30 FPS (image par seconde) et que le programme traite le film comme étant à 24 FPS, on aura un facteur $24/30 (= 0,8)$ entre la réalité (et donc le modèle si il est bien calibré) et la mesure LSPIV. Malheureusement, il n’est pas possible de confirmer (ni d’infirmier) cette hypothèse car les données d’images par seconde n’ont pas été conservées.

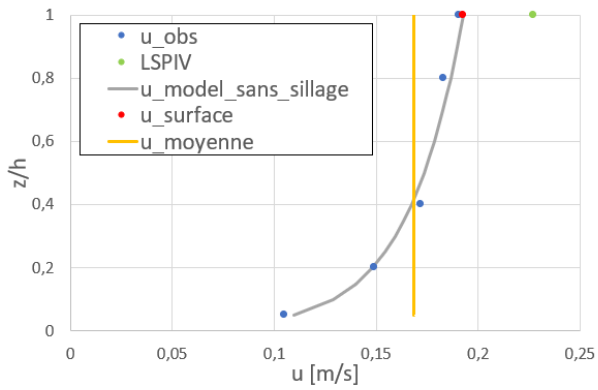


FIGURE 4.10 – Profil de vitesse 4

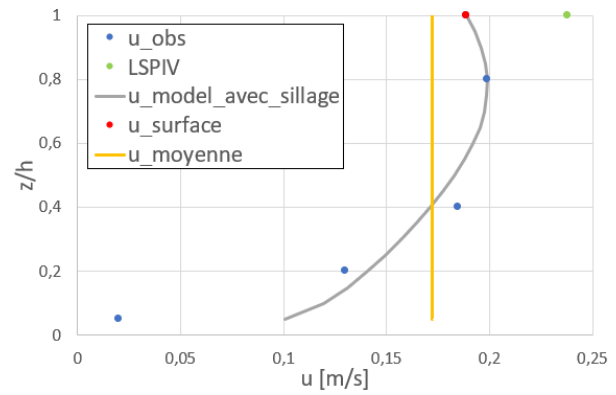


FIGURE 4.13 – Profil de vitesse 5

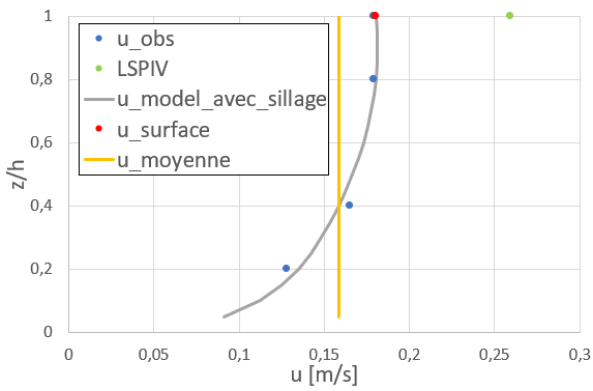


FIGURE 4.11 – Profil de vitesse 6

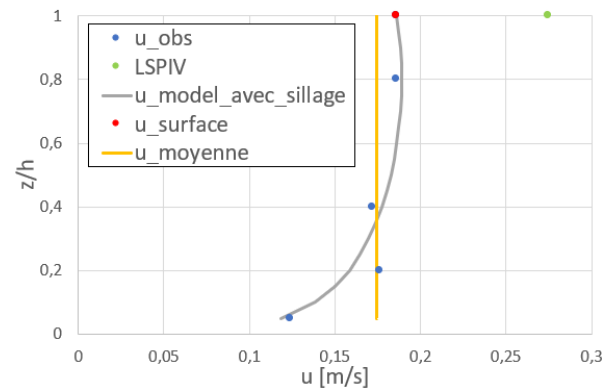


FIGURE 4.14 – Profil de vitesse 7

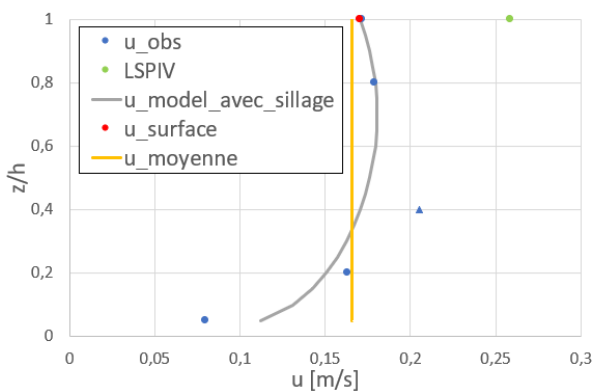


FIGURE 4.12 – Profil de vitesse 8

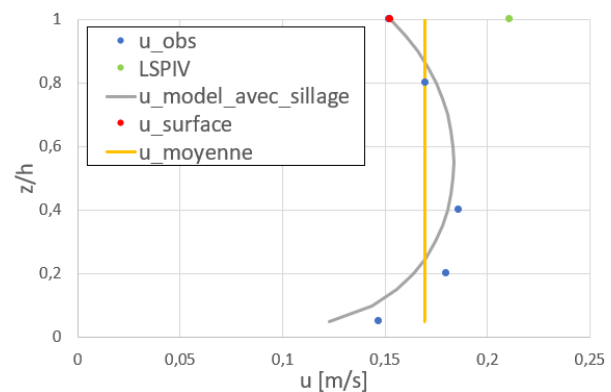


FIGURE 4.15 – Profil de vitesse 9

Chapitre 5

Conclusion et perspectives

La LSPIV est une technique de mesure de débit en développement très prometteuse. En effet, étant donné le caractère non-intrusif de cette technologie, elle pourrait servir à mesurer des débits extrêmes, ce qui est très complexe voire impossible de nos jours. Or, les débits extrêmes sont les débits les plus intéressants à connaître afin de pouvoir se protéger efficacement des crues mais aussi de pouvoir gérer les ressources en eau de façon optimale.

Les avantages de cette techniques sont nombreux :

- Facilité de mise en oeuvre
- Les résultats sont rapides
- Vu qu'il s'agit d'une technique non-intrusive, l'opérateur et le matériel sont en sécurité
- Le matériel est relativement peu cher comparé à d'autres techniques
- Elle est utilisable pour mesurer des débits extrêmes aussi bien en période de crues qu'en période d'étiages

Néanmoins, cette technique manque toujours de précision à l'heure actuelle. En effet, la LSPIV mesure la vitesse de surface et non le débit. Par conséquent, il nous faut connaître le moyen de passer de la vitesse de surface au débit. Pour ce faire, on utilise l'index de vitesse. Cependant, l'index de vitesse est variable et trouver sa juste valeur sur une section est assez complexe.

Dans ce travail, les premières mesures traitées sont des mesures prises en laboratoires sur le canal du LEMSC (Laboratoire d'essais mécaniques, structure et génie civil) à Louvain-la-Neuve. L'avantage des mesures en laboratoire est qu'il est possible de modifier facilement plusieurs paramètres tels que le débit et la hauteur d'eau. Les résultats obtenus pour ces mesures sont concluants. En effet, au centre de l'écoulement, l'index de vitesse local est de 0,9 soit la valeur attendue si l'on se réfère aux valeurs obtenues par Rantz [18]. Sur les bords de l'écoulement, on trouve un index de vitesse local de 1,07. De nouveau cette valeur est tout à fait plausible bien que peut être légèrement trop élevée selon Rantz.

Les résultats obtenus sur base des mesures de Rion manquent du fait qu'il n'y ait que très peu de données disponibles et qu'il est par conséquent impossible de croiser ces résultats avec ceux de d'autres données. A l'avenir, il serait intéressant d'effectuer des mesures sur plus de verticales mais aussi plus proche des bords. De plus, il faudrait effectuer ce travail pour plusieurs débits et hauteurs d'eau. Cela permettrait de pouvoir croiser les données, et donc les résultats mais aussi de bien caractériser les effets aux bords du canal ainsi que le phénomène de plongée. Il serait en effet très positif de savoir à quelle distance des bords cet effet devient négligeable.

La deuxième série de données analysée sont les données de Louis réalisées sur le canal fossé Naboth-Est en Haïti. Les résultats concernant les index de vitesse varient entre 0,89 et 1,41. Cette dernière valeur est beaucoup plus élevée que ce à quoi on peut s'attendre selon Rantz [18] puisque les valeurs maximale de l'index de vitesse sont de l'ordre de 1,08.

Ces résultats sont basées sur des mesures comportant un grand nombre de points pour chaque verticale. Cependant on ne connaît pas la position de la verticale par rapport au bord du canal. Au vu des valeurs élevées obtenues, il pourrait être intéressant de reproduire ces conditions d'écoulement afin de réaliser des mesures sur toute la section et de comprendre dans quelles condition l'index de vitesse peut être aussi grand. En effet, dans le cas de mesure LSPIV, si un phénomène de plongée aussi important n'est pas détecté, cela peut mener à une grande sous-estimation du débit.

Enfin les dernières données analysées sont celles de Asselberghs et Peeters. Ces données ont été prises sur la Ligne à Saint-Martin (Belgique). Les résultats obtenus pour ces mesures sont assez variables. Cependant, on retrouve à nouveau une valeur d'environ 0,9 pour les profils se rapprochant de profils logarithmiques.

Il est possible de critiquer ces résultats de par le fait que le modèle de chaque verticale est établi sur base de 4 ou 5 points. Il est en effet très complexe de calibrer une courbe correctement avec aussi peu de données. En effet, plus le nombre de point est faible, plus les erreurs de mesures se répercuteront dans le modèle. Il serait donc intéressant de réaliser des mesures avec plus de points à l'avenir afin que la précision des modèles soit maximale. Un autre problème des mesures d'Asselberghs et Peeters est que proche des bords, là où la hauteur d'eau est plus faible, les mesures sont seulement effectuées en 3 points, ce qui est trop peu pour pouvoir les analyser. Ainsi, proche des bords, il n'y a aucun résultat ce qui est dommageable étant donné que ce sont les zones où le phénomène de plongée est le plus important.

De manière générale, il serait aussi important de pouvoir déterminer un index de vitesse général à une section afin de pouvoir l'utiliser dans une méthode comme la LSPIV. Pour ce faire, il faut avoir des mesures sur un maximum de verticales avec un maximum de points. Lors des mesures LSPIV, il est aussi important que l'écoulement soit le plus proche possible d'un écoulement uniforme. En effet, dans un écoulement uniforme, le phénomène de plongée existe uniquement près des bords et est facilement quantifiable. Ainsi, réaliser des mesures LSPIV sur des sections où l'écoulement est uniforme permet à la méthode d'être plus fiable.

Bibliographie

- [1] Jean-Loup PUGET. *Le changement Climatique*. In : URL : <https://www.academie-sciences.fr/pdf/rapport/rapport261010.pdf>.
- [2] D. Muyldermans & AL. *Hydraulique Appliquée*. consulté le 26.05.2020. 2013. URL : [sites . uclouvain.be/didacticiel-hydraulique](http://sites.uclouvain.be/didacticiel-hydraulique).
- [3] J.P. GIRARDOT. *Capteurs et instrumentation utilisés en océanographie physique*. consulté le 01.03.2020. URL : <http://www-connex.e.univ-brest.fr/lpo/instrumentation/index.html>.
- [4] Billat C. consulté le 01.03.2020. Mars 2011. URL : http://www.graie.org/graie/graiedoc/reseaux/autosurv/F7_tracage.pdf.
- [5] FAO. *Estimations du débit d'eau*. consulté le 26.05.2020. 2020. URL : www.fao.org/tempref/FI/CDrom/FAO_Training/FAO_Training/General/x6705f/x6705f03.htm#top.
- [6] NIVUS. *Mesure de débit par mesure de niveau hydraulique*. consulté le 26.05.2020. 2020. URL : <https://www.nivus.fr/fr/service-telechargement/know-how/mesure-de-debit-par-mesure-de-niveau-hydraulique/>.
- [7] Guillaume RION. *Vitesse moyenne d'un écoulement à surface libre à partir de mesures des vitesses de surface par une méthode LSPIV*. Louvain-la-Neuve, Belgique : UCL, 2017.
- [8] A.J. RAUDVIKI. *Analysis of resistance in fluvial channels*. USA : Journal of the hydraulics Division, No HY5, 1967.
- [9] Y. ZECH. *Hydraulique Fluviale*. Louvain-la-Neuve, Belgique : Université Catholique de Louvain, 2008.
- [10] S. Soares FRAZAO. *Cours d'hydraulique fluviale*. Slides : UCLouvain, 2020.
- [11] S. LOUIS. *Continuer à irriguer quand les lacs-réservoirs de barrage souffrent de taux de sédimentation sévères - Recommandations d'amélioration de la gestion du principal canal d'irrigation alimenté par l'ouvrage répartiteur de Canneau (Haïti)*. Bruxelles, Belgique : Université Libre de Bruxelles, 2019.
- [12] M. CELLINO. *Experimental study of suspension flow in open channels*. Lausanne, Suisse : EPFL, 1998.
- [13] L. PRANDTL. *Neuere ergebnisse der turbulenzforschung*. VDI-Ztschr, 1933.
- [14] W.H Graf & AL. *Traité de génie civil de l'école polytechnique fédérale de Lausanne Volume 16 Hydraulique fluviale écoulement et phénomènes de transport dans les canaux à géométrie simple*. Lausanne, Suisse : Presses polytechniques et universitaires romandes, 2000.
- [15] G. COLES. *The law of the wake in the turbulent boundary layer*. consulté le 14.04.2020. Janvier 1956. URL : https://authors.library.caltech.edu/38400/1/Coles_1956p191.pdf.
- [16] J. Guo & P.Y. JULIEN. *Application of the modified log-wake law in open-channels*. pp 17-23. 2008. URL : JournalAppliedFluidMechanics.

-
- [17] Hauet & AL. *Méthodes innovantes pour la mesure des débits fluviaux en continu : profileur doppler fixe horizontal (hadcp) et analyse d'images (lspiv)*. pages 123-131 : La Houille Blanche - Revue internationale de l'eau, 2009.
- [18] S.E. Rantz & AL. *Measurement and Computation of Streamflow : Volume 1. Measurement of Stage and Discharge*. Washington, USA : US Geological Survey Water Supply Paper, 2175, 1982.
- [19] *Tube de Pitot*. consulté le 13.02.2020. 2010. URL : http://www.composelec.com/tube_de_pitot.php.
- [20] Dr. WESSMANN. consulté le 13.02.2020. 2005. URL : https://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:Pitot_tube_with_Bernoullis_law_fr.svg.
- [21] Riadh Ben HAMOUDA. *Dynamique des fluides incompressibles réels*. consulté le 23.04.2020. 2005. URL : <https://www.uvt.rnu.tn/resources-uvt/cours/mecanique/chap4/Chapitre-2/index.html>.
- [22] U. HOGSTROM. *Review of some basic characteristics of the atmospheric surface layer*. Suisse : Boundary-Layer Meteorology Vol.78, 1996.
- [23] H. HAMISULTANE. *Econométrie*. consulté le 10.05.2020. 2002. URL : <https://halshs.archives-ouvertes.fr/cel-01261163/document>.
- [24] Wang & AL. *Velocity profile of sediment suspensions and comparison of log-low and wake-law*. pp 211-217. 2001. URL : JournalofHydraulicResearch.
- [25] P. Asselberghs & B. PEETERS. *Mesure du niveau d'eau et de la vitesse de l'écoulement par imagerie en laboratoire et en rivière naturelle*. Louvain-la-Neuve, Belgique : Université Catholique de Louvain, 2019.

UNIVERSITÉ CATHOLIQUE DE LOUVAIN

École polytechnique de Louvain

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