



Faculté de génie

Département de génie civil

# L'IMPACT DE LA RUGOSITÉ ET DU NIVEAU D'EAU SUR LES COURANTS SECONDAIRES EN RIVIÈRE NATURELLE

Mémoire de maîtrise

Spécialité : génie civil

Patrick NICOL

Jury:

Jay LACEY (directeur)

Hubert CABANA (rapporteur)

Bertrand CÔTÉ



# Résumé :

Ce mémoire traite de l'étude des écoulements en rivière naturelle. Plus précisément, l'impact de la granulométrie du lit des rivières, ainsi que de la profondeur d'eau sur la génération de courants secondaires y est analysé. Les courants secondaires sont causés par les effets de cisaillement ainsi que de la turbulence. Cependant, les structures d'écoulement telles que les courants secondaires peuvent être affectés par une multitude de facteurs et la majorité des recherches actuelles sur le domaine sont effectuées en laboratoire. Le but de ce projet est donc d'observer les courants secondaires en milieu naturel. Un vélocimètre acoustique Doppler (ADV) a été utilisé afin de déterminer les profils de vitesse *in situ* de différentes sections de rivières. Le lit de la rivière a été échantillonné afin d'en déterminer la granulométrie. Différentes bases théoriques sont explorées afin d'interpréter les profils de vitesse obtenus. La base théorique choisie est en mesure de décrire les processus physiques de la rivière naturelle ainsi que de permettre la caractérisation des phénomènes de courants secondaires. Selon les recherches effectuées, nous croyons que la granulométrie a un impact sur la structure des courants secondaire puisque ceux-ci dépendent de la rugosité du lit de la rivière. Or, la taille et la forme des grains du lit de la rivière ont certainement un impact sur la rugosité du fond de la rivière. Les effets anthropogéniques sur l'environnement, notamment sur les cours d'eau, sont de plus en plus reconnus. Afin de bien comprendre et mitiger les impacts dus à l'aménagement de notre environnement, il devient nécessaire de caractériser les processus physiques des rivières. Les courants secondaires sont liés à la résistance à l'écoulement des rivières et ont donc un impact considérable sur le comportement de celles-ci.

Mots clés : Rivière naturelle, canaux à surface libre, courants secondaires, granulométrie, vélocimètre acoustique Doppler (ADV), structure d'écoulement.

# Remerciements

J'aimerais remercier : Nicolas Simard, technicien en génie civil pour les pièces fabriquées pour le support de terrain ainsi que Nortek USA pour l'instrumentation, la formation et la résolution de problème de l'appareil.

Je désire aussi offrir mes remerciements à tous mes amis et collègues étudiants qui m'ont aidé lors de mes nombreuses sorties sur le terrain pour la collecte de données : Philippe Tremblay, Sandrine Twagirimana, Jason Duguay, Élyse Fournier ainsi que Mathieu Poitras.

J'aimerais aussi remercier ma famille pour leur soutien, de même que ma copine qui m'a épaulé tout au long de mon projet.

Je tiens à exprimer ma gratitude à Hydro-Québec pour les 2 bourses que j'ai reçues (bourse en hydraulique et bourse de persévérance), ainsi qu'à l'Université de Sherbrooke pour les bourses institutionnelles que j'ai reçues.

Finalement, je réserve des remerciements bien spéciaux à Jay Lacey, mon directeur de recherche, qui a su me diriger et m'appuyer tout au long de mon cheminement.



# Table des matières

Table des matières .....	v
Liste des figures .....	vii
Liste des symboles .....	x
<b>Chapitre 1 Introduction .....</b>	<b>2</b>
1.1 Contexte global du projet de recherche .....	3
1.2 Exposé de la problématique .....	6
<b>Chapitre 2 État de l'art .....</b>	<b>9</b>
2.1 Analyse de l'état de l'art .....	10
2.1.1 Les écoulements turbulents .....	10
2.1.2 L'interaction des courants secondaires avec l'écoulement .....	15
2.1.3 Intérêt d'acquérir des connaissances relatives aux courants secondaires .....	20
2.1.4 Géométrie des courants secondaires .....	21
2.2 Appareils de mesures et traitement des données .....	24
2.2.1 ADV .....	25
2.2.2 Limitations et précision des données .....	26
2.2.3 Traitement des données .....	27
<b>Chapitre 3 Définition du projet.....</b>	<b>28</b>
3.1 Définition et objectifs du projet de recherche .....	29
3.2 Contribution anticipée.....	29
3.3 Méthodologie.....	30
<b>Chapitre 4 Caractéristiques de courants secondaires <i>in situ</i> pour des rivières à lit de gravier .....</b>	<b>33</b>
4.1 Introduction.....	36
4.2 Theoretical framework.....	39
4.3 Field measurement and data processing .....	43
4.4 Results .....	48
4.5 Discussion.....	60
4.6 Conclusions.....	64
<b>Chapitre 5 Conclusions .....</b>	<b>66</b>
5.1 Conclusions.....	67
5.2 Contributions apportées.....	67
5.3 Axes de recherches futures .....	68

<b>Annexes .....</b>	<b>70</b>
<b>Annexe A Localisation des sites de collecte de données.....</b>	<b>71</b>
<b>Annexe B Données supplémentaires.....</b>	<b>75</b>
<i>B.1 Choix de l'appareil de mesure .....</i>	<i>76</i>
<i>B.2 Figures et données supplémentaires.....</i>	<i>77</i>
<b>Annexe C Correspondance avec le journal <i>Water Resources Research</i> .....</b>	<b>96</b>
<b>Bibliographie.....</b>	<b>99</b>

# Liste des figures

Figure 1.1 – Schéma illustrant les courants secondaires par rapport à l’écoulement (Nezu et Nakagawa, 1993).....	4
Figure 1.2 - Représentation schématique du mécanisme de génération de courant secondaire pour un écoulement en canal droit (Nezu & Nakagawa, 1993) .....	7
Figure 1.3- Exemple de lignes d’isovitesse d’un écoulement à surface libre (Nezu & Nakagawa, 1993).....	8
Figure 2.1 – Exemple de profil de vitesse moyenne illustrant les régions internes et externes de l’écoulement (Kironoto & Graf, 1994). .....	13
Figure 2.2 – Présentation des sous-divisions de l’écoulement selon différentes régions, en fonction de taille de la rugosité (Nikora et al. 2007b).. .....	17
Figure 2.3 – Divisions des couches d’écoulement avec (a) haute submersion relative et (b) faible submersion relative (Manes et al. 2007).. .....	19
Figure 2.4 – Exemple de distribution transversale de vorticité et présentation schématique d’un patron de courants secondaires (Rodriguez et Garcia, 2008) .....	22
Figure 2.5 - Effet des cellules de courants secondaires sur la distribution des contraintes de cisaillement (Omran & Knight, 2010).....	23
Figure 2.6 – Illustration des composantes de l’appareil de mesure ADV (image adaptée de Nortek USA) .	25
Figure 2.7 – Localisation du point d’échantillonnage. La zone hachurée représente la zone d’écoulement où l’échantillonnage est impossible d� aux limitations de l’appareil de mesure. ....	26
Figure 3.1– Support de terrain en place pour la collecte de données avec l’ADV .....	32
Figure 4.1 - Plan view of bed topography. Flow direction is from left to right. Bed elevation is expressed in meters (a) Site #1 (b) Site #2 (c) Site #3.....	44
Figure 4.2 - Particle size distribution for investigated sites.....	45
Figure 4.3 - Field mounting frame for the ADV (flow direction from right to left).....	46
Figure 4.4 - Vertical velocity ( $w$ ) distribution scaled by spatial average longitudinal velocity ( $\langle u \rangle$ ) with schematics of observed secondary currents at Site #3 (a) Run 3.B (b) Run 3.C .....	51

Figure 4.5 - Distributions of hydrodynamic variables for Run 1.A: (a) $\mathbf{w} < \mathbf{u} >$ with schematics of observed secondary currents; (b) $\mathbf{u}$ distribution; (c) $-\rho\mathbf{u}\mathbf{w}$ ; (d) TKE distribution .....	54
Figure 4.6 – Run 1.B spatial distributions of (a) $\mathbf{w} < \mathbf{u} >$ (b) $\tau_b$ (c) vertical $\mathbf{u}$ profiles where red and blue lines indicate upflow and downflow regions, respectively; and (d) vertical $-\rho\mathbf{u}\mathbf{w}$ profiles. For subplots (c) and (d) .....	56
Figure 4.7 - Run 3.A spatial distributions of (a) $\mathbf{w} < \mathbf{u} >$ (b) $\tau_b$ (c) vertical $\mathbf{u}$ profiles where red and blue lines indicate upflow and downflow regions, respectively; and (d) vertical $-\rho\mathbf{u}\mathbf{w}$ profiles. For subplots (c) and (d) .....	57
Figure 4.8 – Vertical velocity ( $\mathbf{w}$ ) distribution scaled by spatial average longitudinal velocity ( $< \mathbf{u} >$ ) with schematics of observed secondary currents at the three different sites (a) Run 1.C (b) Run 2.C (c) Run 3.C. ....	59
Figure A.1 – Plan de localisation globale des sites de collecte de données .....	72
Figure A.2 – Vue rapprochée des sites de collecte de données #1 et #2 .....	73
Figure A.3 – Vue rapprochée du site de collecte de données #3 .....	74
Figure B.1 – Exemple de profil d'écart type obtenu avec l'ADVP .....	76
Figure B.2 – Distribution de la vitesse verticale divisée par la vitesse longitudinale moyenne (essai 1.A) ..	78
Figure B.3 – Distribution de la vitesse longitudinale moyenne (essai 1.A).....	78
Figure B.4 – Distribution de l'énergie cinétique turbulente (essai 1.A) .....	79
Figure B.5 – Distribution du cisaillement de Reynolds dans le plan XZ (essai 1.A).....	79
Figure B.6 – Distribution de la vitesse verticale divisée par la vitesse longitudinale moyenne (essai 1.B) ..	80
Figure B.7 – Distribution de la vitesse longitudinale moyenne (essai 1.B).....	80
Figure B.8 – Distribution de l'énergie cinétique turbulente (essai 1.B).....	81
Figure B.9 – Distribution du cisaillement de Reynolds dans le plan XZ (essai 1.B).....	81
Figure B.10 – Distribution de la vitesse verticale divisée par la vitesse longitudinale moyenne (essai 1.C) ..	82
Figure B.11 – Distribution de la vitesse longitudinale moyenne (essai 1.C).....	82
Figure B.12 – Distribution de l'énergie cinétique turbulente (essai 1.C).....	83
Figure B.13 – Distribution du cisaillement de Reynolds dans le plan XZ (essai 1.C).....	83

Figure B.14 – Distribution de la vitesse verticale divisée par la vitesse longitudinale moyenne (essai 2.A)	84
Figure B.15 – Distribution de la vitesse longitudinale moyenne (essai 2.A)	84
Figure B.16 – Distribution de l'énergie cinétique turbulente (essai 2.A)	85
Figure B.17 – Distribution du cisaillement de Reynolds dans le plan XZ (essai 2.A)	85
Figure B.18 – Distribution de la vitesse verticale divisée par la vitesse longitudinale moyenne (essai 2.B)	86
Figure B.19 – Distribution de la vitesse longitudinale moyenne (essai 2.B)	86
Figure B.20 – Distribution de l'énergie cinétique turbulente (essai 2.B)	87
Figure B.21 – Distribution du cisaillement de Reynolds dans le plan XZ (essai 2.B)	87
Figure B.22 – Distribution de la vitesse verticale divisée par la vitesse longitudinale moyenne (essai 2.C)	88
Figure B.23 – Distribution de la vitesse longitudinale moyenne (essai 2.C)	88
Figure B.24 – Distribution de l'énergie cinétique turbulente (essai 2.C)	89
Figure B.25 – Distribution du cisaillement de Reynolds dans le plan XZ (essai 2.C)	89
Figure B.26 – Distribution de la vitesse verticale divisée par la vitesse longitudinale moyenne (essai 3.A)	90
Figure B.27 – Distribution de la vitesse longitudinale moyenne (essai 3.A)	90
Figure B.28 – Distribution de l'énergie cinétique turbulente (essai 3.A)	91
Figure B.29 – Distribution du cisaillement de Reynolds dans le plan XZ (essai 3.A)	91
Figure B.30 – Distribution de la vitesse verticale divisée par la vitesse longitudinale moyenne (essai 3.B)	92
Figure B.31 – Distribution de la vitesse longitudinale moyenne (essai 3.B)	92
Figure B.32 – Distribution de l'énergie cinétique turbulente (essai 3.B)	93
Figure B.33 – Distribution du cisaillement de Reynolds dans le plan XZ (essai 3.B)	93
Figure B.34 – Distribution de la vitesse verticale divisée par la vitesse longitudinale moyenne (essai 3.C)	94
Figure B.35 – Distribution de la vitesse longitudinale moyenne (essai 3.C)	94
Figure B.36 – Distribution de l'énergie cinétique turbulente (essai 3.C)	95
Figure B.37 – Distribution du cisaillement de Reynolds dans le plan XZ (essai 3.C)	95

# Liste des symboles

$Y$  = distance verticale à partir du lit, m

$H$  = profondeur d'eau maximale, m

$h$  = profondeur d'eau locale à la position horizontale en cours, m

$b$  = largeur d'eau, m

$u^*$  = vitesse de frottement, m/s

$u, v$  et  $w$  = vitesse instantanée dans l'axe longitudinal, latéral et vertical, respectivement, m/s

$\bar{u}, \bar{v}$  et  $\bar{w}$  = moyenne temporelle des vitesses, m/s

$u', v'$  et  $w'$  = fluctuations instantanées des vitesses, m/s

$\rho$  = masse volumique du fluide, kg/m<sup>3</sup>

$\tau_b$  = cisaillement au lit, N/m<sup>2</sup>

$\tau_b^x$  et  $\tau_b^y$  = composantes x et y du cisaillement dans les directions principales et transversales, respectivement

$Q$  = débit à travers la section échantillonnée, m<sup>3</sup>/s

$\langle \bar{u} \rangle$  = vitesse moyenne dans la section échantillonnée, m/s

$\bar{u}_{max}$  = vitesse longitudinale maximale dans la section échantillonnée, m/s

$A$  = aire de la section échantillonnée, m<sup>2</sup>



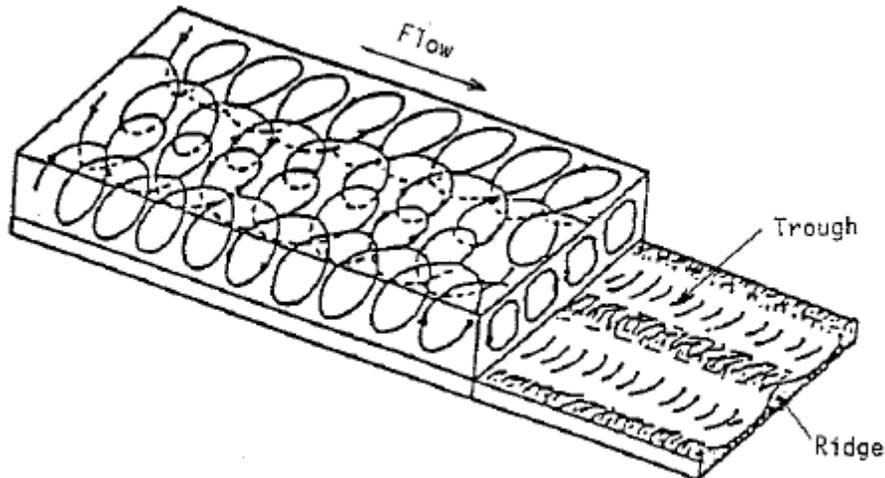
# Chapitre 1

## Introduction

## 1.1 Contexte global du projet de recherche

Les cours d'eau sont présents partout autour de nous, mais il est parfois difficile de comprendre leur importance relativement à l'environnement et même à la société. Il y a donc une nécessité de faire avancer les connaissances dans le domaine des rivières naturelles. Effectivement, les activités humaines ont certes des impacts sur l'environnement, entre autres sur les rivières. Par exemple, l'urbanisation a pour effet d'augmenter les débits dans les cours d'eau. Certaines activités telles que l'agriculture et l'industrialisation rejettent des polluants ainsi que des nutriments dans les cours d'eau. Afin de comprendre les enjeux et de bien caractériser les problématiques, une bonne compréhension du comportement des rivières est de mise. Or, les processus physiques présents dans les rivières sont complexes et difficiles à détailler. Il est donc important de caractériser ces phénomènes afin de bien interpréter le comportement des rivières.

Les processus physiques ainsi que les échanges sont nombreux dans les rivières. Le présent mémoire traitera des structures d'écoulement présentes dans les rivières naturelles. Les exemples les plus communs de structures d'écoulements sont les tourbillons ou les vortex que l'on peut voir apparaître en surface des rivières. Les structures d'écoulement qui sont analysées dans le cadre de ce projet sont les courants secondaires. Ces écoulements, qui sont illustrés à la Figure 1.1, sont des courants circulaires qui se développent dans le plan perpendiculaire au sens de l'écoulement. Une description plus détaillée de ces structures d'écoulement sera présentée à la section 2.1.



**Figure 1.1 – Schéma illustrant les courants secondaires par rapport à l'écoulement (Nezu et Nakagawa, 1993)**

Les courants secondaires peuvent avoir un impact notable sur les différents phénomènes physiques ayant lieu dans les rivières. À titre d'exemple, les courants secondaires affectent le champ d'écoulement sur toute la profondeur, de même que les patrons d'écoulements à la surface. Des zones des courants transversaux avec des directions en alternance, ainsi que des tourbillons sont générées à la surface de l'eau et ceux-ci sont en relation avec les vitesses verticales positive et négative, qui elles sont causées par les courants secondaires. Les patrons d'écoulement résultants de ces phénomènes contribuent au transport de sédiments près du lit, modifient le lit ainsi que la forme du canal et peuvent influencer significativement l'échange de gaz, de chaleur, de momentum ainsi que d'aération à la surface (Nezu & Nakagawa, 1993). La formation de bande de sable sur le lit de canaux droits est un autre phénomène qui est reconnu depuis longtemps et qui est souvent expliqué par un certain agencement impliquant les interactions entre le lit et l'écoulement (e.g., McLean, 1981; Nezu and Nakagawa, 1993; Garcia, 2008; Parker, 2008). Les courants secondaires constituent un bon exemple de ces interactions.

Depuis longtemps, il est largement accepté que les écoulements secondaires jouent un rôle significatif dans la déformation de canaux, la stabilité des berges et le transport de sédiments. Historiquement, une des premières explications des courants secondaires impliquait les sédiments en suspensions comme étant un des facteurs clés dans la génération de ces courants (Vanoni, 1946). De plus, les variations des vitesses verticales pourraient favoriser la remise en suspension de sédiments et/ou polluants dans les cours d'eau. Ces exemples soulignent l'impact qu'ont les courants secondaires sur différents phénomènes présents dans les écoulements ainsi que les liens étroits entre ces différents phénomènes.

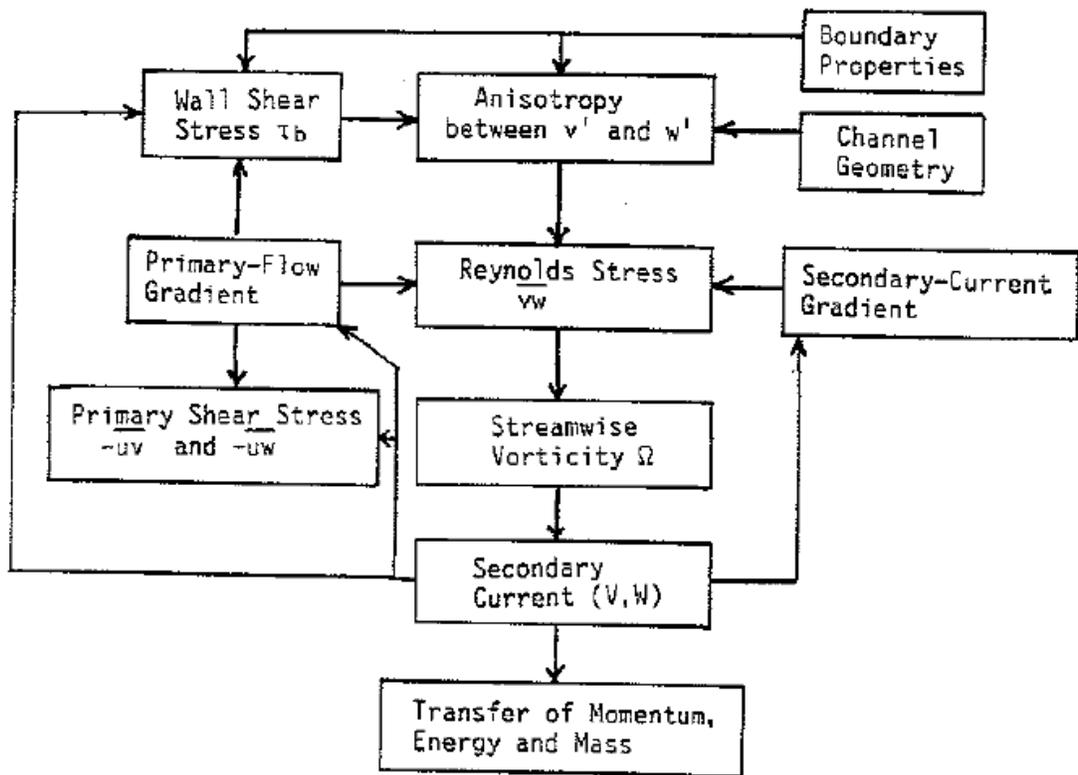
Les rivières représentent un équilibre naturel de sorte qu'une petite perturbation peut affecter la rivière de manière significative. L'écoulement dans une rivière naturelle est donc influencé par une multitude de facteurs. Par exemple, la géométrie, la rugosité, ainsi que la granulométrie ont toutes une influence sur l'écoulement. La rugosité du lit a un grand impact sur la résistance à l'écoulement. Il s'agit donc d'un paramètre qui exerce une forte influence sur l'écoulement en rivière naturelle. De plus, tel que mentionné précédemment, les courants secondaires ont également une influence considérable sur l'écoulement. Ainsi, dans le but de mieux comprendre les courants secondaires, les paramètres qui les influencent ainsi que l'influence que ceux-ci peuvent avoir sur l'écoulement, le présent projet traite de la relation entre la rugosité du lit d'une rivière et la structure d'écoulement dans celle-ci. L'influence du niveau d'eau est également analysée. Comme les lits de rivières sont formés d'une distribution de sable, gravier et cailloux, ceux-ci sont inégaux et leurs granulométries peuvent varier grandement, et ce, même à différents endroits au sein d'une même rivière. Dans le cadre du projet présenté, on tentera de voir l'effet de la rugosité sur les phénomènes de courants secondaires dans une section de rivière.

Les courants secondaires ont fait l'objet de plusieurs études, mais peu d'entre elles ont analysé l'occurrence de ces courants en milieu naturel. Il est donc important de se

pencher sur la question afin de valider que les modèles théoriques développés en laboratoire soient bel et bien applicables dans le cas d'une rivière naturelle.

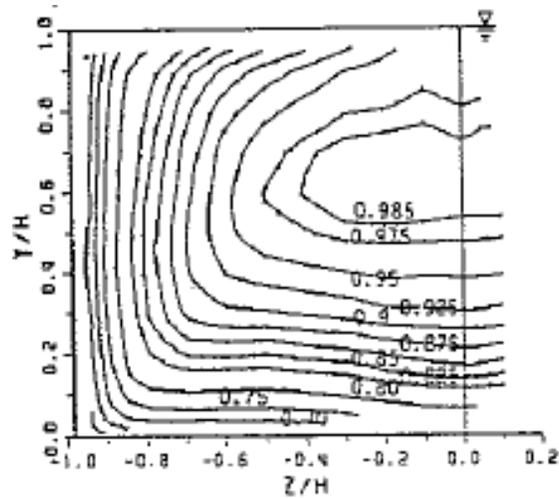
## **1.2 Exposé de la problématique**

Les courants secondaires peuvent se manifester de différentes manières. En 1926, Prandtl classifia ce phénomène selon deux grandes classes. La première, connue sous le nom de courants secondaires du premier type de Prandtl, désigne les courants secondaires générés par la vorticité longitudinale. Un exemple de ce type de courant secondaire est celui causé par les rivières courb es. Le deuxième type de courant secondaire proposé par Prandtl est causé par l'anisotropie de la turbulence. Ce type d'écoulement, qui est souvent défini comme des courants secondaires engendrés par la turbulence, ne nécessite aucune courbure du canal (Nikora & Roy, 2010). Ainsi, contrairement aux courants secondaires du premier type qui peuvent se développer même en régime laminaire, ceux du second type ne peuvent être générés qu'en milieu turbulent. Le présent projet se concentre sur les courants secondaires du second type. Un schéma de leur mécanisme de génération est présenté à la Figure 1.2.



**Figure 1.2 - Représentation schématique du mécanisme de génération de courant secondaire pour un écoulement en canal droit (Nezu & Nakagawa, 1993)**

Selon différentes sources, la vitesse des courants secondaires est de l'ordre de 2-3 % de la vitesse de l'écoulement principal (Tominaga et al. 1989; Nezu & Nakagawa, 1993; Blanckaert et al., 2010). Cette faible vitesse fait en sorte que ces courants sont difficiles à détecter. Cependant, leur faible vitesse n'implique pas que l'on peut ignorer ces courants. Les courants secondaires ont un impact direct sur différents facteurs de l'écoulement. Par exemple, ceux-ci influencent la distribution de la vitesse au sein d'une section de rivière, ainsi que la distribution des contraintes de cisaillements. Par exemple, le phénomène du « velocity-dip », qui est bien connu dans les écoulements à surface libre est un résultat direct des courants secondaires (Nezu & Nakagawa, 1993). Ce phénomène a pour effet que la vitesse maximale d'un écoulement se trouve non pas à la surface d'un canal, mais plutôt tout juste sous celle-ci (voir Figure 1.3).



**Figure 1.3- Exemple de lignes d'isovitesse d'un écoulement à surface libre (Nezu & Nakagawa, 1993). L'axe vertical représente la profondeur relative alors que l'axe horizontal illustre la position horizontale de la mesure par rapport à la demi-largeur du canal (H)**

Ceci est une propriété importante des écoulements à surface libre et démontre donc la grande implication des courants secondaires sur ce type d'écoulement, soulevant ainsi la pertinence d'étudier afin de mieux comprendre le comportement des courants secondaires. De plus, l'évaluation des structures d'écoulements turbulents dans les rivières, les lacs et le long des côtes est essentielle afin de fournir des prédictions précises du mouvement des sédiments et contaminants (Yang & Chow, 2008).

## Chapitre 2

### État de l'art

## 2.1 Analyse de l'état de l'art

Au sein des cours d'eau, nombreux sont les phénomènes imperceptibles à première vue. Ce chapitre offre donc une revue de littérature couvrant la théorie de base des phénomènes qui mènent à la génération de courants secondaires. Afin de situer le projet actuel par rapport aux différentes recherches effectuées dans le domaine, des recherches en lien avec le sujet seront présentées. Ainsi, l'interaction entre les écoulements et les courants secondaires, de même que la géométrie des courants secondaires sera discutée.

### 2.1.1 Les écoulements turbulents

Il existe beaucoup d'études en lien avec les courants secondaires du second type de Prandtl. Comme ceux-ci sont étroitement liés à la turbulence, plusieurs articles sont pertinents pour ce projet. Dans un milieu turbulent, une description de l'écoulement à tous les points dans le temps et dans l'espace n'est pas réalisable. Plutôt, selon Reynolds (1895), des équations gouvernant les valeurs moyennes ont été développées, par exemple, pour la vitesse moyenne de l'écoulement (Tennekes & Lumley, 1972). Les équations de Reynolds de même que l'équation de continuité ont été développées à partir des équations de Navier-Stokes.

L'équation de continuité pour l'écoulement à surface libre dans un canal droit, dans lequel on suppose que tous les dérivés de vitesses par  $\frac{\partial}{\partial x}$  sont égaux à zéro, est la suivante (voir page *ix* pour la liste des symboles) :

$$\frac{\partial V}{\partial y} + \frac{\partial W}{\partial z} = 0$$

Et les équations de Reynolds (Reynolds averaged Navier-Stokes ou RANS) pour l'écoulement à surface libre dans un canal droit sont les suivantes :

$$V \frac{\partial U}{\partial y} + W \frac{\partial U}{\partial z} = g \sin \theta - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial(-\overline{uv})}{\partial y} + \frac{\partial(-\overline{uw})}{\partial z} + \nu \nabla^2 U$$

$$V \frac{\partial V}{\partial y} + W \frac{\partial V}{\partial z} = -g \cos \theta - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial(-\overline{v^2})}{\partial y} + \frac{\partial(-\overline{vw})}{\partial z} + \nu \nabla^2 V$$

$$V \frac{\partial W}{\partial y} + W \frac{\partial W}{\partial z} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial(-\overline{vw})}{\partial y} + \frac{\partial(-\overline{w^2})}{\partial z} + \nu \nabla^2 W$$

Où  $P$  est la pression moyenne,  $\rho$  est la masse volumique du fluide,  $g$  est l'accélération gravitationnelle,  $\nu$  est la viscosité cinématique,  $\theta$  est l'angle de la pente du canal avec l'axe horizontal et le symbole  $\nabla^2$  désigne l'opérateur laplacien. Le principe général de ces équations est que les vitesses d'écoulement sont divisées en deux parties. Premièrement une vitesse moyenne ( $U$ ) et une fluctuation de la vitesse moyenne ( $u$ ). Il est possible de dériver et d'interpréter ces équations d'une multitude de façons. On peut ainsi en faire ressortir les tendances des écoulements et ainsi interpréter l'apparition de structures d'écoulements. Par exemple, la loi du mur (Nezu & Rodi, 1986) décrit l'interaction de l'écoulement avec le fond du canal. Il est donc possible de prédire la vitesse moyenne de l'écoulement à différentes distances de la paroi.

Dû à la condition d'adhérence, le fluide à la paroi a une vitesse de zéro. En s'éloignant du mur, la vitesse augmente selon une distribution logarithmique. L'équation du mur est la suivante :

$$\frac{u}{u_*} = \frac{1}{k} \ln \left( \frac{y}{k_s} \right) + Br$$

Où  $u$  est la vitesse mesurée à une distance  $y$  du niveau de référence (m/s);  $u_*$  est la vitesse de frottement (m/s) ;  $k$  est la constante van Karman, qui est d'environ 0.4 (sans unités), (Hinze, 1959);  $k_s$  est la hauteur de la rugosité (m);  $Br$  est une constante

d'intégration (sans unités). Lorsque des données de vitesse sont disponibles, il est possible d'évaluer les valeurs de cisaillement au lit ( $\tau_b$ ) en utilisant cette équation avec la méthode de Clauser. Cette méthode consiste à appliquer la méthode des moindres carrés sur les données de vitesses de la région interne (Kironoto & Graf, 1994). Ceci permet d'évaluer la vitesse de friction et donc de déduire la valeur de cisaillement au lit.

En dehors de la région interne, soit dans le « outer region » les déviations des profils de vitesses par rapport à la loi du mur semblent suivre la distribution de vitesse de Coles. Aussi appelée la loi du « Wake », cette fonction suit l'équation suivante :

$$\frac{U_c - u}{u_*} = -\frac{1}{k} \ln\left(\frac{y}{\delta}\right) + \frac{2\Pi}{k} \cos^2\left(\frac{\pi x}{\delta}\right)$$

Où  $U_c$  est la vitesse maximum à un point du profil (m/s);  $\delta$  est la distance (m); entre le niveau de référence et le point où  $u = U_c$ ;  $\Pi$  est le paramètre de Coles (sans unités) qui tient compte de la déviation par rapport à la loi du mur. Cette équation permet donc de décrire la vitesse de l'écoulement à différents points à partir du fond, même à une distance trop éloignée pour que la loi du mur soit encore valide.

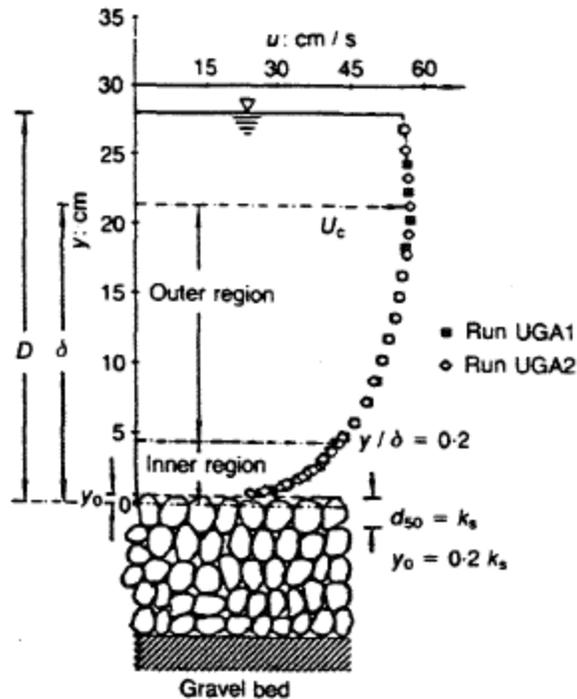


Figure 2.1 – Exemple de profil de vitesse moyenne illustrant les régions internes et externes de l'écoulement (Kironoto & Graf, 1994). Où  $d_{50}$  est la taille de la particule moyenne pour laquelle 50% sont plus fins.  $k_s$  est la valeur de rugosité de sable équivalent de Nikuradse.  $y_0$  est le niveau de référence (mesuré vers le bas, à partir du dessus des éléments de rugosité)

Différentes études ont analysé ces modèles d'écoulements. Kironoto et Graf (1994) ont mené des expériences en laboratoire sur des canaux rugueux à surface libre. Des écoulements à grande profondeur relative (grande hauteur d'eau par rapport à la taille des grains) ont été étudiés. Les auteurs ont trouvé que la loi du mur décrivait bien la région interne alors que la loi du « Wake » gouvernait la région externe (voir Figure 2.1).

Au fil du temps, différentes études ont permis de détailler d'avantage ces modèles d'écoulements de sorte que les régions d'écoulements ont été définies plus précisément. Ainsi, classiquement, les écoulements à surface libre peuvent être divisés en 3 sous-régions : la région à surface-libre, la région intermédiaire, ainsi que la région du « mur » (Nezu and Nakagawa, 1993). La région à surface-libre ( $0.6 < y/h \leq 1.0$ ), où  $y$  est la distance verticale à partir du lit et  $h$  est la hauteur d'eau, est gouvernée par les

variables externes (ex : la profondeur d'eau) et le profil de vitesse dévie légèrement de la loi logarithmique. La région du mur ( $y/h < 0.15-0.2$ ) est contrôlée par les variables internes telles que la vitesse de frottement ( $u_*$ ) et la hauteur de rugosité. Dans cette région, le profil est généralement supposé comme étant logarithmique. L'écoulement  $y$  est sous l'influence directe d'éléments individuels de la rugosité donc la structure d'écoulement n'est pas spatialement homogène (Manes et al., 2007). La région intermédiaire ( $0.15-0.2 \leq y/h \leq 0.6$ ), n'est pas sous une forte influence de la surface libre, ni des propriétés du « mur ». La combinaison des régions à surface libre ainsi qu'intermédiaire compose la couche externe ou « Outer region » (Nezu and Nakagawa, 1993). Lorsque les éléments de rugosité sont assez grands, la région logarithmique peut être perturbée, menant ainsi à différentes régions d'écoulement qui peuvent être classifiées selon leur submersion relative (Nikora, 2007b). Cette classification en 4 régions distinctes : la région externe, la région logarithmique, la « form-induced sublayer » qui est influencée par la forme de la rugosité, ainsi que la région d'interface qui se situe entre les points bas et les sommets de la rugosité.

Les comportements des écoulements selon ces régions sont des relations à deux dimensions et celles-ci sont essentielles afin de comprendre la turbulence des écoulements à surface libre. Elles permettent de décrire les tendances des écoulements et aident à la compréhension générale des écoulements turbulents. Cependant, dans la réalité, les écoulements naturels se développent en trois dimensions et il est donc impossible de représenter ces écoulements réalistement à l'aide de modèle de turbulence à deux dimensions (Nezu & Nakagawa, 1993). Comme les courants secondaires sont des structures d'écoulement en trois dimensions, il est donc nécessaire de développer un modèle tridimensionnel permettant de décrire les courants secondaires.

### 2.1.2 L'interaction des courants secondaires avec l'écoulement

Afin de mieux caractériser les courants secondaires et ainsi de bien décrire leur mouvement en trois dimensions, il est nécessaire de comprendre leur interaction avec l'écoulement. Les distributions de vitesse à deux dimensions décrites à la section précédente sont-elles affectées par les courants secondaires? La réponse à cette question ne fait pas l'unanimité. En effet, selon Rodriguez et Garcia (2008), les courants secondaires affectent le transfert vertical de momentum et donc la distribution principale de vitesse, mais la loi logarithmique s'appliquerait toujours. Ceci revient à affirmer que les courants secondaires n'empêchent pas le respect de la loi du mur. À l'opposé, Yang (2004) affirme que la loi du mur ne tient pas lorsque la vitesse perpendiculaire aux murs n'est pas zéro. Les courants secondaires étant perpendiculaires aux murs, cela revient à affirmer que la loi logarithmique ne tient pas s'il y a des courants secondaires. Cependant, dans une étude de terrain, Lamarre et Roy (2005) ont observé que malgré la structure de sédiment complexe des rivières à lit de gravier; il n'y aurait pas une grande variation dans la forme générale des profils de vitesses mesurés.

Un autre article qui permet de mieux comprendre l'impact des courants secondaires sur les écoulements est celui d'Ansari (2011). Celui-ci s'intéresse à la distribution des contraintes de cisaillement aux murs et au lit de canaux trapézoïdaux sous l'effet des courants secondaires. L'étude a analysé l'impact de l'inclinaison des murs, du ratio de la profondeur par rapport à la largeur du canal, ainsi que de la rugosité des murs sur la distribution des contraintes de cisaillement. Cette étude a démontré que les courants secondaires apportaient une contribution significative aux contraintes de cisaillement aux parois.

Noss et al. (2010) ont étudié les échanges de momentum en rivière naturelle afin d'observer la contribution de la turbulence et des courants secondaires sur la distribution des contraintes de cisaillement. Cette étude est l'une des rares qui se

penchent sur l'observation de courants secondaires en rivière naturelle où le fond présente une distribution hautement non uniforme. Elle présente les différentes méthodes d'estimation des contraintes de cisaillements, et ce, pour des conditions d'écoulements uniforme ainsi que non uniforme. Les auteurs ont développé une nouvelle méthode pour analyser les contraintes de cisaillement affectant la distribution longitudinale des vitesses. Contrairement aux autres méthodes discutées dans l'article, celle-ci est applicable pour les lits de rivières très inégaux. À l'aide de cette méthode, ils ont conclu que les courants secondaires jouaient un rôle déterminant dans les variations de momentum.

La nouvelle méthode présentée par Noss et al. (2010) comporte une formulation mathématique non conventionnelle. Ainsi, des vecteurs à deux dimensions sont utilisés dans l'équation proposée. Ceci permet, par exemple, à un vecteur  $n$  de représenter les vitesses latérales (en  $v$  ainsi qu'en  $w$ ). Comme les vecteurs comportent deux dimensions, les vecteurs doivent être traités comme des nombres complexes. Les règles mathématiques de multiplication et d'addition des nombres complexes s'appliquent donc à ces vecteurs. Cette nouvelle formulation simplifie le calcul de la contrainte de cisaillement totale en trois dimensions en utilisant seulement deux termes, et ce, sans perte d'information (Noss et al. 2010).

L'article d'Ansari, de même que celui de Noss sont de grand intérêt, car ils analysent les liens entre les contraintes de cisaillement et les courants secondaires. Ces contraintes sont une source importante de résistance hydraulique et jouent donc un rôle important dans les écoulements.

Tel que mentionné précédemment, une estimation tridimensionnelle de l'écoulement est nécessaire afin de bien décrire les phénomènes de courants secondaires. Nikora et al. (2007a) propose une nouvelle méthode permettant de décrire les écoulements tridimensionnels. Les équations de Reynolds discutées précédemment considèrent la moyenne temporelle des vitesses d'écoulement. Dans l'article de 2007, Nikora et ses coauteurs proposent d'utiliser cette moyenne temporelle en combinaison avec une

moyenne dans l'espace. Ainsi, une valeur doublement moyennée est obtenue. Les auteurs proposent donc des équations doublement moyennées (Double averaged Navier-Stokes) pour décrire les écoulements. Cette procédure fournit de nouvelles équations de momentum et de continuité pour un fluide, qui sont moyennées dans le temps et dans l'espace et qui contiennent explicitement des termes additionnels importants tels que les contraintes induites par la forme (Nikora et al., 2007a).

Nikora et al. (2007b) démontre certaines applications de la méthode proposée. Différentes couches d'écoulement y sont présentées. La Figure 2.2 montre ces couches pour un lit poreux. Les 4 types d'écoulements distincts en fonction de la profondeur de l'écoulement sont également illustrés sur cette figure. L'article mentionne que la distribution des vitesses pour la couche d'interface, soit entre les points bas et les sommets de la rugosité, est peu développée (Nikora et al., 2007b). La méthodologie de la double moyenne contribue à résoudre ce problème.

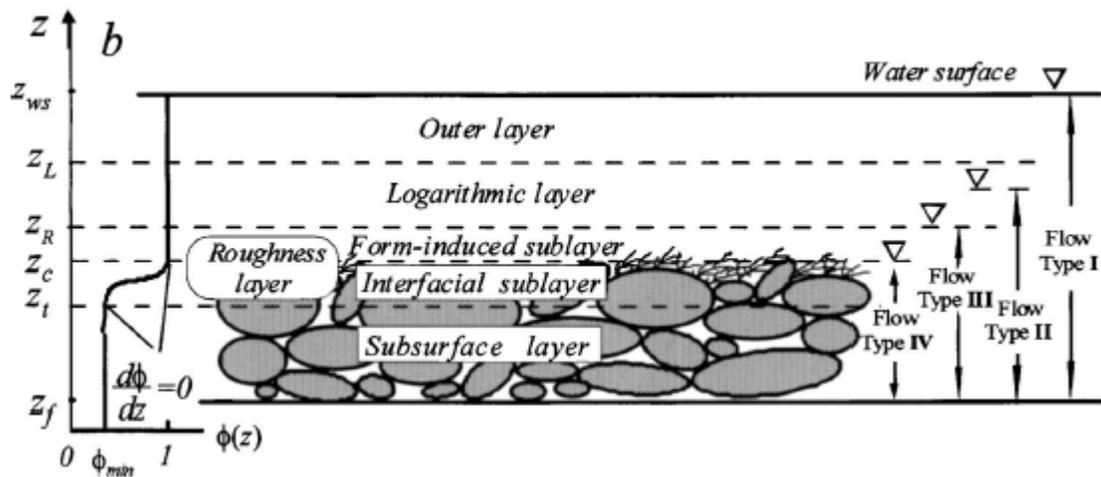
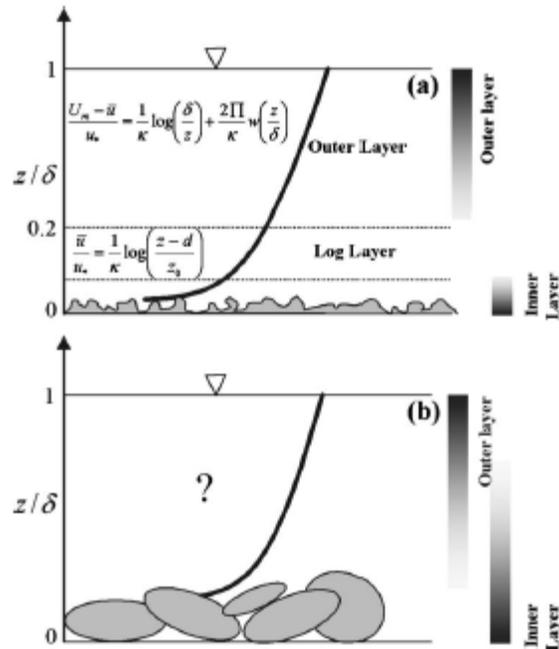


Figure 2.2 – Présentation des sous-divisions de l'écoulement selon différentes régions, en fonction de taille de la rugosité (Nikora et al. 2007b). Où  $z_{ws}$  est l'élévation de la surface de l'eau,  $z_L$  de la couche logarithmique,  $z_R$  de la couche de rugosité,  $z_c$  des sommets de la rugosité,  $z_t$  des points bas de la rugosité et  $z_f$  du fond du canal.

Manes et al. (2007) ont étudié la distribution des couches d'écoulements avec une faible submersion relative en canal rectangulaire. Le cas observé est illustré à la Figure 2.3 et présente un écoulement où la profondeur est trop faible par rapport à la hauteur de la rugosité pour former une couche logarithmique, mais assez profonde pour assurer une couche externe. Cet article indique que la géométrie de la rugosité a un impact sur l'écoulement. Cet article peut donc s'avérer intéressant si la rivière étudiée est peu profonde avec une granulométrie très grossière.

Les articles de Nikora (2007b) et Manes et al. (2007) permettent de voir l'interaction de l'écoulement avec un fond rugueux. Des différences dans les valeurs de cisaillement au lit ont été observées entre les points bas et les sommets de la rugosité. Il a également été noté que ces différences s'atténuent lorsque le niveau d'eau augmente par rapport à la taille de la rugosité. Le cas d'une rivière naturelle entre certainement dans cette catégorie de canal à fond rugueux. Ainsi, pour une rivière, selon la distribution du fond de celle-ci, il peut y avoir une interaction importante entre les points hauts et bas de la rugosité. Cependant, la méthode employant les équations doublement moyennées semble bien s'appliquer pour un fond relativement plat. Le fond d'une rivière naturelle peut comporter des variations beaucoup plus importantes. Il reste donc à voir si cette méthode est applicable à ce type de milieu.



**Figure 2.3 – Divisions des couches d'écoulement avec (a) haute submersion relative et (b) faible submersion relative (Manes et al. 2007). Où  $z$  est la profondeur et  $\delta$  est l'épaisseur de la couche limite.**

Hardy et al. (2010) ont analysé les structures d'écoulement turbulent pour des cas d'écoulement peu profond sur lit de gravier. Ce type de lit est très hétérogène et possède une faible submersion par rapport à la taille de la rugosité. Ces recherches ont permis de conclure que la grande rugosité relative causée par ce type d'écoulement peut avoir une grande importance sur la génération et l'évolution de structures d'écoulements turbulents, notamment, les courants secondaires. Ainsi, la hauteur d'eau, conjointement avec la taille de la rugosité, semble avoir un impact sur les courants secondaires.

### **2.1.3 Intérêt d'acquérir des connaissances relatives aux courants secondaires**

Nikora a effectué plusieurs recherches dans le domaine des écoulements à surface libre. Accompagné d'André Roy, il s'est notamment penché plus spécifiquement sur le phénomène des courants secondaires et ils ont rédigé une revue à ce sujet. Cette revue (Nikora et Roy, 2010), constitue une bonne source d'informations en ce qui a trait aux aspects théoriques des courants secondaires. Dans cet article, on présente une revue des bases théoriques, des avancements récents ainsi que des défis actuels dans le domaine. Cet article souligne également la nécessité d'acquérir des connaissances relatives aux courants secondaires et ce, pour différents domaines, soulignant ainsi l'importance des courants secondaires selon une perspective multidisciplinaire.

Bien que de récentes avancées significatives doivent être reconnues dans la compréhension des mécanismes des écoulements secondaires et leur interaction avec d'autres processus des rivières, il y a toujours plusieurs lacunes dans les connaissances actuelles qui doivent être abordées. En particulier, ces lacunes sont en lien avec la quantification et la prédiction des effets des courants secondaires sur le transport de sédiments, la résistance hydraulique, les mélanges et la morphodynamique. De plus, le rôle des courants secondaires dans le fonctionnement des écosystèmes de rivières doit être identifié. L'effet inhérent des courants secondaires sur les vitesses moyennes, la turbulence, les mélanges ainsi que la dynamique des sédiments est susceptible d'être reflété dans la structure et le fonctionnement des écosystèmes, mais cet effet reste à comprendre et être quantifié (Nikora et Roy, 2010).

Bien que l'effet des courants secondaires sur la résistance hydraulique soit largement reconnu, sa nature n'est toujours pas claire. Ainsi, son incorporation explicite dans les équations de résistance demeure un problème non résolu (e.g., Yen, 2002). En général, les courants secondaires modifient la distribution transversale des vitesses moyennes, des forces de cisaillement, ainsi que des valeurs de cisaillement au lit (Nikora et Roy, 2010).

Les écoulements en rivière et en canaux à surface libres qui présentent des structures complexes en trois dimensions et des structures d'écoulement ne peuvent être représentés comme des écoulements à deux dimensions. Ainsi, les modèles de turbulence à 2 dimensions peuvent ne pas donner des résultats adéquats pour des écoulements tridimensionnels. L'identification du type de courants secondaires est essentielle afin de comprendre les structures d'écoulement turbulent 3D puisque les courants secondaires jouent un rôle important dans le transfert transversal de momentum, d'énergie, de chaleur ainsi que de masse dans un canal à surface libre (Albayrak et Lemmin, 2011).

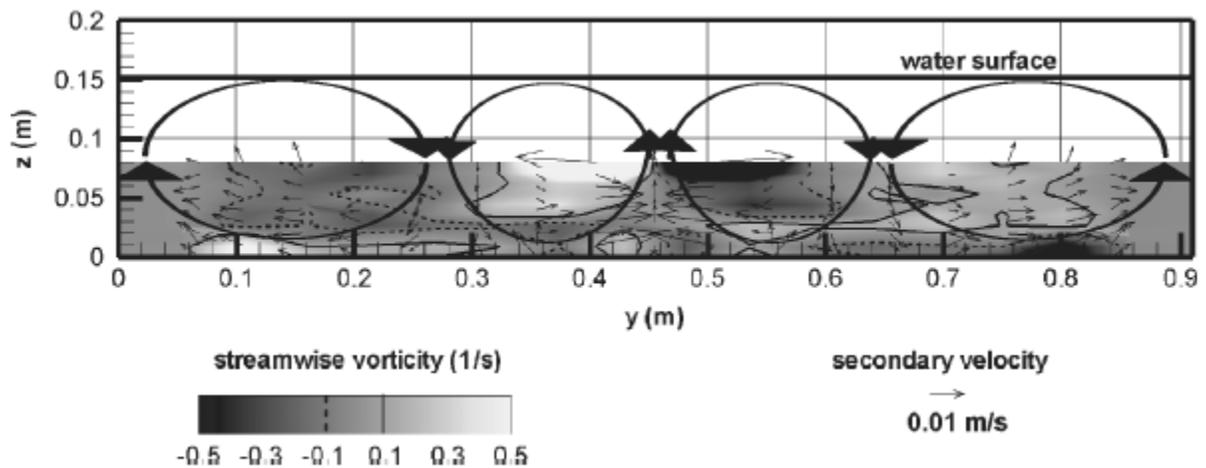
Finalement, les modélisations hydrauliques deviennent de plus en plus avancées de sorte que des modélisations en trois dimensions sont maintenant réalisables. Afin d'obtenir une grande précision avec ces modèles, et ainsi pouvoir représenter réalistement certaines particularités des écoulements tridimensionnels, on se doit de bien comprendre les phénomènes impliqués, notamment les courants secondaires.

#### **2.1.4 Géométrie des courants secondaires**

La géométrie des courants secondaires a fait l'objet de nombreuses études. Les patrons de courants secondaires ont notamment été étudiés. Tominaga et al. (1989) ont effectué différents tests en laboratoire. Des canaux rectangulaires ainsi que des canaux trapézoïdaux ont été utilisés. Ils ont conclu que les canaux à surfaces libres présentaient des patrons de courants secondaires bien différents que les canaux en charge. La section du canal joue également un rôle déterminant sur les patrons de courants secondaires puisque l'étude citée plus haut mentionne que les canaux rectangulaires et trapézoïdaux ont présenté des structures de courants secondaires différentes.

L'ouvrage de Nezu et Nakagawa (1993) indique que dans les canaux étroits, les courants secondaires sont influencés par les coins du canal. Il y est également mentionné que pour un canal étant plus large que 2.5 fois la profondeur d'écoulement (ratio  $b/h > 2.5$ ),

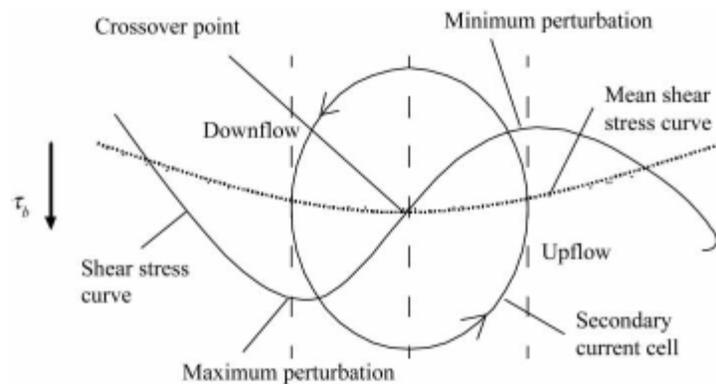
les courants secondaires ne pouvaient pas être observés. Cependant, ces observations étaient basées sur des expériences en canal à parois lisses. Blanckaert et al. (2010) ont regardé l'influence de la profondeur d'eau, de l'inclinaison et de la rugosité des berges sur les patrons d'écoulements et les contraintes de cisaillement dues aux courants secondaires. Ils ont conclu qu'un patron stable de courants secondaires couvrant la largeur complète du lit peut seulement être observé si la rugosité est suffisante pour fournir les oscillations transversales nécessaires au cisaillement du lit ainsi que le cisaillement turbulent de Reynolds. Ils ont également conclu que les conditions présentes dans le cas de rivières naturelles fournissent effectivement la rugosité nécessaire afin de générer des courants secondaires sur la largeur complète de la rivière. Ceci est donc de grande importance pour le mémoire actuel, car les résultats indiquent que la rugosité de la rivière joue un rôle déterminant dans le développement de courants secondaires.



**Figure 2.4 – Exemple de distribution transversale de vorticité et présentation schématique d'un patron de courants secondaires (Rodriguez et Garcia, 2008)**

Rodriguez et Garcia (2008) ont observé les structures d'écoulement à trois dimensions et la turbulence en canal rectiligne à lit rugueux. Leurs expériences ont été conduites dans un canal dans des conditions présentant un ratio de largeur sur profondeur de 8.5 et 6.3. Ces valeurs se situent entre les valeurs de classification d'un canal large ( $b/h >$

10) et d'un canal étroit ( $b/h < 5$ ). Leurs recherches étaient axées sur les courants secondaires et leurs résultats appuient également le fait que les courants secondaires se développent à des ratios de  $b/h > 2.5$ . La Figure 2.4 démontre la distribution transversale de vorticité. Les cellules de courants secondaires y sont également indiquées.



**Figure 2.5 - Effet des cellules de courants secondaires sur la distribution des contraintes de cisaillement (Omran & Knight, 2010)**

Dans les canaux larges, les courants secondaires se développent en cellules distinctes. Omran et Knight (2010) ont proposé une méthode de modélisation de cellule de courants secondaires en canal rectangulaire. Leurs recherches portent sur la distribution des contraintes de cisaillement aux parois. Dans le cadre de leurs recherches, ils ont testé une méthode d'approximation de la distribution des contraintes de cisaillements. Ils ont conclu que cette méthode n'était pas efficace puisqu'elle ne tient pas compte des courants secondaires. Leurs recherches ont également dévoilé que la présence de courants secondaires perturbe la distribution des contraintes de cisaillement. La Figure 2.5 illustre cette perturbation. On remarque sur cette figure que la courbe de contrainte de cisaillement est influencée par la cellule de courant secondaire. Celle-ci augmente dans la zone de courants descendants et elle est réduite à l'endroit où le courant

remonte. Cette variation de contrainte de cisaillement constitue un indicateur intéressant afin de délimiter les différentes cellules de courants secondaires.

## **2.2 Appareils de mesures et traitement des données**

Afin de détecter les courants secondaires en rivière naturelle, une investigation détaillée des vitesses dans les 3 axes ( $X$ ,  $Y$ , et  $Z$ ) est nécessaire. Pour ce faire, un vélocimètre acoustique Doppler (ADV) a été utilisé. Il s'agit du seul instrument actuellement disponible pour mesurer des vitesses à haute fréquence en trois dimensions. L'ADV est donc l'appareil le plus précis disponible pour la collecte des données nécessaire au présent projet. De plus, sa petite taille et sa manœuvrabilité en font un équipement de choix pour les collectes de données sur le terrain (Sukhodolov & Roads, 2001). MacVicar et al. (2007) compare l'utilisation d'un ADV avec un courantomètre électromagnétique. Il mentionne que l'ADV est non-intrusif, ne requiert pas de calibration, mesure à plus haute fréquence, en trois dimensions et avec un volume d'échantillonnage plus faible que le courantomètre électromagnétique. Ces particularités ont mené à l'acceptation rapide et l'utilisation de l'ADV dans une large gamme d'environnements (MacVicar et al., 2007). À titre informatif, d'autres types d'appareil de mesure, tel que la vélocimétrie par image de particule (PIV), fournissent des résultats précis et très détaillés. Cependant, ce type d'appareil nécessite l'utilisation de laser et de caméras difficilement utilisables dans le contexte du projet actuel, soit en rivière naturelle.

### 2.2.1 ADV

Ce type d'appareil possède un émetteur ainsi que 4 capteurs positionnés selon 2 axes en forme de croix (voir Figure 2.6). Tel qu'expliqué dans l'article de Voulgaris & Trowbridge (1998), l'appareil envoie des ondes sonores qui sont reflétées par les particules d'eau en mouvement dans la rivière. Le mouvement des particules va ainsi causer un décalage de la fréquence des ondes envoyées (effet Doppler). C'est ce décalage qui permet d'évaluer la vitesse. L'appareil permet donc de déduire précisément les vitesses dans les trois directions ( $X$ ,  $Y$ ,  $Z$ ). La vitesse en  $Z$  est captée selon les deux axes de capteurs et permet donc d'obtenir une valeur redondante qui peut être utile lors de la validation de données. La fréquence du signal ainsi que la durée d'échantillonnage peuvent être ajustées selon les besoins. La taille de la cellule de prise de donnée offre également une certaine flexibilité.

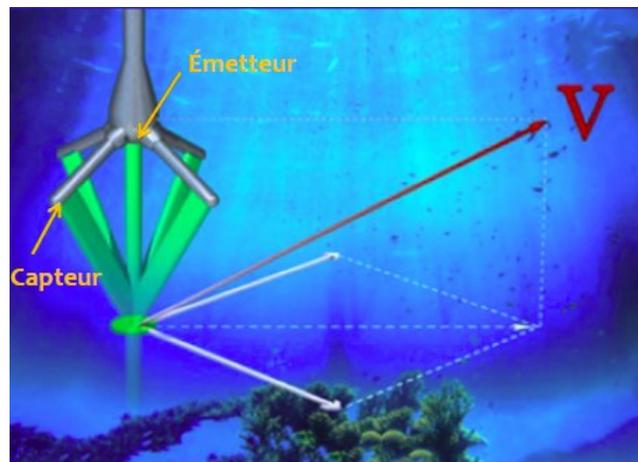
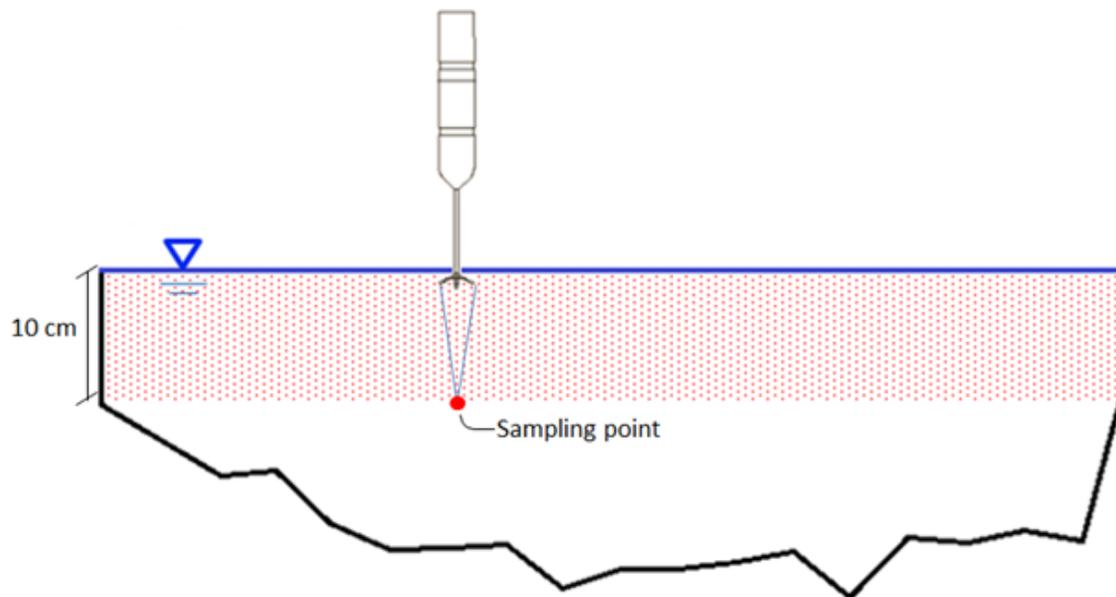


Figure 2.6 – Illustration des composantes de l'appareil de mesure ADV (image adaptée de Nortek USA)

## 2.2.2 Limitations et précision des données

Selon la fiche du fabricant, la précision de l'appareil de mesure est 0,5% de la valeur mesurée  $\pm 1$  mm/s. L'appareil de mesure est fixé à un support terrain permettant un positionnement stable sur des axes gradués. La précision pour la position de l'appareil est évaluée à 0,5cm dans l'axe horizontal et de 0,5mm pour la position verticale. La tête de l'appareil, qui doit être submergée pour permettre la lecture, permet d'obtenir une mesure à un point situé à 10 cm plus bas que la tête de l'appareil. Ainsi, il est donc impossible d'obtenir des vitesses pour le premier 10 cm de l'écoulement à partir de la surface. La Figure 2.7 illustre une section d'écoulement avec la zone où l'appareil n'est pas en mesure de prendre de lecture.



**Figure 2.7 – Localisation du point d'échantillonnage. La zone hachurée représente la zone d'écoulement où l'échantillonnage est impossible dû aux limitations de l'appareil de mesure.**

L'appareil est également limité lors de la collecte de données près du lit de la rivière. Comme le signal envoyé par l'appareil est une onde sonore, il est possible que celle-ci frappe le fond inégal du lit de la rivière et revienne sous forme d'écho. Ce phénomène

peut donc détériorer le signal capté. Afin d'éviter ce type d'altération, il a été déterminé que lors de la collecte de données, le point le plus près du lit serait limité à une distance de 0,5 cm du fond.

### 2.2.3 Traitement des données

Le logiciel MATLAB a été utilisé afin de programmer des outils pour aider dans le traitement de données brutes ainsi que dans la présentation et visualisation des données récoltées. Ainsi, les données ont pu être traitées pour enlever les crêtes dans le signal. La qualité des données récoltées a pu être évaluée en comparant la force du signal par rapport au bruit capté par l'appareil. Pour ce faire, la méthode proposée par Lacey et Rennie (2012) a été utilisée. Un critère du rejet de ratio de bruit par rapport au signal de 0.5 a été utilisé. Par la suite, des rotations ont été effectuées sur les séries de données afin de corriger tout écart entre l'alignement de l'appareil et l'axe principal de courant. De plus, des graphiques ont été générés afin d'inspecter visuellement les séries des données afin de valider la cohérence de celle-ci et de détecter leur validité générale. Les données moyennes et turbulentes ont par la suite été compilées pour chacune des collectes de données effectuées. Ainsi, les vitesses moyennes, ainsi que les contraintes de Reynolds ont été évaluées selon les trois axes. De plus, les valeurs d'énergie cinétique turbulente ont été calculées à partir des fluctuations de vitesses. L'équation suivante démontre le calcul effectué.

$$TKE = (\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2})/2$$

Afin de faciliter l'analyse et l'interprétation des données récoltées, différents types de graphiques ont été générés pour chacune des variables mentionnées précédemment.

## Chapitre 3

### Définition du projet

### **3.1 Définition et objectifs du projet de recherche**

La recherche à fine échelle liée aux courants secondaires étant relativement nouvelle, plusieurs questions restent à répondre. La question posée dans le cadre de cette recherche est la suivante : quel est l'impact de la profondeur de l'eau et de la granulométrie sur le développement de courants secondaires en rivières naturelles? Plus précisément, on tentera de déterminer, si le niveau d'eau et la taille des grains du lit de la rivière ont un impact sur la structure des courants secondaires. Par exemple, si le nombre de cellules est influencé par ces paramètres, ou encore si les courants provenant des coins de la rivière sont plus ou moins importants. Afin de trouver réponse à cette question, les profils de vitesse tridimensionnels devront être relevés *in situ* pour quelques sections de rivières.

Ensuite, les vitesses devront être interprétées afin de comprendre les structures d'écoulement présentes. Cette approche permettra d'observer les phénomènes de courants secondaires en rivière naturelle. Ces actions seront répétées dans différentes sections de rivières comportant des granulométries différentes. En comparant les structures d'écoulement des différentes sections, nous tenterons de voir si la taille des grains du lit de la rivière joue un rôle déterminant dans le développement de courants secondaires.

### **3.2 Contribution anticipée**

Suite aux recherches effectuées dans le cadre de ce projet, nous pensons que la granulométrie ainsi que la hauteur d'eau auront effectivement un impact sur la structure des courants secondaires. Des études précédentes ont conclu que la génération de courants secondaires était influencée par la distribution de la rugosité du lit du canal (Blanckaert et al., 2010). Comme la taille et la forme des grains ont certainement un impact sur la rugosité du lit de la rivière, il est logique de penser que la

granulométrie influencera les courants secondaires. De plus, comme la hauteur d'eau en comparaison avec la taille de la rugosité se reflète dans un changement de rugosité relative, il est anticipé que la profondeur d'eau aura un impact sur les courants secondaires. Cependant, comme Blanckaert et al. (2010) s'agit d'une étude en canal, il sera intéressant de voir si les résultats sont applicables en rivière naturelle.

Ceci soulève une autre contribution qu'apportera ce projet de recherche puisque la plupart des études traitant des courants secondaires ont été effectuées en laboratoire. Il s'agit d'un milieu plus facilement contrôlable pour la prise de données. Cependant, les processus et les interactions sont beaucoup plus nombreux dans un écoulement en milieu naturel. La réalisation d'une étude en rivière naturelle permettra donc d'obtenir des données tenant compte de ces facteurs.

Globalement, cette recherche permettra donc de mieux comprendre les mécanismes de génération de courants secondaires ainsi que de déterminer si la granulométrie, ainsi que la hauteur d'eau, sont des facteurs influents pour ceux-ci. Tel qu'exprimé précédemment, il y a une nécessité d'accroître les connaissances des processus physiques impliqués dans l'écoulement de rivières naturelles. Ce projet de recherche contribuera donc à détailler ces processus.

### **3.3 Méthodologie**

Afin de rendre ce projet à terme, des sections de rivières dans les environs de Sherbrooke (voir cartes en Annexe A) seront choisies pour être étudiées. Les sections devront respecter certains critères de sélection. Par exemple, la profondeur de la rivière devra être inférieure à 0.80 m pour pouvoir avoir accès avec nos équipements. De plus, les sections choisies devront être situées sur un tronçon relativement droit de la rivière, car la courbure de la rivière engendre des courants secondaires de premier type. Ceux-ci peuvent perturber les phénomènes que nous voulons observer et ne sont donc pas

souhaitables. La topographie du lit de la rivière sera relevée aux endroits propices à la prise de données. Les données à recueillir sur le terrain seront la topographie, les profils de vitesse à différentes sections ainsi que des échantillons granulométriques du lit.

Pour les données topographiques, une station totale sera utilisée pour obtenir les coordonnées précises de la rivière et de son lit. Dans le cas de la granulométrie, le lit de la rivière sera échantillonné de manière représentative et les échantillons seront sujets à des analyses granulométriques pour ainsi déterminer la distribution de la taille des grains. La prise de données pour les profils de vitesse sera cependant plus complexe. Un vélocimètre acoustique Doppler (ADV) sera utilisé afin de mesurer les profils. L'utilisation d'un ADV pour la mesure de turbulence est discutée dans l'article de Chanson et al. (2007).

Afin de prendre les lectures en rivières naturelles de manière précise, l'ADV devra être fixé à un support mécanique (voir Figure 3.1). Ce support permettra de déplacer l'appareil de manière verticale, longitudinale ainsi que transversale. Les coordonnées du support seront relevées à l'aide de la station totale. Il sera ainsi possible de connaître précisément l'emplacement de l'appareil en relation avec la section de rivière.



**Figure 3.1– Support de terrain en place pour la collecte de données avec l’ADV**

Une fois les données recueillies, celles-ci devront être traitées. Dans un premier lieu, on devra s’assurer que les données sont bien perpendiculaires à l’appareil. Tel que mentionné dans l’article de Rodriguez et Garcia (2010), comme les vitesses des courants secondaires dans un canal rectiligne sont égales à seulement une fraction de la vitesse longitudinale, tout désalignement mineur du capteur peut altérer sévèrement le profil de vitesse obtenu. Une rotation des données est donc de mise afin de s’assurer que l’appareil est bien aligné avec le sens de l’écoulement. Finalement, les données devront être interprétées visuellement afin de détecter les courants secondaires. Notamment, des tendances de vitesses positives et négatives en alternance dans l’axe vertical témoignent de la présence de courants secondaires. Des graphiques seront générés afin d’offrir une bonne visualisation des résultats.

## Chapitre 4

### Caractéristiques de courants secondaires *in situ* pour des rivières à lit de gravier

# Avant-propos

## **Auteurs et affiliation:**

**Patrick Nicol**

Département de génie civil, Université de Sherbrooke, Québec, Canada

**Jay Lacey**

Département de génie civil, Université de Sherbrooke, Québec, Canada

**Date de soumission:** 09 mars 2015

**Journal:** Water Resources Research

**Titre:** Characteristics of in situ secondary currents in gravel-bed rivers

## **Contribution à la thèse:**

L'article suivant résume le travail expérimental qui a été effectué pour évaluer les caractéristiques des courants secondaires en rivière naturelle. Une description complète du montage expérimental est incluse. Une présentation des résultats ainsi que les analyses et discussions subséquentes y sont également présentées.

## **Preuve de soumission:**

Une preuve de soumission est présentée à l'annexe B sous forme de lettre de soumission de l'article au Journal de *Water Resources Research*.

## **Note:**

En attente des commentaires émis suite à la révision de l'article par le Journal, il est possible que la version finale diffère en certains égards de la version ici présentée.

# Characteristics of *in situ* secondary currents in gravel-bed rivers

Patrick Nicol and R.W. Jay Lacey, Department of Civil Engineering, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, J1K 2R1, Canada

Corresponding author: R.W.J. Lacey, Department of Civil Engineering, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec, J1K 2R1, Canada

## Key points

- Secondary currents were observed at all 3 field sites and scaled with flow depth
- Bed particle size was found to strengthen the magnitude of secondary currents
- Bed shear stress varied markedly in upflow and downflow regions

**Abstract:** This research compares the turbulent flow structure of three gravel-bed rivers located in the Eastern Townships, Quebec, Canada. Specifically the study investigates the occurrence of turbulent secondary currents (Prandtl's 2nd kind) under varying bed roughnesses and water depths. *In situ* instantaneous three-dimensional velocities were recorded using an acoustic Doppler velocimeter (ADV). The dimensions and magnitudes of secondary current cells in different flow conditions are presented. The results indicate the presence of secondary currents throughout all the investigated cross-sections. The observed secondary currents were found to scale with the flow depth as well as to be influenced by bed roughness. The secondary circulations were found to have an impact on the vertical velocity distribution as well as the vertical Reynolds shear stress distribution. Bed shear stress showed variations ranging between 49-78% in adjacent regions of downflow vs. upflow.

**Index keywords:** 5419 Hydrology and fluvial processes, 1856 River channels, 1825 Geomorphology: fluvial

**Author keywords:** turbulence induced secondary currents, open-channel flow, gravel-bed rivers, particle size, bed roughness

## 4.1 Introduction

While natural river flows are generally assumed to be uniform, in reality the flow structure is three-dimensional as a result of heterogeneity of the bed roughness, as well as, variations in longitudinal and transverse river-bed geometry [Noss *et al.*, 2010]. River flows are free-surface, boundary layer flows in which three-dimensional large scale turbulent current structures have been shown to be present [Roy *et al.*, 2004]. Fluid parcels in which there is a correlation in the fluctuations can broadly be defined as coherent motions. These are generally thought to be resulting from eddies or vortices [Hussain, 1986]. The concept behind these structures is the acknowledgment of some order in turbulence. The definition of a coherent flow structure used herein is a region of three-dimensional flow in which one or more flow variable presents a tendency or a substantial correlation with another variable over time and/or space [Nikora and Roy, 2012].

A classic example of coherent flow structures is secondary currents (SC). These currents can be divided in two types. In the case where flow is not uniform in the streamwise direction, vortex stretching generates streamwise vorticity which is termed secondary currents of Prandtl's first kind [Nezu and Nakagawa, 1993]. Secondary currents occurring in river bends and meanders are typical examples of this type of secondary

flow [Nikora and Roy, 2012]. The second type, referred to as Prandtl's 2<sup>nd</sup> kind of secondary currents is driven by turbulence anisotropy and is the focus of the current study. These SC require no channel curvature to generate them and are often defined as turbulence-driven SC [Nikora and Roy, 2012]. SC have been described as large-scale streamwise vortical structures that form counter-rotating cells across the channel cross-section and typically have a velocity of about 2-3% of the streamwise velocity [Tominaga et al., 1989; Nezu and Nakagawa, 1993; Blanckaert et al., 2010; Albayrak and Lemmin, 2011]. The low transverse velocity (relative to streamwise velocity) makes SC hard to detect *in situ*. Hence, in order to detect the presence of SC and evaluate their properties, detailed 3-dimensionnal (3D) measurements are required [Nikora et al., 1998]

SC have been investigated in several laboratory flume studies [e.g., Rodriguez and Garcia, 2008; Albayrak and Lemmin, 2011]. Very few studies, however, have been conducted in natural streams. An exception is the study by Sukhodolov and Uijttewaai [2010], who through Reynolds shear stress profiles, identified SC near the banks of their study reach at low flows. Yet at higher water levels, the signature of SC was difficult to observe – suggesting a substantial change in flow structure with depth. A recent study by Chauvet et al. [2014] identified SC in a large river using an Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) and suggested that the SC persist throughout the entire cross section.

In natural streams, even at the simplest flow conditions, non-uniform flow is a ubiquitous phenomenon that is not fully understood. In order to predict sediment and

contaminant transport in rivers, lakes and coastal water where flow non-uniformity has a significant effect, knowledge of turbulence structures are essential [Yang and Chow, 2008]. Field studies are important because many physical processes occurring in natural rivers cannot be reproduced in the laboratory [Franca et al., 2008]. For example, the combination of processes such as vegetation interaction, as well as, rapid changes in topographic features such as bed roughness and channel planform modify flow structure by adding turbulent energy at a multitude of scales. *In situ* studies provide essential information on the combined effects of these processes.

The effect of bed roughness distribution on turbulent flow structures has been investigated in very few field studies due to the difficulty of collecting velocity and bed elevation data at high spatial resolution [e.g., Lamarre and Roy, 2005; Franca et al., 2008]. Most field measurements include a very restrained number of sampling points along transects. Field investigations of SC are almost non-existent as a detailed and dense sampling of instantaneous flow velocities as well as bed topography is necessary in order to assess the variability of turbulent flow structures in gravel-bed rivers.

The current study investigates the flow structure in 3 gravel-bed rivers in the Eastern Townships, Québec. The scope of the study was aimed at detecting the presence of SC in natural river conditions. Furthermore, the effects of flow depth and bed roughness on SC were examined. Instantaneous velocities were obtained using an acoustic Doppler velocimeter (ADV) mounted on a support frame. Velocity data series were collected at sites providing different bed roughness values and each site was assessed at 3 different

water depths. The results provide insightful information comparing secondary cells with varying roughness heights, roughness ratios as well as width/depth ratios. Reynolds shear stress distributions and bed shear stress were estimated showing relationships with SC upflow and downflow regions.

## 4.2 Theoretical framework

*Nezu and Nakagawa* [1993] show that turbulent induced SC are influenced by the corners of the channel (bed/bank interface). They also suggest that the aspect ratio  $b/H$  has a determinant effect on the formation and dynamics of SC (where  $b$  is the river width and  $H$  is the flow depth). This has been supported by recent research, where the number of SC cells across the channel has been found to vary proportionally with the aspect ratio [*Albayrak and Lemmin*, 2011]. *Nezu and Nakagawa* [1993] also indicated that for very wide channels, SC cells would die out in the middle of the channel. However, *Blanckaert et al.* [2010], as well as *Rodriguez and Garcia* [2008] observed otherwise. *Blanckaert et al.* [2010] conducted a laboratory experiment to study the effect of channel depth, bank inclination and bank roughness on the variability of flow patterns and boundary shear stress caused by SC. Their study concludes that, in order to sustain a stable pattern of SC through the entire width of a fixed horizontal bed, the roughness needs to be sufficient to provide the required transverse oscillations in the bed shear and the turbulent shear stresses. *Blanckaert et al.* [2010] also indicate that natural rivers should provide the necessary roughness for SC to be observed along the

complete width of the river. In open-channel flows, the bed roughness plays a major role in flow development. In gravel-bed rivers, particle size is very heterogeneous. This can lead to a broad range of bed roughness values not only from reach to reach but also within a single river cross-section. This non-uniformity of bed roughness can contribute to the generation of SC. Naturally occurring grain sorting has been found to accumulate fine sand over the ridges. Near the bed, the secondary flow caused by changes in bed roughness is directed, from rougher parts of the bed towards smoother parts. This destabilizing effect can be stronger in the case of non-uniform sediment size [Colombini, 1993]. In rivers where the bed is formed of gravel, the flow is typically shallow. The ratio of mean depth to effective roughness is usually less than 10-20 during high flow conditions and less than 5 at low flows [Hardy et al., 2010]. According to numerical model predictions, as well as laboratory and field measurements, for flows with high effective roughness heights, a significant influence on the generation, evolution, and dissipation of turbulent coherent flow structures is exerted by the microtopography of the bed [Hardy et al., 2010].

According to *Blanckaert et al.* [2010], turbulence driven SC are known to be efficient in advecting momentum, and thereby in altering the patterns of velocity, boundary shear stress, turbulence and sediment transport. When secondary cells are present, the vertical velocity component,  $w$ , will show an alternation of upwelling and downwelling regions. This will also have an impact on the shear stress distribution and hence sediment transport. Table 4.1 presents a summary of flow characteristics observed in the presence of SC [Nezu and Nakagawa, 1993]. Considering the vertical velocity

variations caused by the presence of SC, a good way to detect their presence is to investigate the spatial distribution of the time averaged vertical velocity component,  $\bar{w}$ .

**Table 4.1 - Summary of turbulent structures of cellular secondary currents in open channels [after Nezu and Nakagawa, 1993].**

Type	Upflow region ( $\bar{w} > 0$ )	Downflow region ( $\bar{w} < 0$ )
Primary (streamwise) mean velocity	-	+
Bed shear stress, $\tau_b$	-	+
Turbulence intensity farther from the bed	+	-
Reynolds shear stress farther from the bed	+	-
River bed form	Ridges	Troughs
Bed roughness	Fine sand	Coarse sand

As presented in Table 4.1, in the presence of SC, the bed shear stress,  $\tau_b$ , increases in regions of downflow, whereas it decreases in regions of upflow [Nezu and Nakagawa, 1993]. The bed shear stress influences the erosion taking place in the channel and hence the overall stability of the channel. Different methods of evaluating bed shear stress have been used, but few consider flows which are highly three dimensional. The logarithmic law of the wall is commonly used to estimate local bed shear stress using the Clauser method (by applying a least-square fitting of the data inner flow region). A local estimate of bed shear stress can also be obtained using the quadratic stress law which relates the average shear stress at the bed to the square of the average fluid velocity ( $\bar{u}$ ) [Schlichting, 1987]. This technique includes a drag coefficient which is not a constant and makes it therefore difficult to estimate accurately [Dietrich and Whiting, 1989].

When turbulence measurements are available, using the three components of velocity, the turbulent kinetic energy, TKE, method can be used to estimate  $\tau_b$ :

$$\tau_b = C_1 [0.5(\overline{u'^2} + \overline{v'^2} + \overline{w'^2})] = C_1(\text{TKE}) \quad (1)$$

Where  $C_1$  is a proportionality constant ( $\sim 0.19$ ) [Soulsby, 1983; Kim et al., 2000], and  $u', v', w'$  are the longitudinal, lateral and vertical velocity fluctuations, respectively. However, as the TKE method was developed in oceanography studies, the coefficient  $C_1$  requires further validation for use in natural rivers. A fourth method of estimating bed shear stress is achieved by measuring the vertical profile of the principal Reynolds shear stress,  $-\rho\overline{uw}$ , and extrapolating values down to the bed. This method has proven robust for uniform flows where the vertical profile is linear, yet its use in non-uniform flows can lead to erroneous  $\tau_b$  estimations. A robust method for estimating  $\tau_b$  using all the symmetric components of the Reynolds stress tensor is presented by Dey and Barbhuiya [2005]:

$$\tau_b^x = -\rho(\overline{w'u'} + \overline{v'u'}) \quad (2)$$

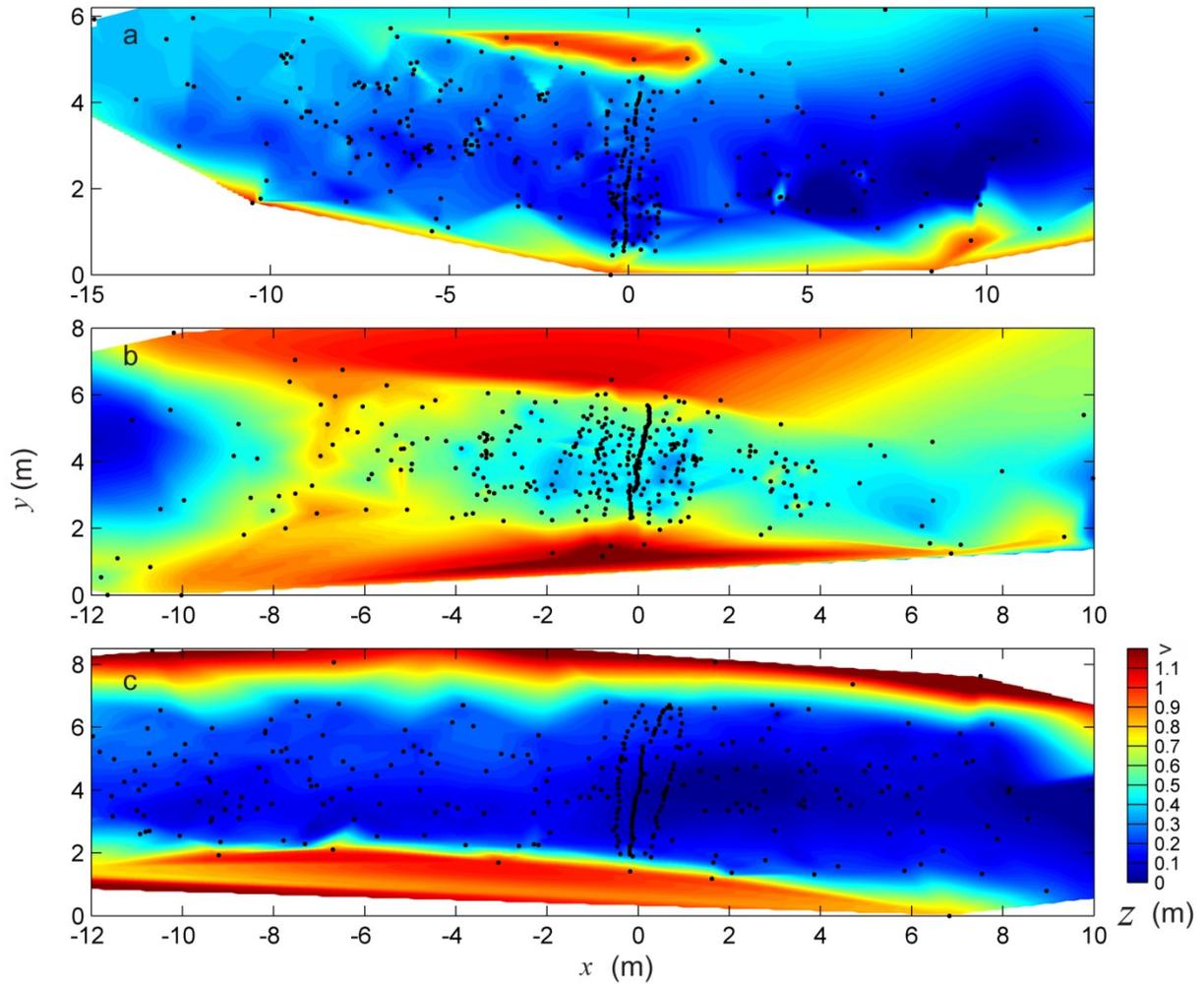
$$\tau_b^y = -\rho(\overline{w'v'} + \overline{u'v'}) \quad (3)$$

In which  $\tau_b^x$  and  $\tau_b^y$  are components of bed-shear stress in the downstream and transverse directions, respectively. Thus, the total bed shear stress is calculated as follows:

$$\tau_b = \sqrt{(\tau_b^x)^2 + (\tau_b^y)^2} \quad (4)$$

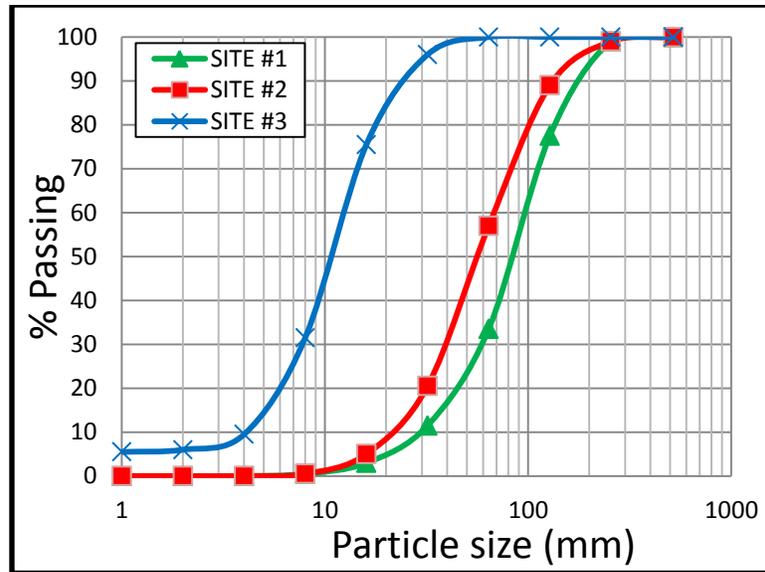
### 4.3 Field measurement and data processing

Our study was conducted on three gravel-bed rivers located in the Eastern Townships, Québec. Investigated field Sites #1, #2 and #3 are reaches located in the Bury River, Tambs River and Lac d'Argent River, respectively (see Appendix A). To avoid the influence of river curvature which would cause the presence of Prandtl's SC of the first kind, the three field sites were selected in relatively straight river reaches. At each site, a single transect (cross-section normal to the mean flow direction) was sampled. The selected sites' wetted widths (at the time of measurements) ranged from 2-3 meters, and the maximum water depth ranged from 0.23-0.31 meters. A total station (Leica TPS300) was used to measure water depth and bed topography at each site. Figure 4.1 illustrates the bed topography at all three sites where the black dots indicate sampled bed elevation measurements. A Cartesian coordinate system was implemented where the longitudinal (streamwise), lateral (cross-stream), and vertical dimensions are defined as  $x$ ,  $y$ , and  $z$ , respectively. Generally, bed topography measurements were obtained with a maximum of 1 meter spacing for the areas furthest from the sampled cross-section. In the 5 meters preceding and following the cross-section, the spacing was reduced in order to improve the detection of roughness elements. For the cross-section where velocities were to be obtained, topographic measurements were obtained at close intervals to best represent bed roughness. On average, this resulted in a bed measurement every 0.03 m across the riverbed.



**Figure 4.1 - Plan view of bed topography. Flow direction is from left to right. Bed elevation is expressed in meters (a) Site #1 (b) Site #2 (c) Site #3**

Grain size was determined at each site using a Wolman pebble count [Wolman, 1954]. 200 stones were sampled and the intermediate axis was measured. The grain size analysis results gave median diameters  $d_{50}$  of 86, 59, and 12 mm for Sites #1, #2 and #3 respectively. The particle size distribution for each site is presented in Figure 4.2.



**Figure 4.2 - Particle size distribution for investigated sites**

An acoustic Doppler velocimeter (ADV) (Vectrino, NortekUSA) was used to sample high frequency velocities over river cross-sections. The ADV was mounted on a 1.5 m by 1.5 m aluminum frame/traverse, which allowed accurate three-dimensional (3D) positioning. The frame was levelled and anchored to the river bed using 15 mm steel bars (Figure 4.3). The total station was used to position the frame extremities and using the frame coordinates, the exact measurement coordinates could be determined.



**Figure 4.3 - Field mounting frame for the ADV (flow direction from right to left)**

Field measurements were carried out at 9 dates during the summer of 2012 (3 days per site under different flow conditions). Each field deployment lasted no more than one day to minimize long term water level fluctuations. For each field deployment, depending on the water height and the width of the water surface at the time of measurement, 14 to 26 vertical profiles were obtained along the transect (e.g., see Figure 4.4 where black dots represent sampling locations). The profiles were spaced laterally at equal intervals. The number of measurements for each vertical profile location was determined according to flow depth with up to 5 vertical samples in the deepest sections. This led to a total 69 to 123 sampling locations for each deployment. For each vertical profile a near bed velocity sample was obtained centered at 0.005 m from the bed. Considering that the ADV probe head needs to be submerged in order to

collect data and that the sampling volume is located 0.1 m from the head (field probe), the sample point closest to the water surface was approximately 0.12 m from the water surface.

Velocity measurements were obtained at a frequency of 200 Hz for 100 seconds at each location, resulting in data series of 20 000 samples. The sampling volume height was set at 7 mm for all measurements. Once the data was collected for three different flow conditions at all locations, the data series were visually inspected. The data series were then despiked using the phase space filter as suggested by *Goring and Nikora* [2002]. Time series velocity spectra were produced and analyzed to evaluate data quality. Time series with horizontal spectra (indicating high noise levels) were removed. The noise ratio in each time series was calculated following the method outlined by *Lacey and Rennie* [2012] (based on *Blanckaert and Lemmin* [2006]). A threshold of the noise ratio  $> 0.5$  was used to eliminate poor data series. The data quality evaluations resulted in the removal of less than 6% of all sampled data series. Given the *in situ* nature of the data collection, this removal rate is considered to be acceptable. In comparison, *Lacey and Rennie* (2012) had a removal rate of 1.5%. While the number of rejected series was lower than that attained in the present study, their experiment was conducted in laboratory conditions, which may have been more favourable for data collection. For ADV measurements, the transverse velocities can be severely contaminated by minor probe misalignment [*Rodriguez and Garcia*, 2008]. As the SC occur in the transverse velocity field, correct alignment of the velocity time-series is essential to the accurate interpretation of SC. Therefore a rotation was performed on the velocity time series to

minimize the effect of probe misalignment on the cross-stream (transverse) velocity component. For each measurement location, mean and turbulence statistics were calculated. These statistics included time-averaged velocities ( $\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}$ ), Reynolds shear stresses ( $-\rho\overline{u'v'}, -\rho\overline{u'w'}, -\rho\overline{v'w'}$ ), and TKE. TKE estimates were de-noised using the noise estimates obtained via the *Blanckaert and Lemmin* [2006] method and the redundant  $w$  velocity component measured by the ADV.

#### 4.4 Results

The main hydraulic variables observed at each site for the 3 deployments (or Runs: A, B, & C) are summarized in Table 4.2. At each site, maximum water depth varied between the three deployments with variations in maximum depth of 0.016, 0.083 and 0.050 m for Sites 1, 2 and 3 respectively. Cross-sectional average velocities  $\langle \bar{\mathbf{u}} \rangle$  were obtained by taking the average of all measurements points at each cross-section, where the overbar represents time averaging and “ $\langle \rangle$ ” represents spatial averaging. Important variations in  $\langle \bar{\mathbf{u}} \rangle$  between deployments are observed with a minimum variation of  $\langle \bar{\mathbf{u}} \rangle$  of 17% between Runs 3.B and 3.A, while the largest variation (where  $\langle \bar{\mathbf{u}} \rangle$  increases by 269%) is shown between Run 1.C and 1.A. The lowest variations in flow between the deployments were 1% and 8% for Sites #3 (Runs 3.B and 3.A) and #2 (Runs 2.B and 2.C), respectively. The maximum variation in flow was 327% (observed between Runs 1.C and 1.A). Maximum flow depth,  $H$ , is seen to increase with  $Q$ , with the exception of Runs 1.B and 1.C and 3.A and 3.B. The increasing trend with  $Q$  is also

observed for the other flow parameters such as  $\langle \bar{u} \rangle$  and wetted area,  $A$ . The exception for Site #1 is likely due to the low relative depths at this site, while for Site #3, the difference in estimated flows between Run 3.A and 3.B is minimal ( $\Delta Q = 1\%$ ) leading to similar values of the flow parameters (e.g.,  $\langle H \rangle$  and  $A$ ).

**Table 4.2 - Main hydraulic characteristics at the examined cross sections**

<b>Cross section No.</b>	$Q$ (m <sup>3</sup> /s)	$\langle \bar{u} \rangle$ (m)	$\bar{u}_{max}$ (m/s)	$\langle H \rangle$ (m)	$H$ (m)	$A$ (m <sup>2</sup> )	$b$ (m)	$b/H$	$Fr$	$d_{84}$ (mm)
<i>Site #1</i>										150
1.A	0.056	0.095	0.195	0.191	0.286	0.474	2.55	8.90	0.07	
1.B	0.138	0.199	0.443	0.236	0.302	0.573	2.55	8.44	0.13	
1.C	0.238	0.350	0.643	0.218	0.295	0.576	2.60	8.81	0.24	
<i>Site #2</i>										107
2.A	0.066	0.143	0.515	0.160	0.226	0.358	2.00	8.84	0.11	
2.B	0.200	0.416	0.822	0.172	0.260	0.410	2.10	8.07	0.30	
2.C	0.202	0.275	0.788	0.208	0.309	0.572	2.50	8.08	0.18	
<i>Site #3</i>										20
3.A	0.054	0.083	0.228	0.209	0.264	0.534	2.55	9.66	0.06	
3.B	0.059	0.097	0.224	0.194	0.243	0.496	2.55	10.49	0.07	
3.C	0.107	0.135	0.359	0.237	0.293	0.614	2.55	8.71	0.09	

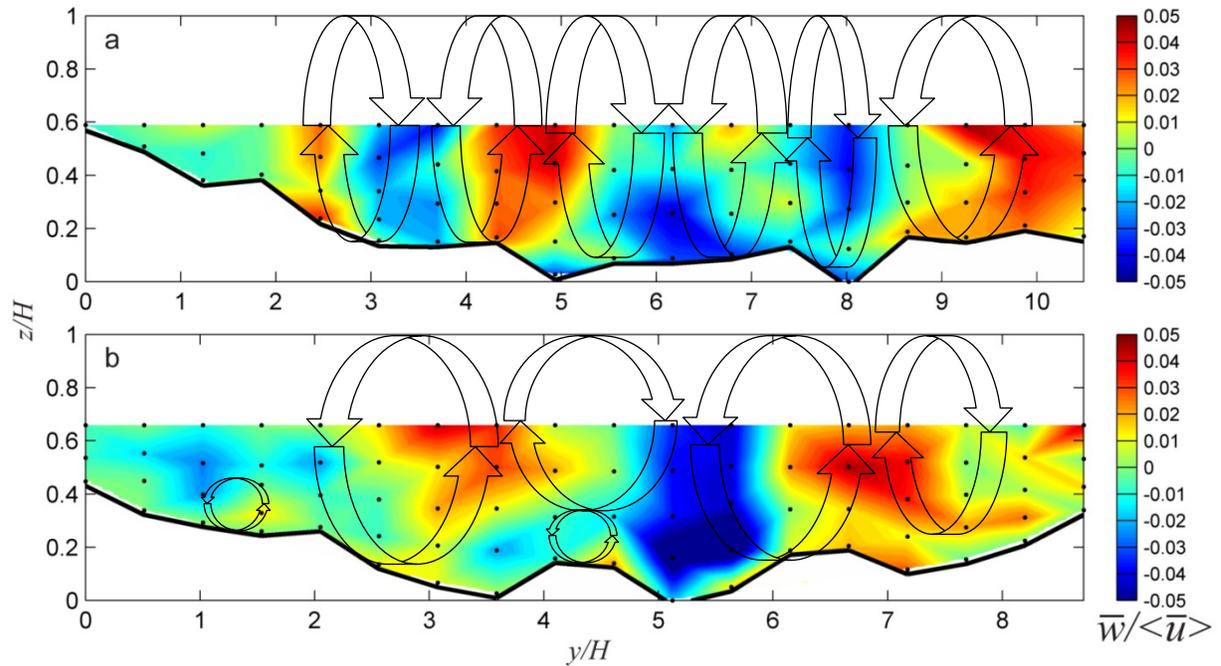
<sup>a</sup> Abbreviations are as follows:  $Q$  is the discharge,  $\langle \bar{u} \rangle$  is the average longitudinal velocity for the entire cross section,  $\bar{u}_{max}$  is the maximum longitudinal velocity,  $A$  is the sampled flow area,  $b$  is the sampled width,  $\langle H \rangle$  is the average flow depth,  $H$  is the maximum flow depth,  $b/H$  is the width to depth ratio,  $Fr$  is the Froude number, and  $d_{84}$  is the eighty-fourth percentile particle size.

The time averaged vertical velocity,  $\bar{w}$ , distributions for the lower and higher flow conditions at Site #3 (i.e., 3.B and 3.C) are shown in Figure 4.4. Plots of the  $\bar{w}$  distributions are very useful for identifying and quantifying SC cells [e.g., Nezu and Nakagawa, 1993]. The presence of SC causes an alternating pattern of upward and

downward velocities as shown by *Chauvet et al.*, [2014]. Although the data for both runs presented in Figure 4.4 was collected at the same site, slight differences in bed topography can be noted. Considering the natural state of the ungaged studied sites, the changes in bed topography are attributable to sediment transport, as well as physical alterations that might have taken place between the deployments for data collection. Another possible factor is that although thorough efforts were made to position the frame back in the same position for every deployment, slight misalignment of the frame may have occurred.

In general, Figure 4.4 presents clear evidence of secondary circulation. Circulation arrows are drawn to aid with the interpretation and discussion of the secondary cells. The effect of flow depth on the secondary cell generation is apparent when comparing the two flow conditions. The SC cells for the lower flow Run 3.B (Figure 4.4a) are smaller in their lateral dimensions,  $b_{sc}$ , compared to the high flow Run 3.C. Widths ranged between 0.15 m and 0.35 m (or  $b_{sc}/H = 0.62$  and  $1.44$ ) for Run 3.B and with the exception of two smaller cells close to the bed,  $b_{sc} = 0.40$  to  $0.50$  m ( $b_{sc}/H = 1.37$  to  $1.7$ ) for Run 3.C. Moreover, for Run 3.B, 6 major SC cells are observed while only 4 large SC cells are observed for Run 3.C. These observations indicate the size of the SC cells is influenced by the water depth which is in agreement with previous research (e.g., *Blanckaert et al.* [2010]). Similar scaling with depth is observed at the 2 other study sites. The average width and number of SC cells estimated for all Runs are presented in Table 4.3. Only the larger cells contributing to the pattern of counter-rotating cells are included in the estimation of SC cell width and number. While there is some scatter in

the results, there is an indication of larger SC and lower number of cells with increasing flows.



**Figure 4.4 - Vertical velocity ( $\bar{w}$ ) distribution scaled by spatial average longitudinal velocity ( $\langle \bar{u} \rangle$ ) with schematics of observed secondary currents at Site #3 (a) Run 3.B (b) Run 3.C**

**Table 4.3 SC characteristics for all sampled Runs**

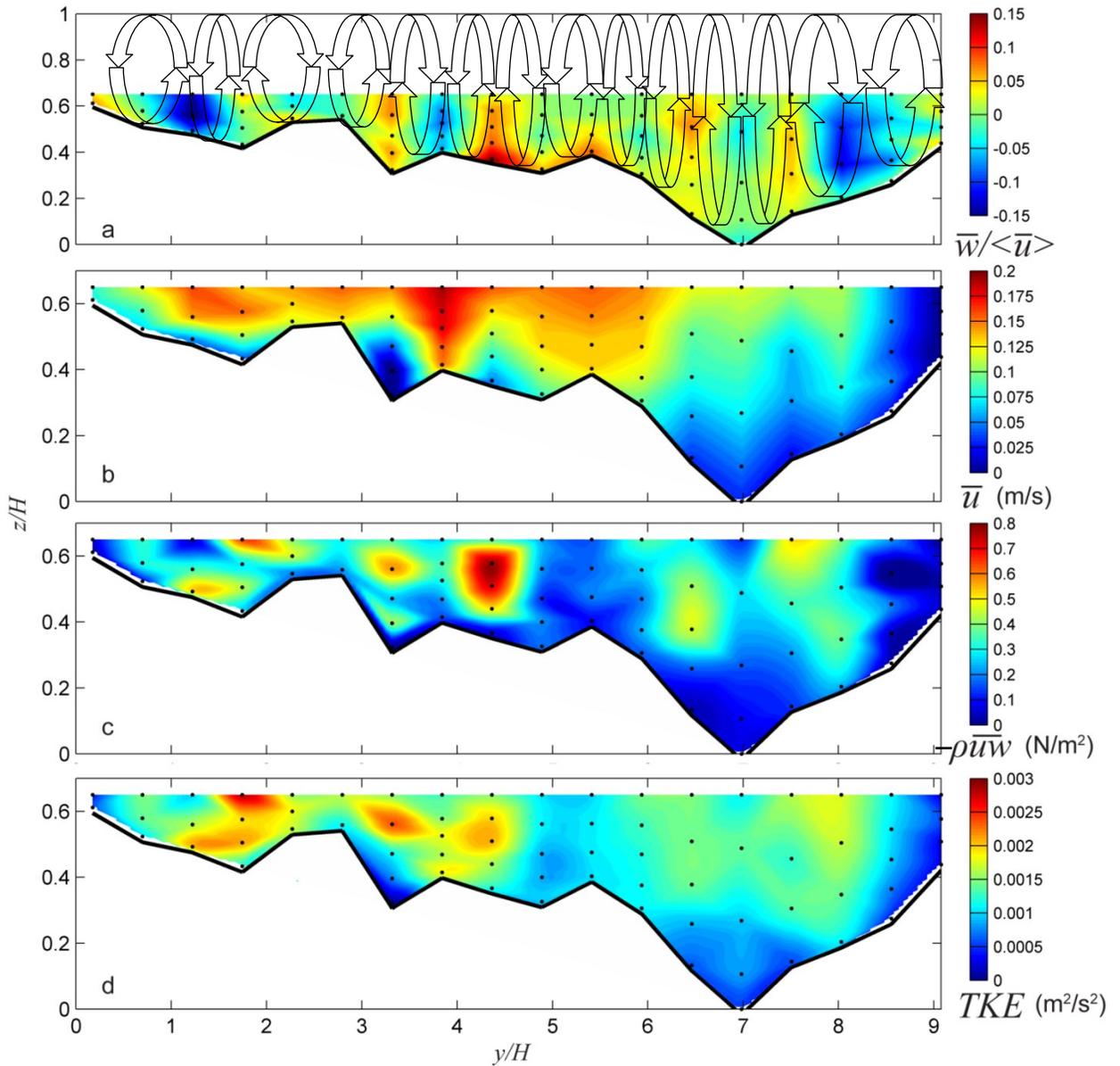
Run	Average SC width ( $b_{sc}$ ) (m)	Number of SC cells	$b_{sc}/H$
1.A	0.190	14	0.66
1.B	0.317	8	1.05
1.C	0.188	9	0.64
2.A	0.184	9	0.81
2.B	0.171	10	0.66
2.C	0.199	11	0.64
3.A	0.215	5	0.81
3.B	0.306	6	1.26
3.C	0.417	4	1.42

The effect of secondary currents on multiple flow variables for Run 1.A is observed in Figure 4.5 where the spatial distributions of  $\bar{u}$ ,  $\bar{w}$  (scaled by  $\langle \bar{u} \rangle$ ), principal Reynolds shear stress,  $-\rho\overline{uw}$ , and turbulent kinetic energy,  $TKE$ , are presented. Directional arrows outlining SC circulations were added on Figure 4.5a to aid interpretation. Similarly to the previously presented Runs 3.B and 3.C, secondary currents are apparent and cover the full width of the channel with average widths of 0.190 m ( $b_{sc}/H = 0.66$ ). Evident correlations are observed between values of  $\bar{u}$  and zones of upflow and downflow induced by the SC. For example, higher  $u$  velocity fluid is being carried downward in regions of downflow (e.g., at  $y/H=3.9$  and 8.1) while lower  $u$  velocity fluid is carried upwards in regions of upflow (e.g., at  $y/H=4.4$  and 7.5). At  $y/H=3.9$  the high  $u$  velocity fluid is advected all the way to the bed. The signature of SC is also reflected in the spatial distribution of  $-\rho\overline{uw}$  (Figure 4.5c). In agreement with Table 4.1 [after *Nezu and Nakagawa, 1993*], away from the bed higher values of  $-\rho\overline{uw}$  are observed in the presence of upward moving SC regions (e.g. at  $y/H=4.4$ ), while of lower values of  $-\rho\overline{uw}$  occur where the SC is downward (e.g., at  $y/H=3.9$ ). Values of  $-\rho\overline{uw}$  range from -0.037 to 0.779 N/m<sup>2</sup> which are similar to previously observed in an eco-hydraulics flume with a gravel bed [*Nikora et al., 1998*] as well as in natural river conditions [*Noss et al., 2010*].

While the signature of SC is less apparent in the  $TKE$  spatial distribution plot (Figure 4.5d), trends are similar to those discussed for  $-\rho\overline{uw}$  above (i.e., zones of high  $TKE$  correspond to regions of upward SC) and concur with previous studies [e.g., *Nezu and Nakagawa, 1993; Blanckaert et al., 2010*]. For Run 1.A, maximum values of  $TKE$  were observed on the left side of the channel (looking downstream) coinciding with regions of

high  $\bar{u}$  with values attaining  $0.0028 \text{ m}^2/\text{s}^2$ . Similar magnitude *in situ* TKE values were observed in a natural river by *Sukhodolov et al.* [2010]. Similar trends are observed in all Runs with maximum values of  $-\rho\bar{u}\bar{w}$  and TKE reaching  $12.25 \text{ N/m}^2$  and  $0.041 \text{ m}^2/\text{s}^2$ , respectively.

Previous research has shown that the magnitude of secondary currents ranges from 2 to 3% of the streamwise velocity [e.g., *Tominaga et al.*, 1989]. In general, our results show higher magnitudes of  $\bar{w}/\langle \bar{u} \rangle$  than previous studies. A possible explanation for this is that previous research of SC has, for the most part, been conducted in the laboratory setting. Therefore, the higher magnitudes of  $\bar{w}/\langle \bar{u} \rangle$  found herein suggest the generation of stronger magnitude SC in gravel-bed rivers. The highest values of  $\bar{w}/\langle \bar{u} \rangle$  observed in our study were for Site #1 where Runs 1.A and 1.B were of  $\bar{w}/\langle \bar{u} \rangle = 0.13$  and  $0.15$ , respectively (see Figure 4.5a and Figure 4.6a). Site #1 had the largest bed sediments ( $d_{84} = 150 \text{ mm}$ ) suggesting a positive correlation between SC strength and bed grain size. A slight bias towards elevated values of  $\bar{w}/\langle \bar{u} \rangle$  may have occurred as a result of scaling by the spatially averaged  $u$  instead of a local value. Furthermore, since data from the first 0.12 m under the water surface could not be sampled due to ADV configuration, the highest velocity region near the surface is under-sampled in the spatial average.



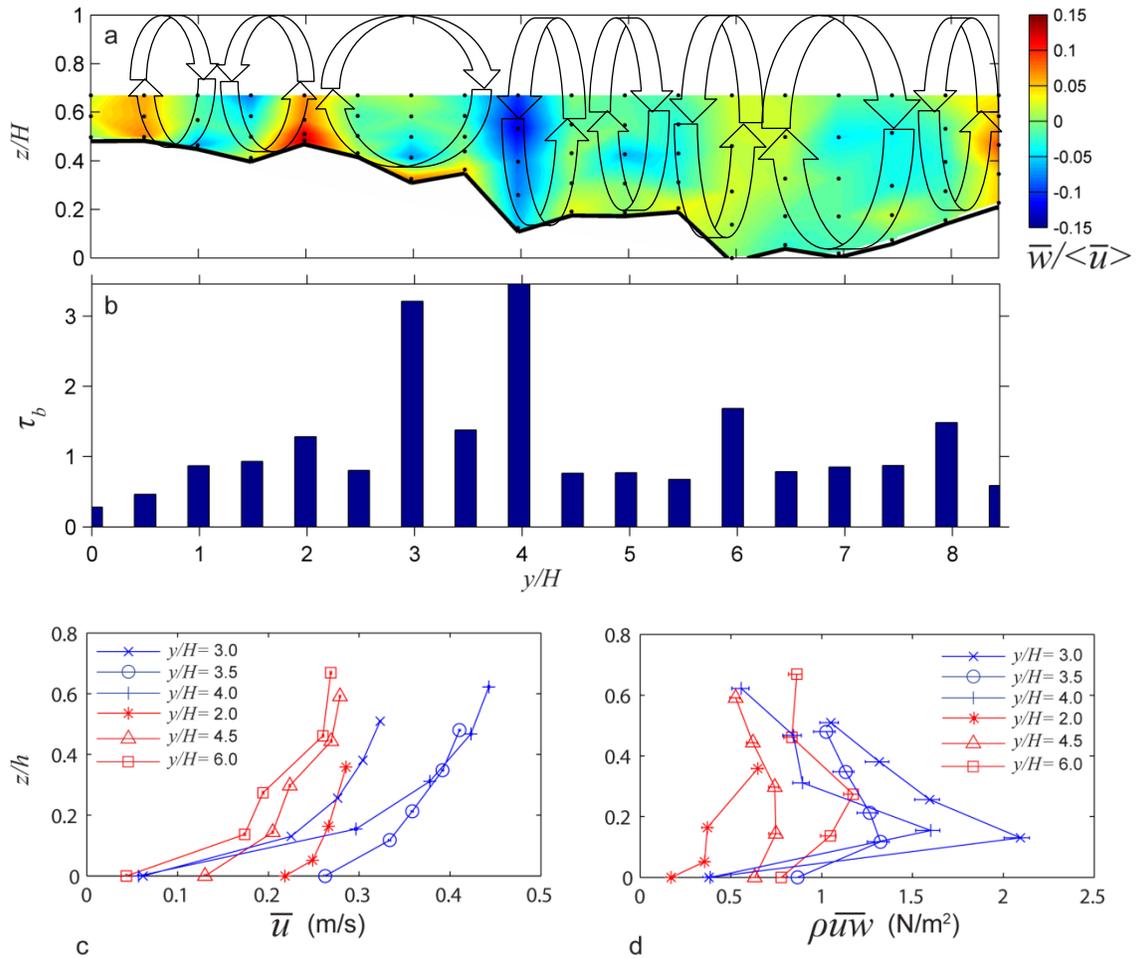
**Figure 4.5 - Distributions of hydrodynamic variables for Run 1.A: (a)  $\bar{w}/\langle \bar{u} \rangle$  with schematics of observed secondary currents; (b)  $\bar{u}$  distribution; (c)  $-\rho\bar{u}\bar{w}$ ; (d) TKE distribution**

The spatial distributions of  $\bar{w}/\langle \bar{u} \rangle$ , bed shear stress  $\tau_b$ , and the vertical distributions of  $\bar{u}$  and  $-\rho\bar{u}\bar{w}$  for Run 1.B and Run 3.A are presented in Figure 4.6 and Figure 4.7, respectively. The bed shear stress was estimated using Equation 4 with data obtained at

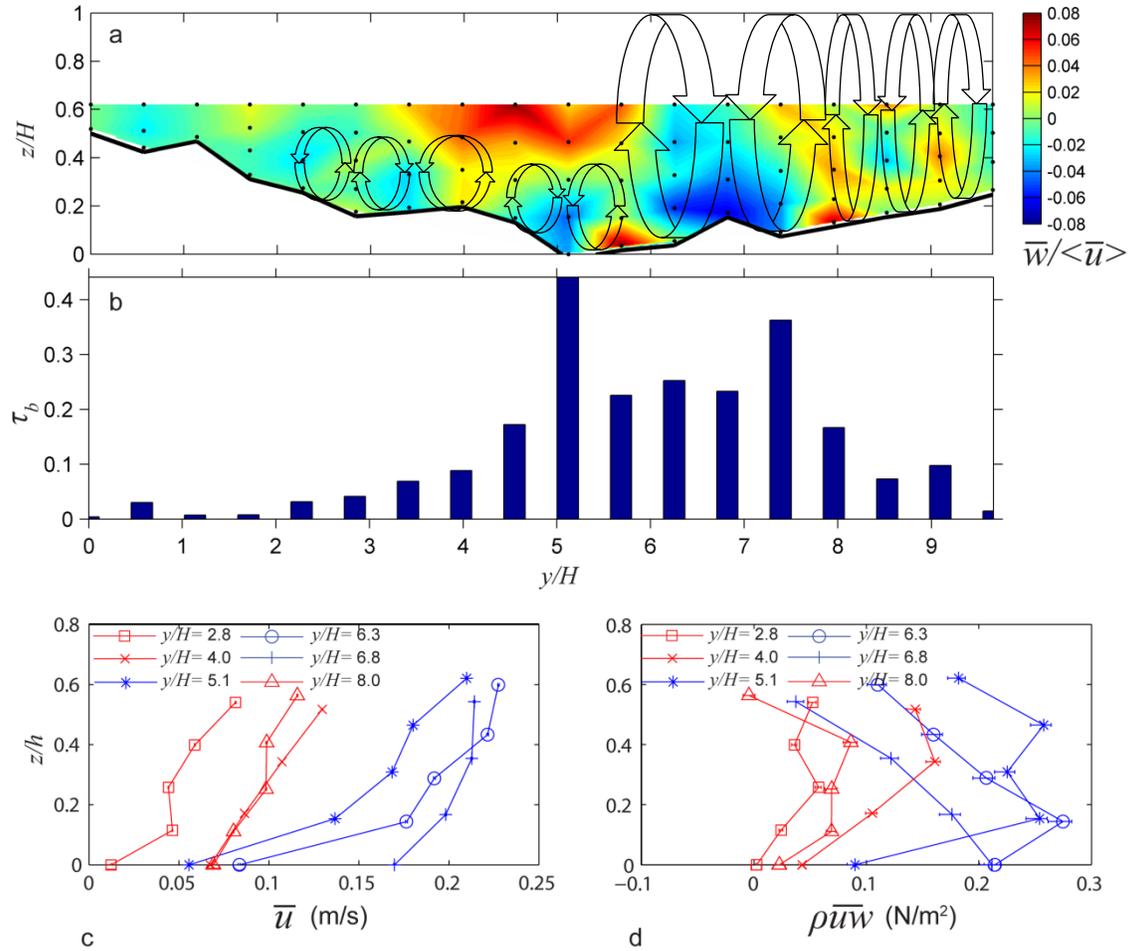
every lateral sampling location using the second point closest to the river bed. In agreement with Table 4.1, regions of downflow in the  $\bar{w}/\langle \bar{u} \rangle$  distribution plots, concord with regions of high  $\tau_b$  (e.g.,  $y/H=4.0$  and  $y/H=7.9$  in Figure 4.6a and b and  $y/H=5.1$  and  $y/H=6.8$  in Figure 4.7a and b), while regions of upflow concord with low  $\tau_b$  (e.g.,  $y/H=4.5$  in Figure 6a and b and  $y/H=5.7$  in Figure 4.7and b). Adjacent values of  $\tau_b$  are observed to vary greatly depending on the direction of the SC. For example, for Run 1.B,  $\tau_b = 3.46 \text{ N/m}^2$  at  $y/H=4.0$  while at  $y/H=4.5$  the value of  $\tau_b$  drops to  $0.76 \text{ N/m}^2$  (Figure 4.6b). Similar variations in adjacent values of  $\tau_b$  are observed for Run 3.A. (Figure 4.7b). The magnitudes of  $\tau_b$  observed are similar with those obtained in previous *in situ* studies [Papanicolaou and Hilldale, 2002].

Marked differences in the vertical profiles of  $\bar{u}$  are observed between the upflow (positive  $\bar{w}/\langle \bar{u} \rangle$ ) and downflow (negative  $\bar{w}/\langle \bar{u} \rangle$ ) regions of SC. Figure 4.6c and Figure 4.7c present examples of  $\bar{u}$  profiles where red and blue lines represent upflow and downflow regions, respectively. Aside from the increased velocity magnitudes, it can be seen that the velocity gradient  $d\bar{u}/dz$  for the downflow regions is higher than for the upflow  $\bar{u}$  profiles which are more uniform. Profiles of  $-\rho\bar{u}\bar{w}$  are provided in Figure 4.6d and Figure 4.7d, and show a steeper gradient of  $-\rho\bar{u}\bar{w}$  associated with downflow regions. In contrast, the  $-\rho\bar{u}\bar{w}$  profiles for the upflow regions tend to be closer to vertical and some have positive slopes (see Figure 4.7d). Estimates of  $\tau_b$  obtained by extrapolating the downflow  $-\rho\bar{u}\bar{w}$  profiles to the bed give slightly lower values than those obtained with Equation 4 (Figure 4.6b and Figure 4.7b). Given the positive

gradient of certain upflow  $-\rho\bar{u}\bar{w}$  profiles (Figure 4.7d), estimates of  $\tau_b$  in upflow regions using the extrapolation method are unreliable.



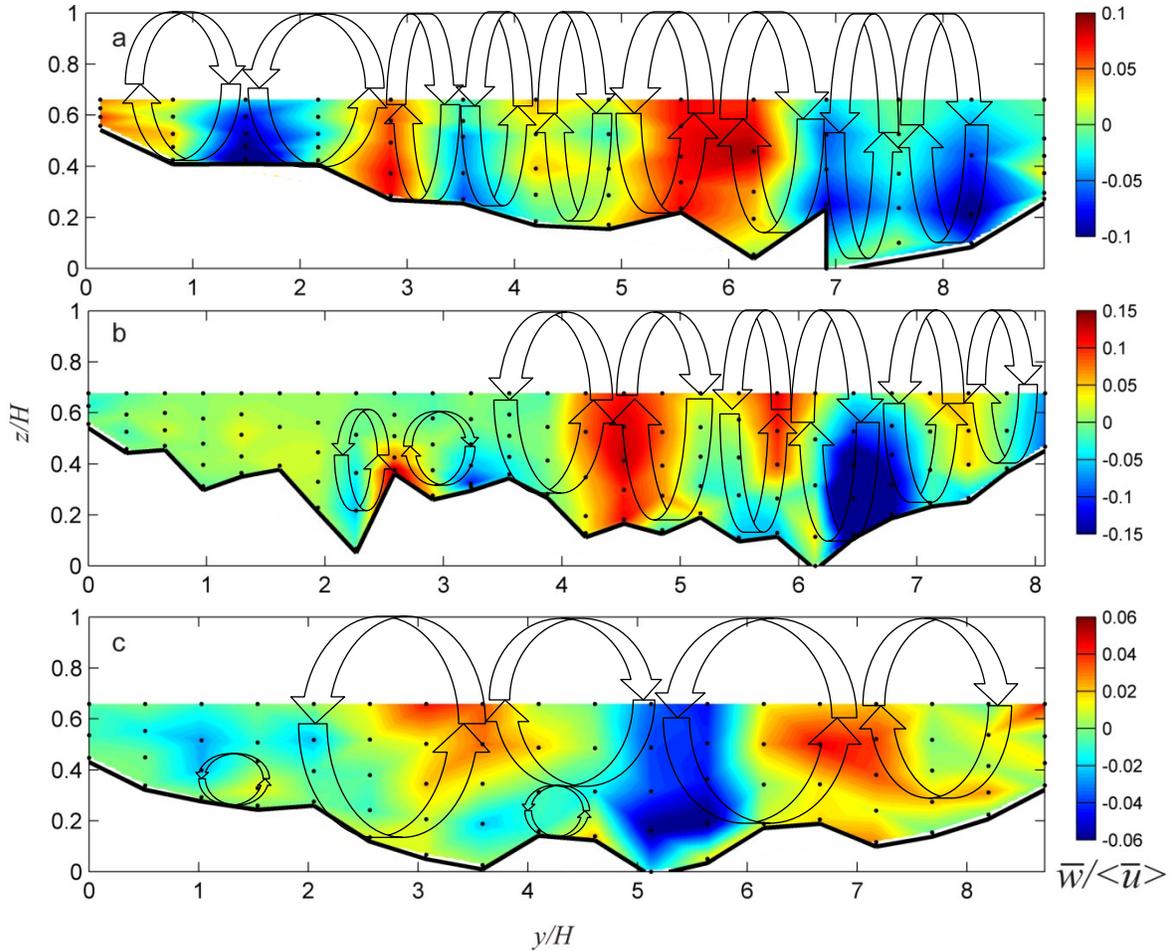
**Figure 4.6 – Run 1.B spatial distributions of (a)  $\bar{w}/\langle\bar{u}\rangle$  (b)  $\tau_b$  (c) vertical  $\bar{u}$  profiles where red and blue lines indicate upflow and downflow regions, respectively; and (d) vertical  $-\rho\bar{u}\bar{w}$  profiles. For subplots (c) and (d), error bars were calculated using bootstrapping method at a 95% confidence interval. In the case of longitudinal velocities  $\bar{u}$ , error bars are present but have very slim ranges.**



**Figure 4.7 - Run 3.A spatial distributions of (a)  $\bar{w}/\langle \bar{u} \rangle$  (b)  $\tau_b$  (c) vertical  $\bar{u}$  profiles where red and blue lines indicate upflow and downflow regions, respectively; and (d) vertical  $-\rho \bar{u} \bar{w}$  profiles. For subplots (c) and (d), error bars were calculated using bootstrapping method at a 95% confidence interval. In the case of longitudinal velocities  $\bar{u}$ , error bars are present but have very slim ranges.**

The effect of bed grain size on the generation of SC is highlighted in Figure 4.8 which shows the  $\bar{w}/\langle \bar{u} \rangle$  distributions of all three investigated sites at similar flow conditions (Runs 1.C, 2.C, and 3.C). For these Runs, the average sampled flow depths,  $\langle h \rangle$ , for Sites #1, #2 and #3 are 0.218 m, 0.208 m and 0.237 m, respectively, while the maximum flow depth of all 3 sites is similar, ranging from 0.293 to 0.309 m (see Table 4.2). In general, the results suggest that increased bed roughness height contributes to the

establishment of a regular pattern of SC. For example, for Site #1, which presents the largest roughness ( $d_{84} = 150$  mm), the cross-section has a well-established SC pattern throughout the entire width, and sampled height (Figure 4.8a). Site #2 also presents a sustained SC pattern over most of the cross-section (Figure 4.8b), yet the SC do not always extend through the water column. For example, from  $y/H = 2$  to 4 the SC seem to be disturbed in the upper water column where some smaller SC cells are located close to the riverbed. For the smoothest bed (Site #3), a clear alternation of positive and negative vertical velocities across the flow width is not present. While variations of vertical velocity exist, the SC cells are less obvious and visually harder to identify. The SC cells appear wider (greater than the flow depth) and tend not to extend through the entire water column.



**Figure 4.8 – Vertical velocity ( $\bar{w}$ ) distribution scaled by spatial average longitudinal velocity ( $\langle \bar{u} \rangle$ ) with schematics of observed secondary currents at the three different sites (a) Run 1.C (b) Run 2.C (c) Run 3.C.**

The above results suggest that bed grain size does have an effect on the patterns of SC across the channel (i.e., Site #1 which has the largest bed grain size has a more defined SC pattern throughout the entire flow cross-section). This is in agreement with the study of *Hardy et al.* [2010], whose experiment studied the importance of roughness in the generation coherent flow structures. Results from *Rodriguez and Garcia* [2008] also indicate a reinforcement of the secondary flow pattern for a flow with bed roughness

( $d_{90}=10\text{mm}$ ) and relatively smooth walls. The authors observed that with the increase of roughness, the visual distinctiveness of the coherent flow structure was more defined throughout the depth of the flow. In our study, the strength or magnitude of the SC also appears to be influenced by the flow roughness. This is in agreement with the experimental results reported by *Tominaga et al.* [1989] and *Rodriguez and Garcia* [2008]. The highest values of the SC strength are observed at Site #2.C (Figure 4.8b). Two zones of high vertical velocity at ( $y/H=4.5$  and  $y/H=6.8$ ), one positive and one negative, with values reaching approximately 15% of  $\langle \bar{u} \rangle$  are seen, yet the majority of the sampled section has values within the range of  $\pm 10\%$  of  $\langle \bar{u} \rangle$ . Site #1 has values of SC strength in the same range, whereas for site #3, the sampled section shows values within the range of  $\pm 5\%$

## 4.5 Discussion

While it has been suggested that SC dissipate towards the center of the channel [*Nezu and Nakagawa*, 1993], we observed secondary flow patterns over the majority of the river width in all the 9 investigated flow conditions. This supports the findings from *Blanckaert et al.* [2010] that natural rivers provide the required roughness for the generation of SC over the entire width. The bed needs to be sufficiently rough to deform the velocity profiles in order for a stable pattern of SC to be maintained. These deformations provide the required transverse oscillations in the bed shear stress and turbulent shear stresses, as well as the friction coefficient [*Blanckaert et al.*, 2010].

In general, our *in situ* results show positive and negative shifts from expected  $\bar{u}$  and  $-\rho\bar{u}\bar{w}$  profiles in regions of downflow and upflow. For example, in Figure 4.6c, the deformations of the velocity profiles due to SC can be observed. In regions of downflow (at  $y/H=4.0$ ), we notice a shift in the profile to greater values of  $\bar{u}$ , where faster traveling fluid is carried downwards. The profile at  $y/H=5.1$  in Figure 4.7c is associated with a negative vertical velocity from the bottom ( $z/H=0$  to  $0.3$ ) and positive from vertical velocities from this point to the top of the sampled section. This translates as an “S” shaped  $u$  velocity profile with a positive shift in  $\bar{u}$  at  $z/H=0.16$ , and a negative shift in  $\bar{u}$  at  $z/H=0.46$  in the strongest upflowing location. Similar observations can be made in the  $-\rho\bar{u}\bar{w}$  profile, where a low value of  $-\rho\bar{u}\bar{w}$  was obtained at the  $z/H=0.31$ , where the  $\bar{w}$  changes from negative to positive. In upflow regions, for example at  $y/H=4.5$  and  $y/H=6.0$  for Run 1.B (Figure 4.6), the gradient of the vertical  $\bar{u}$  profile is reduced by slower moving fluid being advected from lower regions. The gradient of the vertical distribution of  $-\rho\bar{u}\bar{w}$  (Figure 4.6d) is also reduced in the upflow locations closer to the bed. The observed positive and negative shifts in the  $\bar{u}$  and  $-\rho\bar{u}\bar{w}$  profiles are in good accordance with the results of *Sukhodolov and Uijttewaal* [2010] who observed Reynolds stress profiles with very distinctive SC patterns near the banks. The effects of SC in their observations were more pronounced at low water levels, yet in our study the effects can be observed at both high and low water levels (e.g., Run 1.B and 3.A in Figure 4.6d and Figure 4.7d, respectively).

The maximum  $\tau_b$  for Run 3.A (Figure 4.7b) calculated using Equation 4 occurs at  $y/H= 5.1$  where  $\tau_b = 0.44 \text{ N/m}^2$ . The occurrence of high  $\tau_b$  at  $y/H= 5.1$  is supported by both the large vertical  $\bar{u}$  gradient in the profile and the elevated values in the  $-\rho\bar{u}\bar{w}$  profile.  $\tau_b$  was estimated using the data measured from the second point closest to the bed in the velocity profile, as opposed to the point nearest to the bed (within 5 mm). Comparisons with profiles indicated that the point nearest the bed was likely in the roughness layer where  $-\rho\bar{u}\bar{w}$  deviates drastically from the linear trend due to the influence eddies shedding from individual bed roughness grains [Nikora *et al.*, 2007]. The range of  $\tau_b$  values compare well to data obtained in previous *in-situ* studies by Papanicolaou and Hilldale, [2002], as well as in a laboratory study by Duan [2009]. Based on these results, we believe that Equation 4 is a reliable way to evaluate bed shear stress in complex flows.

As expected from previous research [e.g., Nezu and Nakagawa, 1993] and indicated in Table 4.1, the regions of downflow clearly indicate higher  $\tau_b$  stress than those of upwelling flow. In adjacent regions of downflow vs. upflow, the shear stress variations ranged between 49 and 78%. For example, the transition from downflow to upflow at  $y/H= 4.0$  to  $4.5$  for Run 1.B resulted in a diminution of bed shear stress by 78% (going from  $3.46$  to  $0.76 \text{ N/m}^2$ ). For Run 3.A, the transitions from  $y/H=5.1$  to  $y/H=5.7$ , and from  $y/H=7.4$  to  $8.0$ , caused a decrease of bed shear stress of 49% and 54%, respectively.

SC are expected to occur in regions where turbulence is heterogeneous throughout the water column. This explains the existence of SC in regions near the side-wall and their presumed absence further away from the side wall [Nezu and Nakagawa, 1993; Nikora et al., 1998]. In narrow open channels, corner flows are generated from the anisotropy of turbulence produced by the sidewall. In the case of wide open channels, the side wall effect is believed to disappear in the central zone [Nezu and Nakagawa, 1993]. As stipulated by Blanckaert et al. [2010], there is a widespread perception that the banks generate SC and that these currents vanish at a distance from the bank larger than  $2.5H$ . Blanckaert et al. [2010] suggest that bed roughness is sufficient to produce the turbulent heterogeneity necessary for SC generation. While our study confirms the presence of SC throughout the cross-sectional flow field and the importance of bed roughness, there is an indication that certain bank geometries still play a determining role in SC generation in natural channels. In irregular channels such as the ones observed in this study, the transition between the bed and banks is smoother than for artificial channels and there is less delimitation between the river bed and the river bank. At Site #3, the right bank is near vertical while the left bank slopes gently to the water surface. While it can be seen that SC are present over the entire river's width, the right side of the channel with the more defined bed/bank corner seems to generate stronger secondary currents than the side with the less prominent corner. This is most obvious in the data for Run 3.B, but is also observable for Run 3.C (both shown in Figure 4). Runs 3.A and 2.C also present similar behaviour, as shown in Figure 4.7 and 8b, respectively.

In Figure 4.6 at  $y/H=2.0$ , we see a roughness element protruding into the flow by about  $\Delta z = 0.03$  m. At this location, we notice a region of strong upflow suggesting that the roughness element could have led to the positive vertical velocity. In contrast, a similar protruding roughness element is present in Figure 4.7 at  $y/H=6.8$ . In this case, there is no apparent upflow caused by the element. In fact, this region is one of strong downflow. In general, we found no discernable trends relating individual roughness elements to SC. This suggests that the overall bed contributes to the generation of SC, but single elements do not seem to influence the general pattern of SC.

## 4.6 Conclusions

This study investigates SC in natural flow conditions at different bed roughnesses and water depths. In situ instantaneous three-dimensional velocities were recorded using an acoustic Doppler velocimeter (ADV). For each velocity time series, mean and turbulence statistics such as mean velocities, principal Reynolds shear stress and turbulent kinetic energy were calculated. The time averaged vertical velocity distributions provided valuable insight to shape and size of SC. SC were observed at all sites and over the range of flows investigated.

The observed SC were influenced by the bed roughness and were also found to scale with the flow depth. The vertical velocity distribution as well as the vertical stress distribution was impacted by the presence of SC. The large scale roughness elements can have a local velocity distribution impact, but the overall pattern of SC seems more

dependent on the overall bed roughness. It was found that the bed grain size influenced the strength of SC. The site with the largest bed grain size had SC velocities (scaled by  $\langle \bar{u} \rangle$ ) up to 50% stronger in comparison to the site with the smallest particle size. Bed shear stress was found to vary considerably (78% reduction) in adjacent downwelling and upwelling zones.

# Chapitre 5

## Conclusions

## **5.1 Conclusions**

Le projet de recherche avait comme objectif principal de caractériser l'écoulement de rivières naturelles à lit rugueux dans le but de détecter et d'analyser des courants secondaires du deuxième type de Prandtl. Ce phénomène étant un sujet de recherche relativement nouveau, peu de données sont disponibles par rapport à ce type de courant secondaire. De plus, la plupart des recherches ayant été réalisées à ce sujet ont été effectuées en laboratoire. Les recherches se penchant sur courants secondaires en conditions naturelles sont presque inexistantes. Le projet a donc visé à détecter puis déterminer l'influence de différents paramètres de l'écoulement sur les courants secondaires en rivière naturelle.

Les résultats obtenus dans la présente étude ont permis de constater que les courants secondaires ont un impact marqué sur les valeurs de cisaillement au lit du cours d'eau. Ceux-ci peuvent donc avoir un impact sur l'érosion du lit des cours d'eau ainsi que le transport de sédiments. Les données obtenues pourraient être utiles afin de valider des modèles de simulations hydrauliques à trois dimensions. Il serait intéressant de voir si les modèles actuels permettent de prédire adéquatement les courants secondaires et si les valeurs de cisaillement obtenues à l'aide de ces modèles représentent bien l'effet des courants secondaires.

## **5.2 Contributions apportées**

Les recherches effectuées dans le cadre du présent projet ont permis d'obtenir des données de vitesses et de statistiques de turbulence à haute résolution spatiale. Ainsi, nous avons pu établir un portrait détaillé d'écoulement en rivière naturelle, et ce, pour 3 sites différents à 3 conditions différentes d'écoulement. Ceci a permis de détecter la présence de courants secondaires dans différentes conditions d'écoulement en rivière naturelle. L'analyse de celles-ci a permis de découvrir certains paramètres qui

influencent les dimensions et les vitesses des courants secondaires. Notamment, nous avons observé que la largeur des courants secondaires varie en fonction de la profondeur d'eau. Les courants secondaires sont également influencés par la rugosité du lit de la rivière. Une influence marquée des courants secondaires a été observée sur les profils de vitesses ainsi que la distribution verticale de cisaillement dans l'écoulement. Un effet marqué des courants secondaires a été observé sur les valeurs de cisaillement au lit de la rivière. Effectivement, les zones d'écoulements verticaux positifs (vers le haut) ont démontré des variations de cisaillement au lit de 49-78% en comparaison avec une zone adjacente de vitesse verticale négative (écoulement vers le lit). Conformément aux attentes, les zones de vitesses verticales dirigées vers le bas ont causé une augmentation du cisaillement au lit. Il a également été observé que les grands éléments de rugosité, ainsi que la topographie du lit de la rivière ont un impact localisé sur les distributions de vitesse, mais ne semblent pas avoir une influence sur le patron général de courants secondaires. La rugosité générale du lit semble avoir un impact plus marqué à cet effet. De plus, la rugosité influence aussi la force des courants secondaires. En comparant le site ayant la plus grande rugosité avec celui ayant la plus faible, les courants secondaires étaient jusqu'à 50 % plus puissants.

### **5.3 Axes de recherches futures**

Le présent projet a permis d'obtenir des données importantes sur les écoulements en rivière naturelle. Ceci permet de valider les notions théoriques d'écoulement tridimensionnel et des phénomènes observés en laboratoire dans un contexte de rivière naturelle. Cependant, dans un tel contexte, il devient plus difficile d'isoler l'effet individuel de plusieurs variables. Certains éléments ou encore la combinaison d'éléments individuels ont potentiellement eu un impact sur les courants secondaires observés en rivière naturelle. Il serait intéressant de valider l'impact isolé de certaines de ces variables sur les courants secondaires. À titre d'exemple, il serait intéressant de caractériser l'effet de la géométrie du lit de la rivière. Un lit de rivière de forme

parabolique ou encore trapézoïdale pourrait être comparé à un lit irrégulier. Des essais avec de telles géométries pourraient être conduits afin de valider l'impact de ce paramètre sur les courants secondaires.

Un autre axe de recherche pourrait consister à caractériser la rugosité nécessaire pour maintenir un patron de courants secondaires sur la totalité de la largeur de la section d'écoulement. Cet élément a été partiellement observé dans la recherche actuelle. Des courants secondaires ont été observés pour chacun des essais réalisés, mais dans certains cas, ceux-ci ne couvraient pas la totalité de la section d'écoulement. De par le nombre plus élevé de paramètres entrant en ligne de compte, le contexte de rivière naturelle permet difficilement de statuer sur un seuil de rugosité nécessaire au maintien de courants secondaires sur la totalité de la section observée. Afin de caractériser cette rugosité nécessaire, il serait pertinent de réaliser des essais dans un milieu plus contrôlé avec une forme de lit uniforme. Les paramètres de taille de rugosité ainsi que la hauteur d'eau (qui affecte la rugosité relative) seraient les variables à isoler dans le cadre d'une telle recherche.

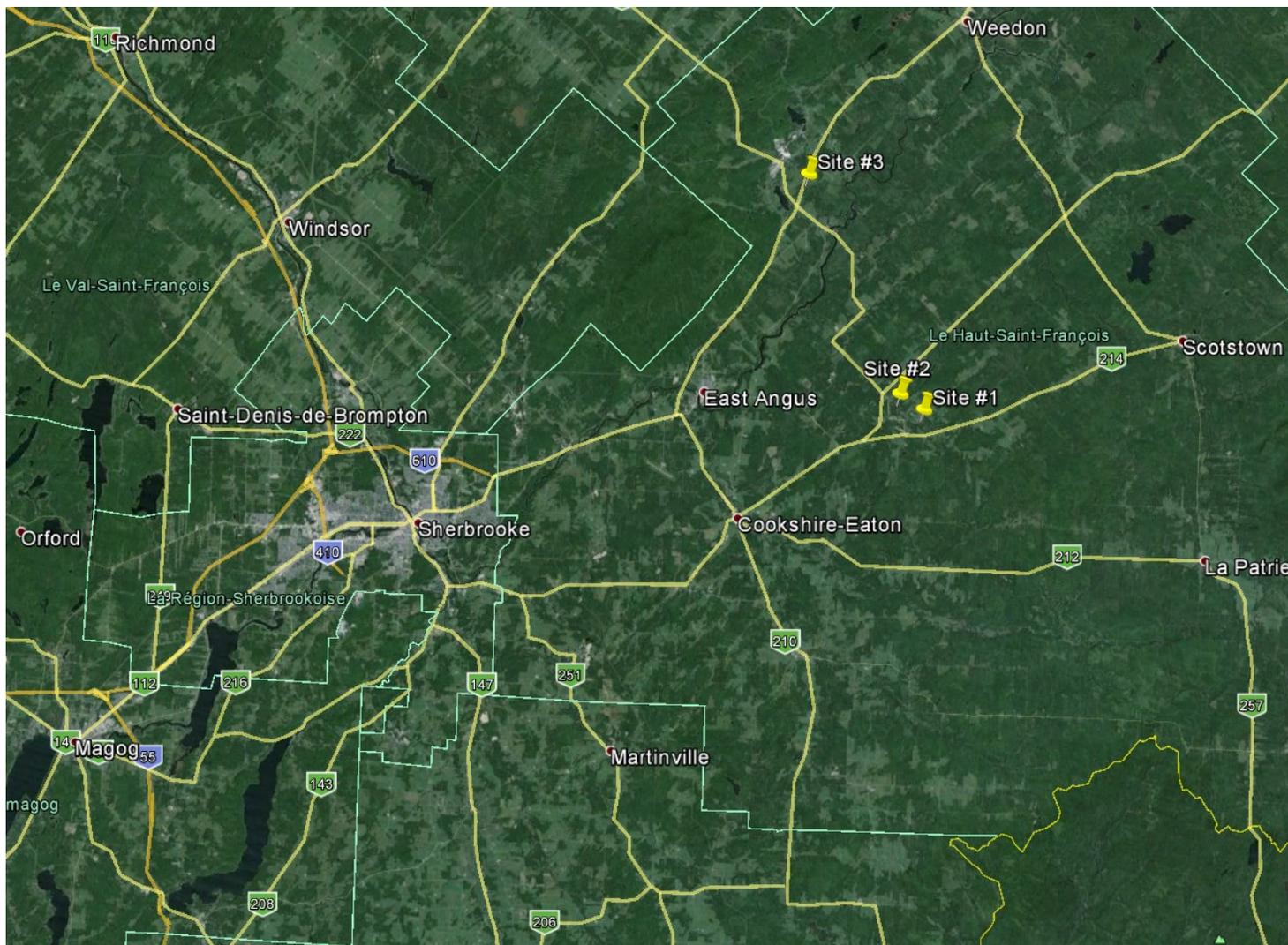
Un autre élément pouvant être analysé est l'impact d'un gros élément de rugosité sur les courants secondaires. Afin de caractériser précisément l'impact de cette variable, des essais en laboratoire pourraient être effectués. Cependant, cette recherche se transpose relativement bien sur le terrain. Ainsi, il pourrait également être pertinent d'observer ces variables dans des conditions de rivière naturelle. Par exemple, des essais pourraient être effectués avec et sans la présence d'une pierre de grande taille qui pourrait être placée dans une rivière naturelle possédant une rugosité relativement faible. De plus, considérant la rareté des études de courants secondaires en rivière naturelle, ainsi que la faible disponibilité de données vitesses et de statistiques de turbulence à haute résolution spatiale, les études dans ce contexte procurent des données précieuses à ce niveau.

Les éléments énumérés ci-haut constituent des pistes intéressantes de projets de recherches futurs pour d'autres étudiants du département.

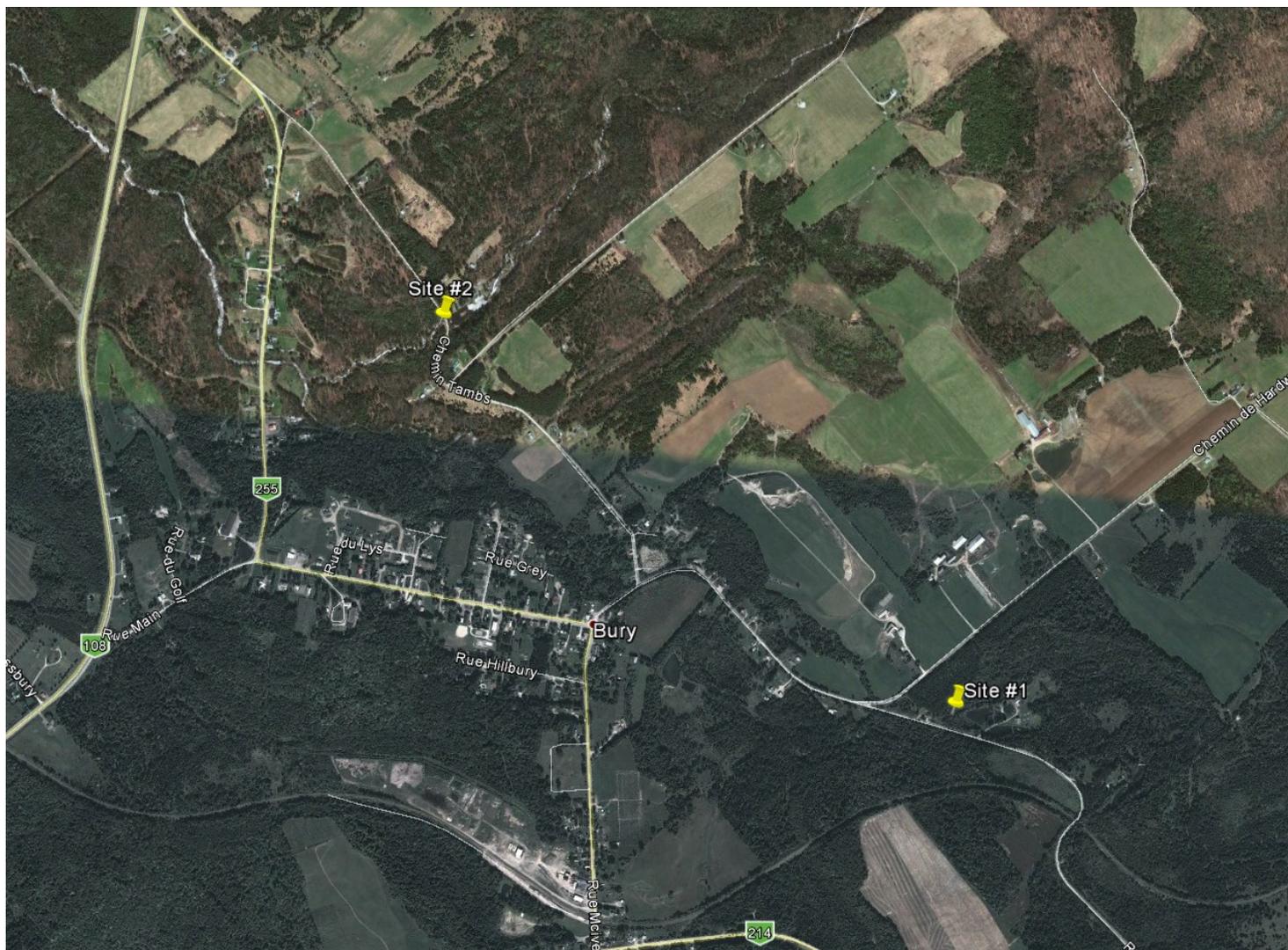
# Annexes

## Annexe A

### Localisation des sites de collecte de données



**Figure A.1 – Plan de localisation globale des sites de collecte de données**



**Figure A.2 – Vue rapprochée des sites de collecte de données #1 et #2**



**Figure A.3 – Vue rapprochée du site de collecte de données #3**

## Annexe B

### Données supplémentaires

## B.1 Choix de l'appareil de mesure

Dans le cadre des recherches effectuées, il a d'abord été considéré d'utiliser un profileur vélocimétrique acoustique Doppler (ADVP). Alors que l'ADV, tel que décrit à la section 2.2.1, permet la lecture d'un seul point, l'ADVP permet de diviser la zone d'échantillonnage en différentes cellules. Ainsi, l'ADVP permet d'obtenir un profil en récoltant des données à différents points. À titre d'exemple, un profil comportant 20 cellules de 1 mm peut être échantillonné en simultanée. Ces cellules sont positionnées de part et d'autre de la position normale d'un ADV standard. Ainsi, l'appareil ADVP permet de limiter la taille de zone d'impossibilité de lecture telle qu'illustrée à la Figure 2.7.

Afin de statuer sur le choix d'instrument, différents tests ont été effectués avec un ADVP de type Vectrino II de Nortek. Ce dernier a été utilisé afin d'enregistrer des données d'un écoulement simple dans le canal du laboratoire d'hydraulique de l'Université.

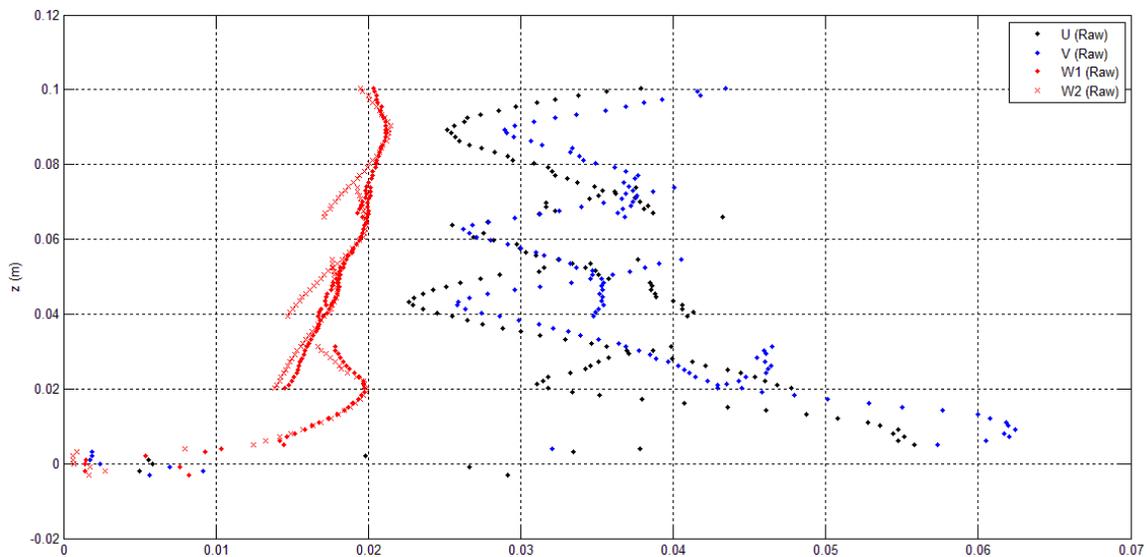


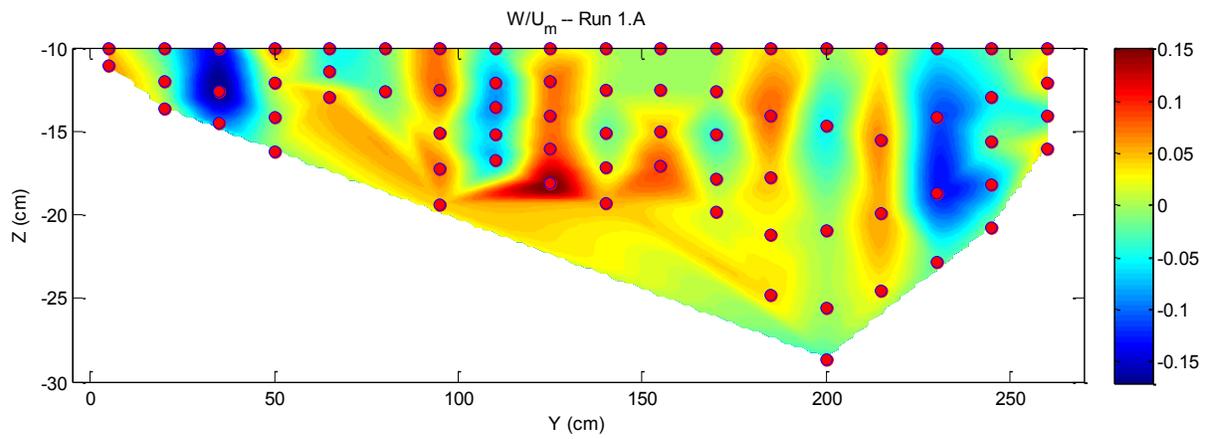
Figure B.1 – Exemple de profil d'écart type obtenu avec l'ADVP

La Figure B.1 présente l'écart-type des vitesses  $U$ ,  $V$ ,  $W1$  et  $W2$ , suite aux essais réalisés dans le canal de l'Université. Elle démontre clairement l'éloignement de part et d'autre du point de mesure optimal. L'écart-type devient beaucoup plus élevé dans les cellules au-dessus et en dessous du point principal de mesure. On remarque aussi que, plus on s'éloigne du point de mesure optimal, plus l'écart-type grandit. Ceci démontre que la précision avec laquelle l'appareil peut récolter des données s'estompe en s'éloignant du point de mesure principal. De plus, nous remarquons que les variations des écarts-types sont plus importants pour les axes  $X$  et  $Y$  et que les vitesses en  $Z$  semblent moins affectées.

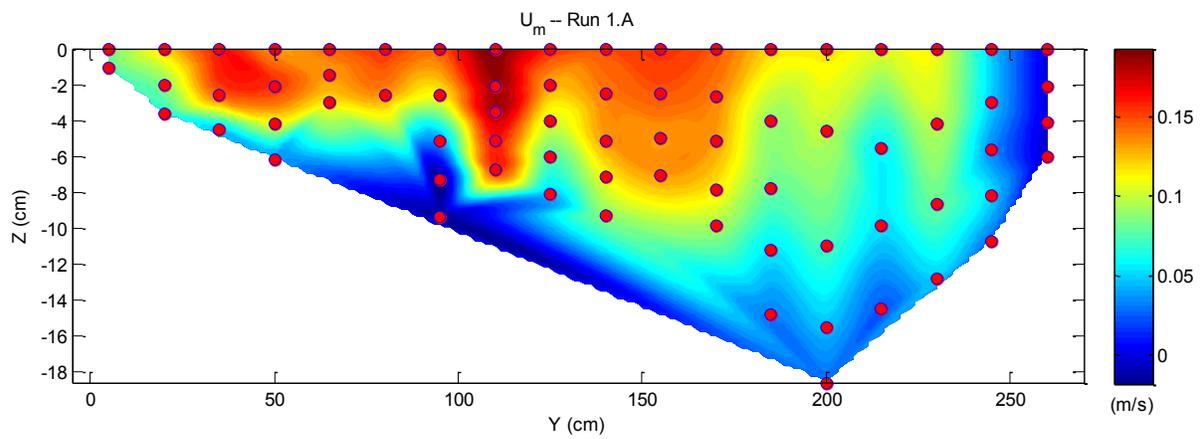
Finalement, il a été constaté que la précision de l'appareil réduisait en s'éloignant du point de mesure optimal. Dans le cadre du présent projet, les vitesses échantillonnées dans l'axe vertical étaient très faibles et nécessitaient une grande précision. Ainsi, il a été jugé que cette diffusion de la précision dans le spectre de mesure n'était pas acceptable. En conclusion, l'appareil allouant un nombre de points de mesure moins élevé, mais avec une précision supérieure a donc été privilégié.

## **B.2 Figures et données supplémentaires**

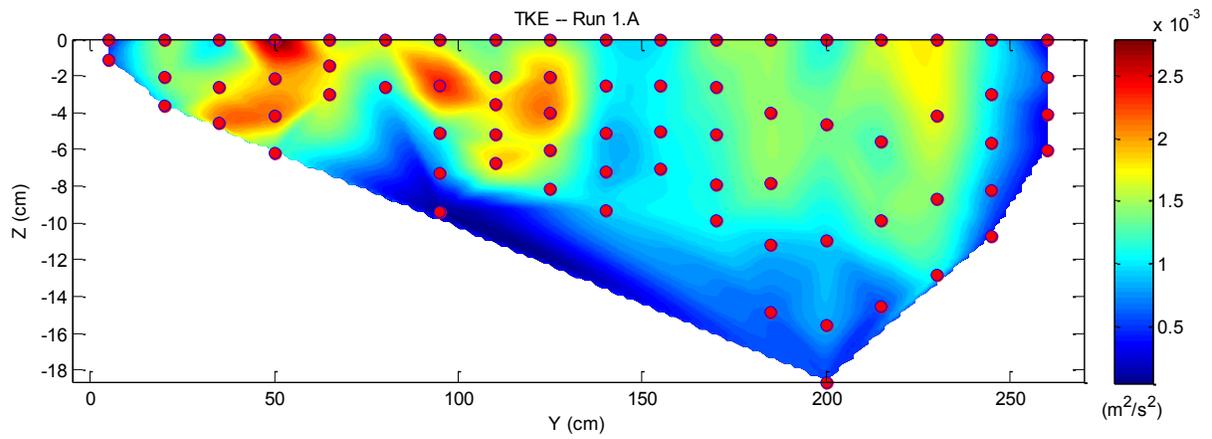
Un bon nombre de figures et données ont été générées et analysées sans toutefois avoir été intégrées à l'article soumis par souci de maintenir la longueur de l'article acceptable en égard aux standards de publication usuels. Certaines de ces figures sont présentées dans la section suivante. Pour chacun des essais effectués, les figures de vitesse verticale divisée par la vitesse longitudinale moyenne (annotés  $W/U_m$  sur les figures) sont présentées. La distribution de vitesse longitudinale ( $U$ ), ainsi que la distribution de l'énergie cinétique turbulente ( $TKE$ ) sont présentées pour chacun des essais réalisés. Finalement, la distribution du cisaillement de Reynolds dans le plan  $XZ$  est présentée. Ces figures sont annotées «  $-p_{UW}$  » dans la section qui suit.



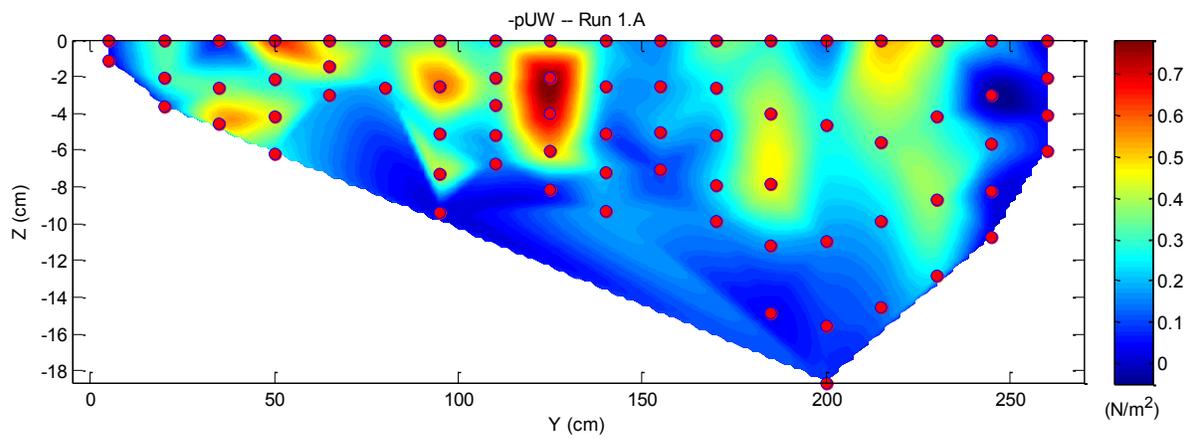
**Figure B.2 – Distribution de la vitesse verticale divisée par la vitesse longitudinale moyenne (essai 1.A)**



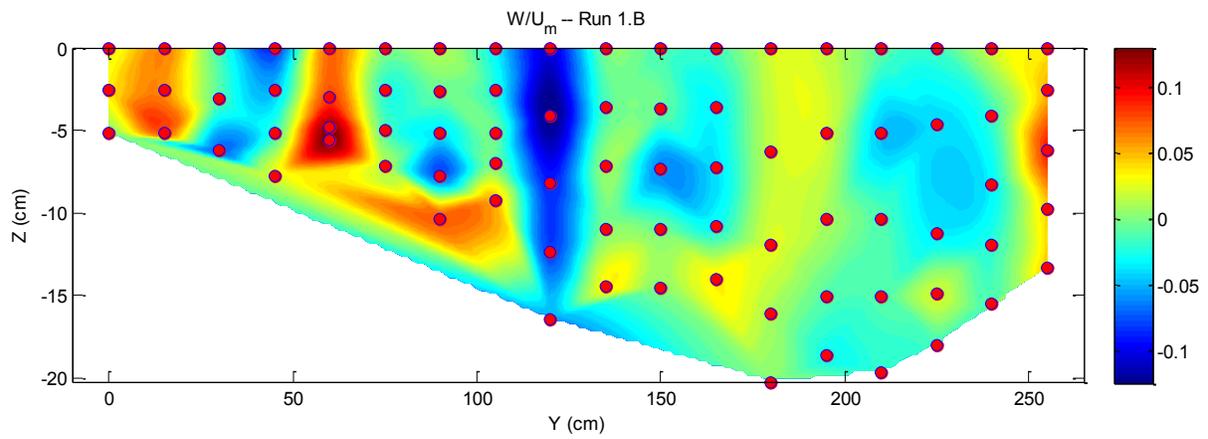
**Figure B.3 – Distribution de la vitesse longitudinale moyenne (essai 1.A)**



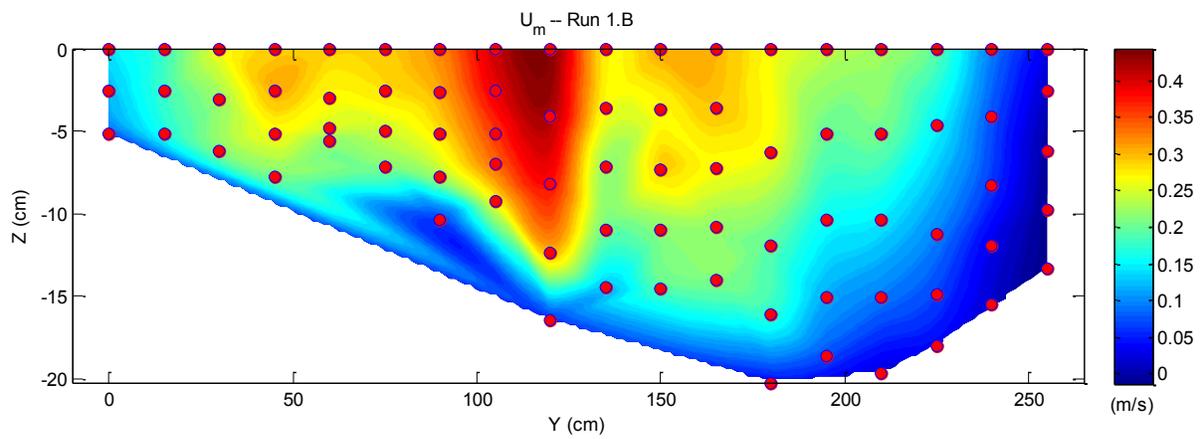
**Figure B.4 – Distribution de l'énergie cinétique turbulente (essai 1.A)**



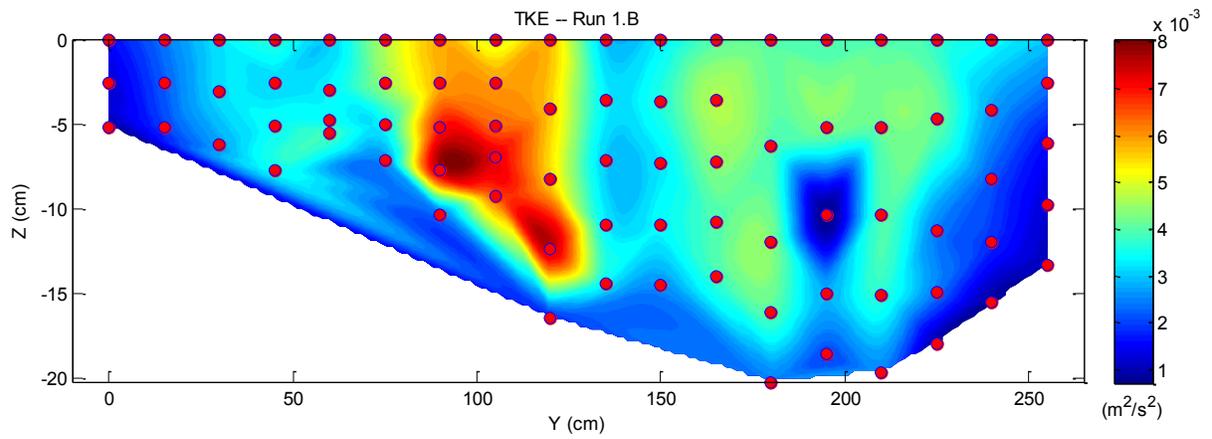
**Figure B.5 – Distribution du cisaillement de Reynolds dans le plan XZ (essai 1.A)**



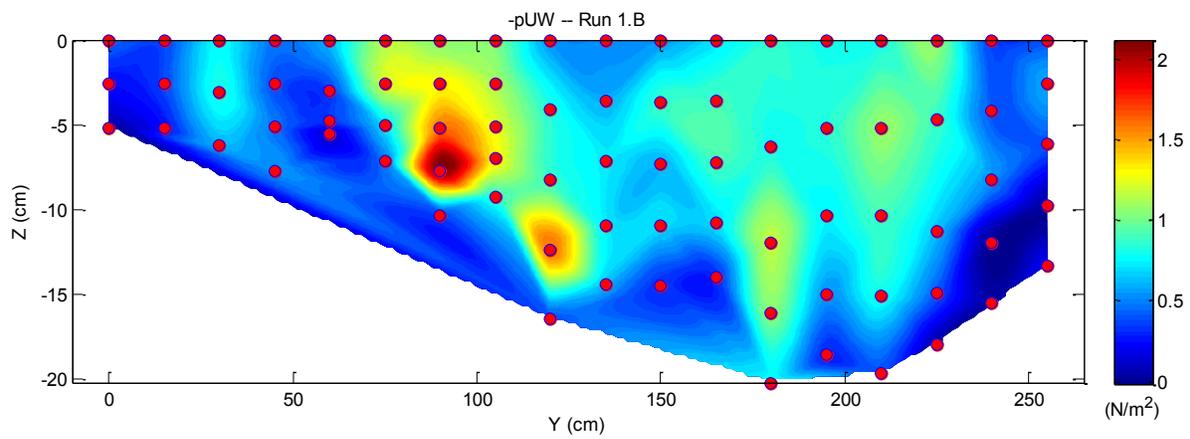
**Figure B.6 – Distribution de la vitesse verticale divisée par la vitesse longitudinale moyenne (essai 1.B)**



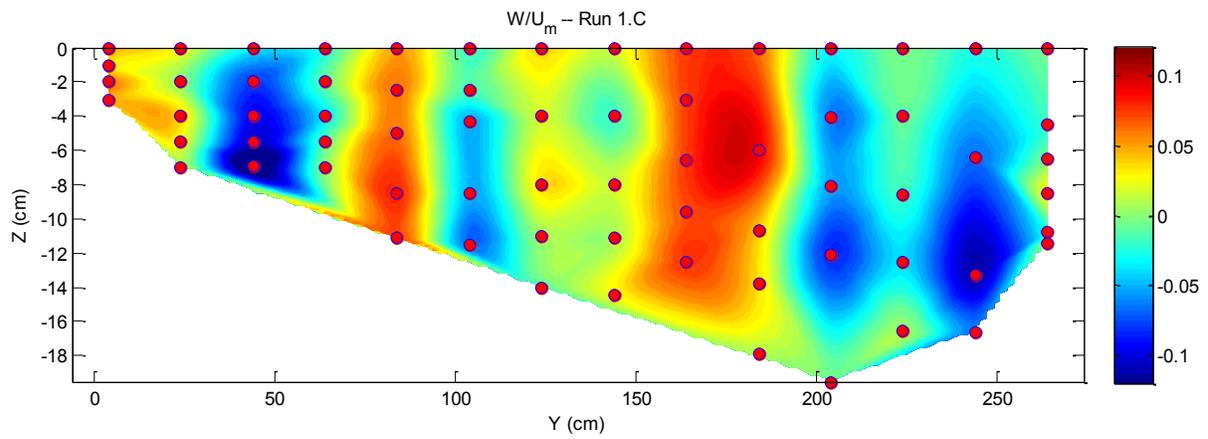
**Figure B.7 – Distribution de la vitesse longitudinale moyenne (essai 1.B)**



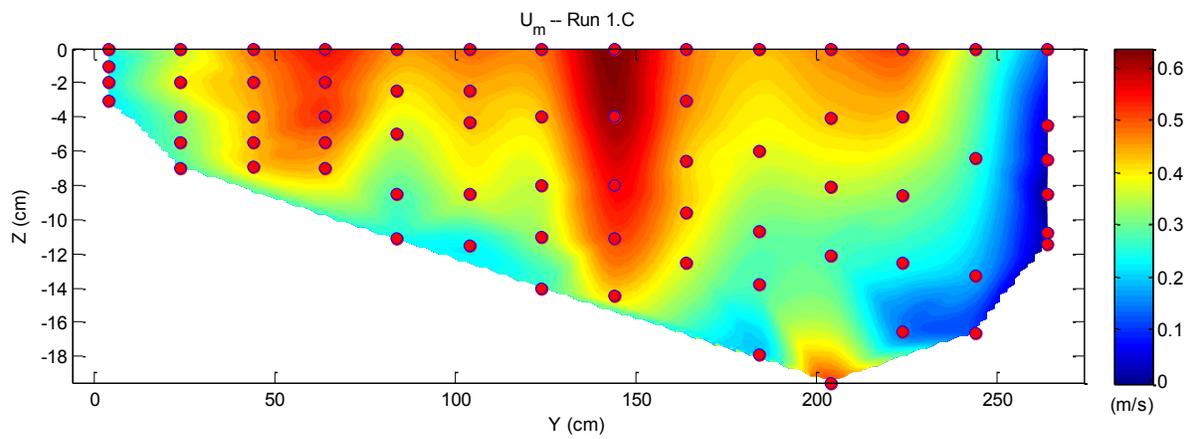
**Figure B.8 – Distribution de l'énergie cinétique turbulente (essai 1.B)**



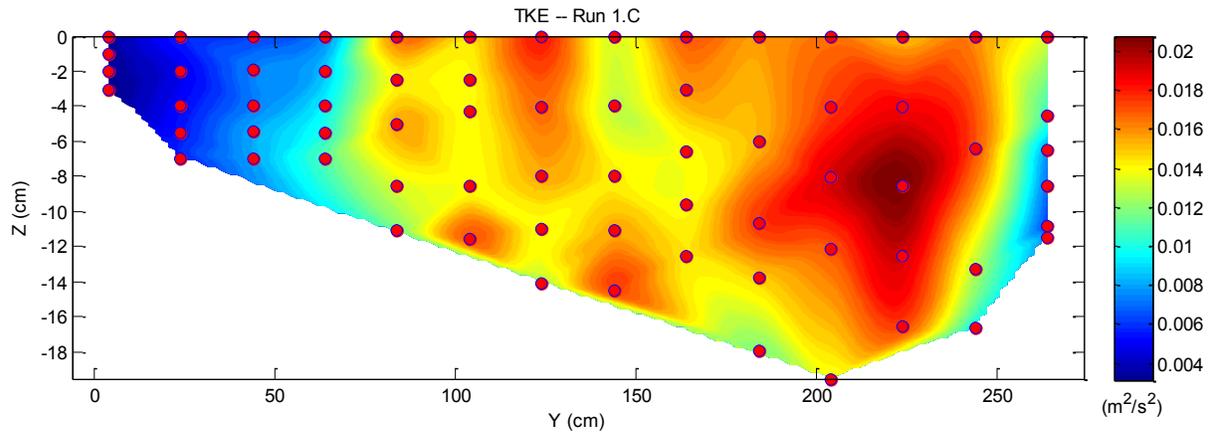
**Figure B.9 – Distribution du cisaillement de Reynolds dans le plan XZ (essai 1.B)**



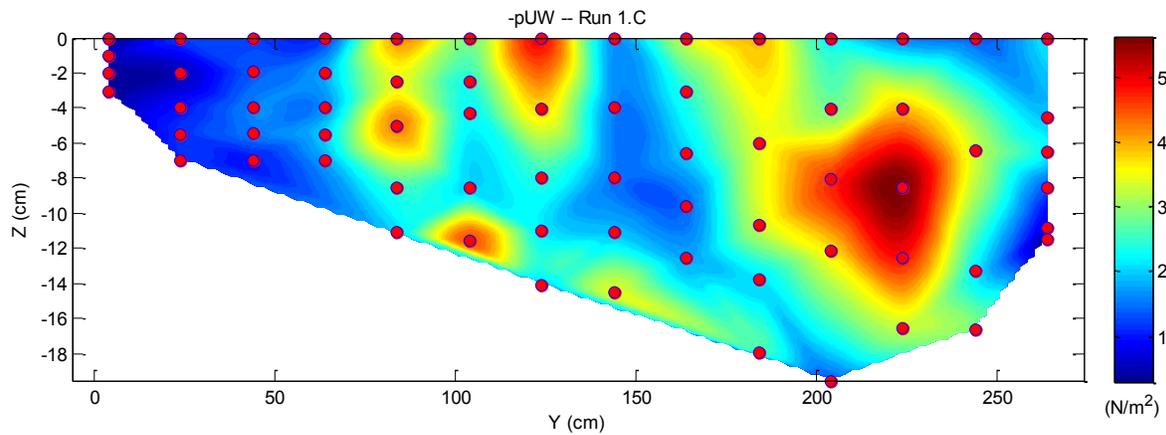
**Figure B.10 – Distribution de la vitesse verticale divisée par la vitesse longitudinale moyenne (essai 1.C)**



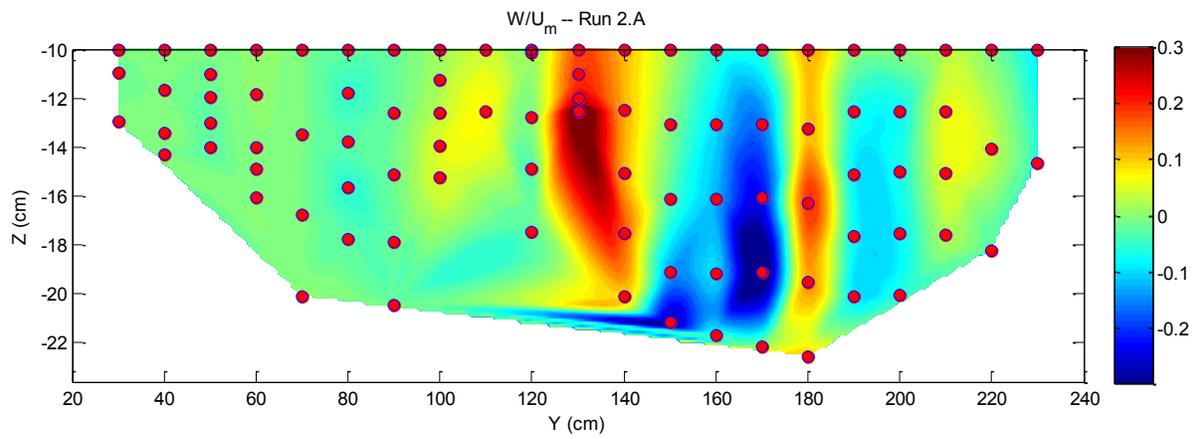
**Figure B.11 – Distribution de la vitesse longitudinale moyenne (essai 1.C)**



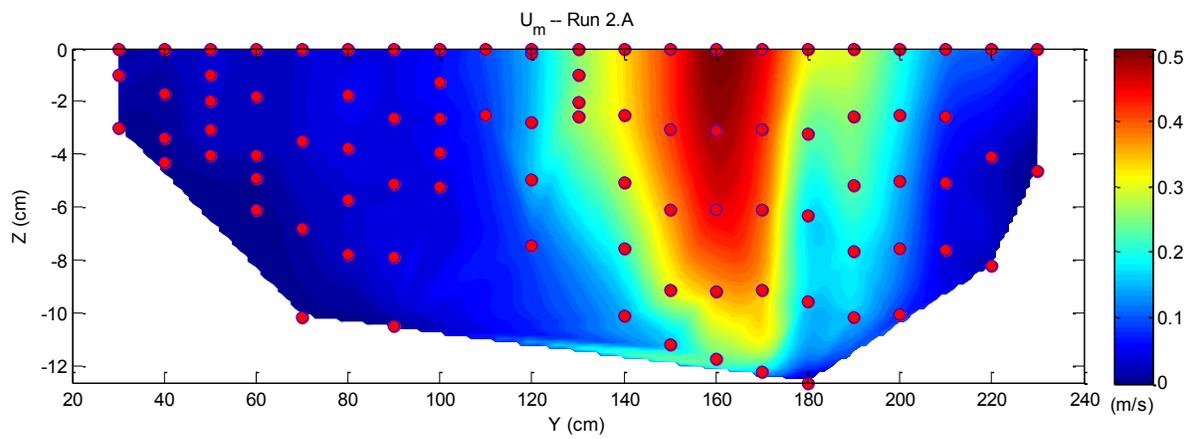
**Figure B.12 – Distribution de l'énergie cinétique turbulente (essai 1.C)**



**Figure B.13 – Distribution du cisaillement de Reynolds dans le plan XZ (essai 1.C)**



**Figure B.14 – Distribution de la vitesse verticale divisée par la vitesse longitudinale moyenne (essai 2.A)**



**Figure B.15 – Distribution de la vitesse longitudinale moyenne (essai 2.A)**

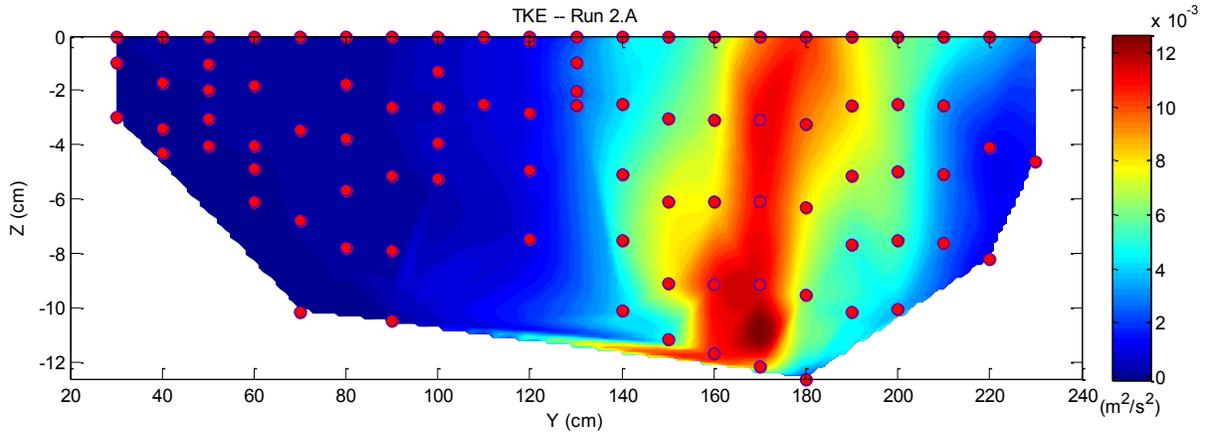


Figure B.16 – Distribution de l'énergie cinétique turbulente (essai 2.A)

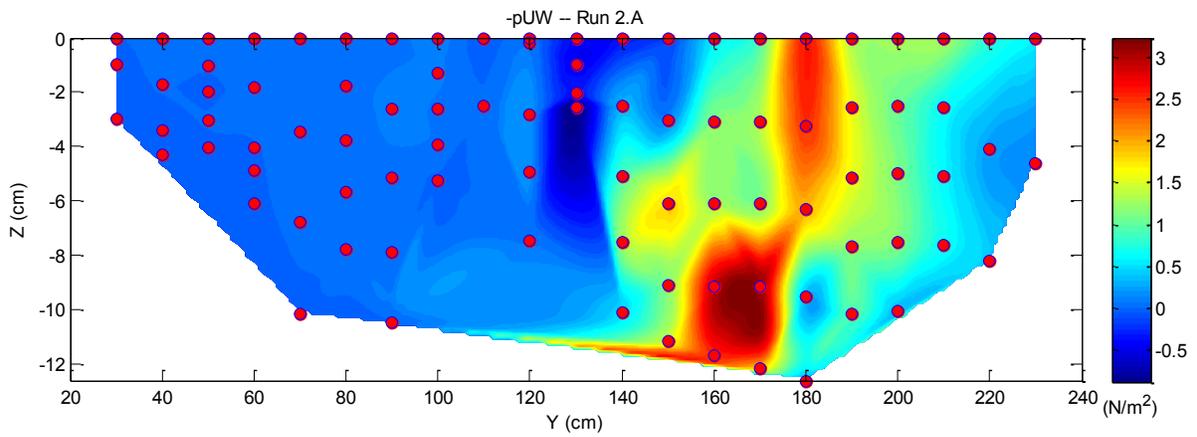


Figure B.17 – Distribution du cisaillement de Reynolds dans le plan XZ (essai 2.A)

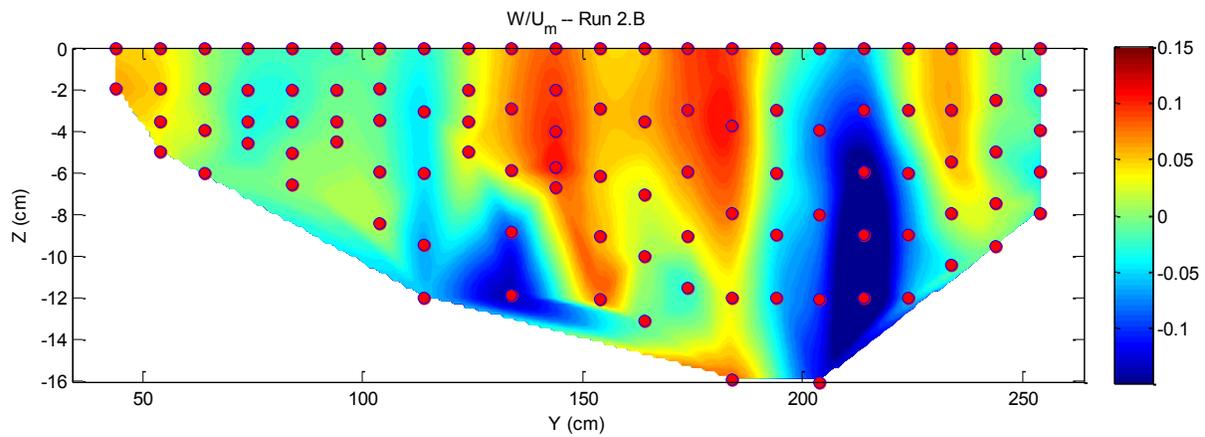


Figure B.18 – Distribution de la vitesse verticale divisée par la vitesse longitudinale moyenne (essai 2.B)

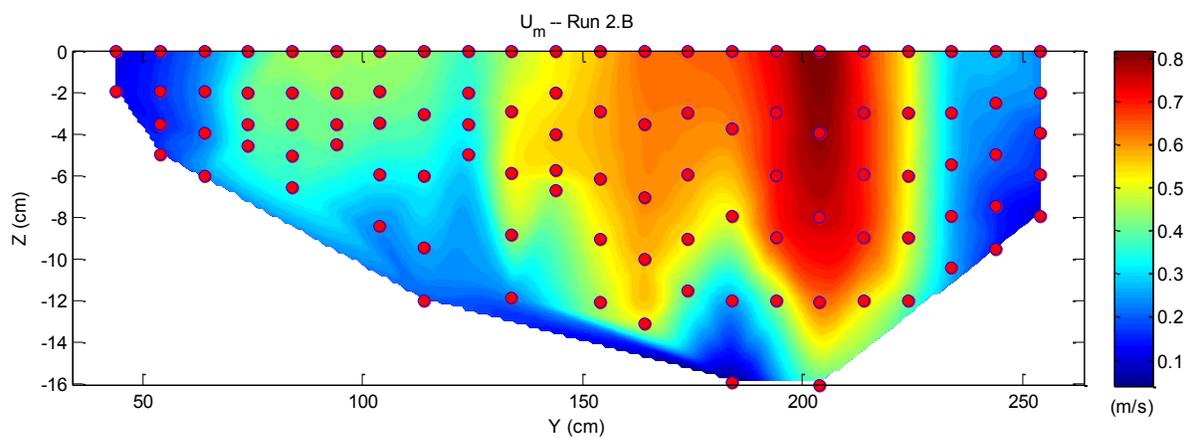


Figure B.19 – Distribution de la vitesse longitudinale moyenne (essai 2.B)

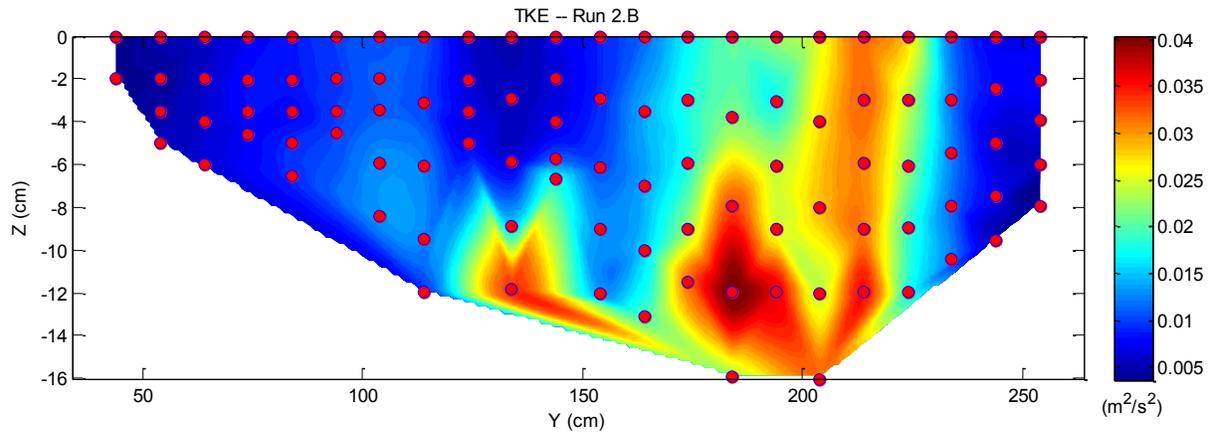


Figure B.20 – Distribution de l'énergie cinétique turbulente (essai 2.B)

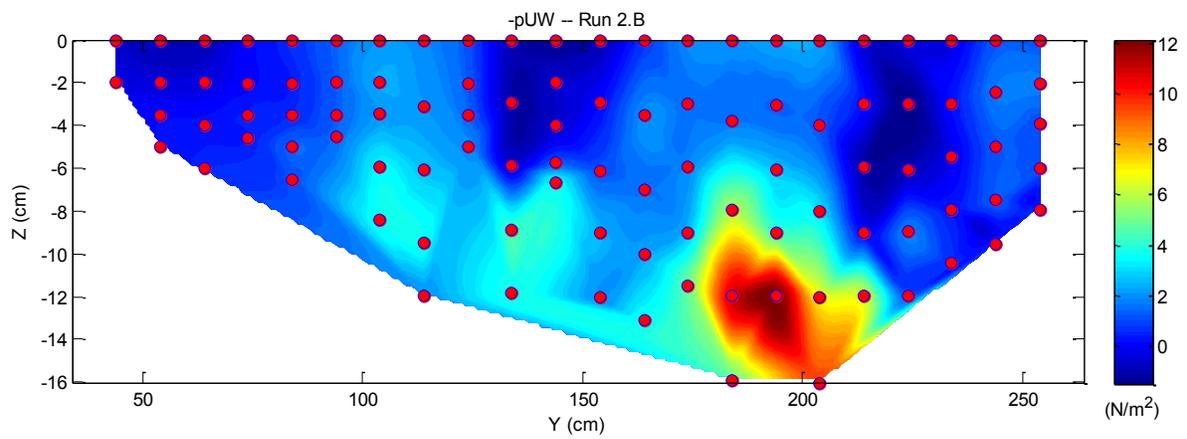


Figure B.21 – Distribution du cisaillement de Reynolds dans le plan XZ (essai 2.B)

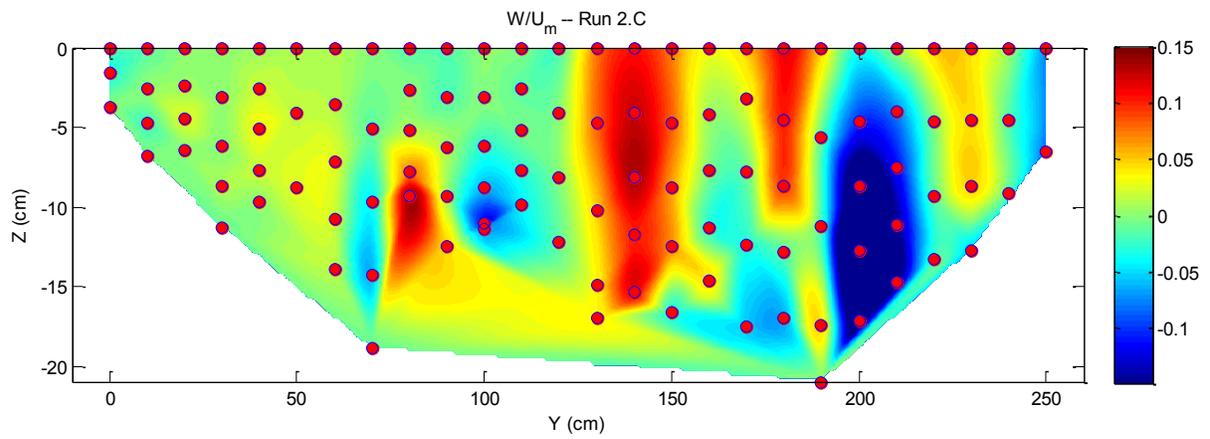


Figure B.22 – Distribution de la vitesse verticale divisée par la vitesse longitudinale moyenne (essai 2.C)

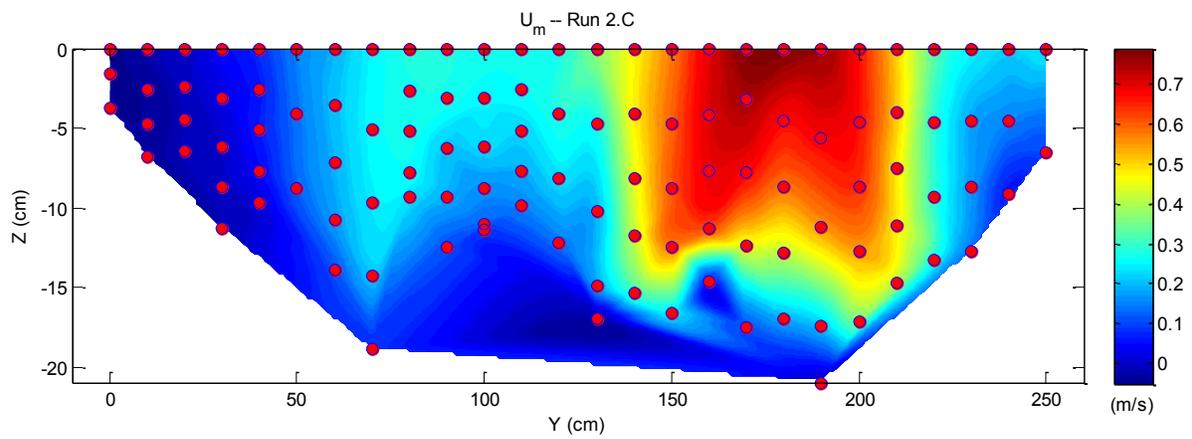
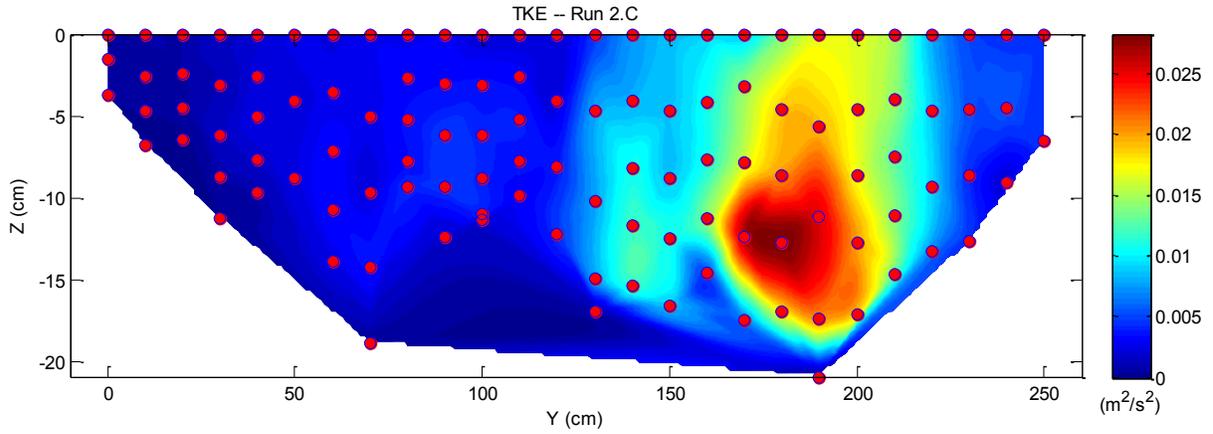
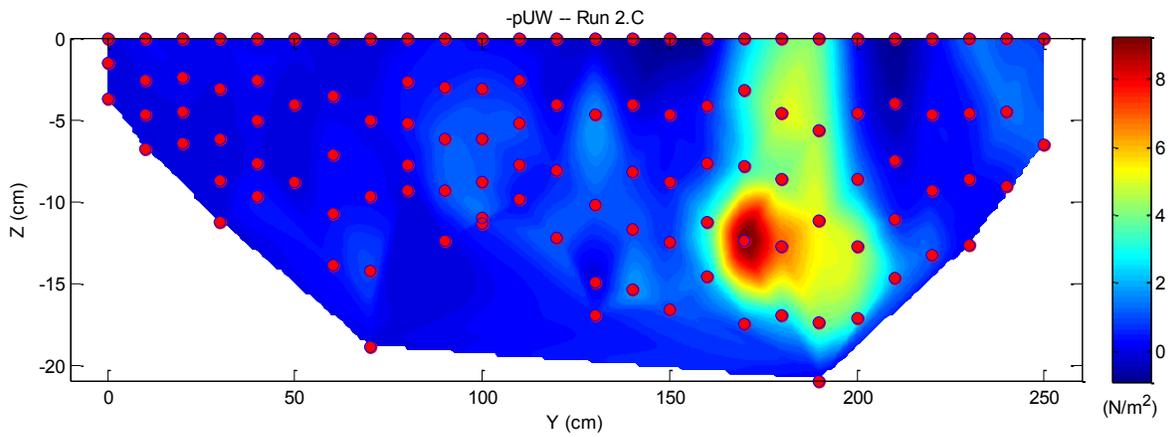


Figure B.23 – Distribution de la vitesse longitudinale moyenne (essai 2.C)



**Figure B.24 – Distribution de l'énergie cinétique turbulente (essai 2.C)**



**Figure B.25 – Distribution du cisaillement de Reynolds dans le plan XZ (essai 2.C)**

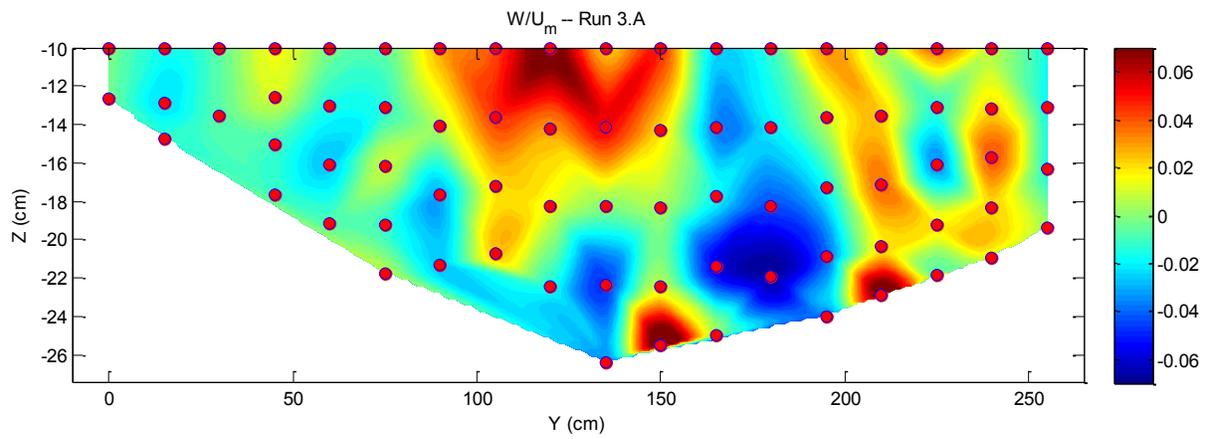


Figure B.26 – Distribution de la vitesse verticale divisée par la vitesse longitudinale moyenne (essai 3.A)

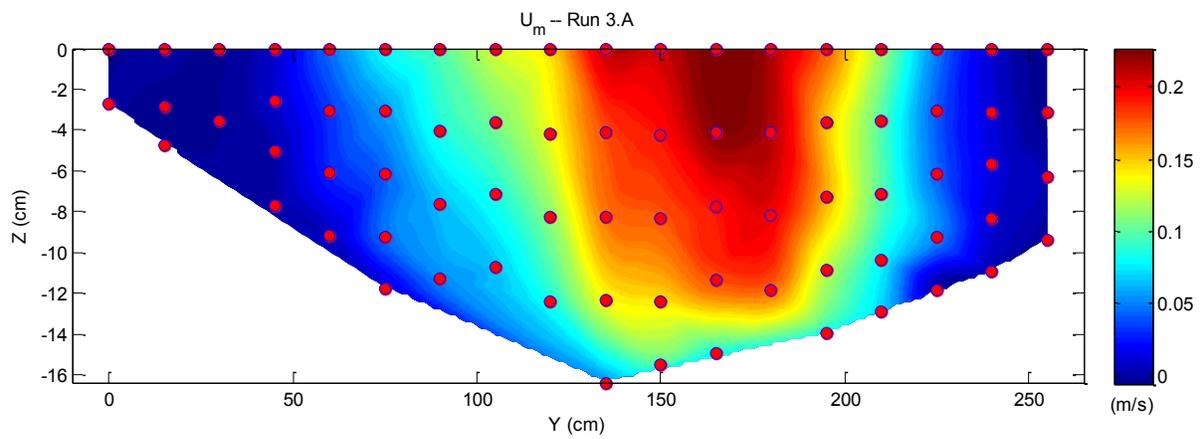


Figure B.27 – Distribution de la vitesse longitudinale moyenne (essai 3.A)

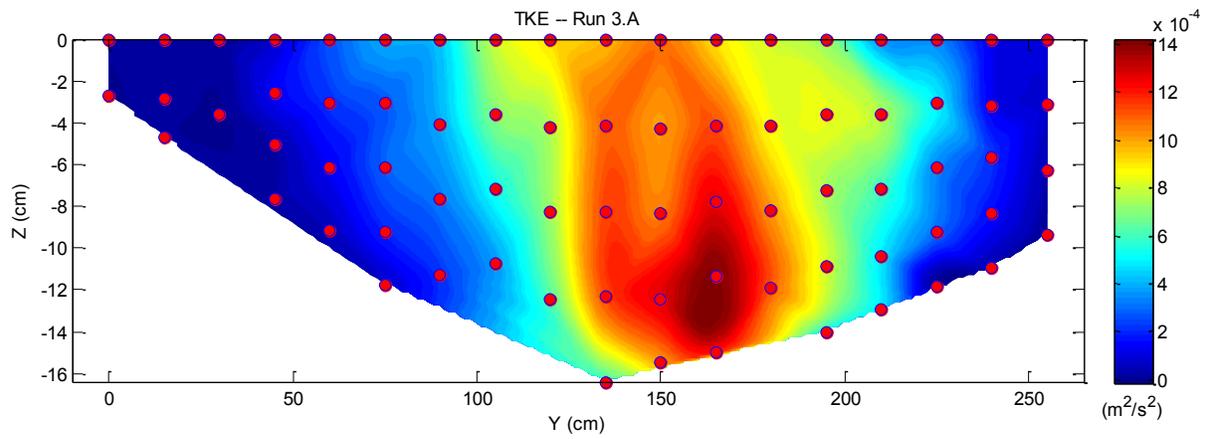


Figure B.28 – Distribution de l'énergie cinétique turbulente (essai 3.A)

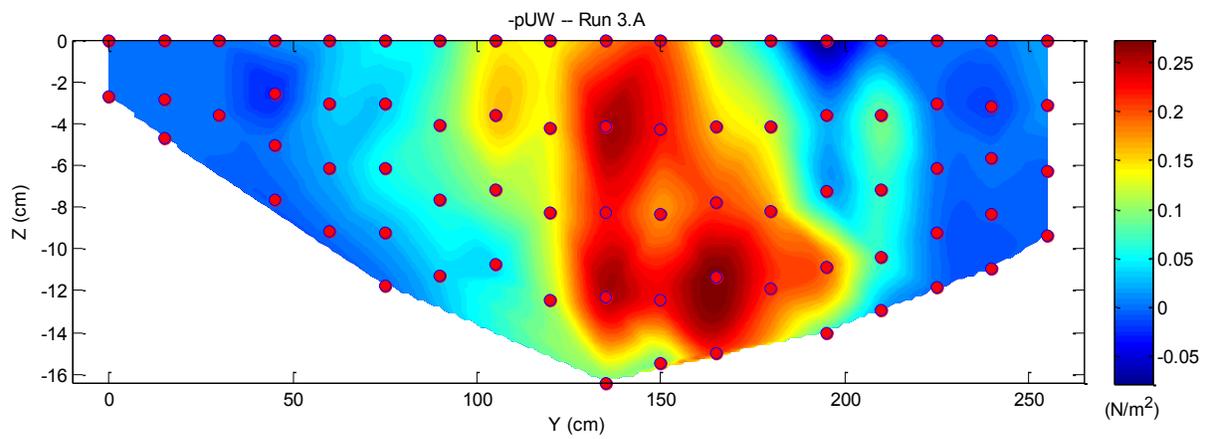
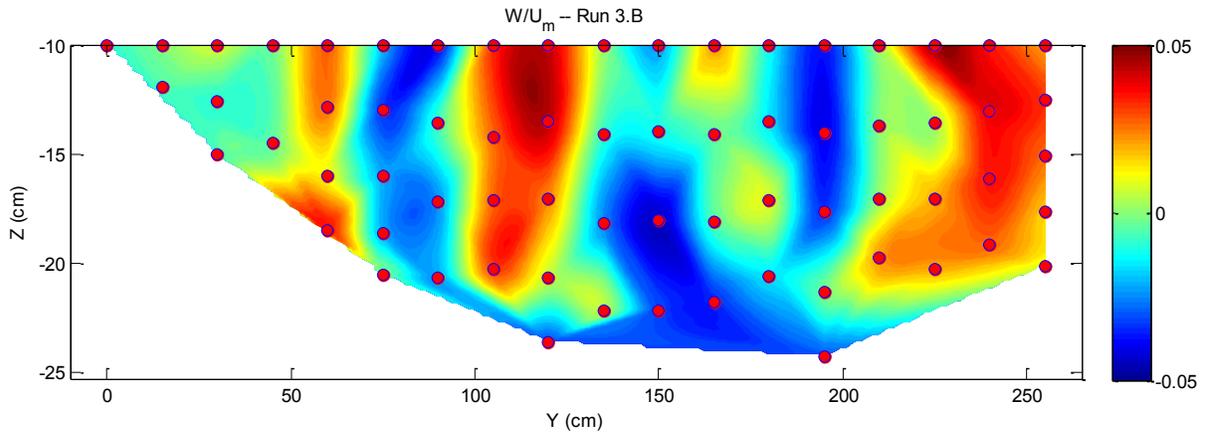
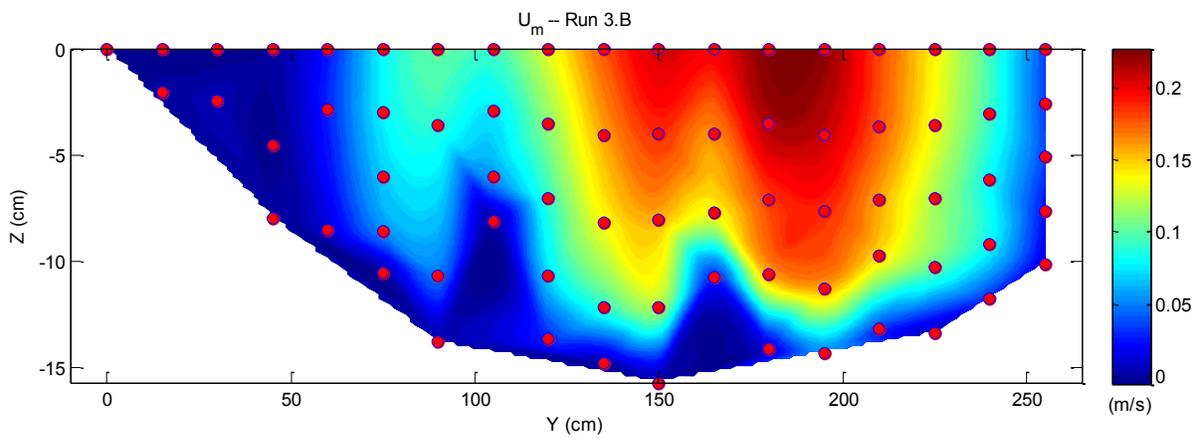


Figure B.29 – Distribution du cisaillement de Reynolds dans le plan XZ (essai 3.A)



**Figure B.30 – Distribution de la vitesse verticale divisée par la vitesse longitudinale moyenne (essai 3.B)**



**Figure B.31 – Distribution de la vitesse longitudinale moyenne (essai 3.B)**

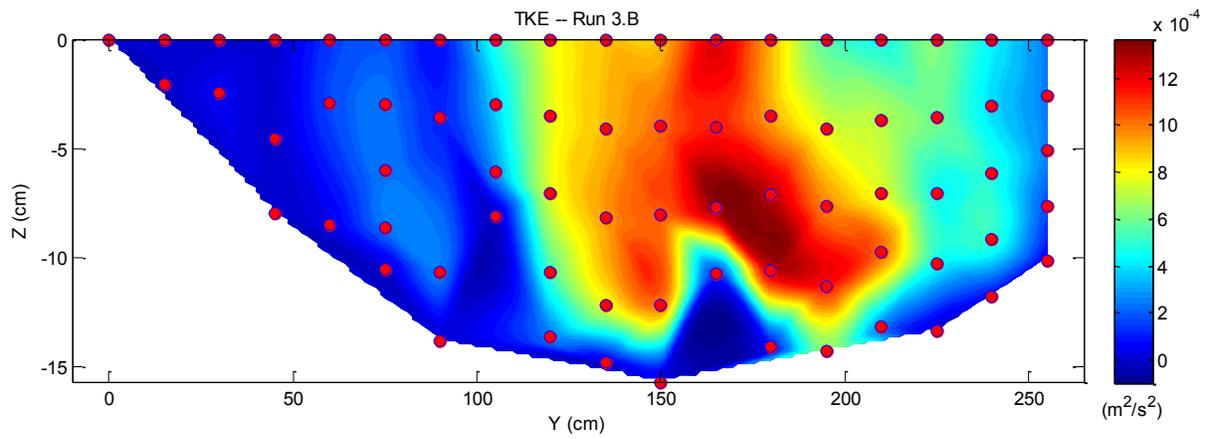


Figure B.32 – Distribution de l'énergie cinétique turbulente (essai 3.B)

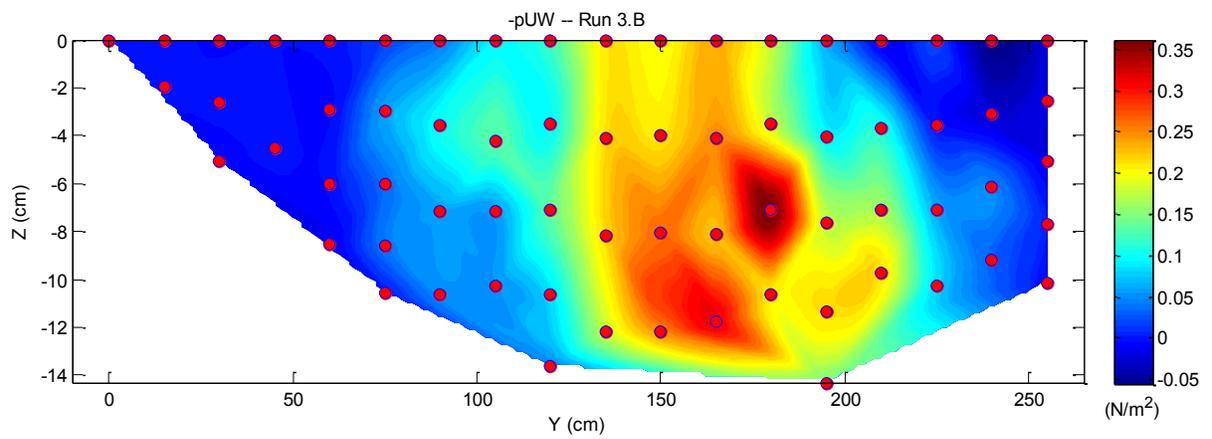
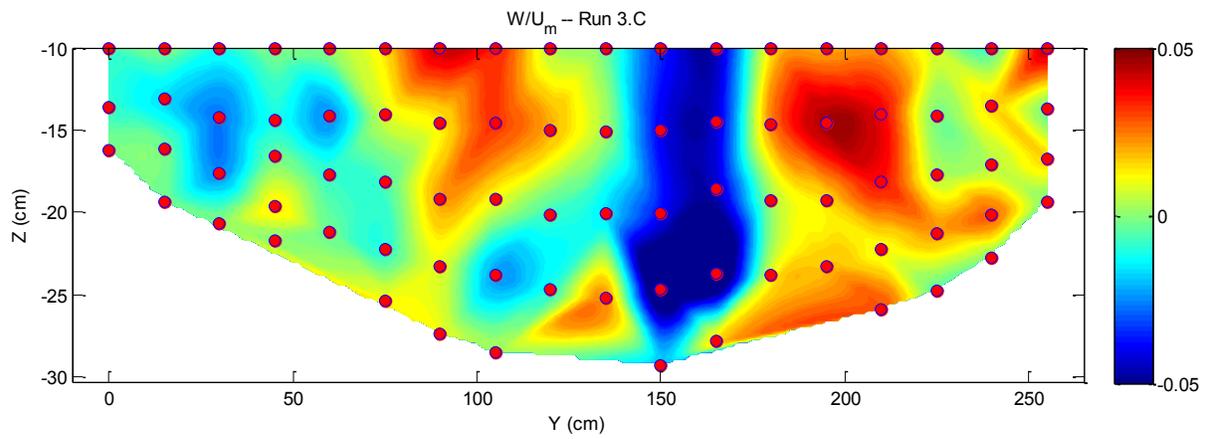
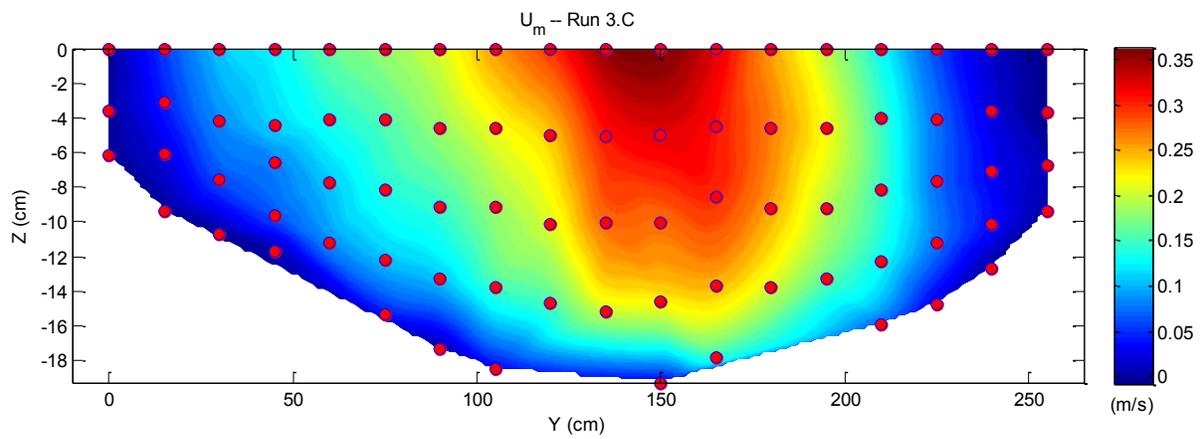


Figure B.33 – Distribution du cisaillement de Reynolds dans le plan XZ (essai 3.B)



**Figure B.34 – Distribution de la vitesse verticale divisée par la vitesse longitudinale moyenne (essai 3.C)**



**Figure B.35 – Distribution de la vitesse longitudinale moyenne (essai 3.C)**

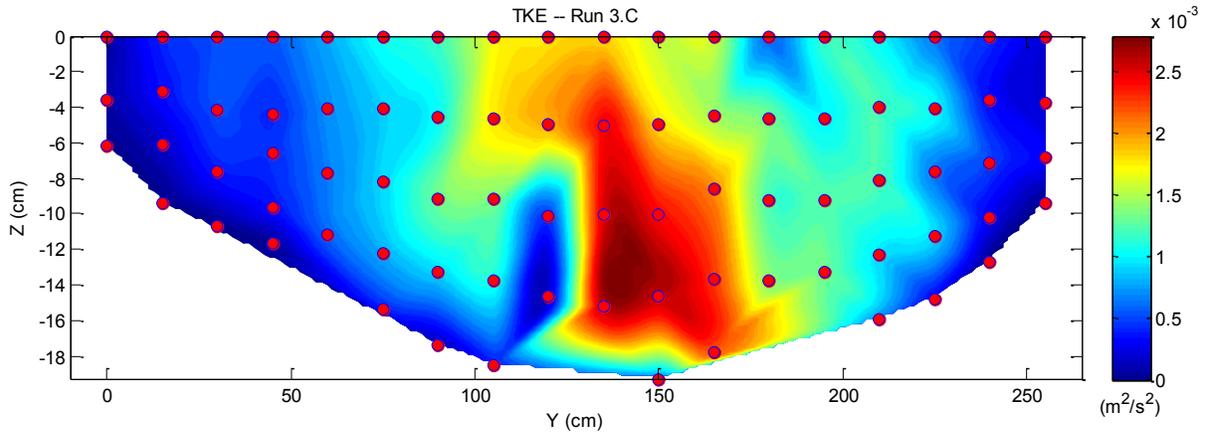


Figure B.36 – Distribution de l'énergie cinétique turbulente (essai 3.C)

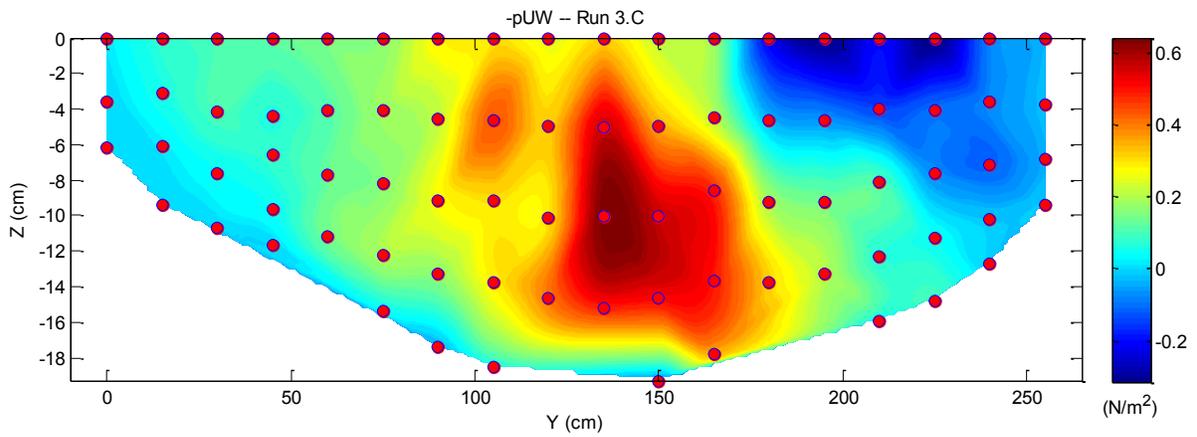


Figure B.37 – Distribution du cisaillement de Reynolds dans le plan XZ (essai 3.C)

## Annexe C

### Correspondance avec le journal *Water Resources Research*



UNIVERSITÉ DE  
SHERBROOKE

Faculté de génie / Faculty of Engineering  
2500 Boul. Université  
Sherbrooke (Québec) J1K 2R1  
Canada

Département de génie civil / Department of Civil Eng.  
(819) 821-7114 (téléphone / phone)  
(819) 821-7974 (télécopieur / fax)  
www.gci.usherbrooke.ca

March 9th, 2015

Alberto Montanari, Editor in Chief  
Professor of Hydraulic Works and Hydrology  
Department DICAM  
University of Bologna  
Via del Risorgimento 2, I-40136 Bologna, Italy

**RE: WRR new manuscript submission**

Dear Professor Montanari,

My co-author, Patrick Nicol, and I wish to submit the enclosed manuscript entitled "Characteristics of *in situ* secondary currents in gravel-bed rivers" for consideration for publication in the *Water Resources Research*. The principal results identify the presence of turbulence generated secondary currents (SC) at three gravel-bed river sites in Quebec, Canada. The characteristics of the SC are presented along with the effect of bed roughness and flow depth on SC generation. The influence of SC on bed shear stress and Reynolds shear stress distributions is also presented. This study presents, to our knowledge, the most detailed investigation of SC performed *in situ* to date and should be of great interest to river engineers and water resource scientists. The analysis and results of this manuscript are original and have not been submitted nor published in whole or in part elsewhere.

We believe that our manuscript fits well within the scope of the journal and that it meets the quality standards of the *Water Resources Research*. We look forward to hearing from you in the future.

Sincerely yours,

Jay Lacey, Ph.D., Eng.  
Associate Professor  
Department of Civil Engineering



# Bibliographie

- Albayrak, I. and U. Lemmin (2011), Secondary currents and corresponding surface velocity patterns in a turbulent open-channel flow over a rough bed, *Journal of Hydraulic Engineering*, 137(11), 1318-1334.
- Ansari, K., Morvan, H. P. and Hargreaves, D. M. (2011). Numerical investigation into secondary currents and wall shear in trapezoidal channels. *Journal of Hydraulic Engineering*, 137(4), 432-440.
- Biron, P. M., Robson, C., Lapointe, M. F. and S. J. Gaskin (2004), Comparing different methods of bed shear stress estimates in simple and complex flow fields, *Earth Surface Processes and Landforms*, 29(11), 1403-1415.
- Blanckaert, K., Duarte, A. and Schleiss, A. J. (2010). Influence of shallowness, bank inclination and bank roughness on the variability of flow patterns and boundary shear stress due to secondary currents in straight open-channels. *Advances in Water Resources*, 33(9), 1062-1074.
- Blanckaert, K. and U. Lemmin (2006), Means of noise reduction in acoustic turbulence measurements, *Journal of Hydraulic Research*, 44(1), 3-17.
- Chanson, H., Trevethan, M. and Koch, C. (2007). Discussion of "turbulence measurements with acoustic doppler velocimeters" by Carlos M. Garcia, Mariano I. Cantero, Yarko Nino, and Marcelo H. Garcia. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(11), 1283-1286.
- Chauvet, H., Devauchelle, O., Metivier, F., Lajeunesse, E. and A. Limare (2014), Recirculation cells in a wide channel, *Physics of Fluids*, 26(1), 016604.
- Colombini, M. (1993), Turbulence-driven secondary flows and formation of sand ridges, *Journal of Fluid Mechanics*, 254, 701-719.
- Dey, S. and A. K. Barbhuiya (2005), Flow field at a vertical-wall abutment, *Journal of Hydraulic Engineering*, 131 (12), 1126-1135.

- Dietrich WE, and P. Whiting (1989), Boundary shear stress and sediment transport in river meanders of sand and gravel, In *River Meandering*, Ikeda S, Parker G (eds). Water Resources Monograph 12, American Geophysical Union: Washington, DC; p. 1-50.
- Duan, J. G. (2009), Mean flow and turbulence around a laboratory spur dike, *Journal of Hydraulic Engineering*, 135(10), 803-811.
- Franca, M. J., Ferreira, R. M. L. and U. Lemmin, (2008), Parameterization of the logarithmic layer of double-averaged streamwise velocity profiles in gravel-bed river flows, *Advances in Water Resources*, 31(6), 915-925.
- Garcia, G. (2008). Transport of gravel and sediment mixtures, in *Sedimentation Engineering: Processes, Measurements, Modeling, and Practice*, [Ed.] M. Garcia, ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 110, 21-164.
- Goring, D. G. and V. I. Nikora, (2002), Despiking acoustic doppler velocimeter data. *Journal of Hydraulic Engineering*, 128(1), 117-126.
- Guo, J. and Julien, P. Y. (2005). Shear stress in smooth rectangular open-channel flows. *Journal of Hydraulic Engineering*, 131(1), 30-37.
- Hardy, R. J., Best, J. L., Lane, S. N. and P. E. Carbonneau (2010), Coherent flow structures in a depth-limited flow over a gravel surface: The influence of surface roughness. *Journal of Geophysical Research F: Earth Surface*, 115 doi: 10.1029/2009JF001416.
- Hinze, J.O. (1959). Turbulence. McGraw-Hill, États-Unis
- Hurther, D. and Lemmin, U. (1998). A constant-beam-width transducer for 3D acoustic Doppler profile measurements in open-channel flows. *Measurement Science & Technology*, 9(10), 1706-14.
- Hussain, A.K.M.F. (1986), Coherent structures and turbulence, *Journal of Fluid Mechanics*, 173, 303-356,
- Kim, S. -C., Friedrichs, C. T., Maa, J. P.-Y. and L. D. Wright (2000), Estimating bottom stress in tidal boundary layer from acoustic Doppler velocimeter data, *Journal of Hydraulic Engineering*, 126(6), 399-406.

- Kironoto, B. A. and Graf, W. H. (1994). Turbulence characteristics in rough uniform open-channel flow. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Water, Maritime and Energy*, 106(4), 333-344.
- Lacey, R.W.J. and C.D Rennie (2012) Laboratory investigation of turbulent flow structure around a bed-mounted cube at multiple flow stages, *Journal of Hydraulic Engineering*, 138(1), 71-84.
- Lamarre, H. and A. G. Roy (2005), Reach scale variability of turbulent flow characteristics in a gravel-bed river, *Geomorphology*, 68(1-2), 95-113.
- Manes, C., Pokrajac, D. and McEwan, I. (2007). Double-averaged open-channel flows with small relative submergence. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(8), 896-904.
- MacVicar, B. J., Beaulieu, E., Champagne, V. and Roy, A. G. (2007). Measuring water velocity in highly turbulent flows: field tests of an electromagnetic current meter (ECM) and an acoustic Doppler velocimeter (ADV), *Earth Surface Processes and Landforms*, 32(9), 1412-1432.
- McLean, S.R. (1981). The Role of Non-Uniform Roughness in the Formation of Sand Ribbons, *Mar. Geol.*, 42, 49–74.
- Montes, S. (1998). Hydraulics of open channel flow. American Society of Civil Engineers, États-Unis
- Nezu, I. and Nakagawa, H. (1993). Turbulence in open-channel flows. Balkema, Rotterdam, The Netherlands.
- Nezu, I. and Rodi, W. (1986). Open-channel Flow Measurements with a Laser Doppler Anemometer, *American Society of Civil Engineers*, - 335 p.
- Nikora, V. I., Goring, D. G. and B. J. F. Biggs (1998), Silverstream eco-hydraulics flume: Hydraulic design and tests, *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, 32(4), 607-620.
- Nikora, V., Goring, D., McEwan, I. and Griffiths, G. (2001). Spatially averaged open-channel flow over rough bed. *Journal of Hydraulic Engineering*, 127(2), 123-133.

- Nikora, V., McEwan, I., McLean, S., Coleman, S., Pokrajac, D. and Walters, R. (2007a). Double-averaging concept for rough-bed open-channel and overland flows: Theoretical background. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(8), 873-883.
- Nikora, V., McLea, S., Coleman, S., Pokrajac, D., McEwan, I., Campbell, L., Aberle, J., Clunie, D. and Koll, K. (2007b). Double-averaging concept for rough-bed open-channel and overland flows: Applications. *Journal of Hydraulic Engineering*, 133(8), 884-895.
- Nikora, V. and Roy, A. G. (2010). Secondary flows in rivers : Theoretical framework, recent advances, and current challenges. 7<sup>th</sup> Gravel-bed river conference, Tadoussac, Québec,
- Nikora, V. and A. G. Roy (2012), Secondary Flows in Rivers: Theoretical Framework, Recent Advances, and Current Challenges, in *Gravel-bed Rivers: Processes, Tools, Environments*, [Ed.] M. Church, P.M. Biron, A.G. Roy, John Wiley & Sons, Ltd, Chichester, UK. doi: 10.1002/9781119952497.ch1
- Noss, C., Salzmann, T. and Storchenegger, I. (2010). Turbulent and advective momentum fluxes in streams. *Water Resources Research*, 46(12), doi:10.1029/2010WR009297.
- Omran, M. and Knight, D. W. (2010). Modelling secondary cells and sediment transport in rectangular channels. *Journal of Hydraulic Research*, 48(2), 205-212.
- Papanicolaou, A. N., and R. Hildale (2002), Turbulence characteristics in gradual channel transition, *J. Eng. Mech.*, 1289, 948–960.
- Papanicolaou, A. N., Elhakeem, M., Krallis, G., Prakash, S. and Edinger, J. (2008). Sediment transport modeling review - Current and future developments. *Journal of Hydraulic Engineering*, 134(1), 1-14.
- Parker, G. (2008). Transport of gravel and sediment mixtures, in *Sedimentation Engineering: Processes, Measurements, Modeling, and Practice*, [Ed.] M. Garcia, ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 110, 165-252.
- Rodriguez, J. F. and Garcia, M. H. (2008). Laboratory measurements of 3-D flow patterns and turbulence in straight open channel with rough bed. *Journal of Hydraulic Research*, 46(4), 454-465.

- Roy, A. G., Buffin-Bélanger, T., Lamarre, H. and A. D. Kirkbride (2004), Size, shape and dynamics of large-scale turbulent flow structures in a gravel-bed river. *Journal of Fluid Mechanics*, 500, 1-27.
- Schlichting H. (1987), *Boundary Layer Theory* (7th edition). McGraw-Hill: New York
- Shiono, K. and Knight, D. W. (1991). Turbulent open-channel flows with variable depth across the channel. *Journal of Fluid Mechanics*, 222, 617-46.
- Soulsby, R. L. (1983), The bottom boundary layer of shelf seas, in *Physical oceanography of coastal and shelf seas*, [Ed.] Johns, B., Elsevier, 189-266.
- Sukhodolov, A. N. and Rhoads, B. L. (2001). Field investigation of three-dimensional flow structure at stream confluences: 2. Turbulence, *Water Resources Research*, volume 37, numéro 9, p. 2411-2424.
- Sukhodolov, A. N., Schnauder, I. and W. S. J. Uijtewaal (2010), Dynamics of shallow lateral shear layers: Experimental study in a river with a sandy bed, *Water Resources Research*, 46(11) DOI: 10.1029/2010WR009245
- Sukhodolov, A. N. and W. S. J. Uijtewaal (2010), Assessment of a river reach for environmental fluid dynamics studies, *Journal of Hydraulic Engineering*, 136(11), 880-888.
- Tennekes, H. and Lumley, J. L. (1972). *A first course in turbulence*. The MIT Press, Cambridge, Massachusetts, and London, England.
- Tominaga, A., Nezu, I., Ezaki, K. and Nakagawa, H. (1989). Three-dimensional turbulent structure in straight open channel flows. *Journal of Hydraulic Research*, 27(1), 149-173.
- Vanoni, V.A. (1946). Transportation of suspended sediment by water, *Transactions, ASCE*, Vol. 111, Paper No. 2267, 67-133.
- Voulgaris, G. and J.H. Trowbridge (1998) Evaluation of the acoustic Doppler velocimeter (ADV) for turbulence measurements, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 15(1), 272-289.
- Wolman, G. M, (1954), A method of sampling coarse river-bed material, *Transaction, American Geophysical Union*, 35(6), 951-956.

Yang, S. -. (2005). Interactions of boundary shear stress, secondary currents and velocity. *Fluid Dynamics Research*, 36(3), 121-36.

Yang, S.-Q. and A. T. Chow (2008), Turbulence structures in non-uniform flows, *Advances in Water Resources*, 31(10), 1344-1351.

Yen, B. (2002). Open Channel Flow Resistance. *Journal of Hydraulic Engineering*, volume 128, numéro 1, p. 20-39.