

2M11.3466.1

Université de Montréal

**Caractérisation de l'écoulement turbulent en rivière à lit
de graviers peu profonde**
Stratégie d'échantillonnage, interpolation et structure spatiale

par
Mathieu Roy

Département de Géographie
Arts et Sciences

Mémoire présenté à la Faculté des études supérieures
en vue de l'obtention du grade de M.Sc.
en Géographie
Géomorphologie fluviale

Novembre 2006

© Mathieu Roy, 2006



6
59
U54
2007
V'002

2007 10 10

Direction des bibliothèques

AVIS

L'auteur a autorisé l'Université de Montréal à reproduire et diffuser, en totalité ou en partie, par quelque moyen que ce soit et sur quelque support que ce soit, et exclusivement à des fins non lucratives d'enseignement et de recherche, des copies de ce mémoire ou de cette thèse.

L'auteur et les coauteurs le cas échéant conservent la propriété du droit d'auteur et des droits moraux qui protègent ce document. Ni la thèse ou le mémoire, ni des extraits substantiels de ce document, ne doivent être imprimés ou autrement reproduits sans l'autorisation de l'auteur.

Afin de se conformer à la Loi canadienne sur la protection des renseignements personnels, quelques formulaires secondaires, coordonnées ou signatures intégrées au texte ont pu être enlevés de ce document. Bien que cela ait pu affecter la pagination, il n'y a aucun contenu manquant.

NOTICE

The author of this thesis or dissertation has granted a nonexclusive license allowing Université de Montréal to reproduce and publish the document, in part or in whole, and in any format, solely for noncommercial educational and research purposes.

The author and co-authors if applicable retain copyright ownership and moral rights in this document. Neither the whole thesis or dissertation, nor substantial extracts from it, may be printed or otherwise reproduced without the author's permission.

In compliance with the Canadian Privacy Act some supporting forms, contact information or signatures may have been removed from the document. While this may affect the document page count, it does not represent any loss of content from the document.

Université de Montréal
Faculté des études supérieures

Ce mémoire intitulé :

**Caractérisation de la turbulence en rivière à lit de
graviers peu profonde**

présenté par :
Mathieu Roy

a été évalué par un jury composé des personnes suivantes :

François Courchesne, président-rapporteur
André Roy, directeur de recherche
Lael Parrott, membre du jury

Sommaire

La turbulence de l'écoulement en rivière a récemment été reconnue comme une variable qui affecte le comportement et les dépenses énergétiques des poissons. De plus, comme la turbulence explique en partie la distribution zones aux propriétés uniformes (*patch*) de certaines composantes des écosystèmes fluviaux, il importe donc de connaître sa distribution spatiale à l'échelle du tronçon. Dans les rivières à lit de graviers, où la profondeur est souvent limitée, la méthode la plus appropriée consiste à caractériser la turbulence à partir de sondes ponctuelles à haute fréquence. En raison de la nature et du fonctionnement de ces instruments de mesure, cette stratégie exige des efforts d'échantillonnage considérables. L'interpolation spatiale des mesures ponctuelles constitue donc un outil intéressant pour obtenir une couverture spatiale de l'écoulement turbulent.

Dans cette étude, la distribution spatiale de la turbulence dans quatre sections morphologiquement distinctes d'une rivière à lit de graviers a été investiguée dans le but de déterminer une méthodologie d'échantillonnage. Les objectifs sont : 1) de déterminer quel algorithme d'interpolation offre la meilleure représentation de la variabilité de la turbulence, 2) d'estimer la densité optimale de points représentant un compromis minimisant les efforts d'échantillonnage et maximisant la précision de l'interpolation et 3) de caractériser la structure spatiale longitudinale et transversale des propriétés turbulentes à l'échelle du tronçon.

Dans un segment de la rivière Eaton Nord, Québec, Canada, nous avons comparé deux seuils et deux mouilles présentant des étendues contrastées de vitesse moyenne, turbulence et rugosité du lit. La microtopographie du lit a été caractérisée à l'aide d'une station tachéométrique. Des séries temporelles de vitesse de l'écoulement ont été recueillies à tous les 25 cm selon une grille d'échantillonnage systématique à l'aide de deux sondes acoustiques à effet Doppler (ADV). La profondeur des tronçons varie entre 0.4 et 0.9 m et la vitesse oscille entre 0 et 100 cm/s. À partir des séries de vitesses, nous avons estimé la

vitesse moyenne, l'intensité turbulente, le cisaillement de Reynolds et l'énergie cinétique turbulente.

La performance de cinq modèles d'interpolation a été évaluée à une haute densité (16 points/m²) en comparant la différence absolue entre les valeurs estimées et les valeurs mesurées d'un échantillon test. Comme la différence entre les modèles n'était pas significative, le modèle d'interpolation linéaire basé sur une grille de triangles irréguliers a été sélectionné pour les analyses subséquentes. Ensuite, la relation entre la densité d'échantillonnage et les erreurs d'interpolation a été analysée. Une densité variant entre 4 et 5.5 points/m² représente le compromis optimal minimisant les efforts d'échantillonnage et maximisant la précision de l'interpolation. Sur une grille d'échantillonnage systématique, cette densité représente un échantillonnage au pas de 0.5 m. Nous avons aussi observé que la rugosité moyenne du lit présente une relation linéaire avec l'hétérogénéité hydraulique des sections et par conséquent, avec les erreurs d'interpolation. Toutefois, les sections les plus rugueuses et hétérogènes ne présentent pas des valeurs critiques d'échantillonnage supérieures, suggérant qu'une partie de la variabilité dans ces sections survient à une échelle inférieure à 0.25 m.

Les variables ne sont pas toutes distribuées de la même façon dans l'espace. À la densité d'échantillonnage optimale, les intensités turbulentes (*RMS*) dans les trois composantes présentent des erreurs relatives comparables à celles de la vitesse moyenne longitudinale, soit des erreurs variant entre 10 et 15 %. L'énergie cinétique montre des erreurs légèrement supérieures, avoisinant 20 %. À l'opposé, la variabilité de la vitesse moyenne verticale (*W*) et du cisaillement de Reynolds (τ) sont mal représentés par un échantillonnage planimétrique, avec des erreurs relatives variant entre 30 et 50 % et entre 65 et 100 % respectivement.

Les semivariogrammes directionnels ont montré une plus grande variabilité spatiale dans la direction transversale que longitudinale. De plus, pour la plupart des variables, la persistance des patrons spatiaux s'étendait sur une distance deux fois plus longue dans la

direction longitudinale que transversale. L'inverse a aussi parfois été observé pour certaines variables, telles que U et V et la magnitude de la différence entre l'axe longitudinal varie de façon très importante entre les sections. Par conséquent, devant la difficulté d'établir une norme quantitative de pas d'échantillonnage selon la direction, l'échantillonnage selon un pas égal dans les deux directions pourrait s'avérer la meilleure option.

Les erreurs d'interpolation relativement faibles de l'intensité turbulente et la longue portée des semivariogrammes directionnels confirment la dominance de grands patrons spatiaux de turbulence en rivière. L'occurrence de structures turbulentes induites par les éléments de rugosité individuels pourrait être camouflée par une dominance des structures à grande échelle balayant la colonne d'eau.

La méthodologie d'échantillonnage élaborée dans cette étude pourra s'avérer utile d'une part pour caractériser l'habitat des poissons, d'autre part pour améliorer nos connaissances des liens qui unissent la turbulence aux autres variables hydrauliques. Ultérieurement, ces connaissances pourront être appliquées à l'élaboration de plans de restauration des habitats fluviaux et à la modélisation hydrodynamique de l'écoulement turbulent.

Mots-clés : Rivières à lit de graviers, turbulence, échantillonnage, habitats

Abstract

The use of biotelemetry such as radio-tracking and PIT tags has renewed interest in fish habitat studies. These techniques provide fish locations that can be linked to physical habitat variables (depth, velocity, substrate size and roughness, etc.) at the reach scale. Recently, flow turbulence has been recognized as a variable that affects fish behavior and energy expenditures. In gravel-bed rivers, where depth is often limited, the most common way to measure turbulence is to use high frequency velocity sensors at a point and spatially interpolate the data at the scale of the entire reach. In this study, we provide guidelines for the sampling and the interpolation of velocity point measurements at the reach scale. The objectives were (1) to estimate the accuracy of several interpolation models; (2) to assess the performance of various interpolation models and estimate an optimal density of measurement that would represent a tradeoff between an extensive sampling strategy and reasonable interpolation accuracy; and (3) to investigate the downstream and transverse structure of turbulent flow in river morphological units.

The study sites consisted of four river sections, two riffles and two pools, with contrasting velocity ranges, depths and bed roughness. Velocity time series of 100 s were sampled systematically every 25 cm using two acoustic Doppler Velocimeters (25 Hz). From the velocity time series, several mean and turbulent flow parameters were estimated (mean flow velocity, *RMS*, Reynolds shear stress and turbulent kinetic energy). The performance of five interpolation models was then tested. Since no significant difference was observed, the linear interpolation model was chosen for further analysis. Testing the influence of the sample size on the interpolation model accuracy was done by successively subtracting subsamples of 5 % up to 95% of the total number of points and by computing interpolation error estimators. Our conclusions are the following:

1. Densities varying between 4 points/m² and 5.5 points/m² represent a tradeoff between minimizing sampling effort and maximizing interpolation accuracy.

2. Mean bed roughness presents a significant linear correlation with hydraulic heterogeneity of the sections and with interpolation errors. Nevertheless, the sections presenting a rougher bed did not show higher density threshold, suggesting that some part of the variability in turbulence statistics in the section varies over a scale smaller than 0.25 m.

3. At the optimal sampling density, interpolation errors related to turbulent intensities are comparable to those of mean flow velocity (10 to 15 %) and *TKE*-related errors are slightly higher (20 %)

4. Mean vertical velocity and shear stress are not well characterized using a planimetric sampling scheme as errors range from 30 to 50 % and 65 to 100 % respectively.

5. Directional semivariograms showed a greater spatial variability in the transversal direction compared to the longitudinal direction. The overall coherence of spatial patterns extended over a distance twice as long in the downstream than in the transverse direction. The opposite was observed for a few variables and the magnitudes of the difference between the directions varied substantially between the sections. Therefore, systematic sampling could be more suitable to a wide range of sections than an asymmetric sampling.

6. The interpolation errors are relatively low and the long range of the semivariograms confirm the dominance of large scale turbulent patterns. This suggests that coherent turbulent structures induced by roughness elements could be masked by the dominance of more energetic large scale turbulent structures sweeping the entire water column.

The sampling guidelines presented in this study offer efficient tools for further investigation of the relations between turbulent flow and fish habitat use.

Keywords : Gravel-bed rivers, turbulence, sampling, habitats

Table des matières

Sommaire	iii
Abstract	vi
Table des matières.....	viii
Liste des tableaux.....	xi
Liste des figures	xiii
Liste des symboles	xxi
Remerciements.....	xxii
1. Introduction et contexte.....	1
1.1 L'écoulement en rivière	2
1.1.1 Les types d'écoulement.....	3
1.1.2 La couche-limite et le profil de vitesse	4
1.1.3 La turbulence.....	6
1.1.4 Les échelles temporelles et spatiales de variabilité de l'écoulement	16
1.2 Les habitats fluviaux : milieux turbulents.....	18
1.2.1 Bactéries, algues et périphyton	18
1.2.2 Les invertébrés	20
1.2.3 Les poissons	21
1.2.4 L'importance de la turbulence à l'échelle du tronçon : exemple de l'utilisation de l'habitat par les juvéniles du saumon Atlantique de la rivière Patapédia	25
1.3 Variables d'habitat physique : Interrelations et caractérisation à l'échelle du tronçon	27
1.3.1 La vitesse moyenne	28
1.3.2 La rugosité.....	29
1.3.3 La turbulence : variabilité en plan.....	40
1.4 Conclusion	49
2. Problématique et méthodologie.....	51
2.1 Problématique et objectifs.....	51
2.2 Méthodologie	54

2.2.1 Site d'étude.....	54
2.2.2 Acquisition des données.....	58
2.2.3 Les variables de l'écoulement.....	65
2.2.4 Analyse des données	67
3.0 Résultats	74
3.1 Description des sections.....	74
3.1.1 Profondeur de l'écoulement	74
3.1.2 La rugosité du lit	74
3.1.3 Vitesse moyenne longitudinale	76
3.1.4 Vitesse moyenne latérale.....	77
3.1.5 Vitesse moyenne verticale.....	78
3.1.6 Intensité turbulente longitudinale.....	79
3.1.7 Intensité turbulente latérale.....	80
3.1.8 Intensité turbulente verticale.....	81
3.1.9 Intensité turbulente relative.....	82
3.1.10 Le cisaillement de Reynolds	85
3.1.11 Énergie cinétique turbulente (TKE).....	86
3.1.12 Interrelations entre les variables.....	88
3.1.13 Analyse en composante principale.....	91
3.2 Analyse des données	95
3.2.1 Choix du modèle d'interpolation	95
3.2.2 Performance du modèle linéaire.....	97
3.2.3 Effet de la densité d'échantillonnage sur l'exactitude du modèle d'interpolation	100
3.2.4 La variabilité de la performance entre les sections : rugosité et hétérogénéité 108	
3.2.5 Semivariogrammes directionnels.....	110
4.0 Discussion	119
4.1 Une méthodologie d'échantillonnage	119
4.2 La structure spatiale des variables hydrauliques.....	124

4.3 Interprétation hydraulique.....	128
Conclusion	133
Bibliographie.....	135

Liste des tableaux

Tableau 2.1 Caractéristiques morphologiques de chaque section. La taille des particules est mesurée à partir de l'axe b (intermédiaire). Le tri $\sigma = ((\Psi_{84}-\Psi_{16})/4)+(\Psi_{95}-\Psi_5)/6.6$, où $\Psi=\log_2 D$ (mm).....	57
Tableau 2.2 Moyennes et écarts-types (entre parenthèses) de la vitesse moyenne et la profondeur de l'écoulement dans les quatre sections.....	58
Tableau 2.3 Caractéristiques de l'échantillonnage des séries de vitesse. Les données manquantes sont causées par des séries de vitesses rejetées pour leur trop basse qualité ou des trous dans la grille d'échantillonnage causés par une trop faible profondeur.....	63
Tableau 2.4 Paramètres des semivariogrammes directionnels.....	71
Tableau 3.1. Valeurs médiane de d'intensité turbulente relative longitudinale ITR_U , latérale ITR_L et verticale ITR_W des quatre sections.....	83
Tableau 3.2. Synthèse des statistiques des quatre sections. Moyenne, écart-type (entre parenthèses) et médiane (*).....	88
Tableau 3.3. Matrice de corrélation des variables hydrauliques du Seuil 1.....	89
Tableau 3.4 Matrice de corrélation des variables hydrauliques du Seuil 2.....	89
Tableau 3.5 Matrice de corrélation des variables hydrauliques de Mouille 1..	90
Tableau 3.6 Matrice de corrélation des variables hydrauliques de Mouille 2..	90
Tableau 3.7 Matrice de corrélation des variables hydrauliques pour les quatre sections.....	91
Tableau 3.8 Saturations (corrélation entre une variable et une composante) des variables primaires des quatre sections pour les trois premières composantes principales. Les saturations surlignées sont les plus importantes pour décrire la composante.....	93
Tableau 3.9 Moyenne et écart-type (entre parenthèses) de la différence absolue moyenne ($ \overline{\Delta z} $) entre les valeurs mesurées et les valeurs estimées de 20 groupes-test (N=10% des échantillons de chaque section, densité = 14.4 points/m ²) pour trois variables (U , RMS_U et TKE) et pour cinq modèles	

d'interpolation : linéaire, cubique, distance inverse, krigeage et voisin naturel. F et p représentent les indices de tests ANOVA comparant $ \overline{\Delta z} $ des cinq modèles.....	97
Tableau 3.10 Paramètres des modèles de covariance (exp : exponentiel, spher : sphérique, gauss : gaussien) ajustés aux variogrammes directionnels des variables hydrauliques dans la direction longitudinale (<i>l</i>).et transversale (<i>t</i>).....	113

Liste des figures

Figure 1.1 Profil de vitesse dans la couche-limite d'un écoulement turbulent. Variation de la vitesse moyenne (x) en fonction de la hauteur d'eau (y). L'épaisseur des couches n'est pas à l'échelle. (Carling, 1992a)....	5
Figure 1.2 Exemple d'une série temporelle de vitesses longitudinales (u), latérales (v) et verticales (w) enregistrée à 25 Hz à 10 cm au dessus du lit dans une rivière à lit de gravier.....	7
Figure 1.3 Vue latérale d'un modèle conceptuel illustrant le cycle éjection-incursion (d'après Smith, 1996 ; modifié par Buffin-Bélanger <i>et al.</i> 2000a)..	11
Figure 1.4 Six zones d'écoulement associées à la présence d'un amas de galet dans une rivière à lit de gravier (d'après Buffin-Bélanger et Roy, 1998). La structure d'échappement résulte de l'interaction entre la zone de recirculation et l'écoulement longitudinal.....	12
Figure 1.5 (a) Mouvement des structures à grande échelle (Buffin-Bélanger <i>et al.</i> , 2000a, tel que visualisé par Falco (1977)) (b) Représentation des zones de vitesse rapide et de vitesse lente ainsi que leur interface. L'interface rapide-lent est caractérisée par une forte contrainte de cisaillement (Buffin-Bélanger <i>et al.</i> , 2000a, tel que documenté par Nakagawa et Nezu, 1981) (c) Représentation d'une séquence d'événements turbulents associée au passage de fronts de vitesse lents et rapides (Buffin-Bélanger <i>et al.</i> 2000a, tel que suggéré par Ferguson <i>et al.</i> 1996). La succession typique à un point passe par les temps 1 à 5.....	14
Figure 1.6 Vue de plan (a) et de côté (b) de la distribution spatiale des fronts de vitesse lente et rapide (Yalin 1992).....	15
Figure 1.7 Spectre de puissance de la vitesse dans une rivière à lit de gravier schématisé en fonction de la fréquence (temporel) et du nombre d'onde (spatial), d'après Nikora (sous presse). W_0 et W représente la largeur de la vallée et du chenal, H la profondeur moyenne, Z la distance au dessus du lit et Δ la taille moyenne des particules.....	17
Figure 1.8 Coûts énergétiques du saumon Atlantique juvénile sous quatre conditions d'écoulement définies par la vitesse moyenne de l'écoulement (U) et l'intensité turbulente (RMS). Les barres blanches représentent les coûts dans des conditions de 'basse' turbulence (5 cm/s) et les barres noires les conditions de 'forte' turbulence (8 cm/s). Les lignes verticales représentent les intervalles de confiance. D'après Enders <i>et al.</i> (2003).....	23

- Figure 1.9 Positions des poissons (cercles pleins) et des briques (rectangles) à un débit de a) $0.030 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. et b) $0.111 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Les ellipses représentent l'intervalle de confiance de 65% pour chaque débit. L'écoulement se dirige vers la droite..... 23
- Figure 1.10 Distribution spatiale de la profondeur (Y), de la vitesse moyenne (U) et de l'énergie cinétique turbulente (TKE) dans un tronçon A, B et C de la rivière Patapédia. Domaines vitaux (kernel) de quatre saumons Atlantique juvéniles estimé à des intervalles de confiance de 25, 50, 75 et 95% de probabilité de densité des poissons. Les cercles de plus petite taille pour les poissons 1 et 4 font partie du domaine vital estimé à une probabilité de 95% de probabilité de présence. (données non publiées)..... 26
- Figure 1.11. Trois types d'écoulement au dessus d'un lit rugueux, fonction de l'espacement entre les protubérances (λ): a) écoulement au dessus d'éléments isolés, b) écoulement dominé par le sillage, c) écoulement quasi lisse. D'après Morris (1955), modifié par Chow (1982). Tiré de Davis et Barmuta, 1984)..... 32
- Figure 1.12 Vu de profil et en plan d'un outil de mesure de la rugosité d'un habitat d'invertébrés. Unités en cm. D'après Gore (1978)..... 34
- Figure 1.13. Vue de profil d'une séquence seuil-mouille typique dans une rivière à lit de graviers. Les unités de mesures sont exprimées en 'largeur du chenal'. (D'après Thomson *et al.* 2006)..... 36
- Figure 1.14 Dynamique morpho-sédimentaire d'un gradient longitudinal dans une séquence seuil-mouille typique. La séquence illustre le niveau d'imbrication et la taille des particules, le seuil de mise en transport des particules et le bilan sédimentaire dans une mouille localisée entre deux seuils et divisée en 'entrée', 'milieu' et 'sortie'. (D'après Sear, 1996)..... 37
- Figure.1.15 Distribution des sous-unités morpho-hydrauliques à chaque site. MR : centre du seuil PT: sortie de la mouille; PH : entrée de la mouille; FE : bords au courant rapide; SE : bords au courant lent..... 39
- Figure 1.16. A) Vue de haut de la zone d'échantillonnage. Les grands cercles représentent les billes du lit (8 mm de diamètre) et les petits cercles la localisation des mesures de LDV. B) Distribution spatiale de la vitesse verticale moyenne pondérée ($W^* u_*^{-1}$) C) Distribution spatiale de l'intensité turbulente verticale ($w'^* u_*^{-1}$)..... 41
- Figure 1.17 Moyenne (U), écart-type (URMS), et le coefficient d'asymétrie (USkew) de la vitesse longitudinale (A) dans la couche la plus près du lit et (B) dans la couche la plus élevée au dessus du lit ($zD = 0.05 \text{ m}$, flow 1; zD

= 0.1 m, flows 2 et 3) sous trois débits. L'écoulement s'écoule de gauche à droite. L'échelle est en centimètres .Pour le coefficient d'asymétrie, les symboles pleins indiquent des valeurs négatives. (D'après Buffin-Bélanger *et al.* 2006)..... 42

Figure 1.18 Variabilité spatiale de la hauteur de rugosité (y_0), de la contrainte de cisaillement au lit et de l'intensité turbulente dans deux tronçons de la rivière Eaton, Québec a) 1999 et b) 2000. (D'après Lamarre et Roy, 2005)..... 44

Figure 1.19. Corrélation entre la distance des profils de vitesse d'éléments de rugosité et les propriétés turbulentes (haut) fréquence d'événements, (milieu) durée des événements de haute vitesse (bas) durée des événements de basse vitesse. a) 1999 et b) 2000..... 46

Figure 1.20 Carte thématique représentant l'intensité turbulente longitudinale sans dimension u'/U_* (cercles proportionnels) superposé à la bathymétrie du tronçon à trois débits différents. À droite, histogrammes de probabilités représentant la distribution d'intensité turbulente du tronçon. (D'après Legleiter *et al.* sous presse)..... 47

Figure 1.21 Semivariogrammes directionnels (dessus) longitudinal et (bas) transverse de l'intensité turbulente dans les trois composantes orthogonales de l'écoulement, (de gauche à droite) u' ,longitudinale, v' verticale et w' latérale. N.B. la notation des composantes verticales et latérales diffère de celle utilisée dans le texte. Les couleurs désignent trois débits différents. (D'après Legleiter *et al.* sous presse)..... 48

Figure 2.1 Localisation du site d'étude. Rivière Eaton Nord, Estrie, Québec, Canada. (Figure tirée de Buffin-Bélanger *et al.* 1998)..... 54

Figure 2.2 Quatre sections étudiées. S1: Seuil 1; S2: Seuil 2, M1: Mouille 1; M2: Mouille 2. Les flèches indiquent la direction de l'écoulement..... 55

Figure 2.3 Segment de la rivière Eaton Nord et localisation des quatre sections caractérisées. Les flèches indiquent le sens de l'écoulement..... 56

Figure 2.4. Courbes de fréquence cumulée de la distribution granulométrique de l'axe B (intermédiaire)..... 57

Figure 2.5 Dates des quatre périodes de prise de données et série des débits estimés (m^3/s) à l'aide d'une jauge à pression électronique et d'une courbe de tarage..... 59

Figure 2.6 Fonctionnement d'un courantomètre à effet Doppler. La sonde mesure la vitesse en enregistrant la différence de fréquence de la pulsation émise par rapport à sa fréquence de retour après avoir réfléchi sur une particule en suspension. Les trois branches orthogonales de la sonde permettent de mesurer les composantes longitudinale, latérale et verticale de l'écoulement. (Sontek, 2006).....	60
Figure 2.7 Stratégie d'échantillonnage utilisée : Deux opérateurs dans la rivière positionnent les sondes et une personne sur la berge enregistre, vérifie la qualité des signaux et localise la position des mesures à l'aide d'une station totale tachéométrique.....	61
Figure 2.8 Photo illustrant un exemple de repères utilisés comme grille d'échantillonnage systématique.....	62
Figure 2.9 Grilles d'échantillonnage des quatre sections de la rivière Eaton Nord.....	63
Figure 2.10 Technique de rééchantillonnage. 10% des points d'une section sont soustraits. Ensuite les données sont interpolées. Puis, les valeurs obtenues par le modèle à l'endroit où les points ont été soustraits sont comparées aux valeurs réelles.....	69
Figure 2.11. Exemple de semivariogramme expérimental. La ligne bleue représente un modèle paramétrique asymptotique appliqué aux données expérimentales. Le pas est de 0.25 m. Dans cet exemple, la présence d'une pépîte, d'un palier et d'une portée souligne l'autocorrélation spatiale des données.....	72
Figure 3.1 Cartes et distributions de fréquence de la bathymétrie en mètres des quatre sections, S1: Seuil 1, S2: Seuil 2, M1: Mouille 1 et M2: Mouille2. Les flèches représentent la direction de l'écoulement longitudinal. Les points représentent la localisation des échantillons de la vitesse de l'écoulement. m : moyenne ; et : écart-type du tronçon. Les distributions et statistiques bathymétriques sont calculées à partir de la portion du tronçon couverte par les mesures de vitesse de l'écoulement uniquement.....	75
Figure 3.3 Cartes et distributions de fréquence de la rugosité (m) des quatre sections, S1: Seuil 1, S2: Seuil 2, M1: Mouille 1 et M2: Mouille 2, calculé à partir de l'écart-type d'une fenêtre mobile de 65 X 65 cm. Les flèches représentent la direction de l'écoulement longitudinal. Les points représentent la localisation des échantillons de la vitesse de l'écoulement. m : moyenne ; et : écart-type du tronçon. Les distributions et statistiques de rugosité sont calculées à partir de la portion du tronçon couverte par des les	

mesures de vitesse de l'écoulement uniquement.....	76
Figure 3.4 Cartes et distributions de fréquence de la vitesse moyenne longitudinale (U) (cm/s) des quatre sections, S1: Seuil 1, S2: Seuil 2, M1: Mouille 1 et M2: Mouille 2. Les flèches représentent la direction de l'écoulement longitudinal. Les points représentent la localisation des échantillons de la vitesse de l'écoulement. m : moyenne ; et : écart-type du tronçon.....	77
Figure 3.5 Cartes et distributions de fréquence de la vitesse moyenne latérale (V) (cm/s) des quatre sections, S1: Seuil 1, S2: Seuil 2, M1: Mouille 1 et M2: Mouille 2. Les flèches représentent la direction de l'écoulement longitudinal. Les points représentent la localisation des échantillons de la vitesse de l'écoulement. m : moyenne ; et : écart-type du tronçon.....	78
Figure 3.6 Cartes et distributions de fréquence de la vitesse moyenne verticale (W) (cm/s) des quatre sections, S1: Seuil 1, S2: Seuil 2, M1: Mouille 1 et M2: Mouille 2. Les flèches représentent la direction de l'écoulement longitudinal. Les points représentent la localisation des échantillons de la vitesse de l'écoulement. m : moyenne ; et : écart-type du tronçon.....	79
Figure 3.7 Cartes et distributions de RMS_U (cm/s) des quatre sections, S1: Seuil 1, S2: Seuil 2, M1: Mouille 1 et M2: Mouille 2. Les flèches représentent la direction de l'écoulement longitudinal. Les points représentent la localisation des échantillons de la vitesse de l'écoulement. m : moyenne ; et : écart-type du tronçon.....	80
Figure 3.8 Cartes et distributions de RMS_V (cm/s) des quatre sections, S1: Seuil 1, S2: Seuil 2, M1: Mouille 1 et M2: Mouille 2. Les flèches représentent la direction de l'écoulement longitudinal. Les points représentent la localisation des échantillons de la vitesse de l'écoulement. m : moyenne ; et : écart-type du tronçon.....	81
Figure 3.9 Cartes et distributions de RMS_W (cm/s) des quatre sections, S1: Seuil 1, S2: Seuil 2, M1: Mouille 1 et M2: Mouille 2. Les flèches représentent la direction de l'écoulement longitudinal. Les points représentent la localisation des échantillons de la vitesse de l'écoulement. m : moyenne ; et : écart-type du tronçon.....	82
Figure 3.10 Cartes et distributions de l'intensité turbulente relative longitudinale ($ITR_U = RMS_U / U$) (%) des quatre sections, S1: Seuil 1, S2: Seuil 2, M1: Mouille 1 et M2: Mouille 2. Les flèches représentent la direction de l'écoulement longitudinal. Les points représentent la localisation des échantillons de la vitesse de l'écoulement. m : moyenne ;	

et : écart-type du tronçon. ($ITR_U > 200\%$ n'apparaissent pas sur les graphes).....	83
Figure 3.11 Cartes et distributions de l'intensité turbulente relative latérale ($ITR_V = RMS_V / U$) (%) des quatre sections, S1: Seuil 1, S2: Seuil 2, M1: Mouille 1 et M2: Mouille 2. Les flèches représentent la direction de l'écoulement longitudinal. Les points représentent la localisation des échantillons de la vitesse de l'écoulement. m : moyenne ; et : écart-type du tronçon. ($ITR_V > 200\%$ n'apparaissent pas sur les graphes).....	84
Figure 3.12 Cartes et distributions de l'intensité turbulente relative verticale ($ITR_W = RMS_W / U$) (%) des quatre sections, S1: Seuil 1, S2: Seuil 2, M1: Mouille 1 et M2: Mouille 2. Les flèches représentent la direction de l'écoulement longitudinal. Les points représentent la localisation des échantillons de la vitesse de l'écoulement. m : moyenne ; et : écart-type du tronçon. ($ITR_W > 200\%$ n'apparaissent pas sur les graphes).....	85
Figure 3.13 Cartes et distributions du cisaillement de Reynold's (N/m^2) des quatre sections, S1: Seuil 1, S2: Seuil 2, M1: Mouille 1 et M2: Mouille 2. Les flèches représentent la direction de l'écoulement longitudinal. Les points représentent la localisation des échantillons de la vitesse de l'écoulement. m : moyenne ; et : écart-type du tronçon.....	86
Figure 3.14 Cartes et distributions de l'énergie cinétique turbulente (cm^2/s^2) des quatre sections, S1: Seuil 1, S2: Seuil 2, M1: Mouille 1 et M2: Mouille 2. Les flèches représentent la direction de l'écoulement longitudinal. Les points représentent la localisation des échantillons de la vitesse de l'écoulement. m : moyenne ; et : écart-type du tronçon.....	87
Figure 3.15 Variance expliquée (%) par les composantes d'une analyse en composante principale effectuée sur l'ensemble des quatre sections.....	92
Figure 3.16. A) Saturation des variables en fonction de la composante 1 et 2. B) Cartographie des scores de chaque section en fonction des deux premières composantes. La première composante est principalement constituée de la vitesse moyenne et de la turbulence. La seconde composante est basée sur la vitesse moyenne, la rugosité et la profondeur (voir texte).....	94
Figure 3.17 Valeurs de U 'estimées' par un modèle d'interpolation linéaire en fonction des valeurs 'mesurées' d'un échantillon test de 10% des points de mesures de chaque section et proportion de valeurs surestimées par le modèle.....	98

Figure 3.18 A) Valeurs de RMS_U et B) TKE estimées par un modèle d'interpolation linéaire en fonction des valeurs mesurées d'un échantillon test de 10% des points de mesures de chaque section et proportion de valeurs surestimées par le modèle..... 99

Figure 3.19 Différence absolue ($|\overline{\Delta z}|$), erreur relative ($(|\overline{\Delta z}| / \text{moyenne du tronçon}) * 100$) et coefficient de corrélation entre les valeurs mesurées et prédites par l'interpolation en fonction de la densité d'échantillonnage (points /m²) de la vitesse moyenne dans les trois dimensions orthogonales. Les lignes pointillées verticales indiquent les valeurs critiques optimales estimées visuellement..... 103

Figure 3.20 Différence absolue ($|\overline{\Delta z}|$), erreur relative ($(|\overline{\Delta z}| / \text{moyenne du tronçon}) * 100$) et coefficient de corrélation entre les valeurs mesurées et prédites par l'interpolation en fonction de la densité d'échantillonnage de l'intensité turbulente dans les trois dimensions orthogonales. Les lignes pointillées verticales indiquent les valeurs critiques optimales estimées visuellement..... 104

Figure 3.21 Différence absolue ($|\overline{\Delta z}|$), erreur relative ($(|\overline{\Delta z}| / \text{moyenne du tronçon}) * 100$) et coefficient de corrélation entre les valeurs mesurées et prédites par l'interpolation en fonction de la densité d'échantillonnage du cisaillement de Reynolds moyen et de l'énergie cinétique moyenne. Les lignes pointillées verticales indiquent les valeurs critiques optimales estimées visuellement..... 106

Figure 3.22 Valeurs critiques de densités 'échantillonnage optimales estimées pour les variables hydrauliques dans les quatre sections..... 107

Figure 3.23 Moyenne des corrélations entre les valeurs estimées et mesurées et des erreurs relatives à un une valeur critique estimées (Seuils : 5.5 points/m² ; Mouilles : 4 points/m²)..... 108

Figure 3.24 Coefficient de variation (écart-type/moyenne des sections) en fonction de la rugosité du lit moyenne et erreur relative d'interpolation en fonction du coefficient de variation des quatre section Seuil 1, Seuil 2, Mouille 1 et Mouille 2..... 109

Figure 3.25 Semivariogrammes directionnels normalisés longitudinaux (cercles pleins) et transversaux (cercles vides) de la vitesse moyenne de l'écoulement U , V et W sur une distance de 4 m..... 112

Figure 3.26 Semivariogrammes directionnels normalisés longitudinaux (cercles pleins) et transversaux (cercles vides) de l'intensité turbulente de l'écoulement dans les trois dimensions RMS_U , RMS_V et RMS_W sur une distance de 4 m.....	115
Figure 3.27 Semivariogrammes directionnels normalisés longitudinaux (cercles pleins) et transversaux (cercles vides) de l'intensité turbulente de l'écoulement dans les trois dimensions RMS_U , RMS_V et RMS_W sur une distance de 4 m.....	117
Figure 4.1 Comparaison de la densité d'échantillonnage en fonction de la forme à superficie égale. (A : 25 points/m ² B : 27 points/m ²).....	121
Figure 4.2 Densité d'échantillonnage en fonction de la superficie pour six pas d'échantillonnage dans une section hypothétique carrée.....	122

Liste des symboles

d	Profondeur
g	Force gravitationnelle
H	Profondeur moyenne du tronçon
h	'Pas' (lag)
ITR_U	Intensité turbulente relative longitudinale
ITR_V	Intensité turbulente relative latérale
ITR_W	Intensité turbulente relative verticale
l	Direction longitudinale d'un variogramme directionnel
$M1, M2$	Mouille 1, Mouille 2
NA_e	Aire occupée par des éléments de rugosité
Re	nombre de Reynolds
RMS_U	Intensité turbulente longitudinale (valeur quadratique moyenne)
RMS_V	Intensité turbulente latérale (valeur quadratique moyenne)
RMS_W	Intensité turbulente verticale (valeur quadratique moyenne)
s	Pente moyenne du tronçon
$S1, S2$	Seuil 1, Seuil 2
s_0, s_a	Coordonnées d'un point
t	Direction transversale d'un variogramme directionnel
TKE	Énergie cinétique turbulente
U^*	Vitesse de friction
U	Vitesse moyenne longitudinale
u'	Fluctuations de vitesse longitudinale instantanées
V	Vitesse moyenne latérale
v'	Fluctuations de vitesse latérale instantanées
W	Vitesse moyenne verticale
w'	Fluctuations de vitesse verticale instantanées
y_0	Hauteur au dessus du lit pour laquelle la vitesse est nulle
ε	Coefficient de viscosité turbulent
$\gamma(h)$	Semivariance en fonction du pas d'échantillonnage
κ	Constante de Von Karmen
ρ	Densité de l'eau
τ	Contrainte de cisaillement
τ_R	Cisaillement de Reynolds
μ	Viscosité moléculaire de l'eau
ν	Viscosité cinématique

Remerciements

Merci à André Roy de m'avoir transmis sa passion pour la recherche et pour les rivières. Je te remercie André pour la constance de ton enthousiasme, pour les encouragements, pour ta participation active dans la recherche et aussi pour l'intérêt que tu portes envers tes étudiants. Merci aussi de m'avoir donné la chance il y a trois ans de faire partie de cette équipe fort dynamique, de m'avoir fait confiance et intégré dans le projet de la rivière Patapédia. Cette expérience et les responsabilités qui en découlent m'ont ouvert une grande porte. Merci à mes amis européens Eva Enders, Mickaël Ovidio et Eric Hallot pour m'avoir accepté sans retenue comme un membre à part entière de l'équipe malgré mon manque d'expérience. Je remercie sincèrement les personnes qui ont eu la patience de participer à ces longues journées de travaux sur le terrain. Merci à Julie Thérien, Christine Rozon, Francis Gagnon et Annie Cassista. Un merci particulier à Geneviève Marquis pour son support logistique de mise en page et pour sa précieuse aide dans mes débuts dans Matlab. Merci aux autres membres de l'équipe qui avez tous été bien gentils de vouloir répondre à mes multiples questions. Merci à ma famille et mes bons amis, qui m'ont fourni le support moral pour mettre à terme ce travail. Enfin, je tiens à témoigner ma reconnaissance au CRSNG et à la Chaire de recherche du Canada en dynamique fluviale pour leur généreux support financier.

1. Introduction et contexte

Au cours des dernières décennies, les écosystèmes fluviaux ont subi une pression accrue, suite à l'altération de la structure physique des rivières et à la modification des régimes hydrologiques (Parrish *et al.* 1998). Dans ce contexte, la compréhension des liens qui unissent les organismes à leur environnement physique est essentielle au développement de stratégies de conservation et de restauration des habitats fluviaux. En écologie, les variables d'habitat physique sont souvent étudiées dans le but d'expliquer la distribution spatiale des organismes comme les poissons et les invertébrés (e.g. Cunjak, 1988; Brooks *et al.* 2005). La structure spatiale des variables physiques, observable à différentes échelles, présente ainsi un intérêt marqué (Legendre et Fortin, 1989). Cet intérêt a récemment été consolidé notamment par l'effervescence des paradigmes comme la connectivité (Moilanen et Nieminen, 2002), la complexité et l'hétérogénéité spatiale (Arscott *et al.* 2000).

En milieu fluvial, les variables hydrauliques sont généralement considérées comme étant dominantes (Statzner *et al.*, 1988). L'importance du lien entre les variables hydrauliques et les organismes a même justifié la naissance de l'écohydraulique, un champ d'étude interdisciplinaire, né de la fusion de l'écologie, de la géomorphologie fluviale et de l'hydraulique (Kemp *et al.* 1999). Récemment, la turbulence de l'écoulement a été identifiée comme une variable hydraulique d'importance agissant sur le comportement et la distribution des organismes fluviaux (Hart et Finelli, 1999; Biggs *et al.* 2005). Comme la turbulence s'observe sur une gamme d'échelles spatiales et temporelles, elle influence de diverses manières les différents organismes ayant pour domicile les rivières.

Ce projet de recherche s'inscrit dans la foulée des études récentes visant à lier la turbulence de l'écoulement et habitat. La turbulence est un phénomène difficile à caractériser et à quantifier, surtout dans un contexte fluvial qui montre une grande variabilité de rugosité et de morphologie, comme les rivières à lit de graviers. Le mémoire qui suit tente d'évaluer la densité des mesures de turbulence optimale en vue de décrire adéquatement la variabilité dans différentes unités morphologiques. Il se divise en quatre sections. Le premier présente le contexte de l'étude. Nous avons procédé à une vaste recension de la littérature afin de

bien cerner les lacunes et les besoins dans le champ de l'écohydraulique et d'établir les objectifs de l'étude. Au chapitre 2, nous développons la méthodologie avant de présenter les résultats au chapitre 3. Une discussion et des recommandations quant à la densité optimale des mesures et à la structure spatiale de la turbulence en rivière graveleuse.

Ce chapitre a comme objectif de présenter le contexte et la problématique du projet de recherche. Nous visons à exposer l'état des connaissances en ce qui a trait à l'influence de la turbulence sur les organismes fluviaux et ainsi montrer qu'il existe une lacune importante dans les études réalisées à l'échelle du tronçon. D'une part, nous aborderons quelques principes fondamentaux de l'écoulement en rivière et définirons le concept de la turbulence et des échelles de variabilité de l'écoulement. En second lieu, nous illustrerons la diversité et la complexité de l'influence de la turbulence sur les organismes fluviaux par l'entremise de divers exemples portant sur une gamme d'organismes, tels les bactéries, les algues, les invertébrés et les poissons. Ensuite, nous présenterons les principales variables d'habitat physique, leurs interrelations et les méthodes de caractérisation à l'échelle du tronçon.

1.1 L'écoulement en rivière

En milieu fluvial, l'écoulement turbulent est la norme plutôt que l'exception (Carling, 1992). La variabilité spatiale de l'écoulement s'observe en trois dimensions et est fonction de la morphologie du chenal et de la rugosité du lit (Robert, 1990). La turbulence intéresse les géomorphologues fluviaux en raison de son rôle dans les processus de transport des sédiments et dans le développement et le maintien des formes du lit (Leeder, 1983). Les géomorphologues fluviaux et hydrauliciens ont largement documenté les caractéristiques de l'écoulement turbulent en rivière. Cependant, le transfert de ces connaissances vers des applications écologiques en est encore à ses débuts. Bien que la turbulence puisse jouer un rôle important sur le comportement et la distribution des organismes aquatiques, relativement peu d'efforts ont été déployés pour répondre à cette question (Hart et Finelli, 1999).

1.1.1 Les types d'écoulement

Dans un cours d'eau, la vitesse de l'écoulement résulte de l'équilibre entre les forces gravitationnelles et les forces de friction. La viscosité, soit la résistance interne d'un fluide à la déformation, entraîne la création d'un gradient de vitesse et du transfert de *momentum* entre les différentes portions de l'écoulement.

Le nombre de Reynolds (Re) est utilisé pour discriminer l'écoulement laminaire de l'écoulement turbulent. Cette variable sans dimension se décrit comme le rapport entre les forces d'inertie et les forces de friction :

$$Re = (\bar{U}.d)/\nu \quad (1.1)$$

où \bar{U} représente la vitesse moyenne ($m\ s^{-1}$), d la profondeur (m) et ν la viscosité cinématique ($m^2.s^{-1}$). Quand Re est inférieur à 500, les forces visqueuses dominent et l'écoulement est laminaire. Dans ce type d'écoulement, les couches de fluide parallèles glissent les unes sur les autres sans échange vertical ni latéral. Dans un écoulement laminaire, la distribution des forces de cisaillement (τ) ($N\ m^{-2}$), soit la force qui induit un changement de vitesse en fonction de la hauteur au-dessus du lit, s'exprime comme

$$\tau = \mu(du/dy) \quad (1.2)$$

où τ représente la force de cisaillement, μ la viscosité moléculaire de l'eau ($N\ s\ m^{-2}$) et du/dy le taux de changement de la vitesse en fonction de la profondeur (s^{-1}).

Lorsque Re est plus grand que 2000, les forces turbulentes dominent. Les échanges latéraux et verticaux dans le fluide marqués par des fluctuations instantanées de vitesse sont importants. Ce type d'écoulement est omniprésent en rivière naturelle, comme le nombre de Reynolds observé est presque toujours en deçà du seuil de 2000. Lorsque l'écoulement est

turbulent, on ajoute un coefficient de friction relié aux tourbillons à la relation entre les forces de cisaillement et le gradient de vitesse. Le cisaillement se définit alors comme

$$\tau = (\mu + \varepsilon) du / dy \quad (1.3)$$

où ε représente le coefficient de viscosité associé aux tourbillons ($N \text{ s m}^{-2}$). Ce coefficient exprime le transfert vertical de momentum, où des portions lentes de fluides sont transférées dans des régions où l'écoulement est rapide et vice versa (Chanson, 1999).

1.1.2 La couche-limite et le profil de vitesse

L'écoulement turbulent se développe généralement dans ce qu'on appelle la couche-limite. Cette couche est créée par la friction à l'interface entre le lit solide et le fluide en mouvement. Dans la couche-limite, la vitesse augmente du lit vers la surface selon un gradient vertical. La vitesse est presque nulle près du lit et augmente jusqu'à sa vitesse maximale à la borne supérieure de la couche-limite (Carling, 1992). Le profil de vitesse observé dans la couche-limite exprime donc la variabilité des vitesses longitudinales en fonction de la hauteur au dessus du lit (Fig. 1.1).

Un profil de vitesse dans un écoulement turbulent se divise en couches distinctes. Très près du lit, une couche très mince d'écoulement où les forces visqueuses dominent est fréquemment observée. L'épaisseur de cette couche tend à diminuer avec l'augmentation de la contrainte de cisaillement (Richards, 1982). Au dessus de la couche visqueuse se trouve une couche de transition, puis immédiatement au dessus est observé l'écoulement turbulent, dans la couche logarithmique. La couche logarithmique présente un grand intérêt puisque c'est là que les mesures de vitesse de l'écoulement et de contraintes de cisaillement au lit sont prises et que les liens avec le transport de sédiments sont généralement établis (Robert, 2003). Au dessus de cette couche logarithmique, on retrouve la couche externe.

Grâce à la connaissance de la distribution verticale dans la couche logarithmique, la vitesse de l'écoulement à une hauteur au dessus du lit peut-être estimée à partir de

$$U_y = 2.5u_* \ln(y/y_0) \quad (1.4)$$

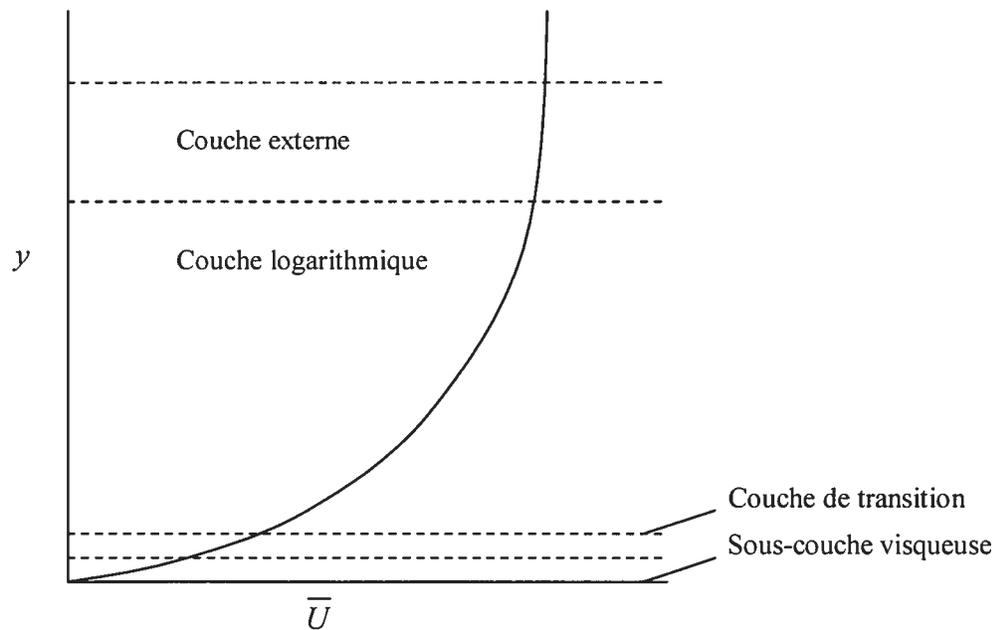


Figure 1.1 Profil de vitesse dans la couche-limite d'un écoulement turbulent. Variation de la vitesse moyenne (\bar{U}) en fonction de la hauteur d'eau (y). L'épaisseur des couches n'est pas à l'échelle. (Carling, 1992a)

où la constante 2.5 est égale à $1/\kappa$, κ étant la constante de von Karmen, u^* la vitesse de friction (m s^{-1}) déterminée à partir de τ et du profil de vitesse, y la profondeur et y_0 la hauteur au dessus du lit à laquelle la vitesse est nulle. Cette vitesse peut être dérivée de l'équation

$$y_0 = e^{-a/b} \quad (1.5)$$

où a et b sont respectivement l'ordonnée à l'origine et la pente de la régression linéaire entre la vitesse longitudinale et le logarithme de la hauteur au dessus du lit. L'équation 1.4 est aussi souvent appelée la *Loi du mur* et elle est fréquemment utilisée pour estimer la contrainte de cisaillement. Dans les rivières à lit de graviers, où la profondeur est souvent limitée, la couche-limite s'étend jusqu'à la surface de l'eau. Dans ce contexte, comme la hauteur d'eau totale représente l'épaisseur de la couche-limite, l'ensemble de l'écoulement est affecté par la rugosité du lit (Robert, 1997).

1.1.3 La turbulence

La turbulence se définit comme l'état instable d'un fluide dont la vitesse et la pression varient dans l'espace et le temps. Dans un écoulement turbulent, les particules du fluide se déplacent selon des trajectoires irrégulières, causant ainsi un échange de *momentum* (i.e. quantité de mouvement (N s^{-1})) d'une partie du fluide à une autre (Bradshaw, 1985). Cela se manifeste par des fluctuations de vitesse instantanées pouvant dépasser dix fois la magnitude de la vitesse moyenne (Hart *et al.* 1996).

En écologie aquatique, la turbulence a longtemps été un phénomène qu'il était possible de caractériser uniquement à partir d'observations visuelles qualitatives et de descripteurs simples basés sur la vitesse moyenne et la profondeur comme le nombre de Reynolds (1.1) et le nombre de Froude (Davis et Barmuta, 1989, Jowett, 1993). Depuis les quinze dernières années, des innovations technologiques majeures ont transformé la recherche sur le terrain dans le domaine de l'hydraulique et de la turbulence. Traditionnellement, les études étaient principalement effectuées en laboratoire en utilisant des techniques de visualisation et d'anémométrie. Par la suite, la recherche s'est déplacée en milieu naturel, grâce en partie à l'apparition des courantomètres à haute fréquence comme le courantomètre électromagnétique (EMCM) et le velocimètre acoustique à effet Doppler (ADV).

Ces courantomètres permettent d'enregistrer des séries temporelles à un point dans l'espace à une fréquence pouvant atteindre 25 Hz (Fig. 1.2). Le signal se décompose en trois

composantes spatiales, soit la vitesse longitudinale (u) latérale (v) et verticale (w). Les fluctuations de vitesse instantanées se définissent selon la décomposition de Reynolds

$$u' = \bar{U} - u \quad (1.6)$$

$$v' = \bar{V} - v \quad (1.7)$$

$$w' = \bar{W} - w \quad (1.8)$$

où u' , v' et w' sont les écarts avec la moyenne (m s^{-1}), \bar{U} , \bar{V} et \bar{W} les vitesses moyennes (m s^{-1}) et u , v et w les vitesses instantanées (m s^{-1}). Les fluctuations u' , v' et w' peuvent alors être positives ou négatives.

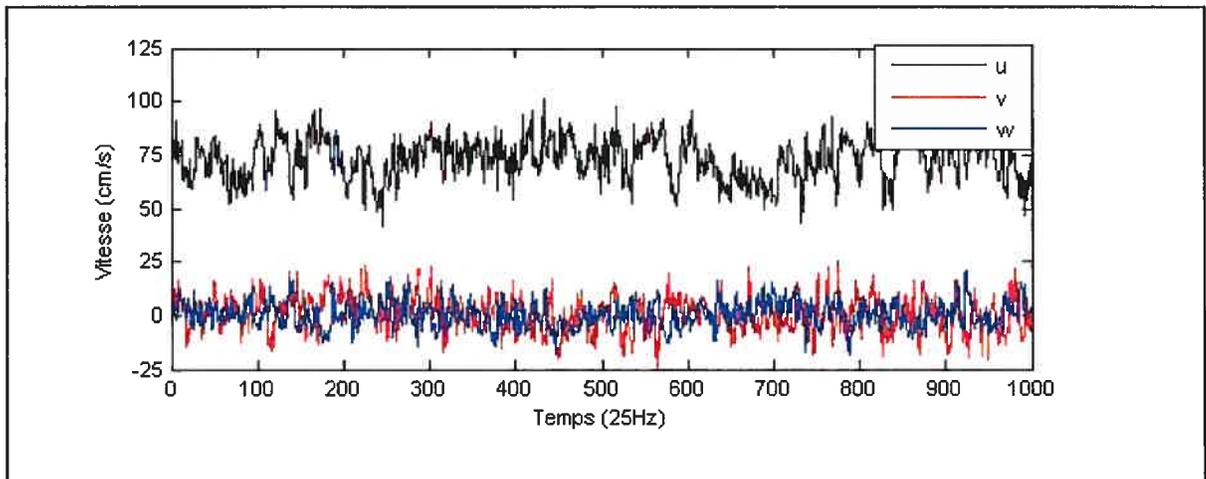


Figure 1.2 Exemple d'une série temporelle de vitesses longitudinales (u), latérales (v) et verticales (w) enregistrée à 25 Hz à 10 cm au dessus du lit dans une rivière à lit de gravier.

L'analyse de séries temporelles permet de caractériser la turbulence selon deux approches distinctes. La première consiste à estimer les propriétés statistiques moyennes de la turbulence dans l'espace. La seconde approche d'analyse consiste à observer l'occurrence de structures turbulentes cohérentes, en caractérisant par exemple la fréquence et la durée d'occurrence de portions du fluide identifiées selon une technique d'échantillonnage directionnel.

1.1.3.1 Les propriétés statistiques moyennes

Dans une série temporelle de vitesses, plus la magnitude des écarts à la moyenne est élevée, plus l'écoulement est considéré turbulent. La valeur quadratique moyenne (RMS) constitue un indicateur commun pour quantifier l'intensité turbulente (RMS). Pour la composante longitudinale de l'écoulement :

$$RMS_u = \sqrt{((\sum u'^2) / N)} \quad (1.9)$$

où N représente le nombre total d'observations de la série temporelle. La valeur quadratique moyenne peut aussi être estimée pour les composantes latérale et verticale de l'écoulement.

$$RMS_v = \sqrt{((\sum v'^2) / N)} \quad (1.10)$$

$$RMS_w = \sqrt{((\sum w'^2) / N)} \quad (1.11)$$

Les intensités turbulentes (RMS) se combinent pour donner l'énergie cinétique turbulente (TKE) en trois dimensions :

$$TKE = 0.5\rho(RMS_u^2 + RMS_v^2 + RMS_w^2) \quad (1.12)$$

où ρ est la densité de l'eau (kg m^{-3}) (Clifford et French, 1993). L'énergie cinétique turbulente exprime une quantité d'énergie par unité de volume ($\text{cm}^{-2} \text{s}^{-2}$).

L'intensité turbulente est aussi fréquemment transformée en unité sans dimension en la pondérant par la vitesse longitudinale moyenne (\bar{U}). Ce coefficient de variation, aussi appelé intensité turbulente relative (ITR) est obtenu par

$$ITR_u = (RMS_u / \bar{U}) * 100 \quad (1.13)$$

$$ITR_v = (RMS_v / \bar{U}) * 100 \quad (1.14)$$

$$ITR_w = (RMS_w / \bar{U}) * 100 \quad (1.15)$$

Bien que le terme ‘*intensité turbulente*’ soit fréquemment utilisé dans la littérature pour désigner l’intensité turbulente relative (%) (e.g. Biron *et al.* 2004, Enders *et al.* 2004), nous réserverons ici le terme ‘intensité turbulente’ à la valeur quadratique moyenne (RMS), variable à laquelle il est le plus souvent associé dans la littérature (e.g. Robson *et al.*, 1999; Buffin-Bélanger *et al.* 2005; Smith and Brannon, 2005).

On peut aussi estimer des statistiques moyennes sur des quantités qui font intervenir simultanément deux composantes. Les cisaillements de Reynolds instantanés sont ainsi obtenus en faisant le produit de la fluctuation de vitesse dans deux dimensions multiplié par la densité de l’eau (ρ). Le cisaillement de Reynolds le plus fréquemment utilisé repose sur les composantes longitudinale et verticale de l’écoulement. Cette variable est souvent associée au transport des sédiments (Drake *et al.* 1988; Lapointe, 1992). En faisant la moyenne de ces fluctuations, on obtient

$$\tau_R = -\rho \langle u'w' \rangle \quad (1.16)$$

Il est également possible de calculer le cisaillement de Reynolds en faisant la moyenne des fluctuations instantanées du produit des autres dimensions (e.g. $-\rho \langle u'v' \rangle$, $-\rho \langle v'w' \rangle$). Le cisaillement de Reynolds représente l’intensité des échanges de momentum à un point précis dans l’écoulement. Les particules d’eau s’élevant du lit vers la surface présentent une vitesse verticale (w) positive. Ce mouvement vertical entraîne un ralentissement de u' dans la couche supérieure de l’écoulement, donc une fluctuation négative. À l’inverse, les particules d’eau qui descendent vers le lit (w négatif) font augmenter la vitesse longitudinale (u') près du lit (Clifford and French, 1993). Par conséquent, le produit de u' et v' est généralement négativement corrélé. Cependant, dans

des champs d'écoulement complexe, u' et w' peuvent parfois être indépendants et corrélés positivement. Les cisaillements normaux sont quant à eux donnés par $(-\rho \langle u'^2 \rangle, -\rho \langle v'^2 \rangle, -\rho \langle w'^2 \rangle)$.

La vitesse moyenne, l'intensité turbulente, l'énergie cinétique turbulente, l'intensité turbulente relative et le cisaillement de Reynolds moyen sont des variables hydrauliques qui caractérisent l'écoulement en utilisant les moyennes des fluctuations. Avant 1960, la turbulence était perçue comme un phénomène stochastique dont l'existence était reliée à la superposition de mouvements individuels quasi-périodiques sur une étendue d'échelles (Liepmann, 1952). Des progrès importants ont depuis révélé la présence dans l'écoulement d'une structure spatio-temporelle irrégulière, mais périodique: les structures turbulentes cohérentes (Hussein, 1983; Roy *et al.* 2004).

1.1.3.2 Les structures turbulentes cohérentes

La littérature portant sur les structures turbulentes est abondante ainsi que diversifiée. Plusieurs types de structures ont été identifiés à travers la réalisation d'études en laboratoire et sur le terrain (Buffin-Bélanger, 2000a). Bien que le présent projet de recherche ne traite pas de la caractérisation des structures turbulentes individuelles, il est important de faire une brève description de leurs caractéristiques, puisqu'elles sont intrinsèquement liées aux propriétés turbulentes moyennes. En rivière à lit de gravier, il existe trois types de structures en interaction: les structures du cycle d'éjection-incursion, les structures d'échappement et les structures à grande échelle (Buffin-Bélanger *et al.* 2000a).

Le **cycle d'éjection-incursion**, le plus étudié des types de structures turbulentes, se développe dans la sous-couche visqueuse (Roy et Buffin-Bélanger, 2000). Le cycle est composé d'une part des éjections, associées à des montées lentes de fluides vers la partie supérieure de la couche limite et d'autre part à des incursions de fluide rapide qui partent de la surface vers le lit (Fig. 1.3; Smith, 1996). Le cycle d'éjection-incursion, structure d'une

durée relativement courte (< 1 s) (Buffin-Bélanger et Roy (2000a) a d'abord été observé sur un lit lisse (Kline *et al.*, 1967) puis sur un lit rugueux (Grass, 1971; Defina, 1996).

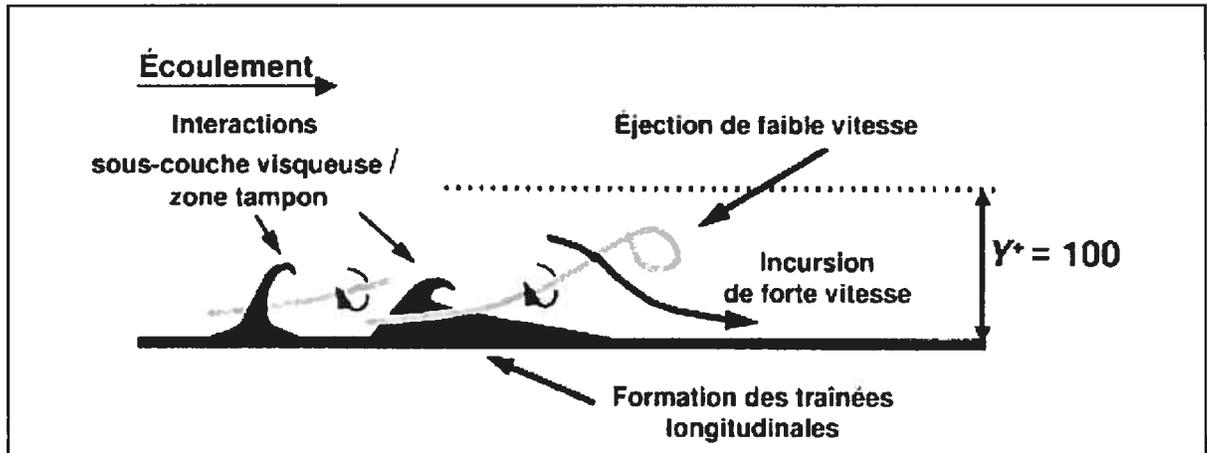


Figure 1.3 Vue latérale d'un modèle conceptuel illustrant le cycle éjection-incursion (d'après Smith, 1996 ; modifié par Buffin-Bélanger *et al.* 2000)

Le modèle le plus accepté illustrant sa formation est celui du vortex en fer à cheval. Selon ce modèle, le cycle éjection-incursion se forme à partir du soulèvement graduel de traînées longitudinales de faible vitesse dans la sous-couche visqueuse vers la surface. C'est en s'élevant que les structures prennent la forme d'un fer à cheval (Allen, 1985). La taille des structures est fonction du nombre de Reynolds (eq. 1.1) (Shah et Antonia, 1989). De plus, ces structures sont également affectées par la rugosité. Plus la rugosité est élevée, plus la magnitude et la fréquence des éjections et des incursions augmente (Grass, 1971). Le cycle éjection-incursion est d'une grande importance, comme il est responsable d'une forte proportion du cisaillement de Reynolds (eq. 1.16) (Best, 1993).

Contrairement au cycle éjection-incursion qui apparaît autant sur un lit lisse que sur un lit rugueux, les structures d'échappement sont directement associées à la présence d'éléments de rugosité. L'étude de ces structures a d'abord été réalisée en laboratoire, où l'on a examiné les structures qui se créent à l'aval d'obstacles cylindriques ou sphériques (e.g. Acarlar et Smith, 1987). Les structures d'échappement sont créées par l'interaction entre la zone de recirculation située derrière l'obstacle et l'écoulement longitudinal. Bien que le

processus à l'origine des structures d'échappement soit différent de celui qui produit le cycle éjection-incursion, ces deux types de structures peuvent prendre la forme d'un fer à cheval. Cependant, ce type de structure a été observé en laboratoire, dans un écoulement très faiblement turbulent. En milieu naturel, où le nombre de Reynolds est souvent très élevé, il est fort possible que la structure diffère (Zdravkovich, 1996). En échantillonnant de façon détaillée l'écoulement autour d'un amas de galets en milieu naturel, Buffin-Bélanger et Roy (1998) ont identifié six zones distinctes de l'écoulement (Fig. 1.4).

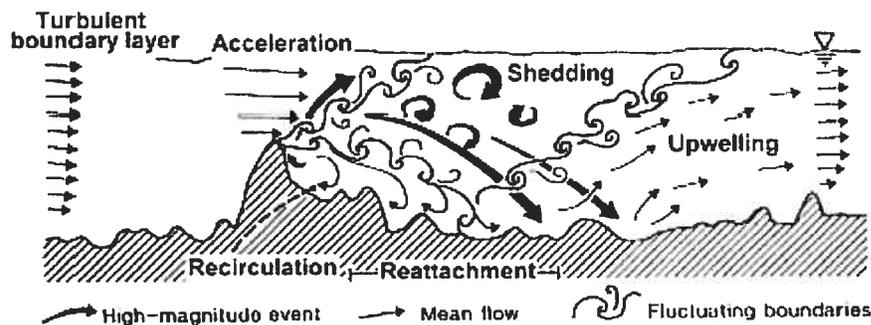


Figure 1.4 Six zones d'écoulement associées à la présence d'un amas de galet dans une rivière à lit de gravier (d'après Buffin-Bélanger et Roy, 1998). La structure d'échappement résulte de l'interaction entre la zone de recirculation et l'écoulement longitudinal.

D'abord on observe une zone d'accélération au-dessus de l'amas de galets. Immédiatement à l'aval de l'obstacle se forme une zone de recirculation engendrée par la séparation de l'écoulement. L'interaction entre la zone de recirculation du fluide et l'écoulement ambiant entraîne alors la formation de structures d'échappement (*shedding*), soit une portion du fluide plus lent, qui s'élève vers la portion supérieure de la couche limite. Puis, à l'aval de l'obstacle, au point de réattachement, l'écoulement est ralenti et s'élève progressivement vers la surface (*upwelling*), tout en continuant à subir des événements sporadiques de forte magnitude en direction du lit. La taille et la fréquence des structures d'échappement est fonction de la dimension de l'obstacle, mais aussi de la vitesse de l'écoulement (Acarlar et Smith, 1987). Bien que ces structures turbulentes soient difficiles à mesurer en milieu naturel, la structure d'échappement représente le processus de dissipation d'énergie qui domine dans les rivières au lit rugueux selon Clifford *et al.* (1992).

Le troisième type de structures, les structures à grande échelle, existent en l'absence de protubérances du lit (e.g. Kirkbride et Ferguson, 1995; Ferguson *et al.* 1996, Buffin-Bélanger *et al.* 2000a). Ces structures difficiles à isoler des autres processus turbulents sont connues depuis moins longtemps que les types de structures précédentes. Elles sont constituées d'une alternance de fronts rapides et de fronts lents, inclinés vers l'aval, qui occupe toute l'épaisseur de la couche-limite (Nakagawa et Nezu, 1981; Buffin-Bélanger *et al.* 2000a; Fig. 1.5). Les fronts rapides et lents, tel qu'imaginés par Yalin (1992), présentent une alternance longitudinale (Fig. 1.6a) autant que latérale (Fig. 1.6b). Yalin (1992) suggère également des changements de vitesses plus abruptes au début d'un front rapide et graduels au début d'un front lent. Les structures turbulentes à grande échelle sont en interaction avec les autres types de structures. Par exemple, Roy *et al.* (2004) ont proposé que les fronts de vitesse rapide agissent comme déclencheur d'éjections dans la région proche du lit qui peuvent donner naissance à des éjections puissantes (megaburst). Contrairement à ce qu'imaginait Yalin (1992; Fig. 1.6), les structures à grande échelle sont étroites et longues. Roy *et al.* (2004) ont observé des structures d'une longueur égale à 3 à 5 fois la profondeur de la tranche d'eau et une largeur de 0.5 à 1 fois la profondeur.

Cette distribution spatiale laisse présumer une complexité importante du patron de ces structures dans la dimension latérale. Cependant, encore peu d'études se sont sérieusement penchées sur la dynamique latérale de ces structures à l'échelle du tronçon (Buffin-Bélanger *et al.* 2000b). Par ailleurs, ces structures sont importantes pour leur rôle dans la dissipation de l'énergie. Les structures à grande échelle contiennent une portion importante de l'énergie cinétique (TKE) et du cisaillement de Reynolds (τ_R) et plus le nombre de Reynolds (Re) augmente, plus ce type de structure domine l'écoulement (Falco, 1977).

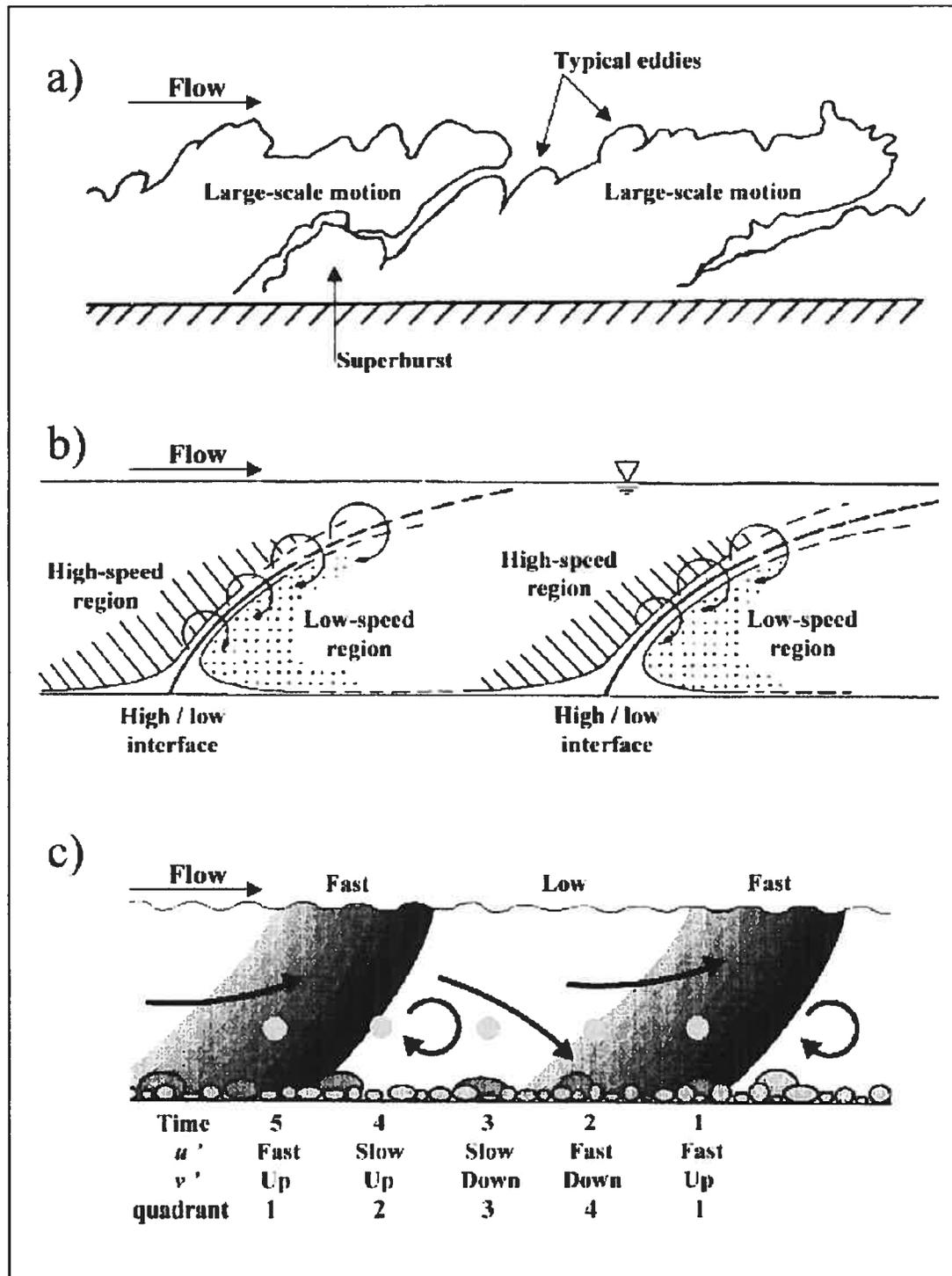


Figure 1.5 (a) Mouvement des structures à grande échelle (Buffin-Bélanger *et al.*, 2000, tel que visualisé par Falco (1977)) (b) Représentation des zones de vitesse rapide et de vitesse lente ainsi que leur interface. L'interface rapide-lent est caractérisée par une forte contrainte de cisaillement (Buffin-Bélanger *et al.*, 2000, tel que documenté par Nakagawa et Nezu, 1981) (c) Représentation d'une séquence d'événements turbulents associée au passage de fronts de vitesse lents et rapides (Buffin-Bélanger *et al.* 2000, tel que suggéré par Ferguson *et al.* 1996). La succession typique à un point passe par les temps 1 à 5.

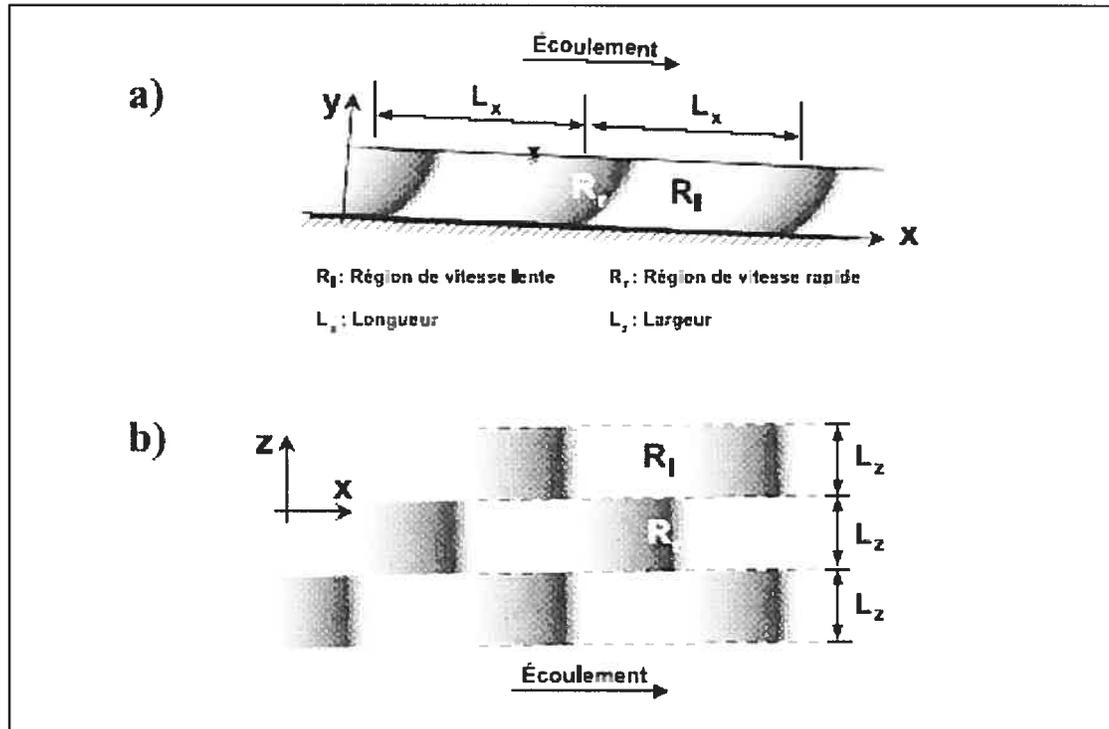


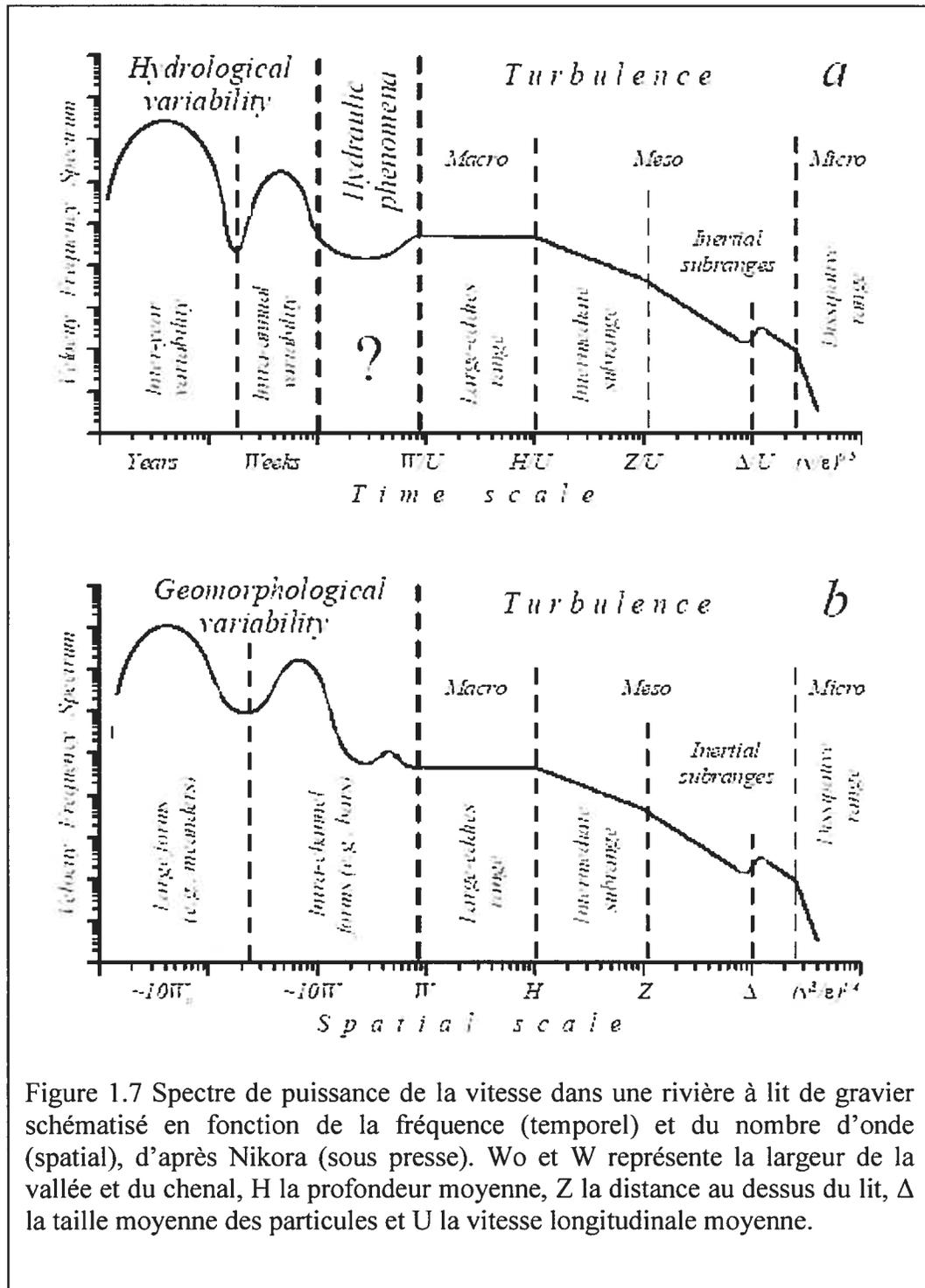
Figure 1.6 Vue de plan (a) et de côté (b) de la distribution spatiale des fronts de vitesse lente et rapide (Yalin, 1992).

Le type et la taille des structures turbulentes en rivière varient en fonction de plusieurs paramètres. Par exemple, il a été démontré que la taille des structures à grande échelle était fonction de la profondeur de la tranche d'eau (Roy *et al.* 2004). De plus, la fréquence des structures est inversement proportionnelle à leur durée (Paiement-Paradis *et al.* 2003) et de façon générale, l'amplitude des fluctuations augmente avec les échelles spatiales et temporelles. Ce phénomène semble en effet s'appliquer à une gamme d'échelles. Il paraît nécessaire, dans ce contexte d'illustrer la place qu'occupe la turbulence dans une hiérarchie d'échelles imbriquées.

1.1.4 Les échelles temporelles et spatiales de variabilité de l'écoulement

Dans une rivière à lit de graviers, la variabilité de l'écoulement s'observe sur une gamme d'échelles spatiales et temporelles, allant de la milliseconde à la décennie et du millimètre jusqu'aux dizaines de kilomètres (Hart et Finelli, 1999). De façon générale, l'amplitude des fluctuations augmente avec les échelles spatiale et temporelle. Cette relation s'illustre par un spectre de puissance des variations de vitesse dans le temps (Fig. 1.7a) et dans l'espace (Fig. 1.7b) (Nikora, sous presse). Les basses fréquences du spectre temporel représentent les fluctuations interannuelles et saisonnières alors que les hautes fréquences représentent les fluctuations de vitesse associées à la turbulence (Fig. 1.7a). De façon similaire, sur le spectre de puissance des variations spatiales, les basses fréquences représentent les fluctuations de courant associées aux formes comme les grands bancs et méandres (centaines de mètres), alors que les hautes fréquences illustrent la variabilité spatiale de l'écoulement reliée à la turbulence (millimètres) (Fig. 1.7b).

Nikora (sous presse) propose une subdivision de l'échelle spatiale et temporelle de la turbulence en trois sous-catégories : l'échelle macro, dont les structures sont confinées entre la largeur et la profondeur de la rivière, l'échelle meso, dont les dimensions s'insèrent entre l'échelle de la profondeur et l'échelle dissipative, et l'échelle micro-turbulente, associée aux tourbillons dissipatifs et à la cascade énergétique de Kolmogorov. À l'échelle de la turbulence, le spectre de vitesse illustre clairement la diminution de l'amplitude des fluctuations en fonction de l'échelle. En effet, les tourbillons de grande taille renferment des tourbillons de plus petite taille. Les petits tourbillons présentent une fréquence d'occurrence supérieure et leur taille varie entre celle de la profondeur et celle de la hauteur des éléments de rugosité du lit.



La vitesse moyenne représente la source d'énergie principale à l'origine de la turbulence. Cette source d'énergie est transférée en 'énergie turbulente' par le cisaillement et par la séparation de l'écoulement en aval des obstacles. Le spectre de la vitesse procure donc une mesure de l'énergie cinétique relative que les organismes en rivière doivent subir à différentes échelles et illustre que l'énergie associée à des événements à grande échelle est beaucoup plus élevée qu'à des événements à petite échelle (e.g. Nikora *et al.* 1999). En mettant en évidence les échelles de variabilité de l'écoulement, le spectre procure aussi un contexte pour relier les échelles de turbulence aux processus écologiques.

1.2 Les habitats fluviaux : milieux turbulents

Récemment, les projets de recherche portant sur l'effet de la turbulence sur les organismes fluviaux se sont multipliés. Les résultats obtenus sont complexes et souvent spécifiques à une espèce en particulier. Par conséquent, beaucoup reste à faire pour élucider le rôle de la turbulence et de ses interactions avec les êtres vivants. Comme les organismes utilisent généralement un micro-habitat proportionnel à leur taille, ils sont affectés différemment par les différentes échelles de turbulentes présentées à la figure 1.7. En effet, Biggs *et al.* (2005) suggèrent arbitrairement que pour être 'ressentie' par un organisme, la taille des structures turbulentes ne devrait pas être inférieure à 0.01 fois la taille d'un animal, ni supérieure à dix fois sa taille. Selon ce postulat, les organismes de petite taille comme les colonies bactériennes seraient affectées principalement par la portion du spectre associé à la micro-turbulence, alors que les poissons, de plus grande taille, seraient davantage affectés par la macro-turbulence (Fig. 1.7). Dans cette section, nous exposons les liens entre l'écoulement turbulent et les d'organismes à travers une gamme d'échelle, allant de la bactérie aux poissons.

1.2.1 Bactéries, algues et périphyton

La croissance et le taux de respiration des bactéries sont étroitement liés aux fluctuations de vitesse de l'écoulement. Les interactions entre les bactéries et l'écoulement sont principalement contrôlées à deux échelles. La première échelle, l'échelle de Kolmogorov,

détermine la taille des plus petits tourbillons présents dans l'écoulement. La seconde échelle se définit comme la plus petite taille à laquelle des fluctuations de concentrations en nutriments peuvent être détectées (Bergstedt *et al.*, 2004). Les organismes de taille inférieure à l'échelle de Kolmogorov ne subissent pas la contrainte de cisaillement associée à la turbulence, comme ils sont de taille inférieure aux tourbillons, mais subissent toutefois le cisaillement laminaire relié au profil de vitesse. Dans le cadre d'une étude en laboratoire, Bergstedt *et al.* (2004) ont montré que la dissipation d'énergie reliée à la turbulence était positivement corrélée à l'abondance, au taux de croissance et à la respiration de certains types de bactéries. Dans ce contexte, la turbulence impose non seulement une force de cisaillement directe sur les bactéries, mais est aussi responsable des fluctuations à petite échelle de la concentration en nutriments. À l'opposé, la turbulence peut affecter négativement la croissance de certaines bactéries en empêchant la formation d'une stratification thermique (Mitrovic *et al.* 2003). Par exemple, si la turbulence atteint un certain seuil, l'absence de stratification thermique empêche la reproduction des cyanobactéries dans les zones profondes de l'écoulement (Reynolds & Walsby 1975). C'est pour cette raison que les cours d'eau eutrophisés ne sont pas dans tous les cas envahis de cyanobactéries potentiellement toxiques alors que les conditions chimiques de l'eau y sont favorables à leur prolifération (Steinberg et Hartmann, 1988). De façon similaire, la micro-turbulence inhibe le développement des algues (e.g. *Scenedesmus quadricauda*) (Hondzo et Lyn, 1999). Le cisaillement associé à la turbulence peut engendrer la destruction des cellules végétales ainsi que l'agrégation des cellules mortes et des cellules vivantes. Ainsi, en jouant un rôle important dans l'agrégation de la matière organique, incluant les algues, la turbulence constitue un processus clé à la base de plusieurs écosystèmes aquatiques (O'Melia et Tiller, 1993; Hosaka *et al.*, 1995).

La turbulence de l'écoulement affecte aussi la distribution de la matière inorganique. Bochardt (1996) et Larned *et al.* (2004) ont démontré qu'il existe une augmentation de la consommation de nutriments inorganiques et une augmentation du taux de croissance du périphyton lorsque le lit est balayé par des structures turbulentes. Alors que la biomasse et la croissance des amas (*patches*) de périphyton est positivement reliée à la turbulence près

du lit, à l'inverse, la biomasse des tapis d'algues filamenteuses diminue avec une augmentation de la turbulence au lit (Biggs et Hickey, 1994 ; Biggs *et al.*, 1998). La colonisation de ces organismes résulte donc d'un équilibre entre un effet positif relié à une plus grande concentration de nutriments et un effet négatif relié au cisaillement qui engendre le bris et le détachement de biomasse (Biggs, 2005).

1.2.2 Les invertébrés

Les organismes dotés de mobilité sont aussi influencés par les fluctuations de vitesse de l'écoulement. C'est le cas des invertébrés et des larves de poissons, dont la distribution, l'assemblage et les taux de survie sont influencés par les conditions hydrauliques. Cependant, les recherches récentes portant sur le sujet présentent souvent des résultats complexes qui varient en fonction des sites, des espèces, de l'échelle d'analyse et de la période de l'année. Par exemple, en mesurant la turbulence dans une gamme de microhabitats fluviaux à l'aide d'un ADV, Bouckaert et Davis (1998) ont observé une plus grande abondance et richesse spécifique dans la zone de sillage qu'en amont des blocs et des amas de galets. Ils soulignent que cette distribution n'est pas due à la vitesse moyenne, mais plutôt aux processus reliés à la turbulence dans la zone de sillage, tels qu'une plus grande accumulation de particules organiques et davantage d'échanges gazeux dissous. Par ailleurs, Quinn *et al.* (1996) ont observé une corrélation inverse entre la rugosité du lit en amont et l'abondance et la diversité d'invertébrés. Ils ont ainsi observé un effet négatif de la turbulence plus marqué pour les filtreurs (filter-feeders) que pour les collecteurs-déchiqueteurs (*collector-browsers*) et les prédateurs. Brooks *et al.* (2005) ont aussi observé que l'abondance de macro-invertébrés était corrélée négativement à la turbulence près du lit. Dans le cadre d'une recherche similaire, Robson *et al.* (1998) ont accru artificiellement la rugosité du lit en amont pour tester l'effet d'une augmentation de la turbulence sur trois communautés d'invertébrés. Contrairement à Brooks *et al.* (2005), ils n'ont pas observé d'effet significatif de la turbulence sur les invertébrés. Robson *et al.* (1999) ont avancé l'hypothèse que la baisse de la vitesse moyenne engendrée par l'augmentation de la rugosité puisse avoir 'compensé' l'effet potentiellement négatif de la turbulence.

En plus de bénéficier d'adaptations morphologiques pour survivre dans un environnement turbulent (e.g. forme aplatie, taille inférieure aux pores du lit, forts crochets) (Church, sous presse), les invertébrés peuvent se déplacer par 'dérive active' afin de réagir à un changement de conditions hydrauliques (Lancaster, 1999 ; Lancaster *et al.* 2006). C'est notamment ce qui explique les variations dans l'assemblage des espèces à un site en fonction du débit (Barmuta, 1989). De plus, les assemblages peuvent être plus ou moins affectés par les variations de l'écoulement en fonction de la saison. Par exemple, Méricoux et Dolédec (2004) ont observé qu'un assemblage soumis à une augmentation de la contrainte de cisaillement subissait une diminution de richesse spécifique plus élevée lorsqu'elle survenait au printemps que lorsqu'elle survenait à l'automne.

1.2.3 Les poissons

Contrairement au domaine des invertébrés, qui intègre depuis déjà quelques décennies des variables hydrauliques complexes, le domaine de l'étude des habitats des poissons se limite généralement à trois variables: la profondeur, la vitesse moyenne et la granulométrie de surface du lit. Les poissons en rivière à lit de gravier évoluent dans un environnement où la turbulence est omniprésente. D'ailleurs, depuis plusieurs décennies, certains auteurs ont formulé l'hypothèse que la fréquence irrégulière des battements de queue des salmonidés puisse être attribuable à la turbulence (Jenkins, 1969 ; Puckett et Dill, 1985). En contrepartie, la turbulence n'est toujours pas explicitement considérée dans les modèles hydrauliques d'habitat (e.g. Guay *et al.* 2000; Guensch *et al.* 2001). Pourtant, quelques études récentes, notamment dans le domaine de la bioénergétique des poissons, ont montré que la turbulence exerce un impact important. Par exemple, en étudiant les juvéniles du saumon Atlantique à l'aide d'une technique de respirométrie, Enders *et al.* (2003) ont observé qu'à vitesse constante, une augmentation de l'intensité turbulente de 5 cm/s à 8 cm/s entraînait une augmentation significative des coûts énergétiques (Fig. 1.8). Les auteurs ont testé cette augmentation de l'intensité turbulente pour deux vitesses moyennes, soit 18 et 23 cm/s et ont constaté une augmentation des coûts énergétiques d'un facteur de 1.3 et de 1.6 respectivement. De façon similaire, Pavlov *et al.* (2000) ont montré que la vitesse de nage maximale diminuait avec l'intensité turbulente, suggérant des coûts énergétiques plus élevés quand la turbulence

augmente. De plus, en jumelant des techniques de vélocimétrie et de visualisation en milieu naturel, Enders *et al.* (2005) ont observé que la proportion de temps que les juvéniles du saumon Atlantique utilisaient pour s'alimenter était corrélée négativement avec la turbulence.

La turbulence pourrait aussi avoir un impact sur l'utilisation de l'habitat des salmonidés. En chenal expérimental, Smith *et al.* (2005) ont observé que les juvéniles de la truite arc-en-ciel (*Oncorhynchus Mykiss*) 'préféraient' des micro-habitats où la turbulence était faible, et ce, sur une grande étendue de vitesses moyennes. Les poissons occupaient des micro-habitats fortement turbulents seulement dans les cas où la vitesse moyenne était aussi plus élevée (Fig. 1.9).

À haut débit, ces poissons ont davantage tendance à se rassembler autour des éléments de rugosité pour bénéficier d'un abri contre le courant. Néanmoins, sous les deux conditions de débit observées, la turbulence au point focal des poissons était toujours inférieure à la moyenne du chenal. Smith *et al.* (2005) proposent d'inclure la turbulence comme variable pour améliorer la prédiction de la position des poissons dans un chenal. Dans une étude successive, les mêmes auteurs ont examiné le lien entre la densité de juvéniles et la turbulence (Smith *et al.* 2006). Ils ont observé qu'en augmentant le débit, la turbulence augmentait spatialement d'une façon différente de la vitesse moyenne et que la turbulence 'expliquait' la redistribution des poissons de façon significative alors que cette relation n'était pas significative pour la vitesse moyenne. Selon Smith *et al.* (2006), la turbulence intègre la variabilité associée à l'effet combiné du débit et du couvert (blocs, amas de galets, débris de bois, etc.). Cependant, étant donné le contexte simplifié et artificiel (chenal d'une largeur de 90 cm) dans lequel ont été effectuées ces recherches, ces résultats doivent être généralisés avec précaution.

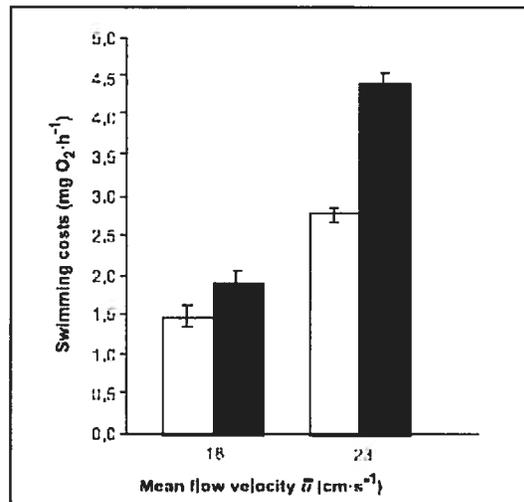


Figure 1.8 Coûts énergétiques du saumon Atlantique juvénile sous quatre conditions d'écoulement définies par la vitesse moyenne de l'écoulement (U) et l'intensité turbulente (RMS). Les barres blanches représentent les coûts dans des conditions de 'basse' turbulence (5 cm/s) et les barres noires les conditions de 'forte' turbulence (8 cm/s). Les lignes verticales représentent les intervalles de confiance. D'après Enders *et al.* (2003)

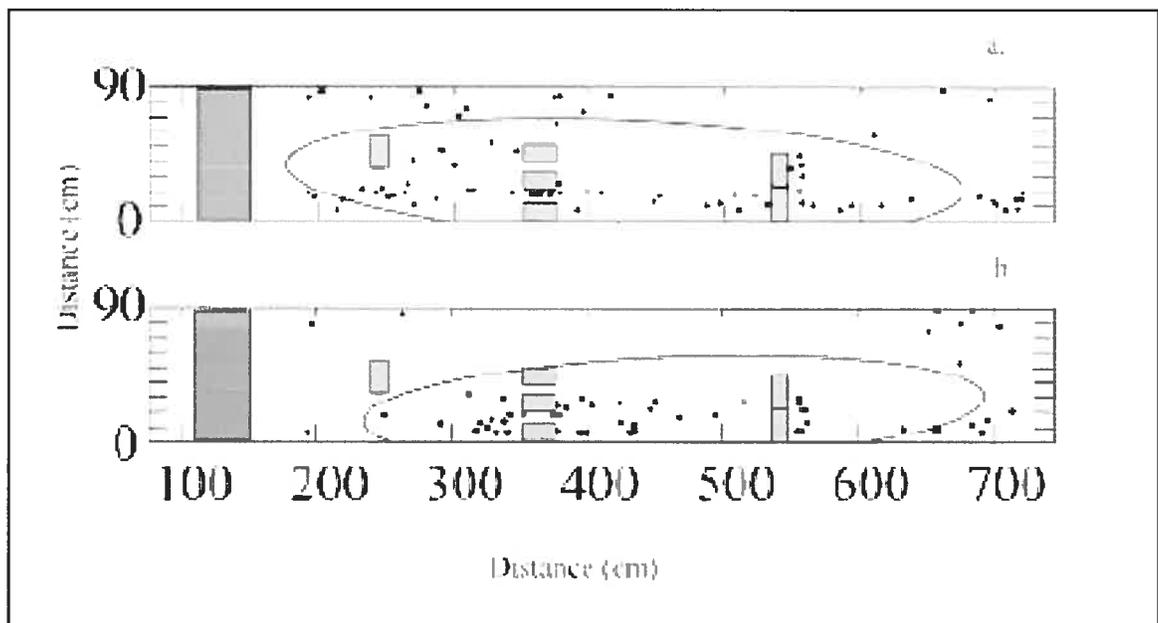


Figure 1.9 Positions des poissons (cercles pleins) et des briques (rectangles) à un débit de a) $0.030 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. et b) $0.111 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Les ellipses représentent l'intervalle de confiance de 65% pour chaque débit. L'écoulement se dirige vers la droite (Smith *et al.* 2005).

Dans le cadre d'une étude similaire Cotel *et al.* (2006) ont à notre connaissance été les premiers à publier des résultats sur l'utilisation de l'habitat de poissons en fonction de la turbulence de l'écoulement. Cotel *et al.* ont échantillonné et comparé l'habitat utilisé par les poissons par rapport à l'habitat disponible. Pour ce faire, ils ont enregistré la turbulence focale (au 'nez du poisson') d'une cinquantaine de truites grises (*Salmo trutta*) ainsi qu'à tous les deux mètres de façon à reproduire l'habitat disponible dans un cours d'eau au lit sableux du Michigan. Les résultats indiquent que les truites grises occupent des micro-habitats de plus faible intensité turbulente relative (*ITR*) que la moyenne des micro-habitats similaires (profondeur, vitesse moyenne, substrat). Cependant, l'*ITR* y est plus élevée que la moyenne des habitats disponibles dans un tronçon typique comportant des habitats diversifiés. Les auteurs soulignent toutefois que l'*ITR* est inversement proportionnelle à la vitesse moyenne, comme les micro-habitats de très faible vitesse présentent une *ITR* très élevée.

Alors que les recherches ci-dessus suggèrent que la turbulence exerce un effet négatif sur les poissons en augmentant les coûts énergétiques liés à la nage, à l'inverse, Liao *et al.* (2003) suggèrent que les salmonidés sont en mesure d'utiliser des structures turbulentes pour diminuer leurs dépenses énergétiques liées à la nage. En créant artificiellement des structures turbulentes à intervalles réguliers en laboratoire, Liao *et al.* (2003) ont montré que les poissons pouvaient utiliser ces structures pour diminuer leur activité musculaire en effectuant un slalom entre les vortex. Cependant, les structures homogènes et périodiques créées par Liao *et al.* (2003) sont différentes des structures observées dans l'écoulement turbulent dans une rivière à lit de graviers. Contrairement aux recherches précédentes, qui ont attribué un effet positif ou négatif à la turbulence, Nikora *et al.* (2003) arrivent à la conclusion que l'effet de la turbulence sur les performances de nage des poissons est négligeable. Ils attribuent ce résultat à la mécanique de l'interaction turbulence-poisson, qui serait dépendante de l'échelle énergétique de la turbulence et de la taille des poissons. Ainsi, dans le même écoulement turbulent, des poissons de différentes tailles subiraient l'effet de la turbulence différemment. Un poisson d'une longueur donnée ne répondrait pas de la même façon à des tourbillons beaucoup plus petits que sa longueur, mais répondrait sûrement à des tourbillons considérablement plus grands (Nikora *et al.*

2003). L'impact de la turbulence sur les poissons augmenterait donc plus le ratio de la longueur du poisson sur la longueur des structures turbulente serait faible.

Outre la taille des organismes, le caractère mobile de certains comme les poissons augmente la complexité de la caractérisation de leur habitat. Comme les poissons sont mobiles, leur habitat peut varier dans le temps. Pour étudier l'utilisation de l'habitat des individus, le moyen le plus approprié est de combiner une caractérisation à l'échelle de leur domaine vital (échelle du tronçon) à la radio-téléométrie. La section qui suit présente un exemple de projet de recherche que nous avons récemment effectuée qui intègre la turbulence à l'échelle du tronçon et l'utilisation de l'habitat par les juvéniles du saumon Atlantique.

1.2.4 L'importance de la turbulence à l'échelle du tronçon : exemple de l'utilisation de l'habitat par les juvéniles du saumon Atlantique de la rivière Patapédia

Dans cette étude préliminaire, nous avons utilisé la radio-téléométrie et la cartographie détaillée de l'habitat pour caractériser le domaine vital et l'utilisation de l'habitat des juvéniles du saumon Atlantique en fonction de la profondeur (Y), de la vitesse moyenne (U) et de l'énergie cinétique turbulente (TKE). Les observations ont été réalisées à la fin de l'été 2003 et 2004 sur un segment de la rivière Patapédia en Gaspésie. Dans ces tronçons, la vitesse a été échantillonnée approximativement aux deux mètres à l'aide d'un ADV, puis a été interpolée à l'aide d'un algorithme d'interpolation linéaire à l'ensemble du tronçon, de façon à obtenir une couverture spatiale complète. Douze juvéniles ont ainsi été suivis intensivement pendant 5 jours (2003 : $N=4$; 2004 : $N=8$). Chaque poisson a été localisé à un intervalle de 10 minutes durant 10 heures. À notre connaissance, il s'agit, avec Cotel *et al.* (2006), d'une des deux seules études s'intéressant à l'utilisation de l'habitat en fonction de la turbulence en milieu naturel à l'échelle du tronçon. À la différence de Cotel *et al.* (2006), plutôt que de comporter une seule 'image fixe' de la position des poissons à un temps précis, notre étude comporte une dimension temporelle.

De façon à estimer les préférences des individus pour un certain type d'habitat, nous avons utilisé une méthode commune de comparaison de l'habitat utilisé par le poisson à l'habitat disponible (voir Rosenfeld, 2003). Les résultats montrent que les juvéniles sont beaucoup plus mobiles et utilisent un domaine vital plus grand (96 m^2 à 3013 m^2) que ce qui est suggéré dans la littérature (Saunders & Gee 1964, 36 m^2 ; Hesthagen 1990, $40\text{-}50 \text{ m}^2$) (voir Ovidio *et al.* (soumis) pour les résultats de l'année 2004 seulement). De plus, les résultats présentent une forte variabilité inter-individuelle dans l'utilisation de l'habitat. Pendant la période d'observation, les poissons ont sélectionné des micro-habitats couvrant 80% de l'étendue de profondeur, vitesse moyenne et turbulence disponibles dans les tronçons (Fig. 1.10).

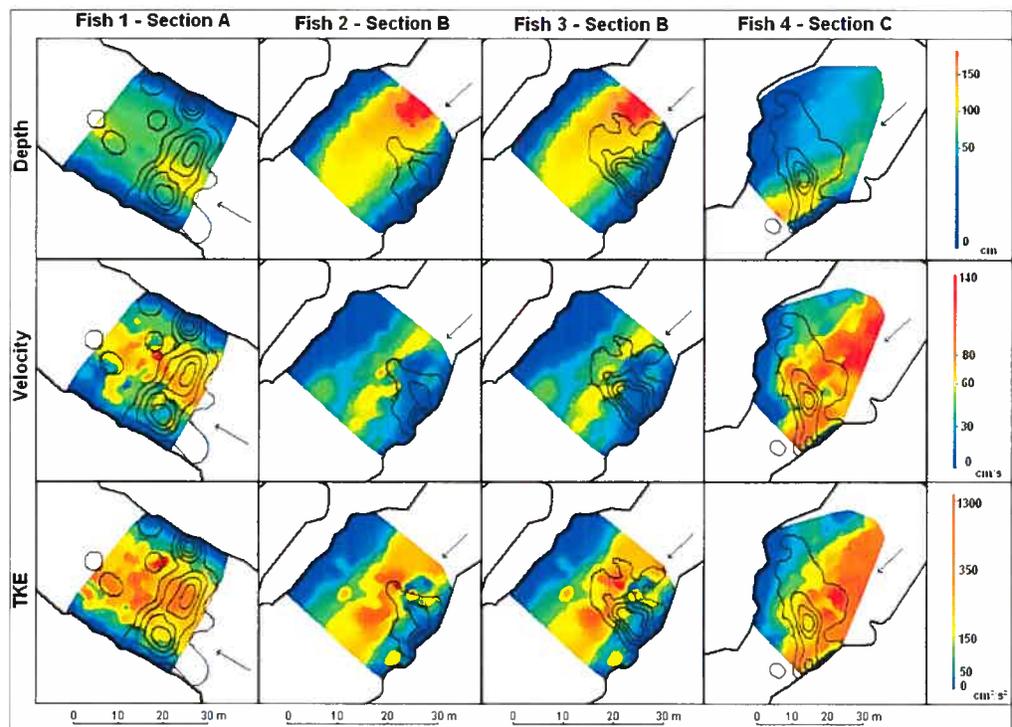


Figure 1.10 Distribution spatiale de la profondeur (Y), de la vitesse moyenne (U) et de l'énergie cinétique turbulente (TKE) dans un tronçon A, B et C de la rivière Patapédia. Domaines vitaux (kernel) de quatre saumons Atlantique juvéniles estimés à des intervalles de confiance de 25, 50, 75 et 95% de probabilité de densité des poissons. Les cercles de plus petite taille pour les poissons 1 et 4 font partie du domaine vital estimé à une probabilité de 95% de probabilité de présence. (données non publiées)

Une telle utilisation de l'habitat suggère que les saumons Atlantique juvéniles ne sont pas tous sédentaires, contraints à demeurer dans un seul type d'habitat. Cela révèle plutôt une utilisation 'flexible' et peut-être opportuniste de l'habitat. Cette étude préliminaire ne constitue qu'un exemple d'application possible de l'intégration de la turbulence à l'échelle du tronçon dans la recherche sur les habitats.

Cependant, en dépit de son importance écologique, l'échelle du tronçon est rarement l'échelle d'analyse des études reliant la turbulence aux processus écologiques. Cela est possiblement dû au fait qu'avec la technologie actuellement disponible, l'échantillonnage de la turbulence à l'échelle du tronçon ou du segment de rivière représente un défi technique considérable, particulièrement en rivière peu profonde au lit rugueux (Nikora, sous presse).

1.3 Variables d'habitat physique : Interrelations et caractérisation à l'échelle du tronçon

La très grande majorité des études portant sur les habitats fluviaux sont effectuées à une seule échelle spatiale et les relations entre les échelles demeurent rarement clairement établies (Parson *et al.* 2004). Dans le cas des études portant sur la turbulence, les études sont souvent restreintes à l'échelle du micro-habitat ou de la patch ($\approx 1 \text{ m}^2$). Néanmoins, relier une caractérisation fine de l'écoulement aux processus biologiques à l'échelle du tronçon pourrait permettre d'approfondir notre compréhension de la dynamique des patches (patch dynamics). Cette compréhension doit s'appuyer sur une caractérisation à l'échelle du tronçon, qui inclut les concepts spatiaux comme l'hétérogénéité de l'habitat, l'adjacence et la connectivité entre les patches. Par exemple, en milieu tropical, Boyero et Bosch (2004) ont montré que l'hétérogénéité des variables dans 28 seuils était aussi importante pour expliquer les variations des assemblages d'invertébrés que les valeurs moyennes. Comme nous l'avons constaté, l'échelle du tronçon est aussi très appropriée pour l'étude d'espèces plus mobiles, comme les poissons. Cependant, en dépit des efforts déployés dans les dernières décennies pour caractériser les structures turbulentes, les connaissances reliées à la distribution spatiale de la turbulence à l'échelle du tronçon demeurent parcellaires et incomplètes.

Dans un tronçon de rivière à lit de gravier, la variabilité de l'écoulement est principalement fonction du débit, de l'organisation des particules et de la morphologie du lit. Les relations unissant les variables sont donc complexes et dynamiques. Dans cette section du chapitre, nous exposons les variables hydrauliques principales et leur distribution planimétrique, à l'échelle du tronçon, soit la vitesse, la rugosité, la profondeur induite par la morphologie et enfin, la turbulence. À travers la description des variables, nous présenterons les interrelations entre ces variables et les propriétés de l'écoulement ainsi que des méthodes de caractérisation les plus communes.

1.3.1 La vitesse moyenne

Le terme 'vitesse moyenne' désigne généralement la moyenne de la vitesse longitudinale enregistrée sur une période de temps à un endroit donné. Il s'agit de la variable exerçant le plus grand contrôle sur l'écologie des cours d'eau (Statzner, 1988). De façon générale la vitesse moyenne est maximale au centre du chenal et décroît vers les berges. Toutefois, ce principe général n'est respecté que lorsque le tronçon caractérisé est rectiligne et symétrique. Dans les rivières naturelles, il existe des zones de recirculation, créées par les irrégularités morphologiques de la berge et du lit. La vitesse moyenne varie aussi localement en fonction de l'agencement des particules et de la profondeur. Ces thèmes seront brièvement abordés dans la section 1.3.2 et 1.3.3

Le développement dans les années 90 de l'ADV a rendu possible de mesurer simultanément les trois composantes orthogonales de l'écoulement. Cette innovation est particulièrement importante pour la caractérisation du champ de vitesses moyennes à l'échelle du tronçon, particulièrement où l'on retrouve des champs complexes, comme à des confluences ou dans les méandres (Ferguson, sous presse). La méthode consiste généralement à construire des isovels à partir de données ponctuelles prises sur une partie du tronçon (e.g. Frothingham et Rhoads, 2003). Sur les grandes rivières, lorsque la profondeur le permet, le profileur de vitesse à effet Doppler (ADCP) déployé sur un bateau en mouvement constitue une alternative avantageuse. Cet instrument permet d'obtenir des champs de vitesse beaucoup plus rapidement qu'avec un ADV et procure aussi du même coup une information sur la variabilité verticale de l'écoulement. Néanmoins, sa fréquence d'échantillonnage demeure limitée à 1Hz, ce qui ne

permet pas de capter toutes les propriétés des structures turbulentes. De plus, les appareils acoustiques à effet Doppler ont un coût relativement élevé et leur utilisation requiert des efforts de terrain et de traitement analytique considérables.

Il existe toutefois certains outils permettant de limiter les efforts d'acquisition de données sur le terrain. Parmi ceux-ci, les modèles stochastiques de distributions développés par Lamouroux (1995) sont maintenant réutilisés, notamment par Rhoads *et al.* (2003) comme protocole d'évaluation des habitats hydrauliques. Cette approche simple consiste à utiliser des modèles de distribution de probabilité de vitesse pour prédire la vitesse en fonction du débit (Lamouroux, 1995). Une autre approche, plus complexe, consiste à utiliser des modèles hydrodynamiques pour obtenir un champ de vitesse moyenne. Les modèles permettent maintenant d'estimer un champ de vitesse en deux ou trois dimensions en utilisant des mesures de topographie avec une précision acceptable. Toutefois, leur performance est fonction de la complexité du chenal et de la rugosité du lit.

1.3.2 La rugosité

Il est généralement admis qu'il existe trois échelles de rugosité dans une rivière à lit de gravier: l'échelle des particules, l'échelle des micro-formes et l'échelle des séquences seuils-mouilles (Robert, 1990). Bien que chacune de ces échelles joue un rôle sur la variabilité spatiale de l'écoulement, leur contribution individuelle à l'intensité turbulente à l'échelle du tronçon demeure spéculative. Néanmoins, chaque échelle de rugosité pourrait potentiellement être associée à un type particulier de structure turbulente (Buffin-Bélanger *et al.* (2000b). La rugosité de la taille des grains serait liée aux structures d'éjection, les micro-formes seraient associées aux structures d'échappement et les grandes unités morphologiques (ondulations du chenal, seuil, mouilles) exerceraient un contrôle sur les structures à grande échelle.

1.3.2.1 L'échelle des grains

Généralement, dans les rivières naturelles, le lit est composé de sédiments hétérométriques et caractérisé par une grande étendue de taille de grains. La façon la plus commune de caractériser la rugosité du lit d'une rivière consiste à utiliser un indice basé sur la distribution de taille d'un

échantillon de particules (Hey and Thorne, 1983 ; Church *et al.*, 1987). (Voir Wohl *et al.* (1996) pour une comparaison des différentes méthodes d'échantillonnage.) Les percentiles de la distribution des particules tels que D_{50} , D_{65} , D_{84} et D_{90} sont traditionnellement utilisés par les géomorphologues et les ingénieurs dans les équations de résistance à l'écoulement (e.g. Bray, 1982). Cette mesure de la rugosité du lit présente l'avantage d'être simple. Cependant, pour comparer le lit de plusieurs tronçons entre eux, il faut considérer que la distribution et la configuration des particules du lit, leur forme, leur orientation, leur espacement, leur tri et leur imbrication sont semblables entre les rivières. Selon Bathurst (1985), cette prémisse est suffisamment respectée, donc D_n peut être utilisée comme variable simple pour décrire la rugosité du lit. Cette opinion est toutefois contestée, plusieurs auteurs soulignant l'importance de la forme et de l'orientation des particules ainsi que la présence de micro-structures (Robert, 1990; Carling *et al.*, 1992). Par exemple, très souvent il n'y a pas de relation directe entre la taille des particules et leur élévation au dessus du lit, en raison de leur imbrication (Kirchner, 1990). De plus, la ségrégation spatiale des zones de taille de sédiments homogènes représente un défi important à l'échelle du tronçon ou de la section de rivière (Mosley et Tindale, 1985). Néanmoins, la taille des sédiments constitue une variable clé en écologie aquatique, où elle est utilisée pour décrire les habitats de poisson (eg. Heggenes, 1990). L'apport individuel de l'échelle des grains à la résistance à l'écoulement demeure une question nécessitant une étude plus approfondie, particulièrement en ce qui a trait à l'effet de la forme et de l'orientation des particules sur l'écoulement (Nikora *et al.*, 1998).

1.3.2.2 L'échelle des microformes

L'arrangement des particules joue aussi un rôle important sur l'écoulement. L'organisation spatiale structurée des particules du lit résulte généralement de multiples événements hydrologiques d'intensité suffisante pour engendrer le transport des sédiments. Il existe plusieurs types de microformes dans une rivière à lit de graviers qui peuvent occuper jusqu'à 10% de la surface du lit (Bradshaw, 1985). Ces formes sont en grande partie responsables de la microtopographie du lit (Hassan and Reid, 1990). Les microformes se présentent sous deux formes: les amas de galets et les alignements transversaux (*transverse*

ribs). Les amas de galets consistent essentiellement en un obstacle à l'écoulement composé d'un amoncellement de quelques gros cailloux qui produisent une zone de sillage (*wake zone*) où se retrouvent des particules de taille plus fine. Très communs dans les rivières naturelles, les amas de galets sont associés au développement de structures turbulentes comme les structures d'échappement (Fig. 1.4 ; Buffin-Bélanger *et al.* 1998 ; 2001). Les amas de galets jouent une fonction écologique importante, puisqu' ils servent de zone protégée à des communautés d'invertébrés et pour certains poissons comme les salmonidés (e.g. Metcalfe *et al.* 1997 ; Brooks, 2005). De plus, comme ces formes sont très abondantes, elles pourraient jouer un rôle important sur la variabilité de l'écoulement.

En effet, l'abondance et l'espacement des amas de galets et des protubérances en rivière pourraient influencer la structure de l'écoulement. Par exemple, lorsque plusieurs amas de galets se joignent, ils peuvent prendre une forme circulaire (Bluck, 1987). L'espacement des protubérances comme les blocs et les amas de galets exerce aussi un contrôle sur l'écoulement. Lorsque les éléments de rugosité sont très denses, l'écoulement circulant au dessus du lit est similaire à celui qu'on observe au dessus d'un lit lisse. Morris (1955) illustre ce phénomène en définissant trois catégories d'écoulement en fonction de l'espacement longitudinal des éléments de rugosité sur le lit (λ) : a) l'écoulement au-dessus d'éléments isolés, b) l'écoulement d'interférence des zones de sillage et c) l'écoulement quasi lisse (Fig. 1.11). Lorsque les éléments de rugosité sont très espacés entre eux, l'écoulement que l'on observe s'apparente à celui formé autour d'un amas de galets (Buffin-Bélanger *et al.* 1998). À l'opposé, lorsque la densité d'éléments de rugosité est très élevée, l'écoulement circulant au dessus du lit est similaire à celui qui se forme au dessus d'un lit lisse. Nowell et Church (1979) ont testé le concept de Morris en prenant en compte l'espacement latéral des éléments de rugosité. Ils ont utilisé le concept de densité d'éléments de rugosité :

$$NA_e/A_t \quad (1.17)$$

où NA_e représente l'aire occupée par des éléments de rugosité et A_t représente l'aire totale de la portion du lit caractérisée.

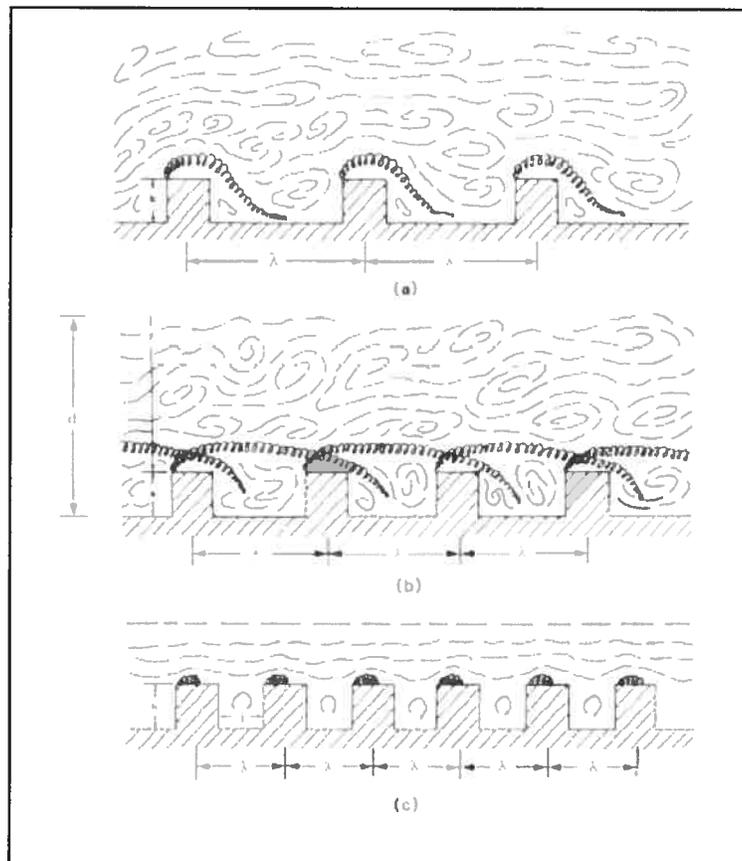


Fig. 1.11. Trois types d'écoulement au dessus d'un lit rugueux, fonction de l'espace entre les protubérances (λ) : a) écoulement au dessus d'éléments isolés, b) écoulement dominé par le sillage, c) écoulement quasi lisse. D'après Morris (1955), modifié par Chow (1982). Tiré de Davis et Barmuta, 1984)

Selon Nowell et Church (1979), lorsque la densité d'éléments de rugosité est supérieure à $1/12$, on observe un écoulement quasi lisse au-dessus des éléments de rugosité. L'écoulement d'interférence des zones de sillage survient quant à lui à des densités de rugosité de $1/16$ et $1/22$ et l'écoulement au-dessus d'éléments isolés à une densité très faible ($1/50$). Cet exemple montre qu'un indice de rugosité calculé simplement à partir de la taille des particules peut ne pas présenter de relation directe avec les processus turbulents.

Lorsque les éléments de rugosité s'alignent dans l'axe latéral, on appelle ces formes les 'formes transversales' (*transverse ribs*). Ces formes sont constituées d'un alignement transversal de galets et de blocs espacés à intervalles réguliers (MacDonald et Banerjee, 1971). Les particules faisant partie de la forme transversale se distinguent par leur taille plus grande que les particules avoisinantes. La présence et la distribution de ces formes sont notamment fonction de la pente du lit (Bluck, 1987). Les formes transversales sont observées dans les rivières à lit de graviers qui présentent des séquences seuils-mouilles, mais sont aussi parties intégrantes des systèmes en *step-pool*, cours d'eau à pente forte, constitués d'une succession de mouilles en marche d'escalier. Ce type de morphologie se retrouve principalement dans les cours d'eau de tête, où les pentes sont fortes. Les interrelations entre ces types de formes et l'écoulement demeurent méconnues, notamment en raison de la difficulté à caractériser l'écoulement à l'aide des outils technologiques actuellement disponibles (Wohl et Thomson, 2000 ; Lamarre, 2006).

Il existe plusieurs méthodes permettant de caractériser la rugosité locale à l'échelle du tronçon en considérant l'arrangement des particules. Par exemple, les écologistes ont développé un type d'outil simple servant à estimer la rugosité locale du lit constituant l'habitat d'une communauté d'invertébrés. Ce type d'instrument est constitué de multiples tiges graduées amovibles placées verticalement côte à côte sur une structure de bois ou de métal (Fig. 1.12 ; Gore, 1978). Les tiges graduées servent à mesurer la dénivellation du lit sur une surface correspondant à un micro-habitat. L'écart-type de la hauteur de chaque tige peut ensuite être utilisé comme indice de rugosité (Brooks *et al.*, 2005). Cette technique est adaptée à l'étude des invertébrés, pour une caractérisation de la rugosité en milieu peu profond et à petite échelle. Cependant, cet appareil est peu adapté à un échantillonnage systématique à l'échelle du tronçon. L'utilisation d'une station tachéométrique représente une alternative intéressante pour caractériser la rugosité du lit en tenant compte des éléments de rugosité individuels et des microformes.

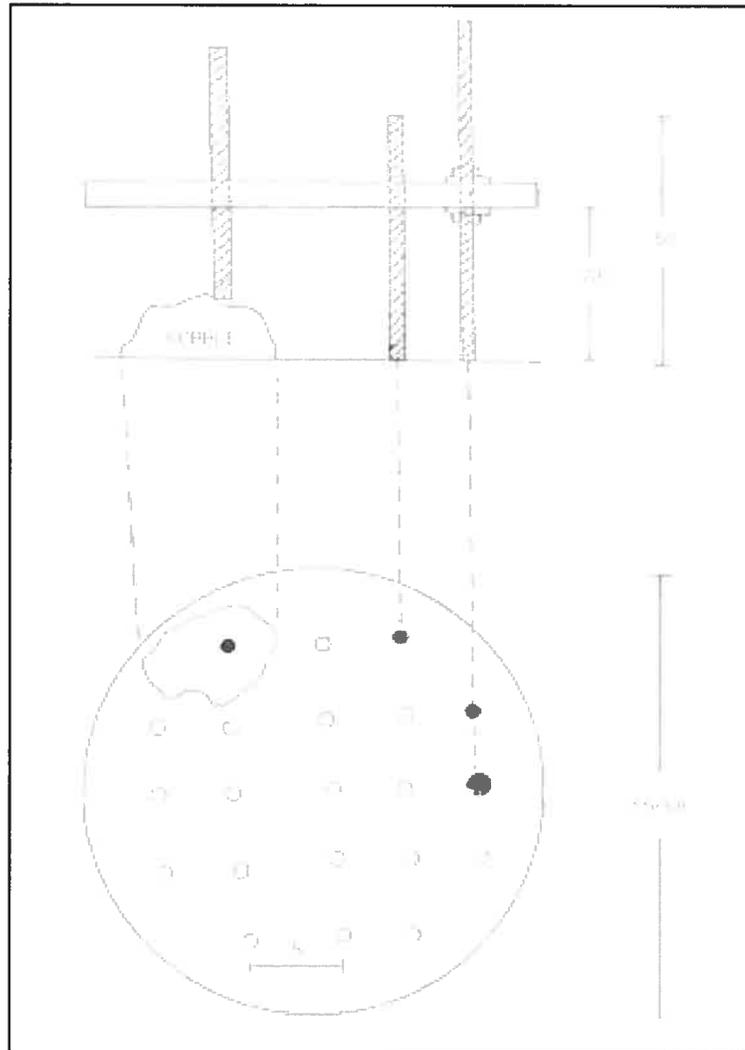


Fig.1.12 Vu de profil et en plan d'un outil de mesure de la rugosité d'un habitat d'invertébrés. Unités en cm. D'après Gore (1978)

Lamarre (2006) a récemment proposé une méthode optimale pour échantillonner et caractériser les structures sédimentaires dans les rivières à lit de gravier à l'aide d'une station tachéométrique. De façon à obtenir le modèle numérique de terrain (MNT) le plus représentatif possible des microformes du lit, l'auteur recommande de caractériser la microtopographie en suivant un échantillonnage systématique complété d'un échantillonnage des points critiques où il y a rupture de pente. Elle propose aussi l'utilisation d'un algorithme d'interpolation par un réseau de triangles irréguliers (TIN). À partir d'un MNT, il est ensuite possible d'estimer un indice de rugosité. Par exemple, la rugosité peut être représentée par l'écart-type de l'élévation dans une fenêtre mobile d'une taille donnée (e.g.

Legleiter, sous presse). Bien qu'un tel indice de rugosité soit spécifique à un site, il comporte l'avantage d'inclure plusieurs échelles de rugosité (grains, micro-formes) (Nikora *et al.* 1998 ; Lane 2005).

L'apparition de nouveaux outils technologiques tels que l'imagerie hyperspectrale (Fonstad et Marcus, 2005) et le balayage laser (Smart *et al.*, 2004) procurent maintenant des moyens d'obtenir des relevés topographiques en réduisant l'ampleur des travaux sur le terrain. De plus, les récentes avancées dans le domaine de la photogrammétrie permettent désormais de caractériser la micro-topographie et l'arrangement des particules du lit en plus de la morphologie du chenal (Lane, 2001 ; Carbonneau *et al.*, 2003 ; Carbonneau *et al.*, 2005). Cependant, l'utilité de ces appareils est souvent limitée par la présence de végétation riveraine et par l'épaisseur de la tranche d'eau. Comme ces cas sont la norme plutôt que l'exception, l'utilisation d'une station tachéométrique demeure une méthode intéressante pour cartographier le lit des rivières graveleuses (Lamarre, 2006). De plus, les relevés micro-topographiques permettent de capter la variabilité de la rugosité à une plus grande échelle, celle des ondulations du chenal ou des séquences seuil-mouille.

1.3.2.3 La profondeur : l'échelle des séquences seuil-mouille

En rivière à lit de gravier, la profondeur joue un rôle important dans la formation et le maintien des structures turbulentes (Roy *et al.* 2004). En milieu naturel, les variations les plus importantes de la profondeur sont reliées aux grandes ondulations du chenal, notamment, les séquences seuil-mouille.

Les séquences seuil-mouille sont des caractéristiques ubiquistes des cours d'eau au lit rugueux. Les seuils et les mouilles sont des formes qui observées dans les cours d'eau de pentes faibles à modérées allant de 1 à 3% (Clifford, 1993a; Montgomery et Buffington, 1997). La morphologie des cours d'eau de type seuil-mouille se définit comme une ondulation du lit à grande échelle donnant lieu à une succession de bancs, de seuils (sommets) et de mouilles (creux) (Leopold *et al.* 1964) (Fig. 1.13 ; Thomson *et al.* 2006). La distance entre chaque mouille varie généralement entre cinq et sept fois la largeur du

chenal (Leopold *et al.* 1964 ; Keller et Melhorn, 1978). De plus, le ratio de la profondeur des mouilles sur la distance les séparant présente un facteur d'échelle (0.03) (Carling et Orr, 2000).

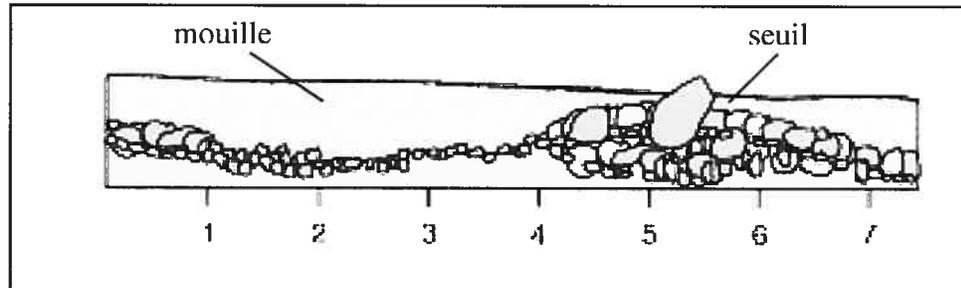


Figure 1.13. Vue de profil d'une séquence seuil-mouille typique dans une rivière à lit de graviers. Les unités de mesures sont exprimées en 'largeur du chenal'. (D'après Thomson, sous presse).

De façon générale, les seuils se caractérisent par une faible profondeur, généralement associée à une forte vitesse, une pente de la surface de l'eau plus raide et à une granulométrie du lit grossière. À l'inverse, les mouilles constituent les creux des ondulations et sont caractérisées par une plus grande profondeur, généralement accompagnée d'une diminution de la vitesse, d'une pente de la surface de l'eau plus douce et de sédiments plus fins (Clifford et Richards, 1992).

Il est reconnu qu'en général, les mouilles présentent un lit composé de particules de plus faible dimension que les seuils (e.g. Sear, 1996 ; Robert, 1997). La différence entre les seuils et les mouilles est clairement visible dans les cours d'eau dont le lit est très hétérogène, mais cette différence est parfois moins claire dans les cours d'eau aux sédiments plus grossiers (Clifford, 1993). Dans les seuils, les sédiments sont également mieux structurés et imbriqués que dans les mouilles (Fig. 1.14 ; Sear, 1996).

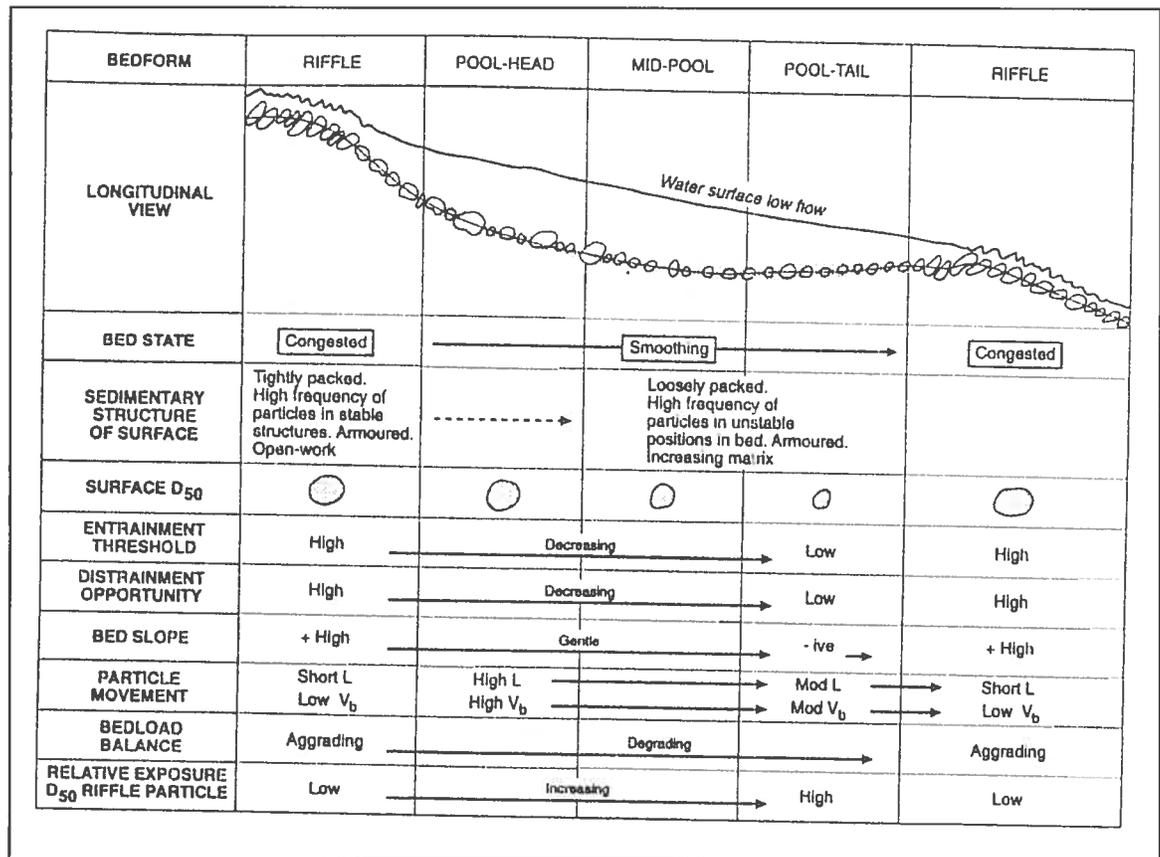


Figure 1.14 Dynamique morpho-sédimentaire d'un gradient longitudinal dans une séquence seuil-mouille typique. La séquence illustre le niveau d'imbrication et la taille des particules, le seuil de mise en transport des particules et le bilan sédimentaire dans une mouille localisée entre deux seuils et divisée en 'entrée', 'milieu' et 'sortie'. D'après Sear, 1996

Cette observation pourrait s'expliquer par les interrelations du lit avec l'écoulement. Par exemple, dans les seuils, le lit est soumis à un écoulement fortement turbulent. Cela entraîne une vibration et le mouvement sporadique de particules. À l'inverse, dans les mouilles, l'écoulement près du lit est plus lent et moins turbulent. Par conséquent, les structures compactes et imbriquées sont moins présentes que dans les seuils (Sear, 1996). La dynamique de l'écoulement dans les seuils et dans les mouilles est toutefois sujette à varier dans le temps.

Une hypothèse très répandue expliquant la dynamique du transport des sédiments dans les séquences seuil-mouille est celle de 'l'inversion de vitesse' (Keller, 1971). Selon cette hypothèse, pendant une crue, le taux d'augmentation de la vitesse serait plus élevé dans les mouilles que dans les seuils, de sorte qu'au niveau plein bord, la vitesse dans les mouilles excèderait la vitesse dans les seuils. Ce phénomène aurait non seulement une grande importance pour la dynamique du transport des sédiments, mais aussi pour les habitats fluviaux. Par exemple, lors de crues, certains poissons comme les salmonidés pourraient entreprendre des déplacements en vue de trouver des habitats plus avantageux (e.g. Kemp *et al.* 2003 ; Scruton *et al.* 2003). Par conséquent, la dynamique temporelle du débit constitue un aspect majeur dans la description des unités morphologiques et des habitats dans un cours d'eau (MacVicar, 2006).

Les unités morphologiques sont non seulement variables dans le temps, mais aussi dans l'espace. Les unités morphologiques comme les seuils et les mouilles ne sont pas uniformes. Comme l'a montré Sear (1996), la mouille peut-être divisée en sous-unités, telle que l'entrée et la sortie de la mouille (Fig. 1.14). Cette différence hydro-morphologique se manifeste aussi dans la distribution de certains organismes. Par exemple, à l'aide d'une analyse de groupement hiérarchique effectuée sur la vitesse moyenne, la profondeur et le substrat, Inoue et Nunokawa (2002) ont classé les unités morphologiques en sous-unités (Fig. 1.15) et ont ainsi montré que des espèces de poissons distinctes exhibaient une préférence pour des sous-unités particulières, telles que l'entrée de la mouille et la sortie de la mouille. Ces résultats soulignent l'avantage de l'échelle des petites zones homogènes (*patch*) ou des sous-unités pour expliquer la distribution des poissons, plutôt que la traditionnelle échelle grossière des unités morphologiques (seuils, mouilles, cascades, etc.).

Par ailleurs, il existe des mouilles dans lesquelles la dynamique de l'écoulement est dominée par la présence d'éléments stables, comme la roche en place ou des débris de bois.

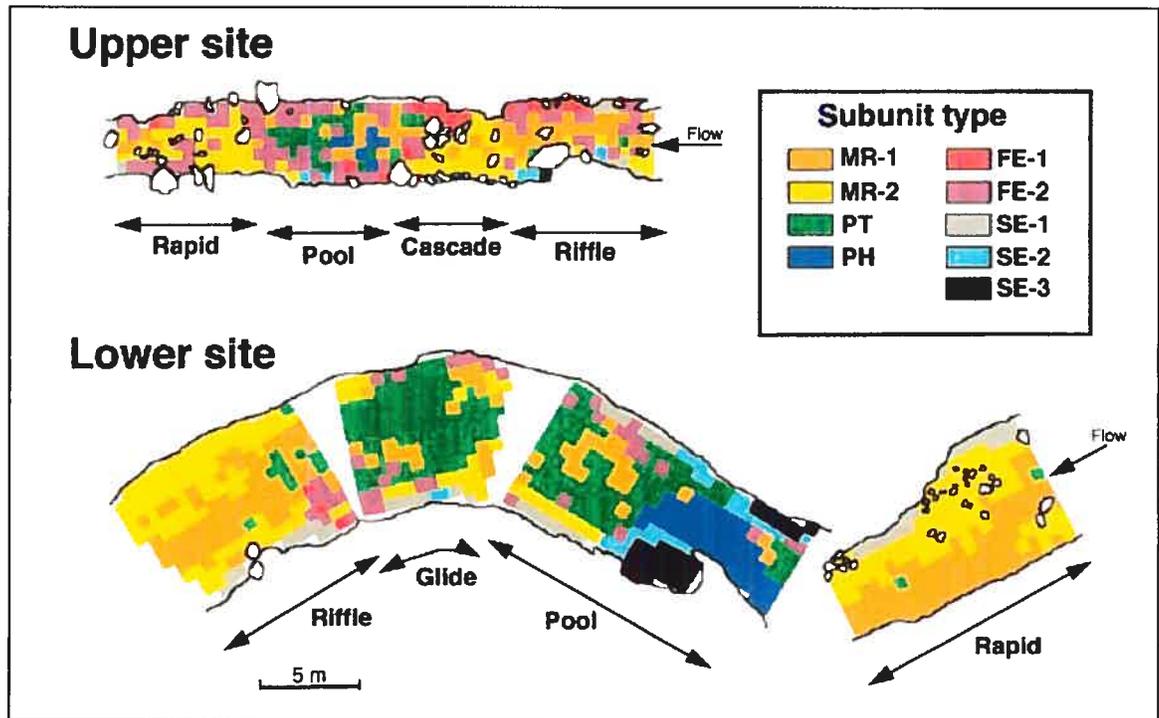


Figure.1.15 Distribution des sous-unités morpho-hydrauliques à chaque site. MR : centre du seuil PT: sortie de la mouille; PH : entrée de la mouille; FE : bords au courant rapide; SE : bords au courant lent (Inoue et Nunokawa, 2002).

Dans les rivières au lit constitué de particules grossières ou de roche en place une constriction engendre des courants de recirculation et une convergence de l'écoulement, ce qui entraîne une augmentation de la vitesse à l'entrée de la mouille et un affouillement souvent important dans la mouille (Robert, 2004). Dans ce type de mouille, les sédiments sont expulsés en direction de la sortie de la mouille (Thomson *et al.* 1999). Par conséquent, en terme de caractérisation d'habitats, ces types de mouilles où la vitesse est rapide et le substrat grossier doivent être considérées comme des unités distinctes.

À l'échelle du tronçon, l'ensemble des variables précédentes, soit la vitesse moyenne, la rugosité et la profondeur induite par la morphologie du chenal interagissent et façonnent la variabilité de spatiale à l'échelle du tronçon.

1.3.3 La turbulence : variabilité en plan

À ce jour, des avancées considérables ont été réalisées en laboratoire et sur le terrain dans le domaine de la caractérisation des structures turbulentes en écoulement de surface libre (Roy *et al.* 2004). Par le passé, ces études réalisées avec des EMCM se sont principalement concentrées sur la dynamique longitudinale et verticale de l'écoulement le long de quelques transects longitudinaux (e.g. Robert *et al.*, 1996 ; Buffin-Bélanger, 1998). Beaucoup plus rarement, la variabilité latérale a été étudiée. Or, dans un contexte d'étude portant sur l'habitat des poissons (e.g section 1.2.4), organisme mobile, une caractérisation en plan à l'échelle du tronçon devient souhaitable. En dépit de leur importance, les études portant sur la variabilité de la turbulence en plan sont peu nombreuses. Elles recourent cependant trois échelles spatiales : l'échelle du point ($\sim 0.001 \text{ m}^2$) (Dancey *et al.* 2000), de la *patch* ($\sim 1 \text{ m}^2$) (Buffin-Bélanger *et al.* 2006) et du tronçon ($\sim 100 \text{ m}^2$) (Lamarre et Roy, 2005 ; Legleiter *et al.* sous presse).

À l'échelle du point, Dancey *et al.* (2000) ont examiné de façon détaillée l'écoulement au dessus d'un lit artificiel composé de petites billes de diamètre uniforme (8 mm) densément imbriquées. Des mesures de vitesse ont été recueillies selon une grille systématique à l'aide d'un velocimètre laser à effet Doppler (3D-LDV). Les auteurs ont ainsi montré que les propriétés de la vitesse verticale moyenne ($\langle W \rangle$) et la valeur quadratique verticale moyenne RMS_w de l'écoulement varie sur de très courtes distances (Fig. 1.16). Ces résultats montrent que très près du lit, l'écoulement vertical présente une très grande variabilité à une échelle très restreinte. Cependant, les résultats de cette étude ne montrent pas de symétrie parfaite en raison de l'incertitude et de la difficulté à maintenir le lit parfaitement immobile.

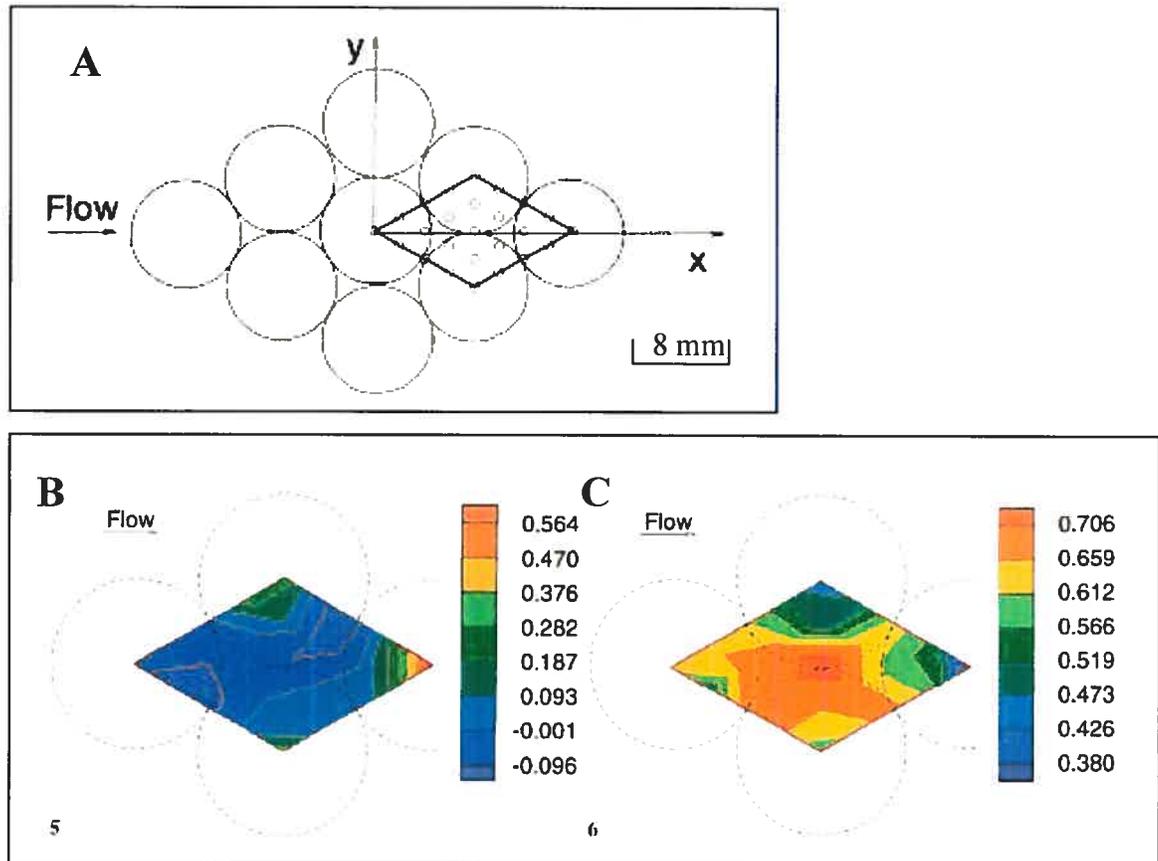


Figure 1.16. A) Vue de haut de la zone d'échantillonnage. Les grands cercles représentent les billes du lit (8 mm de diamètre) et les petits cercles la localisation des mesures de LDV. B) Distribution spatiale de la vitesse verticale moyenne pondérée ($W^* u_*^{-1}$) C) Distribution spatiale de l'intensité turbulente verticale ($w'^* u_*^{-1}$) (Dancey et al 2000)

De plus, ces résultats sont spécifiques à ces conditions de laboratoire, notamment l'utilisation d'un chenal expérimental au lit homogène composé de particules symétriques, qui ne présentent que très peu de similitudes avec le milieu naturel. À l'échelle des unités homogènes (*patches*), Buffin-Bélanger *et al.* (2006) ont affronté le problème de généralisation des résultats obtenus en laboratoire en utilisant une technique innovatrice de reproduction d'un lit naturel (voir Buffin-Bélanger *et al.* 2003). Ils ont mesuré la vitesse à 25Hz avec un ADV à quatre hauteurs au près du lit (0.008 à 0.1 m) à 99 positions selon une grille très dense (longitudinal : 0.1 m, latéral : 0.05 m; Fig.1.17).

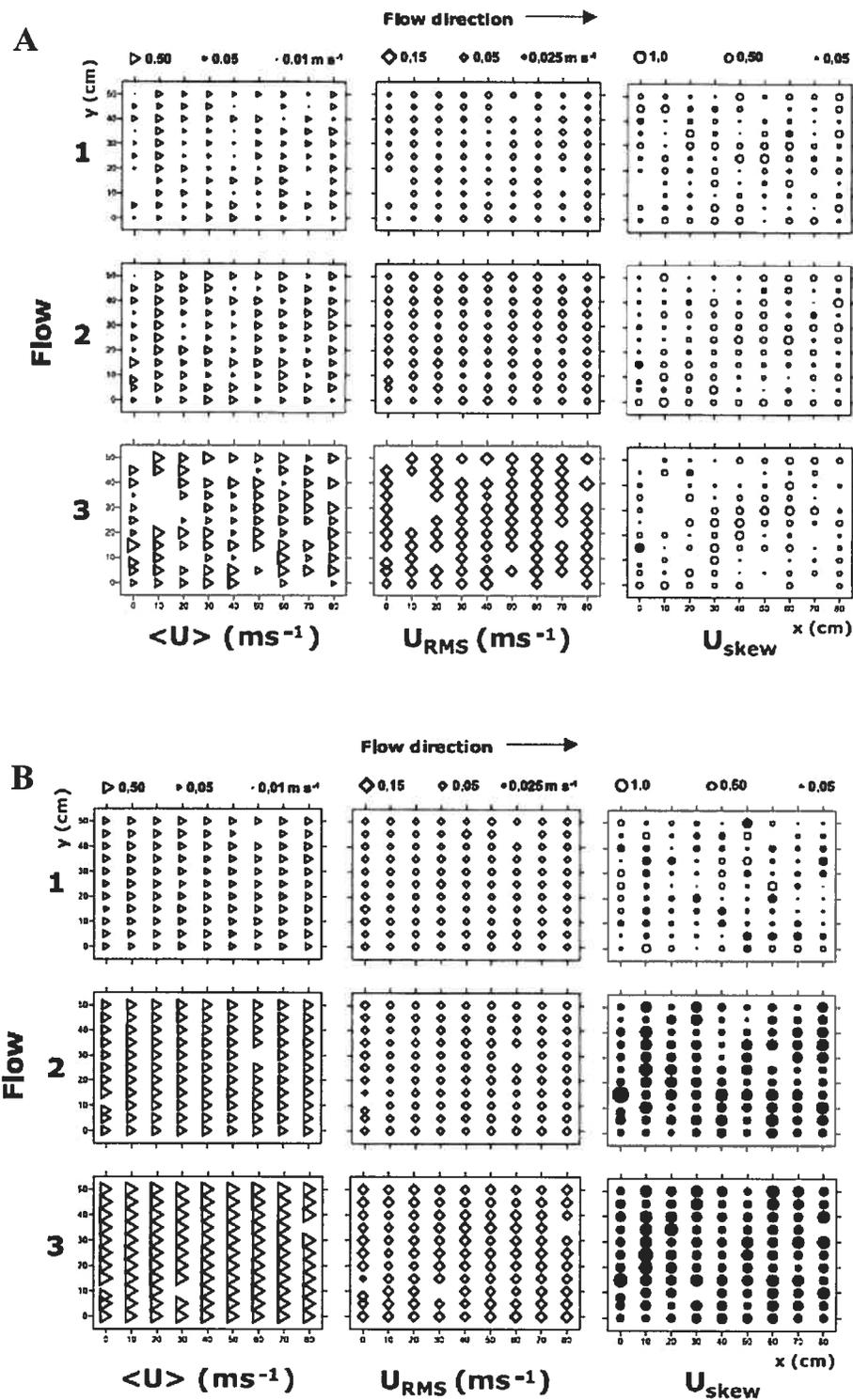


Figure 1.17 Moyenne (U), écart-type (U_{RMS}), et le coefficient d'asymétrie (U_{skew}) de la vitesse longitudinale (A) dans la couche la plus près du lit et (B) dans la couche la plus élevée au dessus du lit ($z_D = 0.05$ m, flow 1; $z_D = 0.1$ m, flows 2 et 3) sous trois débits. L'écoulement s'écoule de gauche à droite. L'échelle est en centimètres. Pour le coefficient d'asymétrie, les symboles pleins indiquent des valeurs négatives. (D'après Buffin-Bélanger *et al.* 2006)

Ils ont observé que l'hétérogénéité spatiale de $\langle U \rangle$ et de RMS_U augmente avec la vitesse moyenne et diminue linéairement avec la distance au-dessus du lit. Ils ont aussi constaté que sur la surface étudiée (0.5 m^2) la vitesse devenait homogène à une distance de deux à quatre fois la médiane de l'élévation du lit. En chenal expérimental, Lawless et Robert (2001) ont aussi examiné la variabilité spatiale de la turbulence en plan. Cependant, ils ont adopté la stratégie d'échantillonnage des profils de vitesse plutôt qu'un échantillonnage dense près du lit. Dans cette étude, Lawless et Robert (2001) se sont intéressés à l'effet des amas de galets sur l'écoulement et mettant en évidence l'importance de la composante latérale dans le développement de structures d'échappement. Ce type de recherche effectuée à l'échelle de la *patch* en laboratoire permet d'isoler l'effet d'un amas de galet, mais n'est pas représentatif de ce qui est observé à l'échelle du tronçon de cours d'eau, où les macro-structures turbulentes jouent un rôle important.

À l'échelle du tronçon, deux hypothèses peuvent être posées concernant la structure de l'écoulement d'une rivière à lit de gravier. Selon la première hypothèse, la variabilité des caractéristiques de l'écoulement turbulent serait dominée par l'influence des amas de galets et des blocs qui composent le lit à travers le processus de formation de structures d'échappement (accélération du fluide, sillage, etc. ex. Fig. 1.4). Selon la seconde hypothèse, l'écoulement à l'échelle du tronçon serait dominé par les structures turbulentes à grande échelle, qui sont ubiquistes et indépendantes de la présence d'éléments de rugosité (Lamarre et Roy, 2005).

Pour investiguer la question de la variabilité spatiale de la turbulence à l'échelle du tronçon, Lamarre et Roy, (2005) ont échantillonné à une forte densité la rugosité du lit et les propriétés de l'écoulement (65 profils de vitesse) de deux tronçons de pente modérée (0.02) d'une rivière à lit de gravier en Estrie ($D_{84}=100 \text{ mm}$). Les résultats de cette étude ont montré qu'en dépit de la configuration complexe du lit, la variabilité spatiale des propriétés moyennes et turbulentes de l'écoulement dans un seuil se caractérise par de grands patrons spatiaux plutôt que par des changements abruptes reliés à la présence d'éléments de rugosité individuels (Fig. 1.18). Ils concluent que de façon surprenante, les protubérances du lit (amas de galets et blocs) ont un impact très local sur la variabilité des propriétés turbulentes à

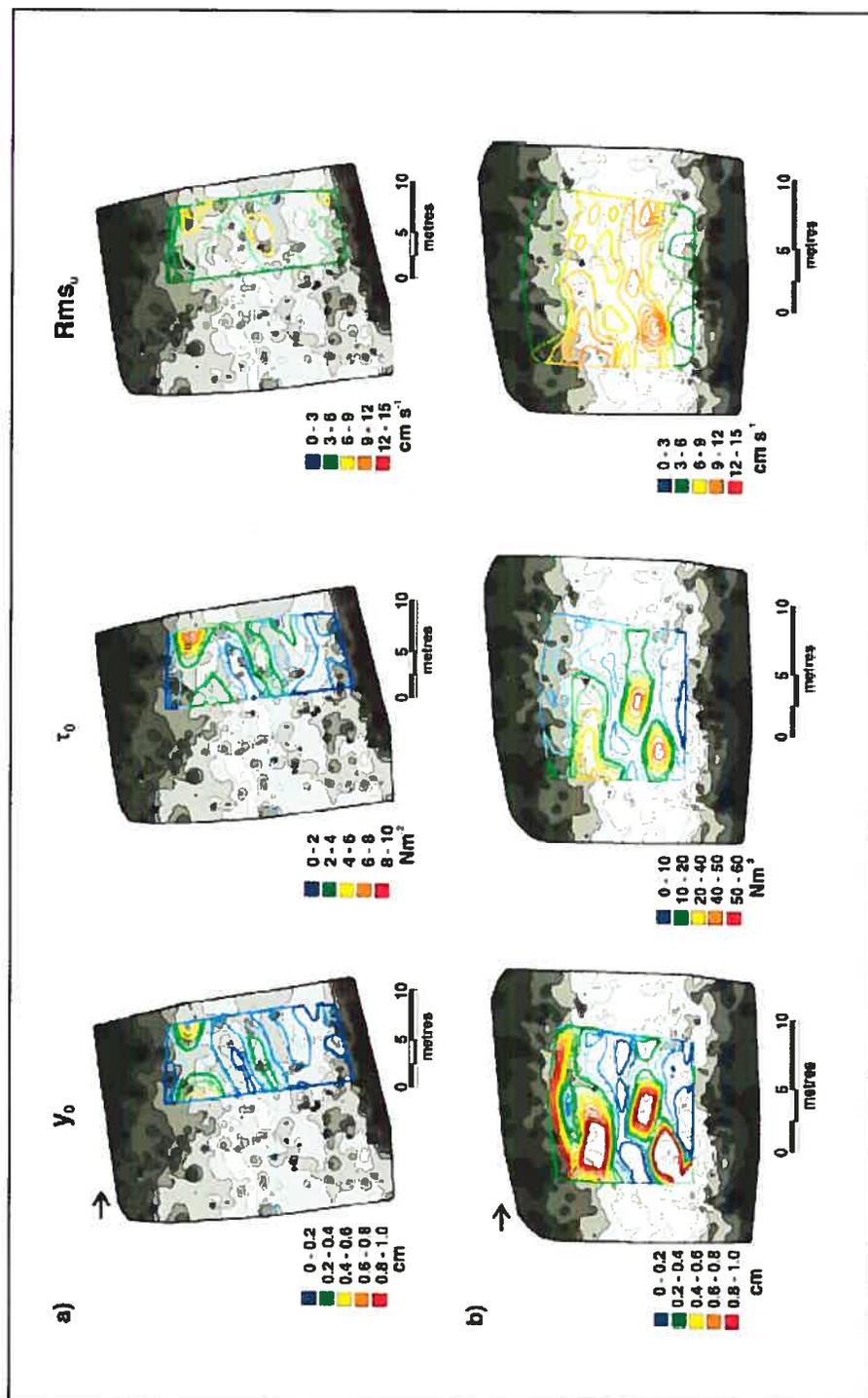


Figure 1.18 Variabilité spatiale de la hauteur de rugosité (y_0), de la contrainte de cisaillement au lit (τ_0) et de l'intensité turbulente (RMS) dans deux tronçons de la rivière Eaton, Québec a) 1999 et b) 2000. (D'après Lamarre et Roy, 2004).

l'échelle du tronçon. Cela suggère plutôt que la variabilité des propriétés turbulentes soit principalement contrôlée par les ondulations du chenal et la profondeur plutôt que par la présence d'éléments de rugosité. La cartographie de la distribution spatiale de la rugosité, de la contrainte de cisaillement au lit et de l'intensité turbulente longitudinale (RMSU) illustre l'effet à l'échelle locale des éléments de rugosité (amas de galets et blocs) sur les profils de vitesse (Fig. 1.18). Toutefois, cet effet se manifeste sur une courte distance longitudinale (maximum: $22D_{84}$) et la majeure partie du tronçon est dominée par des patrons à grande échelle bien organisés.

Lamarre et Roy (2005) ont aussi observé l'effet des protubérances sous l'angle des structures turbulentes cohérentes. Les auteurs ont observé une absence de corrélation entre la distance en aval d'un obstacle et les propriétés des structures turbulentes, telles, la fréquence d'occurrence des structures, la durée des événements de haute vitesse et des événements de basse vitesse (Fig. 1.19). Il en est aussi de même pour la forme des profils de vitesse qui n'est nullement corrélée aux propriétés des structures.

Dans le cadre d'une étude similaire, Legleiter *et al.* (sous presse) se sont intéressés à la variabilité spatiale des propriétés turbulentes moyennes de l'écoulement en fonction de trois débits distincts ($1.13 \text{ m}^3/\text{s}$; $2.41 \text{ m}^3/\text{s}$; $3.25 \text{ m}^3/\text{s}$). À l'aide d'un ADV (*flowtracker*) à faible résolution (1 Hz), Legleiter *et al.* (sous presse) ont vérifié l'applicabilité des résultats de Lamarre et Roy (2005) à un seuil de pente plus abrupte (0.041) et aux sédiments plus grossiers ($D_{84}=254 \text{ mm}$). Legleiter *et al.* (sous presse) ont échantillonné l'écoulement à tous les 0.5 m le long de cinq transects (Fig. 1.20) et ont utilisé les géostatistiques pour caractériser la variabilité de l'intensité turbulente de l'écoulement dans l'axe longitudinal et transversal du tronçon. De façon à comparer la turbulence mesurée à des débits différents, ils ont standardisé l'intensité turbulente (RMS) par la vitesse de friction

$$U_* = \sqrt{ghS} \quad (1.18)$$

où g représente l'accélération gravitationnelle ($\text{m}^2 \text{ s}^{-2}$), h est la profondeur moyenne du tronçon (m) et S la pente moyenne du tronçon (Nezu et Nakagawa, 1993)

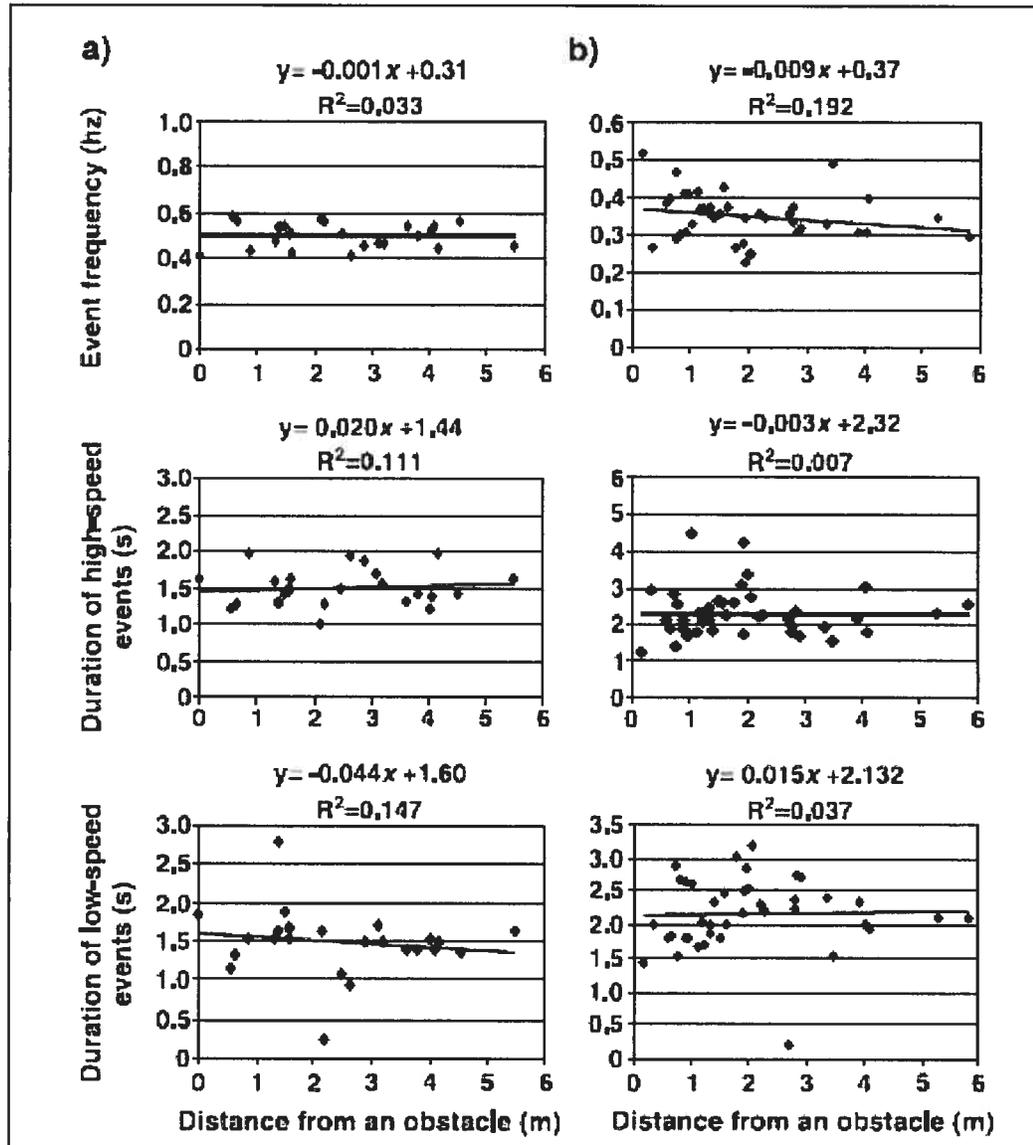


Figure 1.19. Corrélation entre la distance des profils de vitesse d'éléments de rugosité et les propriétés turbulentes (haut) fréquence d'événements, (milieu) durée des événements de haute vitesse (bas) durée des événements de basse vitesse. a) 1999 et b) 2000. D'après Lamarre et Roy, (2005).

À l'aide de semivariogrammes directionnels, Legleiter *et al* (sous presse) ont observé que la distribution spatiale de l'intensité turbulente était moins structurée que la vitesse moyenne (Fig.1.21). De plus, l'effet du débit a été difficile à cerner. Plusieurs constatations peuvent toutefois être soulignées.

Pour l'intensité turbulente longitudinale (RMS_U), c'est sous les conditions de débit intermédiaire ($2.41 \text{ m}^3/\text{s}$) que la valeur de palier la plus basse a été identifiée (Fig. 1.21). Cette situation serait attribuable au fait qu'en situation de haut débit ($3.25 \text{ m}^3/\text{s}$) et de bas débit ($1.13 \text{ m}^3/\text{s}$), une forte asymétrie de l'écoulement se crée. En effet, la haute semivariance est occasionnée par la présence de valeurs très faibles d'intensité turbulente sur la portion droite du chenal, où la vitesse et la profondeur relative sont faibles, ainsi que par les valeurs élevées dans le thalweg (Fig.1.20).

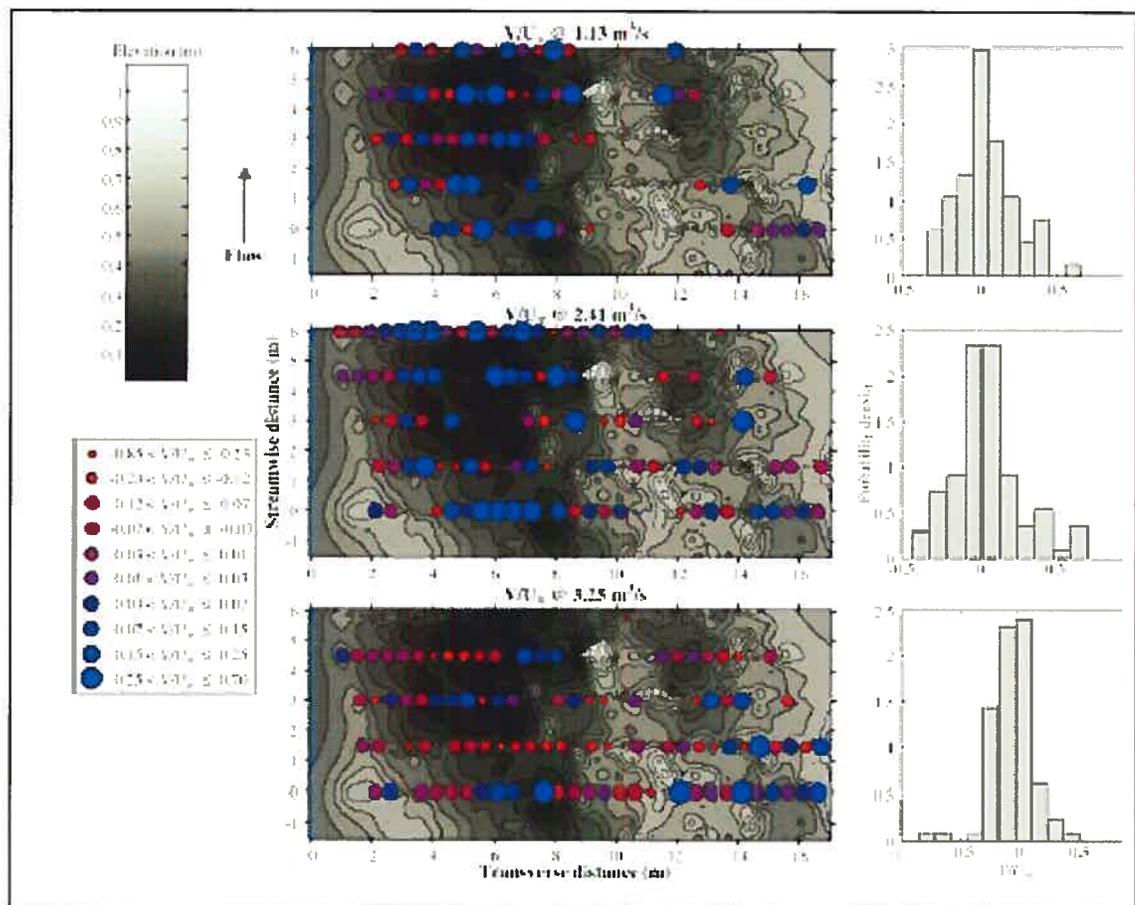


Figure 1.20 Carte thématique représentant l'intensité turbulente longitudinale sans dimension u'/U , (cercles proportionnels) superposé à la bathymétrie du tronçon à trois débits différents. À droite, histogrammes de probabilités représentant la distribution d'intensité turbulente du tronçon. (D'après Legleiter *et al.* sous presse)

Comme il était anticipé, la variabilité minimale de l'intensité turbulente verticale (RMS_w) a été observée en condition de haut débit, dans la direction longitudinale et transversale. Le contraste

entre les deux portions du tronçon s'est atténué avec l'augmentation du débit. Ce phénomène est d'ailleurs bien illustré par les semivariogrammes transversaux. Cette situation se répercute aussi sur la structure spatiale de l'intensité turbulente latérale (RMS_v). Ces résultats suggèrent que la turbulence est plus intense et développe un patron spatial plus continu à mesure que le débit augmente et l'effet des éléments de rugosité individuels devient moins important.

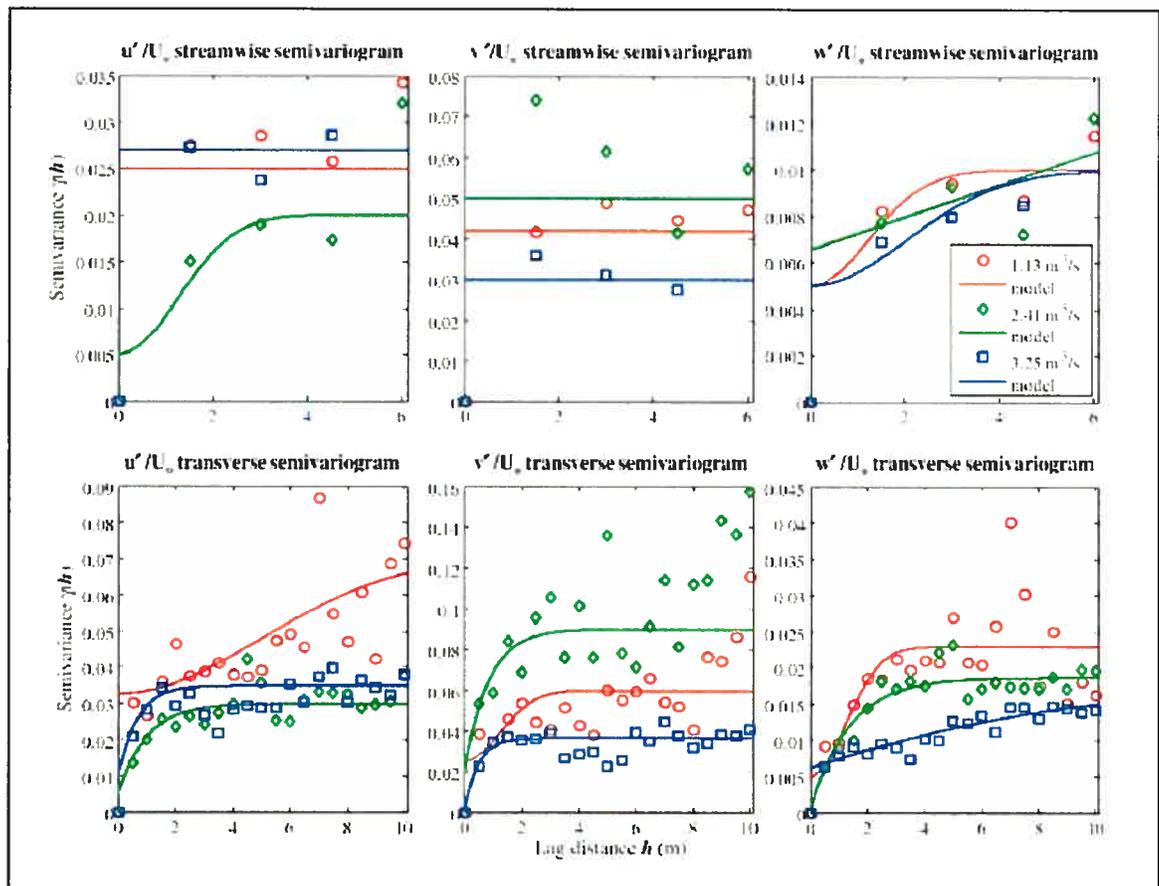


Figure 1.21 Semivariogrammes directionnels (dessus) longitudinal et (bas) transverse de l'intensité turbulente dans les trois composantes orthogonales de l'écoulement, (de gauche à droite) u' longitudinale, v' verticale et w' latérale. N.B. la notation des composantes verticales et latérales diffère de celle utilisée dans le texte. Les couleurs désignent trois débits différents. (D'après Legleiter *et al.* 2006)

Les résultats de Legleiter *et al.* (sous presse) sont pertinents et originaux, comme ils présentent la variabilité latérale de l'écoulement d'une berge à l'autre. Cependant, les auteurs ont ainsi négligé la variabilité longitudinale. Legleiter *et al.* (sous presse) ont également utilisé des

corrélogrammes croisés pour observer la persistance spatiale de la turbulence en relation avec la rugosité du lit. De manière générale, ils confirment les résultats de Lamarre et Roy (2005) : l’empreinte longitudinale des éléments de rugosité peut s’étendre jusqu’à $25D_{84}$ et la variabilité des propriétés turbulentes à l’échelle du tronçon est principalement conditionnée par les grandes ondulations du chenal, plutôt que par les éléments de rugosité individuels.

Dans l’étude de Lamarre et Roy (2005), la distribution spatiale des propriétés turbulentes varie presque systématiquement du thalweg jusqu’aux berges. Cela pourrait s’expliquer par la présence des structures turbulentes à grande échelle qui ont une taille proportionnelle à la profondeur. Ces structures peuvent prendre leur origine d’une éjection de portion lente de fluide à partir de la zone de séparation à l’aval d’un obstacle, comme un amas de galets (Buffin-Bélanger, 1998 ; Roy *et al.* 2004). Selon ce point de vue, même si les propriétés de l’écoulement ne sont modifiées que sur une courte distance à l’aval d’un amas de galets, ces derniers peuvent jouer un rôle important dans l’auto-organisation et le maintien des structures turbulentes (Lamarre et Roy, 2005). Cependant, ces structures peuvent aussi se former en l’absence de ces obstacles, ce qui rend difficile d’isoler l’effet d’une protubérance. Néanmoins, la présence de patrons spatiaux de turbulence liés aux macro-structures turbulentes à l’échelle du tronçon portent à croire qu’il pourrait exister un lien entre ces patrons et les processus écologiques.

1.4 Conclusion

L’influence de la turbulence sur les processus écologiques soulève depuis peu un intérêt marqué chez les écologistes et les géomorphologues fluviaux. Depuis les travaux pionniers des années 70, les moyens technologiques permettant de caractériser la turbulence en rivière ont beaucoup évolué. Néanmoins, la quasi-totalité des études portant sur l’influence de la turbulence en écologie ont été effectuées à micro-échelle, autour d’un bloc ou d’un amas de galets. Les géomorphologues et hydrauliciens se sont récemment intéressés avec succès à la question de la distribution spatiale de la turbulence à l’échelle du tronçon. Ces connaissances pourraient être appliquées à des études portant sur des processus écologiques à l’échelle du tronçon comme la prolifération des algues ou l’utilisation de l’habitat par les poissons.

L'étude de la distribution spatiale de la turbulence nous a révélé qu'elle est très variable très près du lit à une échelle presque microscopique (Dancey *et al.* 2000), mais qu'elle devient quasi homogène à l'échelle d'une zone (*patch*) de 0.5 m^2 en s'élevant sensiblement au-dessus du lit. Cependant, à cette échelle spatiale, l'écoulement est dominé par la présence ou l'absence d'éléments protubérants. À l'inverse, à l'échelle du tronçon, la présence de patrons spatiaux des propriétés turbulentes suggère que les structures turbulentes à grande échelle pourraient constituer le processus dominant.

Il est donc possible que les processus écologiques survenant à l'échelle du tronçon soient aussi dominés par ces variations spatio-temporelles de l'écoulement. Cette question constitue selon nous une avenue de recherche très prometteuse. De plus, des questions méthodologiques portant sur la mesure de la turbulence en plan à l'échelle du tronçon doivent être investiguées pour faciliter la réalisation subséquente des études portant sur l'interaction des champs d'écoulement complexe avec les organismes vivants.

2. Problématique et méthodologie

2.1 Problématique et objectifs

Dans la dernière décennie, l'amélioration des techniques biotéléométriques comme le radio-pistage et l'utilisation des émetteurs passifs ont donné un nouveau souffle au domaine de la recherche sur l'utilisation de l'habitat des poissons en rivière. L'utilisation de ces techniques a permis de révéler des patrons spatio-temporels d'utilisation de l'habitat, ainsi qu'une importante mobilité chez des espèces de poissons que l'on croyait autrefois sédentaires (e.g. Økland *et al.* 2004; Ovidio *et al.*, soumis).

En milieu fluvial, l'écoulement turbulent est la norme plutôt que l'exception. Dans le domaine de la recherche sur les invertébrés, la turbulence a depuis longtemps été reconnue comme une variable régissant la construction et le maintien des assemblages d'invertébrés. Des avancées technologiques importantes dans le domaine de la vélocimétrie ont permis ces dernières années de faire progresser les connaissances relatives à la dynamique de l'écoulement dans le micro-habitat des invertébrés. Récemment, la question de l'effet de la turbulence de l'écoulement sur les poissons a été soulevée. Sous l'angle de la bioénergétique, un micro-habitat optimal en est un qui minimise les dépenses énergétiques liées à la nage tout en maximisant les apports alimentaires. La turbulence pourrait représenter un désavantage pour les poissons, comme la turbulence peut engendrer une augmentation des coûts énergétiques liés à la nage. C'est ce qu'ont montré Enders *et al.* (2003) en observant des juvéniles du saumon Atlantique en utilisant une technique de respirométrie en laboratoire. De façon similaire, Pavlov *et al.* (2000) ont observé que la vitesse de nage soutenue des salmonidés diminue en fonction de l'intensité turbulente.

D'autres études se sont penchées sur la turbulence sous l'angle de l'utilisation de l'habitat et du comportement. Par exemple, il y aurait corrélation entre la proportion de temps allouée par les juvéniles pour s'alimenter et l'intensité turbulente (Enders *et al.*

2005). Par conséquent, il serait permis de croire que plusieurs types de poissons choisissent leurs micro-habitats en fonction de la turbulence. En effet, Smith *et al.* (2005, 2006) ont observé que les juvéniles de la truite arc-en-ciel (*Oncorhynchus mykiss*) optaient pour des micro-habitats où la turbulence était faible, et ce, à travers une gamme de vitesses moyennes. Lorsque ces poissons sélectionnaient des micro-habitats où la turbulence était forte, elle était accompagnée d'une vitesse moyenne élevée. Cependant, cette étude a été réalisée dans un chenal expérimental de 90 cm de largeur à l'aide de briques rectangulaires en guise d'éléments de rugosité, habitat qui ne présente que peu de similitudes avec le milieu naturel. Néanmoins, Cotel *et al.* (2006) ont obtenu des résultats similaires dans une rivière naturelle. Ils ont observé que la localisation des micro-habitats d'une autre espèce de salmonidés, les truites grises adultes (*Salmo trutta*), était reliée à l'intensité turbulente relative (ITR). Ils ont ainsi observé que les poissons dans la rivière occupaient des habitats où l'ITR était inférieure à celle mesurée dans les habitats similaires où il n'y avait pas de poissons. À notre connaissance, ces récentes études sont à ce jour les seules à s'être penchées sur la question de l'utilisation de l'habitat par les poissons en relation avec la turbulence en milieu naturel.

Comme les poissons sont mobiles et utilisent plusieurs types d'habitat en peu de temps, les études portant sur l'utilisation de l'habitat pourraient y gagner en adoptant une méthodologie qui permet de décrire les trajectoires des poissons dans le temps et de caractériser leur habitat de façon continue dans l'espace. La combinaison de la radio-téléométrie et de la caractérisation fine de l'habitat constitue une méthode permettant de superposer les déplacements des poissons sur une matrice de champs de vitesse et de turbulence à l'échelle du tronçon. De plus, comme la turbulence pourrait en partie expliquer la distribution en plaques (*patch*) de certaines composantes des écosystèmes fluviaux (algues, plantes, invertébrés, etc.) (Biggs *et al.* 2005) ainsi que l'utilisation de l'habitat de certains poissons (Cotel *et al.* 2006), connaître sa distribution spatiale à l'échelle du tronçon (adjacence, connectivité, hétérogénéité, etc.) est d'un grand intérêt pour les études écologiques (Bellehumeur et Legendre, 1998).

Or, encore peu de recherches ont à ce jour été effectuées sur la variabilité de la turbulence et sur les relations entre la turbulence et les autres variables physiques à l'échelle du tronçon. Autrefois, la turbulence était considérée *a priori* par les écologistes comme un phénomène régi localement par la rugosité du lit (Hart et Finelli, 1999). Si la

turbulence était un phénomène dont la variabilité était totalement contrôlée à une échelle locale, une caractérisation de la turbulence à l'échelle du tronçon avec les outils technologiques actuels serait très laborieuse, voire irréalisable. Néanmoins, les études dans les domaines de la géomorphologie fluviale et de l'hydraulique ont récemment montré que l'écoulement en rivière est dominé par des structures turbulentes à grande échelle (Roy *et al.* 2004). Ainsi, la distribution spatiale de l'écoulement à l'échelle du tronçon serait relativement peu influencée par la présence d'éléments de rugosité. Les propriétés turbulentes de l'écoulement seraient plutôt contrôlées par la profondeur induite par la morphologie du lit (Lamarre et Roy 2005; Legleiter *et al.* sous presse). Les auteurs de ces études avancent l'hypothèse qu'un nombre limité de mesures ponctuelles puisse être suffisant pour décrire adéquatement les patrons de turbulence à l'échelle du tronçon.

Avec les sondes actuellement disponibles sur le marché, la méthode appropriée pour caractériser la turbulence à l'échelle du tronçon dans une rivière à lit de gravier peu profonde (ex. habitat typique du saumon Atlantique) consiste à échantillonner systématiquement la vitesse de l'écoulement près du lit point par point sur toute la surface du tronçon. En raison de la nature et du fonctionnement des instruments, cette stratégie exige des efforts d'échantillonnage considérables sur le terrain. L'interpolation spatiale des mesures ponctuelles constitue donc un outil intéressant pour obtenir une couverture spatiale complète du tronçon, tout en optimisant les efforts d'échantillonnage.

Le but de notre étude est d'élaborer une stratégie d'échantillonnage de la turbulence à l'échelle du tronçon qui soit la plus efficace et facile à mettre en application dans le cadre d'études sur l'utilisation de l'habitat des salmonidés en rivière à lit de gravier. Les objectifs spécifiques sont 1) de déterminer quel algorithme d'interpolation offre la meilleure représentation de la variabilité de la turbulence à haute densité, 2) d'estimer la densité optimale de points nécessaires à la réalisation d'une interpolation précise à l'échelle du tronçon dans une variété d'environnements et 3) d'utiliser les géostatistiques pour quantifier la variabilité spatiale (latérale et longitudinale) des propriétés turbulentes à l'échelle du tronçon. Pour atteindre ces objectifs, quatre sections de rivières ont été échantillonnées à très haute résolution spatiale. De façon à tenir compte de la diversité des habitats dans ce type de rivière, deux seuils et deux mouilles présentant un gradient de complexité ont été caractérisés et comparés.

2.2 Méthodologie

2.2.1 Site d'étude

Entre août et septembre 2005, nous avons caractérisé quatre portions d'un segment de la rivière Eaton Nord, en Estrie, Québec, Canada. Ce site d'étude est localisé approximativement à 200 km à l'est de Montréal (Fig. 2.1). À l'étiage, la largeur de la rivière Eaton Nord varie entre 10 et 20 mètres. Dans ce segment de rivière, quatre 'unités morphologiques' ont été caractérisées, soit deux seuils et deux mouilles (Seuil 1, Seuil 2, Mouille 1 et Mouille 2; Fig. 2.2). L'appellation ultérieure de ces unités morpho-hydrauliques se fera ici sous le nom de 'section', bien qu'elles ne s'étendent pas sur toute la largeur du chenal.

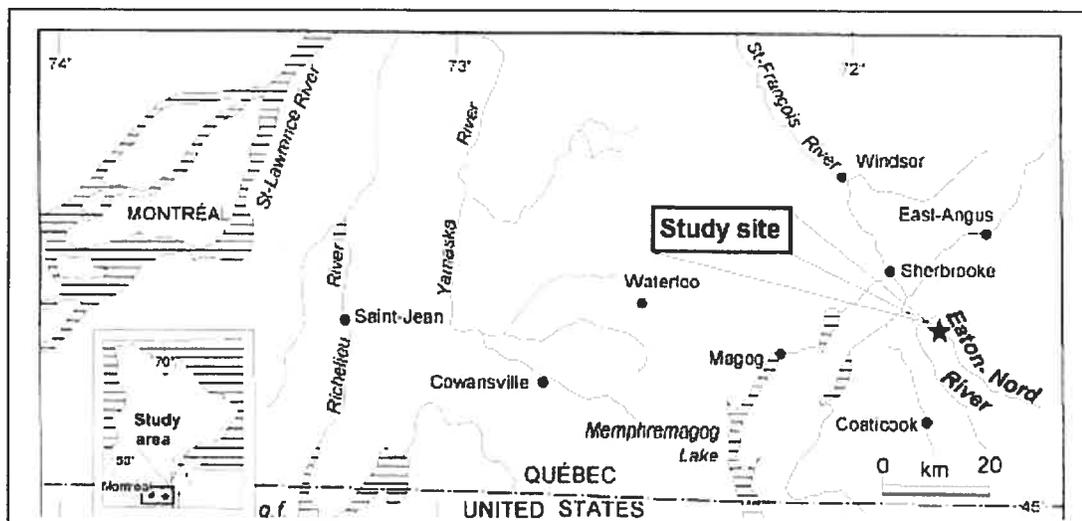


Figure 2.1 Localisation du site d'étude. Rivière Eaton Nord, Estrie, Québec, Canada. (Figure tirée de Buffin-Bélanger *et al.* 1998).

Les caractéristiques hydrauliques et morphologiques de chaque section ont été échantillonnées et cartographiées en détail. Les quatre sections présentent une gamme de caractéristiques morphologiques. Les Seuils 1 et 2 sont localisés dans une portion rectiligne de la section de rivière, en amont des Mouilles 1 et 2 (Fig. 2.3). La Mouille 1 se situe dans un bras de méandre alors que la Mouille 2, approximativement 150 mètres en aval, est une 'mouille de constriction' formée par la présence d'un affleurement de roche en place.

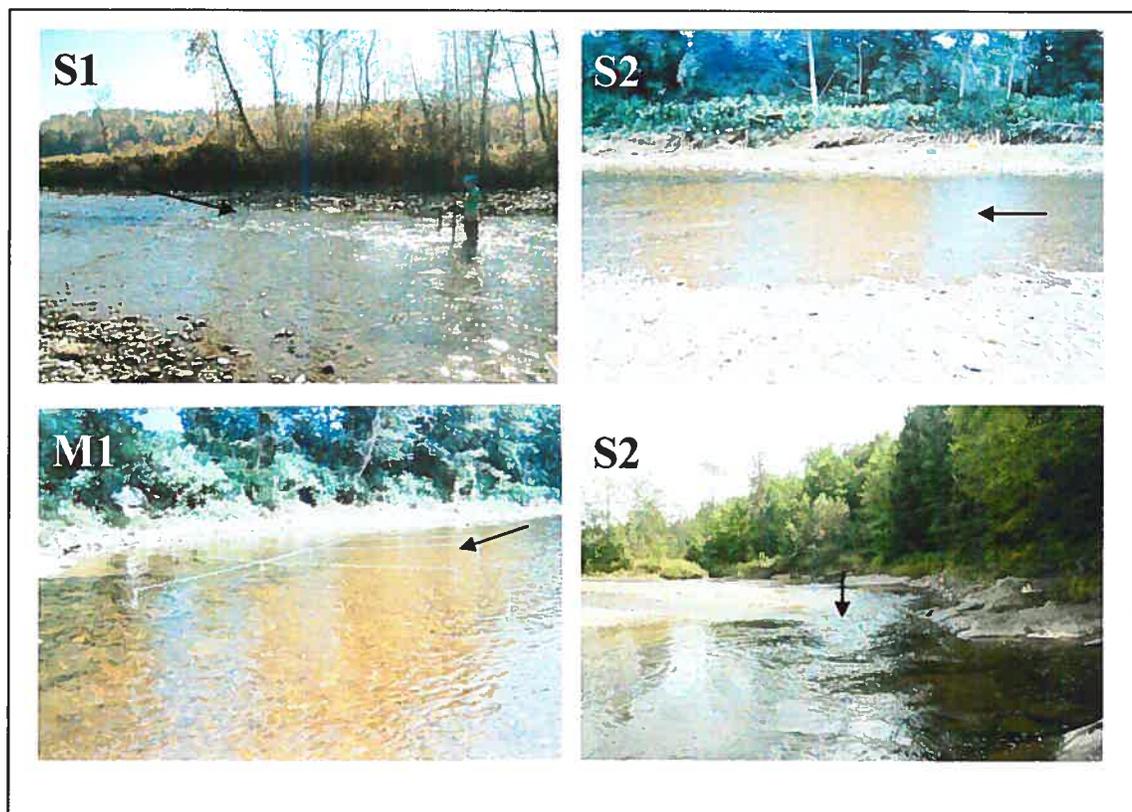
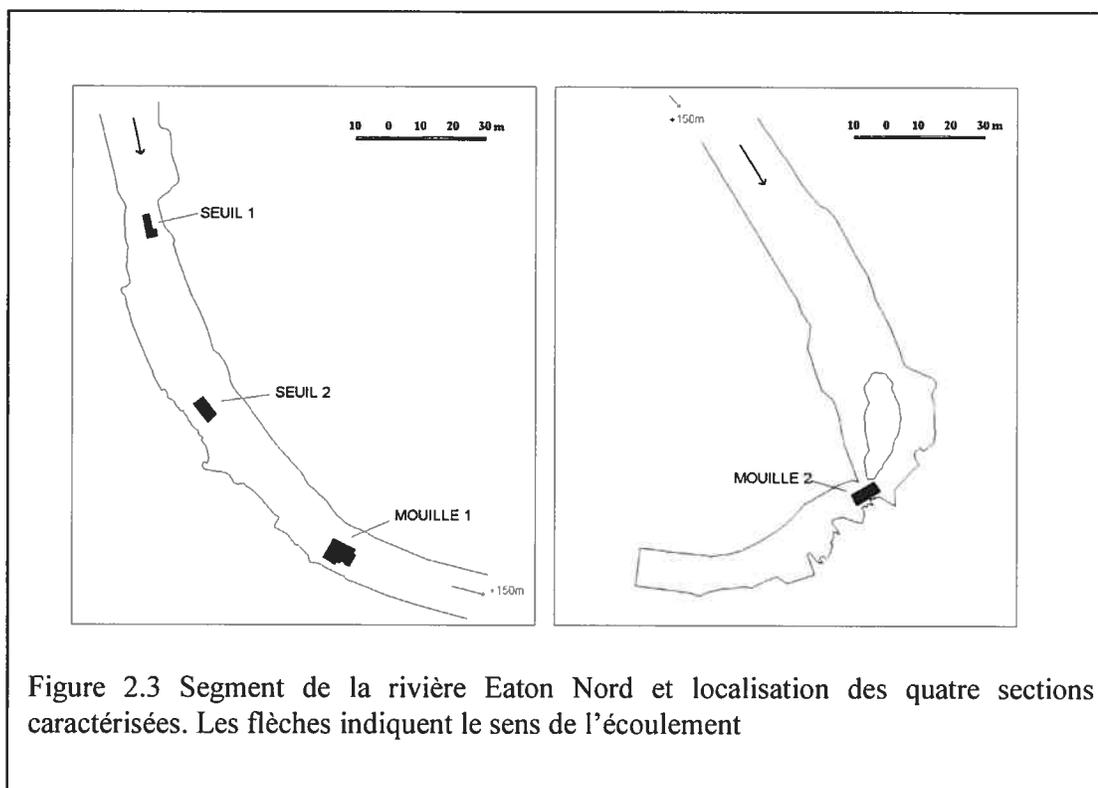


Figure 2.2 Quatre sections étudiées. S1: Seuil 1; S2: Seuil 2, M1: Mouille 1; M2: Mouille 2. Les flèches indiquent la direction de l'écoulement.



Les sections des deux seuils et de la Mouille 1 se localisent dans des zones de faibles gradients variant entre 0.2 et 1 % (Tab.2.1). À l'inverse, l'affleurement rocheux donnant naissance à la section de Mouille 2 engendre aussi la présence d'une pente beaucoup plus forte, de l'ordre de 4 %. Les sections couvrent entre 20 et 32 m² du lit. La taille des sédiments de surface a été échantillonnée selon la méthode de Wolman (1954), en mesurant la longueur de l'axe B (axe intermédiaire) de 200 à 600 particules par section. Les quatre sections présentent des distributions granulométriques hétérogènes, composées principalement d'un mélange de cailloux et de galets, mais aussi de quelques blocs (Fig. 2.4).

Contrairement à ce que l'on observe généralement, la taille des sédiments de surface dans les mouilles n'était pas inférieure à celle dans les seuils et la section de la Mouille 1 présente les sédiments les plus grossiers, avec des D₈₄ et D₉₅ supérieurs à ceux des seuils (Tab.2.1).

	Pente (%)	Superficie (m ²)	D ₅ (mm)	D ₁₆ (mm)	D ₅₀ (mm)	D ₈₄ (mm)	D ₉₅ (mm)	Tri σ
Seuil 1	0.2	20	12	25	55	100	180	1.09
Seuil 2	0.3	28	4	11	30	90	150	1.55
Mouille 1	0.5	32	4	10	28	130	210	1.79
Mouille 2	4	28	4	12	35	100	160	1.57

Tableau 2.1 Caractéristiques morphologiques de chaque section. La taille des particules est mesurée à partir de l'axe B (intermédiaire). Le tri $\sigma = ((\Psi_{84}-\Psi_{16})/4)+(\Psi_{95}-\Psi_5)/6.6$, où $\Psi = \log_2 D$ (mm)

Le Seuil 1 exhibe toutefois la taille médiane la plus grossière, avec un D₅₀ de 55 mm. À l'inverse, le Seuil 2 présente les sédiments les plus fins, et ce, pratiquement dans toutes les portions de la distribution.

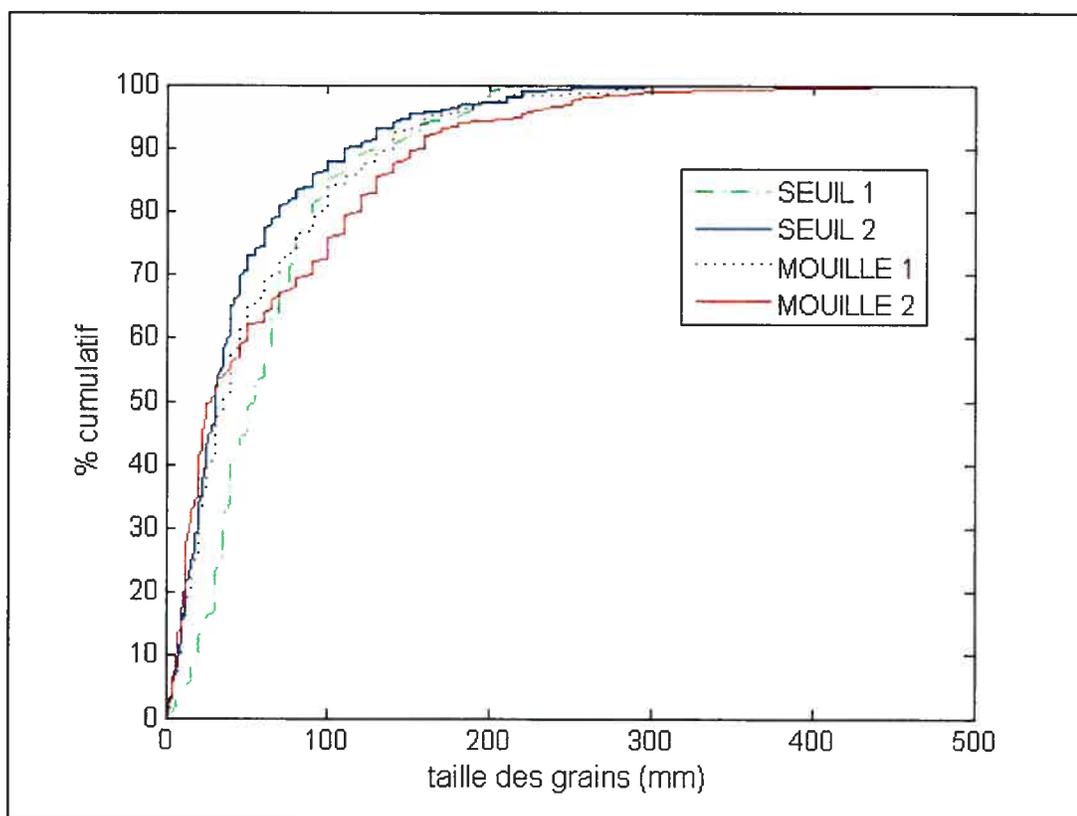


Figure 2.4. Courbes de fréquence cumulée de la distribution granulométrique de l'axe B (intermédiaire)

Dans le Seuil 2, les sédiments sont les mieux triés, avec un indice de tri de 1.09. La Mouille 1 montre la distribution la plus hétérogène, avec un tri de 1.79. Les deux seuils et la Mouille 2 présentent quand à eux des tris comparables.

Les quatre sites présentent une gamme de vitesses longitudinales moyennes (U) allant de 21 à 77 cm/s (Tab.2.2). La vitesse observée dans les seuils est jusqu'à trois fois plus élevée que celle des mouilles. Les mouilles sont proportionnellement plus hétérogènes que les seuils, avec des écarts-types de 10 et 14 cm/s. En contrepartie, les sections ne présentent pas une différence de profondeur marquée entre les seuils et les mouilles. En effet, la profondeur de la Mouille 1 est plus basse que celle des deux seuils, en raison d'un niveau d'eau inférieur lors de la prise de mesure. L'écart-type de la profondeur dans les mouilles est toutefois plus élevé que dans les seuils, ce qui illustre la grande étendue de profondeurs observées.

	S1	S2	M1	M2
Vitesse longitudinale moyenne (cm/s)	62 (15)	77 (7)	27 (10)	21 (14)
Profondeur (m)	0.38 (0.04)	0.44 (0.03)	0.37 (0.08)	0.56 (0.17)

Tableau 2.2 Moyennes et écarts-types (entre parenthèses) de la vitesse moyenne et de la profondeur de l'écoulement dans les quatre sections.

2.2.2 Acquisition des données

Dans chacune des sections, la vitesse en trois dimensions et la micro-topographie ont été échantillonnées et cartographiées en détail. L'échantillonnage de chacune des quatre sections a nécessité une période de trois à quatre jours de travail.

2.2.2.1 La mesure de la vitesse de l'écoulement

L'échantillonnage de la vitesse en plan de l'écoulement à l'échelle du tronçon requiert que le débit du cours d'eau demeure constant pendant la prise de mesure. Ainsi, nous avons utilisé une jauge à niveau d'eau électronique pour estimer le débit en construisant une courbe de tarage. Les mesures de vitesse ont été prises à un débit d'étiage variant entre 1.20 et 2.31 m³/s selon les sections (Fig. 2.5). Durant la période d'échantillonnage

de chaque section, le niveau d'eau, mesuré à toutes les heures, n'a jamais fluctué de plus de 3 cm.

Pour caractériser le champ de l'écoulement turbulent dans chaque section, nous avons utilisé deux vélocimètres acoustiques à effet Doppler (ADV). Ces sondes sont communément utilisées pour mesurer la turbulence de l'écoulement en rivière (Lane *et al.* 1998). Elles permettent d'échantillonner les trois composantes spatiales de la vitesse en mesurant le changement de fréquence d'une pulsation émise par rapport à sa fréquence de retour après réflexion sur des particules en suspension dans l'eau dans un volume d'échantillonnage de 0.25 cm^3 localisé à 10 cm en dessous de la sonde (Sontek, 2000) (Fig. 2.6).

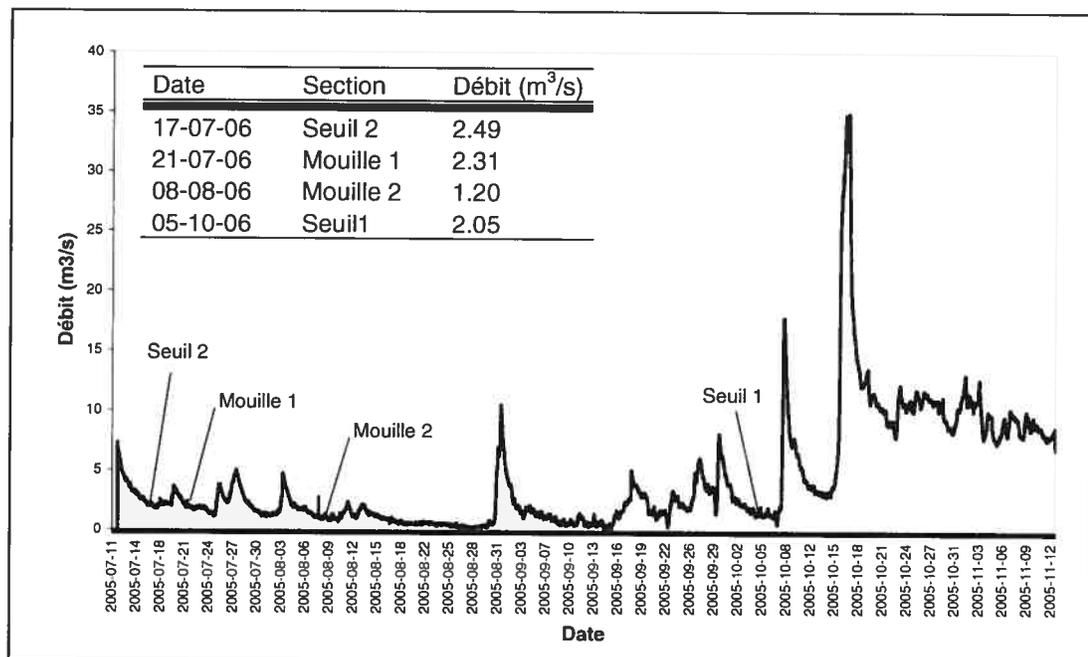


Figure 2.5 Dates des quatre périodes de prise de données et série des débits estimés (m^3/s) à l'aide d'une jauge à pression électronique et d'une courbe de tarage.

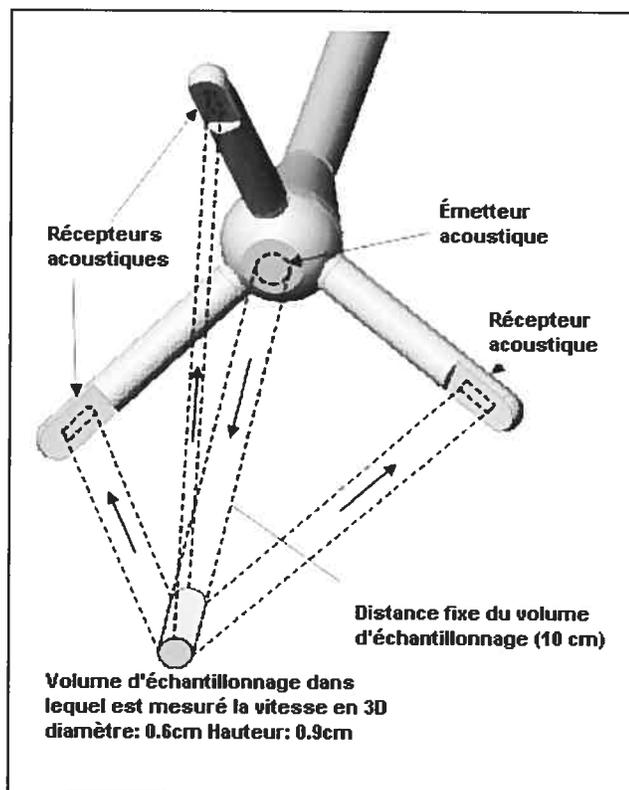


Figure 2.6 Fonctionnement d'un courantomètre à effet Doppler. La sonde mesure la vitesse en enregistrant la différence de fréquence de la pulsation émise par rapport à sa fréquence de retour après avoir réfléchi sur une particule en suspension. Les trois branches orthogonales de la sonde permettent de mesurer les composantes longitudinale, latérale et verticale de l'écoulement. (Sontek, 2006)

Nous avons fixé les ADV à des structures submersibles composées d'une tige d'acier de 2 m et d'un support métallique. L'équipe de travail était composée de deux opérateurs dont la tâche était de positionner les ADV et de les déplacer entre les mesures et d'une troisième personne localisée sur la berge dont le rôle était d'initialiser et d'arrêter l'enregistrement des séries de vitesses à l'aide d'ordinateurs portables, de s'assurer de la qualité des signaux en temps réel ainsi que d'enregistrer le positionnement de chaque mesure à l'aide d'une station totale tachéométrique (Leica- TC-805L (Fig. 2.7)). Les ordinateurs et les ADV ont été alimentés par un groupe électrogène situé à 50 mètres des instruments.

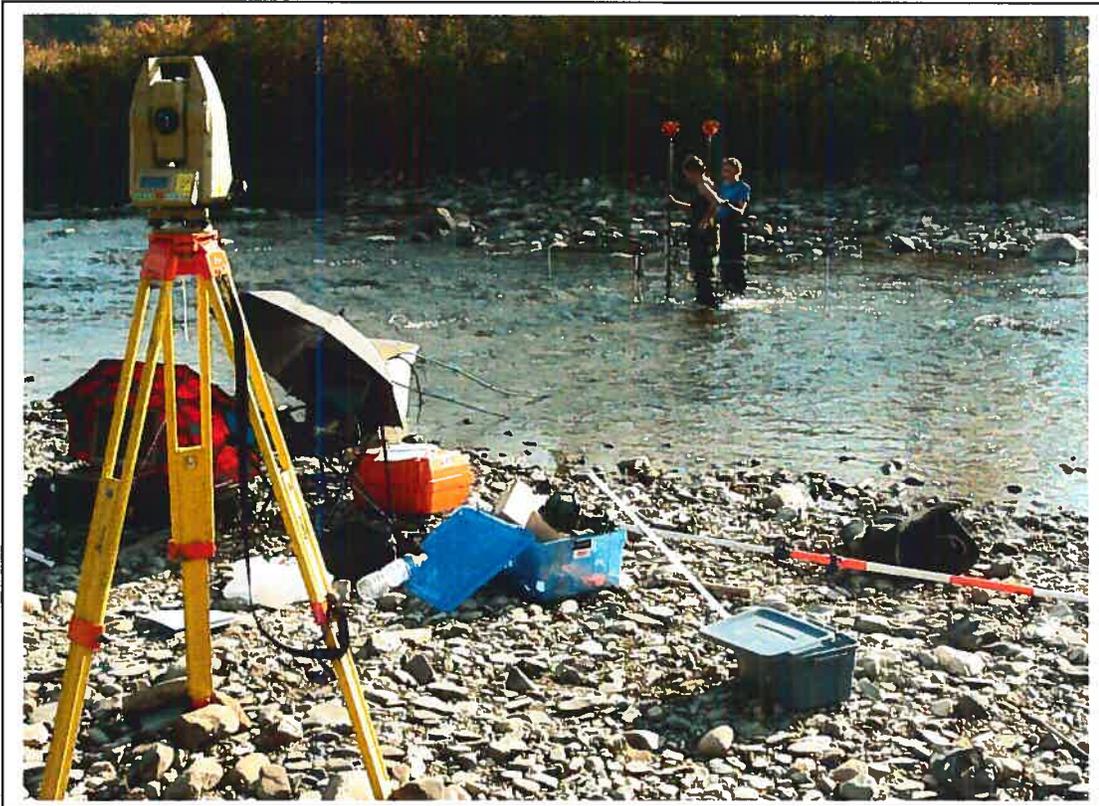


Figure 2.7 Stratégie d'échantillonnage utilisée : Deux opérateurs dans la rivière positionnent les sondes et une personne sur la berge enregistre, vérifie la qualité des signaux et localise la position des mesures à l'aide d'une station totale tachéométrique.

L'échantillonnage des séries de vitesses a été effectué à tous les 0.25 m selon une grille systématique (densité : 16 points/m²). De façon à s'assurer de suivre la grille, des fines tiges de métal et de la ficelle ont été utilisées comme marqueurs (Fig. 2.8). Les sections d'échantillonnage ont été orientées dans l'axe de l'écoulement primaire, de façon à toujours orienter les courantomètres dans un axe parallèle et d'établir un cadre de référence pour comparer les sections entre elles. Les quatre sections caractérisées n'ont pas la même superficie ni la même forme (Fig. 2.9). En conséquence, le nombre de points de mesure varie d'une section à l'autre. En raison de la très faible profondeur observée le long des berges rendant l'utilisation de l'ADV impossible, les sections ne s'étendent pas sur toute la largeur du chenal de façon à constituer des tronçons complets. Comme l'ADV mesure la vitesse dans un volume d'échantillonnage localisé 10 cm en dessous de la sonde, nous avons jugé qu'une tranche d'un minimum de 15 cm de profondeur était requise pour effectuer l'échantillonnage.

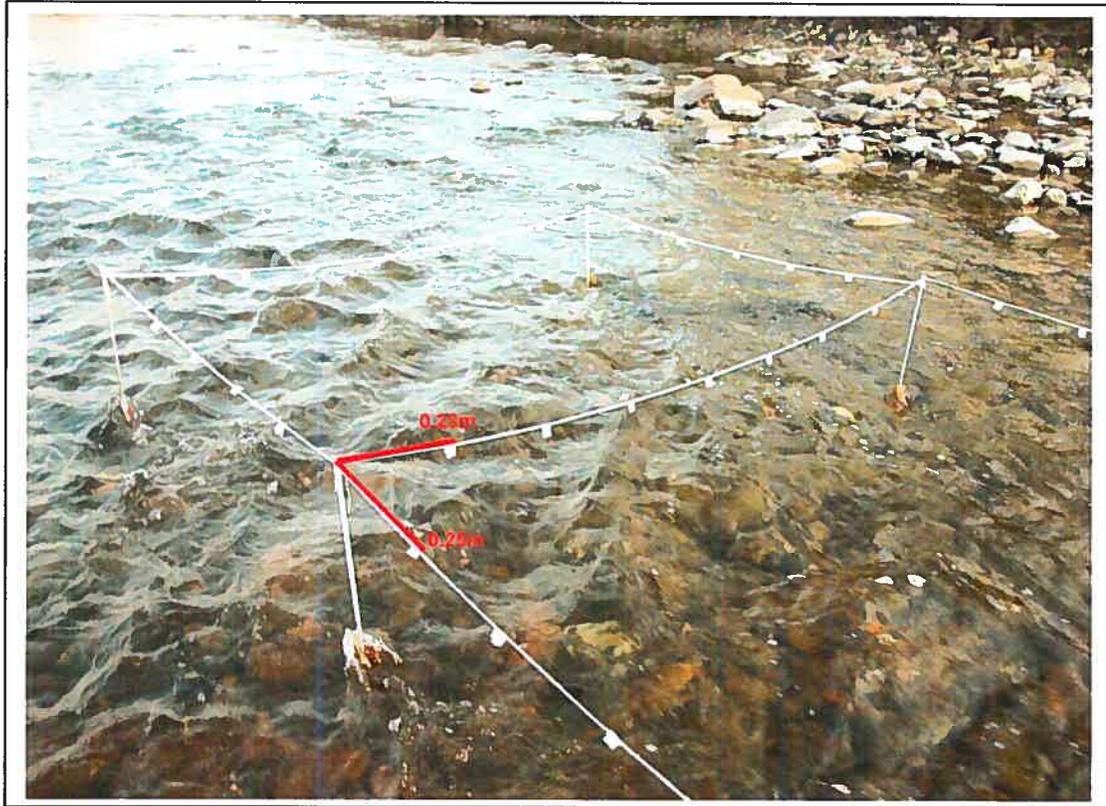


Figure 2.8 Exemple de repères utilisés comme grille d'échantillonnage systématique.

À l'étiage, cette hauteur minimale n'était atteinte que dans la portion centrale du chenal, portion qui couvrait dans tous les cas moins de la moitié du périmètre mouillé. De plus, entre 1 et 8% des points des grilles d'échantillonnage n'ont pu être échantillonnés en raison de la présence de trop gros blocs ou de roche en place rendant la profondeur insuffisante pour y déployer l'ADV.

Au total, 2064 séries de vitesses ont été échantillonnées à 10 cm au dessus du lit (Tab.2.3). Cette hauteur au dessus du lit a été choisie en raison de la nécessité d'opérer rapidement de façon à obtenir un grand nombre d'échantillons de bonne qualité dans un temps limité et à un débit constant.



Figure 2.9 Grilles d'échantillonnage des quatre sections de la rivière Eaton Nord.

	Superficie (m ²)	Nombre de mesures	(%) Mesures manquantes
Seuil 1	18	290	1
Seuil 2	28	448	3
Mouille 1	54	832	5
Mouille 2	30	494	8

Tableau 2.3 Caractéristiques de l'échantillonnage des séries de vitesse. Les données manquantes sont causées par des séries de vitesse rejetées pour leur trop basse qualité ou des trous dans la grille d'échantillonnage causés par une trop faible profondeur.

En effet, de multiples séances d'essais nous ont montré que mesurer plus près du lit requiert une longue période d'ajustement de l'appareil avant chaque mesure. Les séries de vitesses ont été enregistrées à une fréquence de 25Hz pendant 80s (2000 enregistrements). Cette fréquence et durée dépassent les standards de qualité optimaux suggérés par Buffin-Bélanger et Roy (2005) pour l'enregistrement de signaux turbulents avec un ADV.

Un des défis de l'application de cette méthodologie est de faire concorder les coordonnées spatiales de chaque échantillon à la série de vitesse appropriée. Pour ce faire, il est important d'utiliser un système de codification rigoureux de façon à pouvoir associer *a posteriori* les données spatiales obtenues à l'aide de la station totale aux mesures de vitesses échantillonnées avec l'ADV.

L'acquisition de données en milieu naturel à l'aide d'un ADV nécessite une phase de validation rigoureuse (Nikora et Goring, 1998; Lane *et al.* 1998; McLelland et Nicholas, 2000). D'abord, chacune des séries de vitesse et les séries temporelles des indicateurs de qualité, soit la corrélation et le rapport signal à bruit (SNR), ont été inspectées visuellement afin de détecter les anomalies évidentes dans les signaux. Dans ce contexte, la 'corrélation' du signal de l'ADV représente la 'distance spectrale' entre deux estimés de vitesse calculés à l'aide de deux paires de pulsations (voir Lane *et al.* 1998). La baisse de corrélation peut être due à la réflexion du signal dans l'arrangement complexe des particules du lit ou à la faible quantité de particules en suspension dans l'eau nécessaire au retour du signal émis. Comme la qualité des données a été contrôlée durant l'enregistrement sur le terrain, de façon générale peu de séries ont présenté des défauts, les anomalies les plus fréquentes étaient dues à la dérive de feuilles mortes sur les sondes. Lorsque ce problème a été identifié, la durée des séries a été allongée et la portion défectueuse du signal a pu être coupée par la suite, tout en conservant la longueur prescrite de 2000 enregistrements (80s). Les séries où la corrélation moyenne était inférieure à 70% ou dont le rapport signal à bruit moyen était inférieur à 15% ont été rejetées et n'ont pas été utilisées dans les analyses subséquentes. Le nombre de mesures rejetées varie entre 1 et 2%, selon les sections.

De façon similaire, les séries comportant des 'pics' ont été corrigées en utilisant un filtre élaboré par Goring et Nikora (2002) opérant dans l'espace de phase permettant de résoudre les ambiguïtés du signal. Les pics, ou valeurs extrêmes dans les séries de vitesse, se produisent quand une vitesse instantanée dépasse l'étendue dynamique de l'ADV, résultant en une vitesse très élevée suivie d'une vitesse très lente. Le filtre de Goring et Nikora (2002) a permis de supprimer les valeurs extrêmes et de les remplacer par une valeur interpolée à partir de l'estimé de vitesse suivant. Afin d'uniformiser la qualité des données, nous avons exclu les séries dont plus de 10% des données dans une

des trois composantes de la vitesse avaient été modifiées par l'algorithme. Moins de 1% des mesures ont été éliminées de cette façon.

L'utilisation de la technologie Doppler entraîne aussi en conséquence un bruit de haute fréquence dans les signaux, le bruit Doppler (Nikora et Goring, 1998). Afin d'atténuer ce bruit, nous avons filtré la totalité des signaux à l'aide d'un filtre passe-bas (Butterworth, 3^e degré), tel que recommandé par Lane *et al.* (1998). De façon générale, les signaux défectueux ont été causés par la dérive de matière en suspension, par la présence de bulles d'air (Rodriguez *et al.* 1999), par la réflexion du signal par un lit à configuration complexe ou par un fort cisaillement dans le volume d'échantillonnage (Finelli *et al.* 1999). Comme suggéré par Roy *et al.* (1996), nous n'avons pas appliqué de rotation sur les données.

2.2.2.2 La micro-topographie

La micro-topographie des sections a été caractérisée à l'aide d'une station totale tachéométrique laser en utilisant une stratégie d'échantillonnage recommandée par Lamarre (2006). L'échantillonnage a été effectué en combinant une approche systématique à une approche par rupture de pente. Plus spécifiquement, la topographie a été échantillonnée d'une part par transects étroitement espacés. D'autre part, les particules et les groupes de particules dont la hauteur dépassait 15 cm au dessus du lit ont été échantillonnés séparément en enregistrant les points de rupture de pente.

2.2.3 Les variables de l'écoulement

2.2.3.1 Vitesse moyenne et turbulence

À partir de chaque série de vitesses échantillonnée pour 80 s, nous avons estimé trois variables hydrauliques pour les trois dimensions de l'écoulement : la vitesse moyenne (U , V , W), représentée par la moyenne temporelle, l'intensité turbulente, représentée par la valeur quadratique moyenne (RMS_U , RMS_V , RMS_W) et l'intensité turbulente relative représentée par le rapport entre l'intensité turbulente et la vitesse moyenne de la composante longitudinale en pourcentage (ITR_U , ITR_V , ITR_W).

Deux variables combinant les fluctuations de vitesse dans plus d'une dimension ont aussi été calculées, soit le cisaillement de Reynolds moyen (τ_R) et l'énergie cinétique turbulente (TKE), estimées respectivement par

$$\tau_R = -\rho \langle u'w' \rangle \quad (2.1)$$

$$TKE = 0.5\rho(RMS_U^2 + RMS_V^2 + RMS_W^2) \quad (2.2)$$

où ρ représente la densité de l'eau (kg m^{-3}), τ_R mesure l'intensité des échanges de momentum dans le fluide dans le plan XZ de l'écoulement et TKE est la seule variable tenant compte des trois dimensions de l'écoulement.

2.2.3.2 Profondeur de l'écoulement et rugosité du lit

À partir des relevés topographiques obtenus à l'aide d'une station totale, des modèles numériques d'élévation ont été dérivés pour chaque section par le biais d'un algorithme d'interpolation par réseau de triangles irréguliers (TIN) à une résolution de 0.05 m. Selon Lamarre (2006), la stratégie d'échantillonnage combinant une approche systématique et par rupture de pente ainsi qu'un algorithme d'interpolation par TIN procurent les modèles numériques d'élévation les plus représentatifs d'une micro-topographie comportant des éléments de rugosité comme des blocs isolés et des amas de galets.

À partir des modèles numériques d'élévation, nous avons dérivé deux variables fondamentales dans les études écologiques : la profondeur de l'écoulement et la rugosité du lit. Pour chaque section, la profondeur a été calculée en soustrayant la hauteur moyenne du niveau d'eau dans la section à toutes les valeurs du modèle numérique d'élévation. De façon similaire, pour caractériser la rugosité du lit, nous avons développé un indice à partir des modèles numériques d'élévation. Cet indice de rugosité est basé sur l'écart-type des valeurs d'élévation contenues dans une fenêtre mobile de 0.65 m par 0.65 m. Ainsi, une valeur a été attribuée au point central de la fenêtre pour chaque position. Ce type d'index présente l'avantage d'être plus représentatif de la rugosité réelle que la méthode traditionnelle d'estimation de la rugosité basée sur la taille

individuelle des grains. En effet, cet indice tient compte de l'imbrication des particules et il permet d'obtenir une couverture spatiale à haute résolution sur l'ensemble d'une surface, plutôt qu'une valeur moyenne pour la section (voir Nikora *et al.* (1998) pour une discussion sur la mesure de la rugosité du lit).

2.2.4 Analyse des données

2.2.4.1 Modèles d'interpolation

Le premier objectif de cette étude était de déterminer parmi les algorithmes d'interpolation les plus répandus et facilement utilisables lequel représente le plus fidèlement la distribution spatiale de la vitesse moyenne et de la turbulence. Tous les modèles d'interpolation utilisent une grille pour estimer la distribution spatiale d'une variable entre les mesures effectuées. Néanmoins, certains modèles d'interpolation sont plus adaptés à certains types de données que d'autres. En effet, l'interpolation linéaire par réseau de triangles irréguliers et l'interpolation par voisinage naturel se prêtent bien aux données topographiques, alors que les propriétés chimiques des sols sont généralement mieux représentées à l'aide d'une interpolation par la distance inverse pondérée ou par le krigeage. Nous avons donc testé la performance de cinq modèles pour interpoler la vitesse moyenne et la turbulence: la distance inverse pondérée (IDW), le voisinage naturel avec lissage linéaire (NN-L), le réseau de triangles irréguliers avec une interpolation linéaire (TIN-L), le réseau de triangle irréguliers interpolation cubique (TIN-C) et le krigeage. Pour chaque méthode d'interpolation, les données ont été interpolées sur une grille composée de cellules carrées de 0.05 par 0.05 m.

Le modèle d'interpolation (IDW) est fondé sur l'application d'une fenêtre mobile de forme circulaire. Chaque valeur a été déterminée en faisant la moyenne de l'ensemble des valeurs localisées dans un rayon de recherche de 0.30 m. Les points se situant progressivement plus loin du point central influencent la valeur estimée de façon beaucoup moins importante que les points localisés plus près du centre. Ce type d'interpolation s'applique généralement à des données très variables spatialement.

L'interpolation (NN) se base sur le partitionnement de l'espace selon une grille de polygones de Thiessen (Sibson, 1981). Pour chaque valeur de la matrice d'interpolation,

un polygone 'temporaire' est tracé et superposé sur le réseau de polygones initial. La valeur de chaque cellule est définie par la moyenne pondérée par l'aire des polygones intersectés par le polygone 'temporaire'.

Le réseau de triangles irréguliers (TIN) implique un partitionnement de l'espace beaucoup plus simple que NN. Cet algorithme est souvent simplement appelé 'interpolation linéaire'. Ce modèle d'interpolation utilise un réseau de triangles de Delaunay comme grille. Chaque cellule S_0 est reliée aux trois sommets d'un triangle à l'intérieur duquel cette cellule est localisée, formant ainsi trois triangles plus petits. L'interpolation est effectuée en faisant la moyenne des trois triangles, pondérée par leur taille respective. Cette méthode de triangulation est jumelée à l'interpolation linéaire (TIN-L). Cependant, la même méthode peut aussi être utilisée pour effectuer une interpolation cubique (TIN-L). Ces méthodes sont jugées efficaces en présence de bris de pente importants.

Contrairement aux modèles d'interpolation précédents, le krigeage prend en considération la structure de dépendance spatiale des données (Matheron, 1962; 1963). Le krigeage se base sur l'analyse du semivariogramme et se définit comme une 'méthode d'estimation linéaire optimale et 'non-biaisée' de variables régionalisées (Trangmar *et al.*, 1985). Le krigeage fonctionne à partir d'une moyenne mobile, de façon similaire à IDW. Chaque estimé est basé sur une estimation locale d'une moyenne pondérée des valeurs observées dans le voisinage. Nous avons ici utilisé le krigeage de type 'ordinaire'. Ce type de krigeage assume que la variance est stationnaire et que la moyenne est non-stationnaire à l'intérieur du rayon de recherche. Le krigeage est très fréquemment utilisé avec toute une gamme de types de données. Il est souvent le type d'interpolation le plus efficace pour obtenir des estimés avec peu de données et lorsqu'un niveau de précision très élevé n'est pas requis (Pour plus de détails sur le krigeage, voir Wackernagel, 2003).

Parmi ces quatre types de modèles, NN et TIN sont plus 'précis' que IDW et le krigeage, puisqu'ils conservent les valeurs originales des échantillons mesurés dans la grille interpolée. En contrepartie, IDW et le krigeage estiment des valeurs davantage représentatives d'une zone. Par ailleurs, le temps requis pour l'interpolation n'est pas un

enjeu dans le choix d'un modèle d'interpolation, en raison de la quantité d'échantillons relativement limitée et de la puissance des outils informatiques disponibles.

Pour tester la précision des modèles d'interpolation, nous avons utilisé une technique de rééchantillonnage aléatoire. D'abord, dans chaque section, 10% des échantillons ont été aléatoirement sélectionnés, puis soustraits du jeu de données original (Fig. 2.10). Ensuite, nous avons interpolé les données résiduelles (90% du jeu de données total) et avons échantillonné la valeur prédite par le modèle d'interpolation à l'endroit où la mesure avait été soustraite. Ainsi, nous avons pu comparer les valeurs prédites aux valeurs mesurées et estimer trois indices d'erreur : différence absolue moyenne ($| \text{Valeur estimée} - \text{valeur mesurée} |$), l'écart-type de ces différences et l'erreur moyenne relative (%), soit le ratio de la moyenne des différences absolues sur la valeur mesurée. À partir de l'analyse des erreurs, un algorithme d'interpolation a été sélectionné pour procéder à l'étape suivante.

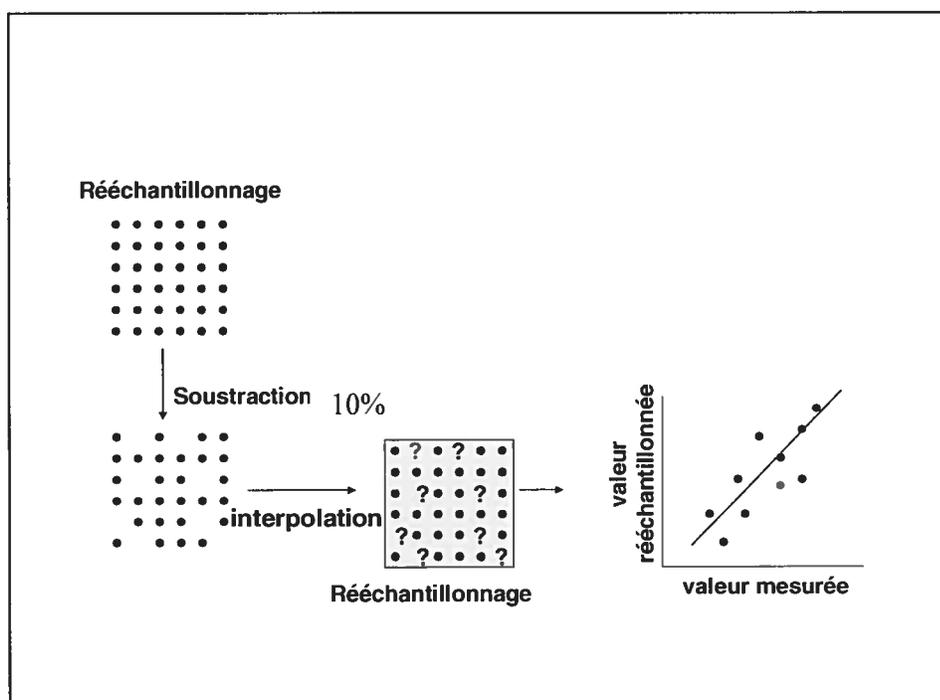


Figure 2.10 Technique de rééchantillonnage. 10% des points d'une section sont soustraits. Ensuite les données sont interpolées. Puis, les valeurs obtenues par le modèle à l'endroit où les points ont été soustraits sont comparées aux valeurs réelles.

2.2.4.2 Densité d'échantillonnage

Le second objectif de cette recherche consiste à estimer l'influence de la taille de l'échantillon sur la précision de l'interpolation, de façon à déterminer le nombre de mesures qui représente le meilleur compromis entre la précision de l'interpolation et les efforts d'échantillonnage sur le terrain. Pour y arriver, nous avons utilisé la technique décrite précédemment (Fig 2.10), qui consiste à sélectionner aléatoirement un sous-échantillon et à le retrancher du jeu de données, puis, à interpoler les mesures ponctuelles et à comparer les valeurs estimées là où les échantillons ont été retranchés avec les valeurs mesurées. Trois indices d'erreur ont été utilisés pour estimer la performance de l'interpolation : la différence absolue, l'erreur relative et le coefficient de corrélation. L'erreur relative ne représente pas ici la moyenne des erreurs relatives de chaque mesure, ce type d'erreur aurait été gonflé par la présence de valeurs près de zéro au dénominateur. Nous avons plutôt divisé la moyenne des différences absolues par la valeur absolue de la moyenne du tronçon. Le troisième indice d'erreur est le coefficient de corrélation entre les valeurs estimées par le modèle et les valeurs mesurées. En faisant varier progressivement la taille des sous-échantillons retranchés et en estimant les erreurs d'échantillonnage, on obtient la relation entre la densité d'échantillonnage et la précision de l'échantillon. Ainsi, nous avons calculé les erreurs pour chaque tranche de 5 % de la densité jusqu'à 95 % de la densité (15.2 points/m²). Nous avons itéré cette opération 30 fois et estimé la moyenne et l'écart-type des trois indices d'erreur. Les points du pourtour des sections n'ont pas été retranchés dans des sous-échantillons test, de façon à maintenir la forme et la superficie de l'interpolation intacte. Il est attendu que la précision de l'interpolation augmente en fonction de la densité d'échantillonnage. À l'aide de ces courbes, des valeurs critiques optimales d'échantillonnage seront estimées visuellement à partir des ruptures de pente de la courbe. Ces valeurs critiques représenteront le compromis minimisant les efforts d'échantillonnage et maximisant la précision.

2.2.4.3 Géostatistiques

Le troisième objectif consistait à utiliser les géostatistiques pour examiner la structure spatiale de la vitesse et de la turbulence dans les sections. Plus précisément, nous avons visé à quantifier la persistance d'un patron spatial organisé pour chaque variable en fonction des unités morphologiques, soit deux seuils et deux mouilles. Nous avons

utilisé des semivariogrammes directionnels longitudinaux et transversaux pour quantifier la variabilité spatiale de la vitesse et de la turbulence dans les sections, soit selon

$$\gamma(h) = 1/2N \sum_{\alpha=1}^{N(h)} [z(s_{\alpha}) - z(s_{\alpha} + h)]^2 \quad (2.3)$$

où h représente le ‘pas’ qui sépare les paires d’observations de la variable z aux coordonnées indiquées par s_{α} et $s_{\alpha}+h$ et $N(h)$ est le nombre de paires dont la distance les séparant est comprise dans l’étendue de distance et d’angle spécifié (Goovaerts, 1997). En appliquant l’équation (2.3) à plusieurs pas, nous avons créé des semivariogrammes expérimentaux décrivant la persistance d’un patron en fonction de la distance. Des faibles valeurs de $\gamma(h)$ pour un h donné indiquent une autocorrélation spatiale importante. Les semivariogrammes directionnels sont obtenus en diminuant l’angle de tolérance et en spécifiant une largeur de bande maximale au secteur de recherche (voir Deutsch et Journel, 1998). Dans notre étude, nous avons utilisé une méthodologie d’analyse similaire à Legleiter *et al.* (sous presse). Nous avons appliqué une rotation aux coordonnées des quatre sections de façon à orienter facilement les semivariogrammes dans les directions longitudinal (l) et transversal (t). Les paramètres utilisés pour construire les semivariogrammes sont présentés au tableau 2.4.

Direction	Longitudinal (l)	Transversal (t)
Pas de départ	0	0
Pas d’incrément (m)	0.25	0.25
Pas maximum (m)	8	S1:4 S2:4 M1:8 M2:5
Azimut (degrés)	90	0
Tolérance de l’azimut	15	15

Tableau 2.4 Paramètres des semivariogrammes directionnels

Les semivariogrammes peuvent être décrits par trois propriétés, soit la constante de pépité, le palier et la portée (Fig. 2.11; Wackernagel, 2003). La constante de pépité représente la valeur de $\gamma(h)$ pour laquelle $h=0$. Elle illustre la combinaison de l’erreur d’échantillonnage et la portion de la variance qui existe à un intervalle inférieur à la distance d’échantillonnage, 0.25 m dans le cas présent. Le palier, parfois absent, se présente comme un plateau, où la valeur de $\gamma(h)$ demeure constante en augmentant la distance (h).

Lorsque les variables présentent une autocorrélation spatiale, le semivariogramme suivra une tendance positive dans sa phase initiale et atteindra ensuite le palier. La valeur de h où le palier débute s'appelle la portée. C'est la distance à laquelle on considère qu'il n'y a plus d'autocorrélation spatiale entre les points. La portée est parfois utilisée pour déterminer l'intervalle d'échantillonnage minimal, comme les mesures échantillonnées au-delà de cette distance sont spatialement indépendantes. Parfois, il n'y a pas de palier et la semivariance est constante en fonction de la distance. Dans ces cas, il y a effet de pépité. Cela peut impliquer que la densité d'échantillonnage est insuffisante pour capter la variabilité spatiale du phénomène et qu'il n'y a pas de corrélation spatiale entre les points.

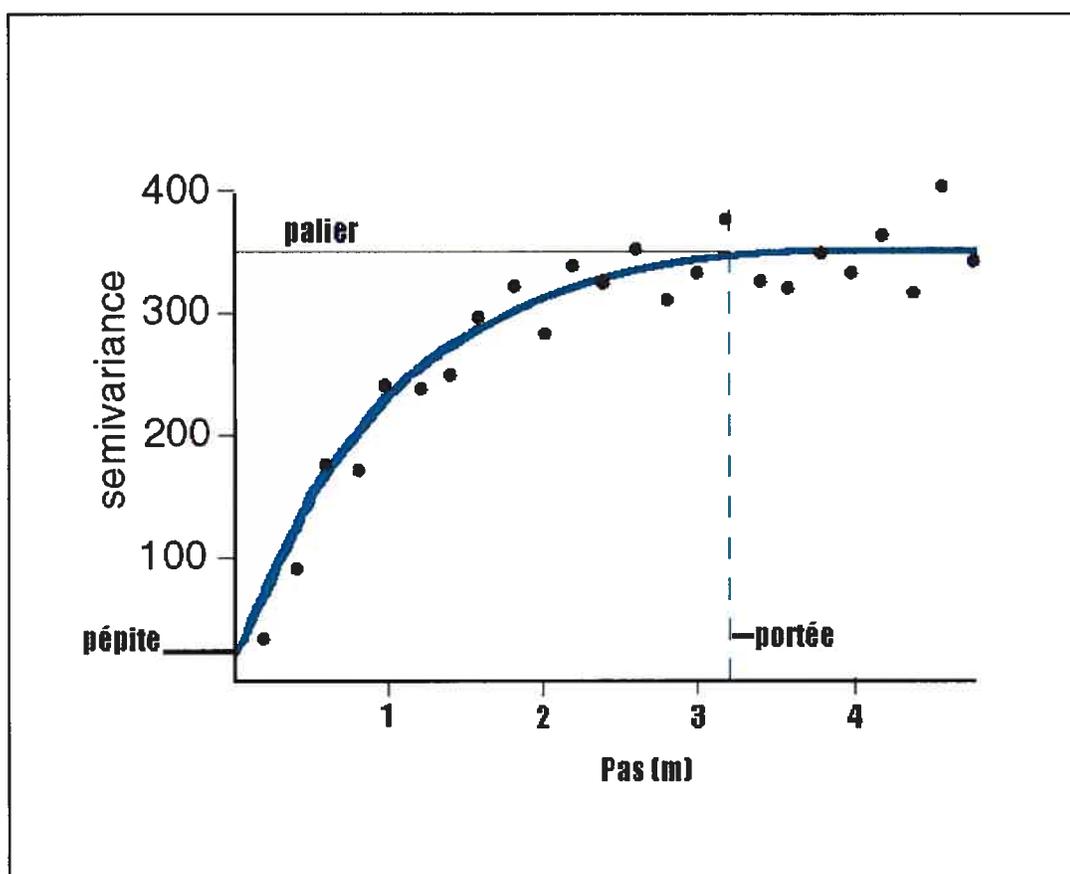


Figure 2.11. Exemple de semivariogramme expérimental. La courbe représente un modèle paramétrique asymptotique appliqué aux données expérimentales. Le pas est de 0.25 m. Dans cet exemple, la présence d'une pépité, d'un palier et d'une portée souligne l'autocorrélation spatiale des données.

Afin de déterminer ces paramètres, nous avons appliqué des modèles de covariance paramétriques aux semivariogrammes expérimentaux. Pour ce faire, nous avons utilisé un programme exécutable en *Matlab* développé par Lafleur et Graton (1998; INRS-Océanographie). Pour chacune des variables, pour chaque section et pour chaque direction (l et t), nous avons testé quatre modèles et conservé celui offrant le meilleur modèle de prédiction. Dans la présente étude, nous avons sélectionné quatre modèles de covariance, tel que suggéré par Legleiter *et al* (sous presse), soit le modèle d'effet de pépité (Eq.2.4), le modèle exponentiel (Eq.2.5), le modèle sphérique (Eq.2.6) et le modèle gaussien (Eq.2.7) :

$$C_{mg}(h) = 0 \text{ quand } |h| = 0 \quad 2.4$$

$$C_{mg}(h) = b \text{ quand } |h| > 0$$

$$C_{exp}(h) = b \exp(-3|h|/a) \quad 2.5$$

$$C_{spher}(h) = c(3h/2a - h^3/2a^3) \quad 2.6$$

$$h < a; C(h) = c; h \geq a$$

$$C_{Gauss}(h) = b \exp(-3|h|^2/a) \quad 2.7$$

où b représente le palier, a représente la portée et h le pas d'échantillonnage. Comme les modèles exponentiels et gaussiens sont asymptotiques, ils tendent à l'infini vers le palier. Par conséquent, nous considérons la portée à une distance où $b = 95\%$ du palier Wackernagel (2003). L'ensemble de ces outils statistiques et méthodes seront déployés afin de décrire les sections et comprendre la structure spatiale des variables hydrauliques.

3.0 Résultats

3.1 Description des sections

Nous présentons maintenant les cartes montrant la distribution spatiale des variables dans chacune des sections. Afin de construire les cartes, nous avons appliqué un algorithme d'interpolation linéaire à la distribution des valeurs ponctuelles de chacune des variables. L'interpolation a été effectuée sur une grille de cellules carrées de 0.05 m de côté. Puis, les distributions de fréquence de chaque variable ont été estimées à partir des matrices interpolées (Fig. 3.1 à 3.14). Nous décrivons d'abord les caractéristiques saillantes des sections pour ensuite répondre aux objectifs spécifiques de cette recherche.

3.1.1 Profondeur de l'écoulement

Toutes les sections présentent une faible profondeur ($Y < 1$ m) et une distribution symétrique des profondeurs (Fig. 3.1). La Mouille 1 et le Seuil 1 exhibent les profondeurs moyennes les plus basses avec 0.37 et 0.38 m respectivement.

Si la Mouille 1 présente une profondeur moyenne plus faible que celle des deux seuils, c'est en raison du niveau d'eau qui y était légèrement moins élevé lors de la prise des données (Fig. 2.5). C'est aussi parce que la Mouille 1 est asymétrique et comprend une portion peu profonde sur sa rive gauche (par rapport au sens de l'écoulement). Comme on pouvait s'y attendre, les deux seuils sont beaucoup plus homogènes que les mouilles, avec des écart-types de profondeur de 0.03 et 0.04 m. La Mouille 2 est la section la plus profonde et la plus hétérogène, avec un écart-type de 0.17 m.

3.1.2 La rugosité du lit

La rugosité (k) des quatre sections présente une distribution de fréquence fortement asymétrique vers la gauche (Fig. 3.2). Les mouilles sont plus rugueuses que les seuils et sont plus hétérogènes. L'hétérogénéité de la rugosité des mouilles est partiellement due à l'asymétrie de la bathymétrie des sections. Le Seuil 2 est la section la plus homogène et la moins rugueuse des sections, avec un indice de rugosité moyen de 0.019 m et un écart-type de 0.009 m. C'est aussi dans cette section qu'on a observé le substrat de plus

petite taille ($D_{84}=90$ mm). Par contre, le Seuil 1 présente un D_{84} équivalent à celui de la Mouille 2, mais un indice de rugosité largement inférieur. Cette observation s'explique en partie par une meilleure imbrication des particules dans les seuils que dans les mouilles.

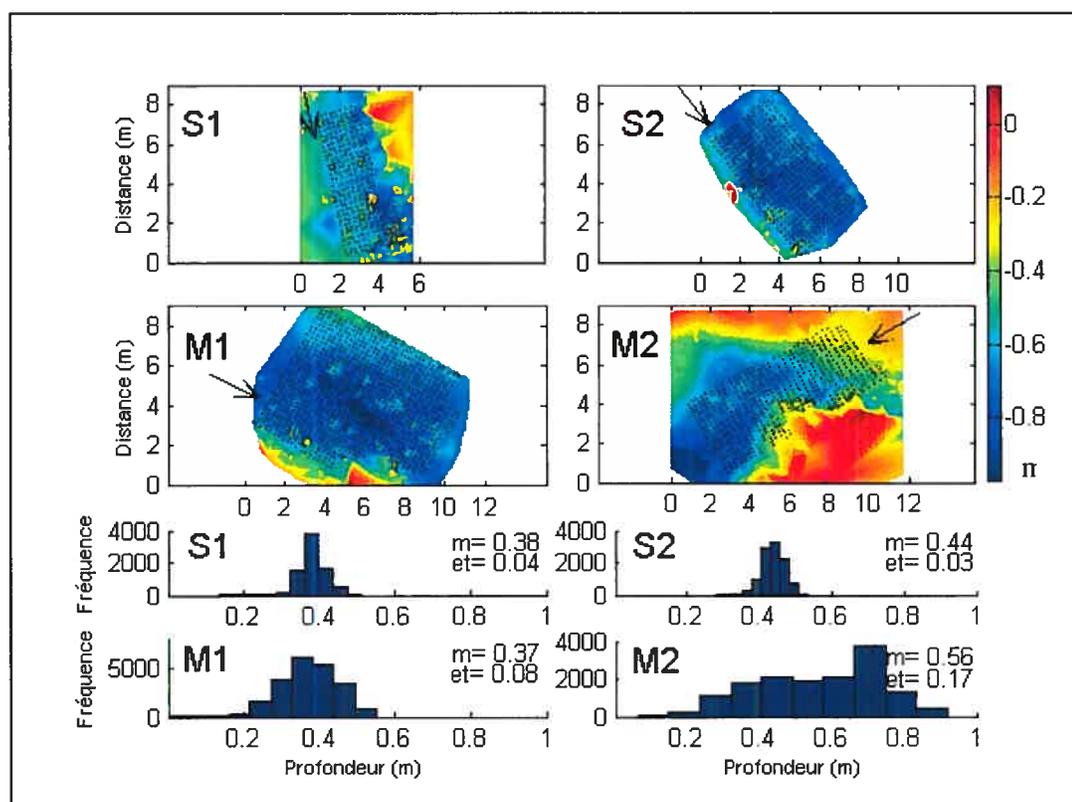


Figure 3.1 Cartes et distributions de fréquence de la bathymétrie en mètres des quatre sections, S1: Seuil 1, S2: Seuil 2, M1: Mouille 1 et M2: Mouille 2. Les flèches représentent la direction de l'écoulement longitudinal. Les points représentent la localisation des échantillons de la vitesse de l'écoulement. m : moyenne ; et : écart-type du tronçon. Les distributions et statistiques bathymétriques sont calculées à partir de la portion du tronçon couverte par les mesures de vitesse de l'écoulement uniquement.

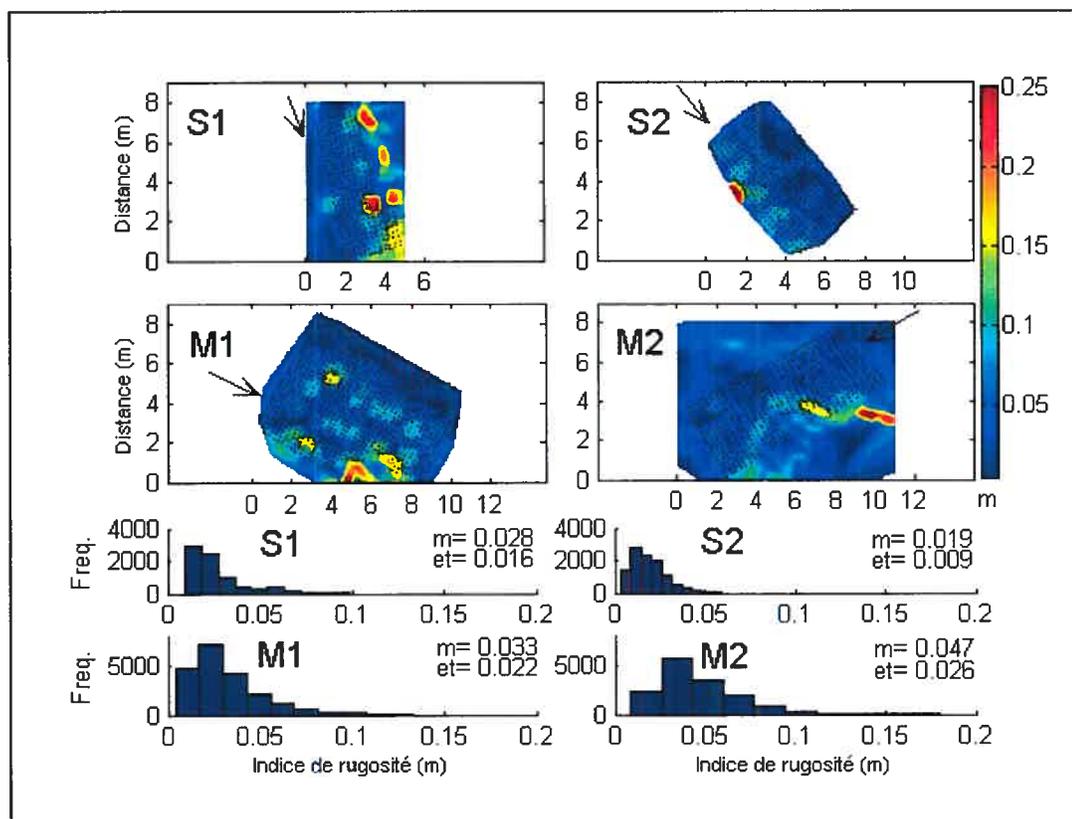


Figure 3.3 Cartes et distributions de fréquence de la rugosité (m) des quatre sections, S1: Seuil 1, S2: Seuil 2, M1: Mouille 1 et M2: Mouille 2, calculé à partir de l'écart-type d'une fenêtre mobile de 65 X 65 cm. Les flèches représentent la direction de l'écoulement longitudinal. Les points représentent la localisation des échantillons de la vitesse de l'écoulement. m : moyenne ; et : écart-type du tronçon. Les distributions et statistiques de rugosité sont calculées à partir de la portion du tronçon couverte par des les mesures de vitesse de l'écoulement uniquement.

3.1.3 Vitesse moyenne longitudinale

La vitesse moyenne longitudinale (U) des seuils correspond au double et même au triple de celle observée dans les mouilles (Fig. 3.3). En effet, les vitesses mesurées dans les mouilles oscillent principalement entre -10 et 50 cm/s et entre 50 et 100 cm/s dans les seuils. Les vitesses négatives sont attribuables à des courants de recirculation. La vitesse longitudinale suit sensiblement les mêmes patrons spatiaux que la profondeur. Cette observation s'applique particulièrement aux deux sections fortement asymétriques, soit le Seuil 1 et la Mouille 1, où l'écoulement est beaucoup plus rapide dans une partie de la section. Cela se manifeste par des distributions de fréquence asymétriques vers la droite. À l'opposé, les Seuil 2 et Mouille 2 ont des distributions de vitesses symétriques. Les

seuils sont plus homogènes que les mouilles, particulièrement le Seuil 2, avec un faible écart-type de 7 cm/s pour une vitesse moyenne de 77 cm/s. Il s'agit de la section présentant la vitesse la plus élevée. Par ailleurs, dans toutes les sections, les zones de plus faible vitesse en plein centre du chenal sont attribuables à la présence d'éléments de rugosité de forte dimension ou dans le cas de la Mouille 2, d'un surcreusement dans la roche en place.

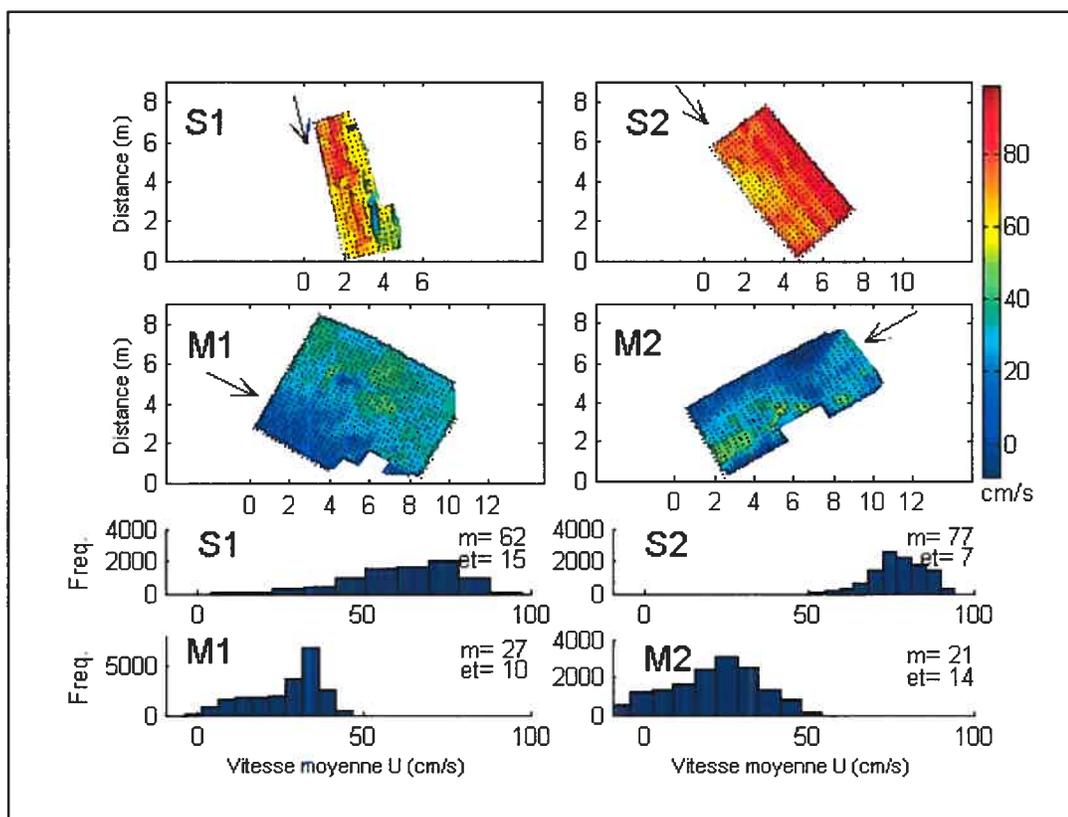


Figure 3.4 Cartes et distributions de fréquence de la vitesse moyenne longitudinale (U) (cm/s) des quatre sections, S1: Seuil 1, S2: Seuil 2, M1: Mouille 1 et M2: Mouille 2. Les flèches représentent la direction de l'écoulement longitudinal. Les points représentent la localisation des échantillons de la vitesse de l'écoulement. m : moyenne; et : écart-type du tronçon.

3.1.4 Vitesse moyenne latérale

La vitesse latérale moyenne (V) correspond à la composante de la vitesse qui est perpendiculaire au sens de l'écoulement principal. Lorsque l'écoulement latéral est nul, cela signifie que la direction de l'écoulement longitudinal est orienté exactement dans un axe parallèle à la grille d'échantillonnage (Fig. 3.5). Une valeur négative indique que l'écoulement est orienté vers la gauche (par rapport à l'écoulement longitudinal) alors qu'une valeur positive correspond à un écoulement vers la droite. Le Seuil 1 présente un

écoulement latéral vers la gauche important en raison d'une bathymétrie asymétrique. Dans le Seuil 2, l'écoulement est plus symétrique et s'écoule vers le centre du chenal. La Mouille 1 présente un écoulement orienté légèrement vers la gauche en raison de son emplacement à l'entrée d'un méandre. Puis, la Mouille 2 présente un écoulement beaucoup plus complexe, comme sa morphologie est conditionnée par la roche en place. Ainsi, nous observons à l'entrée de la section une zone de recirculation caractérisée par un écoulement vers la gauche et en plein centre de la section une grande masse d'eau qui s'écoule vers la droite.

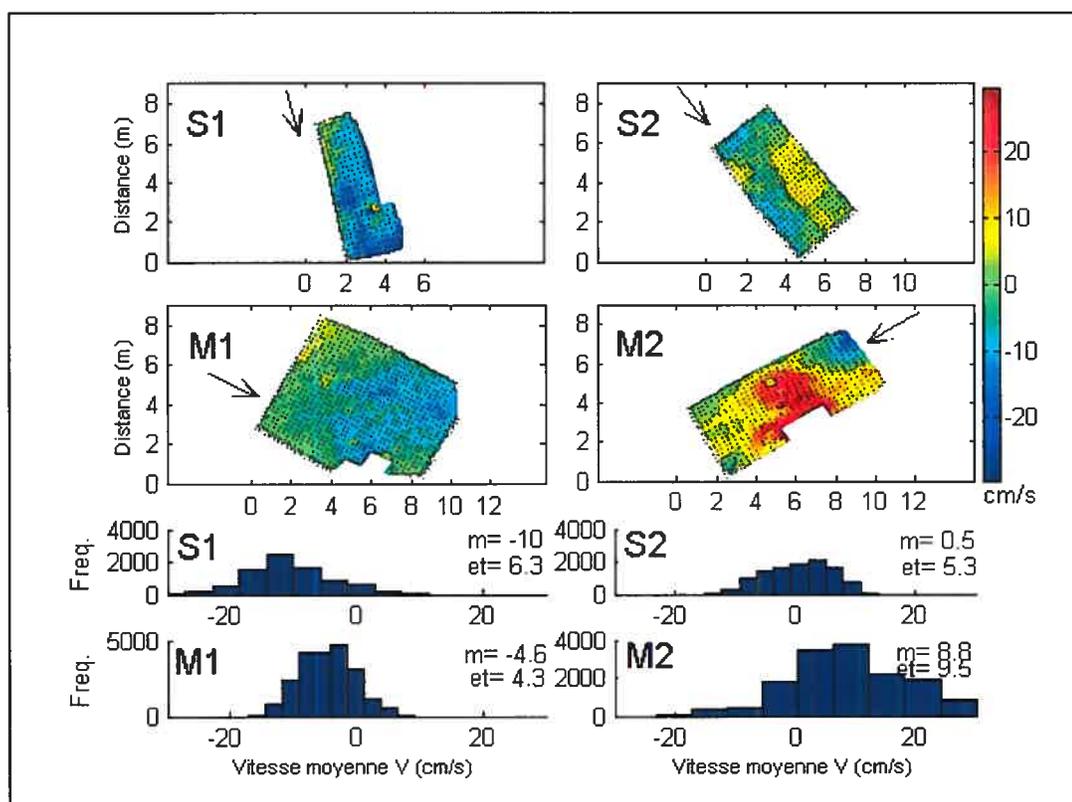


Figure 3.5 Cartes et distributions de fréquence de la vitesse moyenne latérale (V) (cm/s) des quatre sections, S1: Seuil 1, S2: Seuil 2, M1: Mouille 1 et M2: Mouille 2. Les flèches représentent la direction de l'écoulement longitudinal. Les points représentent la localisation des échantillons de la vitesse de l'écoulement. m : moyenne; et : écart-type du tronçon.

3.1.5 Vitesse moyenne verticale

W représente la magnitude de la vitesse orientée vers la surface (vitesse positive) ou vers le lit (vitesse négative) (Fig. 3.6). Pour les quatre sections, la forme des distributions de fréquence est similaire, soit symétrique et centrée sur zéro. Bien que les sections

présentent des vitesses près de zéro, nous avons observé dans quelques zones des vitesses moyennes négatives et positives qui peuvent atteindre ± 8 cm/s. Ces zones sont particulièrement visibles dans le Seuil 1 et la Mouille 2. À l'inverse, le Seuil 2 et la Mouille 1 présentent très peu de vitesses de magnitude supérieure à 3 cm/s.

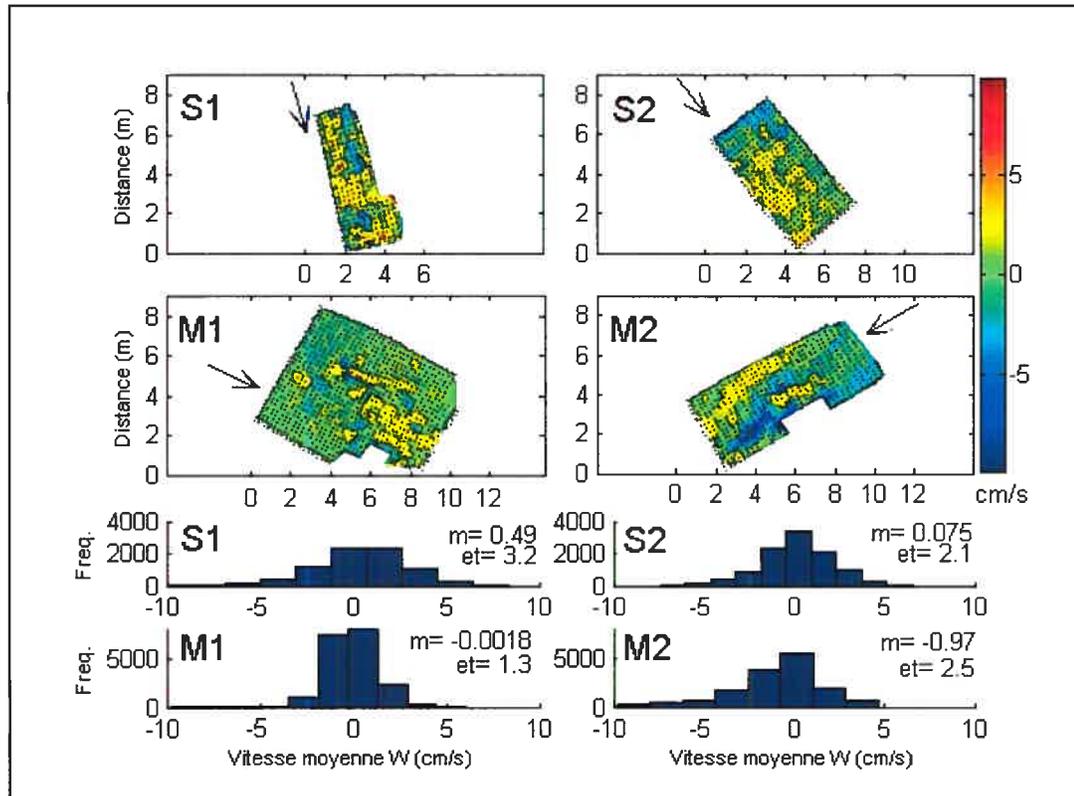


Figure 3.6 Cartes et distributions de fréquence de la vitesse moyenne verticale (W) (cm/s) des quatre sections, S1: Seuil 1, S2: Seuil 2, M1: Mouille 1 et M2: Mouille 2. Les flèches représentent la direction de l'écoulement longitudinal. Les points représentent la localisation des échantillons de la vitesse de l'écoulement. m : moyenne; et : écart-type du tronçon.

3.1.6 Intensité turbulente longitudinale

RMS_U représente un indicateur de la magnitude des fluctuations de vitesse et de la turbulence de la composante longitudinale de l'écoulement. Comme cette variable est souvent corrélée avec U (Smith *et al.* 2006), on retrouve l'écoulement le plus turbulent dans les seuils, là où l'écoulement est plus rapide (Fig. 3.7). Comme pour les variables précédentes, ce sont le Seuil 1 et la Mouille 2 qui exhibent la plus grande hétérogénéité, avec des écarts-types de 2.6 et 3.3 cm/s. À l'inverse, le Seuil 2 et la Mouille 1 sont fortement homogènes et présentent une faible étendue de valeurs. Bien que la Mouille 2

présente un RMS_U moyen modéré (8.9 cm/s), nous y avons observé une zone fortement turbulente (≈ 20 cm/s) reliée au cisaillement entre l'écoulement principal et une zone de recirculation.

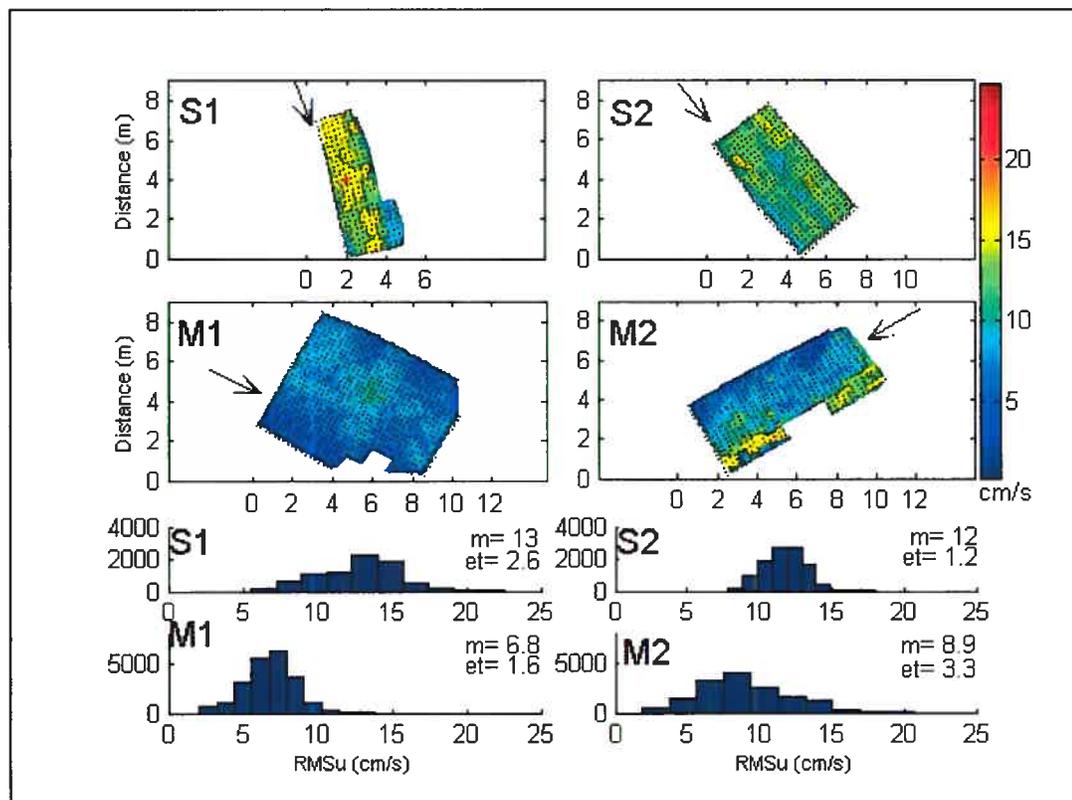


Figure 3.7 Cartes et distributions de RMS_U (cm/s) des quatre sections, S1: Seuil 1, S2: Seuil 2, M1: Mouille 1 et M2: Mouille 2. Les flèches représentent la direction de l'écoulement longitudinal. Les points représentent la localisation des échantillons de la vitesse de l'écoulement. m : moyenne ; et : écart-type du tronçon.

3.1.7 Intensité turbulente latérale

La moyenne de RMS_V présente moins de différence entre les sections que la moyenne de RMS_U (Fig. 3.8). La Mouille 1 est faiblement turbulente, à l'exception de la zone de sillage localisée derrière un bloc de grande taille au milieu de la section. Cependant, la moyenne de RMS_V des trois autres sections est similaire. Il ressort néanmoins que le Seuil 2 est la section la plus homogène et la Mouille 2 la section la plus hétérogène. L'hétérogénéité de la Mouille 2 est principalement due à la présence d'une zone de circulation dans la partie amont de la section et à une zone de tourbillons localisée principalement en aval sur la rive gauche.

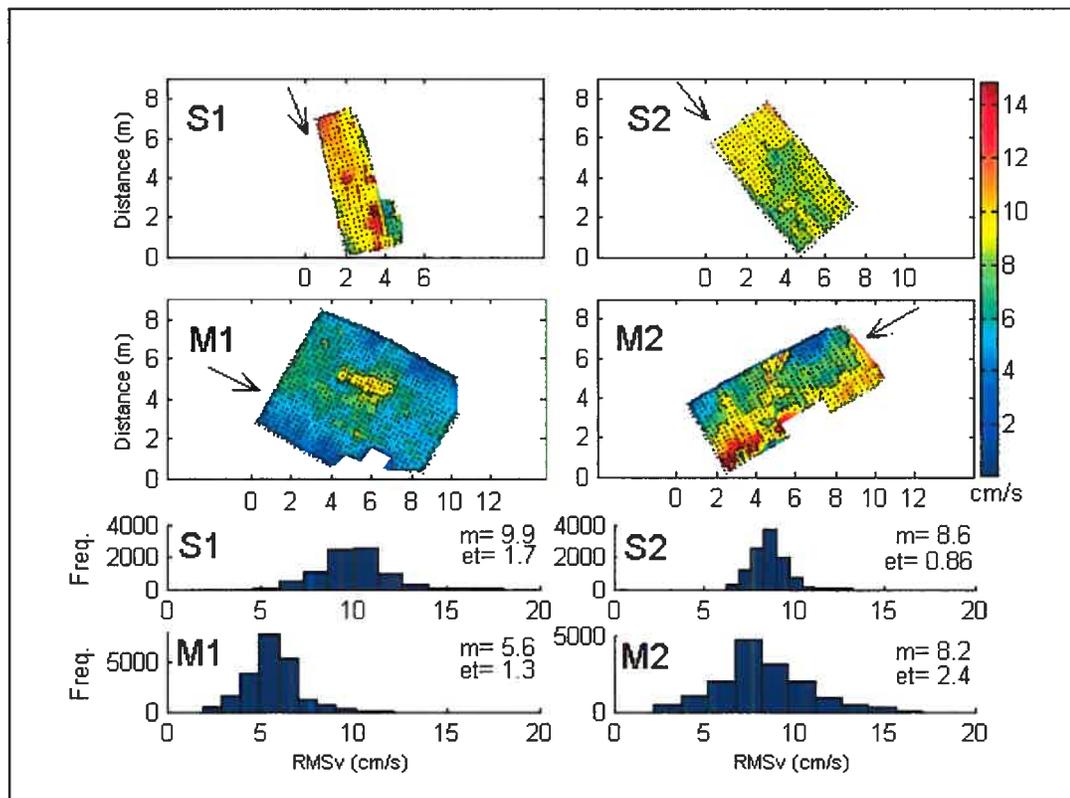


Figure 3.8 Cartes et distributions de RMS_V (cm/s) des quatre sections, S1: Seuil 1, S2: Seuil 2, M1: Mouille 1 et M2: Mouille 2. Les flèches représentent la direction de l'écoulement longitudinal. Les points représentent la localisation des échantillons de la vitesse de l'écoulement. m : moyenne ; et : écart-type du tronçon.

3.1.8 Intensité turbulente verticale

Les distributions spatiales de RMS_W et les distributions de fréquence sont très similaires à celles observées pour RMS_V (Fig. 3.9). Les valeurs de RMS_W sont toutefois légèrement inférieures à celles de la composante latérale.

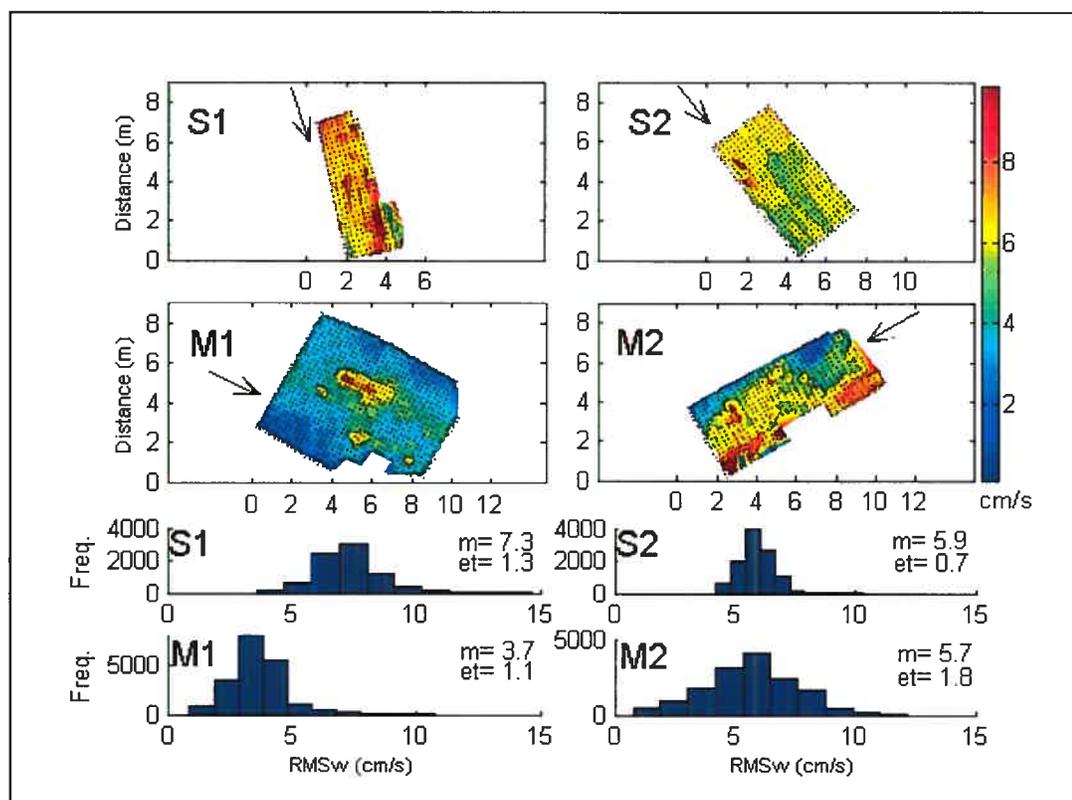


Figure 3.9 Cartes et distributions de RMS_w (cm/s) des quatre sections, S1: Seuil 1, S2: Seuil 2, M1: Mouille 1 et M2: Mouille 2. Les flèches représentent la direction de l'écoulement longitudinal. Les points représentent la localisation des échantillons de la vitesse de l'écoulement. m : moyenne ; et : écart-type du tronçon.

3.1.9 Intensité turbulente relative

Les trois composantes orthogonales de l'intensité turbulente relative (ITR_U , ITR_V et ITR_W) présentent des patrons spatiaux fortement similaires (Fig. 3.10 à 3.12). Comme l' ITR est un ratio dont le dénominateur est la vitesse longitudinale moyenne, les magnitudes les plus élevées ont été observées là où la vitesse de l'écoulement longitudinale était presque nulle. Des valeurs extrêmes pouvant atteindre dans plusieurs cas 4000% ont été observées dans les zones de recirculation et immédiatement derrière des blocs ou des amas de galets dans l'écoulement. Par conséquent, la présence de ces valeurs extrêmes font de la médiane un meilleur outil de comparaison que la moyenne. La médiane varie selon les sections entre 15 et 35% pour l' ITR_U , entre 11 et 32% pour ITR et entre 8 et 23% pour ITR_W . (Tab. 3.1). La médiane de l' ITR dans les seuils était moins élevée que dans les mouilles. Les valeurs les moins élevées et les plus homogènes ont été observées dans le Seuil 2, section dans laquelle aucune valeur extrême n'a été

relevée (Fig. 3.10 à Fig. 3.12). À l'inverse, la Mouille 2 présente les valeurs médianes de l' ITR les plus élevées, avec des valeurs de RMS élevées et des vitesses modérées.

	ITR_U (%)	ITR_V (%)	ITR_W (%)
Seuil 1	20.11	14.99	10.79
Seuil 2	15.10	11.01	7.55
Mouille 1	25.06	20.24	13.24
Mouille 2	35.31	32.24	23.15

Tableau 3.1. Valeurs médiane d'intensité turbulente relative longitudinale ITR_U , latérale ITR_V et verticale ITR_W des quatre sections.

En somme, les trois composantes révèlent des patrons presque identiques, mettant en évidence les zones de faible vitesse moyenne principalement localisée en marge des sections et derrière les éléments de rugosité de forte dimension.

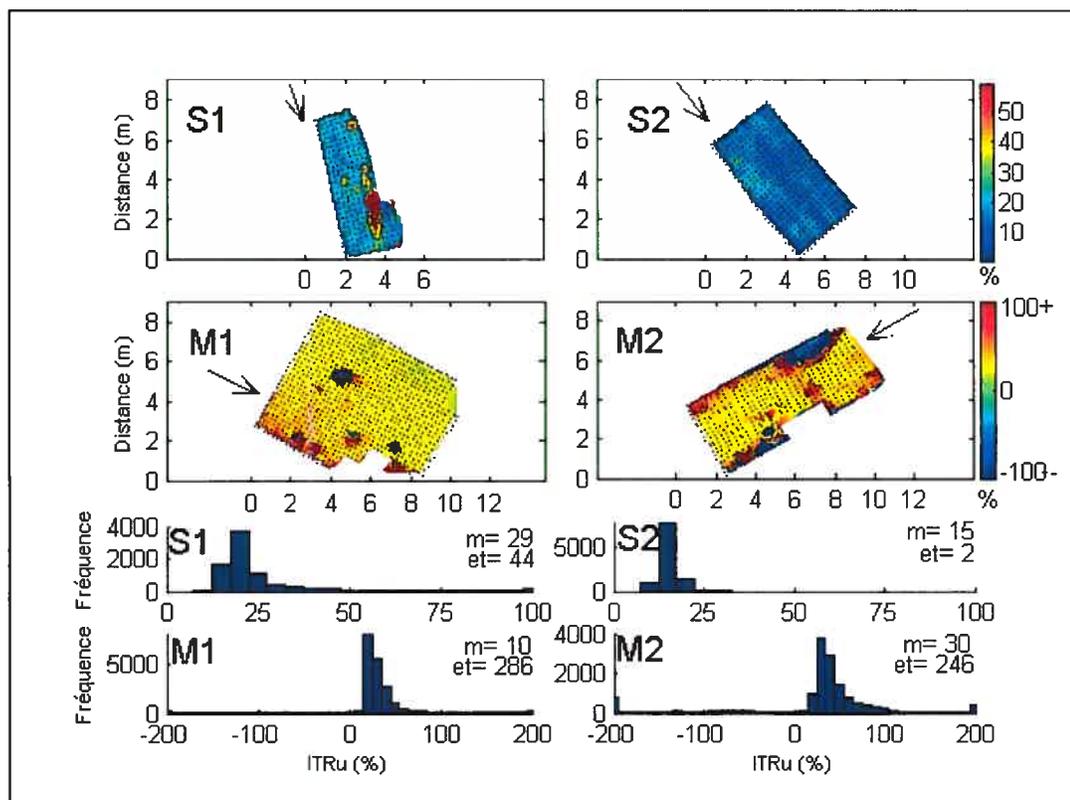


Figure 3.10 Cartes et distributions de l'intensité turbulente relative longitudinale ($ITR_U = RMS_U / U$) (%) des quatre sections, S1: Seuil 1, S2: Seuil 2, M1: Mouille 1 et M2: Mouille 2. Les flèches représentent la direction de l'écoulement longitudinal. Les points représentent la localisation des échantillons de la vitesse de l'écoulement. m : moyenne ; et : écart-type du tronçon. ($ITR_U > 200\%$ n'apparaissent pas sur les graphes).

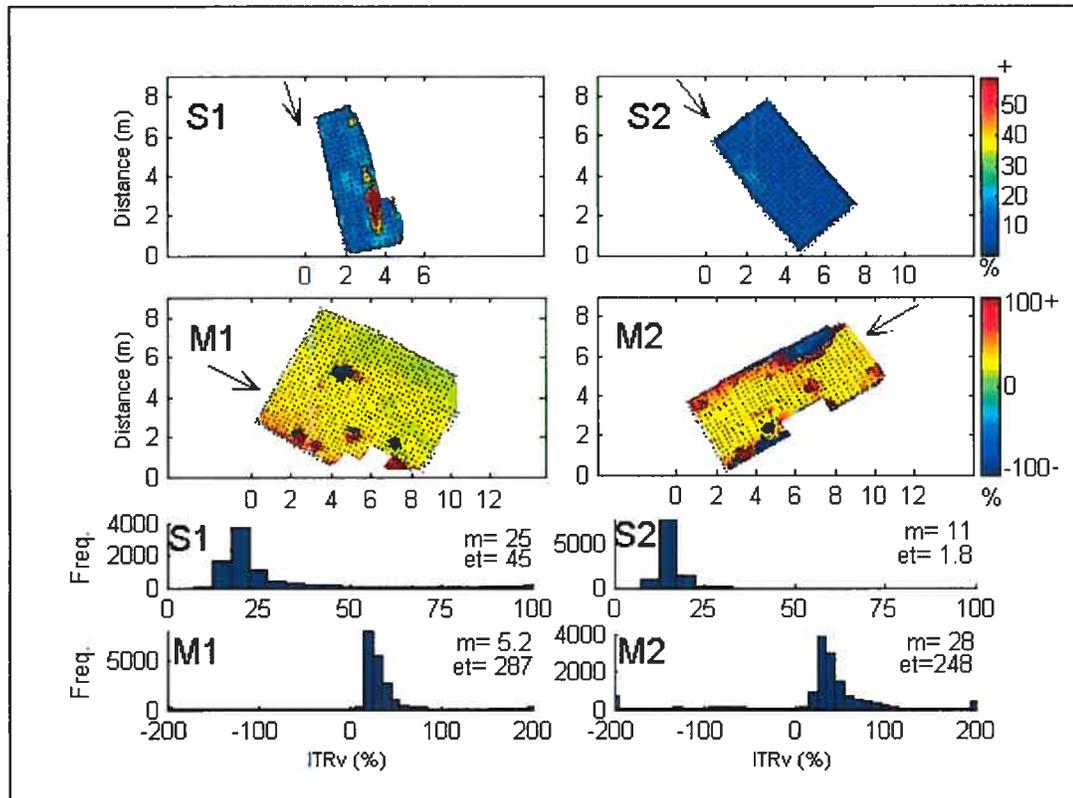


Figure 3.11 Cartes et distributions de l'intensité turbulente relative latérale ($ITR_v = \text{RMS}_v / U$) (%) des quatre sections, S1: Seuil 1, S2: Seuil 2, M1: Mouille 1 et M2: Mouille 2. Les flèches représentent la direction de l'écoulement longitudinal. Les points représentent la localisation des échantillons de la vitesse de l'écoulement. m : moyenne ; et : écart-type du tronçon. ($ITR_v > 200\%$ n'apparaissent pas sur les graphes).

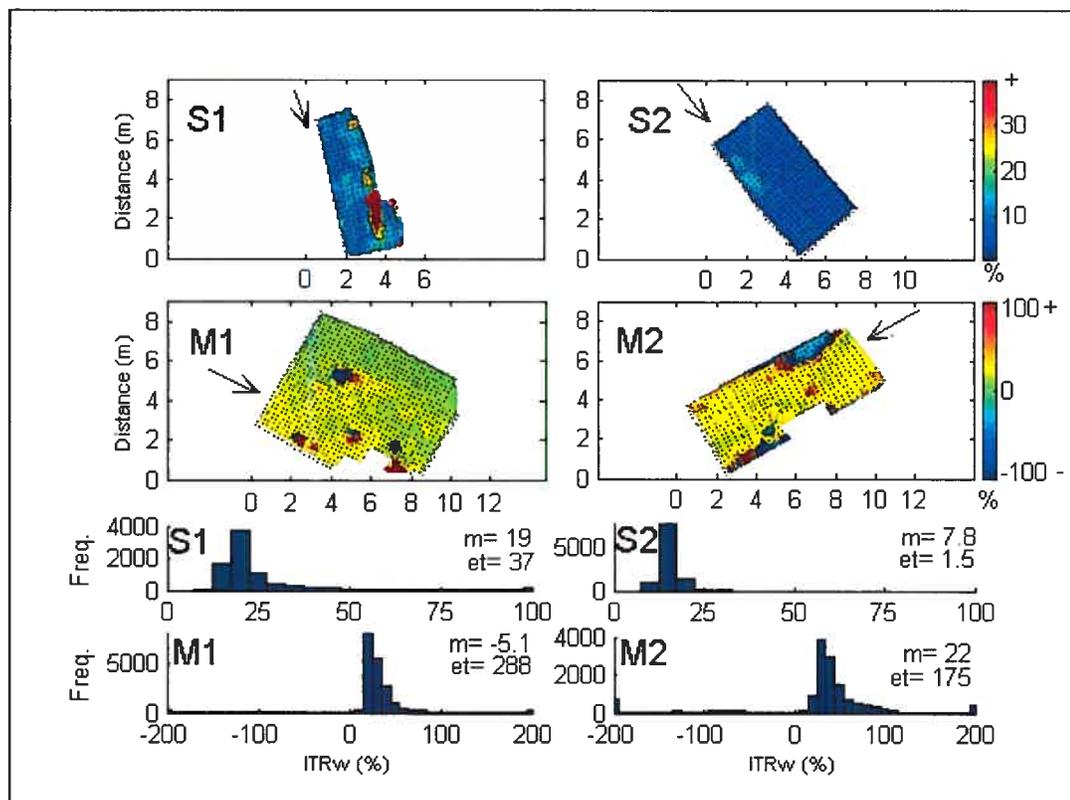


Figure 3.12 Cartes et distributions de l'intensité turbulente relative verticale ($ITR_w = RMS_w / U$) (%) des quatre sections, S1: Seuil 1, S2: Seuil 2, M1: Mouille 1 et M2: Mouille 2. Les flèches représentent la direction de l'écoulement longitudinal. Les points représentent la localisation des échantillons de la vitesse de l'écoulement. m : moyenne ; et : écart-type du tronçon. ($ITR_w > 200\%$ n'apparaissent pas sur les graphes).

3.1.10 Le cisaillement de Reynolds

Le cisaillement de Reynolds (τ_R), basé sur la covariance des fluctuations longitudinales et verticales de l'écoulement, constitue un indicateur de la force exercée sur le lit par unité de surface. Le cisaillement de Reynolds dans les seuils était en moyenne plus élevé que dans les mouilles (Fig. 3.13). Le Seuil 1 présente la plus forte hétérogénéité et des valeurs plus élevées que le Seuil 2, bien que la vitesse longitudinale moyenne y soit inférieure. La Mouille 2 était également très hétérogène, avec une valeur d'écart-type (12 N/m^2) plus élevée que la valeur de la moyenne (15 N/m^2) (Fig. 3.13). En contrepartie, le Seuil 2 et la Mouille 1 sont plus homogènes avec des écarts-types relativement faibles.

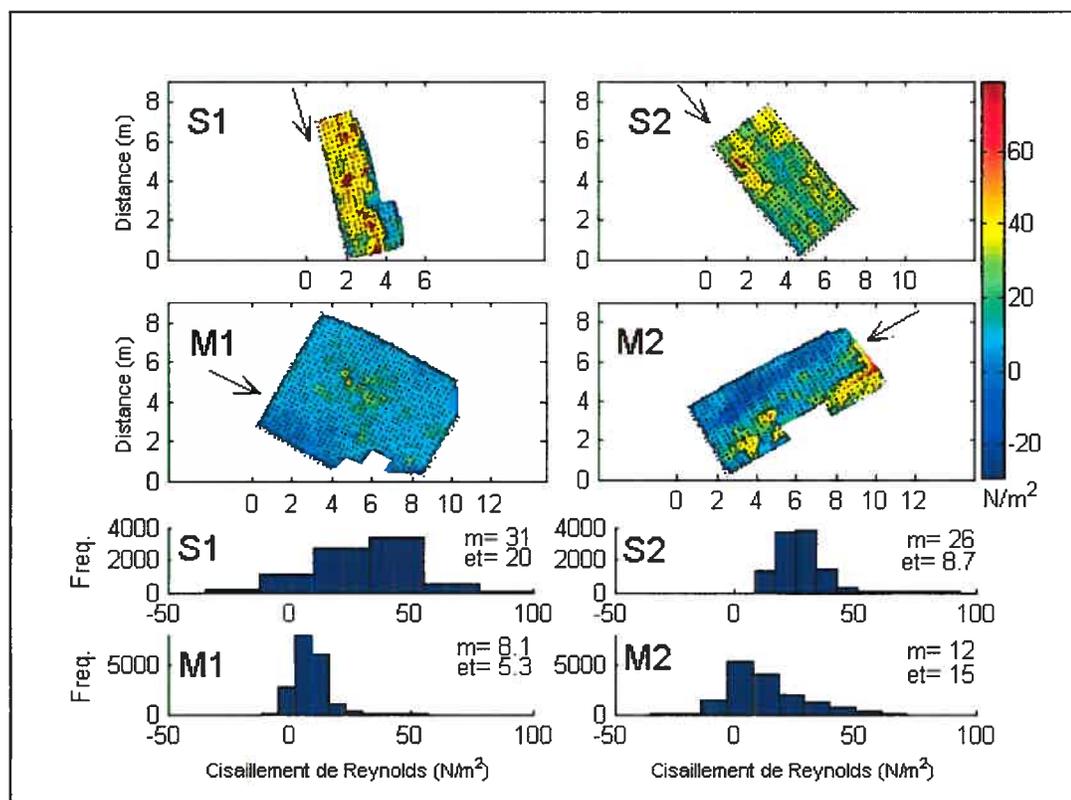


Figure 3.13 Cartes et distributions du cisaillement de Reynold's (N/m^2) des quatre sections, S1: Seuil 1, S2: Seuil 2, M1: Mouille 1 et M2: Mouille 2. Les flèches représentent la direction de l'écoulement longitudinal. Les points représentent la localisation des échantillons de la vitesse de l'écoulement. m : moyenne ; et : écart-type du tronçon.

3.1.11 Énergie cinétique turbulente (TKE)

Le patron spatial de l'énergie cinétique turbulente est similaire à celui du cisaillement de Reynolds, mais il intègre la dimension latérale aux deux autres dimensions de l'écoulement et ne tient pas compte de la direction de l'écoulement. Les sections montrent des distributions symétriques de fréquence de TKE, à l'exception de la Mouille 2, où les valeurs dans la zone de forte intensité turbulente en aval de la roche en place induisent une asymétrie vers la gauche (Fig. 3.14). Ainsi, les quatre sections présentent une variété de patrons de turbulence. En effet, deux sections sont homogènes (S2, M1) alors que les deux autres sont hétérogènes (S1, M2). De plus, on observe toutes les combinaisons entre l'homogénéité et la valeur moyenne de TKE : l'écoulement dans la Mouille 1 est homogène et faiblement turbulent, celui de la Mouille 2 très hétérogène et

modérément turbulent, celui du Seuil 3, homogène et très turbulente, et enfin, celui du Seuil 1, hétérogène et fortement turbulent.

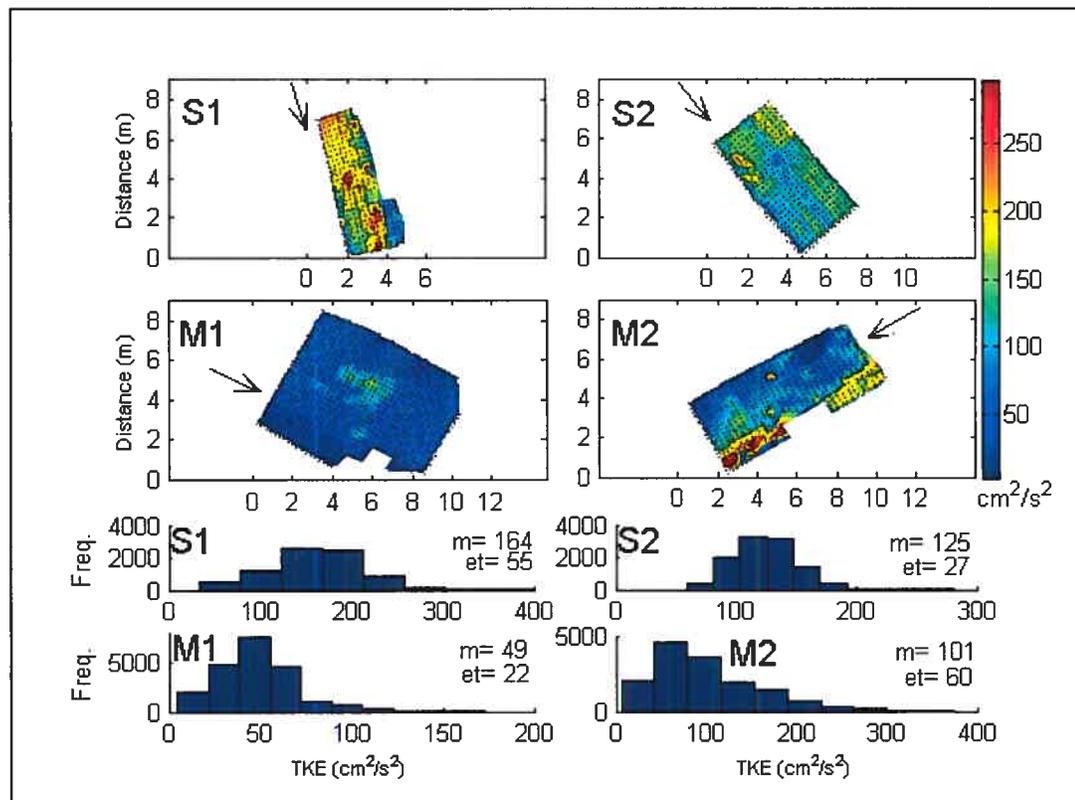


Figure 3.14 Cartes et distributions de l'énergie cinétique turbulente (cm^2/s^2) des quatre sections, S1: Seuil 1, S2: Seuil 2, M1: Mouille 1 et M2: Mouille 2. Les flèches représentent la direction de l'écoulement longitudinal. Les points représentent la localisation des échantillons de la vitesse de l'écoulement. m : moyenne ; et : écart-type du tronçon.

Les quatre sections étudiées couvrent une gamme de conditions hydrauliques différentes. Le tableau 3.2 résume les statistiques des quatre tronçons. En somme, la profondeur ne varie pas de façon importante entre les sections, mais les valeurs de U et des propriétés turbulentes sont plus élevées dans les seuils. De façon générale, le Seuil 1 et la Mouille 2 sont des sections beaucoup plus hétérogènes que le Seuil 2 et la Mouille 1. D'ailleurs, le Seuil 1 présente le lit le plus lisse et la Mouille 2 le lit le plus rugueux. Les variables hydrauliques sont interreliées entre elles et interagissent dans un système complexe. Une brève investigation des interrelations entre les variables est très utile à une compréhension de la distribution spatiale de ces variables.

Variables	Seuil 1	Seuil 2	Mouille 1	Mouille 2
Y (m)	-0.38 (0.04)	-0.44 (0.03)	-0.37 (0.08)	-0.56 (0.17)
k (m)	0.028 (0.02)	0.019(0.009)	0.033 (0.02)	0.047 (0.03)
U (cm/s)	62 (15)	77 (7.4)	27 (10)	21 (14)
V (cm/s)	-10 (6.3)	0.50 (5.3)	-4.6 (4.3)	8.8 (9.5)
W (cm/s)	0.49 (3.2)	0.075 (2.1)	0.0018 (1.3)	-0.97 (2.5)
RMS_U (cm/s)	13 (2.6)	12 (1.2)	6.8 (1.6)	8.9 (3.3)
RMS_V (cm/s)	9.9 (1.7)	8.6 (0.86)	5.6 (1.3)	8.20 (2.4)
RMS_W (cm/s)	7.3 (1.3)	5.9 (0.71)	3.7 (1.1)	5.7 (1.8)
ITR_U (%)	29 (44) *20	15 (2.4) *15	10(286.81) *25	30 (246) *35
ITR_V (%)	25 (45) *15	11 (1.8) *11	5.2 (287) *20	28 (248) *32
ITR_W (%)	19 (37) *35	7.8 (1.5) *7.6	-5.1 (288) *13	22 (175) *23
τ (N/m ²)	31 (20)	26 (8.7)	8.1 (5.3)	12(15)
TKE (cm ² /s ²)	164 (55)	124.7 (26.6)	49 (22)	101 (60)

Tableau 3.2. Synthèse des statistiques des quatre sections. Moyenne, écart-type (entre parenthèses) et médiane (*)

3.1.12 Interrelations entre les variables

Ici, les relations entre les variables ont été examinées à l'aide des indices de corrélation entre les variables à l'emplacement de chaque point de mesure de vitesse. La corrélation entre les variables hydrauliques présente une variabilité importante entre les quatre sections (Tab. 3.3 à 3.6). À l'exception des variables turbulentes (RMS , ITR , τ et TKE) qui sont fortement corrélées entre elles, les corrélations entre les variables sont généralement de faibles à modérées ($r \approx 0.01$ à 0.4)

Par exemple, la profondeur de l'écoulement ne présente dans aucune section des corrélations fortes avec une autre variable. Cependant, dans les deux seuils, Y est corrélé modérément et négativement avec U ($r = -0.29$ et -0.25), alors que ce n'est pas le cas dans les mouilles. À l'inverse, dans la Mouille 2, le coefficient de corrélation est positif ($r = 0.22$), en raison de la morphologie induite par la roche en place. En effet, dans cette section, la constriction engendrée par la roche en place entraîne une augmentation conjointe de la vitesse et de la profondeur. Cette situation contraste avec celle des seuils, dans lesquels l'augmentation de la vitesse causée par la convergence de l'écoulement entraîné par une diminution de la profondeur. Dans la Mouille 1, l'asymétrie du chenal

entraîne une plus grande complexité. D'un côté du talweg, les faibles profondeurs sont associées à une augmentation de la vitesse alors que le long de la berge opposée, la vitesse moyenne est presque nulle. Par conséquent, le coefficient de corrélation dans la Mouille 1 est très bas ($r = 0.05$).

La rugosité du lit est corrélée plus fortement avec U que ne l'est la profondeur. Du moins, c'est le cas dans les seuils et la Mouille 1, où la corrélation varie entre -0.41 et -0.54. Cette relation illustre la diminution de U localement en présence d'éléments de rugosité de forte taille. Dans la Mouille 2, la rugosité n'est pas reliée à U . Cela pourrait s'expliquer par la constriction qui force l'eau contre la roche en place fortement rugueuse. La rugosité est également corrélée avec les trois dimensions de ITR dans le Seuil 1.

S1	Y	k	U	RMS_U	ITR_U	V	RMS_V	ITR_V	W	RMS_W	ITR_W	τ	TKE
Y	1.00	0.05	-0.25	-0.11	-0.04	-0.01	0.00	-0.03	0.09	0.12	-0.03	-0.06	-0.02
k		1.00	-0.54	-0.35	0.52	0.25	-0.17	0.53	0.09	0.05	0.54	-0.30	-0.22
U			1.00	0.46	-0.45	-0.16	0.09	-0.47	-0.27	-0.27	-0.48	0.46	0.20
RMS_U				1.00	-0.01	-0.22	0.81	-0.05	-0.11	0.62	-0.07	0.82	0.93
ITR_U					1.00	-0.13	0.17	1.00	0.15	0.30	1.00	-0.19	0.10
V						1.00	-0.28	-0.13	0.08	-0.17	-0.12	-0.11	-0.22
RMS_V							1.00	0.15	0.01	0.85	0.13	0.58	0.93
ITR_V								1.00	0.16	0.28	1.00	-0.22	0.07
W									1.00	0.06	0.17	-0.35	-0.05
RMS_W										1.00	0.28	0.43	0.82
ITR_W											1.00	-0.24	0.05
τ												1.00	0.75
TKE													1.00

Tableau 3.3. Matrice de corrélation des variables hydrauliques du Seuil 1.

S2	Y	k	U	RMS_U	ITR_U	V	RMS_V	ITR_V	W	RMS_W	ITR_W	τ	TKE
Y	1.00	-0.05	-0.29	0.12	0.30	-0.13	0.11	0.29	0.06	0.13	0.26	0.13	0.11
k		1.00	-0.48	-0.33	0.07	0.16	-0.08	0.29	0.28	0.03	0.30	-0.07	-0.20
U			1.00	0.09	-0.61	-0.03	-0.02	-0.72	-0.30	-0.26	-0.74	-0.17	0.00
RMS_U				1.00	0.72	-0.30	0.78	0.47	-0.37	0.75	0.44	0.85	0.96
ITR_U					1.00	-0.22	0.63	0.88	-0.09	0.79	0.88	0.81	0.76
V						1.00	-0.21	-0.14	0.06	-0.21	-0.13	-0.22	-0.28
RMS_V							1.00	0.69	-0.42	0.85	0.57	0.80	0.90
ITR_V								1.00	-0.08	0.79	0.94	0.69	0.62
W									1.00	-0.40	-0.09	-0.35	-0.42
RMS_W										1.00	0.83	0.91	0.88
ITR_W											1.00	0.71	0.59
τ_R												1.00	0.92
TKE													1.00

Tableau 3.4 Matrice de corrélation des variables hydrauliques du Seuil 2.

M1	<i>Y</i>	<i>k</i>	<i>U</i>	RMS_U	ITR_U	<i>V</i>	RMS_V	ITR_V	<i>W</i>	RMS_W	ITR_W	<i>T</i>	<i>TKE</i>
<i>Y</i>	1.00	-0.12	0.05	0.38	-0.10	0.23	0.45	0.04	0.03	0.45	-0.09	0.34	0.39
<i>k</i>		1.00	-0.41	-0.31	0.06	-0.06	-0.18	0.09	0.03	-0.09	0.04	-0.19	-0.16
<i>U</i>			1.00	0.59	0.05	0.21	0.42	-0.21	0.10	0.35	0.07	0.45	0.42
RMS_U				1.00	-0.07	0.12	0.88	-0.03	-0.06	0.78	-0.05	0.81	0.92
ITR_U					1.00	0.02	-0.11	-0.93	-0.03	-0.22	0.99	-0.07	-0.13
<i>V</i>						1.00	0.23	-0.07	0.04	0.34	0.04	0.19	0.21
RMS_V							1.00	0.05	0.00	0.88	-0.10	0.69	0.96
ITR_V								1.00	0.04	0.16	-0.95	0.00	0.07
<i>W</i>									1.00	-0.01	-0.03	-0.23	-0.05
RMS_W										1.00	-0.20	0.73	0.92
ITR_W											1.00	-0.06	-0.11
τ_R												1.00	0.78
<i>TKE</i>													1.00

Tableau 3.5 Matrice de corrélation des variables hydrauliques de Mouille 1.

M2	<i>Y</i>	<i>k</i>	<i>U</i>	RMS_U	ITR_U	<i>V</i>	RMS_V	ITR_V	<i>W</i>	RMS_W	ITR_W	τ	<i>TKE</i>
<i>Y</i>	1.00	-0.21	0.22	-0.02	0.16	-0.12	0.15	0.01	0.17	0.15	0.12	-0.24	0.05
<i>k</i>		1.00	0.09	0.22	0.06	0.30	0.19	0.10	-0.26	0.21	0.07	0.23	0.21
<i>U</i>			1.00	0.52	0.08	0.28	0.56	-0.31	-0.34	0.60	0.05	0.35	0.49
RMS_U				1.00	0.12	0.21	0.86	-0.04	-0.53	0.88	0.11	0.67	0.95
ITR_U					1.00	0.02	0.14	0.56	-0.07	0.17	0.99	0.09	0.14
<i>V</i>						1.00	0.22	-0.12	-0.32	0.27	0.03	0.17	0.17
RMS_V							1.00	0.02	-0.47	0.90	0.14	0.55	0.93
ITR_V								1.00	0.08	-0.02	0.59	-0.06	0.02
<i>W</i>									1.00	-0.40	-0.06	-0.60	-0.52
RMS_W										1.00	0.16	0.54	0.91
ITR_W											1.00	0.08	0.13
τ_R												1.00	0.62
<i>TKE</i>													1.00

Tableau 3.6 Matrice de corrélation des variables hydrauliques de Mouille 2.

La vitesse moyenne longitudinale, la variable hydraulique souvent considérée comme la plus fondamentale, présente des coefficients de corrélation positifs, mais faibles, avec les variables de turbulence (RMS , τ et TKE), les coefficients de corrélation variant de 0.45 à 0.60, sauf dans le Seuil 2 où les corrélations sont faibles. En effet, dans cette section, U présente un patron visiblement différent de la turbulence. En effet ; U est relativement uniforme sur l'ensemble de la section, alors que la turbulence est distribuée de façon plus hétérogène (Fig. 3.4 ; Fig. 3.7).

Par ailleurs, les variables turbulentes sont reliées entre elles. Par exemple, RMS_U est également relié aux autres dimensions de l'intensité turbulente ($RMS_V:r = 0.78$ à 0.88 ;

RMS_W : $r = 0.62$ à 0.88). Ceci était perceptible par la similarité des cartes pour chacune des variables dans une même section. L'énergie cinétique turbulente est aussi naturellement fortement corrélée à RMS , comme TKE est généré à partir de cette variable.

Enfin, les trois composantes de ITR sont aussi fortement corrélées entre elles, mais peu avec d'autres variables. Cette situation pourrait être due à l'existence des valeurs extrêmes, tel que nous l'avons montré précédemment. Par conséquent, nous n'avons pas retenu ces variables pour toutes les analyses subséquentes.

3.1.13 Analyse en composante principale

L'utilisation d'une technique de réduction des données permet de faciliter la visualisation des différences entre les sections. D'abord, les données des quatre sections ont été combinées. Les coefficients de corrélation pour les quatre sections sont présentées au tableau 3.7. Nous avons effectué une analyse en composante principale sans rotation sur les variables primaires, où les variables représentant des ratios, comme l' ITR ont été exclues. Le système complexe de variables des quatre sections a été réduit à un nombre restreint de dimensions.

TOUS	Y	k	U	RMS_U	ITR_U	V	RMS_V	ITR_V	W	RMS_W	ITR_W	τ	TKE
Y	1.00	0.07	-0.10	0.10	0.05	0.15	0.29	0.06	-0.05	0.29	0.04	-0.08	0.17
k		1.00	-0.43	-0.18	0.07	0.27	-0.03	0.14	-0.15	0.01	0.06	-0.17	-0.07
U			1.00	0.69	0.01	-0.05	0.49	-0.21	0.04	0.47	0.02	0.61	0.54
RMS_U				1.00	0.03	0.15	0.89	-0.08	-0.16	0.87	0.03	0.82	0.96
ITR_U					1.00	0.03	0.04	-0.42	-0.03	0.01	0.98	0.02	0.04
V						1.00	0.27	-0.04	-0.16	0.32	0.04	0.09	0.21
RMS_V							1.00	0.00	-0.19	0.94	0.04	0.68	0.95
ITR_V								1.00	0.02	0.02	-0.53	-0.09	-0.02
W									1.00	-0.15	-0.03	-0.26	-0.19
RMS_W										1.00	0.01	0.67	0.93
ITR_W											1.00	0.02	0.04
τ_R												1.00	0.78
TKE													1.00

Tableau 3.7 Matrice de corrélation des variables hydrauliques pour les quatre sections

Nous avons extrait les trois premières composantes, soit les composantes dont la valeur propre (eigenvalue) était supérieure à 1. Ces trois composantes expliquent ensemble plus de 77% de la variance (Fig. 3.15). La première composante représente principalement U

et l'ensemble de variables turbulentes (RMS_U , RMS_V , RMS_W , τ et TKE), qui sont généralement positivement corrélées entre elles (Tab. 3.8). La première composante représente donc un gradient allant d'une vitesse longitudinale basse et faiblement turbulente à un écoulement rapide et fortement turbulent (Fig. 3.16A). La seconde composante est constituée davantage de Y , k , U et V . Elle représente un gradient allant d'une vitesse longitudinale basse dans une zone profonde au lit rugueux à un écoulement rapide, peu profond et à un lit plus lisse.

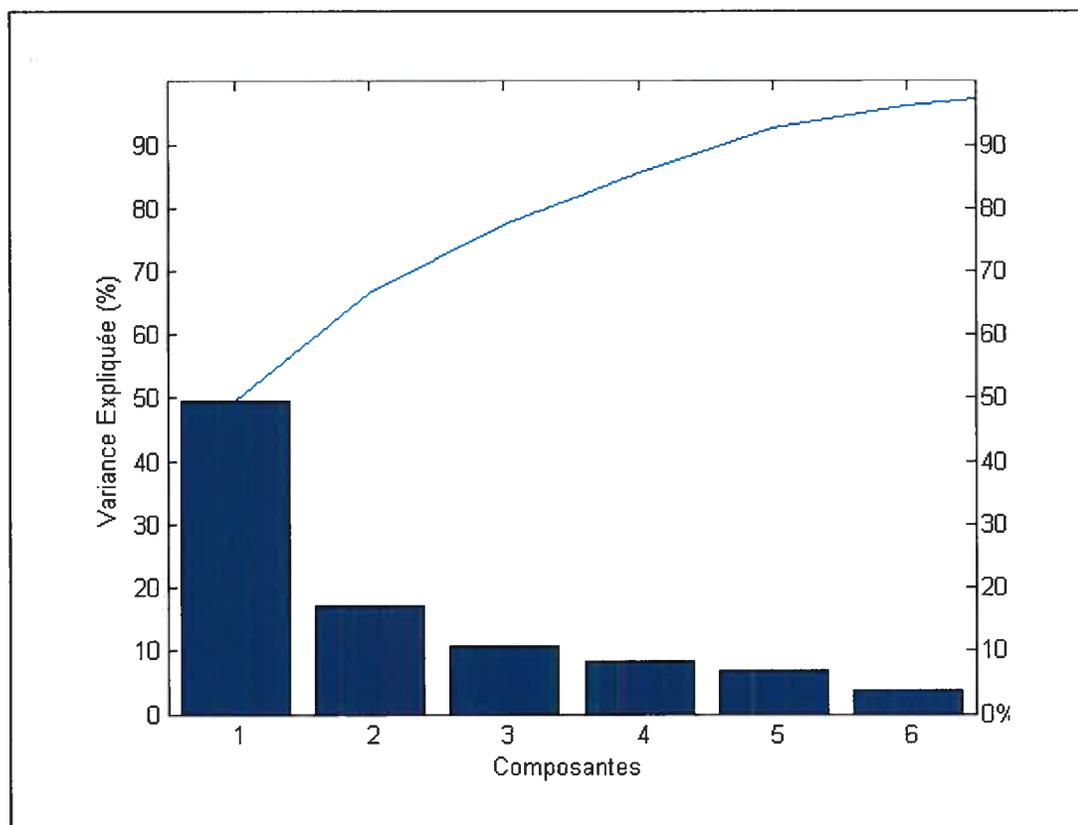


Figure 3.15 Variance expliquée (%) par les composantes d'une analyse en composante principale effectuée sur l'ensemble des quatre sections. La courbe représente la variance cumulative expliquée.

	Composante1	Composante2	Composante3
Y	0.08	0.36	0.68
k	-0.07	0.57	-0.21
U	0.30	-0.42	-0.01
RMS _U	0.44	-0.08	-0.01
V	0.11	0.48	-0.07
RMS _V	0.42	0.13	0.12
W	-0.10	-0.28	0.61
RMS _W	0.42	0.15	0.13
τ	0.38	-0.14	-0.28
TKE	0.44	0.05	0.01

Tableau 3.8 Saturations (corrélation entre une variable et une composante) des variables primaires des quatre sections pour les trois premières composantes principales. Les saturations surlignées sont les plus importantes pour décrire la composante.

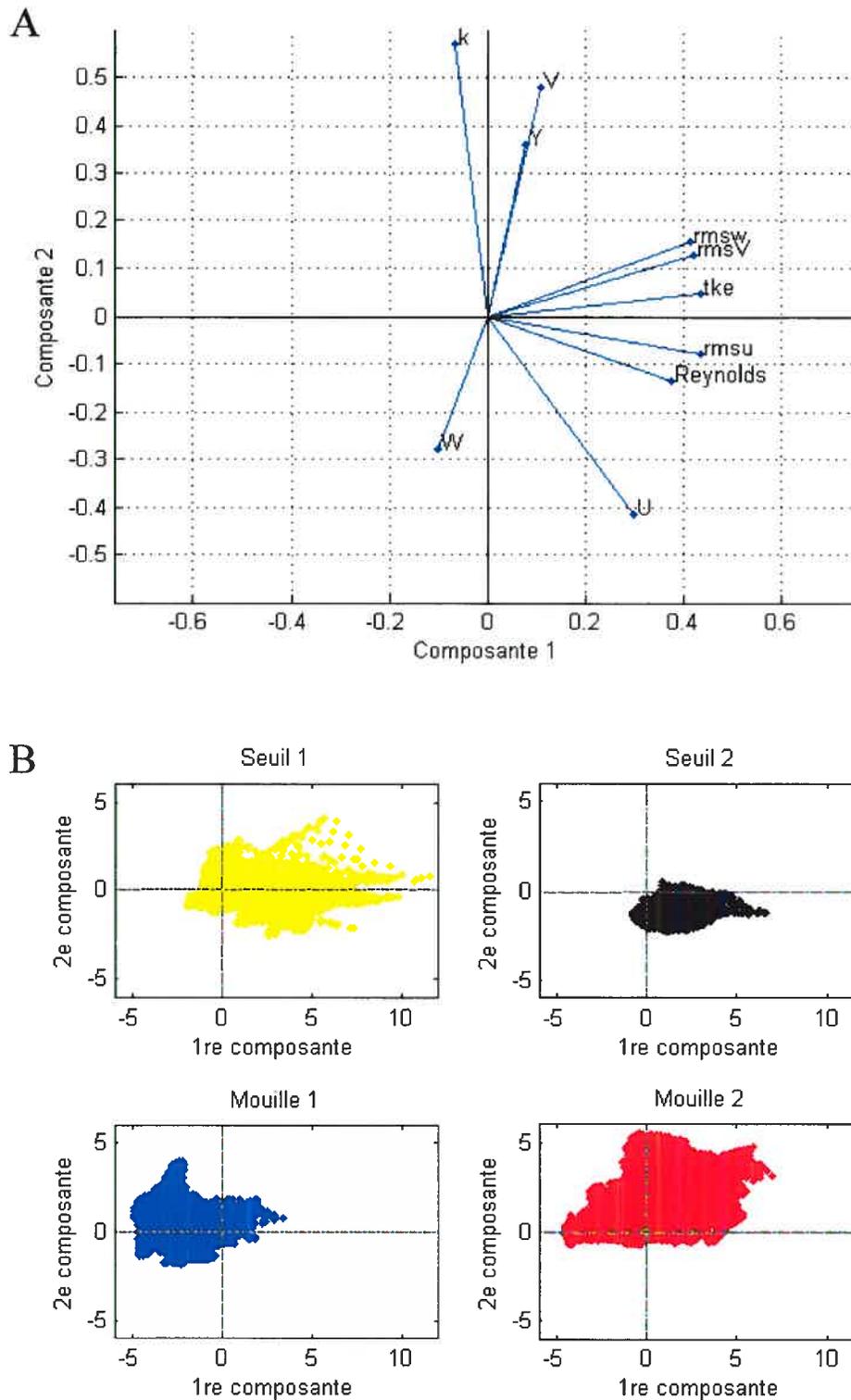


Figure 3.16. A) Saturation des variables en fonction de la composante 1 et 2. B) Cartographie des scores de chaque section en fonction des deux premières composantes. La première composante est principalement constituée de la turbulence et de la vitesse moyenne. La seconde composante est basée sur la vitesse moyenne, la rugosité et la profondeur (voir texte).

La troisième composante (non représentée sur la figure) est formée principalement par la profondeur et la vitesse moyenne verticale et représente un gradient d'habitat profond et de vitesse moyenne davantage orientée vers la surface à un écoulement peu profond davantage orienté vers le lit.

La cartographie des scores des deux premières composantes illustre clairement que les sites sélectionnés représentent un gradient dans la variabilité des milieux (Fig. 3.16B). D'abord, les scores observés dans les seuils pour la composante 1 sont presque tous positifs, ce qui montre la dominance de la turbulence et de la vitesse longitudinale qui ont des valeurs élevées. Toutefois, les seuils se distinguent dans la composante B. Le Seuil 1 avec des valeurs autant positives que négatives présente une gamme de profondeur et de rugosité. À l'inverse, le Seuil 2 est très homogène et moins profond. La Mouille 1 présente quant à elle davantage de valeurs négatives dans la première composante, en raison de l'écoulement longitudinal lent et de la faible turbulence. Les scores de la composante 2 sont davantage positifs, illustrant la dominance des valeurs de profondeur et de rugosité élevées. Enfin, la Mouille 2 peut être qualifiée d'hybride entre un seuil et une mouille, comme elle présente les caractéristiques de profondeur et de rugosité d'une mouille, illustré par les scores positifs de la composante 2 ainsi qu'une grande gamme de valeurs de vitesse et de turbulence.

3.2 Analyse des données

Dans le but de répondre aux objectifs spécifiques de l'étude, les données ont été analysées en quatre étapes. D'abord, nous avons sélectionné l'algorithme d'interpolation offrant la meilleure performance, qui a ensuite été comparée entre les quatre sections. Puis, nous décrivons la relation entre la densité d'échantillonnage et la performance du modèle. Enfin, la structure spatiale des données dans la direction longitudinale et transversale a été étudiée à l'aide de semivariogrammes directionnels.

3.2.1 Choix du modèle d'interpolation

Les performances de cinq modèles d'interpolation ont été comparées : l'interpolation linéaire et cubique (réseaux de triangles irréguliers), la distance inverse, le krigeage et le voisinage naturel. À partir d'un sous-échantillon test de 10% des points de mesures dans

chaque section, nous avons utilisé une technique de rééchantillonnage pour estimer l'erreur reliée à chaque modèle. Les échantillons test ont été aléatoirement sélectionnés et soustraits du jeu de données de chaque section. Puis, les mesures ponctuelles ont été réinterpolées et la valeur estimée par le modèle a été comparée à la valeur mesurée. Le tableau 3.9 présente la moyenne et l'écart-type de la différence absolue ($|\Delta z|$) et l'erreur relative ($(|\Delta z| / \text{moyenne de } z \text{ dans la section}) * 100$) de chaque modèle d'interpolation pour trois variables : U , RMS_U et TKE .

Les différences absolues moyennes de U engendrées par les modèles varient approximativement entre 2.5 et 7 cm/s, ce qui équivaut à des erreurs relatives moyennes variant entre 5 et 19 %. Les erreurs d'interpolation de RMS présentent une moins grande variabilité entre les sections, avec des différences absolues moyennes oscillant entre 0.6 et 1.2 cm/s soit entre 8 et 15%. Les erreurs d'interpolation de TKE sont légèrement supérieures, avec des différences absolues moyennes entre 7 et 22 cm^2/s^2 . La variabilité des erreurs entre les sections est relativement faible, avec des erreurs absolues entre 12 et 17 %.

Par ailleurs, les indices d'erreur présentent une très faible variabilité entre les modèles d'interpolation. En effet, à cause de la forte densité d'échantillonnage, soit 14.4 points/ m^2 (90% de la densité maximale échantillonnée), aucun modèle d'interpolation ne présente des différences moyennes absolues significativement supérieures à un autre (test ANOVA $\alpha=0.05$), et ce, pour les trois variables et dans toutes les sections.

L'absence de différence entre les modèles est aussi due à la forte variabilité des erreurs des sous-échantillons, avec des valeurs d'écart-types s'approchant des valeurs moyennes. Néanmoins, bien que la différence ne soit pas significative, le modèle linéaire basé sur un réseau de triangles irréguliers présente le plus souvent les erreurs moyennes les plus basses. De plus, ce modèle est parmi les plus simples et les plus fortement répandus. Par conséquent, pour les étapes subséquentes de l'analyse des données, nous avons choisi d'utiliser le modèle d'interpolation linéaire basé sur un réseau de triangles irréguliers appelé dans la suite de cette analyse, modèle linéaire.

	LIN		CUB		IDW		KRIG		NN		Test-ANOVA	
	$ \overline{\Delta z} $	Rel (%)	F	p								
<i>U</i> cm/s												
S1	5.76 (4.71)	9.44	6.30 (6.64)	10.33	6.08 (4.30)	9.97	6.68 (7.34)	10.95	7.00 (7.48)	11.48	0.19	0.96
S2	3.98 (3.68)	5.17	3.90 (3.34)	5.06	4.02 (3.23)	5.22	3.87 (3.26)	5.03	3.77 (3.38)	4.90	0.03	0.99
M1	2.51 (2.38)	9.30	2.49 (2.48)	9.22	2.57 (2.55)	9.52	2.45 (2.45)	9.07	2.42 (2.42)	8.96	0.04	0.99
M2	3.88 (3.15)	18.5	3.99 (4.64)	19.00	3.64 (3.29)	17.33	3.60 (3.19)	17.14	3.96 (4.00)	18.86	0.06	0.98
<i>RMS_u</i> cm/s												
S1	1.06 (0.99)	8.15	1.20 (1.07)	9.23	1.12 (0.96)	8.62	1.19 (6.68)	9.15	1.20 (1.13)	9.23	0.24	0.96
S2	1.12 (0.92)	9.33	1.22 (0.96)	10.17	1.12 (0.99)	9.33	1.12 (0.98)	9.33	1.16 (0.99)	9.67	0.09	0.99
M1	0.66 (0.56)	9.71	0.67 (0.55)	9.85	0.79 (0.61)	11.62	0.64 (0.52)	9.41	0.67 (0.56)	9.85	0.76	0.58
M2	0.85 (1.10)	9.55	1.30 (2.08)	14.61	1.10 (1.47)	12.36	1.06 (3.60)	11.91	1.20 (1.79)	13.48	0.27	0.92
<i>TKE</i> cm ² /s												
S1	20.74 (19.2)	12.65	22.32 (20.3)	13.61	22.54 (18.4)	13.74	23.01 (20.9)	14.03	23.51 (22.0)	14.34	0.23	0.96
S2	19.01 (18.5)	15.21	20.5 (19.0)	16.40	21.12 (22.9)	16.90	19.65 (20.1)	15.72	20.19 (19.7)	16.15	0.07	0.99
M1	7.53 (7.33)	15.4	7.79 (7.77)	15.9	7.10 (6.64)	14.5	7.03 (6.76)	14.4	7.03 (6.76)	14.35	0.16	0.95
M2	14.66 (37.1)	14.51	20.3 (49.9)	20.10	16.69 (39.2)	16.52	17.02 (38.1)	16.85	17.11 (39.1)	16.94	0.67	0.95

Tableau 3.9 Moyenne et écart-type (entre parenthèses) de la différence absolue moyenne ($|\overline{\Delta z}|$) entre les valeurs mesurées et les valeurs estimées de 20 groupes-test (N=10% des échantillons de chaque section, densité = 14.4 points/m²) pour trois variables (*U*, *RMS_u* et *TKE*) et pour cinq modèles d'interpolation : linéaire, cubique, distance inverse, krigeage et voisin naturel. F et p représentent les indices de tests ANOVA comparant $|\overline{\Delta z}|$ des cinq modèles.

3.2.2 Performance du modèle linéaire

Pour les sous-échantillons de 10% présentés au tableau 3.9, le modèle d'interpolation linéaire a généré des erreurs distribuées de part et d'autre de la moyenne sans biais évident d'estimation (Fig. 3.17 à 3.19).

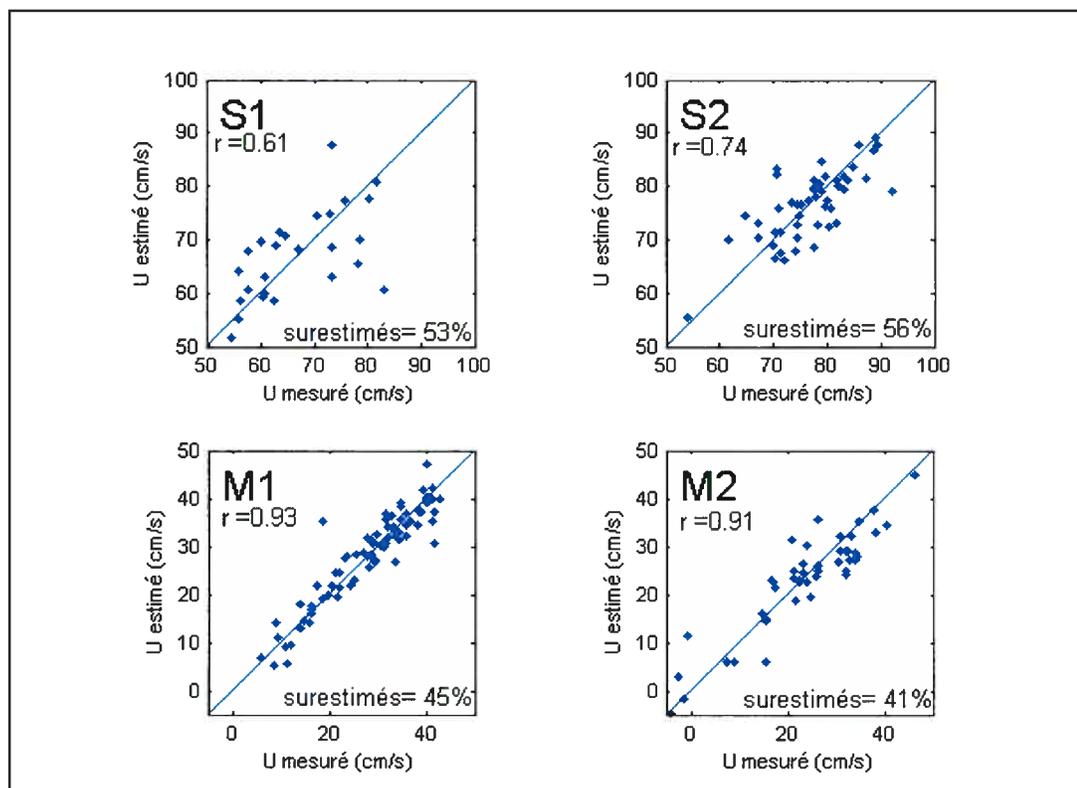


Figure 3.17 Valeurs de U 'estimées' par un modèle d'interpolation linéaire en fonction des valeurs 'mesurées' d'un échantillon test de 10% des points de mesures de chaque section et proportion des valeurs surestimées par le modèle.

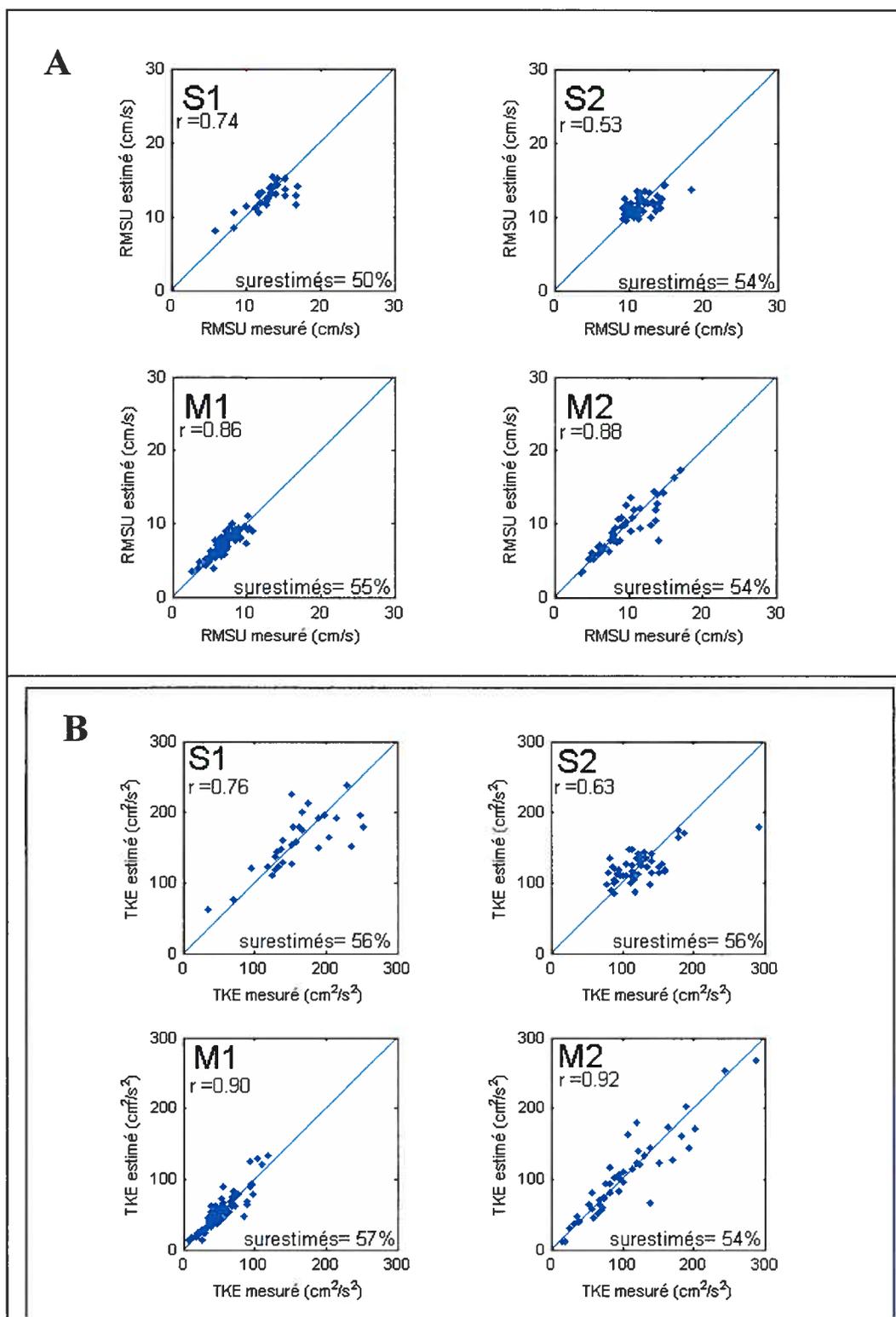


Figure 3.18 A) Valeurs de RMS_U et B) TKE estimées par un modèle d'interpolation linéaire en fonction des valeurs mesurées d'un échantillon test de 10% des points de mesures de chaque section et proportion de valeurs surestimées par le modèle.

Cela suggère que de façon générale, le modèle d'interpolation ne présente pas de tendance forte à surestimer ou sous-estimer ce type de données. Toutefois, la vitesse longitudinale a été plus souvent surestimée dans les seuils (Fig. 3.17 ; 53 et 56%), alors qu'elle a été plus souvent sous-estimée dans les mouilles (45 et 41%). Dans le cas de RMS_U et de TKE , le modèle linéaire a dans presque tous les cas faiblement surestimé les valeurs, avec des proportions allant de 54 à 57% de valeurs surestimées (Fig. 3.18). L'interpolation linéaire de RMS_U dans le Seuil 1 présente quant à elle autant de valeurs surestimées que de valeurs sous-estimées.

Les erreurs reliées aux sous-échantillons de 10% présentées aux figures 3.17 et 3.18 montrent une meilleure performance du modèle dans les deux mouilles que dans les deux seuils, illustrée par une différence dans les coefficients de corrélation (r) (Fig. 3.17 ; 3.18). Toutefois, les coefficients de corrélation sont des indicateurs à interpréter avec précaution parce que les variables et les sections ne présentent pas toutes exactement les mêmes distributions. De plus, l'examen d'un seul sous-échantillon test de 10 % par section n'assure pas une représentativité permettant de comparer les sections entre elles de façon fiable. Par conséquent, nous avons fait la moyenne de 30 sous-échantillons pour examiner la relation entre la densité d'échantillonnage et la performance de l'interpolation et comparer les sections entre elles.

3.2.3 Effet de la densité d'échantillonnage sur l'exactitude du modèle d'interpolation

Afin d'étudier la relation entre la densité d'échantillonnage et les erreurs du modèle d'interpolation, nous avons utilisé une méthode similaire à un *bootstrapping*. Cette méthode de décimation permet d'illustrer la forme que prend la relation entre l'erreur et la densité d'échantillonnage. Les figures 3.19 à 3.21 présentent les relations entre les différences absolues moyennes, les erreurs relatives, les coefficients de corrélation et la densité d'échantillonnage pour chacune des variables. Nous présentons ici les moyennes et les écarts-types des décimations basés sur 30 itérations.

La méthode de décimation utilisée révèle l'existence pour plusieurs variables de courbes asymptotiques caractérisées par un effet de seuil (threshold effect) (Fig. 3.19 à 3.21).

Nous considérons ces seuils estimés visuellement, que nous appellerons ‘valeurs critiques’, comme la densité d’échantillonnage représentant un compromis optimal limitant à la fois les efforts d’échantillonnage sur le terrain et les erreurs associées à l’interpolation des données ponctuelles.

Notons d’abord que l’écart-type des erreurs montre une tendance à augmenter avec la densité d’échantillonnage. Cela est dû à la taille des échantillons utilisés pour estimer les erreurs. Par exemple, pour calculer l’erreur moyenne reliée à 95 % de la densité maximale (15.2 points/m²), des sous-échantillons de 5 % ont été utilisés. Toutefois, pour calculer l’erreur moyenne reliée à une densité de 20% de la densité maximale (3.2 points /m²), des sous-échantillons de 80 % du total sont utilisés. Il est normalement attendu que les sous-échantillons de 80 % du total soient peu différents les uns des autres, comme ils comportent une grande proportion de la population totale. À l’opposé, les sous-échantillons de 5 % ont plus de chances d’être très variables. C’est ce qui explique en partie que les écarts-types des erreurs à forte densité d’échantillonnage soient plus élevés que ceux à faible densité.

3.2.3.1 Densité optimale : Vitesse moyenne

La courbe de la relation entre la densité d’échantillonnage et les indices d’erreur d’interpolation de U se présente sous la forme asymptotique (Fig. 3.19). Les courbes montrent des valeurs critiques clairement définies dans les mouilles, c’est-à-dire que l’erreur n’augmente que très peu après la valeur critique. Par contre, dans les seuils, on observe des ruptures de pente, mais l’erreur continue de diminuer progressivement en fonction de la densité d’échantillonnage au-delà des valeurs critiques estimées. Les valeurs critiques des sections varient entre 4 et 7 points/ m², celles des mouilles étant légèrement inférieures à celles des seuils. Les quatre sections présentent des corrélations entre les valeurs estimées et mesurées variant entre 0.6 et 0.9. Par ailleurs, les sections présentant les erreurs absolues les plus élevées ne présentent pas nécessairement les erreurs relatives les plus hautes. Par exemple, le Seuil 1 présente les différences absolues les plus élevées, mais ses erreurs relatives sont comparables à celles de la Mouille 1 (10 à 20 %). La Mouille 3 montre des erreurs relatives les plus élevées (20 à 40 %), en raison de la moyenne de U dans la section qui y est relativement basse (21 cm/s). Enfin, le Seuil 2 exhibe les erreurs relatives les plus faibles, en raison de la moyenne de U dans la section qui y est élevée (77 cm/s).

Les courbes des indices d'erreur d'interpolation de V en fonction de la densité d'échantillonnage sont similaires à celles de U . Les quatre sections présentent des valeurs critiques clairement identifiables variant entre 2 et 4 points/m². Bien que les valeurs estimées montrent généralement une corrélation relativement élevée entre les valeurs estimées et les valeurs mesurées, les erreurs relatives varient toutefois entre 25 et 40 % pour les mouilles et le Seuil 1. Le Seuil 2 présente les erreurs relatives les plus élevées, avec des erreurs s'élevant à environ 70%.

Les courbes d'indices d'erreur d'interpolation de W présentent des ruptures de pentes moins abruptes que celles de U et V . En effet, à l'exception du Seuil 1 qui présente un plateau, les erreurs estimées diminuent progressivement en fonction de la densité d'échantillonnage. Les valeurs critiques estimées pour W varient entre 6 et 9 points/m². Les erreurs relatives y sont très élevées, oscillant entre 60 à 130%. Si les erreurs relatives de V et W sont aussi élevées, c'est en partie parce que les valeurs moyennes de V et W des tronçons sont très basses (< 4 cm/s). Les coefficients de corrélation suggèrent que la performance de l'interpolation de W est nettement plus faible performance de U et V , avec des des valeurs oscillant entre 0.3 et 0.7 à la valeur d'échantillonnage critique estimée.

3.2.3.2 Densité d'échantillonnage optimale : Intensité turbulente

Comme pour la vitesse moyenne, les courbes d'erreurs d'interpolation de l'intensité turbulente dans les trois dimensions présentent pour la plupart des courbes à tendance asymptotique (Fig. 3.20).

Pour RMS_U , des 'effets de seuil' sont clairement identifiables pour les deux mouilles et le Seuil 1 et les valeurs critiques varient entre 3 et 5 points/m² pour les mouilles et le Seuil 1. La valeur critique est d'approximativement 8 points/m² pour le Seuil 2. La différence entre la performance du modèle d'interpolation dans les seuils et dans les mouilles est mise en évidence par le coefficient de corrélation clairement plus élevé dans les mouilles. Néanmoins, la variabilité des erreurs absolues demeure restreinte. En effet, ces dernières varient de 0.5 à 2.5 cm/s, ce qui équivaut à des erreurs relatives de 8 à 20 %.

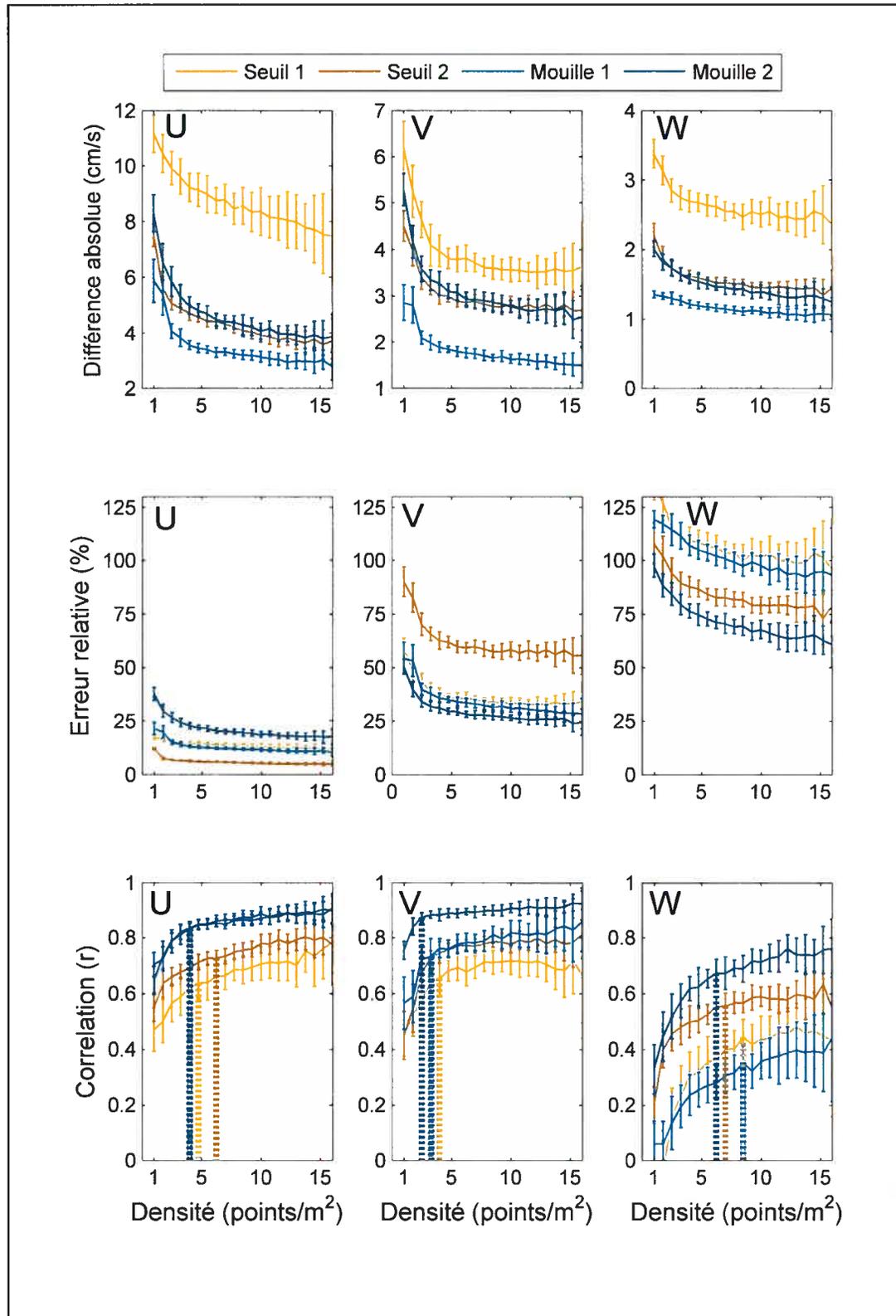


Figure 3.19 Différence absolue ($|\overline{\Delta z}|$), erreur relative ($(|\overline{\Delta z}| / \text{moyenne du tronçon}) \cdot 100$) et coefficient de corrélation entre les valeurs mesurées et prédites par l'interpolation en fonction de la densité d'échantillonnage (points / m²) de la vitesse moyenne dans les trois dimensions orthogonales. Les lignes pointillées verticales indiquent les valeurs critiques optimales estimées visuellement.

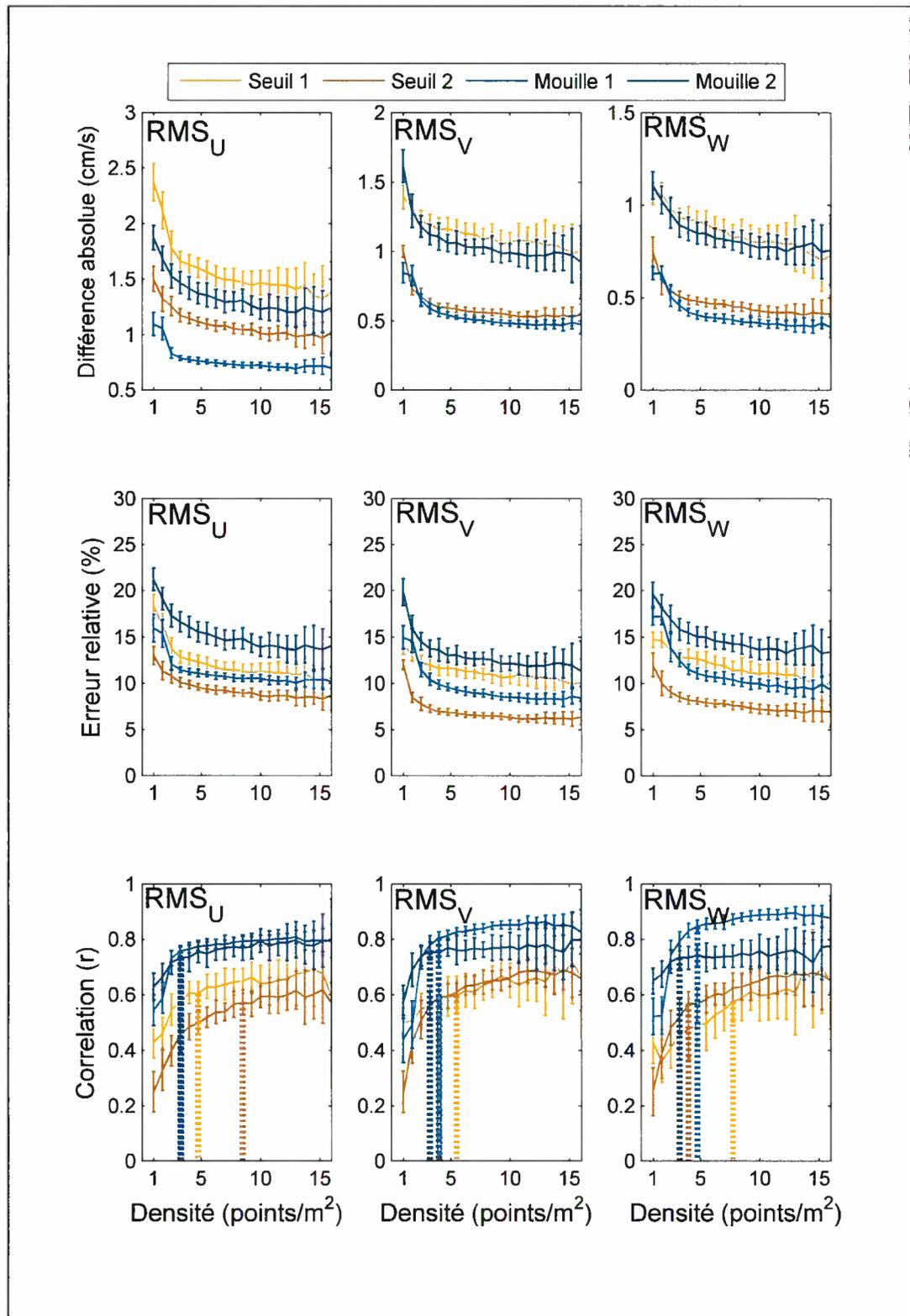


Figure 3.20 Différence absolue ($|\overline{\Delta z}|$), erreur relative ($(|\overline{\Delta z}| / \text{moyenne du tronçon}) * 100$) et coefficient de corrélation entre les valeurs mesurées et prédites par l'interpolation en fonction de la densité d'échantillonnage de l'intensité turbulente dans les trois dimensions orthogonales. Les lignes pointillées verticales indiquent les valeurs critiques optimales estimées visuellement.

L'allure des courbes de différence absolue moyenne et d'erreur relative de RMS_V est similaire à celles de RMS_U . Les valeurs critiques optimales estimées des quatre sections varient entre 3 et 6 points/ m². Les erreurs estimées pour le Seuil 2 sont légèrement supérieures à celles estimées pour RMS_U . De plus, les erreurs absolues et relatives de RMS_V sont aussi parmi les plus basses de toutes les variables (≈ 0.75 cm/s; 8%).

Les courbes d'erreur d'interpolation de RMS_W sont aussi similaires à celles de l'intensité turbulente longitudinale et verticale. Les mouilles présentent des valeurs critiques clairement définies, entre 3 et 5 points/m². Les erreurs relatives des deux seuils sont comparables à celles de l'intensité turbulente longitudinale et latérale. Notons aussi que même si les corrélations de RMS_U , RMS_V et RMS_W sont généralement inférieures à celles de U et V , les erreurs relatives des intensités turbulentes sont nettement inférieures.

À l'instar des courbes d'erreur d'interpolation des vitesses moyennes, les courbes du cisaillement de Reynolds et de TKE présentent des résultats mitigés (Fig. 3.21). Pour τ , les courbes de corrélation des seuils et de la Mouille 1 sont relativement basses à toutes les densités. En contrepartie, il est possible d'établir des seuils dans le comportement des courbes de ces trois sections. Les valeurs critiques que nous avons estimées pour ces trois sections varient entre 4 et 7 points/m². Toutefois, aucune valeur critique n'a pu être estimée pour la Mouille 1, comme elle présente peu de variation des erreurs en fonction de la densité d'échantillonnage. De plus, les erreurs relatives de τ variant de 25 à 75 % sont nettement plus élevées que celles observées pour les intensités turbulentes.

Les courbes d'erreur d'interpolation de TKE présentent une forme qui s'apparente davantage à celle des trois composantes de l'intensité turbulente. Ce résultat est attendu, comme le calcul de TKE est composé de la somme des RMS dans les trois dimensions. On y observe une différence évidente entre les courbes de corrélation des deux seuils et celles des deux mouilles (Fig. 3.21). Toutefois, cette différence ne se manifeste pas sur les valeurs critiques de densité optimale. En effet, les valeurs critiques estimées sont relativement basses pour toutes les sections (2.5 à 4 points/m²). Par ailleurs, les erreurs relatives varient peu entre les sections, suggérant ici une erreur proportionnelle à la magnitude de TKE (≈ 20 à 30 %)

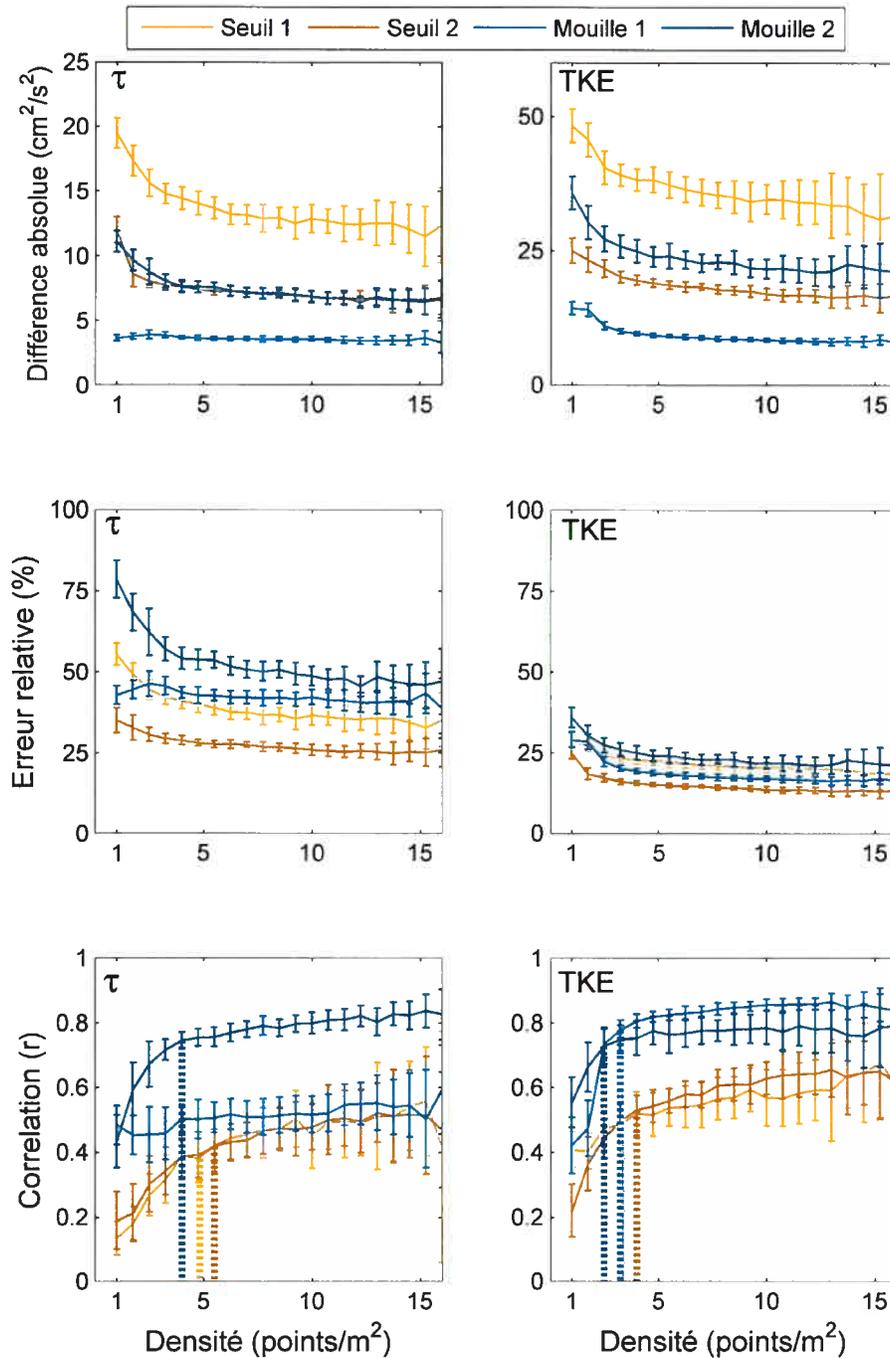


Figure 3.21 Différence absolue ($|\overline{\Delta z}|$), erreur relative ($(|\overline{\Delta z}| / \text{moyenne du tronçon}) \cdot 100$) et coefficient de corrélation entre les valeurs mesurées et prédites par l'interpolation en fonction de la densité d'échantillonnage du cisaillement de Reynolds moyen et de l'énergie cinétique moyenne. Les lignes pointillées verticales indiquent les valeurs critiques optimales estimées visuellement.

De façon générale les valeurs critiques que nous avons estimées pour les mouilles sont inférieures à celles des seuils (Fig. 3.22). La variable W présente des valeurs critiques plus élevées dans les quatre sections que les autres variables ($W \approx 6 < x > 9$ points/m²).

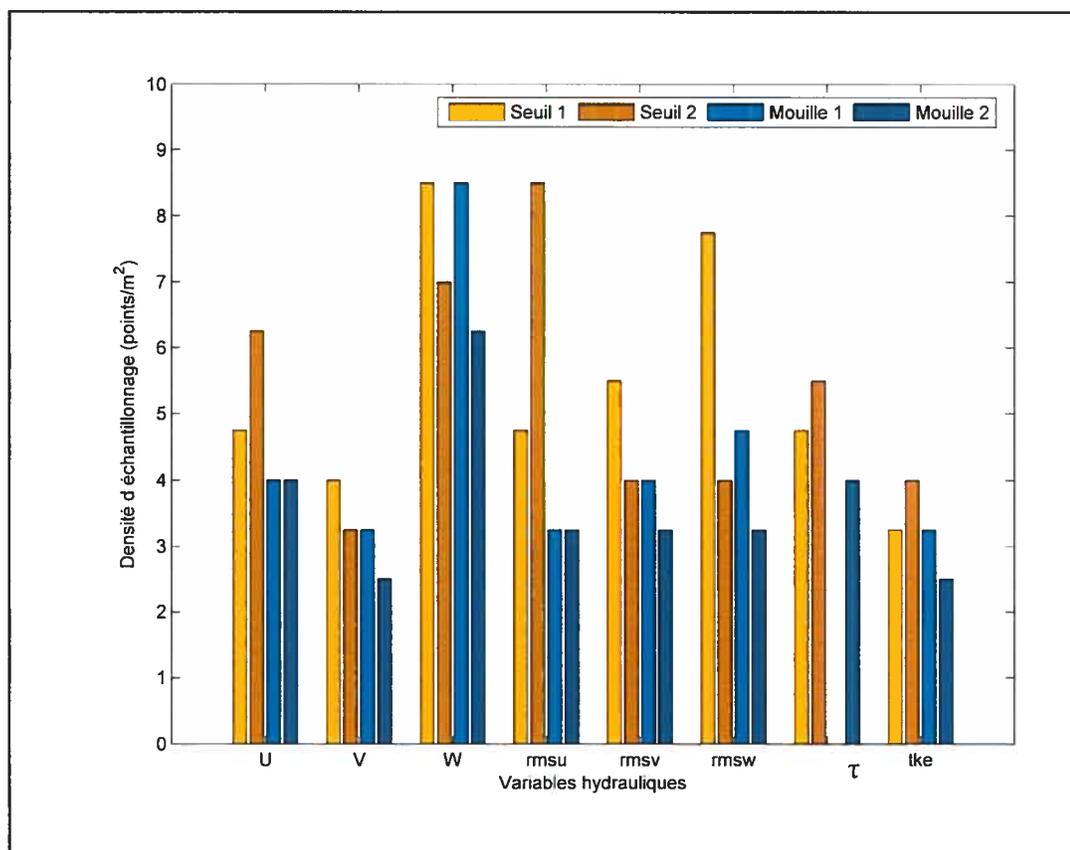


Figure 3.22 Valeurs critiques de densité d'échantillonnage optimales estimées pour les variables hydrauliques dans les quatre sections.

À l'exception de W , les valeurs critiques des mouilles varient entre 2.5 et 4 points/m². Pour les seuils, ces valeurs oscillent entre 3.25 et 8.25 points/m², avec la majorité des valeurs critiques inférieures à 5.5 points/m².

À la lumière de ces résultats, nous considérons que la valeur critique de densité d'échantillonnage de 4 points/m² pour les seuils et de 5.5 points/m² pour les mouilles correspond à un compromis minimisant les efforts d'échantillonnage et maximisant l'exactitude du modèle. La figure 3.23 résume les corrélations et les erreurs relatives pour les seuils et les mouilles à ce seuil d'échantillonnage jugé optimal.

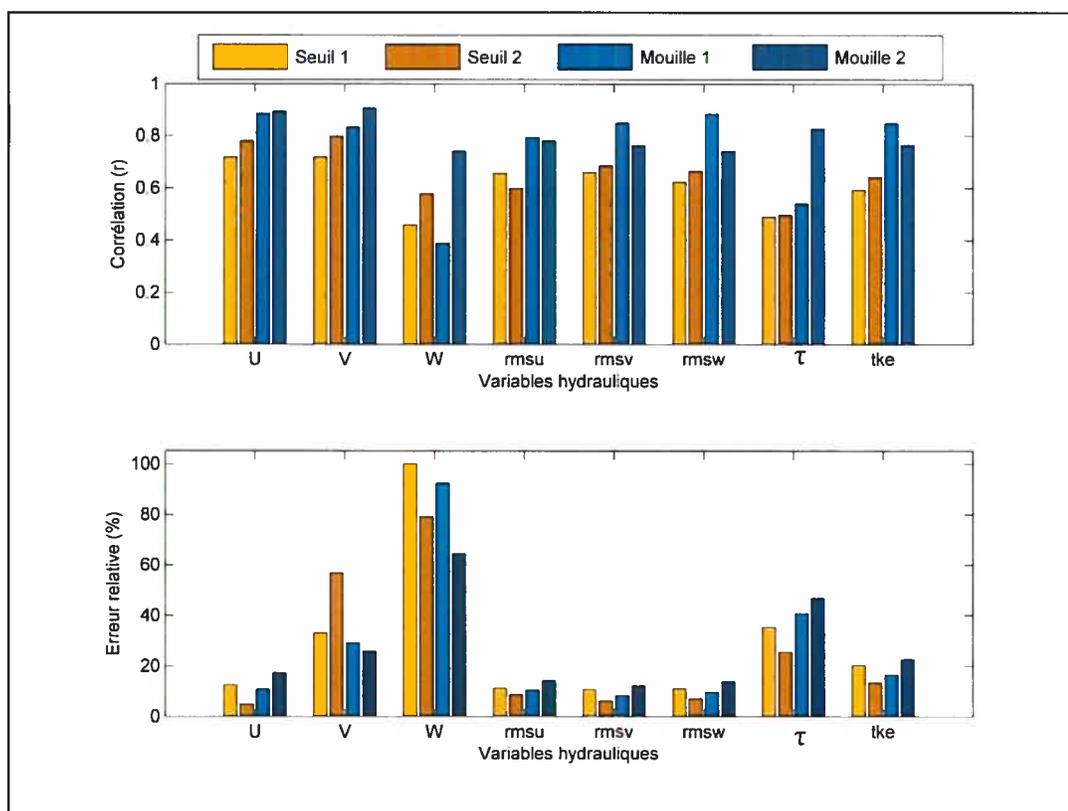


Figure 3.23 Moyenne des corrélations entre les valeurs estimées et mesurées et des erreurs relatives à une valeur critique estimée (Seuils : 5.5 points/m² ; Mouilles : 4 points/m²).

Aux densités critiques optimales, les corrélations sont supérieures à 0.6 pour toutes les variables, excepté W et τ , qui montrent des erreurs plus élevées, particulièrement dans les seuils et dans la mouille 1. Les composantes de l'intensité turbulente et la vitesse moyenne longitudinale sont les mieux représentées par l'interpolation, avec des erreurs relatives inférieures à 20 %. Pour la plupart des variables, les erreurs relatives présentent une faible variabilité entre les sections, suggérant que l'erreur soit en partie proportionnelle à la magnitude des variables mesurées. Néanmoins, les caractéristiques morphologiques pourraient avoir un effet sur la performance de l'interpolation.

3.2.4 La variabilité de la performance entre les sections : rugosité et hétérogénéité

Malgré le petit nombre de sections étudiées, une relation linéaire significative ($\alpha = 0.05$) a été observée entre la rugosité du lit et l'hétérogénéité hydraulique des quatre sections,

ici illustrée par le coefficient de variation de U , RMS_U et TKE (écart-type /moyenne du tronçon). Des relations similaires, significatives dans le cas de RMS_U , ont aussi été observées entre le coefficient de variation et les erreurs relatives d'interpolation.

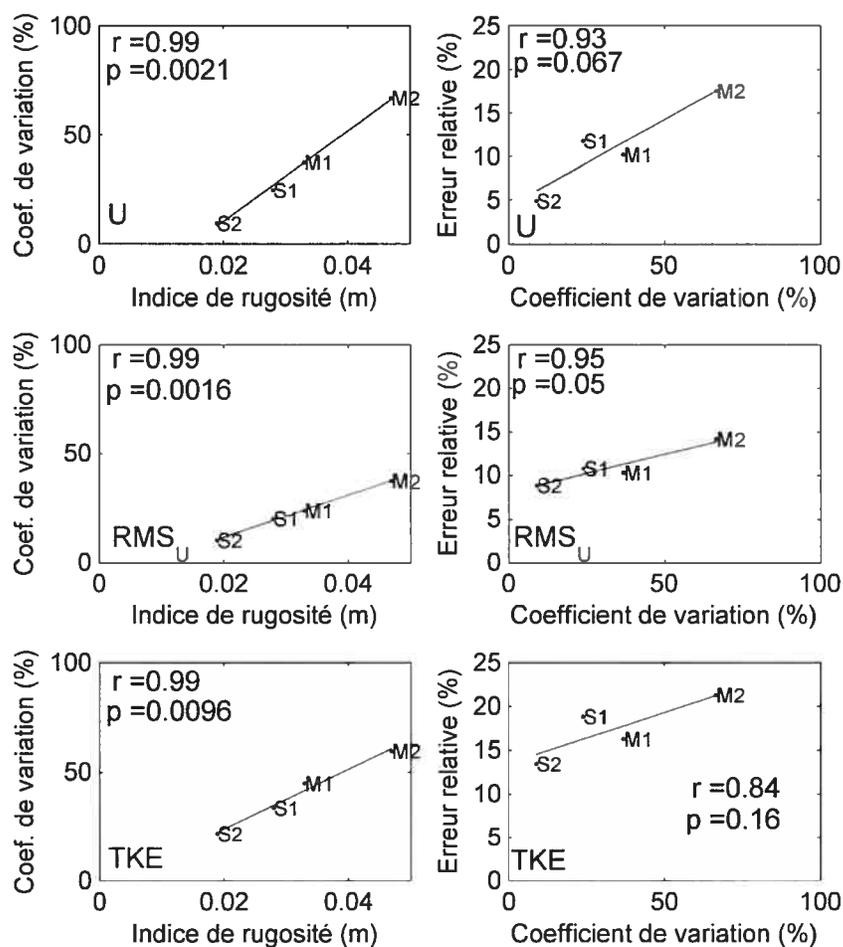


Figure 3.24 Coefficient de variation (écart-type/moyenne des sections) en fonction de la rugosité du lit moyenne et erreur relative d'interpolation en fonction du coefficient de variation des quatre sections Seuil 1, Seuil 2, Mouille 1 et Mouille 2.

Ces corrélations suggèrent que plus les sections sont hétérogènes, moins l'interpolation est performante. Néanmoins, en dépit de la grande variabilité de l'hétérogénéité des sections, les erreurs varient très peu entre les sections. En effet, les erreurs relatives de RMS_U et de TKE varient approximativement entre 10 et 15 % et entre 15 et 20% respectivement.

L'estimation des erreurs d'interpolation pour des densités d'échantillonnage variées nous a permis d'estimer des seuils que l'on interprète comme une densité optimale. Cependant, ces erreurs fournissent peu d'information sur la structure spatiale des champs de vitesse et de turbulence. Donc, pour investiguer cette structure spatiale et améliorer la stratégie d'échantillonnage, nous avons fait appel aux géostatistiques.

3.2.5 Semivariogrammes directionnels

Pour quantifier les patrons spatiaux de vitesse et de turbulence présentés aux figures 3.4 à 3.14, nous avons utilisé des semivariogrammes directionnels empiriques orientés dans les directions longitudinale (l) et transversale (t) pour chaque variable hydraulique (Fig. 3.25 à 3.27). La structure spatiale des variables a été résumée en 'ajustant' des modèles paramétriques et en estimant trois paramètres : l'effet de pépite, la portée et le palier (Tab. 3.10).

L'estimation automatisée des paramètres de modèles de covariance (méthode des moindres carrés) constitue un enjeu important de l'utilisation de cette méthode. D'une part, un semivariogramme fortement bruité ayant l'allure d'un 'effet de pépite pure' (*pure nugget effect* : peu ou pas de structure spatiale) est souvent considéré par un algorithme d'ajustement comme un modèle de covariance dont la portée est très longue (Legleiter *et al.* sous presse). Dans ces cas, nous n'avons pas retenu les paramètres et un effet de pépite pure a plutôt été estimé visuellement d'une manière similaire à celle utilisée par Legleiter *et al.* (sous presse). D'autre part, il arrive qu'un semivariogramme ne présente pas de palier, mais plutôt une croissance progressive de la semivariance en fonction du pas d'échantillonnage. Ces cas surviennent lorsque la variance n'est pas uniforme sur l'ensemble de la surface étudiée. Lorsque ce phénomène a été observé, aucun modèle paramétrique n'a pu être ajusté et interprété. Toutefois, l'effet de pépite a été estimé pour toutes les sections en utilisant une procédure commune en géostatistiques, soit l'extrapolation linéaire des premiers pas d'échantillonnage vers l'abscisse à l'origine (Goovaerts, 1997).

3.2.5.1 Vitesses moyennes

Les semivariogrammes montrent une gamme de comportements et illustrent clairement l'asymétrie de la structure spatiale de U (Fig. 3.25). Dans toutes les sections, les valeurs de $\gamma(h)$ dans la direction t sont nettement plus élevées que dans la direction l . Les valeurs du palier t du Seuil 1 et de la Mouille 2 sont respectivement près de deux et quatre fois plus élevées que les valeurs du palier s (Tab. 3.10). Dans le cas du Seuil 2 et de la Mouille 1, la variance augmente progressivement de façon quasi linéaire sans atteindre de plateau dans l'intervalle d'échantillonnage observé. Ce type de courbe sans plateau met en évidence l'asymétrie de la distribution de U dans le Seuil 2 et la Mouille 1. En effet, U est nettement plus élevé sur la rive gauche de ces sections que sur la rive droite (Fig. 3.4). Dans la direction longitudinale, la structure spatiale de U dans les quatre sections montre peu de variabilité, avec des paliers variant de 0.37 à 0.59 et des portées variant entre 1 et 2 mètres. À l'opposé, les sections se distinguent dans l'axe transversal, notamment par leur portée. L'absence de portée pour le Seuil 2 et la Mouille 1 illustre une corrélation spatiale entre les échantillons sur une distance supérieure à 4 m. De façon similaire, la portée dans la direction l est nettement supérieure à la portée longitudinale. À l'inverse, la portée transversale du Seuil 1 est inférieure à la portée longitudinale (Tab. 3.10). Ces résultats suggèrent que dans ces trois sections où la variabilité transversale de la bathymétrie est la plus importante, la corrélation spatiale dans la direction t s'étend sur une plus longue distance que dans la direction l (S2, M1 et M2). Le Seuil 1 est davantage étroit et sa variabilité transversale bathymétrique est davantage reliée à la microtopographie. Par conséquent, il n'est donc pas surprenant d'y observer une portée transversale inférieure à la portée longitudinale. En général, l'effet de pépite, représentant la combinaison de l'erreur d'échantillonnage et de la variabilité spatiale survenant à une échelle inférieure à 0.25 m, est relativement bas (5 à 8 %), excepté pour la direction transversale de la Mouille 1, qui montre une erreur plus élevée (22 % ; Tab. 3.10).

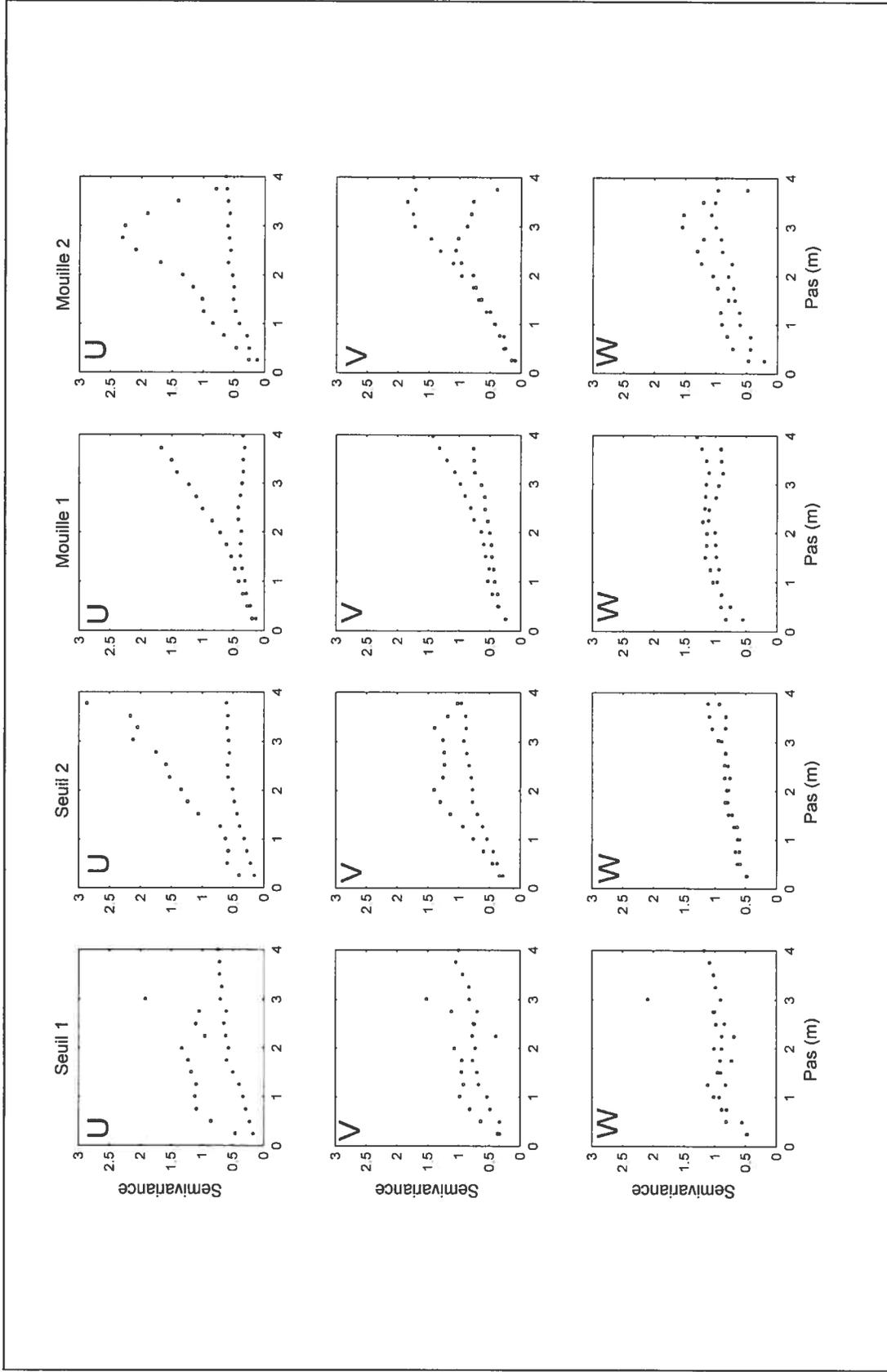


Figure 3.25 Semivariogrammes directionnels normalisés longitudinaux (cercles pleins) et transversaux (cercles vides) de la vitesse moyenne de l'écoulement U , V et W sur une distance de 4 m.

	Paramètres	Seuil1		Seuil 2		Mouille 1		Mouille 2	
		<i>l</i>	<i>t</i>	<i>l</i>	<i>t</i>	<i>l</i>	<i>t</i>	<i>l</i>	<i>t</i>
<i>U</i>	Pépité	0.05	0.05	0.07	0.21	0.04	0.08	0.07	0.07
	Modèle	exp	exp	exp	----	exp	----	exp	spher
	Pallier	0.59	1.15	0.58	----	0.37	----	0.42	1.5
	Portée (m)	1.75	0.75	2.00	----	1.00	----	1.25	2.00
<i>V</i>	Pépité	0.14	0.14	0.18	0.18	0.10	0.10	0.01	0.01
	Modèle	exp	exp	exp	spher	----	exp	exp	spher
	Pallier	0.6	0.9	0.76	1.39	----	0.48	1.64	0.87
	Portée (m)	1.25	1.00	1.75	1.50	----	1.25	2.75	2.00
<i>W</i>	Pépité	0.28	0.50	0.35	0.35	0.28	0.77	0.05	0.18
	Modèle	exp	exp	exp	exp	exp	exp	exp	exp
	Pallier	0.97	0.93	0.92	0.84	1.11	1.03	0.88	1.18
	Portée (m)	1	0.5	1	0.75	1	0.5	2	1.5
<i>RMS_U</i>	Pépité	0.12	0.21	0.11	0.50	0.07	0.07	0.10	0.10
	Modèle	exp	spher	exp	----	exp	spher	exp	----
	Pallier	0.66	1.04	0.64	----	0.49	1.33	0.40	----
	Portée (m)	2.25	1.00	1.75	----	1.50	2.25	0.75	----
<i>RMS_V</i>	Pépité	0.04	0.07	0.12	0.38	0.07	0.07	0.21	0.14
	Modèle	exp	spher	exp	pépité	exp	gauss	exp	----
	Pallier	0.6	1.08	0.96	----	0.64	1.26	0.46	----
	Portée (m)	1.75	0.75	2.50	----	2.25	1.75	1.00	----
<i>RMS_W</i>	Pépité	0.13	0.38	0.14	0.76	0.01	0.01	0.28	0.04
	Modèle	exp	exp	exp	pépité	spher	gauss	exp	----
	Pallier	0.78	1.09	1.02	----	0.89	1.09	0.52	----
	Portée (m)	1.75	0.50	3.00	----	2.50	1.50	1.00	----
<i>τ</i>	Pépité	0.28	0.5	0.21	0.68	0.28	0.5	0.28	0.07
	Modèle	exp	exp	exp	pépité	exp	exp	exp	exp
	Pallier	0.82	1.1	0.88	----	0.86	1.29	0.51	1.23
	Portée (m)	2.25	1.25	1.75	----	2.25	1.75	1.00	2.25
<i>TKE</i>	Pépité	0.04	0.28	0.14	0.57	0.10	0.10	0.10	0.10
	Modèle	exp	exp	exp	exp	exp	gauss	exp	----
	Pallier	0.72	0.79	0.69	1.05	1.18	0.86	0.45	----
	Portée (m)	2.00	1.00	2.00	1.25	2.50	1.75	1.00	----

Tableau 3.10 Paramètres des modèles de covariance (exp : exponentiel, spher : sphérique, gauss : gaussien) ajustés aux variogrammes directionnels des variables hydrauliques dans la direction longitudinale (*l*) et transversale (*t*).

Dans toutes les sections, les semivariogrammes de *V* présentent une plus grande similarité entre les directions *l* et *t* que ce n'est le cas pour *U* (Fig. 3.25). Néanmoins, nous observons une différence entre les seuils et les mouilles. Dans les mouilles, la plus grande variabilité (palier élevé) survient dans le sens longitudinal, alors que dans les seuils, la variabilité est supérieure dans l'axe transversal (Fig. 3.5). De plus, la vitesse

latérale est corrélée spatialement sur une distance plus longue dans la Mouille 2 que dans les autres sections (Tab. 3.10 ; portée : l , 2.75 ; t , 2.0). La Mouille 2, caractérisée par une forte influence de la vitesse moyenne latérale, se distingue aussi par un effet de pépite très bas (0.01). Les valeurs d'effet de pépite de V estimées pour les autres sections sont toutefois supérieures à celles estimées pour U (0.10 à 0.18).

La structure spatiale de W se distingue nettement de celle de U et de V . À l'exception de la Mouille 2, les semivariogrammes des directions l et t présentent une forte similarité (Fig. 3.25, 3^e rangée). Dans les deux seuils et la Mouille 1, la portée est relativement courte (0.5 à 1 m). La Mouille 2, dont la pente est beaucoup plus forte que les autres sections (Tab. 2.1, 0.04), présente des corrélations spatiales qui s'étendent sur une plus longue distance que les autres sections (Tab. 3.10, portée : l 1.5 m, t 2 m). La Mouille 2 montre aussi les effets de pépite les plus bas (Tab. 3.10, pépite : l 0.05 , t 0.18). Néanmoins, l'effet de pépite des autres sections varie entre 0.28 et 0.77, ce qui indique qu'une proportion considérable de la variabilité de W survient à une échelle inférieure au pas d'échantillonnage de 0.25 m.

3.2.5.2 Intensités turbulentes, cisaillement de Reynolds et énergie cinétique turbulente

Contrairement à U , V et W , les trois composantes orthogonales de l'intensité turbulente sont fortement corrélées entre elles, et ce dans toutes les sections (Tab. 3.7). Ce phénomène se reflète dans les structures spatiales de RMS_U , RMS_V et RMS_W , qui présentent de fortes similarités (Fig. 3.26). À quelques exceptions près, la structure spatiale de l'intensité turbulente est presque aussi bien définie à cette échelle que celle observée pour U .

Comme c'est le cas pour U , la structure spatiale de RMS_U diffère fortement selon la direction observée (Fig. 3.26). En effet, dans toutes les sections, les valeurs de $g(h)$ sont toujours plus élevées dans la direction transversale que dans la direction longitudinale.

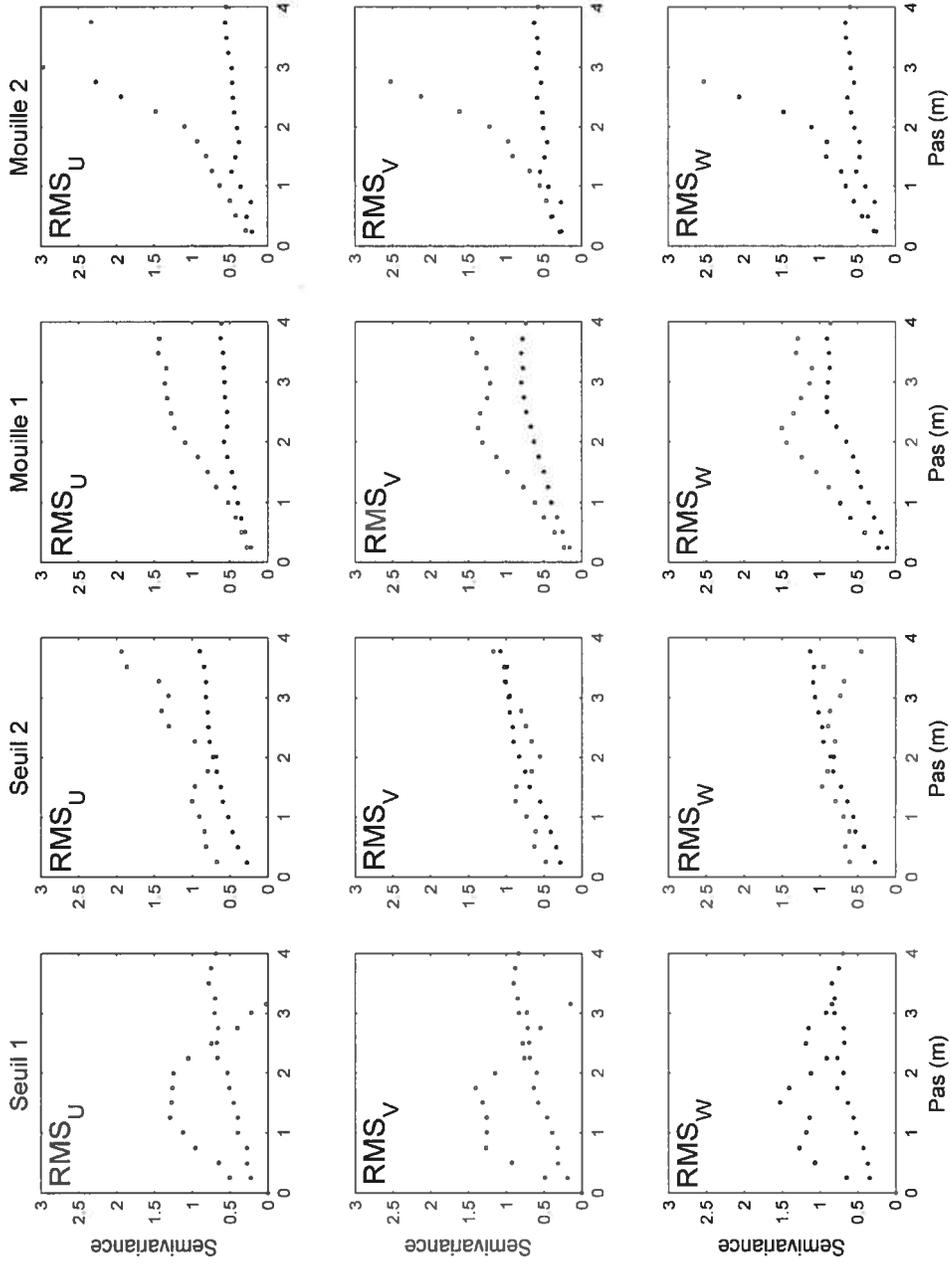


Figure 3.26 Semivariogrammes directionnels normalisés longitudinaux (cercles pleins) et transversaux (cercles vides) de l'intensité turbulente de l'écoulement dans les trois dimensions RMS_U , RMS_V et RMS_W sur une distance de 4 m.

De plus, les semivariogrammes dans la direction l sont peu bruités et montrent une forte similarité entre les sections. Toutefois, les valeurs de portée indiquent que dans l'axe l , l'intensité turbulente longitudinale est corrélée sur une plus longue distance dans les seuils que dans les mouilles (Tab. 3.10).

Dans l'axe transversal, la structure spatiale présente une plus grande variabilité. Le Seuil 2 et la Mouille 2 montrent une augmentation progressive de $g(h)$ sans palier. Notons aussi la faible cohérence spatiale du Seuil 2 dans la direction transversale, illustrée par un variogramme bruité. Ensuite, la Mouille 1 présente un palier clairement défini dans la direction t , contrairement à ce que nous avons observé pour U . De plus, les valeurs d'effet de pépité sont relativement faibles et varient entre 0.07 et 0.12, excepté dans la direction transversale du Seuil 2 et de la Mouille 1, où l'effet de pépité a atteint 0.5 et 0.21 respectivement (Tab. 3.10).

La structure spatiale de RMS_V (Fig. 3.26), illustrée par les semivariogrammes, présente *grosso modo* les mêmes caractéristiques que la structure spatiale de RMS_U . Toutefois, le patron spatial de RMS_V dans la direction transverse du Seuil 2 est moins défini et s'apparente à un effet de pépité pure. Une autre différence concerne la Mouille 1, pour laquelle la portée dans la direction l (2.25 m) est supérieure à celle de la direction t (1.75), soit l'inverse de ce qui a été observé pour RMS_U (Tab. 3.10).

RMS_W montre aussi une structure spatiale similaire (Fig. 3.26). Toutefois, dans la direction transversale du Seuil 1, le semivariogramme prend une forme davantage bruitée alors que celui du Seuil 2 s'apparente à un effet de pépité pure. D'ailleurs, les valeurs d'effet de pépité sont plus élevées que celles estimées pour RMS_V et RMS_W . De plus, notons que l'intensité turbulente verticale présente des patrons spatiaux plus cohérents et sur une plus longue distance que la vitesse moyenne verticale à l'échelle échantillonnée dans cette étude.

Les semivariogrammes du cisaillement de Reynolds (Fig. 3.27) s'apparentent fortement aux semivariogrammes de l'intensité turbulente, plus particulièrement à ceux de RMS_W . Dans les Seuils et la Mouille 1, τ est corrélé sur une distance plus longue dans la direction longitudinale que transversale (Tab. 3.10).

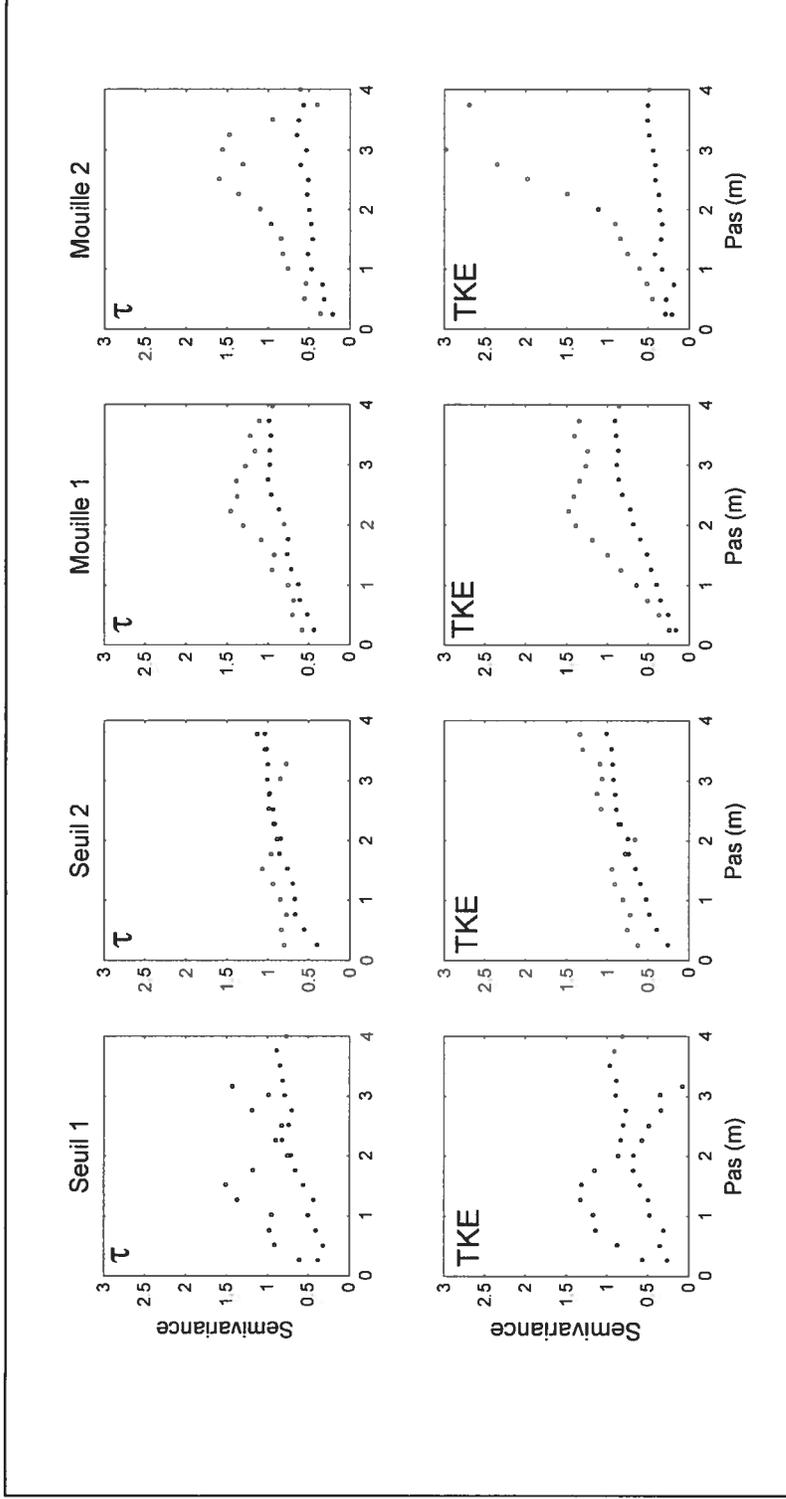


Figure 3.27 Semivariogrammes directionnels normalisés longitudinaux (cercles pleins) et transversaux (cercles vides) du cisaillement de Reynolds et de l'énergie cinétique turbulente sur une distance de 4 m.

À l'inverse, dans la Mouille 2, fortement influencée par une dénivellation abrupte induite par la roche en place, la portée longitudinale est inférieure à la portée transversale. C'est d'ailleurs dans la Mouille 2 et le Seuil 1 que l'on retrouve la plus forte différence de valeur de palier entre la direction l et t .

La structure spatiale de TKE s'apparente aussi très fortement à celle des RMS (Fig. 3.27). Ce phénomène n'est guère surprenant parce que d'une part, cette variable est constituée à partir des trois composantes orthogonales de l'intensité turbulente et d'autre part, ces trois variables ont une structure similaire et sont corrélées entre elles. On note toutefois que les seuils et la Mouille 1 ont des portées longitudinales allant de 2 à 2.5 m, ce qui suggère que cette variable soit distribuée de façon cohérente dans cette direction. Pour les mouilles, l'effet de pépité est relativement bas dans les deux directions (0.10), alors que pour les seuils, milieux plus turbulents, l'effet de pépité se révèle jusqu'à quatre fois plus élevé dans la direction transversale.

En somme, l'intensité turbulente présente de grands patrons à l'échelle du tronçon et cette variable ne requiert qu'une densité de points de mesure relativement restreinte pour être caractérisée adéquatement à l'échelle du tronçon. De plus, en dépit d'une grande variabilité morphologique et hydraulique dans les quatre sections, les valeurs critiques et les erreurs relatives varient peu entre les sections. Toutefois, la vitesse moyenne verticale et le cisaillement de Reynolds présentent une distribution plus hétérogène, nécessitant probablement encore plus de points de mesure pour être caractérisés adéquatement. Enfin, la cohérence spatiale s'étend sur une plus longue distance dans le sens longitudinal que latéral dans toutes les sections pour la majorité des variables. Toutefois, il existe plusieurs exceptions et la magnitude de différence entre les portées longitudinale et latérale varie de façon importante entre les sections.

4.0 Discussion

Dans cette étude, l'échantillonnage de vitesses ponctuelles à une haute fréquence temporelle (25 Hz) sur une grille spatiale dense (0.25 m) nous a fourni une information détaillée de l'écoulement turbulent dans quatre sections morphologiquement distinctes et typiques d'une rivière à lit de graviers peu profonde. Les objectifs étaient d'évaluer la performance de modèles d'interpolation, d'estimer la densité optimale de points nécessaires à la réalisation d'une interpolation précise à l'échelle du tronçon dans une variété d'environnements et d'utiliser les géostatistiques pour quantifier la variabilité spatiale longitudinale et transversale des propriétés turbulentes. À notre connaissance, la résolution spatiale de données dépasse largement celles des études précédentes réalisées à l'échelle du tronçon (*reach scale*) (Lamarre et Roy 2005, $l \approx 3$ m, $t \approx 1.5$ m ; Legleiter *et al.* sous presse : $l = 1.5$ m, $t = 0.5$ m). Les résultats complètent aussi des études récentes sur la distribution spatiale de la turbulence à l'échelle du tronçon. Cette étude se distingue aussi des précédentes par l'investigation de plusieurs sections aux propriétés distinctes et par la mise en lumière des différences entre la structure spatiale longitudinale et transversale des propriétés turbulentes de l'écoulement. Nos résultats innovent en procurant des balises pour l'échantillonnage des caractéristiques de l'écoulement et notamment de la turbulence qui seront utiles à la réalisation d'études écohydrauliques. Dans cette discussion, nous aborderons plusieurs aspects reliés à la technique d'échantillonnage, à la structure spatiale des propriétés de l'écoulement ainsi qu'à leur interprétation hydraulique et biologique.

4.1 Une méthodologie d'échantillonnage

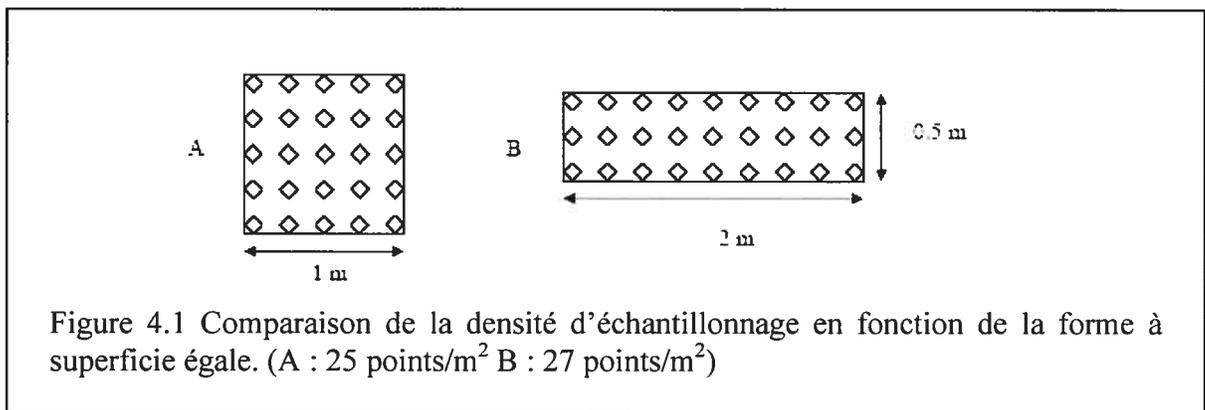
À partir des courbes des indices d'erreur d'interpolation, nous avons estimé des valeurs critiques de densité d'échantillonnage de la vitesse moyenne et de la turbulence. Nous avons trouvé qu'une densité minimale de 4 points/m² pour les mouilles et de 5.5 points/m² pour les seuils représentaient un compromis minimisant les efforts d'échantillonnage et maximisant la précision de l'interpolation. L'utilisation d'une méthodologie optimale de mesures de vitesses à l'aide d'un ADV constitue en enjeu réel, comme ces données sont fastidieuses à obtenir et qu'elles doivent être recueillies le plus rapidement possible, sans

que le débit ne varie. Par exemple, pour la réalisation de cette étude, à une densité d'approximativement 16 points/m², chaque section a nécessité de deux à trois journées entières d'échantillonnage. À la densité d'échantillonnage que nous recommandons pour les seuils (5.5 points/m²), moins du quart du temps aurait été requis pour couvrir la même section. Par ailleurs, pour que la méthodologie soit réellement optimale, la densité d'échantillonnage devrait être combinée à la durée optimale des séries de vitesse de 60 s proposée par Buffin-Bélanger et Roy (2005).

Dans cette étude, une méthode d'échantillonnage systématique a été privilégiée pour la mesure de l'écoulement, contrairement à la topographie, qui a été échantillonnée à l'aide d'une approche combinant l'échantillonnage systématique et par rupture de pente suggérée par Lamarre (2006). Théoriquement, une approche par rupture de pente aurait probablement pu optimiser les efforts d'échantillonnage en diminuant le nombre de points dans les zones homogènes et en accroissant le nombre de points dans les régions plus hétérogènes. Toutefois, il n'est pas possible de procéder selon cette approche en raison de la difficulté des opérateurs à discerner les ruptures de pente de l'écoulement. Par conséquent, l'approche systématique représente la meilleure option. Donc, sur une grille d'échantillonnage systématique de forme carrée, la densité de 5.5 points/m² se traduit par un pas de 0.5 m entre les points.

Par ailleurs, la forme des sections constitue un aspect important dans la stratégie d'échantillonnage. D'une part, dans la présente étude, la forme a induit un biais dans la comparaison des sections. Les quatre sections étudiées présentent des formes rectangulaires, mais certaines sont plus allongées que d'autres. Si les sections ne sont pas toutes de la même forme et de la même taille, c'est principalement en raison de contraintes logistiques, notamment des restrictions liées à la profondeur minimale nécessaire à l'utilisation de l'ADV. Il est probable que la forme et la superficie des sections aient eu un impact sur les erreurs d'interpolation. En effet, pour tester l'effet de la densité d'échantillonnage sur les erreurs d'interpolation par décimation, les points sur le pourtour des sections n'ont jamais été soustraits, de façon à toujours conserver intacte la forme des

sections. Donc, les sections plus allongées (S1, S2 et M2) ont bénéficié d'une proportion de points de contour intouchés plus élevée que la section plus large (M1). De plus, la forme d'une section intervient aussi dans l'élaboration d'un plan d'échantillonnage, puisque qu'à superficie égale, une forme rectangulaire nécessite davantage de points de mesure qu'une forme carrée en raison de l'effet de contour (Fig. 4.1). De façon similaire, pour un pas d'échantillonnage donné, une section de petite superficie présente une densité nettement plus élevée qu'une section de grande superficie. Par exemple, une section carrée échantillonnée à une résolution de 0.25 m présente une densité qui tend vers 16 points/m² lorsque sa superficie est élevée, mais s'élève progressivement jusqu'à 25 points/m² quand la superficie de la section est inférieure à 15m² (Fig. 4.2). Par conséquent, pour caractériser des superficies de petite taille, une densité de points supérieure est à prévoir.



Nous avons estimé de façon générale des valeurs critiques optimales dans les seuils légèrement plus élevées que dans les mouilles et des valeurs de corrélation entre les valeurs estimées et mesurées des variables généralement plus élevées dans les mouilles. Cette observation diffère pour les erreurs relatives qui sont généralement plus élevées dans les sections hétérogènes, indépendamment du fait que les sections soient des seuils ou des mouilles. Par ailleurs, la valeur critique de 5.5 points/m² estimée pour les mouilles et de 4 points/m² pour les seuils ne s'appliquent probablement pas à toutes les mouilles et les seuils d'une rivière à lit de graviers. D'une part, les appellations 'seuils' et 'mouilles' données aux sections de cette étude ne s'appuient pas sur des critères stricts de classification.

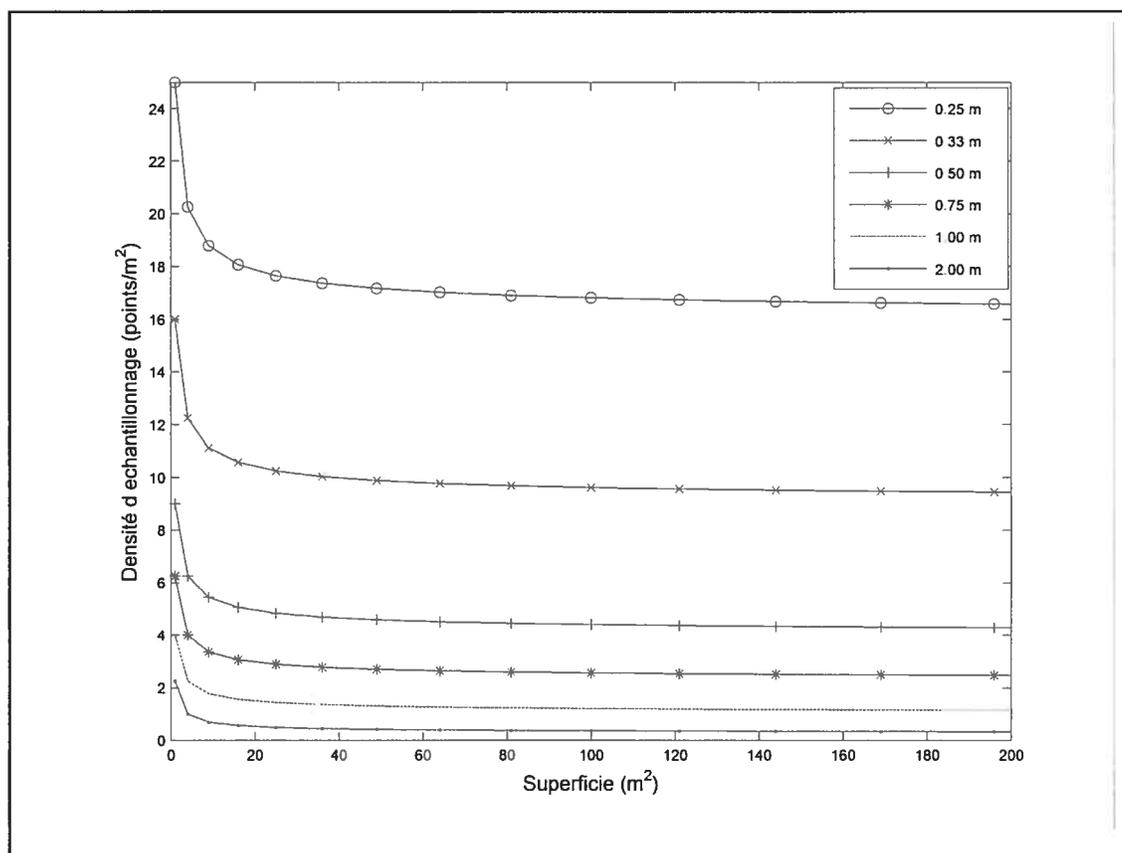


Figure 4.2 Densité d'échantillonnage en fonction de la superficie pour six pas d'échantillonnage dans une section hypothétique carrée.

Pour des raisons pratiques, les zones à l'étude ici ne couvrent qu'une partie de la morphologie des seuils et mouilles. Par exemple, les mouilles ne sont pas couvertes jusqu'à leur sortie (*pool tail*) et dans le cas des seuils, seule la partie centrale, de part et d'autre du thalweg a été couverte. Si les tronçons entiers avaient été caractérisés, soit la portion plus profonde pour les mouilles et l'écoulement lent et peu profond près des berges pour les seuils, il est probable que la performance de l'interpolation aurait été accrue, en raison de la faible magnitude et de l'homogénéité de la vitesse et la turbulence qui caractérisent souvent ces endroits.

D'autre part, les appellations 'seuils' et 'mouilles' n'ont pas été ici attribuées aux sections uniquement sur la base de leur profondeur, mais davantage à partir de la morphologie des tronçons où s'inscrivent les sections.. En effet, les sections ne présentent entre elles qu'une

faible différence de profondeur moyenne. Ce qui les différencie davantage, c'est la moyenne de U , qui était de deux à trois fois plus élevée dans les seuils que dans les mouilles et les variables de turbulence, qui étaient aussi plus élevées dans les seuils que dans les mouilles. Par conséquent, les valeurs de densité critiques que nous proposons s'appliquent davantage à des conditions de vitesses et de turbulence qu'à des conditions de profondeurs. De plus, bien que les quatre sections de cette étude ne présentent pas une très grande différence de profondeur moyenne, elles se distinguent nettement par leur rugosité. Les résultats montrent que plus la rugosité est élevée, plus les propriétés hydrauliques des sections sont hétérogènes et les erreurs relatives sont élevées (Fig. 3.24). Cependant, pour la plupart des variables, les erreurs relatives ne varient pas de façon importante entre les sections.

Dans cette étude, nous avons choisi d'utiliser un modèle d'interpolation linéaire. Comme aucun modèle n'offrait de meilleurs résultats par rapport à un autre à une densité de 16 points/m², nous avons choisi ce modèle, sur la base de sa simplicité et de son efficacité à interpoler des données lorsque la densité est élevée (Keim *et al.* 1999). Toutefois, il se peut qu'à une densité inférieure, notamment à la densité 'optimale', un autre modèle offre une meilleure performance. Par exemple, le krigeage est souvent utilisé lorsque la densité d'échantillonnage est faible. Les analyses géostatistiques que nous avons effectuées suggèrent que le krigeage pourraient bien s'appliquer à la plupart des variables dans la plupart des sections. Cependant, l'absence de palier pour le Seuil 2 et la Mouille 2 dans l'axe transversal indique une inhomogénéité de la variance dans ces sections et cela pourrait restreindre l'efficacité de l'interpolation par krigeage (Trangmar *et al.*, 1985). Néanmoins, l'hypothèse qu'un autre modèle d'interpolation puisse être plus performant à basse densité d'échantillonnage mérite d'être testée.

Les semivariogrammes ont révélé une structure distincte dans l'axe transversal et longitudinal de chaque section. Cette information pourrait être utilisée pour optimiser l'échantillonnage en densifiant le nombre de points de mesure dans l'axe ou la portée est plus courte par rapport à l'autre axe. Cependant, les résultats obtenus en fonction des

sections sont difficilement généralisables à un plan d'échantillonnage en raison de la variabilité entre les sections. Néanmoins, il en ressort que généralement, pour la plupart des variables, la portée est plus longue dans l'axe longitudinal que transversal (plus de deux fois plus longue pour S1). Toutefois, il existe des exceptions, notamment l'intensité turbulente longitudinale de la Mouille 1 et le cisaillement de Reynolds de la Mouille 2. De plus, la magnitude des différences varie de façon importante entre les sections. Ces résultats sont similaires à ceux de Legleiter *et al.* (sous presse) qui ont observé une portée transversale parfois plus longue dans l'axe transversal, parfois plus longue dans l'axe longitudinal. Devant la difficulté d'établir une norme quantitative de pas d'échantillonnage selon la direction, nous suggérons d'échantillonner selon un pas égal dans les deux directions, ou en espaçant légèrement plus les transects transversaux que longitudinaux dans les sections où l'écoulement semble parfaitement rectiligne.

4.2 La structure spatiale des variables hydrauliques

Nos résultats montrent que les variables hydrauliques présentent des structures spatiales diversifiées. Par conséquent, elles ne sont pas toutes aussi bien caractérisées les unes que les autres par un échantillonnage planimétrique à une densité d'échantillonnage qui soit réaliste dans la pratique.

Premièrement, à la lumière des résultats, l'intensité turbulente relative se révèle une variable à utiliser avec précaution. Cette variable a été récemment utilisée dans quelques études reliant la turbulence au comportement de salmonidés (Enders *et al.* 2005 ; Cotel *et al.*, 2006). Elle permet de comparer la turbulence dans des micro-habitats dont la vitesse moyenne est différente. Or, il apparaît que dans une étendue comportant de faibles valeurs de U , l' ITR est inversement proportionnelle à U . C'est particulièrement le cas dans les mouilles et les zones calmes près des berges, où on retrouve des valeurs de U avoisinant zéro. Par exemple, nous avons observé des valeurs de ITR allant jusqu'à 4000 % dans la Mouille 1 et la Mouille 2. Cela soulève la question de la pertinence de cette variable dans des environnements comprenant des basses valeurs de U . Par exemple, il serait étonnant

qu'un poisson de taille moyenne soit fortement influencé par une fluctuation de 1 cm/s dans un écoulement où U avoisine 0.1 cm/s, bien que ces conditions reflètent une ITR très élevée (1000 %). Néanmoins, cette variable pourrait s'avérer utile dans des environnements relativement homogènes où U est élevée, comme dans le Seuil 2, où aucune valeur extrême de ITR n'a été relevée.

Deuxièmement, nous avons observé que la structure spatiale de RMS dans les trois dimensions était presque aussi bien définie que celle de U . D'une part, les erreurs relatives d'interpolation de RMS_U , RMS_V et RMS_W avoisinent celles de U pour les quatre sections (10 à 15 %). D'autre part, les semivariogrammes de RMS reflètent une structure spatiale organisée, à l'exception de l'axe transversal des seuils, qui contient davantage de bruits et présentent un effet de pépité plus élevé. D'ailleurs, la proportion de variance de RMS n'ayant pas été captée par l'échantillonnage à 0.25 m (effet de pépité) n'est que légèrement supérieure à celle de la vitesse moyenne. Ces résultats sont opposés à ceux de Legleiter *et al.* (sous presse), la seule étude à notre connaissance ayant investigué la structure spatiale de l'écoulement à l'échelle du tronçon. En échantillonnant l'écoulement à l'étiage dans l'axe longitudinal, les auteurs ont observé une absence de cohérence spatiale de RMS_U , RMS_V et RMS_W dans cette direction. Or, nous avons observé une persistance spatiale plus longue dans l'axe longitudinal que transversal, caractérisée par une portée variant entre 1.5 à 2.5 m dans les seuils. Toutefois, le seuil caractérisé par Legleiter *et al.* (sous presse) présentait une forte pente s'apparentant davantage à la Mouille 2 et par une rugosité beaucoup plus élevée que toutes les sections que nous avons étudiées. Dans la Mouille 2, nous avons observé des portées moins élevées pour les RMS dans l'axe longitudinal, variant entre 0.75 m et 1 m. Ces valeurs de portée sont inférieures au pas d'échantillonnage de 1.5 m utilisé par Legleiter *et al.* Par conséquent, dans un écoulement très hétérogène comme celui de la Mouille 2 et du tronçon étudié par Legleiter *et al.* (sous presse), un échantillonnage à tous les 1.5 m se montre donc nettement insuffisant pour caractériser la structure spatiale.

Par ailleurs, de façon générale, Legleiter *et al.* (sous presse) ont observé une structure spatiale de l'intensité turbulente mieux définie dans l'axe transversal que longitudinal. Ce phénomène est contraire à nos résultats montrant que la structure spatiale longitudinale n'a jamais été moins cohérente que la structure transversale. Il se pourrait que les effets de pépite observés pour l'intensité turbulente dans l'axe longitudinal par Legleiter *et al.* (sous presse) aient simplement été le résultat d'un nombre d'échantillons insuffisants dans cette direction (3 à 5 points). En effet, il est généralement admis qu'un minimum de trente couples de points est nécessaire au calcul de la semivariance en fonction du pas d'échantillonnage (Wackernagel, 2003). Or, ces auteurs ont échantillonné l'écoulement à tous les 0.5 m sur quatre transects espacés de 1.5 m (Fig. 1.20 ; Fig. 1.21). Les variogrammes longitudinaux sont donc construits à partir de seulement quatre points. De plus, en raison de la faible fréquence d'échantillonnage de l'appareil utilisé (1 Hz), les séries temporelles enregistrées par Legleiter *et al.* (sous presse) (180 observations par série) ne sont probablement pas suffisamment denses et longues pour en dériver les propriétés turbulentes de façon fiable. Selon le protocole élaboré par Soulsby (1980) pour déterminer la longueur des séries de vitesse nécessaires à la caractérisation de la turbulence près du lit, les données utilisées par Legleiter *et al.* (sous presse) subiraient une perte de variance allant jusqu'à 70%, principalement dans les fluctuations de hautes fréquences. Buffin-Bélanger et Roy (2005) recommandent un nombre d'observations optimal de 1500 à 2250 observations à une fréquence de 25 Hz pour représenter les propriétés turbulentes de l'écoulement de façon adéquate. L'effet combiné de ces différences méthodologiques et de la variabilité morphologique des sections pourrait être une des causes des différences entre les résultats des auteurs et les nôtres.

Comme les variables précédentes, *TKE* présente aussi une structure spatiale relativement cohérente dans les quatre sections étudiées. Toutefois, les erreurs relatives moyennes oscillent autour de 20 %, ce qui peut représenter dans certains contextes une erreur considérable. Néanmoins, une alternative à l'interpolation de *TKE* pourrait consister à estimer cette variable à partir de matrices interpolées des trois composantes de l'intensité turbulente, qui, elles, présentent des erreurs légèrement inférieures. *V* montre aussi des

résultats variables selon les sections. Lorsque la magnitude du courant latéral est importante dans un tronçon, V présente une cohérence spatiale. Par contre, lorsque la distribution est centrée sur zéro, avec très peu de variabilité, l'erreur relative peut se révéler très élevée, comme c'est le cas dans les seuils rectilignes (e.g. Seuil 2). Par conséquent, cette variable doit être utilisée avec précaution.

Contrairement aux variables précédentes, la structure spatiale de la vitesse moyenne verticale (W) et du cisaillement de Reynolds ($\rho u'w'$) τ présente très peu de cohérence spatiale à l'échelle d'échantillonnage de cette étude, avec des erreurs relatives très élevées. Les erreurs d'interpolation élevées s'expliquent partiellement par le fait que ces deux variables présentent une composante verticale et que l'interpolation spatiale planimétrique ne tient pas en compte la dimension verticale. W s'avère plus structurée dans la section où la pente est plus forte et où l'écoulement vers le bas domine. C'est également ce qui a été observé par Legleiter *et al.* (sous presse) dans un tronçon de pente comparable. Néanmoins, les fortes valeurs d'effet de pépité observées pour toutes les sections suggèrent que plus de la moitié de la variabilité de W et de τ est induite par un processus survenant à une échelle inférieure à 0.25 m. Par conséquent, l'interpolation planimétrique de W à l'échelle du tronçon est peu recommandée et τ pourrait être interpolé dans les situations qui ne requièrent que très peu de précision. Toutefois, τ représente une variable jugée primordiale dans une gamme d'études, notamment sur le transport des sédiments. Par conséquent, dans une étude subséquente, il serait utile d'investiguer sa distribution spatiale à une échelle spatiale plus fine afin d'arriver à décrire une plus grande proportion de sa variabilité spatiale. Cette question pourrait également être étudiée en utilisant des semivariogrammes sur des échantillons d'écoulement obtenus à une résolution spatiale encore plus fine que celle de la présente étude.

En somme, la structure des variables hydrauliques présentées ici résulte de la présence de structures cohérentes dont une forte proportion de la variabilité est induite par la profondeur de l'écoulement et la rugosité du lit.

4.3 Interprétation hydraulique

Dans le cadre de cette étude, la turbulence a été abordée avec l'approche des valeurs moyennes, sans égard à la caractérisation des structures cohérentes. Toutefois, la nature des structures présentes dans les sections pourrait être à l'origine des patrons que nous avons observés. Par exemple, les valeurs de pépité relativement basses, la longue portée des semivariogrammes ainsi que les erreurs d'interpolation relativement faibles montrent qu'une très forte proportion de la variabilité de U , V , RMS_U , RMS_V , RMS_W et TKE survient à une échelle variant entre 0.5 et 2.5 m. Ces résultats supportent l'idée que la variabilité de la turbulence à l'échelle du tronçon est dominée par l'occurrence de structures à grande échelle (Buffin-Bélanger *et al.* 2000a). Ces structures turbulentes sont connues pour être ubiquistes en rivière à lit de graviers. Bien que ces structures apparaissent même sur un lit lisse, il se peut que leur occurrence et leur magnitude soient accrues par la présence d'éléments de rugosité. La portée des variogrammes de RMS_U illustre une persistance spatiale longitudinale de 5.9, 4, 4 et 1.3 fois la profondeur pour les sections S1, S2, M1 et M2 respectivement. Dans le cas de S1, S2 et M1, la longueur de la portée de RMS_U s'approche de la longueur des structures à grande échelle de 3 à 5 Y observée par Roy *et al.* (2004) dans les rivières à lit de graviers. Dans le cas de la Mouille 1, la section au lit le plus rugueux, la courte portée pourrait s'expliquer par la présence d'autres structures, venant 'perturber' le patron des structures à grande échelle. En effet, les structures d'échappement et le cycle éjection-incursion sont des structures turbulentes fortement influencées par la présence de d'éléments de rugosité individuels comme les blocs et les amas de galets. Donc, la distribution spatiale de ce type de structures devrait a priori être plus hétérogène que celui des structures à grande échelle. Il est toutefois difficile de départir l'empreinte des types de structures dans l'écoulement (Roy et Buffin-Bélanger, 2000). Leur présence pourrait toutefois être à la source d'une portion considérable de la variabilité de la turbulence survenant à une échelle inférieure à 0.25 m.

D'ailleurs, il est possible que les structures induites par la rugosité aient un effet majeur sur la structure spatiale des variables W et τ , qui ont montré une faible cohérence spatiale, avec un effet de pépité très élevé. Par exemple, à 10 cm au dessus du lit, la direction de W , soit

l'écoulement vers le bas ou vers le haut, peut être dictée par la présence ou l'absence d'un amas de galets. Toutefois, la présence de l'amas de galets aura une influence importante, mais de moindre ampleur sur l'intensité turbulente longitudinale. Le cisaillement de Reynolds ($-\rho \langle u'w' \rangle$) est aussi une variable dont la distribution spatiale est fortement influencée par la rugosité du lit (Biron *et al.*, 2004). La covariance de u' et w' est généralement négative, particulièrement sous l'influence des structures à grande échelle qui balayent la tranche d'écoulement de la surface vers le lit, mais peuvent prendre des valeurs positives sous l'influence d'une rugosité complexe (Clifford et French, 1993).

Dans une certaine mesure, nos résultats confirment ceux de Lamarre et Roy (2005) et de Legleiter *et al.* (sous presse), selon lesquels la distribution des propriétés turbulentes de l'écoulement des rivières à lit de graviers ne sont pas influencés de façon importante par les éléments de rugosité individuels à l'échelle du tronçon. En effet, la distribution de RMS_U dans les sections est relativement uniforme (Fig. 3.7), et l'effet des amas de galets se répercute sur l'écoulement sur une courte distance. Cette distribution suggère que l'empreinte dans l'écoulement des éléments de rugosité serait camouflée par l'occurrence des structures à grande échelle, qui seraient davantage influencées par les variations de profondeur que de rugosité (Roy *et al.* 2004). Par contre, la distribution de W et τ sont très hétérogènes et leur distribution pourrait être dominée par un processus survenant à plus petite échelle, particulièrement dans les sections présentant de faibles pentes. Cette conclusion est toutefois différente de celle de Legleiter *et al.* (sous presse) qui ont observé une cohérence spatiale de W très longue variant entre 6 et 8 m.

En contrepartie, la somme des éléments de rugosité affecte l'hétérogénéité de l'écoulement (coefficient de variation des sections). Bien que les propriétés turbulentes des tronçons soient davantage influencées par les structures à grande échelle que par des structures liées aux amas de galets, les résultats montrent une relation linéaire significative entre la rugosité moyenne du lit et l'hétérogénéité de l'écoulement à l'échelle du tronçon (Fig. 3.24). Par exemple, le Seuil 1 et le Seuil 2 présentent une distribution de profondeur similaire, mais la rugosité du lit est beaucoup plus élevée dans le Seuil 1 et on y observe une beaucoup plus

grande variabilité des propriétés moyennes et turbulentes de l'écoulement. Donc, même si les éléments de rugosité n'ont un impact que localisé sur la turbulence, la somme des perturbations de l'écoulement se manifeste dans l'hétérogénéité des tronçons.

La méthodologie dont est l'objet la présente étude comporte le désavantage de refléter les propriétés de l'écoulement de chaque section à un seul niveau d'eau. Il est connu que l'hétérogénéité des propriétés moyennes de l'écoulement diminue avec l'augmentation du niveau d'eau (Lamouroux *et al.*, 1995). Cette conclusion s'applique aussi aux propriétés turbulentes de l'écoulement relativement près du lit à l'échelle d'une *patch* (0.4 m^2 , Buffin-Bélanger *et al.*, 2006) et du tronçon (Legleiter *et al.*, sous presse). De plus, les variations de l'intensité turbulente sont moins importantes là où la rugosité relative est élevée (Clifford, 1996). Répétée plusieurs fois sur le même tronçon à des niveaux d'eau contrastés, cette méthodologie pourrait être utile à l'élaboration d'un modèle hydrodynamique incorporant la turbulence. Par ailleurs, dans cette étude, l'écoulement a été échantillonné à quatre reprises pendant deux à trois jours. Le niveau d'eau a fluctué entre 1.2 et 2.5 m³/s. Cette fluctuation du niveau d'eau pourrait introduire un léger biais dans la comparaison des sections entre elles. Par exemple, l'écoulement de la Mouille 2 aurait pu présenter une plus grande homogénéité si le débit y avait été plus élevé, à un niveau comparable aux trois autres sections.

Une autre contrainte de la méthodologie de caractérisation employée est la difficulté d'obtenir rapidement des signaux de qualité très près du lit à l'aide d'un ADV. Dans le cadre de cette étude, pour maximiser l'efficacité de l'échantillonnage, nous avons mesuré la vitesse à une hauteur de 10 cm au dessus du lit. L'importance de mesurer le plus près du lit possible découle du fait que c'est là que se trouve l'habitat de la grande majorité des organismes vivants dans les rivières (Hart et Finelli, 1999) et ce sont les conditions hydrauliques près du lit qui conditionnent le transport de sédiments (Sechet et Guenec, 1999). Par conséquent, dans une étude subséquente, compte tenu que la densité d'échantillonnage peut être diminuée à seulement 5.5 points/m², une partie du temps épargné pourrait être consacrée à un échantillonnage plus près du lit, ce qui nécessite

davantage d'ajustements de l'appareil et de reprises de mesures de mauvaise qualité. Toutefois, il est possible que l'écoulement échantillonné plus près du lit présente une plus forte hétérogénéité et varie sur une échelle beaucoup plus petite. En effet, en échantillonnant systématiquement à tous les 10 cm dans une superficie rectangulaire de 0.8 par 1.4 m, à une hauteur de 10 cm au dessus d'un lit composé d'un substrat rugueux homogène, Buffin-Bélanger *et al.* (2006) ont montré que l'intensité turbulente était homogène, et ce, sur une gamme de débits. Toutefois, l'hétérogénéité augmentait fortement avec l'augmentation du débit lorsque la vitesse de l'écoulement était mesurée très près du lit (5 mm). Dans cette étude, il est fort probable que si l'écoulement avait été mesuré à cette hauteur, la densité d'échantillonnage optimale aurait été inférieure à celle que nous avons estimé pour 10 cm au dessus du lit. Néanmoins les résultats de Buffin-Bélanger *et al.* (2006) ont été obtenus sur une petite superficie présentant peu de variations de profondeurs. Il est possible qu'à l'échelle d'un tronçon dont le substrat est hétérogène et la profondeur variable, la variabilité de l'écoulement à l'échelle de la patch ($\approx 1 \text{ m}^2$) diffère. Cette question constitue une avenue de recherche prometteuse.

Les faibles erreurs pour l'intensité turbulente et la longue portée des semivariogrammes directionnels confirment la dominance de grands patrons spatiaux de turbulence. Ces patrons spatiaux montrent qu'il est pertinent d'investiguer l'effet de la turbulence à l'échelle du tronçon sur l'utilisation de l'habitat des poissons. Plusieurs chercheurs ont examiné la turbulence dans le micro-habitat des poissons (Enders *et al.* 2005 ; Smith *et al.* 2005 ; 2006 ; Cotel, 2006). Toutefois, l'utilisation de l'habitat d'individus dans le temps demeure méconnue. Par exemple, certains poissons pourraient exercer des préférences pour des zones à plus forte ou à plus faible turbulence de façon à minimiser leurs dépenses énergétiques et ces préférences pourraient varier en fonction des cycles journaliers. La combinaison de la radio-téléométrie (Okland *et al.* 2004 ; Ovidio *et al.*, soumis) et de la technique de caractérisation de l'écoulement présenté dans cette étude pourraient permettre dans des études ultérieures d'investiguer les questions de l'effet de la turbulence sur l'utilisation de l'habitat par les poissons. De plus, la cohérence spatiale des propriétés turbulentes comme *RMS* ou *TKE* sur plus d'un mètre suggère que la taille des structures

turbulente pourrait affecter les coûts énergétiques de nage des poissons. En effet, selon Biggs et al. (2005), les structures turbulentes allant jusqu'à dix fois la taille de l'animal sont susceptibles d'induire un stress. Bien que l'écoulement turbulent présente une variabilité engendrée par la profondeur et rugosité du lit, l'ensemble de la colonne d'eau est balayé par des structures à grande échelle fortement énergétiques.

Nous avons montré par cette étude qu'une bonne proportion de la variabilité de la turbulence peut se capter à l'aide d'un échantillonnage relativement peu dense. La méthodologie d'échantillonnage élaborée dans la présente étude pourra s'avérer utile d'une part pour caractériser l'habitat des poissons, d'autre part pour améliorer nos connaissances des liens qui unissent la turbulence aux autres variables hydrauliques. Ces connaissances pourront ultimement être utiles à des programmes de restauration des habitats fluviaux et potentiellement être appliquée à l'étude des structures turbulentes et du transport des sédiments.

Conclusion

Cette étude fournit les grandes lignes d'une méthodologie de caractérisation de l'habitat hydraulique dans une rivière à lit de graviers peu profonde. Cette méthodologie trouvera son utilité dans la réalisation d'études écohydrauliques et pourra aussi être appliquée à l'étude de la caractérisation des structures turbulentes à l'échelle du tronçon. En échantillonnant l'écoulement turbulent à une forte densité spatiale dans quatre environnements aux caractéristiques contrastées, nous avons établi la relation entre la densité d'échantillonnage et la taille de l'échantillon et nous avons utilisé les géostatistiques pour examiner la structure spatiale longitudinale et transversale de l'écoulement. Nos conclusions sont les suivantes :

1. Une densité variant entre 4 et 5.5 points/m² représente le compromis optimal minimisant les efforts d'échantillonnage et maximisant la précision de l'interpolation. Sur une grille d'échantillonnage systématique, cette densité représente un échantillonnage au pas approximatif de 0.5 m.
2. La rugosité moyenne du lit présente une relation linéaire avec l'hétérogénéité hydraulique des sections et par conséquent, avec les erreurs d'interpolation. Toutefois, les sections les plus rugueuses et hétérogènes ne présentent pas des valeurs critiques d'échantillonnage supérieures, suggérant qu'une partie de la variabilité dans ces sections survient à une échelle inférieure à 0.25 m.
3. À la densité d'échantillonnage optimale, les intensités turbulentes (*RMS*) dans les trois composantes présentent des erreurs relatives comparables à celles de la vitesse moyenne longitudinale, soit des erreurs variant entre 10 et 15 %. L'énergie cinétique montre des erreurs légèrement supérieures, avoisinant 20 %.
4. La variabilité de la vitesse moyenne verticale (*W*) et du cisaillement de Reynolds (τ) est mal représentée par un échantillonnage planimétrique, avec des erreurs relatives variant entre 30 et 50 % et entre 65 et 100 % respectivement.

5. Les semivariogrammes directionnels ont montré une plus grande variabilité spatiale dans la direction transversale que longitudinale. De plus, pour la plupart des variables, la persistance des patrons spatiaux s'étendait sur une distance deux fois plus longue dans la direction longitudinale que transversale. Toutefois, l'inverse a aussi été observé pour certaines variables, et la magnitude de la différence entre l'axe longitudinal varie de façon très importante entre les sections. Par conséquent, devant la difficulté d'établir une norme quantitative de pas d'échantillonnage selon la direction, l'échantillonnage selon un pas égal dans les deux directions pourrait s'avérer la meilleure option.
6. Les erreurs d'interpolation relativement faibles de l'intensité turbulente et la longue portée des semivariogrammes directionnels confirment la dominance de grands patrons spatiaux de turbulence. Ces résultats suggèrent que l'occurrence de microstructures turbulentes induites par les éléments de rugosité individuels pourrait être en partie camouflée par une dominance des structures à grande échelle, plus énergétiques, balayant la colonne d'eau.

Les grands patrons de turbulence observés dans cette étude confirment la pertinence d'étudier la relation entre cette variable et les mouvements des poissons à l'échelle du tronçon. Cette méthode de caractérisation demeure fastidieuse et procure une image de l'écoulement à un temps fixe, sans refléter la variabilité de l'écoulement en fonction du débit. Il est souhaitable qu'un échantillonnage répété de l'écoulement à des niveaux d'eau contrastés serve dans l'avenir à réaliser une modélisation hydrodynamique de l'écoulement turbulent à l'échelle du tronçon. Ces outils seront d'une grande utilité dans les domaines de l'hydraulique, la géomorphologie fluviale et l'écologie.

Bibliographie

Acarlar, M.S. et Smith, C.R. 1987. A study of hairpin vortices in a laminar boundary-layer .1. Hairpin vortices generated by a hemisphere protuberance. *Journal of Fluid Mechanics* **175**: 1-41.

Allen, J.R.L. 1985. *Principles of physical sedimentology*. George Allen et Unwin, London.
Arscott, D.B., K. Tockner, & J.V. Ward. 2000. Aquatic habitat diversity along the corridor of an Alpine floodplain river (Fiume Tagliamento, Italy). *Archiv für Hydrobiologie*. **49**: 679-704

Barmuta, L.A. 1989. Habitat patchiness and macrobenthic community structure in an upland stream in temperate Victoria, Australia. *Freshwater Biology* **21**: 223-236.

Bathurst, J. C., 1985. Theoretical aspects of flow resistance, in *Gravel-Bed Rivers*, edited by R. D. Hey, J. C. Bathurst, and C. R. Thorne, pp. 83–108, John Wiley, New York.

Bellehumeur, C. & P. Legendre. 1998. Multiscale sources of variation in ecological variables: modelling spatial dispersion, elaborating sampling designs. *Landscape Ecology* **13** (1): 15-25.

Benett, S.J, et Best J.L. 1996. Mean Flow and turbulence over fixed ripples. Dans: *Coherent flow structures in Open Channels* (Eds. Ashwoth, J.L., Best, S.J., Benett et S.J. McLelland), John Wiley and Sons, 281-304.

Bergstedt, M.S., Hondzo, M.M., et Cotner, J.B. 2004. Effects of small scale fluid motion on bacterial growth and respiration. *Freshwater Biology* **49**: 28-40.

Best, J.L. 1993. On the interactions between turbulent flow structure, sediment transport and bedform development: some considerations from recent experimental research. *In Turbulence: Perspectives on Flow and Sediment Transport*. Edited by N.J. Clifford, J.R. French, et J. Hardistry. John Wiley & Sons Ltd. , Chicester pp. 61-92.

Biggs, B.J.F. et Hickey, C.W. 1994. Periphyton responses to a hydraulic-gradient in a regulated river in New-Zealand. *Freshwater Biology* **32**: 49-&.

Biggs, B.J.F., Nikora, V.I., et Snelder, T.H. 2005. Linking scales of flow variability to lotic ecosystem structure and function. *River Research and Applications* **21**: 283-298.

Biggs, B.J.F., Stevenson, R.J., et Lowe, R.L. 1998. A habitat matrix conceptual model for stream periphyton. *Archiv Fur Hydrobiologie* **143**: 21-56.

Biron, P.M., Robson, C., Lapointe, M.F., et Gaskin, S.J. 2004. Comparing different methods of bed shear stress estimates in simple and complex flow fields. *Earth Surface Processes and Landforms* **29**: 1403-1415.

Bluck, B.J., 1987. Bed forms and clast size changes in gravel-bed rivers, p. 159-179. *In* K.S Richards, édit., *River Channels: Environment and Process*. The Institute of British Geographer Special Publication Series, Basil Blackwell, Oxford, 391 p.

Borchardt, MA. 1996. Nutrients. *Algal Ecology: Freshwater Benthic Ecosystems*, Stevenson RJ *et al.* (eds). Academic Press: New York; 183–227.

Bouckaert, F.W. et Davis, J. 1998. Microflow regimes and the distribution of macroinvertebrates around stream boulders. *Freshwater Biology* **40**: 77-86.

Boyero, L. et Bosch, J. 2004. The effect of riffle-scale environmental variability on macroinvertebrate assemblages in a tropical stream. *Hydrobiologia* **524**: 125-132.

Bradshaw, P., 1985. *An introduction to turbulent flow and its measurement*. Oxford: Pergamon Press, 218pp.

Bray, D.I. 1982. Regime equations for gravel-bed rivers. *In* *Gravel-bed Rivers*. Edited by R.D. Hey, J.C. Bathurst, et C.R. Thorne. John Wiley & Sons Ltd., Wallingford, U.K. pp. 517-552.

Brooks, A.J., Haeusler, T., Reinfelds, I., et Williams, S. 2005. Hydraulic microhabitats and the distribution of macroinvertebrate assemblages in riffles. *Freshwater Biology* **50**: 331-344.

Buffin-Belanger, T., Reid, I., Rice, S., Chandler, J.H., et Lancaster, J. 2003. A casting procedure for reproducing coarse-grained sedimentary surfaces. *Earth Surface Processes and Landforms* **28**: 787-796.

Buffin-Belanger, T., Rice, S., Reid, I., et Lancaster, J. 2006. Spatial heterogeneity of near-bed hydraulics above a patch of river gravel. *Water Resources Research* **42**.

Buffin-Belanger, T. et Roy, A.G. 2005. 1 min in the life of a river: selecting the optimal record length for the measurement of turbulence in fluvial boundary layers. *Geomorphology* **68**: 77-94.

Buffin-Belanger, T. et Roy, A.G. 1998. Effects of a pebble cluster on the turbulent structure of a depth-limited flow in a gravel-bed river. *Geomorphology* **25**: 249-267.

Buffin-Belanger, T., Roy, A.G., et Kirkbride, A.D. 2000a. On large-scale flow structures in a gravel-bed river. *Geomorphology* **32**: 417-435.

Buffin-Belanger, T., Roy, A.G., et Kirkbride, A.D. 2000b. On the integration of turbulent flow structures within the dynamics of a gravel-bed river reach. *Géographie Physique et Quatenaire* **54**: 105-117.

Carbonneau, P.E., Bergeron, N., et Lane, S.N. 2005. Automated grain size measurements from airborne remote sensing for long profile measurements of fluvial grain sizes. *Water Resources Research* **41**.

Carbonneau, P.E., Lane, S.N., et Bergeron, N.E. 2003. Cost-effective non-metric close-range digital photogrammetry and its application to a study of coarse gravel river beds. *International Journal of Remote Sensing* **24**: 2837-2854.

Carling, P.A. 1992. The nature of the fluid boundary-layer and the selection of parameters for benthic ecology. *Freshwater Biology* **28**: 273-284.

Carling, P. A., A. Kelsey, et M. S. Glaister. 1992 Effect of bed roughness, particle shape and orientation on initial motion criteria, in *Dynamics of Gravel-Bed Rivers*, edited by P. Billi *et al.*, pp. 23–38, John Wiley, New York.

Carling, P.A. et Orr, H.G. 2000. Morphology of riffle-pool sequences in the river severn, England. *Earth Surface Processes and Landforms* **25**: 369-384.

Chanson, 1999, the hydraulics of open channel flow. An introduction. London: Arnold, 495pp.

Church, M., D. G. Mclean, et Wolcott J. F., 1987. River-bed gravels: Sampling and analysis, in *Sediment Transport in Gravel-Bed Rivers*, edited by C. R. Thorne, J. C. Bathurst, and R. D. Hey, pp. 43–79, John Wiley, New York.

Church M., (sous presse). Multiple scales in rivers, Dans *Gravel Bed Rivers VI*. Elsevier.

Clifford, N.J. 1996. Morphology and stage dependant flow structure in a grave-bed river in Coherent Flow structures in open Channels edited by P. Ashworth et al. pp. 545-566, John Wiley, Hoboken, N.J.

Clifford, N.J. et French, J.R. 1993. Monitoring and modelling turbulent flow: historical and contemporary perspectives. *In Turbulence: Perspectives on Flow and Sediment Transport. Edited by N.J. Clifford, J.R. French, and J. Hardistry.* John Wiley & Sons Ltd, Chichester pp. 1-34.

Clifford N.J. et Richards K.S., 1992. The reversal hypothesis and the maintenance of riffle-pool sequences. In Carling, P.A. and Petts, G.E (eds.) *Lowland rivers: geomorphological perspectives.* Chichester: Wiley, 43-70.

Cotel, A., Webb P. et Tritico H., *Transactions of the American Fisheries Society* **135**:610–619, 2006

Cunjak, R.A. 1988. Behavior and microhabitat of young Atlantic salmon (*Salmo salar*) during winter. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* **45**: 2156-2160.

- Dancey C. L., Balakrishnan, M., Diplas, P. et Papanicolaou A. N. 2000 The spatial inhomogeneity of turbulence above a fully rough, packed bed in open channel flow, *Experiments in fluids*, **29**, 4: 402-406.
- Davis, J.A. et L.A. Barmuta. 1989. An ecologically useful classification of mean and near-bed flows in streams and rivers. *Freshwater Biology*. **21**:271-282
- Defina, A. 1996. Transverse spacing of low speed streaks in a channel flow over a rough bed. Dans: *Coherent Flow structures in open Channels* (Eds Ashwoth, J.L., Best, S.J., Benett et S.J. McLelland), John Wiley and Sons, 87-99.
- Deutsch, C.V., Journel, A.G., 1998. *GSLIB: Geostatistical Software Library*. Oxford University Press, New York.
- Drake, T.G., Shreve, R.L., Dietrich, W.E., Whiting, P.J., et Leopold, L.B. 1988. Bedload transport of fine gravel observed by motion-picture photography. *Journal of Fluid Mechanics* **192**: 193-217.
- Enders, E.C., Boisclair, D., et Roy, A.G. 2003. The effect of turbulence on the cost of swimming for juvenile Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* **60**: 1149-1160.
- Enders, E.C., Boisclair, D., et Roy, A.G. 2004. The costs of habitat utilization of wild, farmed, and domesticated juvenile Atlantic salmon (*Salmo salar*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* **61**: 2302-2313.
- Enders, E.C., Boisclair, D., et Roy, A.G. 2005. A model of total swimming costs in turbulent flow for juvenile atlantic salmon (*Salmo salar*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* **62**: 1079-1089.
- Enders, E.C., Buffin-Belanger, T., Boisclair, D., et Roy, A.G. 2005. The feeding behaviour of juvenile Atlantic salmon in relation to turbulent flow. *Journal of Fish Biology* **66**: 242-253.
- Falco, R.E. 1977. Coherent motions in the outer region of turbulent boundary layers. *Physics of Fluids* **20**: S124-S132.
- Ferguson, R.I., (sous presse) Gravel-bed rivers at the reach scale. Dans *Gravel Bed Rivers VI*. Elsevier.
- Ferguson, R.I., Kirkbride, A.D. et Roy, A.G. 1996. Markov analysis of velocity fluctuations in gravel-bed rivers. Dans: *Coherent flow Structures in Open Channels* (Eds. P. Ashwoth, J.L. Best, S.J. Benett et S.J. McLelland), John Wiley and Sons, 165-183

- Finelli, C.M., Hart, D.D., Fonseca, D.M., 1999. Evaluating the spatial resolution of an acoustic Doppler velocimeter and the consequences for measuring near-bed flows. *Limnology and Oceanography* 44 (7), 1793–1801.
- Fonstad, M.A. et Marcus, W.A. 2005. Remote sensing of stream depths with hydraulically assisted bathymetry (hab) models. *Geomorphology* 72: 320-339.
- Frothingham, K.M., Rhoads, B.L., 2003. Three-dimensional flow structure and channel change in an asymmetrical compound meander loop, Embarras River, Illinois. *Earth Surface Processes and Landforms*. 28, 625-644.
- Goovaerts, P., 1997. *Geostatistics for Natural Resource Evaluation*. Oxford University Press, New York.
- Gore J.A. 1978. A technique for predicting in-stream flow requirements of benthic macroinvertebrates, *Freshwater Biology*, 8: 141-151.
- Goring et Nikora, 2002. Despiking Acoustic Doppler Velocimeter Data. *Journal of Hydraulic engineering*. ASCE, 128, 1: 117-126.
- Grass, A.J. 1971. Structural features of turbulent flow over smooth and rough boundaries. *Journal of Fluid Mechanics* 50: 233-255.
- Guay, J.C., Boisclair, D., Rioux, D., Leclerc, M., Lapointe, M., et Legendre, P. 2000. Development and validation of numerical habitat models for juveniles of Atlantic salmon (*salmo salar*). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 57: 2065-2075.
- Guensch, G.R., Hardy, T.B., et Addley, R.C. 2001. Examining feeding strategies and position choice of drift-feeding salmonids using an individual-based, mechanistic foraging model. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 58: 446-457.
- Hart, D.D., Clark, B.D., et Jasentuliyana, A. 1996. Fine-scale field measurement of benthic flow environments inhabited by stream invertebrates. *Limnology and Oceanography* 41: 297-308.
- Hart, D.D. et Finelli, C.M. 1999. Physical-biological coupling in streams: the pervasive effects of flow on benthic organisms. *Annual Review of Ecology and Systematics* 30: 363-395.
- Hassan, M.A. et Reid, I. 1990. The influence of microform bed roughness elements on flow and sediment transport in gravel bed rivers. *Earth Surface Processes and Landforms* 15: 739-750.
- Hesthagen, T. 1990. Home range of juvenile Atlantic salmon, *Salmo salar*, and brown trout, 483 *Salmo trutta*, in a Norwegian stream. *Freshwater Biology* 24: 63-67.

- Heggenes, J. et Saltveit, S.J. 1990. Seasonal and spatial microhabitat selection and segregation in young Atlantic salmon, *Salmo salar* L, and brown trout, *salmo-trutta* L, in a norwegian river. *Journal of Fish Biology* **36**: 707-720.
- Hey, R. D., et C. R. Thorne, 1983. Accuracy of surface samples from gravel bed material, *J. Hydraul. Eng.*, **109**, 842-851.
- Hondzo, M. et Lyn, D. 1999. Quantified small-scale turbulence inhibits the growth of a green alga. *Freshwater Biology* **41**: 51-61.
- Hosaka, K., Hioki, T., Furuune, H., et Tanishita, K. 1995. Augmentation of microalgae growth due to hydrodynamic activation. *Energy Conversion and Management* **36**: 725-728.
- Hussain, A. K. M. F. 1983 Coherent structures – reality and myth. *Phys. Fluids* **26**: 2816-2849.
- Inoue, M. et Nunokawa, M. 2002 Effect of longitudinal variation in stream habitat structure on fish abundance: an analysis based on a sub-unit scale habitat classification **47**:1594-1607.
- Jenkins, T. M., Jr. 1969. Social structure, position choice, and microdistribution of two trout species (*Salmo trutta* and *Salmo gairdneri*) resident in mountain streams. *Animal Behaviour Monographs* **2**:56-123
- Jowett, I. G. 1993. A method for objectively identifying pool, run and riffle habitats from physical measurements. *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research*, **27**: 241-248.
- Keim, R.F., Skaugset, A.E., Bateman, D.S., 1999. Digital terrain modeling of small channels with a total-station theodolite. *Adv. Water Resour.* **23**, 41-48.
- Keller, E.A., 1971. Areal sorting of bed load material; the hypothesis of velocity reversal. *Geological Society of America Bulletin* **82**: 753-756
- Keller E.A. et Melhorn, N. 1978: Rythmic spacing and origin of pools and riffles. *Geological Society of America Bulletin* **82**, 753-56.
- Kemp, J.L., Harper, D.M., et Crosa, G.A. 1999. Use of 'functional habitats' to link ecology with morphology and hydrology in river rehabilitation. *Aquatic Conservation-Marine and Freshwater Ecosystems* **9**: 159-178.
- Kemp, P.S., Gilvear, D.J. et Armstrong J.D, 2003. Do juvenile Atlantic salmon parr track local changes in water velocity? *River research and applications*. **19**: 569-575.
- Kirchner, J.W., Dietrich, W.E., Iseya, F., et Ikeda, H. 1990. The variability of critical shear-stress, friction angle, and grain protrusion in water-worked sediments. *Sedimentology* **37**:

647-672.

Kirkbride, A.D. et Ferguson, R. 1995. Turbulent flow structure in a gravel-bed river: markov chain analysis of the fluctuating velocity profile. *Earth Surface Processes and Landforms* **20** : 721-733.

Kline, S.J., Reynolds, W.C., Schraub, F.A., et Runstadler, P.W. 1967. The structure of turbulent boundary layers. *Journal of Fluid Mechanics* **95**: 741-773.

Lamarre H. et Roy A.G., 2001 Organisation morphologique des blocs et des amas de galets dans les cours d'eau à lit de graviers. *Géographie physique et quaternaire*, **55**, 3 : 275-287.

Lamarre H. et Roy A.G., 2005 Reach scale variability of turbulent flow characteristics in a gravel-bed river. *Geomorphology* **68**, 1-2: 95-113.

Lamarre, H. 2006. Le transport des sédiments, les structures sédimentaires et la stabilité dans les cours d'eau de morphologie en step-pool, Thèse de Doctorat, Université de Montréal.

Lamouroux, N., Souchon, Y., Herouin, E., 1995. Predicting velocity frequency-distributions in stream reaches. *Water Resources Research* **31**, 2367-2375.

Lancaster, J. 1999. Small-scale movements of lotic macroinvertebrates with variations in flow. *Freshwater Biology* **41**: 605-619.

Lancaster, J., Buffin-Belanger, T., Reid, I., et Rice, S. 2006. Flow- and substratum-mediated movement by a stream insect. *Freshwater Biology* **51**: 1053-1069.

Lane, S.N. 2005. Roughness - time for a re-evaluation? *Earth Surface Processes and Landforms* **30**: 251-253.

Lane, S.N., Chandler, J.H., et Porfiri, K. 2001. Monitoring river channel and flume surfaces with digital photogrammetry. *Journal of Hydraulic Engineering-ASCE* **127**: 871-877.

Lapointe, M. 1992. Burst-like sediment suspension events in a sand bed river. *Earth Surface Processes and Landforms* **17**: 253-270.

Lane, S.N., Biron, P.M., Bradbrook, K.F., Butler, J.B., Chandler, J.H., Crowell, M.D., McLelland, S.J., Richards, K.S., et Roy, A.G. 1998. Three-dimensional measurement of river channel flow processes using acoustic Doppler velocimetry. *Earth Surface Processes and Landforms* **23**: 1247-1267.

Larned, S.T., Nikora, V.I., et Biggs, B.J.F. 2004. Mass-transfer-limited nitrogen and phosphorus uptake by stream periphyton: a conceptual model and experimental evidence. *Limnology and Oceanography* **49**: 1992-2000.

- Leeder, M.R. 1983. On the interactions between turbulent flow, sediment transport et bedforms mechanics in channelized flows. Dans Collinson, J.D. et Lewin, J. (Eds.) International Association of sedimentologists Special publication, **6**, 5-18.
- Legendre, P. & M.-J. Fortin. 1989. Spatial pattern and ecological analysis. *Vegetatio* **80**: 107-138
- Legleiter, C., Phelps, T.L., Wohl, E.E. (sous presse), Geostatistical analysis of the effects of stage and roughness on reach scale spatial patterns of velocity and turbulence intensity. *Geomorphology*.
- Leopold, L.B., Wolman, M.D. et Miller J.P. 1964 *Fluvial processes in geomorphology*. Dover Publications, New York, 521p.
- Liao, J.C., Beal, D.N., Lauder, G.V., et Triantafyllou, M.S. 2003. Fish exploiting vortices decrease muscle activity. *Science* **302**: 1566-1569.
- Liepmann, H.W. 1952. Aspects of the turbulence problem. *Journal of the applied mathematics and Physics (ZAMP)* **3**: 321-426.
- MacVicar, B. J. 2006. On Turbulence and the formation of Riffle-Pool in Gravel-Bed Rivers, Thèse de Doctorat, Université de Montréal.
- Matheron, G. 1962. *Traité de géostatistique appliquée, Tome I*. Mémoires du Bureau de Recherches Géologiques et Minières, No.14. Editions Technip, Paris.
- Matheron, G. (1963). Principles of geostatistics. *Economic Geology*, **58**:1246-1266.
- McDonald, B.C. et Banerjee, I., 1971. Sediment and bed forms on a braided outwash plain. *Canadian Journal of Earth Sciences*, **8** : 1282-1301.
- McLelland, SJ; Nicholas, AP, A new method for evaluating errors in high-frequency ADV measurements, *Hydrological processes*.
- Merigoux, S. et Doledec, S. 2004. Hydraulic requirements of stream communities: a case study on invertebrates. *Freshwater Biology* **49**: 600-613.
- Metcalfe, N.B., Valdimarsson, S.K., et Fraser, N.H.C. 1997. Habitat profitability and choice in a sit-and-wait predator: juvenile salmon prefer slower currents on darker nights. *Journal of Animal Ecology* **66**: 866-875.
- Mitrovic, S.M., Oliver, R.L., Rees, C., Bowling, L.C., et Buckney, R.T. 2003. Critical flow velocities for the growth and dominance of *Anabaena circinalis* in some turbid freshwater rivers. *Freshwater Biology* **48**: 164-174..

- Moilanen, A. et M. Nieminen. 2002. Simple connectivity measures in spatial ecology. *Ecology* **84**:1131-1145.
- Montgomery, D.R. et Buffington, J.M. 1997. Channel-reach morphology in mountain drainage basins. *Geological Society of America Bulletin* **109**: 596-611.
- Morris, 1955. Flow in rough conduits. *Transactions of ASCE* **120**:373-98
- Mosley, M.P. et Tindale, D.S. 1985. Sediment variability and bed material sampling in gravel-bed rivers. *Earth Surface Processes and Landforms* **10**: 465-482.
- Nakagawa, H. et Nezu, I. 1981. Structure of space-time correlations of bursting phenomena in an open-channel flow. *Journal of Fluid Mechanics* **104**: 1-43.
- Nikora V.I. 1999. Origin of the ‘ -1 ’ spectral law in wall-bounded turbulence. *Physical Review Letters* **83**: 734–737.
- Nikora V.I. (sous presse), Hydrodynamic effect in gravel-bed rivers: from micro to macro-turbulence. Dans *Gravel Bed Rivers VI*. Elsevier.
- Nikora, V et Goring D. 1998. ADV measurements of turbulence: can we improve their interpretation ? *Journal of Hydraulic Engineering, ASCE* **124**: 630-634
- Nikora, V.I., Goring, D.G., Biggs, B.J.F., 1998. On gravel-bed roughness characterization. *Water Resources Research* 34 (3), 517–527.
- Nikora, V.I., Aberle, J., Biggs, B.J.F., Jowett, I.G., et Sykes, J.R.E. 2003. Effects of fish size, time-to-fatigue and turbulence on swimming performance: a case study of *Galaxias maculatus*. *Journal of Fish Biology* **63**: 1365-1382.
- Nowell, A.R.M. et Church, M. 1979. Turbulent-flow in a depth-limited boundary-layer. *Journal of Geophysical Research-Oceans and Atmospheres* **84**: 4816-4824.
- Økland, F., Thorstad, E.B., & Naesje, T.F. 2004. Is atlantic salmon production limited by 519 number of territories? *Journal of Fish Biology* 65: 1047-1055.
- O'Melia C.R. & Tiller C.L. 1993. Physico chemical aggregation and deposition in aquatic environments. *Environmental Particles 1* (eds J. Buffle & H. P. Van Leeuwin), pp. 353-386. Lewis Publishers, Boca Raton, FL.
- Ovidio M., Enders, E., Hallot, E., Roy, M., Philippart, J.C., Petit, F., et Roy, A.G (soumis). Large scale mobility patterns of Atlantic salmon parr in individual space utilization, *Journal of fish biology*.

- Paiement-Paradis G., Buffin-Bélanger, T. et Roy A.G. 2003. Scalings for large turbulent flow structures in gravel-bed rivers. *Geophysical research letters*. 30, 14:
- Parrish, D.L., Behnke, R.J., Gephard, S.R., McCormick, S.D., and Reeves, G.H. 1998. Why aren't there more atlantic salmon (*Salmo salar*)? *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* **55**: 281-287.
- Parsons, M., Thoms, M.C., et Norris, R.H. 2004. Using hierarchy to select scales of measurement in multiscale studies of stream macroinvertebrate assemblages. *Journal of the North American Benthological Society* **23**: 157-170.
- Pavlov D. S., Lupandin A. I. et Skorobokatov, 2000. The effects of flow turbulence on the behaviour and distribution of fish. *Journal of Ichthyology* **40**: S232-S261
- Puckett, K. J., et L. M. Dill. 1985. The energetics of feeding territoriality in juvenile coho salmon (*Oncorhynchus kisutch*). *Behaviour* **92**:97-111.
- Quinn, J.M., Hickey, C.W., et Linklater, W. 1996. Hydraulic influences on periphyton and benthic macroinvertebrates: simulating the effects of upstream bed roughness. *Freshwater Biology* **35**: 301-309.
- Rennie, C.D., Millar, R.G., Church, M., 2002. Measurement of bed load velocity using an acoustic Doppler current profiler. *J. Hydraul. Eng.-ASCE* **128**, 473-483.
- Reynolds C.S. & Walsby A.E. 1975. Water blooms., *Biological Reviews*, **50**, 437-481.
- Rhoads, B.L., Schwartz, J.S., Porter, S., 2003. Stream geomorphology, bank vegetation, and three-dimensional habitat hydraulics for fish in midwestern agricultural streams. *Water Resources Research* **39**, **8**, 1218
- Richards, K.S. 1982: *Rivers, Form and Process in alluvial channels*. London: Methuen, 358pp.
- Robert, A. 1990. Boundary roughness in coarse-grained channels. *Progress in Physical Geography* **14**: 42-70.
- Robert, A. 1997. Characteristics of velocity profiles along riffle-pool sequences and estimates of bed shear stress. *Geomorphology* **19**: 89-98.
- Robert., A. 2003. *River Processes: An introduction to Fluvial Dynamics*. London :Arnold. 214pp.
- Robson, B.J. et Barmuta, L.A. 1998. The effect of two scales of habitat architecture on benthic grazing in a river. *Freshwater Biology* **39**: 207-220.
- Robson, B.J., Chester, E.T., et Davis, J.A. 1999. Manipulating the intensity of near-bed

turbulence in rivers: effects on benthic invertebrates. *Freshwater Biology* **42**: 645-653.

Rodriguez, A., Sanchez-Arcilla, A., Redondo, J.M., Mosso, C., 1999. Macroturbulence measurements with electromagnetic and ultrasonic sensors: a comparison under high-turbulent flows. *Experiments in Fluids* **27** : 31–42.

Rosenfeld, J. 2003. Assessing the habitat requirements of stream fishes: an overview and evaluation of different approaches. *Trans. Am. Fish. Soc.* **132**: 953–968.

Roy, A.G. et Buffin-Bélanger, T. 2000. Advances in the study of turbulent flow structures in gravel-bed rivers. *In Gravel-Bed Rivers V.* John Wiley & Sons Ltd., Chichester pp. 375-404.

Roy, A.G., Biron, P., De Serres, B., 1996. On the necessity of applying a rotation to instantaneous velocity measurements in river flows. *Earth Surface Processes and Landforms*. **21** : 817– 827.

Roy, A.G., Buffin-Belanger, T., Lamarre, H., et Kirkbride, A.D. 2004. Size, shape and dynamics of large-scale turbulent flow structures in a gravel-bed river. *Journal of Fluid Mechanics* **500**: 1-27.

Saunders, R.L. & Gee, J. H. 1964. Movements of young Atlantic salmon in a small stream. *Journal of the fisheries Research Board of Canada* **21**: 27-36

Scruton, D.A., Ollerhead, L.M.N., Clarke, K.D., Pennell, C., Alfredsen, K., Harby, A., et Kelly, D. 2003. The behavioural response of juvenile atlantic salmon (*salmo salar*) and brook trout (*salvelinus fontinalis*) to experimental hydropeaking on a newfoundland (canada) river. *River Research and Applications* **19**: 577-587.

Sear, D.A. 1996. Sediment transport processes in pool-riffle sequences. *Earth Surface Processes and Landforms* **21**: 241-262.

Sechet, P. and Guennec, B. L. 1999. Bursting phenomenon and incipient motion of solid particles in bed-load transport. *Journal of Hydraulic Research*, Vol. 37, No. 5, pp. 683-705

Shah, D.A. et Antonia, R.A. 1989. Scaling of the bursting period in turbulent boundary-layer and duct flows. *Physics of Fluids a-Fluid Dynamics* **1**: 318-325.

Sibson, R. (1981). A brief description of natural neighbour interpolation. *Dans Barnett, V editeur : Interpreting Multivariate Data*, Wiley Series in Probability and Mathematical Statistics : Applied Probability and Statistics, pages 21{36. John Wiley & Sons Inc., New York.

Smart, G., Aberle, J., Duncan, M., et Walsh, J. 2004. Measurement and analysis of alluvial bed roughness. *Journal of Hydraulic Research* **42**: 227-237.

Smith, C.R. 1996. Coherent flow structures in smooth-wall turbulent boundary layers: facts, mechanisms and speculation. *In Coherent Flow Structures in Open Channels. Edited by P.J. Ashwort, S.J. Bennett, J.L. Best, et S.J. McLelland.* John Wiley & Sons, Chichester pp. 1-39.

Smith, D.L., Brannon, E.L., et Odeh, M. 2005. Response of juvenile rainbow trout to turbulence produced by prismatic shapes. *Transactions of the American Fisheries Society* **134**: 741-753.

Smith, D.L., Brannon, E.L., Shafii, B., et Odeh, M. 2006. Use of the average and fluctuating velocity components for estimation of volitional rainbow trout density. *Transactions of the American Fisheries Society* **135**: 431-441.

Soulsby, R.L. 1980, Selecting record length and digitization rate for near-bed turbulence measurements. *Journal of Physical Oceanography*, **10** : 208-219

Statzner, B., Gore, J.A., et Resh, V.H. 1988. Hydraulic stream ecology - observed patterns and potential applications. *Journal of the North American Benthological Society* **7**: 307-360.

Steinberg, C.E.W. et Hartmann, H.M. 1988. Planktonic bloom-forming cyanobacteria and the eutrophication of lakes and rivers. *Freshwater Biology* **20**: 279-287.

Thompson, D.M., Wohl, E.E., Jarrett, R.D., 1999. Pool sediment sorting processes and the velocity-reversal hypothesis. *Geomorphology* **17**, 142-156

Thomson. (sous presse) The characteristics of turbulence in a shear zone downstream of a channel constriction in a coarse-grained forced pool, *Geomorphology*.

Trangmar, B.B., Yost, R.S., Uehara, G. 1985. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. *Adv. Agron.* **38**: 45-94.

Yalin, M.S. (1992) *River Mechanics*. Pergamon Press, Exeter, 219pp.

Wackernagel, H. (2003). *Multivariate Geostatistics : an Introduction with Applications*. Springer-Verlag, Berlin. Third completely revised edition.

Wadson RA, Rowntree KM. 1998. Application of the hydraulic biotope concept to the classification of instream habitats. *Aquatic Ecosystem Health and Management* **1**: 143-157.

Wohl E.E et Thomson D.M., 2000 Velocity characteristics along a small step-pool channel. *Earth Surface Processes and Landforms*, **25**:353-367.

Wohl, E.E., Anthony, D.J., Madsen, S.W., et Thompson, D.M. 1996. A comparison of surface sampling methods for coarse fluvial sediments. *Water Resources Research* **32**: 3219-3226.

Wolman, M.G., 1954. A method of sampling coarse river-bed material. *Transactions of the American Geophysical Union*, 35(6): 951-956.

Zdravkovich, M.M. 1996. Different modes of vortex shedding: an overview. *Journal of Fluids and Structures* **10**: 427-437.

