

Université de Montréal

**Organisation des formes du lit et rôle des changements de rugosité sur la
variabilité spatiale de l'écoulement dans les cours d'eau à lit de graviers.**

Par

Hélène Lamarre

Département de géographie

Faculté des arts et des sciences

Mémoire présenté à la Faculté des études supérieures
en vue de l'obtention du grade de
Maître ès Science (M.Sc.)
en géographie

juin 2001

© Hélène Lamarre, 2001

Université de Montréal
Faculté des études supérieures

Ce mémoire intitulé :

Organisation des formes du lit et rôle des changements de rugosité sur la variabilité spatiale de l'écoulement dans les cours d'eau à lit de graviers.

Par

Hélène Lamarre

a été évalué par un jury composé des personnes suivantes :

François Courchesne

André G. Roy

Pascale Biron

Mémoire accepté le :

SOMMAIRE

Les formes du lit jouent un rôle prépondérant sur la résistance à l'écoulement. La disposition des particules qui composent les lits des cours d'eau en milieux graveleux génère des formes de différentes tailles qui entraînent des changements de rugosité et conséquemment, une variabilité spatiale des caractéristiques turbulentes de l'écoulement. Il est tout de même surprenant de constater que les écoulements en rivières à lit de graviers sont bien structurés et ce, dans un contexte où le lit est composé de particules hétérométriques et de formes organisées de façon complexe. Plusieurs études menées en laboratoire ont permis d'identifier et de décrire les structures cohérentes dans les écoulements turbulents. Seulement, peu de travaux effectués en milieu naturel ont permis de lier la rugosité du lit aux caractéristiques turbulentes de l'écoulement dans un contexte dynamique et à l'échelle d'un tronçon de rivière. On commence à peine à comprendre l'effet d'un amalgame isolé sur l'écoulement. Une meilleure connaissance des liens entre la morphologie du lit et la structure de l'écoulement permettra de mieux comprendre leur influence sur la stabilité des lits ainsi que sur le transport des sédiments.

Les objectifs de cette étude sont 1) de décrire l'organisation des formes du lit ainsi que 2) de quantifier et de prédire la variabilité spatiale des caractéristiques turbulentes de l'écoulement en fonction de la morphologie du lit. Pour répondre au premier objectif, nous avons développé deux stratégies d'échantillonnage qui permettent de cartographier la position des blocs et des amas de galets sur quatre sections de cours d'eau à lit de graviers : une cartographie ponctuelle des éléments de rugosité et une cartographie détaillée de la topographie du lit. Pour caractériser les liens entre les éléments de rugosité et l'écoulement, nous avons réalisé deux cartographies détaillées d'une section de rivière jumelées à un échantillonnage systématique des vitesses longitudinales de l'écoulement. La cartographie de la section est effectuée à haute résolution spatiale à l'aide d'une station tachéométrique. Un échantillonnage systématique de plusieurs profils de vitesse à haute résolution spatiale et temporelle se fait en même temps que la topographie de la surface du lit. Les séries de vitesse sont récoltées à partir de plusieurs courantomètres électromagnétiques déployés verticalement dans l'écoulement. La combinaison des vitesses d'écoulement et de la cartographie qui caractérise les formes du lit et les différentes échelles de rugosité permet de mieux comprendre la variabilité spatiale de l'écoulement à l'échelle d'un tronçon de rivière.

Une première série de résultats nous permet de voir que les éléments de rugosité protubérants ont une organisation préférentielle à la surface du lit. La répartition des éléments de rugosité est d'abord fonction des profondeurs de l'écoulement. On observe aussi que peu importe la méthode d'échantillonnage ou la taille des sections de rivière à l'étude, il existe des zones de la surface du lit où la concentration des obstacles à l'écoulement diminue considérablement. Ces zones apparaissent pour des distances semblables à chacune des sections. Ensuite, la distribution des distances entre les éléments de rugosité les plus près permet d'observer qu'ils se positionnent rarement très près à l'aval d'un autre. Enfin, les éléments de rugosité identifiés dans les cours d'eau à lit de graviers ont tendance à s'organiser sous forme d'alignements. La présence d'organisation dans la distribution des principaux éléments de rugosité est testée à partir de distributions aléatoires d'obstacles.

La seconde série de résultats nous permet de montrer que les écoulements en milieu graveleux sont structurés en fonction de la morphologie du lit. La variabilité des vitesses longitudinales et des écarts-types en fonction de la hauteur au-dessus du lit génère différents types de profils de vitesse à l'échelle de la section de cours d'eau. Les profils de vitesse sont classifiés en fonction de leur forme. Ces formes varient en relation avec la présence et la distance à laquelle les profils se trouvent par rapport aux éléments de rugosité à la surface du lit. Aussi, des séquences typiques de profils apparaissent en fonction de la taille et de la concentration des éléments de rugosité. La cartographie constitue donc un élément essentiel dans la prévision des vitesses de l'écoulement mais aussi dans l'estimation des forces de traction qui permettent de déterminer des mesures de transport des sédiments.

TABLE DES MATIÈRES

SOMMAIRE.....	III
TABLE DES MATIÈRES.....	V
LISTE DES FIGURES.....	VII
LISTE DES TABLEAUX.....	XII
LISTE DES SYMBOLES.....	XIII
REMERCIEMENTS.....	XIV
INTRODUCTION.....	1

1) CONTEXTE

1.1) ORGANISATION COMPLEXE DES PARTICULES À LA SURFACE DU LIT.....	4
1.2) LES ÉCHELLES DE RUGOSITÉ DU LIT.....	6
1.2.1) L'échelle des particules.....	6
1.2.2) Microformes du lit.....	8
1.2.2.1) Les amas de galets.....	9
1.2.2.2) Les formes transversales.....	11
1.2.2.3) Les grandes ondulations à l'échelle du chenal.....	11
1.3) DÉFINITION ET CARACTÉRISTIQUES DE LA TURBULENCE.....	16
1.3.1) Les types d'écoulement et le profil de vitesse.....	16
1.3.2) Qu'est-ce que la turbulence ?.....	21
1.3.3) Les différentes structures turbulentes de l'écoulement.....	21
1.3.3.1) Les structures d'éjection/incursion.....	22
1.3.3.2) Les structures d'échappement.....	25
1.3.3.3) Les structures à grande échelle de l'écoulement.....	28
1.4) EFFET DE LA MORPHOLOGIE DU LIT SUR LES VITESSES DE L'ÉCOULEMENT.....	36
1.4.1) L'espacement des obstacles protubérants.....	37
1.4.2) Les changements de rugosité du lit.....	42
1.4.3) L'organisation des microformes à l'échelle du cours d'eau.....	48
1.5) CONCLUSION.....	52

2) PROBLÉMATIQUE ET MÉTHODE

2.1) PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS.....	55
2.2) STRATÉGIES GÉNÉRALES D'ÉCHANTILLONNAGE.....	58

3) ORGANISATION MORPHOLOGIQUE DES AMAS DE GALETS ET DES ÉLÉMENTS PROTUBÉRANTS DANS LES COURS D'EAU À LIT DE GRAVIERS

3.1) INTRODUCTION.....	60
3.2) MÉTHODE.....	62
3.2.1) Site d'étude.....	62
3.2.2) Méthodes d'échantillonnage.....	66
3.3) RÉSULTATS.....	74
3.3.1) Organisation morphologique du lit en milieux graveleux.....	74
3.3.1.1) Concentration des obstacles à la surface du lit.....	74
3.3.1.2) Distribution des obstacles les plus près.....	80
3.3.1.3) Relation entre la distance des obstacles les plus près et l'angle que prennent ces obstacles à la surface du lit.....	82
3.3.1.4) Alignement des éléments de rugosité protubérants.....	84
3.3.2) Comparaison avec des distributions aléatoires d'obstacles.....	89

3.3.2.1) Distance entre les obstacles les plus près.....	89
3.3.2.2) Relation angle et plus proche voisin.....	91
3.3.2.3) Alignement des éléments de rugosité protubérants.....	94
3.4) DISCUSSION.....	98
3.5) CONCLUSION.....	102
4) RÔLE DE LA MORPHOLOGIE DU LIT SUR LA VARIABILITÉ SPATIALE DE L'ÉCOULEMENT À L'ÉCHELLE D'UN TRONÇON DE COURS D'EAU EN MILIEU GRAVELEUX	
4.1) INTRODUCTION.....	105
4.2) MÉTHODE.....	107
4.2.1) Cartographie du lit.....	109
4.2.2) Vitesses de l'écoulement.....	109
4.3) RÉSULTATS	119
4.3.1) La forme des profils de vitesse longitudinale.....	121
4.3.2) Distribution spatiale des profils types à l'échelle de la section de cours d'eau.....	126
4.3.3) La forme des profils de <i>rmsu</i>	130
4.3.4) Distribution spatiale des profils types de <i>rmsu</i>	135
4.3.5) Liens entre la variabilité des caractéristiques de l'écoulement obtenues à partir des profils de vitesse et les changements morphologiques.....	139
4.4) DISCUSSION.....	144
4.5) CONCLUSION.....	149
5) CONCLUSION.....	151
6) BIBLIOGRAPHIE.....	153

LISTE DES FIGURES

- Figure 1.1** : a) Hétérométrie et imbrication des particules qui composent la surface du lit en milieux graveleux, b) différents types d'arrangement structural du matériel du lit : A) structures imbriquées, B) structures imbriquées partiellement développées, C) bloc en saillie (Laronne et Carson, 1976).....5
- Figure 1.2** : a) Les amas de galets dans les cours d'eau à lit de graviers, b) les composantes d'un amas de galets A) vus en coupe, les amas de galets sont composés d'un obstacle principal, d'une zone d'accumulation de galets à l'amont et d'un dépôt de particules fines à l'aval, B) vue en plan et caractéristiques dimensionnelles des amas de galets (Brayshaw, 1984).....10
- Figure 1.3** : Représentation d'une forme transversale qui marque une dénivellation topographique sur le profil longitudinal du ruisseau Moras, Mauricie-Bois-Francs (Qc)....12
- Figure 1.4** : Représentation d'une séquence seuil-mouille. La section seuil est présentée en arrière plan. Elle est caractérisée par des particules grossières, par des vitesses rapides et de faibles profondeurs de l'écoulement. Au premier plan on observe la mouille où les vitesses ralentissent considérablement et les profondeurs sont plus importantes.....12
- Figure 1.5** : Caractéristiques morphologiques et sédimentologiques des différentes composantes d'une séquence seuil-mouille et influence sur le transport des sédiments (Sear, 1996).....14
- Figure 1.6** : Les écoulements laminaires conceptualisés par le glissement des tranches d'eau les unes sur les autres et par le ralentissement des vitesses près du lit (Knighton, 1998).....17
- Figure 1.7** : Les écoulements turbulents sont caractérisés par des échanges d'énergie entre les tranches d'eau (Knighton, 1998).....17
- Figure 1.8** : Les zones de l'écoulement au-dessus d'un lit lisse : a) la sous-couche visqueuse est consacrée à la production de turbulence, b) la zone de transition à sa généralisation, c) la zone externe est caractérisée par la croissance et la dissipation de l'énergie turbulente (Southard et Middleton, 1984).....17
- Figure 1.9** : Production de turbulence dans chacune des différentes zones de l'écoulement (Kline *et al.*, 1967).....19
- Figure 1.10** : a) Vue en plan de traînée longitudinales dans la couche turbulente de l'écoulement et photographie de traînée à partir de bulles d'hydrogène pour $Re = 4300$ (Smith, 1996), b) traînée longitudinale dans la sous-couche visqueuse d'un écoulement turbulent près du lit et développement d'une structure d'éjection (Kline *et al.*, 1967)...24
- Figure 1.11** : Modèle d'éjection-incursion (*burst-sweep cycle*). Le développement, à partir d'une traînée longitudinale, d'une éjection vers la couche supérieure de l'écoulement suivie d'une incursion de fluide qui se dirige vers la surface du lit. Les profils de vitesse sont présentés pour chacune des étapes du cycle (Allen, 1985).....26

- Figure 1.12** : Composantes des structures en fer à cheval qui se forment directement à l'aval de l'hémisphère dans la zone de sillage créées par l'obstacle (Acarlar et Smith, 1987).....27
- Figure 1.13** : Zones dynamiques de l'écoulement autour d'un amas de galets (Buffin-Bélanger et Roy, 1998).....29
- Figure 1.14** : Structures à grande échelle de l'écoulement. Les portions de fluides rapides sont entrelacées par des portions plus lentes et se développent vers l'aval sur toute la profondeur d'eau (Nezu et Nakagawa, 1993).....30
- Figure 1.15** : Répartition spatiale et dimensions des portions lentes et rapides de l'écoulement. Les sections noires représentent les portions rapides de vitesse et les sections blanches les portions plus lentes que la moyenne (Yalin, 1992).....32
- Figure 1.16** : Portions intermittentes de fluide rapide et de fluide plus lent. Les portions noires représentent les vitesses supérieures aux vitesses moyennes de l'écoulement et les portions blanches les vitesses inférieures (Buffin-Bélanger et Roy, 2000).....34
- Figure 1.17** : Effets du changement de rugosité sur les fluctuations de vitesses longitudinales $\langle u \rangle$, verticales $\langle v \rangle$ et latérales $\langle w \rangle$ de l'écoulement à proximité du lit où z est la hauteur au-dessus du lit et H la profondeur totale de l'écoulement (Dancey, 2000).....38
- Figure 1.18** : Coefficients qui expriment la forme des profils de vitesse pour différentes concentrations de particules à la surface du lit en fonction de la résistance à l'écoulement (Nowell et Church, 1979).....40
- Figure 1.19** : Résistance à l'écoulement en fonction de la densité des particules du lit (Raupach, 1991).....40
- Figure 1.20** : Effets de la concentration des particules sur le comportement de l'écoulement : a) à une faible densité de particule, l'écoulement agit comme pour des obstacles isolés, b) à une échelle intermédiaire, il existe une interaction entre les structures de l'écoulement générées par le premier obstacle et celles qui apparaissent pour un obstacle qui lui succède, c) l'écoulement se comporte de la même façon que sur une surface lisse lorsque les obstacles sont très près (Adapté de Morris, 1955 par Vogel, 1994).....41
- Figure 1.21** : Variabilité des paramètres de turbulence en fonction de la profondeur et identification de trois zones verticales de l'écoulement à partir de l'intensité turbulente et de la densité des éléments de rugosité : a) intensité turbulente, la courbe pleine présente les résultats de Laufer (1950) pour un lit lisse, b) dissipation de l'énergie turbulente (Nowell et Church, 1979).....43
- Figure 1.22** : Manifestation de l'écoulement à différentes élévations au-dessus du lit en fonction des obstacles à la surface d'un cours d'eau à lit de graviers (Robert, 1992)...44

- Figure 1.23** : Fluctuation de vitesse de friction (u^*) et de hauteur où la vitesse est nulle (y_0) en fonction de la distance entre un obstacle et un profil de vitesse (Robert, 1992).....44
- Figure 1.24** : Profils d'intensité turbulente au-dessus d'éléments artificiels de rugosité. Les profils 1 et 2 sont à l'amont de l'obstacle et 3,4,5 et 6 s'éloignent vers l'aval de la transition de rugosité (Robert *et al.*, 1992).....46
- Figure 1.25** : Vecteurs de vitesse longitudinale et verticale de l'écoulement autour d'amas de galets (Lawless et Robert, 2001).....47
- Figure 1.26** : Cartographie des obstacles protubérants à l'écoulement sur une section de la Harris Creek. Les blocs ont tendance à s'organiser sous la forme de cellules circulaires fermées et stables à la surface du lit (Church *et al.*, 1998).....49
- Figure 1.27** : Localisation et densité des amas de galets sur des coupes transversales d'une section de la rivière Turkey Brook (Hassan et Reid, 1990).....51
- Figure 2.1**: Relations entre la structure turbulente de l'écoulement, les formes du lit et le transport des sédiments (Nezu et Nakagawa, 1993).....56
- Figure 3.1** : Localisation des rivières échantillonnées : a) ruisseau Moras et Guertin, b) Eaton Nord.....64
- Figure 3.2** : a) Vue amont du ruisseau Moras (Mauricie-Bois-Francs, Québec), b) ruisseau Guertin (Mauricie-Bois-Francs, Québec), c) vue vers l'aval de la rivière Eaton Nord (Estrie, Québec).....65
- Figure 3.3** : a) Station tachéométrique, b) la station émet un rayon laser qui est réfléchi par l'intermédiaire d'un prisme positionné au point à mesurer. Elle permet de déterminer les coordonnées des points topométriques dans l'espace.....67
- Figure 3.4** : Étapes de réalisation des stratégies d'échantillonnage sur le terrain et en laboratoire : a) méthode de cartographie ponctuelle des éléments de rugosité, b) cartographie détaillées du lit.....70
- Figure 3.5** : a) Système de référence de l'orientation que prennent les obstacles voisins à la surface du lit et b) exemple de diagramme de pourcentage provenant de la relation entre la distance qui sépare les obstacles voisins et l'orientation que prennent ces obstacles par rapport au sens de l'écoulement.....73
- Figure 3.6** : Méthode d'identification des alignements à partir des critères d'angle et de distance.....75
- Figure 3.7** : Distribution des obstacles sur le ruisseau Moras : a) répartition des obstacles, b) fréquence des obstacles à une coupe transversale, c) fréquence des obstacles à une coupe longitudinale, d) profondeurs de l'écoulement à une coupe transversale, e) profondeurs de l'écoulement à une coupe longitudinale.....76

- Figure 3.8** : Distribution des obstacles sur le ruisseau Guertin : a) répartition des obstacles, b) fréquence des obstacles à une coupe transversale, c) fréquence des obstacles à une coupe longitudinale, d) profondeurs de l'écoulement à une coupe transversale, e) profondeurs de l'écoulement à une coupe longitudinale.....76
- Figure 3.9** : Distribution des obstacles sur la rivière Eaton Nord-1999 : a) répartition des obstacles, b) fréquence des obstacles à une coupe transversale, c) fréquence des obstacles à une coupe longitudinale, d) profondeurs de l'écoulement à une coupe transversale, e) profondeurs de l'écoulement à une coupe longitudinale.....77
- Figure 3.10** : Distribution des obstacles sur la rivière Eaton Nord-2000 : a) répartition des obstacles, b) fréquence des obstacles à une coupe transversale, c) fréquence des obstacles à une coupe longitudinale, d) profondeur de l'écoulement.....77
- Figure 3.11** : Distribution des distances ente les obstacles les plus près : a) ruisseau Moras, b) ruisseau Guertin, c) Eaton Nord-1999 d) Eaton Nord-2000.....81
- Figure 3.12** : Distribution en pourcentage de la distance d'obstacles voisins en fonction de l'angle que prennent les obstacles par rapport au sens de l'écoulement : a) ruisseau Moras, b) ruisseau Guertin, c) Eaton Nord-1999, d) Eaton Nord-2000.....83
- Figure 3.13** : Relation entre le nombre d'éléments de rugosité dans un alignement et l'orientation de l'alignement avec l'écoulement : a) ruisseau Moras, b) ruisseau Guertin, c) Eaton Nord-1999 et d) Eaton Nord-2000.....86
- Figure 3.14** : Relation entre le nombre d'éléments de rugosité dans un alignement et la distance moyenne entre chacun des éléments qui forment les alignements pour les campagnes effectuées sur la Eaton Nord-1999 et 2000.....88
- Figure 3.15** : Distribution des distances entre les obstacles les plus près et erreur-type pour chacune des classes de distance pour les distributions aléatoires : a) ruisseau Moras, b) ruisseau Guertin, c) Eaton Nord-1999 et d) Eaton Nod-2000.....90
- Figure 3.16** : Distribution en pourcentage de la distance d'obstacles voisins en fonction de l'angle que prennent les obstacles par rapport au sens de l'écoulement pour des distributions aléatoires : a) ruisseau Moras, b) ruisseau Guertin, c) Eaton Nord-1999, d) Eaton Nord-2000.....93
- Figure 3.17** : Relation entre le nombre d'éléments de rugosité dans un alignement et l'orientation de l'alignement avec l'écoulement pour des distributions aléatoires : a) ruisseau Moras, b) ruisseau Guertin, c) Eaton Nord-1999 et d) Eaton Nord-2000.....96
- Figure 4.1** : Déploiement vertical des courantomètres dans l'écoulement sur la Eaton Nord-1999. Chacun des courantomètres est séparé par une distance verticale de 8 cm.....111
- Figure 4.2** : Topographie et localisation des sites d'échantillonnage des vitesses de l'écoulement (Eaton Nord-1999).....113

Figure 4.3 : Déploiement vertical des courantomètres dans l'écoulement sur la Eaton Nord-2000. La densité des courantomètres est plus élevée près du lit. Dans la portion proximale au lit, les senseurs sont séparés par une distance de 4 cm. Près de la surface, il y a 8 cm entre chacun des senseurs.....114

Figure 4.4 : Topographie et localisation des sites d'échantillonnage des vitesses de l'écoulement (Eaton Nord-2000).....115

Figure 4.5 : Séries de vitesse enregistrées à sept hauteurs au-dessus du lit (cm) pour une durée de 120 secondes. La validation des données peut être effectuée à partir des caractéristiques descriptives moyennes de chacune des séries et de la cohérence des signaux à chacune des hauteurs au-dessus du lit.116

Figure 4.6 : Correspondance entre les valeurs (y_0 , τ) estimées à partir de tous les points des profils de vitesse et celles évaluées à partir des deux points les plus près du lit.....120

Figure 4.7 : Classification des profils de vitesse longitudinale : a) profils types, b) profils récoltés en 1999, c) profils récoltés en 2000.....122

Figure 4.8 : Répartition spatiale des profils types de vitesse longitudinal de l'écoulement en fonction de la morphologie du lit : a) 1999, b) 2000.....127

Figure 4.9 : Classification des profils de *rmsu* : a) profils types, b) profils récoltés en 1999, c) profils récoltés en 2000.....131

Figure 4.10 : Répartition spatiale des profils types de *rmsu* en fonction de la morphologie du lit : a) 1999, b) 2000.....136

Figure 4.11 : Distribution spatiale des valeurs de y_0 (cm) en fonction de la morphologie du lit : a) 1999, b) 2000.....140

Figure 4.12 : Distribution spatiale des valeurs de cisaillement (Nm^{-2}) en fonction de la morphologie du lit : a) 1999, b) 2000.....142

Figure 4.13 : Distribution spatiale des valeurs de *rmsu* en fonction de la morphologie du lit : a) 1999, b) 2000.....143

Figure 4.14 : Changements séquentiels de forme de profils de vitesse et de *rmsu* en fonction de la distance moyenne à un obstacle (a et b) et de l'ensemble des éléments morphologiques à la surface du lit (c, d, e). a) Séquence type des profils de vitesse longitudinale de l'écoulement en fonction d'un obstacle. b) Séquence type des profils de *rmsu* en fonction d'un obstacle. c) Effet de l'augmentation du nombre d'obstacles sur la séquence de profil de vitesse. d) Effet de l'augmentation de la taille d'un obstacle sur la séquence de profil de vitesse longitudinale. e) Effet de l'augmentation du nombre d'obstacles sur la séquence de profil de *rmsu*.....147

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1.1: Revue de la littérature sur l'identification des trois principaux types de structure turbulente de l'écoulement en laboratoire et en milieu naturel.....	23
Tableau 1.2: Similarité des caractéristiques définissant la taille des structures à grande échelles de l'écoulement observées sous différentes conditions.....	35
Tableau 1.3: Synthèse des échelles de rugosité et de leurs effets sur les caractéristiques de l'écoulement.....	53
Tableau 3.1: Caractéristiques morphologiques et hydrauliques des sections de cours d'eau à l'étude.....	63
Tableau 3.2: Critères de sélection et nombre de formes du lit échantillonnées sur les différentes sections d'étude.....	69
Tableau 3.3: Principales caractéristiques des alignements observés sur le ruisseau Moras, Guertin, la Eaton Nord-1999 et la Eaton Nord-2000.....	87
Tableau 3.4: Principales caractéristiques des alignements observés à partir des distributions aléatoires : a) ruisseau Moras, b) ruisseau Guertin, c) Eaton Nord-1999 et d) Eaton Nord-2000.....	96
Tableau 4.1: Caractéristiques des sections à l'étude sur la Eaton Nord en 1999 et 2000. Ces caractéristiques sont similaires sauf en ce qui a trait à la longueur de la section d'échantillonnage.....	108
Tableau 4.2: Nombre de profils de vitesse pour chacun des types de profil identifiés pour les deux campagnes d'échantillonnage.....	124
Tableau 4.3: Distance des profils types de vitesse longitudinale à un obstacle protubérant à la surface du lit.....	128
Tableau 4.4: Nombre de profils de <i>rmsu</i> pour chacun des types de profil identifiés pour les deux campagnes d'échantillonnage.....	133
Tableau 4.5: Distance des profils types de <i>rmsu</i> à un obstacle protubérant à la surface du lit.....	137

LISTE DES SYMBOLES

U	vitesse moyenne longitudinale d'une série de vitesse
V	vitesse moyenne à une coupe transversale
u_i	vitesse longitudinale instantanée au temps i
$\langle u \rangle_y$	vitesse moyenne longitudinale à une hauteur y au-dessus du lit
$\langle v \rangle_y$	vitesse moyenne verticale à une hauteur y au-dessus du lit
$rmsu$	écart-type des distributions des vitesses longitudinales
$rmsv$	écart-type des distributions des vitesses verticales
$\langle u \rangle$	vitesse longitudinale instantanée
$\langle v \rangle$	vitesse verticale instantanée
$\langle w \rangle$	vitesse latérale instantanée
y	hauteur au-dessus du lit
y^+	hauteur standardisée au-dessus du lit
Y	profondeur moyenne de l'écoulement
δ	épaisseur de la couche-limite turbulente
D	épaisseur de la tranche d'eau
R	rayon hydraulique
S_0	pente du lit
k_s	taille des particules
O_i	position d'un élément de rugosité à la surface du lit
D_x	diamètre des particules
b	taille de l'axe le plus long des particules
M_o	mode de la distribution d'échantillonnage
T	période de temps
L	dimension de longueur
n	paramètre de rugosité de Manning
k	constante de <i>von-Karman</i>
g	force gravitationnelle
ρ	densité massique de l'eau
μ	viscosité moléculaire
ν	viscosité cinématique
y_0	hauteur où la vitesse est nulle
u^*	vitesse de friction
τ	force de cisaillement au lit
η	force de viscosité associée aux tourbillons
Re	nombre de Reynolds

REMERCIEMENTS

Pour la liberté, pour le respect des décisions que j'ai prises à la suite de toutes ces permissions spéciales, je t'offre André mes plus sincères remerciements. Merci pour cette confiance et pour ta générosité. C'est pour toutes ces exclamations soudaines devant des courbes normales que je me suis mise à vouloir les faire, à en ajouter d'autres... Je te remercie d'avoir toujours partagé ton enthousiasme et ton dynamisme pour la recherche.

Thomas, mes remerciements pour toi je les garderais précieusement pour une rencontre qui nous permettrait d'effectuer le passage entre nos communications interpersonnelles farfelues par courriel et celles de la réalité ! Mais bon, je t'offre ici que les principaux. Merci de m'avoir impliquée dans plusieurs de tes projets, pour tous ces fameux schémas conceptuels devenus œuvres d'art, merci d'avoir simplifié mes tâches d'analyse de données malgré mon entêtement à vouloir les faire à la manière archaïque -un crayon, un rapporteur d'angles- merci de m'avoir assuré ces pauses plein-air dans toutes nos sorties de terrains, de congrès, de soupers et de fêtes, merci pour tes mots d'encouragements.

Les copains de terrain Gino, Mélissa, Mylène, Geneviève et Sophie, pour ces quelques heures passées sur la station totale et ces cailloux répertoriés, Antoine pour nous avoir sauvé des griffes chien à trois pattes, je vous remercie tous d'avoir passé ces quelques jours à Victoriaville et à Sherbrooke. Enfin Jean-François, Outremont, c'est pas ta ville mais que c'est jolie. Je te remercie de m'y avoir conduite et attendue, de m'avoir permis d'ajouter tous ces papillons aux calendriers en échange d'une vue ultra splendide sur le Mont-Royal... Merci aussi monsieur pour ces corrections et ces ajustements pré-impression !

INTRODUCTION

Plusieurs composantes de l'écoulement et de la morphologie du lit caractérisent les cours d'eau. L'examen de ces composantes à l'échelle d'un tronçon de rivière joue un rôle essentiel dans la dynamique fluviale. Il permet d'élaborer une gamme d'interactions liées aux changements morphologiques des rivières et implique des conséquences importantes pour le bassin-versant.

La surface du lit des cours d'eau est composée autant en milieu sablonneux qu'en milieu graveleux d'amalgames de particules qui prennent place à différentes échelles dans l'écoulement. Seulement, dans les cours d'eau à lit de graviers, la surface est composée de particules dont la taille s'échelonne sur une échelle granulométrique fréquemment complète. De plus, la concentration des particules est très variable. Les différentes tailles et concentrations de cailloux génèrent un environnement très hétérométrique typique des milieux graveleux. La complexité de l'organisation des particules s'exprime par la naissance de formes qui jouent le rôle d'obstacles protubérants à l'écoulement à la surface du lit. Les blocs, les amas de galets, les formes transversales ainsi que les séquences de creux topographiques apparaissent comme étant les principales formes des rivières graveleuses. Ces formes qui résultent de l'agencement des particules du lit ont des implications importantes sur le transport des sédiments parce qu'elles modifient la structure de l'écoulement.

Les éléments de rugosité présents à la surface du lit définissent les échelles de rugosité et entraînent une augmentation de la résistance à l'écoulement. Ils modifient la distribution des pressions mais surtout des vitesses de courant à différentes élévations au-dessus du lit. Ces effets se font particulièrement sentir dans les milieux où le ratio de la taille des éléments de rugosité sur la profondeur de l'écoulement est important. La distribution des obstacles génère aussi une grande variabilité spatiale des caractéristiques turbulentes de l'écoulement. Seulement, peu d'études ont décrit l'écoulement en fonction de l'ensemble des échelles de rugosité présentes dans un cours d'eau à lit de graviers et à l'échelle d'un tronçon de cours d'eau. Ces études ont particulièrement été effectuées en laboratoire sous des conditions hydrauliques contrôlées.

La description des liens entre la morphologie du lit et l'écoulement contribue à améliorer les connaissances permettant de décrire les nombreuses relations qui existent entre l'écoulement, les formes du lit et le transport des sédiments en milieu naturel. Entre autres relations, les éléments de rugosité modifient l'organisation de l'écoulement mais inversement les échanges turbulents expliquent la nature de la résistance du lit sur l'écoulement et influencent la formation des amalgames de cailloux. Aussi, la variabilité spatiale des forces de traction, impliquées dans la dynamique du transport des sédiments, est associée à la présence des formes à la surface du lit. Ces relations permettent non seulement d'interpréter le transport des sédiments et les changements morphologiques d'un cours d'eau mais elles contribuent aussi à une meilleure compréhension de la variabilité des micro-habitats aquatiques. Les modifications de la morphologie du lit et des caractéristiques de l'écoulement peuvent affecter à long terme la viabilité de différentes espèces de poisson. En modifiant la structure de l'écoulement et conséquemment le transport des sédiments en suspension, la morphologie du lit a aussi des implications importantes sur le mélange des polluants en rivière

Ce mémoire se présente sous une structure non-conventionnelle et est composé de cinq sections. Nous présentons dans la première partie une mise en contexte du projet de recherche. Nous passons d'abord en revue les connaissances portant sur les principales échelles de rugosité dans les cours d'eau à lit de graviers et ensuite sur les principes de l'écoulement. En dernier lieu, nous présentons les connaissances sur les effets de l'organisation morphologique du lit sur l'écoulement. La section suivante présente la problématique de recherche et les stratégies méthodologiques générales utilisées pour mener à terme deux projets qui répondent à des objectifs distincts qui sont: 1) de décrire l'organisation morphologique du lit et 2) de montrer les liens entre les éléments de rugosité et l'écoulement à l'échelle d'une section de cours d'eau. Les deux sections suivantes se présentent sous forme d'articles et présentent des résultats portant sur l'organisation morphologie du lit et sur l'effet d'éléments de rugosité sur l'écoulement. Les principaux éléments de la littérature sont repris pour introduire chacun des articles et la méthodologie de chacun des projets est décrite en détail. Dans le premier article, nous déterminerons comment la cartographie permet de représenter les blocs et les amas de galets des cours d'eau à lit de graviers. Nous verrons aussi les différents types d'organisation que prennent les principaux obstacles pour quatre tronçons de cours d'eau. Les caractéristiques des distributions spatiales de ces formes sont testées à partir de distributions aléatoires

d'éléments de rugosité. Le second article traitera du comportement de l'écoulement face aux changements de rugosité que l'on peut observer dans les cours d'eau à lit de graviers. Nous examinerons l'importance de la cartographie du lit comme méthode de prévision des vitesses longitudinales de l'écoulement, des écarts-types de ces distributions de vitesse, de la hauteur où la vitesse est nulle et des contraintes de cisaillement au lit à l'échelle d'une section de cours d'eau. Enfin, la dernière partie énonce les principales contributions des résultats présentés dans les deux articles.

1) CONTEXTE DE LA RECHERCHE

1.1) ORGANISATION COMPLEXE DES PARTICULES À LA SURFACE DU LIT

Dans les cours d'eau à lit de graviers, les relations entre la composition de la surface du lit, l'écoulement et le transport des sédiments sont complexes. Les lits sont composés de particules hétérométriques qui s'organisent sous différentes formes. Ces particules opposent une résistance à l'écoulement, créent une variabilité spatiale des forces de cisaillement exercées au lit et transforment la structure de l'écoulement. L'influence des obstacles sur l'écoulement est encore plus importante lorsqu'on observe la présence d'une forte imbrication entre les particules. Cette imbrication joue un rôle essentiel sur les taux de transport des sédiments (Brayshaw, 1985).

Les structures imbriquées sont caractérisées par des fragments grossiers (axe $b > 60$ mm) reposant les uns sur les autres et plongeant vers l'amont (Laronne et Carson, 1976) (figure 1.1). Leur formation est essentiellement liée au roulement et au glissement des particules. Lorsqu'une particule grossière se dépose sur du matériel plus fin, elle permet immédiatement la formation de vortex qui entraîne les particules fines alors que les galets peuvent se déposer en plongeant aussi vers l'amont. Les plus petites particules sont souvent transportées par saltation ou même par suspension et produisent rarement de telles structures. Avec la taille des particules, la fréquence des structures imbriquées diminue vers l'aval dans un cours d'eau. En outre, les imbrications les plus fortement développées se retrouvent particulièrement dans les petits tributaires ayant une largeur inférieure à 1 m, probablement en raison des forces turbulentes moins importantes et de la dominance des mouvements de roulement dans ce type de cours d'eau.

La position des particules, par rapport au niveau moyen du lit, entraîne aussi une modification des seuils critiques d'entraînement. L'effet de saillie implique que les particules nettement plus grossières que celles qui forment le lit pourraient être mises en mouvement à des forces tractrices plus faibles. Inversement, les forces tractrices pourraient être plus élevées pour mettre en mouvement les particules plus petites (Bravard et Petit, 1997). L'agencement des particules modifie les forces de résistance à l'écoulement. L'initiation du transport des sédiments est donc fortement contrôlée par la présence des obstacles à la surface du lit et des différents types structures que l'on observe en milieux graveleux.

a)



b)

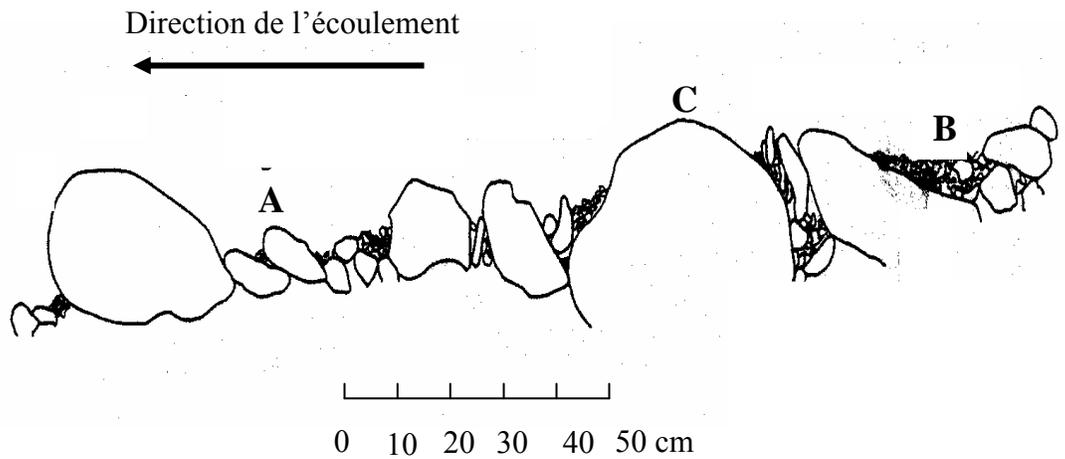


Figure 1.1 : a) Hétérométrie et imbrication des particules qui composent la surface du lit en milieu graveleux , b) différents types d'arrangement structural du matériel du lit : A) structures imbriquées, B) structures imbriquées partiellement développées, C) bloc en saillie (Laronne et Carson, 1976).

L'imbrication et l'effet de saillie montrent comment les particules s'agencent à la surface dans les cours d'eau à lit de graviers. Ces agencements assurent la stabilité du lit en le protégeant des forces d'érosion. Seulement, leur effet sur la dynamique fluviale est fortement contrôlé par l'échelle spatiale à laquelle l'organisation des particules se fait sentir et, conséquemment par la topographie du lit qui modifie aussi les seuils de transport des sédiments (Allen, 1997). Les échelles de rugosité vont alors intervenir différemment, en terme de magnitude, sur les modifications de la structure de l'écoulement.

1.2) LES ÉCHELLES DE RUGOSITÉ DU LIT

Robert (1990) propose une classification des différentes échelles de rugosité qui existent sur les lits de rivière en milieu graveleux. Trois différentes échelles de rugosité jouent un rôle important sur la résistance à l'écoulement : la taille des grains, les microformes du lit et les éléments morphologiques observés à l'échelle du cours d'eau. Ces échelles de rugosité entraînent des changements sur l'ensemble des processus du transport des sédiments. Nous présentons dans les sections suivantes chacune de ces échelles de rugosité. Leur description est essentielle pour éventuellement comprendre l'importance des perturbations qu'elles génèrent sur la résistance et la structure de l'écoulement.

1.2.1) L'échelle des particules

Les coefficients de résistance qui décrivent l'influence des particules sur l'écoulement à une échelle plus grande qu'à l'échelle locale doivent comprendre un ensemble de facteurs qui caractérisent indépendamment la taille, la forme et l'orientation des grains sur le lit. La taille des particules est essentielle à l'identification de la rugosité relative du lit. Nikuradse, en 1933, a développé un premier indice (K_s) pour quantifier la taille des sédiments dans des environnements sablonneux (Wooding *et al.*, 1973). La valeur de K_s est déterminée expérimentalement en terme d'observations mesurables des dimensions des particules à la surface du lit. On utilise habituellement la hauteur des grains. Dans des cours d'eau à lit de graviers, d'autres valeurs de rugosité associées à la taille des grains ont été développées pour estimer K_s à partir de D , le diamètre des particules. K_s représente alors une fonction linéaire de la taille des graviers. L'utilisation seule du diamètre de l'axe médian des grains tend à sous-estimer systématiquement les valeurs de rugosité observées sur le terrain. Il est donc fréquemment pondéré par une constante (Bergeron, 1996) :

$$K_s = C_x D_x$$

où C est la constante correspondant au diamètre des grains et x représente le pourcentage des sédiments dont la taille est inférieure à D . La valeur de x définit alors la rugosité du lit en fonction d'une portion de la distribution des tailles de particule. De nombreuses estimations de K_s ont été utilisées dans la littérature mais elles divergent fréquemment les unes des autres parce que chacune d'entre elles tente d'intégrer certaines des particularités associées à la rugosité d'un chenal. Elles peuvent faire intervenir les effets d'imbrication et de saillie ainsi que l'hétérométrie spatiale des particules sur une section de cours d'eau.

La valeur de K_s permet de quantifier la rugosité du lit seulement dans des conditions où la répartition spatiale des particules de différentes tailles est uniforme. Pour des surfaces où la taille des grains sur le lit est variable, la valeur médiane de la distribution granulométrique des sédiments à la surface du lit peut s'avérer un bon indicateur de la rugosité relative du lit à l'échelle des particules (Bathurst, 1982). Leopold et Wolman (1964) ont choisi de représenter l'échelle de rugosité associée à la taille des particules à partir du 84^e percentile de la distribution granulométrique des sédiments en supposant que les grains dont la taille est plus grande contribuent plus à l'augmentation de la résistance à l'écoulement à l'échelle de la section de cours d'eau. En fait, le 50^e, le 84^e et le 99^e percentile sont les plus utilisés pour représenter la taille de l'axe médian des sédiments parce qu'ils expriment tous la rugosité du lit de manière à décrire l'influence des obstacles les plus gros sur la résistance à l'écoulement (Millar, 1999). Cependant, Bray (1980, 1982) a montré que les différences étaient très peu significatives lors de l'utilisation de l'un ou l'autre des indicateurs dans les équations de résistance à l'écoulement.

La relation entre la forme des particules et la résistance à l'écoulement est plus difficile à investiguer. Par contre, puisque la forme des particules est essentiellement contrôlée par la géologie locale, cet effet n'a pas à être pris en compte dans des régions où la géologie est relativement homogène sur l'ensemble du cours d'eau à l'étude. Elle a donc été fréquemment omise des équations de résistance à l'écoulement proposées dans la littérature (Bathurst, 1978). En fait, les effets de la forme des particules sur la résistance à l'écoulement en milieu naturel sont très limités et ce, même si plusieurs auteurs ont quantifié ces effets en laboratoire notamment à partir d'indices de sphéricité (Wooding *et al.*, 1973).

Wohl et Ikeda (1998) ont utilisé sept différentes configurations de particules à la surface du lit afin d'observer leur influence sur l'écoulement en fonction d'un éventail de conditions liées au débit et aux valeurs de pente du chenal. Ils ont d'abord noté que les éléments de rugosité qui se disposent de façon transversale à l'écoulement créent une résistance beaucoup plus importante que celle générée par les obstacles positionnés longitudinalement. L'orientation longitudinale entraîne des vitesses plus rapides sur la surface du lit pour l'ensemble du profil mais l'influence de ces obstacles sur l'écoulement reste relativement faible. On n'observe pas de modifications sur les valeurs d'écart-type des distributions de vitesse. Par contre, les fluctuations sont importantes dans l'écoulement lorsque nous sommes en présence d'une disposition des particules dans le sens transversal du lit. Cela suggère que les particules transversales sont plus efficaces pour entraîner une augmentation de la résistance à l'écoulement et conséquemment, pour provoquer une augmentation de la dissipation de l'énergie sur l'ensemble de la tranche d'eau. L'augmentation de la production d'énergie est liée à l'influence des grains en terme d'obstacle majeur à l'écoulement. En fait, ces obstacles agissent sur la résistance à l'écoulement comme le feraient les microformes du lit.

L'apport de la résistance à l'écoulement associée à la taille, la forme et l'orientation des particules présentes à la surface du lit dans les cours d'eau à lit de graviers doit être investigué plus en profondeur afin de proposer des mesures qui expriment adéquatement la rugosité du lit à l'échelle des grains. En fait, ces caractéristiques interprètent de manière individuelle la résistance à l'écoulement. Localement sur le lit, les vitesses de l'écoulement tendent à s'organiser autour de critères qui caractérisent les particules qui composent la surface. Or, la concentration et le type d'agencement des particules dans les cours d'eau à lit de graviers vont aussi entraîner des changements importants dans la structure de l'écoulement.

1.2.2) Microformes du lit

Plusieurs microformes du lit se retrouvent dans les cours d'eau en milieu graveleux. Leur formation est associée à l'agencement de particules du lit suite à un événement de transport des sédiments. Les probabilités d'accumulation des particules sur le lit varient en fonction de la taille des grains, de la vitesse locale de cisaillement et du contact entre les grains et la surface du lit (Naden et Brayshaw, 1987). Les périodes de réduction de débit permettent donc l'accumulation de particules qui génèrent les différentes formes du lit. Les

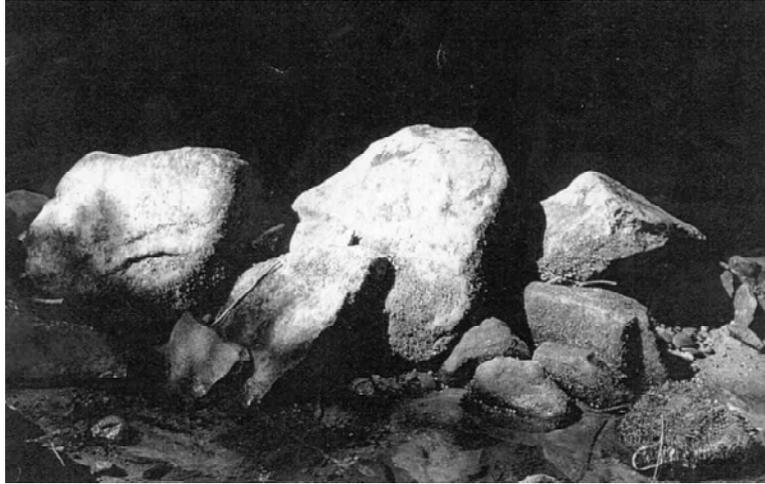
amas de galets et les formes transversales sont les principales formes observées dans les cours d'eau à lit de graviers. On considère aussi les blocs comme des obstacles protubérants à l'écoulement. Ils représentent ainsi une forme spécifique des rivières graveleuses. Les formes jouent un rôle prépondérant sur la stabilité du lit. En fait, l'imbrication des particules retarde la mise en transport des sédiments. L'enchevêtrement et la protection mutuelle des particules confèrent au lit une stabilité supérieure à celle que possèdent les fragments isolés (Reid et Frostick, 1984).

1.2.2.1) Les amas de galets

En terme structural, les amas de galets se définissent par une accumulation de galets de forme généralement plate à l'amont d'une particule plus grosse ainsi que par l'accumulation de particules plus fines dans une zone d'abris à l'aval (figure 1.2). L'obstacle, qui représente la plus grosse particule, est le noyau central de l'amas de galets et permet à plusieurs particules de s'y juxtaposer (Dal Cin, 1968). Les particules à l'amont de l'obstacle se disposent en tuilage. Les grains qui se trouvent à l'aval se déposent dans la zone de recirculation de l'écoulement qui retient les particules (Naden et Brayshaw, 1987). En fait, la séparation de l'écoulement permet le dépôt de fines particules dans la zone d'abri directement à l'aval de l'obstacle.

Les amas de galets occupent près de cinq à dix pour-cent du lit (Brayshaw, 1984) et représentent la principale microforme des cours d'eau à lit de graviers (Teisseyre, 1977). Ils ont tendance à se localiser dans les sections de seuil où l'intensité turbulente est plus forte (Brayshaw, 1984; Billi, 1988; Hassan et Reid, 1990). La largeur du chenal influence la morphologie du lit et notamment la disposition des amas de galets. La concentration des amas de galets augmente dans les sections plus étroites et moins profondes du cours d'eau (Hassan et Reid, 1990). Leur présence joue un rôle critique sur le transport des sédiments. Leur densité sur la surface du lit limite la disponibilité du matériel et retarde la mise en transport des sédiments en fonction de leur agencement, soit du contact mutuel entre les particules (Brayshaw, 1985). Enfin, les amas de galets peuvent être dissociés seulement dans la mesure où les conditions d'écoulement permettent la mobilisation de l'obstacle principal.

a)



b)

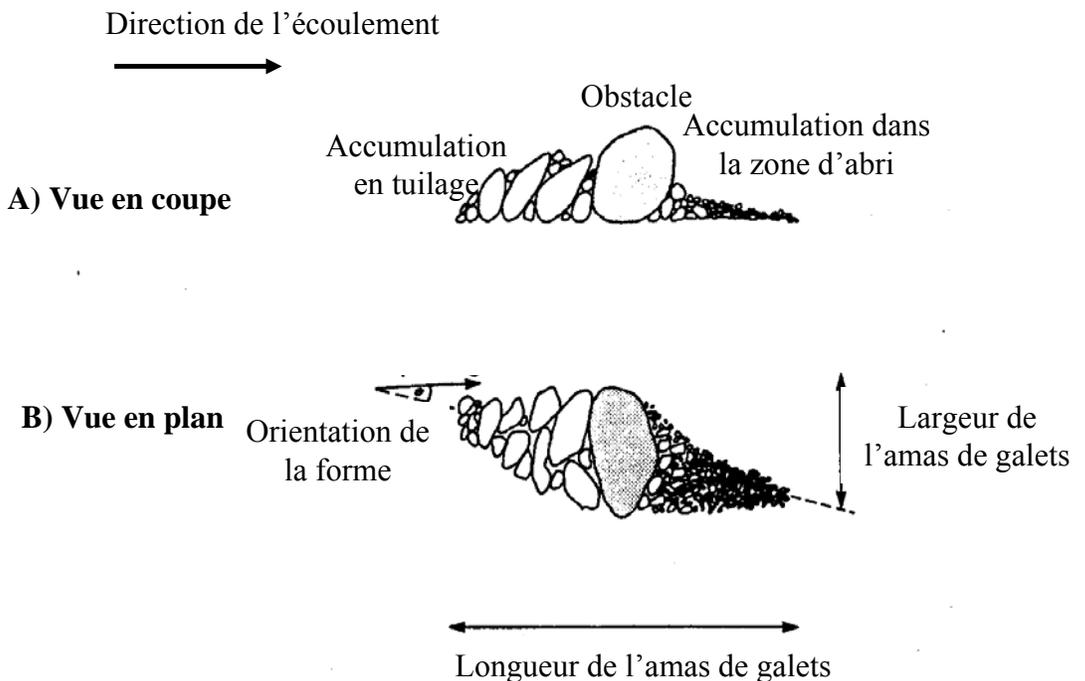


Figure 1.2 : a) Les amas de galets dans les cours d'eau à lit de graviers, b) les composantes d'un amas de galets A) vus en coupe, les amas de galets sont composés d'un obstacle principal, d'une zone d'accumulation de galets à l'amont et d'un dépôt de particules fines à l'aval, B) vue en plan et caractéristiques dimensionnelles des amas de galets (Brayshaw, 1984).

1.2.2.2) Les formes transversales

Les formes transversales sont constituées d'une série de galets et de blocs espacés de façon régulière (Laronne et Carson, 1976). La disposition de ces particules permet la formation d'alignements qui sont observés à l'échelle d'un tronçon de cours d'eau (Gustavson, 1974) et qui sont pratiquement perpendiculaires à l'écoulement (figure 1.3). Les formes transversales marquent une dénivellation topographique dans le profil longitudinal du cours d'eau (McDonald et Banerjee, 1971). Elles se distribuent en fonction d'un éventail de conditions liées aux pentes du lit (Bluck, 1987). Lorsque la surface entre les formes est composée de sédiments qui ne sont pas triés, les formes transversales sont faciles à identifier. Les alignements de galets et de blocs ressortent parmi les particules plus petites. Les formes transversales se distribuent périodiquement dans l'écoulement sur une section de cours d'eau et leur espacement est fonction de la taille de la particule la plus large qui les compose.

Les formes transversales suggèrent la présence de systèmes de mouille en marches d'escalier (*step-pool*) caractéristiques des cours d'eau composés de particules grossières. Ces structures dominent notamment les environnements montagneux (Chin, 1999). Leur présence favorise la stabilité du lit et retarde la mise en transport des sédiments en augmentant les forces de résistance à l'écoulement. La régularité des séquences est liée à la nature d'ajustement entre l'écoulement, le transport des sédiments et l'énergie disponible. Les dimensions et la distance entre les formes transversales sont fonction de la taille des particules qui composent la surface du lit, des gradients de pente du chenal ainsi que du débit. Enfin, même si la taille des particules qui compose la forme transversale est généralement du même ordre que la profondeur de l'écoulement, les systèmes en marches d'escalier deviennent submergés et possiblement mobiles sous des conditions de haut niveau d'eau.

1.2.2.3) Les grandes ondulations à l'échelle du chenal

À l'échelle du cours d'eau, l'influence des séquences seuil-mouille (*riffle-pool*) sur l'organisation de l'écoulement a aussi été investiguée. Wolman (1955) a décrit les seuils comme étant des sections où les profondeurs sont faibles et les vitesses d'écoulement rapides comparativement à celles que l'on observe dans les sections de mouille. La taille des particules, la pente de la surface de l'eau et la morphologie du lit peuvent aussi servir d'indicateurs caractérisant les seuils et les mouilles (Clifford, 1993). Les mouilles sont



Figure 1.3 : Représentation d'une forme transversale qui marque une dénivellation topographique sur le profil longitudinal du ruisseau Moras, Mauricie-Bois-Francs (Québec).



Figure 1.4 : Représentation d'une séquence seuil-mouille. La section seuil est présentée en arrière plan. Elle est caractérisée par des particules grossières, des vitesses rapides et de faibles profondeurs de l'écoulement. Au premier plan on observe la mouille où les vitesses ralentissent considérablement et les profondeurs sont plus importantes.

alors définies comme étant des creux topographiques à la surface du lit comprenant du matériel fin alors que les seuils représentent des élévations où l'on observe une accumulation de particules grossières (Richards, 1976) (figure 1.4).

Sear (1996) a décrit en détail les différentes composantes des séquences seuil-mouille. Il caractérise à la fois la taille des particules, la pente, les structures sédimentaires et plusieurs paramètres associés au transport des sédiments dans chacune des portions du profil longitudinal d'une séquence typique (figure 1.5). Dans les sections de seuils, les particules ont une taille et une imbrication plus importante que dans les mouilles. Elles forment des structures stables et les forces nécessaires pour leur mobilisation sont élevées. Les particules en mouvement se déplacent sur de faibles distances. Les probabilités d'accumulation de particules dans cette zone sont alors élevées. Contrairement, les mouilles sont composées de particules plus fines et demeurent des portions instables du cours d'eau. Le transport des particules se fait à de faibles forces de traction et sur des distances plus importantes ce qui entraîne un surcreusement du lit.

Les seuils et les mouilles définissent différentes échelles de résistance à l'écoulement. Richards (1976) a montré que la résistance estimée à partir du n de Manning et du coefficient de friction de Darcy-Weisbach était beaucoup plus importante dans les sections de seuils et ce, particulièrement dans des sections rectilignes. La sinuosité du cours d'eau permettrait une réduction de la friction et l'équilibre du chenal minimiserait la variabilité des caractéristiques de l'écoulement à l'échelle du cours d'eau. La présence des seuils et des zones d'accumulation de particules entraîne une augmentation de la résistance en provoquant la séparation de l'écoulement et ce, notamment à de faibles niveaux d'eau où les seuils ne sont pas submergés (Bathurst, 1982 ; Millar, 1999). Les séquences seuil-mouille ont une influence sur les vitesses moyennes de l'écoulement (Robert, 1997). À des conditions d'étiage, les seuils sont caractérisés par des vitesses et des gradients de vitesse plus importants que dans les sections de mouille. Ces différences dans les vitesses près du lit entre les seuils et les mouilles s'amenuisent avec une augmentation du débit. Keller (1971) a noté qu'à de forts débits, les vitesses sont plus rapides dans les mouilles. L'augmentation des vitesses permet d'augmenter les taux d'érosion et de maintenir le surcreusement (*velocity reversal hypothesis*).

BEDFORM	RIFFLE	POOL-HEAD	MID-POOL	POOL-TAIL	RIFFLE
LONGITUDINAL VIEW					
BED STATE	Congested	Smoothing			Congested
SEDIMENTARY STRUCTURE OF SURFACE	Tightly packed. High frequency of particles in stable structures. Armoured. Open-work	Loosely packed. High frequency of particles in unstable positions in bed. Armoured. Increasing matrix			
SURFACE D_{50}					
ENTRAINMENT THRESHOLD	High	Decreasing			Low
DISTRAINMENT OPPORTUNITY	High	Decreasing			Low
BED SLOPE	+ High	Gentle			- ive
PARTICLE MOVEMENT	Short L Low V_b	High L High V_b			Mod L Mod V_b
BEDLOAD BALANCE	Aggrading	Degrading			Aggrading
RELATIVE EXPOSURE D_{50} RIFFLE PARTICLE	Low	Increasing			High

Figure 1.5 : Caractéristiques morphologiques et sédimentologiques des composantes d'une séquence seuil-mouille et influence sur le transport des sédiments (Sear, 1996).

La description de ces séquences, à partir de la distance moyenne d'un seuil à un autre, est l'indicateur le plus souvent utilisé pour décrire les effets des structures morphologiques sur la résistance à l'écoulement et expliquer les transformations morphologiques du cours d'eau et l'ajustement du lit le long du profil longitudinal. À l'aide de cet indice, Keller et Melhorn (1978) ont affirmé que le type de matériel composant la surface du lit n'avait aucune influence sur l'organisation des seuils et des mouilles. Les auteurs ont montré que 70% de la variabilité des séquences était expliquée par la largeur du chenal. Ainsi, peu importe la nature du matériel du lit, la morphologie des séquences seuil-mouille devrait être relativement semblable. Roy et Abrahams (1980) ont questionné la méthode employée par Keller et Melhorn (1978) pour conclure sur cette absence de corrélation. En fait, ces corrélations devraient plutôt permettre de comparer un premier groupe correspondant à l'espacement moyen entre les mouilles sur des lits alluviaux et un second représentant l'espacement moyen entre des mouilles qui existent sur des cours d'eau à lit rocheux. En utilisant cette méthode, les auteurs notent que l'espacement moyen sur des lits rocheux est beaucoup plus grand que celui associé aux mouilles sur des lits alluviaux. Ces conclusions supportent l'hypothèse voulant que les formes des lits rocheux s'ajustent à des débits de grande magnitude et de faible fréquence.

La présence des grandes ondulations du lit entraîne une décélération récurrente de l'écoulement causée par le passage de la masse de fluide d'une zone de faible résistance à une zone de forte résistance vers l'aval. Prestegard (1983) a étudié la nature de la résistance à l'écoulement associée à la présence des séquences seuil-mouille et des bancs d'accumulation en utilisant un indicateur de rugosité où la magnitude des déformations du lit est mise en relation avec la distance entre deux seuils. Prestegard (1983) souligne que l'importance des zones d'accumulation est significative comparativement aux effets de la taille des particules sur les valeurs totales de résistance à l'écoulement. Sur les 12 sections de cours d'eau étudiées, au niveau plein bord, les séquences seuil-mouille et les zones d'accumulation le long des berges permettraient d'expliquer entre 50 et 75% de la résistance totale. Par contre, la turbulence générée par la présence des obstacles protubérants dans les cours d'eau à lit de graviers n'est pas prise en compte alors qu'on les observe sur la section d'étude. Conséquemment, on surestime le pourcentage de la résistance associé aux bancs d'accumulation à partir des indicateurs morphologiques de résistance.

Les particules du lit, les microformes et les variations topographiques à l'échelle du cours d'eau constituent les principales échelles de rugosité des rivières graveleuses. Elles modifient l'écoulement en intervenant sur les forces de tractions exercées au lit. Robert (1990) suggère que chacune des échelles de rugosité qui contribuent au cisaillement total soit interprétée individuellement dans les équations de transport des sédiments. Seulement, la contribution de chacune des échelles reste difficile à évaluer. Aussi, les interactions entre les éléments de rugosité sont nombreuses et vont modifier la résistance à l'écoulement. Les changements de rugosité doivent donc être traités à l'échelle d'une section de cours d'eau et non localement de manière à exprimer toutes les composantes du cisaillement total. Nous verrons plus en détail comment ces échelles influencent les vitesses de l'écoulement dans la section 1.4.

1.3) DÉFINITION ET CARACTÉRISTIQUES DE LA TURBULENCE

1.3.1) Les types d'écoulement et le profil de vitesse

Dans les cours d'eau, l'écoulement est soumis à deux forces principales, soit la gravité qui permet à l'eau de s'écouler et d'accélérer en fonction de la pente du chenal et les forces de friction qui s'opposent au mouvement de l'écoulement provoqué par la gravité. Les interactions entre ces deux forces déterminent l'habileté de l'eau à éroder le lit et à initier le transport des sédiments. Elles permettent aussi de classifier les différents types d'écoulement.

Dans un écoulement laminaire, chacune des parcelles de fluide se déplace en couches parallèles qui glissent les unes sur les autres. Les parcelles qui se trouvent dans une couche distincte de l'écoulement n'interagissent pratiquement pas avec celles qui se situent dans les couches adjacentes (figure 1.6). Il n'y a pas d'échanges latéraux ni verticaux dans les écoulements laminaires de telle sorte que la résistance à l'écoulement résulte presque exclusivement des forces de viscosité. Dans ce cas, la distribution des forces de cisaillement est fonction du ratio entre le gradient de vitesse et de profondeur pondéré par la viscosité moléculaire :

$$\tau = \mu \frac{dv}{dy}$$

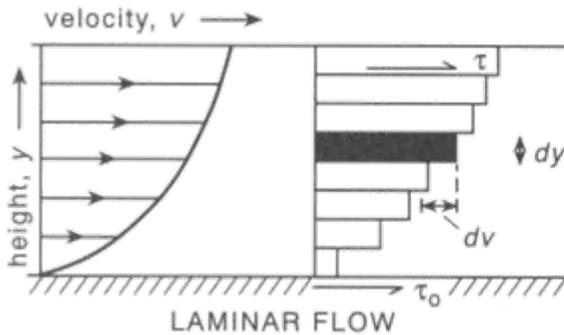


Figure 1.6 : Les écoulements laminaires conceptualisés par le glissement des tranches d'eau les unes sur les autres et par le ralentissement des vitesses près du lit (Knighton, 1998).

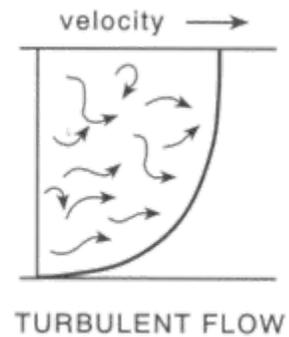


Figure 1.7 : Les écoulements turbulents sont caractérisés par des échanges d'énergie entre les tranches d'eau (Knighton, 1998).

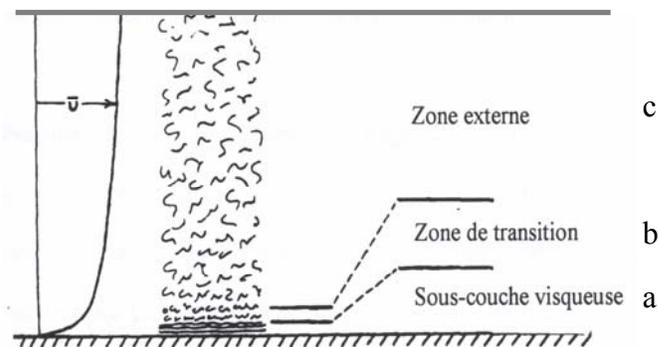


Figure 1.8 : Les zones de l'écoulement au-dessus d'un lit lisse: a) la sous-couche visqueuse est consacrée à la production de turbulence, b) la zone de transition à sa généralisation, c) la zone externe est caractérisée par la croissance et la dissipation de l'énergie turbulente (Southard et Middleton, 1984).

où τ représente la force de cisaillement, μ la viscosité moléculaire et dv/dy est le taux de changement des vitesses (v) avec la profondeur (y). Les écoulements laminaires sont générés en laboratoire et fréquemment utilisés pour simplifier la caractérisation de l'écoulement.

On distingue les écoulements laminaires des écoulements turbulents en fonction du nombre de Reynolds qui exprime le ratio entre les forces turbulentes et les forces visqueuses :

$$Re = \frac{VR}{\nu}$$

où V est la vitesse moyenne de l'écoulement, R le rayon hydraulique et ν la viscosité. Si $Re < 500$, l'écoulement est laminaire et les forces de viscosité prédominent. Lorsque Re dépassent 2000, l'écoulement devient turbulent et les couches parallèles de l'écoulement sont détruites. Les mouvements de fluide s'organisent alors sous forme de tourbillons marqués par des fluctuations de vitesse instantanée. Ces tourbillons impliquent des transferts d'énergie turbulente entre les différentes couches de l'écoulement (figure 1.7). Parce que les forces turbulentes sont plus importantes que les forces visqueuses, les écoulements turbulents exercent une force de cisaillement plus importante que les écoulements laminaires pour des gradients de vitesse similaires. En fait, la viscosité liée à la présence des tourbillons est ajoutée à l'équation du cisaillement telle que présentée pour les écoulements laminaires :

$$\tau = (\mu + \eta) \frac{dv}{dy}$$

où η représente les forces de viscosité associées aux tourbillons.

Les caractéristiques moyennes des différentes zones d'un écoulement turbulent peuvent être décrites au-dessus d'un lit lisse ou au-dessus de particules homogènes dans les cours d'eau à lit de graviers. La distribution spatiale des vitesses permet de définir trois couches distinctes de l'écoulement dans l'axe vertical (figure 1.8). La sous-couche visqueuse se situe près du lit. On y note la présence de phénomènes turbulents plus ou moins périodiques qui permettent l'échange d'énergie. En fait, plus de la moitié de la production totale de turbulence a lieu dans cette zone (Kline *et al.*, 1967 ; Raupach *et al.*, 1991) (figure 1.9). Les vitesses et le nombre de Reynolds y sont relativement faibles. La sous-couche visqueuse tend à disparaître sur des lits plus rugueux. La zone de transition se

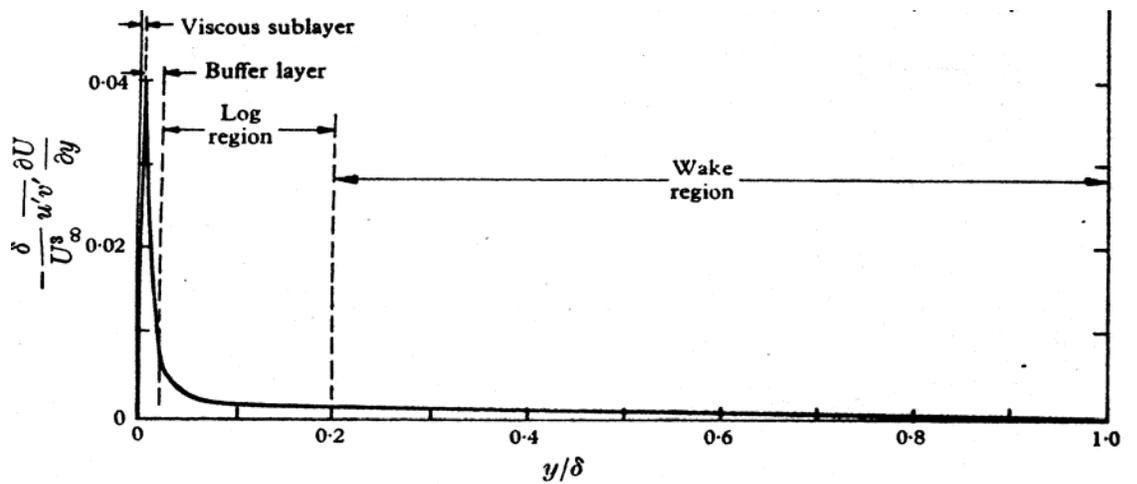


Figure 1.9 : Production de turbulence dans chacune des différentes zones de l'écoulement (Kline *et al.*, 1967).

situé au-dessus de la sous-couche visqueuse. C'est une zone où l'on observe une généralisation de la turbulence vers la surface. Enfin, dans la partie supérieure de l'écoulement, il y a la zone externe qui occupe la majorité de la tranche d'eau. Elle se compose d'un écoulement entièrement turbulent où il y a dissipation de la turbulence. La caractérisation détaillée de ces différentes couches turbulentes de l'écoulement peut être effectuée à partir du profil de vitesse.

Le profil de vitesse exprime la variabilité des vitesses longitudinales en fonction de la profondeur de l'écoulement. Il permet d'estimer les vitesses moyennes à un point dans l'espace et d'évaluer les forces de cisaillement exercées au lit. La vitesse moyenne de l'écoulement à une hauteur au-dessus du lit est déterminée en fonction de la loi universelle des distributions de vitesse de Prandtl-von Karman (1926). Ce modèle postule une distribution des vitesses qui suit la forme logarithmique suivante :

$$\langle u \rangle_y = \frac{1}{k} u^* \ln \left(\frac{y}{y_0} \right)$$

où k est la constante de von Karman égale à 0,4, u^* est la vitesse de friction, y la profondeur et y_0 la hauteur où la vitesse est nulle. La hauteur où la vitesse est nulle est égale à :

$$y_0 = e^{\frac{-a}{b}}$$

où a et b sont l'ordonnée à l'origine et la pente de la régression entre la vitesse et \ln de la hauteur. L'estimation de y_0 peut être interprétée à partir du diamètre des grains k_s qui composent la surface du lit en milieu graveleux. La vitesse de friction (u^*), toujours estimée à partir du profil de vitesse, constitue une valeur essentielle pour évaluer la contrainte de cisaillement au lit :

$$\tau = \rho u_*^2$$

où ρ est la densité de l'eau.

La distribution des vitesses permet d'estimer la hauteur où la vitesse est nulle, les vitesses de friction et le cisaillement au lit mais son intérêt porte surtout sur le fait qu'elle reflète les changements de rugosité à la surface du lit. Lorsque les vitesses sont soumises à des forces de résistance associées à la présence d'éléments de rugosité importants à la surface du lit, la forme des profils de vitesse se modifie. À l'aval d'obstacles protubérants par exemple, les vitesses ont tendance à ralentir dans l'environnement proximal du lit. Le

profil est alors caractérisé par deux segments et la vitesse moyenne de l'écoulement doit être évaluée en pondérant la moyenne des vitesses obtenues pour chacune des sections du profil. Le profil de vitesse permet d'estimer les vitesses moyennes de l'écoulement et le cisaillement au lit en fonction d'un éventail de conditions de rugosité du lit. Il constitue un outil essentiel pour estimer la résistance dans les équations de transport des sédiments.

1.3.2) Qu'est ce que la turbulence ?

La turbulence est un état d'instabilité du fluide qui se traduit par un mouvement tridimensionnel qui varie dans l'espace et dans le temps. Les mouvements sont liés à des fluctuations de vitesse qui s'étendent à toutes les longueurs d'onde comprises entre un minimum déterminé par les forces visqueuses et un maximum qui est déterminé par les conditions de la couche limite de l'écoulement (ex. profondeur, largeur, vitesses, rugosité). La turbulence se traduit par des variations de vitesses instantanées du fluide et constitue l'un des plus communs, des plus complexes et des plus importants états d'un fluide en mouvement (Bradshaw, 1971). Bien qu'elle puisse se décrire à l'aide d'équations différentielles déterministes (Clifford et French, 1993), la turbulence a été associée jusqu'aux années 60 à un phénomène stochastique émergeant de la superposition de mouvements individuels de fluide quasi-périodiques sur une grande étendue d'échelle (Lu et Smith, 1991). L'investigation de la turbulence à l'aide de techniques de visualisation de l'écoulement et de nouveaux instruments de mesure de vitesse de l'écoulement ont permis d'élaborer de nouveaux modèles de la turbulence. Les modèles les plus récents mettent l'accent sur la présence de mouvements ayant des comportements irréguliers mais suffisamment périodiques pour que l'on parle de structures turbulentes cohérentes.

1.3.3) Les différentes structures turbulentes de l'écoulement

La majorité des écoulements géophysiques sont turbulents, c'est pourquoi un des objectifs les plus importants en mécanique des fluides est la clarification des structures turbulentes de l'écoulement et la compréhension des transferts de momentum qui y sont associés (Nezu et Nakagawa, 1993). Une structure de l'écoulement se définit comme étant une organisation spatiale de portion de fluide qui a une certaine cohérence spatiale et temporelle. Plusieurs structures ont leur origine dans la sous-couche visqueuse ou dans la zone de transition. La compréhension des structures de l'écoulement est fondamentale notamment pour le transport des sédiments, les habitats de poissons (Carling, 1995) et le mélange de contaminants dans les cours d'eau en milieu naturel.

Plusieurs études menées en laboratoire ont permis d'identifier et de décrire les différentes structures cohérentes dans les écoulements turbulents telles les structures d'éjection (Theodorsen, 1952 ; Kline *et al.*, 1967, Blackwelder et Kovasny, 1972, Smith, 1996), d'échappement ou de sillage (Brayshaw, 1983, Acarlar et Smith, 1987) et les structures à grande échelle (Falco, 1977 ; Nezu et Nakagawa, 1993 ; Dinehart, 1999). Ces structures ont d'abord été identifiées sur des lits lisses et homogènes, et surtout en laboratoire, mais elles ont éventuellement aussi été observées en milieu naturel dans les cours d'eau plus rugueux (tableau 1.1).

1.3.3.1 Les structures d'éjection/incursion

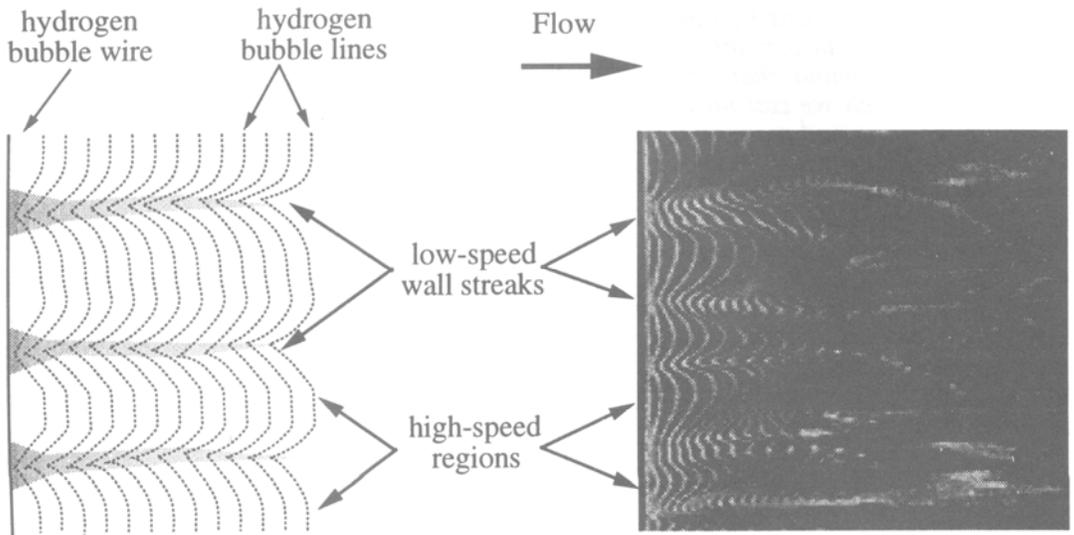
Les structures d'éjection ont d'abord été identifiées sur des lits lisses ou homogènes. Leur formation est associée à la présence de traînées longitudinales de faibles vitesses dans la sous-couche visqueuse d'un écoulement turbulent, près du lit (Figure 1.10). Ces traînées se définissent comme des filaments de fluide longs et étroits qui restent stables sur une certaine distance (Luchik, 1987) et qui se contorsionnent lorsqu'elles sont expulsées vers la couche supérieure de l'écoulement (Bogard et Tiederman, 1986). Elles ont une vitesse approximativement égale à $0,5U$ (Best, 1993), s'alignent dans le sens de l'écoulement et ont un espacement égal à $100 y^+$ (Kline *et al.*, 1967).

Les traînées longitudinales permettent l'échappement vers la couche supérieure de l'écoulement d'une portion de fluide dont les vitesses sont inférieures aux vitesses moyennes de l'écoulement. En s'élevant dans l'écoulement, ces éjections se développent pour prendre la forme de vortex en fer à cheval avant de se désagréger (Grass, 1971). En terme de processus une ou plusieurs éjections peuvent constituer un *burst* qui résultent de l'instabilité des traînées longitudinales. Ces instabilités ont surtout été investiguées sur des lits lisses mais on les retrouve aussi sur des lits plus rugueux (Grass, 1971, Grass et Mansour-Tehrani, 1996; Defina, 1996). Les structures d'éjection sont fréquemment suivies de mouvements d'incursion de fluide rapide provenant de la zone de transition. Les incursions s'étendent latéralement sur une distance beaucoup plus importante que celle des traînées longitudinales. Elles contribuent en grande proportion au cisaillement de Reynolds et sont responsables de l'initiation du transport de sédiments (Best, 1993 ; Nezu et Nakagawa, 1993). Cette succession, continue mais non-périodique, que l'on appelle *burst-*

	Structure d'éjection	Structure d'échappement	Structure à grande échelle
Laboratoire	<ul style="list-style-type: none"> • Teodorsen (1952) • Blackwelder et Kovanay (1972) • Smith (1996) • Grass et Mansour-Tehrani (1996) • Defina (1996) 	<ul style="list-style-type: none"> • Acarlar et Smith (1987) • Kirkbride (1993) 	<ul style="list-style-type: none"> • Falco (1977) • Yalin (1992) • Nezu et Nakagawa (1993)
Milieu naturel	<ul style="list-style-type: none"> • Roy et Buffin-Bélanger (sous presse) 	<ul style="list-style-type: none"> • Buffin-Bélanger et Roy (1998) • Roy <i>et al.</i>(1999) 	<ul style="list-style-type: none"> • Komori et Murakami (1989) • Roy <i>et al.</i> (1996) • Kirkbride et Ferguson (1995) • Ferguson <i>et al.</i> (1996) • Dinehart (1999)

Tableau 1.1 : Revue de la littérature sur l'identification des trois principaux types de structure turbulente de l'écoulement en laboratoire et en milieu naturel.

a)



b)

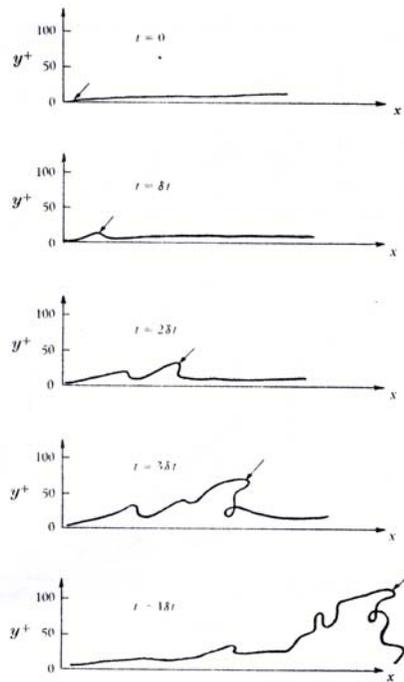


Figure 1.10: a) Vue en plan de traînées longitudinales dans la couche turbulente de l'écoulement et photographie de traînées à partir de bulles d'hydrogène pour $Re = 4300$ (Smith, 1996), b) Traînée longitudinale dans la sous-couche visqueuse d'un écoulement turbulent près du lit et développement d'une structure d'éjection (Kline *et al*, 1967).

sweep cycle, représentent les principales structures observées à micro-échelle dans l'écoulement (figure 1.11).

1.3.3.2) Structures d'échappement

La présence d'un élément morphologique sur le lit entraîne une modification des forces de résistance, des pressions et conséquemment de l'organisation de l'écoulement autour de l'obstacle (Brayshaw, 1983). Acarlar et Smith (1987) ont présenté un modèle décrivant en détail la formation et l'évolution des structures d'échappement autour d'un obstacle hémisphérique. Ils décrivent quantitativement les structures à partir de plusieurs exercices de visualisation et de séries de vitesse récoltées en laboratoire. Les structures d'échappement prennent la forme de structures en fer à cheval qui se développent à l'aval d'un hémisphère. Acarlar et Smith (1987) ont distingué trois principales composantes, soit la tête, la boucle et les extrémités qui se rattachent à la structure qui lui précède (figure 1.12). La formation de ces composantes se produit directement à l'aval de l'hémisphère dans la zone de sillage créée par l'obstacle. Elles prennent ensuite de l'expansion jusqu'à la formation de structures secondaires dans la zone éloignée de l'obstacle et interagissent avec les structures originales. Malgré l'utilisation d'un obstacle hémisphérique dont la forme s'approche d'un amas de galets, le modèle d'Acarlar et Smith (1987) s'applique difficilement en milieu naturel principalement parce que les auteurs ont investigué des écoulements laminaires.

Les travaux de Kirkbride (1993) utilisent la visualisation en laboratoire mais cette fois en prenant soin de reproduire les conditions du lit présentes dans les cours d'eau en milieu graveleux pour décrire l'influence des éléments de rugosité sur l'écoulement. Il identifie la présence des structures d'échappement à l'aval d'obstacles présents sur la surface du lit et propose un modèle où la croissance des structures dans la zone de recirculation joue un rôle important dans ce processus. Il note aussi que l'échappement de structures à partir de la zone de recirculation de l'écoulement constitue un mécanisme dominant de la couche-limite turbulente et que les interactions entre ces échappements et les autres structures de l'écoulement dans les cours d'eau à lit de graviers sont nombreuses.

En milieu naturel, Buffin-Bélanger et Roy (1998) ont caractérisé l'écoulement autour d'un amas de galets à l'aide d'un échantillonnage systématique à haute résolution spatiale et temporelle des vitesses d'écoulement. Les auteurs ont proposé un modèle

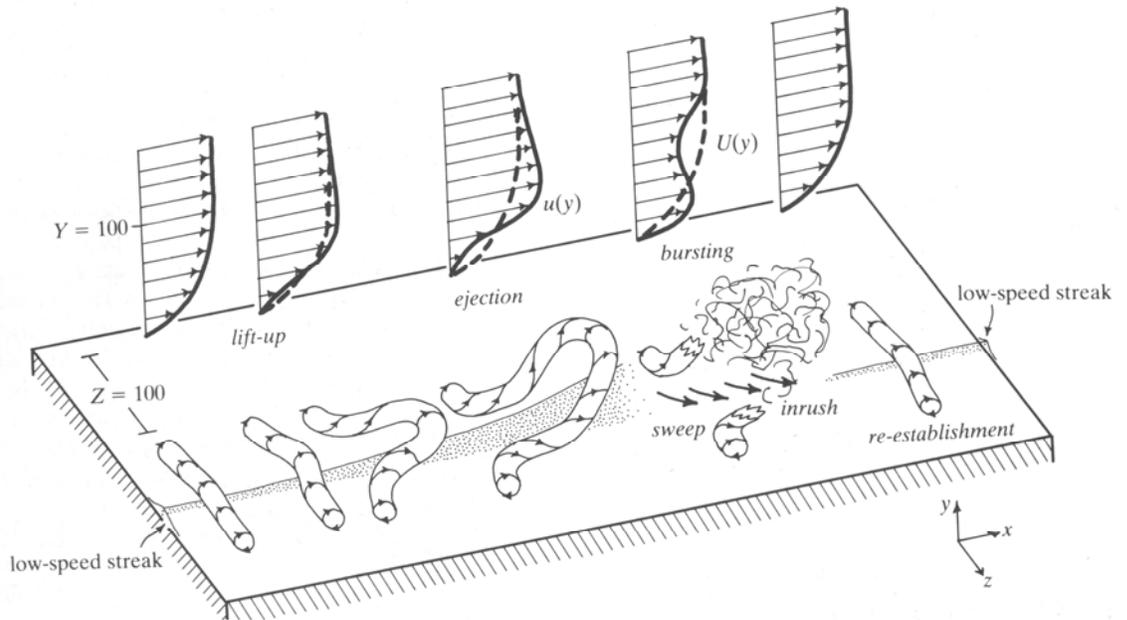


Figure 1.11 : Modèle d'éjection-incursion (*burst-sweep cycle*). Le développement, à partir d'une traînée longitudinale, d'une éjection vers la couche supérieure de l'écoulement suivie d'une incursion de fluide qui se dirige vers la surface du lit. Les profils de vitesse sont présentés pour chacune des étapes du cycle (Allen, 1985).

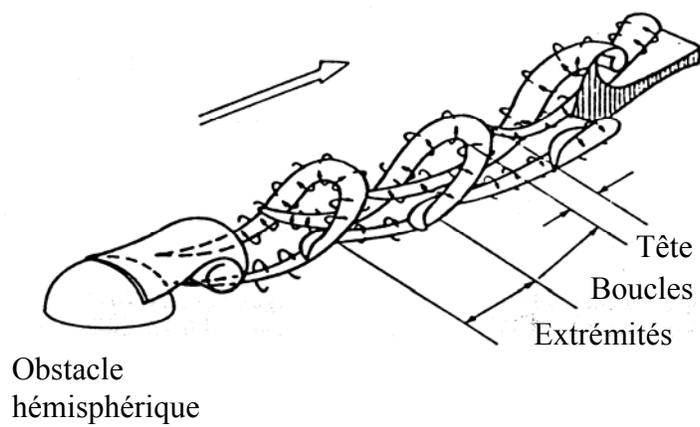


Figure 1.12 : Composantes des structures en fer à cheval qui se forment directement à l'aval de l'hémisphère dans la zone de sillage créée par l'obstacle (Acarlar et Smith, 1987).

composé de plusieurs zones dynamiques d'écoulement autour d'un amas de galets (figure 1.13). On observe d'abord une accélération des vitesses de l'écoulement au sommet du plus haut galet qui compose l'amas. La séparation de l'écoulement directement à l'aval de l'amas de galets permet la création d'une zone de recirculation. En interaction avec l'écoulement ambiant, cette zone de recirculation entraîne la formation de structures d'échappement, soit de portions lentes de fluide qui vont s'élever vers la couche supérieure de l'écoulement. En aval d'un amas de galets, l'écoulement est ralenti, l'intensité turbulente augmente et on observe des zones d'événements verticaux de forte magnitude. Ainsi, non seulement les particules individuelles influencent-elles l'organisation de l'écoulement mais l'arrangement de ces particules sur le lit a aussi une influence sur l'écoulement.

Enfin, Roy *et al.* (1999) ont présenté les premières images de structures d'échappement provenant d'un cours d'eau à lit de graviers grâce à l'injection d'un traceur dans l'écoulement. Ces images sont associées à des mesures de vitesse enregistrées à différentes hauteurs au-dessus du lit. La combinaison de mesures quantitatives à celles provenant de la visualisation laissent supposer que l'écoulement à l'aval d'un obstacle protubérant est très complexe. Ces structures d'échappement auraient plusieurs types de manifestations contrôlées par les interactions entre la zone de recirculation et l'écoulement ambiant. Certains tourbillons vont s'échapper vers la couche supérieure de l'écoulement tandis que d'autres vont prendre de l'expansion vers le lit. Ces patrons seraient reliés à l'influence du passage intermittent de fronts de vitesse rapide et lente dans l'écoulement.

1.3.3.3) Structures à grande échelle de l'écoulement

Des travaux récents effectués sur les rivières à lit de graviers ont permis d'identifier les structures à grande échelle de l'écoulement (Kirkbride et Ferguson, 1995; Ferguson *et al.*, 1996; Dinehart, 1999). Ces structures sont aussi définies comme des structures macro-turbulentes. Elles sont décrites comme des portions rapides de fluide entrelacées par des portions plus lentes qui se développent vers l'aval (figure 1.14). Ces portions de fluide sont perceptibles sur l'ensemble de la tranche d'eau. Les fronts plus lents se dirigent vers la surface de l'eau (Nezu et Nakagawa, 1993). Les connaissances sur la formation des structures à grande échelle en milieu graveleux ainsi que sur leurs implications en milieu naturel ne permettent pas de faire consensus sur un seul modèle où l'on intègre les

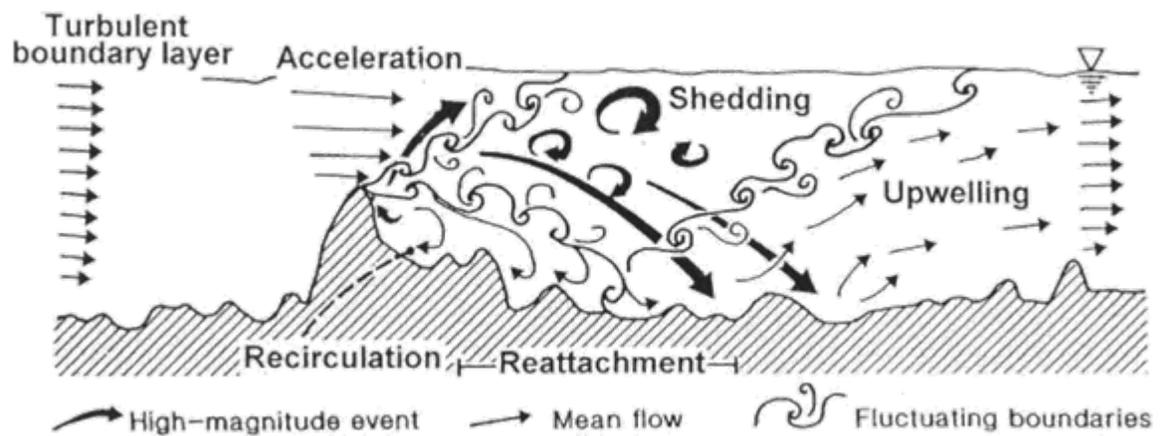


Figure 1.13 : Zones dynamiques de l'écoulement autour d'un amas de galets (Buffin-Bélanger et Roy, 1998)

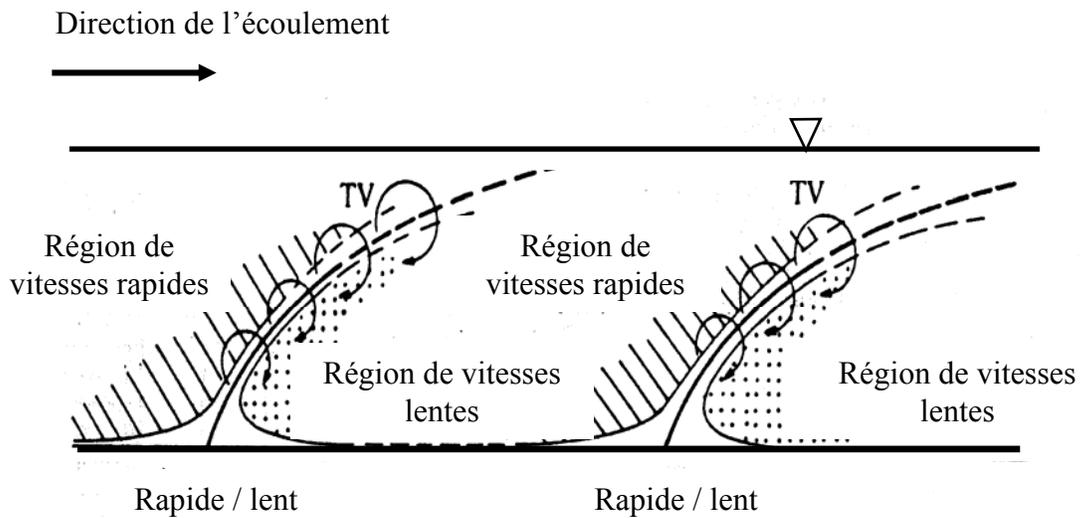


Figure 1.14 : Structures à grande échelle de l'écoulement. Les portions de fluides rapides sont entrelacées par des portions plus lentes et se développent vers l'aval sur toute la profondeur de la tranche d'eau (Nezu et Nakagawa, 1993).

structures présentes à différentes échelles. En fait, les ambiguïtés sur ce que sont et sur la taille que prennent les structures à grande échelle sont nombreuses. Les explications relatives à la formation des structures à grande échelle sont aussi controversées. Elles compliquent encore plus la description des relations qui existent entre les structures de différentes échelles de l'écoulement.

Les principaux modèles théoriques des structures à grande échelle de l'écoulement ont été présentés par Nezu et Nakagawa (1981, 1993) et Yalin (1992). Le premier groupe d'auteurs a proposé un modèle simplifié des structures cohérentes à grande échelle de l'écoulement. Ils schématisent les portions rapides de fluides qui alternent avec les portions plus lentes dans la direction de l'écoulement. Ces portions de fluide occupent une large portion de la profondeur d'écoulement. Elles sont facilement identifiables et ce, même si les différences de vitesse et les limites entre les deux masses de fluide ne sont pas très franches. Les auteurs soulignent aussi que les interactions entre les masses de fluide mettent en place des structures cohérentes comprenant les structures d'éjection et d'incursion. Nezu et Nakagawa (1981) ont enfin montré que l'angle des fronts de vitesse rapide présents dans l'écoulement était de près de 20° et que leur distribution dans le temps et dans l'espace serait aléatoire. Yalin (1992) a détaillé la répartition spatiale des portions rapides et lentes de l'écoulement. Son modèle hautement idéalisé montre, le long d'une section longitudinale, les différentes portions de fluide qui s'étendent sur des distances égales à plusieurs fois la profondeur de l'écoulement (figure 1.15). De plus, il permet d'observer que la transition entre des portions lentes et des portions plus rapides, dans le sens de l'écoulement, est beaucoup plus graduelle que celle qui définit l'interface entre les portions rapides et lentes, ce qui permet de bien marquer les fronts de vitesse rapide.

Les structures à grande échelle de l'écoulement peuvent être influencées par la présence des microformes à la surface du lit (Kim et Adrian, 1999). Kostaschuk et Church (1993) ont observé la présence de structures qui occupent toute la profondeur d'eau au-dessus de dunes en milieu sablonneux. La présence des dunes permettrait la génération de macro-turbulence et donnerait naissance à des bouillons à la surface de l'eau (Jackson, 1976). Ces bouillons seraient liés à la présence de mega-tourbillons (*kolk*) qui prendraient naissance au pied de la crête pour ensuite se propager jusqu'à la surface de l'eau où les bouillons font éruption. Kostaschuk et Church (1993) ont observé la présence des mega-tourbillons à de fortes vitesses moyennes de l'écoulement. À de faibles vitesses, seulement

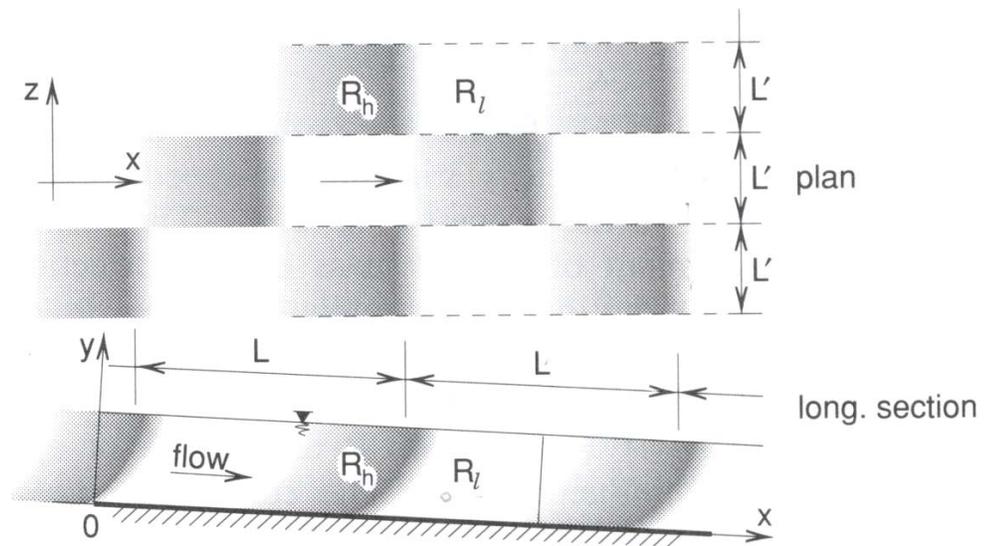


Figure 1.15 : Répartition spatiale et dimensions des portions lentes et rapides de l'écoulement. Les sections noires représentent les portions rapides de vitesse et les sections blanches les portions plus lentes que la moyenne (Yalin 1992).

quelques dunes isolées permettaient la génération des tourbillons. Les tourbillons prennent de l'expansion verticalement dans l'écoulement et leur angle d'incidence avec la surface du lit est inférieur à 8° .

Buffin-Bélanger *et al.* (2000b) ont caractérisé en détail les structures à grande échelle de l'écoulement en rivière à lit de graviers à partir d'analyses de séries temporelles de vitesse. Les auteurs confirment la présence de portions intermittentes de fluide rapide séparées par des portions beaucoup plus lentes en utilisant un système de matrice représentant les fluctuations simultanées des vitesses d'écoulement à trois hauteurs différentes au-dessus du lit. Dans ces matrices, les portions noires représentent les vitesses supérieures aux vitesses moyennes de l'écoulement tandis que les portions blanches sont associées aux fluctuations négatives. La figure 1.16 montre une minute d'échantillonnage des vitesses longitudinales de l'écoulement à différentes hauteurs au-dessus du lit. Les matrices illustrent l'existence des fronts de vitesse rapide et lent. Ces patrons semblent bien organisés et structurés. La majorité des portions rapides s'étend au-delà des trois positions verticales d'échantillonnage. Puisque la distance entre les senseurs est de 8 cm, la cohérence des structures est d'au moins 16 cm. Pour la première fois une telle cohérence des structures à grande échelle de l'écoulement a été observée dans les cours d'eau à lit de graviers.

Il est intéressant de constater que peu importe l'environnement où sont observées les structures à grande échelle, leur taille est similaire. L'échelle temporelle et spatiale des structures ont été investiguées en visualisant l'écoulement ou à partir d'analyses de corrélation-croisée effectuées selon des mesures de vitesse de l'écoulement enregistrées en simultané à différentes positions dans l'espace. Les principaux résultats provenant de la littérature sont présentés dans le tableau 1.2. Ces données ont été récoltées dans l'air ou dans l'eau à des nombre de Reynolds variant entre 1000 et 4200. Les structures observées s'étendent dans le sens de l'écoulement sur des distances égales à environ deux fois la profondeur d'eau. Leur taille latérale et verticale est en moyenne égale à la profondeur de l'écoulement. Il en est de même pour les structures observées dans les cours d'eau à lit de graviers à des nombres de Reynolds beaucoup plus élevés.

Les interactions entre les différents types de structure sont peu détaillées mais les structures à grande échelle de l'écoulement semblent intégrer la turbulence observée à

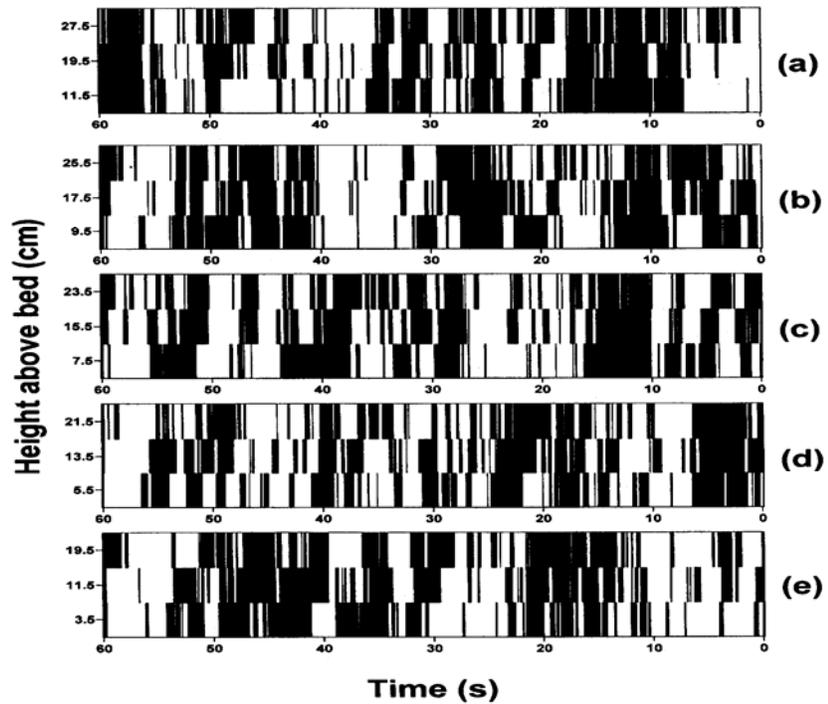


Figure 1.16: Portions intermittentes de fluide rapide et de fluide plus lent. Les portions noires représentent les vitesses supérieures aux vitesses moyennes de l'écoulement et les portions blanches les vitesses inférieures (Buffin-Bélanger et Roy, 2000b).

Références	Longueur	Largeur	Hauteur
Blackwelder et Kovasznay (1972)	10Y		
Falco (1977)	1,6Y		
Brown et Thomas (1978)	2Y		
Nakagawa et Nezu (1981)	1.5Y		0,5-1Y
Komori et Ueda (1982)	1.35Y	1,2Y	0,5Y
Iamoto et Ishigaki (1985)	2Y	1Y	1Y
Komori <i>et al.</i> (1989)	2Y	1Y	0,5Y
Yalin (1992)	6Y	2Y	1Y

Tableau 1.2 : Similarité des caractéristiques définissant la taille des structures à grande échelle de l'écoulement observées sous différentes conditions. Y représente la profondeur moyenne de l'écoulement.

micro-échelle (Buffin-Bélanger *et al.*, 2000a). Pour Yalin (1992) par exemple, les structures à grande échelle de l'écoulement ont un effet générateur de structures d'éjection-incursion. Les structures d'éjection se développent et migrent vers la surface de l'eau le long d'un front de vitesse. Près du lit, on laisse alors place à une partie de la structure à grande échelle qui forme des événements similaires au passage d'une incursion. Puisqu'elles reflètent une gamme d'interactions, les structures à grande échelle devraient expliquer une grande partie de la variabilité des caractéristiques turbulentes de l'écoulement à l'échelle d'un tronçon de cours d'eau. Elles permettent aussi de montrer que les écoulements dans les cours d'eau à lit de graviers sont bien structurés (Ferguson *et al.*, 1996) en étant récurrentes dans les temps et dans l'espace et ce, malgré la variabilité morphologique du lit. Seulement, peu de travaux effectués en milieu naturel ont permis d'exprimer la structure de l'écoulement en fonction des différentes échelles de rugosité à la surface de lit. Pourtant la présence des différents types de structures reflète des mécanismes complexes qui changent d'expression en fonction de la morphologie du lit et qui constituent une composante essentielle de la dynamique fluviale.

1.4) EFFETS DE LA MORPHOLOGIE DU LIT SUR LES VITESSES DE L'ÉCOULEMENT

L'organisation des formes du lit semble refléter celle de l'écoulement. Bien que cette proposition ne soit que spéculative, chacune des échelles de rugosité pourrait éventuellement être associée à différentes structures turbulentes présentes dans l'écoulement. La taille des grains permettrait la mise en place de structures d'éjection, l'agencement des particules sur le lit serait lié aux structures d'échappement tandis que les structures à grande échelle de l'écoulement seraient associées à des éléments morphologiques du cours d'eau (Buffin-Bélanger *et al.*, 2000a). Les effets de la première échelle de rugosité sur la turbulence de l'écoulement ont été investigués en laboratoire et en milieu naturel. Par contre, on connaît moins l'influence des formes ou des transitions d'échelle de rugosité du lit sur la variabilité des caractéristiques de l'écoulement, particulièrement sur la modification des profils de vitesse, à l'échelle d'une section de cours d'eau alors que la morphologie du lit pourrait influencer la récurrence et la cohérence des structures de l'écoulement.

Le profil de vitesse nous informe quant à la nature des échelles de rugosité présentes à la surface du lit ainsi que sur les caractéristiques turbulentes de l'écoulement en un point dans l'espace. Il exprime la vitesse en fonction de différentes hauteurs au-

dessus du lit. Sa hauteur totale est déterminée soit par la profondeur de l'écoulement (Y) du lit jusqu'à la surface de l'eau ou par l'épaisseur de la couche-limite turbulente (δ) qui s'étend approximativement du lit à l'élévation où l'on observe les vitesses maximales dans la tranche d'eau. Les éléments de rugosité produisent des changements sur les profils de vitesse, qui se présentent sous la forme logarithmique dans des conditions de rugosité où la taille des particules est semblable sur toute la section. Soumis à des forces de résistance plus importantes, le profil de vitesse prend différentes formes (Tacchie, 2000). La portion inférieure du profil est soumise aux plus grandes forces de résistance et subit les plus importantes transformations (figure 1.17). Cependant, les éléments de rugosité à la surface du lit peuvent entraîner des changements importants sur l'ensemble de la tranche d'eau dans le cas où l'on observerait par exemple une suite de plusieurs obstacles dans l'écoulement.

En plus des nombreuses interactions entre les différentes échelles de rugosité (Clifford *et al.*, 1992), la concentration et l'organisation des obstacles dans l'espace entraînent des changements importants sur la résistance de l'écoulement à l'échelle d'un tronçon de cours d'eau. Ces changements peuvent être pris en compte en développant différents facteurs de rugosité. Seulement, ces facteurs sont fréquemment développés pour des conditions particulières et peuvent difficilement être utilisés pour tous les cours d'eau. Les différents liens entre les changements de rugosité associés à l'organisation des formes du lit et la variabilité des caractéristiques de l'écoulement sont donc sujets à une attention particulière.

1.4.1) L'espace des obstacles protubérants

Les effets de la concentration des particules se manifestent sur l'organisation de l'écoulement (Bergeron et Charbonneau, 1999). Les vitesses de l'écoulement, à différentes élévations au-dessus du lit, permettent de quantifier plusieurs échelles de rugosité qui expliquent la variabilité spatiale de la résistance à l'écoulement. Les effets de l'irrégularité de la surface du lit se font sentir notamment sur la forme des profils de vitesse (Bathurst, 1982). Par exemple, l'augmentation de la concentration des particules modifie les gradients de vitesse sur toute la tranche d'eau et permet d'observer une augmentation des vitesses de friction et du cisaillement de Reynolds. Elle modifie aussi l'épaisseur de la couche-limite turbulente (Raupach, 1981). L'organisation de l'écoulement peut alors servir

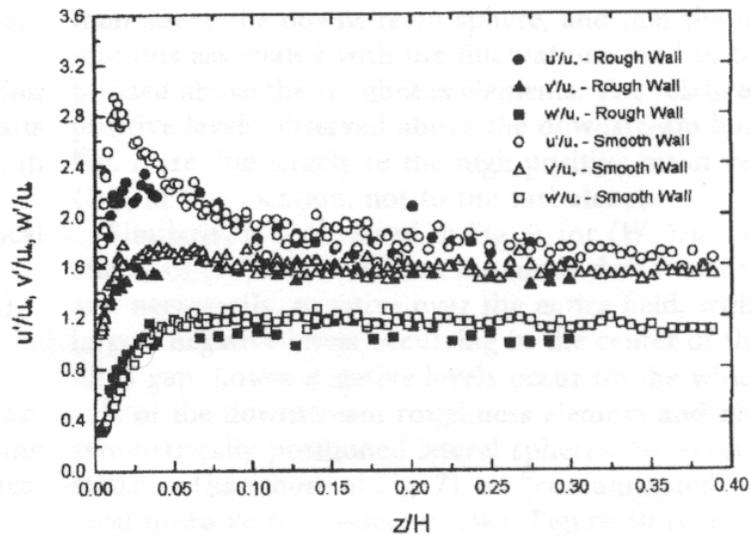


Figure 1.17 : Effets du changement de rugosité sur les fluctuations de vitesses longitudinales $\langle u \rangle$, verticales $\langle v \rangle$ et latérales $\langle w \rangle$ de l'écoulement à proximité du lit où z est la hauteur au-dessus du lit et H la profondeur totale de l'écoulement (Dancey, 2000)

d'indicateur de résistance en reflétant non seulement la rugosité associée à la taille des particules mais celle liée à la concentration et à l'orientation de ces particules sur le lit.

Plusieurs études ont montré que les plus fortes valeurs de résistance apparaissent pour des densités intermédiaires d'éléments de rugosité et que l'orientation des obstacles à l'écoulement affecte l'espacement pour lesquels les maxima de résistance sont observés. Ces observations s'appuient principalement sur la variabilité des caractéristiques turbulentes de l'écoulement sur l'ensemble de la tranche d'eau obtenues à partir de la description de la forme des profils de vitesses.

Nowell et Church (1979) ont décrit la variabilité des caractéristiques turbulentes de l'écoulement en fonction de la densité des particules à la surface du lit. Les profils de vitesse pour cinq différentes concentrations de particules ont été récoltés en laboratoire. Les auteurs ont d'abord observé que les coefficients qui expriment la forme des profils de vitesse et reflètent la résistance à l'écoulement atteignent leur maximum pour une densité d'éléments de rugosité égale à 0,1 qui représente le ratio de l'aire des éléments de rugosité sur l'aire totale de la section d'étude (figure 1.18). Raupach *et al.* (1991) ont quant à eux évalué la résistance maximale à des concentrations d'éléments de 0,2 (figure 1.19). Pour des concentrations plus fortes, la valeur des coefficients des profils de vitesse tend à diminuer.

Les effets de la concentration des particules du lit sur le comportement de l'écoulement ont été conceptualisés par Morris (1955) (figure 1.20). Lorsque les éléments sont très près les uns des autres, l'écoulement se comporte de la même façon que sur une surface homogène. Pour les concentrations d'obstacles de Nowell et Church (1979), ce type d'effet survient à des densités de 1/8 et de 1/12. Pour des densités intermédiaires 1/16 et 1/22, l'intensité turbulente demeure constante jusqu'à $y/D = 0,35$ où y représente la hauteur au-dessus du lit et D la profondeur de la tranche d'eau. À cette échelle de rugosité, on observe une interaction entre les structures de l'écoulement générées par le premier obstacle et celles qui apparaissent pour un obstacle plus en aval. À des densités très faibles, l'écoulement se comporte de la même façon que pour des éléments de rugosité isolés à la surface du lit. Les valeurs maximales de dissipation de l'énergie apparaissent pour des profondeurs $y/D \approx 0,1$.

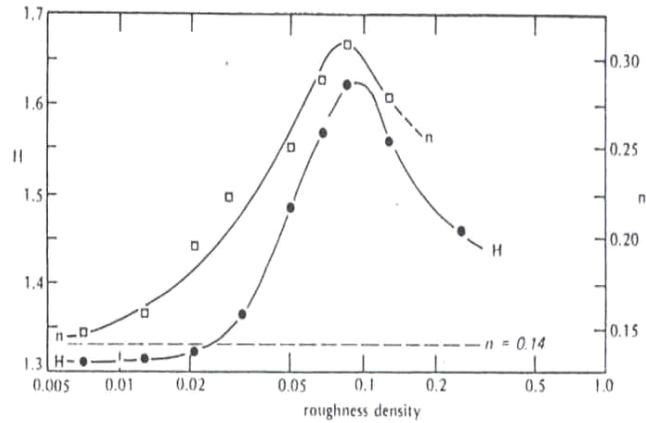


Figure 1.18 : Coefficients (H et n) qui expriment la forme des profils de vitesse pour différentes concentrations de particules à la surface du lit en fonction de la résistance à l'écoulement (Nowell et Church, 1979).

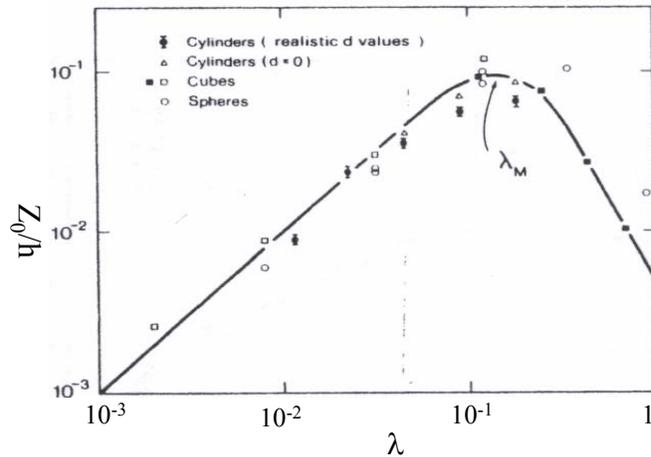


Figure 1.19 : Résistance à l'écoulement en fonction de la densité (λ) des particules du lit (Raupach, 1991).

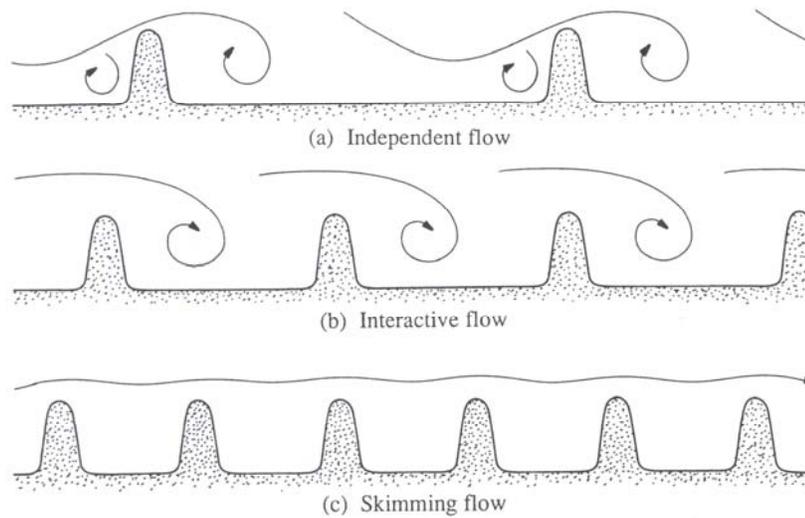


Figure 1.20 : Effets de la concentration des particules sur le comportement de l'écoulement: a) à une faible densité de particules, l'écoulement agit comme pour des obstacles isolés, b) à une échelle intermédiaire, il existe une interaction entre les structures de l'écoulement générées par le premier obstacle et celles qui apparaissent pour un obstacle qui lui succède, c) l'écoulement se comporte de la même façon que sur une surface lisse lorsque les obstacles sont très près (Adapté de Morris, 1955 par Vogel, 1994)

Les manifestations des différentes concentrations d'éléments de rugosité sur l'écoulement permettent d'identifier la présence de trois zones verticales de l'écoulement. Elles s'expriment par la modification de la forme des profils de vitesse, l'intensité turbulente et la dissipation de l'énergie (figure 1.21). Pour $y/D > 0,5$, Nowell et Church (1979) observent une diminution de l'intensité turbulente approximativement linéaire vers la surface de l'eau. Entre 0,5 et 0,20, l'intensité turbulente demeure constante et enfin pour $y/D < 0,20$ les valeurs divergent en fonction de la densité des éléments de rugosité à la surface du lit. Les valeurs d'intensité turbulente ne diminuent pas de la même façon pour des densités d'élément de rugosité différente. En fait, l'ensemble des caractéristiques de l'écoulement dans l'environnement proximal du lit dépend de la concentration des particules.

1.4.2) Les changements de rugosité du lit

Robert *et al.* (1992, 1993, 1996) ont investigué à la fois en laboratoire et en milieu naturel, les effets d'une transition locale de rugosité sur la forme de profils verticaux de vitesse échantillonnés en milieu graveleux. Les profils recueillis montrent des différences significatives en terme de vitesse près du lit, de gradient de vitesse et d'intensité turbulente en fonction de leur position par rapport à la présence d'obstacles protubérants à l'écoulement (figure 1.22). Avant d'atteindre un premier obstacle, les profils de vitesse montrent une forme logarithmique caractéristique des écoulements turbulents ainsi que de faible gradient de vitesse sur l'ensemble de la tranche d'eau. Lorsqu'un profil s'approche de l'élément de transition de rugosité, sa forme se modifie. En fait, la partie inférieure semble affectée par la présence de l'obstacle sur la surface du lit. Une faible concavité apparaît dans la portion supérieure du profil. Immédiatement en aval de l'obstacle, on observe la segmentation des profils. De fait, les vitesses sont significativement ralenties à la base du profil et les gradients de vitesse augmentent considérablement. La concavité du profil à l'aval de l'obstacle devient plus marquée. On observe aussi une augmentation des vitesses de friction (u^*) et de la hauteur où les vitesses sont nulles (y_0) (figure 1.23). Enfin, plus les profils s'éloignent de l'élément de rugosité, plus ils tendent à retrouver leur état initial. L'écoulement s'ajuste aux nouvelles conditions de rugosité du lit. Les manifestations du changement de rugosité sur l'écoulement se font sentir non plus dans la forme des profils mais bien par un simple ajustement des gradients de vitesse.

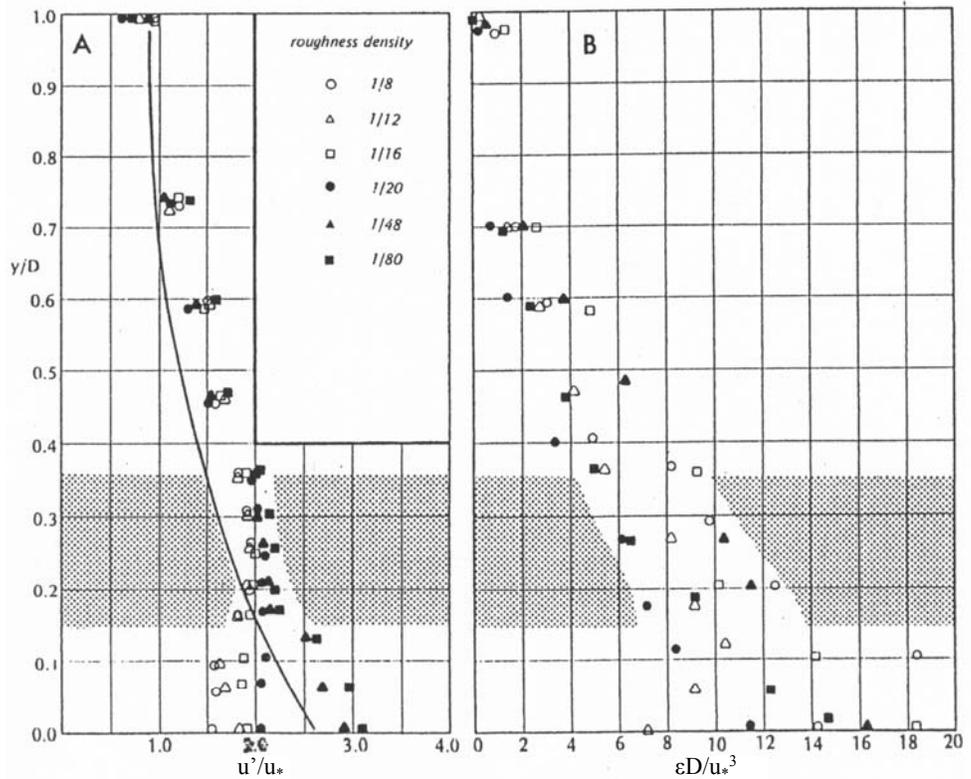


Figure 1.21: Variabilité des paramètres de turbulence en fonction de la profondeur et identification de trois zones verticales de l'écoulement à partir de l'intensité turbulente et de la densité des éléments de rugosité: a) intensité turbulente, la courbe pleine présente les résultats de Laufer (1950) pour un lit lisse b) dissipation de l'énergie turbulente (Nowell et Church, 1979).

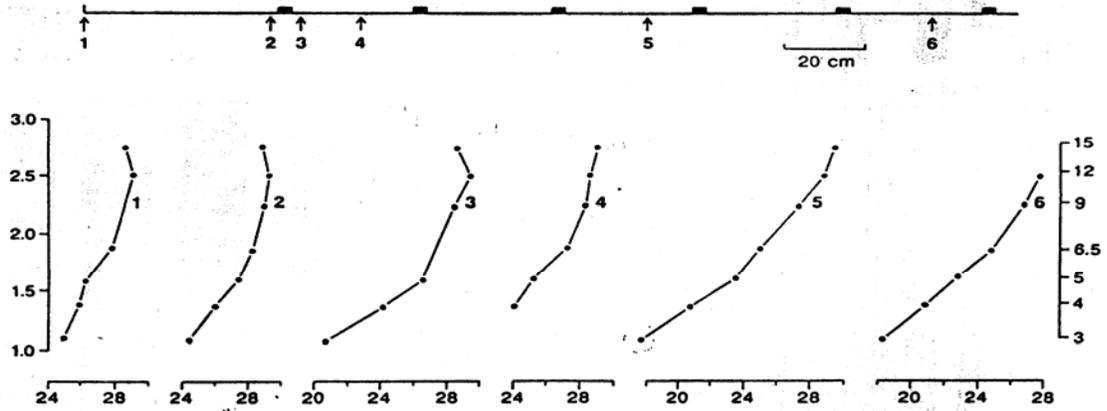


Figure 1.22: Manifestation de l'écoulement à différentes hauteurs au-dessus du lit en fonction des obstacles à la surface d'un cours d'eau à lit de graviers (Robert *et al.*, 1992).

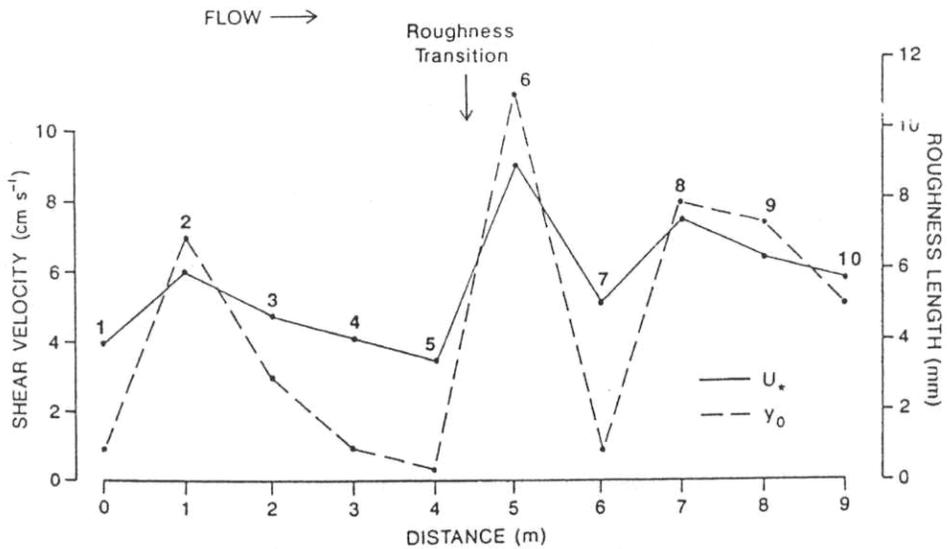


Figure 1.23: Fluctuation des vitesses de friction (u^*) et de la hauteur où la vitesse est nulle (y_0) en fonction de la distance entre un obstacle et un profil de vitesse (Robert *et al.*, 1992).

Les effets du changement de rugosité se manifestent aussi sur l'intensité turbulente (figure 1.24). À l'amont de la transition, les fluctuations des vitesses longitudinales sont moins importantes que celles observées plus en aval. L'intensité turbulente diminue aussi vers la couche supérieure de l'écoulement mais cette variabilité est moins grande que celle observée pour les profils qui se positionnent à l'aval d'obstacle. Immédiatement à l'amont du premier obstacle, l'intensité turbulente près du lit atteint son maximum et les valeurs d'intensité sont très variables sur l'ensemble du profil de vitesse. À l'aval de la transition, l'intensité maximale est deux fois plus importante que la hauteur de l'obstacle. La variabilité des fluctuations des vitesses de l'écoulement est en générale plus grande qu'en amont, avant que l'écoulement soit soumis aux éléments de rugosité.

La variabilité des vitesses dans les trois composantes de l'écoulement a été investiguée par Lawless et Robert (2001). La distribution spatiale des vecteurs de vitesse longitudinale et verticale autour d'amas de galets est présentée dans la figure 1.25. Pour les profils 1 à 3, les vitesses augmentent du lit vers la surface de l'écoulement en prenant une forme logarithmique et les gradients de vitesse ne varient pratiquement pas sur l'ensemble d'un profil. Les vitesses verticales montrent aussi peu de fluctuations sur la tranche d'eau et les vecteurs sont pratiquement horizontaux. Les auteurs supposent que la variabilité spatiale des vitesses longitudinales et verticales est liée à l'échelle de rugosité associée à la taille des grains. Les particules n'offrent pas une résistance assez importante pour modifier la structure spatiale de l'écoulement. À l'aval du premier obstacle, les vitesses longitudinales ralentissent, particulièrement près du lit. Elles atteignent pratiquement 0 cm/s sur les premiers 20% du profil de vitesse. Dans cette portion du profil, les vitesses verticales sont fréquemment négatives ce qui permet aux auteurs d'identifier la zone de séparation de l'écoulement. Près de la surface de l'eau, les gradients de vitesse longitudinale augmentent. Les vitesses verticales sont légèrement négatives et se dirigent vers le lit. Le profil 7 permet d'observer la fin de la séparation de l'écoulement où les vitesses longitudinales près du lit commencent à augmenter. Les vitesses verticales sont positives et se dirigent vers la couche supérieure de l'écoulement dans la portion inférieure du profil de vitesse. Dans la portion supérieure, les vecteurs deviennent horizontaux. Les deux derniers profils reflètent le retour de l'écoulement à l'état initial décrit pour les premiers profils.

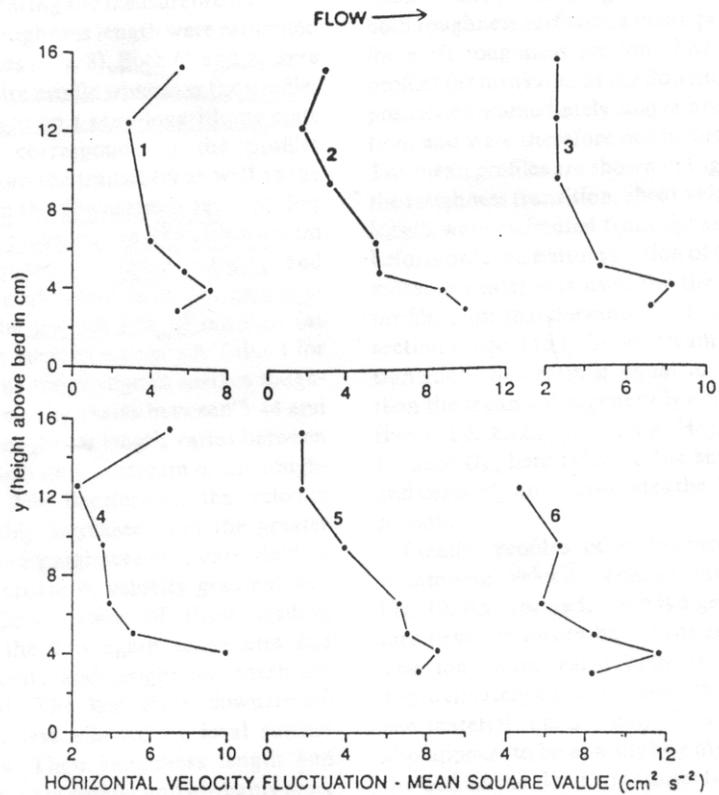


Figure 1.24 : Profils d'intensité turbulente au-dessus d'éléments artificiels de rugosité. Les profils 1 et 2 sont à l'amont de l'obstacle et 3,4,5 et 6 s'éloignent vers l'aval de la transition de rugosité (Robert *et al.*, 1992).

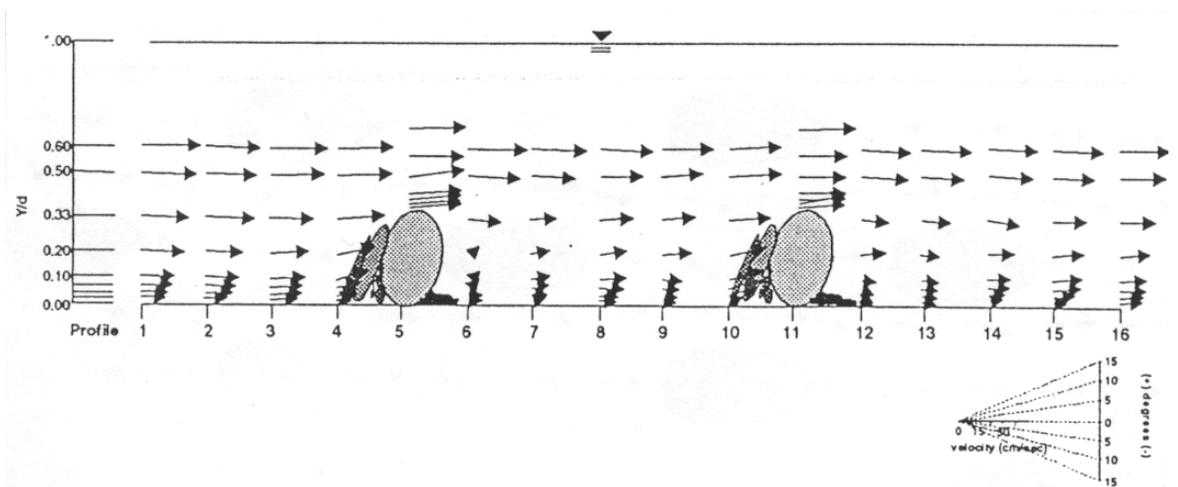


Figure 1.25 : Vecteurs de vitesse longitudinale et verticale de l'écoulement autour d'amas de galets (Lawless et Robert, 2001).

La description de la variabilité spatiale des différentes composantes des vitesses de l'écoulement permet de mieux comprendre les effets de changements de rugosité ponctuels à la surface du lit sur la structure de l'écoulement. Elle explique par exemple comment la présence d'un bloc ou d'un amas de galets intervient sur la magnitude et la direction des vitesses longitudinale et verticale et sur la répartition de l'intensité turbulente de l'écoulement. Ces profils reflètent les transitions de rugosité sur une coupe transversale. Nous verrons que l'organisation spatiale de ces formes à l'échelle d'une section de cours d'eau peut avoir une influence importante sur la résistance à l'écoulement. Jusqu'à maintenant peu de méthodes ont été développées pour identifier cette organisation et ses effets sur la structure de l'écoulement.

1.4.3) L'organisation des microformes à l'échelle du cours d'eau

La réalisation de croquis et la photogrammétrie peuvent nous permettre d'identifier les différentes échelles de rugosité et de décrire l'organisation spatiale des formes du lit. Elles permettent de décrire et de quantifier la concentration et l'espacement ainsi que le type d'agencement des formes dans une section de cours d'eau. Ces méthodes ont aussi été utilisées dans un contexte temporel afin d'identifier l'évolution de zones de dépôt et d'érosion le long d'un cours d'eau ou dans des sections de méandres. Par ailleurs, leur utilisation pour expliquer la variabilité des caractéristiques de l'écoulement turbulent est négligée.

Church *et al.* (1998) ont souligné l'importance de l'organisation des formes du lit sur le transport des sédiments en cartographiant systématiquement les obstacles protubérants du lit, comme des éléments ponctuels, sur une section de cours d'eau de près de 40 m en milieu graveleux (figure 1.26). À partir de photos-aériennes prises à 30 m au-dessus du lit, ils ont observé que la distribution des blocs forme des structures circulaires fermées et stables qu'ils nomment *stone-cells*. Les structures cellulaires avaient déjà été notées par McDonald et Banerjee (1971), Gustavson (1974) et Bluck (1987). Les structures ont généralement un diamètre d'un mètre. Elles sont composées de particules dont la taille est supérieure au D_{84} du matériel qui compose la surface du lit (Hassan et Church, 2000). Leur formation n'est pas fonction de processus aléatoire de dispersion des particules. Elle résulte 1) de l'interaction entre l'écoulement et la texture des sédiments, 2) de la forme et de la densité des particules et 3) de la morphologie de la surface du lit. Ces accumulations

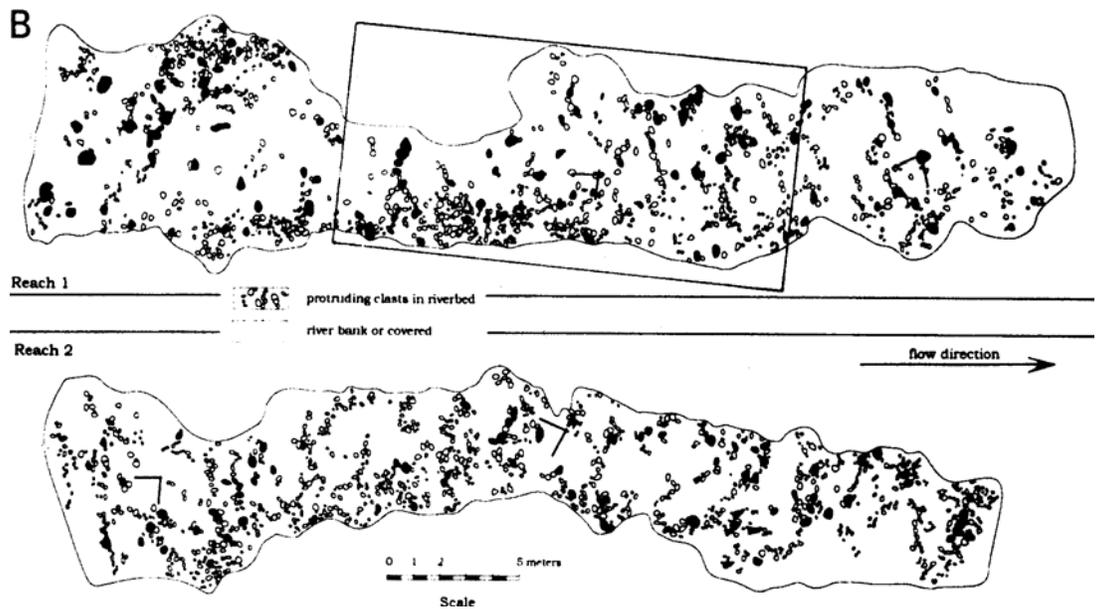


Figure 1.26 : Cartographie des obstacles protubérants à l'écoulement sur une section de la Harris Creek. Les blocs ont tendance à s'organiser sous la forme de cellules circulaires fermées et stables à la surface du lit (Church *et al.*, 1998).

de particules permettent une augmentation de la résistance à l'écoulement et retarderaient la mise en transport des particules. Les modifications de l'écoulement associées à la présence des structures circulaires devraient se traduire par des changements importants sur les profils de vitesse. Les auteurs soulignent enfin que l'organisation des blocs assure une stabilité des lits dans les cours d'eau à lit de graviers. Le développement de structures persistantes dans le chenal limiterait les modifications structurales de la surface du lit de manière telle que les taux de transport deviendraient moins importants que ne le laisserait présager la taille des grains présents sur la surface du lit. Par ailleurs, ces arrangements de blocs dans l'espace n'ont pas été traités systématiquement dans les cours d'eau à lit de graviers et tendent à disparaître si l'apport en sédiments est élevé (Hassan et Church, 2000).

En localisant tous les amas de galets sur une section de cours d'eau, Hassan et Reid (1990) ont observé que leur distribution n'était pas ubiquiste dans l'espace (figure 1.27). Ils notent que la densité des amas de galets est plus grande dans les sections du cours d'eau plus étroites. Sur une petite section de la rivière Turkey Brook, au Nord de Londres, la concentration des amas de galets varie de un à plus de quatre par mètre carré. Hassan et Reid (1990) ont aussi noté qu'il est rare d'apercevoir un amas de galets directement à l'aval d'un autre. Enfin, ils montrent que non seulement l'organisation des particules qui forment les amas de galets a une influence sur la résistance à l'écoulement mais que les effets entre l'organisation des amas sur le lit et le transport des sédiments sont importants.

La cartographie a enfin aussi été utilisée à l'échelle des éléments morphologiques du chenal et ce, afin de circonscrire les zones d'accumulation de particules ayant des échelles de rugosité distinctes le long d'une section de cours d'eau. Bridge *et al.* (1977) ont réalisé différents profils de vitesse dans une section de méandre de la rivière South Esk qui sont ensuite mis en relation avec des zones présentant différentes configurations du lit. Ils ont jumelé les caractéristiques de l'écoulement à une description détaillée du méandre en identifiant grossièrement les zones de lit plat, les zones de dunes ainsi que celles de rides. Les auteurs s'intéressent aux changements abrupts de rugosité entre les différentes zones du lit. La cartographie leur permet de caractériser les changements topographiques de la section à l'échelle du méandre. Seulement, la position et l'organisation des formes identifiées ne peuvent être adéquatement représentées en raison de la faible résolution de la cartographie. Enfin, l'identification des patrons d'écoulement à grande échelle en fonction

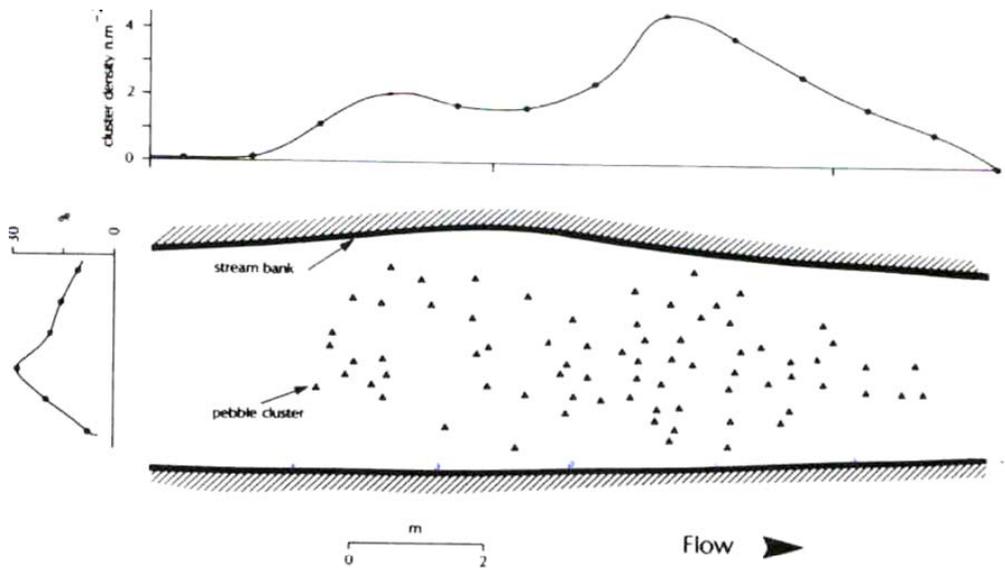


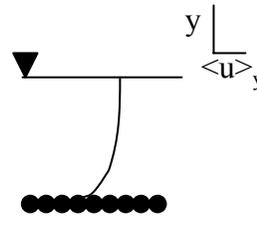
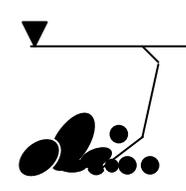
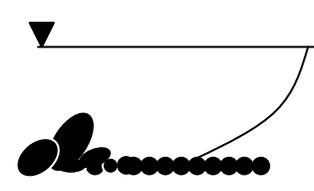
Figure 1.27: Localisation et densité des amas de galets sur des coupes transversales d'une section de la rivière Turkey Brook (Hassan et Reid, 1990).

de sections morphologiques du chenal aura tout de même permis de mieux comprendre les mécanismes associés à l'ajustement du chenal à l'échelle du cours d'eau.

Les principales conclusions des auteurs portent sur le fait que la cartographie est une méthode efficace pour décrire la variabilité spatiale des formes du lit et conséquemment des différentes échelles de rugosité. Seulement, des cartes de localisation des blocs, des amas de galets et des formes transversales ont rarement été présentées dans la littérature. Une de raison qui explique le peu de cartes du lit en milieu graveleux est que la photogrammétrie, telle qu'utilisée par Church *et al.* (1998) par exemple, est difficile à réaliser à l'échelle d'une rivière. De plus, une approche méthodologique entièrement basée sur la cartographie des diverses formes sur le terrain semble complexe par la nature des entités à localiser ou à identifier. Les formes du lit telles que les blocs, les amas de galets et les formes transversales ont tendance à se superposer dans l'espace. Aussi, les effets d'imbrication des particules ne peuvent pas être quantifiés à partir de la cartographie des formes du lit. Enfin, l'identification des formes et la description de leur organisation s'effectue difficilement à l'échelle de la rivière. Il est donc nécessaire de déterminer si une cartographie détaillée de la topographie du lit peut nous permettre d'abord de bien identifier les éléments de rugosité du lit et de traduire la complexité de l'organisation des formes du lit dans les rivières à lit de graviers. Il faut aussi déterminer dans quelles mesures l'organisation des formes du lit que l'on perçoit en milieu naturel existe réellement à partir des cartes résultantes. Le cas échéant, la cartographie permettrait de mieux comprendre l'influence de l'organisation des formes et, conséquemment des changements de rugosité sur la structure de l'écoulement à l'échelle d'une section de cours d'eau.

1.5) CONCLUSION

Les particules du lit, les microformes et l'organisation des principaux éléments de rugosité à la surface du lit contrôlent les caractéristiques de l'écoulement. Le tableau 1.3 présente les principaux effets, observés dans la littérature, des changements de rugosité sur l'écoulement. Dans les cours d'eau à lit de graviers, la taille, la forme et l'orientation des particules du lit et des microformes sont les principaux indicateurs qui permettent de quantifier la résistance à l'écoulement. Pour estimer la résistance totale localement dans une section de cours d'eau, les profils de vitesse peuvent servir d'indicateur des échelles de rugosité. Les profils linéaires caractérisent l'écoulement au-dessus de particules

Échelle des grains		Échelle des microformes (éléments de rugosité individuels)	
Indicateurs de rugosité : Taille, forme et orientation			
Forme du profil			
Influence sur l'écoulement	<p>↑ des vitesses $\langle u \rangle_y$ du lit jusqu'à la surface de l'eau</p> <p>vecteurs d'écoulement horizontaux</p> <p>↓ gradients de vitesse $\langle u \rangle_y$</p> <p>↓ u^* et y_0</p> <p>↓ de l'intensité turbulente du lit vers la surface de l'eau</p>	<p>↓ des vitesses $\langle u \rangle_y$ à proximité du lit</p> <p>vitesses $\langle v \rangle_y$ négatives et vecteurs d'écoulement se dirigent vers le lit</p> <p>↑ gradients de vitesse $\langle u \rangle_y$</p> <p>↑ u^* et y_0</p> <p>↑ de l'intensité turbulente du lit vers la surface de l'eau</p>	<p>Ajustement des vitesses $\langle u \rangle_y$, u^*, y_0 et de l'intensité turbulente aux nouvelles conditions de rugosité</p> <p>vitesses $\langle v \rangle_y$ positives et vecteurs d'écoulement se dirigent vers la surface de l'eau</p>
<p>Organisation spatiale des éléments de rugosité à l'échelle d'un tronçon de cours d'eau : Structures circulaires/structures en diamant/alignements</p>			
<p>Indicateurs de rugosité : Concentration et patrons spatiaux</p>			



Effets sur la variabilité spatiale l'écoulement

Tableau 1.3 : Synthèse des échelles de rugosité et de leurs effets sur l'écoulement.

homogènes où l'on observe l'absence d'éléments de rugosité protubérants à la surface du lit. Dans ces conditions, les vitesses augmentent du lit vers la surface de l'eau en suivant une relation logarithmique. Les gradients de vitesse sont peu accentués et les valeurs de vitesses de friction et d'intensité turbulente sont faibles. Les profils expriment l'effet des grains à la surface du lit. Lorsqu'on observe la présence de microformes ou de particules grossières, les profils se segmentent en deux parties. Les vitesses ralentissent dans l'environnement proximal du lit et les vitesses de friction, la hauteur où les vitesses sont nulles et l'intensité turbulente s'intensifient. Les profils de vitesse reprennent leur forme linéaire lorsqu'ils s'éloignent des éléments de rugosité.

Une description détaillée de l'effet de proximité des éléments de rugosité sur les profils de vitesse pourrait nous permettre d'estimer adéquatement le comportement de l'écoulement à l'échelle de la section de cours d'eau. Cette description s'avère complexe mais essentielle surtout si on fait intervenir les effets des patrons d'organisation spatiale des éléments de rugosité sur la variabilité spatiale des caractéristiques turbulentes de l'écoulement. Seulement, les types d'organisation des obstacles dans les cours d'eau à lit de graviers et leur étape de formation en milieu naturel restent plutôt méconnus. Aussi, même si les différents types d'organisation se reflètent par une variabilité des concentrations d'obstacles à la surface du lit, ils ont été peu investigués jusqu'à maintenant en raison des méthodes de positionnement, notamment de la cartographie, qui sont difficiles à réaliser à l'échelle d'une section de cours d'eau. Enfin, les difficultés méthodologiques sont nombreuses si l'on veut lier l'organisation des obstacles aux caractéristiques moyennes de l'écoulement sur une section de cours d'eau.

2) PROBLÉMATIQUE ET MÉTHODE

2.1) PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS

De nombreux efforts ont été déployés pour lier les vitesses moyennes de l'écoulement, la profondeur, la pente du chenal et les caractéristiques du lit dans les cours d'eau à lit de graviers. Ces efforts visaient à obtenir des méthodes permettant d'estimer correctement les vitesses moyennes à une coupe transversale. Pour réaliser cet objectif, il est fréquent d'utiliser des équations empiriques telle celle de Manning qui met en relation la vitesse moyenne à la pente de la surface de l'eau, la profondeur, et un paramètre qui exprime la rugosité du lit. Ces méthodes sont applicables sur des systèmes où les vitesses moyennes de l'écoulement à différentes profondeurs d'eau suivent un profil logarithmique ainsi que pour des systèmes où la taille des particules du lit est faible comparativement à la profondeur d'eau (Wiberg et Smith, 1991). Seulement, les obstacles protubérants à l'écoulement sont fréquents dans les rivières à lit de graviers et on connaît peu les caractéristiques de leur organisation spatiale à l'échelle du tronçon de cours d'eau. Ces éléments de rugosité modifient non seulement la forme des profils de vitesse mais laissent aussi supposer que les méthodes de prévision des vitesses moyennes de l'écoulement ne sont plus tout à fait au point.

La morphologie du lit joue un rôle important sur la structure de l'écoulement. Conséquemment, elle intervient aussi sur le transport des sédiments. Les connaissances récentes sur la turbulence ont permis à Nezu et Nakagawa (1993) de présenter un modèle intégrant la turbulence, au transport des sédiments et à la morphologie du lit (figure 2.1). Les auteurs proposent une gamme d'interactions entre la double structure de la turbulence comprenant les structures à grande échelle et les cycles d'éjection-incursion, les conditions d'écoulement, la rugosité du lit et la formation des microformes. Ce modèle ne peut être appliqué que dans les écoulements où la concentration des formes du lit n'a pas une influence significative sur la signature de la turbulence. Si ces conditions ne sont pas respectées, l'organisation de l'écoulement est difficile à prévoir malgré les progrès récents de Buffin-Bélanger et Roy (2000b) pour décrire la structure turbulente de l'écoulement dans les cours d'eau à lit de graviers.

Une prédiction adéquate des vitesses de l'écoulement à partir d'observations sur la morphologie du lit est essentielle pour caractériser les conditions à partir desquelles le

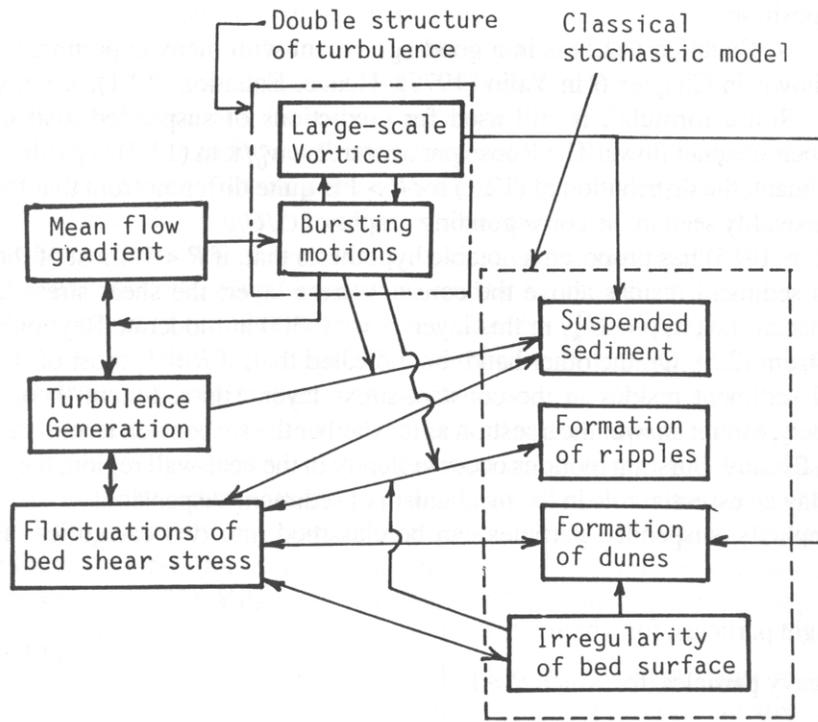


Figure 2.1 : Relations entre la structure turbulente de l'écoulement, les formes du lit et le transport des sédiments (Nezu et Nakagawa, 1993).

matériel qui compose la surface du lit est mis en mouvement. Elle permet également de calculer les taux de transport et d'érosion rapidement (Smart, 1999). Plusieurs de ces prédictions ont été réalisées dans des canaux expérimentaux rectangulaires où le cisaillement est constant sur toute la section d'étude. En milieu graveleux, la variabilité des profondeurs de l'écoulement et de la rugosité du lit influence considérablement les valeurs locales du cisaillement au lit et ces milieux ont peu été investigués en raison de la complexité et de la grande variété d'éléments de rugosité de géométrie différente (Dancey, 2000).

La disposition des particules qui composent les lits de cours d'eau génère des formes de différentes tailles qui entraînent une variation de la rugosité du lit et conséquemment, des changements importants dans l'organisation de l'écoulement (Robert *et al.*, 1993). Les éléments morphologiques produisent des patrons complexes de l'écoulement et ce, même si on s'éloigne de la surface du lit (Bayazit, 1975). Les profils de vitesse reflètent non seulement la taille des particules mais aussi les changements de rugosité en amont (Smart, 1999). On commence à comprendre l'effet d'un amalgame isolé sur la structure de l'écoulement qui est marquée par des structures d'échappement en aval d'un obstacle à la surface du lit. Par ailleurs, l'influence de l'organisation morphologique du lit à l'échelle d'une section d'étude a été peu examinée. Aussi, il est surprenant de constater que les écoulements en rivière à lit de graviers soient bien structurés (Ferguson *et al.*, 1996) et ce, dans un contexte où les particules du lit sont hétérométriques et où l'on observe la présence des formes organisées de façon complexe (Clifford *et al.*, 1992).

Il est clair qu'une cartographie détaillée des lits peut nous permettre d'identifier ces formes et de dégager leur arrangement sur une section de cours d'eau à partir d'indices quantitatifs. Par contre, peu de cartes des formes du lit graveleux ont été réalisées en milieu naturel et elles n'ont jamais été jumelées aux caractéristiques de l'écoulement turbulent à l'échelle d'un tronçon de cours d'eau. Elles s'avèrent pourtant, à première vue, une méthode efficace de description de la rugosité du lit qui peut éventuellement être jumelée à la variabilité spatiale des caractéristiques turbulentes de l'écoulement. Il faut aussi considérer que les études menées en laboratoire ne peuvent reproduire la morphologie du lit à l'échelle d'une section de cours d'eau. L'influence des changements de la rugosité du lit sur l'organisation de l'écoulement ne peut donc y être traitée qu'en termes de variation locale en fonction d'éléments de rugosité ponctuels sur la surface du lit.

Ainsi, pour comprendre les effets de la morphologie du lit sur la variabilité spatiale des caractéristiques de l'écoulement une nouvelle approche doit être utilisée. L'échantillonnage des vitesses doit s'effectuer en simultané avec la cartographie du lit. Cette façon de procéder permet de maintenir les conditions hydrauliques constantes, notamment le débit, au cours de la campagne d'échantillonnage et, conséquemment, d'observer des modifications spatiales de l'écoulement qui soient directement associées aux changements de rugosité à la surface du lit. Ces mesures effectuées sur le terrain sont souvent plus complexes que celles effectuées en laboratoire. Enfin, les vitesses de l'écoulement doivent aussi être recueillies à haute résolution spatiale parce que l'utilisation de plusieurs senseurs déployés verticalement sur l'ensemble de la tranche d'eau permet de caractériser l'écoulement à plusieurs endroits en même temps.

Le premier objectif de cette étude est de décrire et de comprendre l'organisation spatiale des formes présentes à la surface des lits graveleux. Nous déterminerons dans quelle mesure la cartographie détaillée du lit permet de représenter les éléments morphologiques d'une section de rivière. Nous décrirons l'organisation des éléments de rugosité sur quatre tronçons de cours d'eau de taille différente en plus de tester les caractéristiques de ces distributions spatiales à partir de distributions aléatoires d'obstacles, ce qui soulèvera la question d'organisation apparente des formes du lit dans les cours d'eau à lit de graviers. Le second objectif consiste à quantifier et à prévoir la variabilité spatiale des caractéristiques turbulentes de l'écoulement en fonction des principaux éléments de rugosité à la surface du lit. Nous expliquerons les liens qui existent entre la morphologie du lit et la variabilité spatiale de l'écoulement dans un cours d'eau à lit de graviers.

2.2) STRATÉGIES GÉNÉRALES D'ÉCHANTILLONNAGE

De nouvelles approches méthodologiques ont été développées pour décrire l'organisation des formes du lit et pour lier la morphologie à la variabilité spatiale des caractéristiques turbulentes de l'écoulement. En l'absence d'un protocole expérimental déjà existant pour caractériser l'organisation des formes du lit à l'échelle d'une section de cours d'eau, nous avons développé une première méthode de cartographie des obstacles du lit que l'on a par la suite améliorée lors d'une seconde campagne d'échantillonnage.

Lors de la première campagne, nous avons relevé la position des blocs et des amas de galets sur l'ensemble de la section d'étude à partir de seuils quantitatifs d'échantillonnage. Au-dessous d'une certaine taille, les blocs et les amas de galets ne sont pas investigués. Les seuils sont établis en fonction de la représentativité des formes par rapport à la taille des particules du lit sur la section de cours d'eau. Un des principaux problèmes associés à ce type d'échantillonnage, c'est qu'il faut porter une attention constante aux seuils puisqu'ils varient en fonction des caractéristiques morphologiques du cours d'eau. De plus, ils sont arbitraires. Nous n'avons pas défini de critères quantitatifs qui permettent d'identifier rapidement les seuils qui correspondent à un type de cours d'eau en particulier compte tenu de leur grande variabilité morphologique. Aussi, puisque les formes du lit ont tendance à se superposer dans l'espace, le processus décisionnel s'avère complexe. Lors de la seconde campagne d'échantillonnage nous avons effectué une cartographie détaillée de la surface du lit. Un échantillonnage systématique à haute résolution spatiale de la topographie du lit nous a permis d'extraire les principaux éléments de rugosité à partir des cartes résultantes. Cette méthode réduit considérablement le temps alloué à l'échantillonnage sur le terrain en plus d'éviter les problèmes de superposition des formes à la surface du lit.

Pour déterminer l'influence des éléments morphologiques du lit sur la structure de l'écoulement, des vitesses ont été récoltées en même temps que l'échantillonnage des formes du lit. Les vitesses sont récoltées à partir de plusieurs courantmètres électromagnétiques déployés verticalement dans l'écoulement. Elles sont obtenues à haute résolution temporelle et spatiale. Plusieurs profils de vitesse ont été échantillonnés le long de coupes perpendiculaires sur chacune des sections d'étude. La combinaison de ces stratégies d'échantillonnage permet de déterminer si l'organisation des obstacles à la surface du lit reflète la structure de l'écoulement à des niveaux d'étiage. La description des instruments de mesure et les stratégies d'échantillonnage développées pour répondre à chacun des objectifs est présentée en détail dans chacun des articles.

3) ORGANISATION MORPHOLOGIQUE DES AMAS DE GALETS ET DES ÉLÉMENTS PROTUBÉRANTS DANS LES COURS D'EAU À LIT DE GRAVIERS.

3.1) INTRODUCTION

Les particules du lit se présentent sous divers arrangements complexes qui entraînent des changements de rugosité à plusieurs échelles en rivière à lit de graviers (Clifford, 1992; Robert, 1990). Les blocs, les amas de galets et les formes transversales sont les principaux obstacles qui modifient la variabilité spatiale de la résistance à l'écoulement et contrôlent la stabilité du lit à l'échelle du tronçon de cours d'eau (Brayshaw, 1985; Naden et Brayshaw, 1987). La répartition des obstacles à la surface du lit détermine la texture des sédiments (Leopold et Wolman, 1957), les seuils de mise en transport (Jong et Ergenzinger, 1998) et la structure de l'écoulement (Kirkbride, 1993; Buffin-Bélanger et Roy, 1998).

La taille, (Leopold *et al.*, 1964; Hey, 1979; Bray, 1980, 1982; Griffiths, 1981; Millar, 1999) la concentration (Morris, 1955; Nowell et Church, 1979; Raupach, 1981; Robert *et al.*, 1992, 1993, 1996; Smart, 1999) et l'orientation (Wohl et Ikeda, 1998) sont les principaux indicateurs qui caractérisent la résistance générée par les blocs, les amas de galets et les formes transversales à l'échelle d'un tronçon de cours d'eau. Or, non seulement la stabilité du lit est contrôlée par ces indicateurs mais elle semble aussi l'être par l'organisation spatiale des éléments morphologiques du lit (Tribe et Church, 1999).

L'organisation des principaux éléments de rugosité a été traitée à partir de données provenant de photographies de la surface du lit. Cette méthode a été utilisée pour la première fois par Ibbeken et Schleyer (1986). Jong et Ergenzinger (1995) ont positionné et décrit les blocs, les amas de galets et les formes transversales à partir de photographies prises au-dessus du cours d'eau. Les auteurs observent principalement que les amas de galets ont tendance à s'organiser sous forme de diamants à la surface du lit de cours d'eau rectiligne. En fait, un amas de galets se positionne rarement immédiatement à l'aval d'un autre. Jong et Ergenzinger (1995) proposent que la production de turbulence à l'aval d'un obstacle empêche la naissance d'une nouvelle forme. Hassan et Reid (1990) ont montré que ces formes se positionnent rarement à des distances inférieures à celles qui se trouvent entre 0,79 et 0,86 m.

Lorsque les structures d'amas de galets sont plus allongées, les diamants sont fréquemment décrits en terme de structures circulaires. Les structures cellulaires ont d'abord été observées par McDonald et Banerjee (1971), Gustavson (1974), Bluck (1987), Tait et Willetts (1992) puis Ahnert (1994). Par ailleurs, elles n'ont pas été traitées systématiquement et sont difficiles à observer (Hassan et Church, 2000). Church *et al.* (1998) ont reproduit des cartes de distribution de blocs à partir de photos aériennes prises d'un ballon. Les cartes montrent que les blocs s'organisent en structures circulaires fermées et stables. Ils forment des cercles ou ellipses dont le diamètre augmente avec la granulométrie de la section d'étude. Les structures circulaires stabilisent la surface et semblent limiter les modifications texturales du lit. Elles réduisent considérablement la mobilité des particules grossières qui après coup protègent le matériel plus fin.

La cartographie du lit en milieux graveleux peut nous permettre d'identifier les principales formes présentes à la surface du lit et d'examiner leur arrangement sur une section de cours d'eau. Par contre, peu de cartes ont été réalisées en milieu naturel même si elles s'avèrent à première vue une méthode efficace de description des changements morphologiques du lit. Une des raisons qui expliquent cette lacune est que la photogrammétrie est difficile à réaliser à l'échelle d'une rivière. De plus, une approche méthodologique entièrement basée sur la cartographie des formes sur le terrain est complexe par la nature des entités à localiser. En effet, les formes du lit ont tendance à se superposer dans l'espace ce qui entraîne une redondance dans les informations recueillies sur le terrain et par la suite cartographiées. Cette superposition cause aussi certains problèmes quant à la nature des relations que nous pouvons effectuer entre le positionnement des diverses formes. Par exemple, les blocs composent les amas de galet et les amas de galets sont souvent imbriqués à l'intérieur des formes transversales.

Les objectifs de cette étude sont de 1) présenter deux stratégies d'échantillonnage pour cartographier sur le terrain les principales formes des rivières à lit de graviers soit les amas de galets et les éléments protubérants comme les blocs, 2) décrire et quantifier leur organisation à l'échelle d'un tronçon de cours d'eau et 3) tester les caractéristiques d'organisation spatiale des principaux éléments de rugosité à partir de distributions aléatoires.

3.2) MÉTHODE

3.2.1) Site d'étude

Le choix des sites d'étude s'est effectué en fonction de trois critères. D'abord, les formes investiguées doivent être bien développées dans le cours d'eau. Dans ce cas, elles sont faciles à identifier à la surface du lit. De plus, les particules du lit doivent être hétérométriques. La diversité des tailles de particule présentes à la surface du lit stimule la mise en place de ces formes en milieu graveleux. Ensuite, les sections à l'étude sont le plus rectilignes possible ce qui élimine les effets hydrauliques associés à la présence de méandres. Elles permettent de comprendre la variabilité de la morphologie du lit sur un tronçon sans faire intervenir les mécanismes qui entraînent des changements dans la forme du chenal à l'échelle du cours d'eau. Enfin, les sites choisis sont facilement accessibles et permettent le déploiement des appareils scientifiques. L'ensemble des campagnes d'échantillonnage a été effectué en période estivale à des niveaux d'étiage. Les caractéristiques morphologiques et hydrauliques des quatre tronçons investigués sont résumées dans le tableau 3.1.

Deux sections de rivière graveleuse ont été échantillonnées sur le bassin de la rivière Nicolet dans la région de la Mauricie-Bois-Francs (Québec) (figure 3.1a). Ces sections s'étendent sur près de 30 m de longueur. Le ruisseau Moras (figure 3.2a) a une largeur de 7 m et une profondeur moyenne de 0,5 m. La distribution granulométrique des sédiments montre une courbe normale symétrique autour d'une valeur médiane de l'ordre des graviers. On peut y observer une séquence seuil-mouille rapide et une faible sinuosité. Le ruisseau Guertin (figure 3.2b), qui se situe en amont du ruisseau Moras, a une largeur moyenne de 5,5 m et une profondeur moyenne de 0,5 m. La pente de la section est un peu moins abrupte. La taille granulométrique médiane des sédiments est inférieure à celle que l'on observe dans la section du ruisseau Moras mais elle marque tout de même la présence de blocs, d'amas de galets et de formes transversales.

Deux campagnes d'échantillonnage ont aussi été effectuées sur la rivière Eaton Nord (figure 3.2c) qui se situe à environ 180 km au sud-est de Montréal dans la région de l'Estrie (Québec) (figure 3.1b). Une première campagne a été effectuée à l'automne 1999 et une seconde à l'été 2000. Le cours d'eau a une largeur d'environ 17 m et une profondeur moyenne d'environ 0,35 m. La pente du cours d'eau est de l'ordre de 0.002. Les d_{50} et d_{84}

Sites	Longueur (m)	Largeur moyenne à la surface de l'eau (m)	Profondeur moyenne de l'écoulement au moment de l'échantillonnage (m)	Vitesse moyenne (cm/s)
ruisseau Moras	30	7	0,5	(-)
ruisseau Guertin	30	5,5	0,5	(-)
Eaton Nord-1999	22	17	0,3	58,3
Eaton Nord-2000	33	16	0,4	34,4

Tableau 3.1 : Caractéristiques morphologiques et hydrauliques des sections de cours d'eau à l'étude. (-) Mesures non-disponibles.

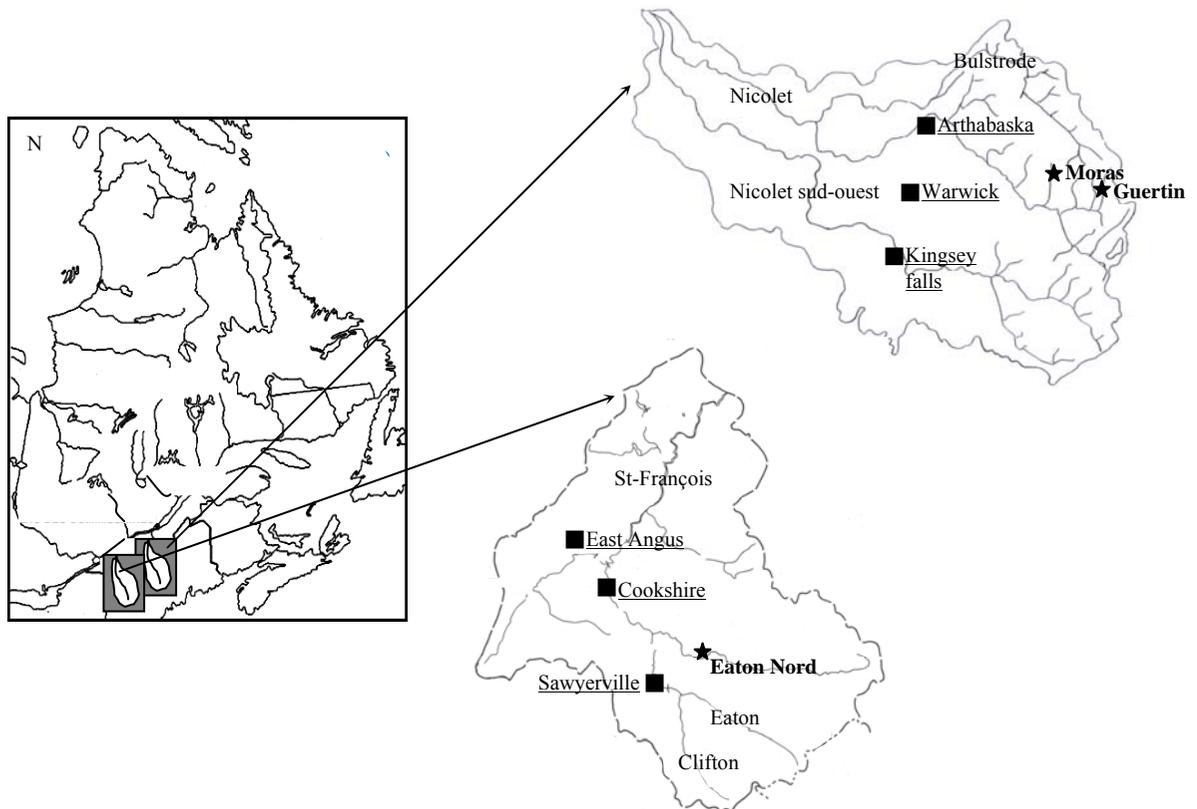


Figure 3.1 : Localisation des sites d'échantillonnage : a) ruisseau Moras et Guertin (Québec), b) Eaton Nord (Québec).

a)



b)



c)



Figure 3.2 : a) Vue amont du ruisseau Moras (Mauricie-Bois-Francs, Québec), b) ruisseau Guertin, (Mauricie-Bois-Francs, Québec), c) vue vers l'aval de la rivière Eaton Nord (Estrie, Québec).

sont respectivement de 37 et 108 mm. Plusieurs types de forme qui offrent une résistance à l'écoulement sont présents sur ce cours d'eau. Le lit est composé d'un grand nombre d'amas de galets et de blocs qui se distribuent sur l'ensemble du chenal dans la section d'étude.

3.2.2) Méthodes d'échantillonnage

Les méthodes de 1) cartographie ponctuelle et 2) cartographie détaillée ont été utilisées sur le terrain. En l'absence de protocole déjà établi pour étudier les questions d'organisation morphologique du lit, les premiers sites d'étude (ruisseaux Moras et Guertin) nous ont permis d'élaborer une méthodologie qui permet de localiser les formes du lit. Les relevés ont porté exclusivement sur la position des blocs et des amas de galets à la surface du lit. Ce protocole permet de conclure sur l'organisation des principales formes du lit. Par ailleurs, il nous a aussi permis d'identifier certaines difficultés que nous avons corrigées notamment en raison du changement de taille des sections étudiées. Lors d'un premier relevés sur la rivière Eaton Nord nous avons effectué une cartographie détaillée de la surface du lit à partir de laquelle il est possible d'extraire les principaux obstacles à l'écoulement une fois les mesures de topographie échantillonnées. Cette méthode a été validée par une seconde campagne sur la Eaton Nord. Les deux stratégies d'échantillonnage se prêtent aux mêmes applications quant à l'analyse des données mais nous verrons que la seconde offre des avantages certains quant à son utilisation sur le terrain.

La localisation ponctuelle des formes et la cartographie détaillée de la surface du lit sont effectuées à l'aide d'une station tachéométrique Leica TC805L (figure 3.3). Les coordonnées des points topométriques sont mesurés à partir d'un système de positionnement relatif. La précision dans la localisation spatiale des points de la station tachéométrique est de 2 mm en terme de distance et de 6 secondes en terme d'orientation.

La cartographie ponctuelle des formes du lit permet de localiser une portion de l'ensemble des blocs et des amas de galets dans l'espace sur une section de cours d'eau. Chacune des formes est échantillonnée en fonction de deux critères de sélection spécifiques. Le premier est que les blocs et les amas de galets échantillonnés doivent respecter un seuil de taille minimale. Ce seuil est déterminé sur le terrain en fonction de l'aire des formes et de la granulométrie de la section d'étude. Le second critère concerne

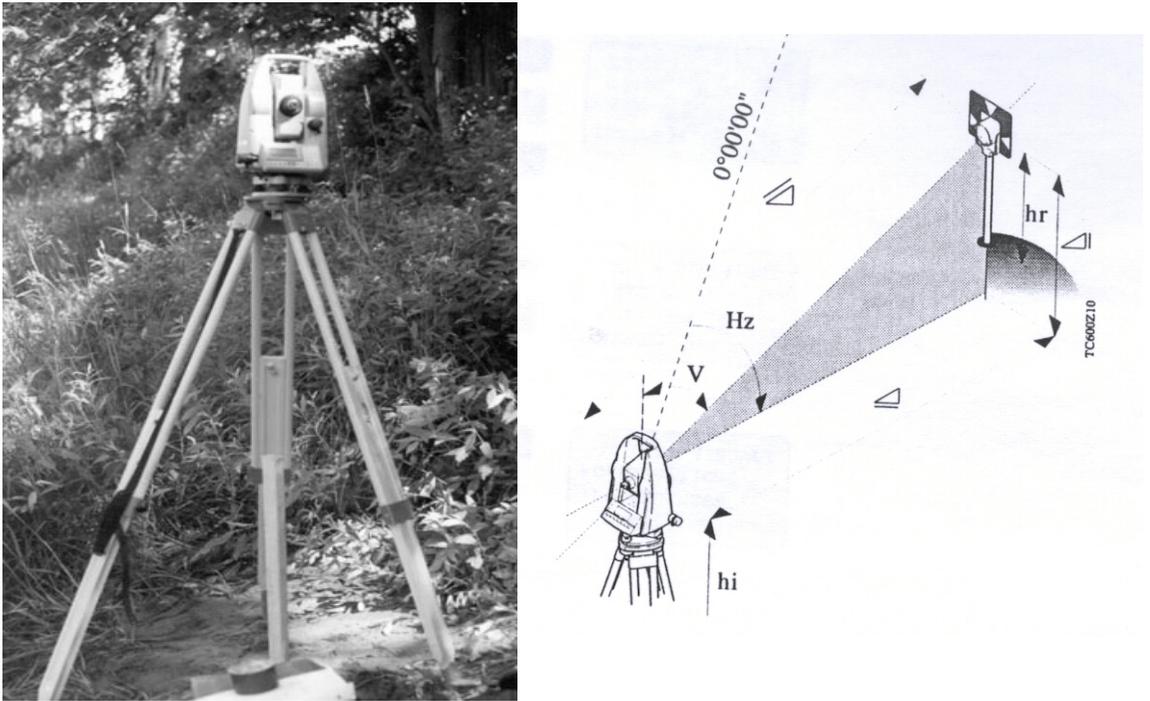


Figure 3.3 : a) Station tachéométrique. b) La station émet un rayon laser qui est réfléchi par l'intermédiaire d'un prisme positionné au point à mesurer. Elle permet de déterminer les coordonnées des points topométriques dans l'espace.

exclusivement les amas de galets. On stipule que pour être échantillonnés, ils doivent correspondre à une définition structurale précise.

Pour les blocs, le seuil adéquat est déterminé sur le terrain par la représentativité de leur taille, en terme d'obstacle à l'écoulement, par rapport à la granulométrie médiane de la section d'étude. Plus la proportion des blocs de grande dimension est élevée sur la section, plus nous augmentons le seuil quantitatif minimal d'échantillonnage. Ces seuils constituent une façon efficace de circonscrire le temps alloué à la réalisation de la campagne d'échantillonnage pour conserver des débits constants. Les amas de galets ont été échantillonnés lorsque les particules alignées à la surface du lit étaient imbriquées les unes aux autres. Ces particules devaient aussi être bien ancrées sur le lit et elles devaient montrer une continuité dans leur disposition. Enfin, nous avons retenu une aire minimale d'au moins $0,1 \text{ m}^2$ pour que les amas de galets soient échantillonnés. L'imbrication des formes l'une dans l'autre n'influence pas la décision des éléments à cartographier et les formes sont considérées comme étant indépendantes les unes des autres. En effet, les blocs peuvent se retrouver à l'intérieur d'amas de galets ce qui ne les empêchent pas d'être échantillonnés en tant qu'élément de rugosité distinct. Sur le ruisseau Moras, nous avons échantillonné vingt amas de galets et 128 blocs ayant un axe a minimal de 0,15 m. Sur la section du ruisseau Guertin, onze amas de galets et 183 blocs ayant un axe a de plus de 0,25 m ont été échantillonnés (tableau 3.2). La position des formes échantillonnées est reportée dans un système d'informations géographiques (*Map Info*).

La cartographie détaillée de la surface du lit a été effectuée en fonction des mêmes critères pour les deux campagnes d'échantillonnage menées sur la Eaton Nord. Cette méthode simplifie l'identification et la description de l'organisation des formes du lit en plus d'éviter les problèmes associés à la superposition des blocs et des amas de galets dans l'espace (figure 3.4). La cartographie détaillée donne les mêmes informations que la cartographie ponctuelle des éléments de rugosité présents à la surface du lit puisqu'elle permet d'extraire des informations quantitatives sur les changements de rugosité du lit. Seulement, elle ne permet pas d'identifier la nature des éléments de rugosité, soit de différencier les blocs des amas de galets par exemple. La morphologie du lit est alors traitée en terme général d'obstacles protubérants à l'écoulement. Ces obstacles comprennent alors tous les éléments de rugosité grossiers qui composent la surface du lit. Les cartes de la topographie du lit sont effectuées de façon systématique à tous les 0,30 m

Sections	Nombre et type de formes	Taille des formes
Moras	Amas de galets : 120 Blocs : 128	Aire minimale : 0,1 m ² Axe <i>a</i> minimal : 0,15 m
Guertin	Amas de galets : 11 Blocs : 183	Aire minimale : 0,1 m ² Axe <i>a</i> minimal : 0,25 m
Eaton Nord-1999	Obstacles : 55	Hauteur : > 10 cm Aire minimale : 0,1 m ²
Eaton Nord-2000	Obstacles : 95	

Tableau 3.2 : Critères de sélection et nombre de formes du lit échantillonnées sur les différentes sections d'étude.

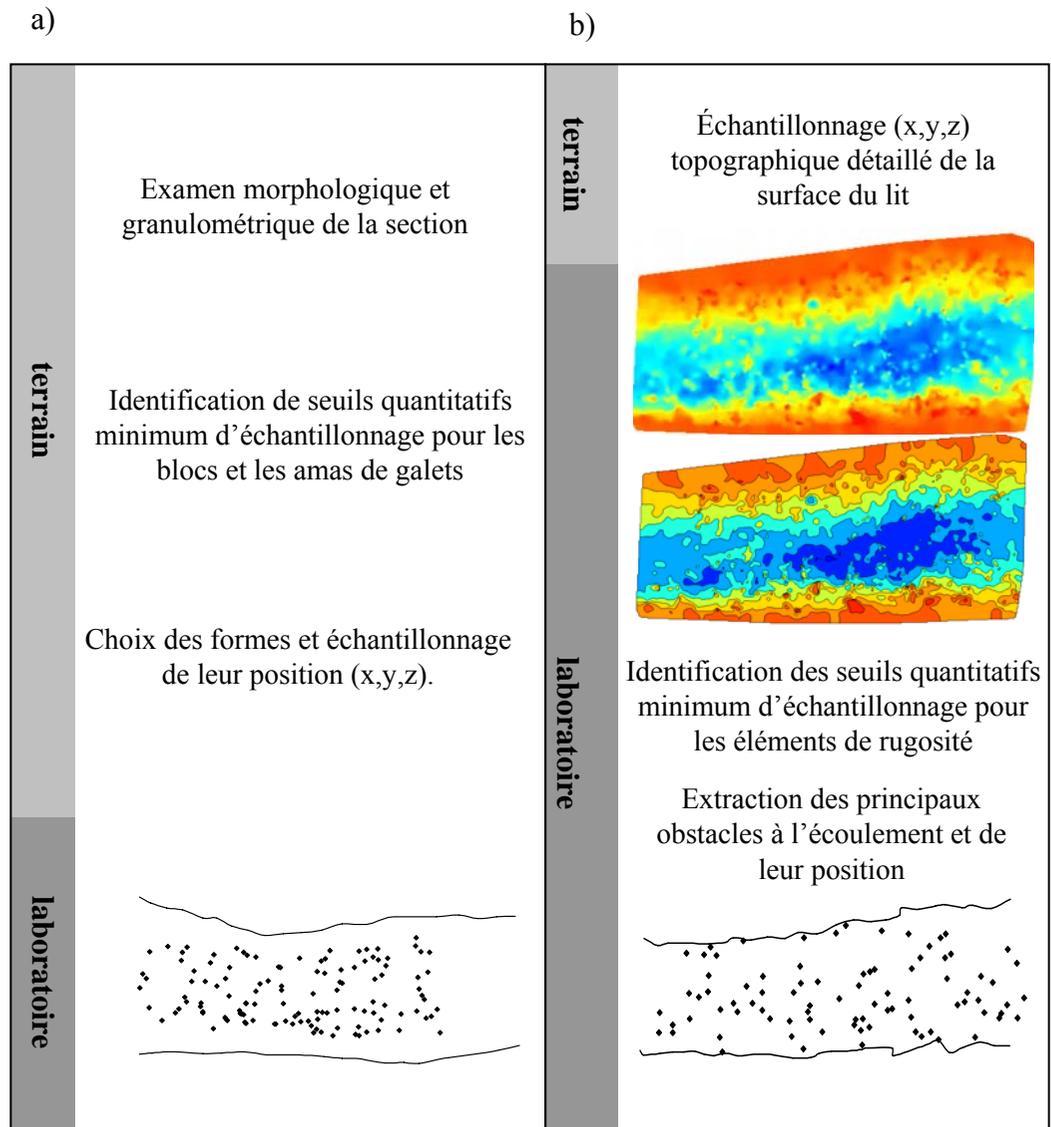


Figure 3.4 : Étapes de réalisation des stratégies d'échantillonnage sur le terrain et en laboratoire: a) méthode de cartographie ponctuelle des éléments de rugosité, b) cartographie détaillée du lit.

sur l'ensemble de la section d'étude le long de plusieurs coupes transversales. À cette grille systématique s'ajoutent les ruptures de pente importantes sur la surface du lit et les changements de rugosité. Ces choix sont critiques pour détailler la morphologie du lit. La densité des points échantillonnés est supérieure à 2 points par m^2 , ce qui nous permet d'obtenir une cartographie à partir de laquelle on extrait les principaux obstacles du lit par un examen des cartes résultantes.

La précision des formes du lit extraites à partir de la cartographie détaillée dépend non seulement de la résolution d'échantillonnage mais aussi des méthodes d'interpolation. La réalisation des cartes topographiques du lit est basée sur l'interpolation par voisinage simple. Cette méthode permet d'obtenir les formes les plus compatibles avec ce que l'on connaît de la réalité. Elle permet une bonne estimation des pentes, des courbures et des dépressions (Drouin, 1999). Les polygones de Thiessen sont utilisés pour déterminer l'aire d'influence de chacun des points échantillonnés. Les limites de ces polygones sont équidistantes par rapport aux différents points. Ensuite, la taille du voisinage du point dont on cherche la valeur est circonscrit et superposé aux aires d'influence délimitées par les polygones. La valeur du point à interpoler est obtenue en effectuant la moyenne de ses valeurs voisines pondérées par l'aire qu'elles occupent dans l'environnement proximal. La résolution détaillée de l'échantillonnage sur le terrain et la variabilité spatiale des changements topographiques à cette échelle permettent d'estimer les valeurs à interpoler à partir de cette méthode principalement parce que la densité des points varie sur la section échantillonnée. L'utilisation d'une grande densité de points d'échantillonnage est essentielle pour appliquer la méthode d'interpolation par voisinage simple qui a tendance à donner une apparence plus lisse à la surface. Des *cartes-contours* sont ensuite construites en établissant un regroupement zonal des mesures obtenues à partir des différentes cartes interpolées. Cette transformation met visuellement en évidence les formes du lit. Elle permet de distinguer plus aisément les différentes échelles de rugosité. Enfin, la pente du chenal est retirée de chacune des cartes produites de manière à ne pas sous-estimer la présence des obstacles du lit dans les portions aval des sections d'étude.

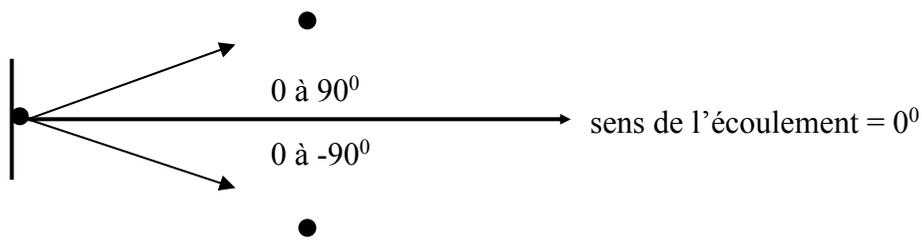
La cartographie d'élément ponctuel permet de faire directement l'analyse spatiale de la distribution des obstacles présents à la surface du lit. Seulement, pour les cartes détaillées réalisées sur la rivière Eaton Nord l'exercice est plus complexe. Il faut extraire visuellement les éléments de rugosité à partir des cartes topographiques. Pour être

identifiée comme étant un obstacle à l'écoulement, la hauteur de la zone représentant un obstacle observé à partir de la cartographie détaillée doit être supérieure à 10 cm et s'étendre sur une aire supérieure à $0,1 \text{ m}^2$. Les blocs et les amas de galets ne sont pas distincts les uns des autres. On suppose qu'ils ont la même influence sur le comportement de l'écoulement à l'échelle d'une section de cours d'eau. En 1999, nous avons relevé 55 obstacles protubérants à l'écoulement et en 2000, 95 obstacles ont été identifiés. Les critères d'identification et le nombre d'obstacles échantillonnés pour chacune des sections d'étude sont présentés au tableau 3.2.

Différents types d'analyse ont été effectués à partir de la répartition spatiale des éléments de rugosité. La première repose sur l'analyse des plus proches voisins à la surface du lit. Pour déterminer si les éléments de rugosité les plus près prennent une orientation préférentielle à la surface du lit, nous avons réalisé des diagrammes de pourcentage illustrant la relation entre la distance et l'angle entre les obstacles voisins. Le système de référence pour déterminer l'angle que prennent ces éléments de rugosité est fonction de la direction moyenne de l'écoulement qui représente l'axe de zéro degré (figure 3.5a). Les angles sont positifs ou négatifs par rapport à la direction de l'écoulement. Les pourcentages sont calculés en fonction du nombre d'observations qui se trouvent à l'intérieur d'intervalles de distances et d'angles bien spécifiques (figure 3.5b). Des tranches de 30 degrés et des intervalles de distance d'un mètre entre les obstacles plus près ont été choisies. Ces classes permettent de noter la variabilité de l'orientation entre des obstacles voisins en fonction des différents intervalles de distance qui les séparent. Seuls les obstacles voisins séparés par moins de cinq mètres sont présentés. Les diagrammes de pourcentage permettent de bien visualiser l'angle que prennent les obstacles les plus près à la surface du lit en fonction de la direction de l'écoulement et de faire ressortir l'organisation des obstacles dans l'espace. L'orientation et la concentration des particules du lit sont des critères qui permettent de définir la résistance à l'écoulement à l'échelle locale. Les analyses spatiales de plus proches voisins permettent de déterminer dans quelle mesure l'interaction entre les éléments de rugosité protubérants pourraient contribuer à la résistance à l'écoulement à l'échelle de la section de cours d'eau.

Le deuxième type d'analyse permet d'identifier les formes transversales composées d'une série d'éléments de rugosité protubérants à la surface du lit. Les alignements sont identifiés en suivant une approche basée sur des critères d'angles et de distances obtenus à

a)



b)

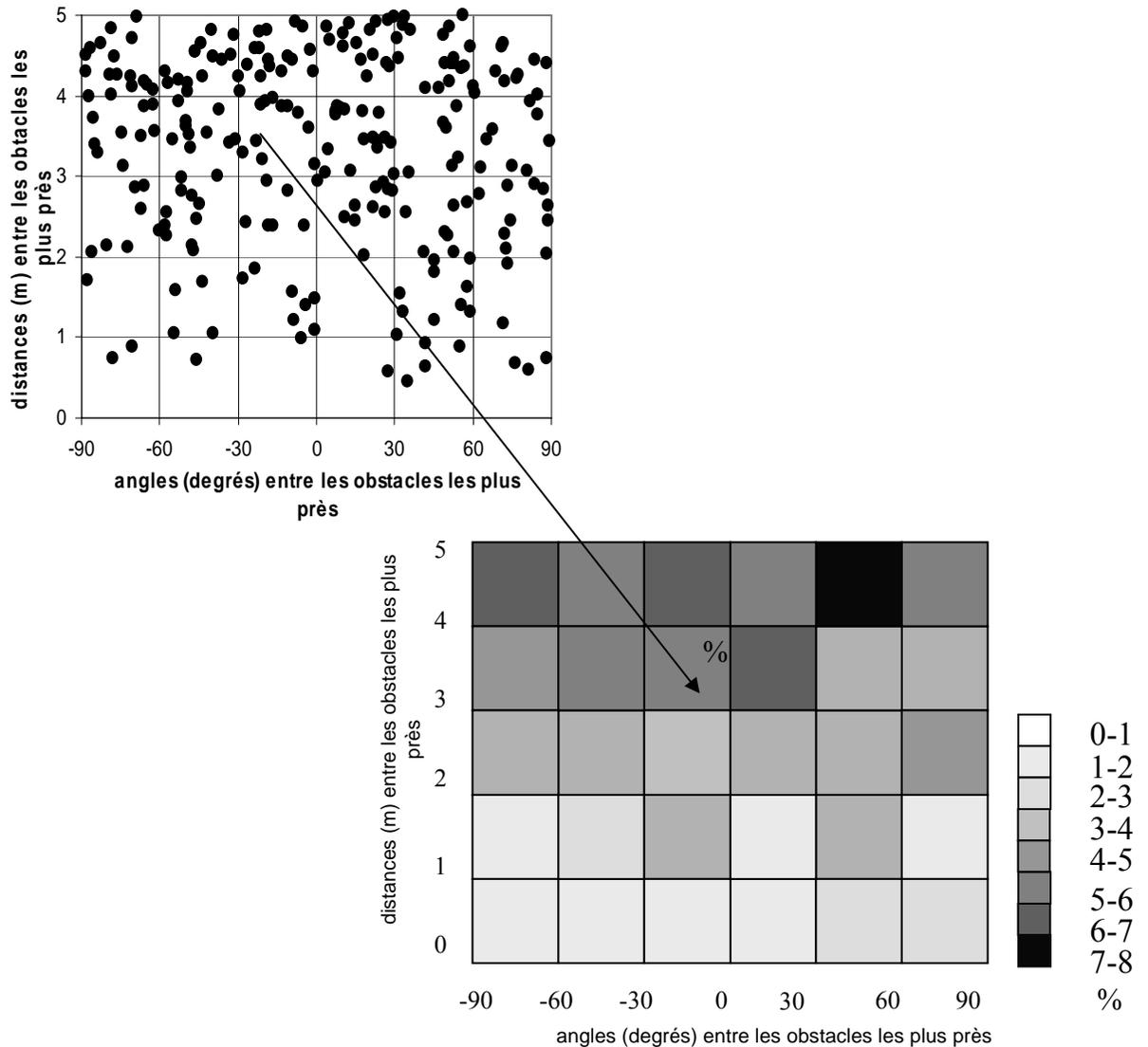


Figure 3.5: a) Système de référence de l'orientation que prennent les obstacles voisins à la surface du lit et b) exemple de diagramme de pourcentages provenant de la relation entre la distance qui sépare les obstacles voisins et l'orientation que prennent ces obstacles par rapport au sens de l'écoulement.

partir de la description des alignements en milieu naturel. À partir d'un obstacle O_i de départ, un alignement peut être identifié si et seulement si l'obstacle qui le suit dans l'écoulement O_{i+1} se situe à une distance inférieure à deux mètres (figure 3.6). À des distances supérieures, les alignements sont scindés en plusieurs parties et leur présence s'estompe à la surface du lit. L'alignement se prolonge dans le cas où 1) l'obstacle O_{i+1} est toujours suivi vers l'aval d'un obstacle O_{i+2} à moins de deux mètres de distance et 2) l'angle entre le segment de départ O_i et O_{i+1} et le segment O_i et O_{i+2} est inférieur à 10 degrés. À ce seuil d'angle, on s'assure que les obstacles se positionnent les uns à l'aval des autres à la surface du lit. Les alignements s'étendent jusqu'au moment où l'on ne peut plus respecter ces critères d'angles et de distances.

3.3) RÉSULTATS

Les résultats se présentent en deux sections. La première montre les caractéristiques qui permettent de conclure sur les types d'organisation morphologique que l'on perçoit dans les cours d'eau à lit de graviers. Nous présentons d'abord des cartes de distribution des éléments de rugosité qui permettent de déterminer les liens entre la profondeur, la taille des sections d'étude et la concentration des obstacles. Les deux analyses suivantes caractérisent les obstacles voisins à la surface du lit. Les distributions des distances qui séparent les obstacles les plus près montrent s'ils se positionnent à des distances privilégiées. Des diagrammes de pourcentage qui illustrent la relation entre ces distances et l'orientation des obstacles voisins permettent d'identifier leur orientation préférentielle en fonction de la taille des sections à l'étude. Enfin, nous avons identifié les caractéristiques des alignements d'éléments de rugosité que l'on retrouve à différentes échelles sur les sections de cours d'eau investiguées. Dans la seconde section, on teste les différents types d'organisation à ceux de distributions aléatoires d'éléments de rugosité. Les distributions aléatoires constituent un modèle de comparaison qui permet de déterminer la nature de l'organisation présente dans les cours d'eau à lit de graviers. Les analyses de plus proches voisins et d'alignements sont reproduites pour ces distributions.

3.3.1) Organisation morphologique du lit en milieux graveleux

3.3.1.1) Concentration des éléments de rugosité à la surface du lit

Les figures 3.7a à 3.10a présentent la variabilité de la densité des obstacles à la surface du lit sur la largeur et sur le profil en long des tronçons de cours d'eau. Les diagrammes de fréquence représentent le nombre d'obstacles moyens pour des tranches

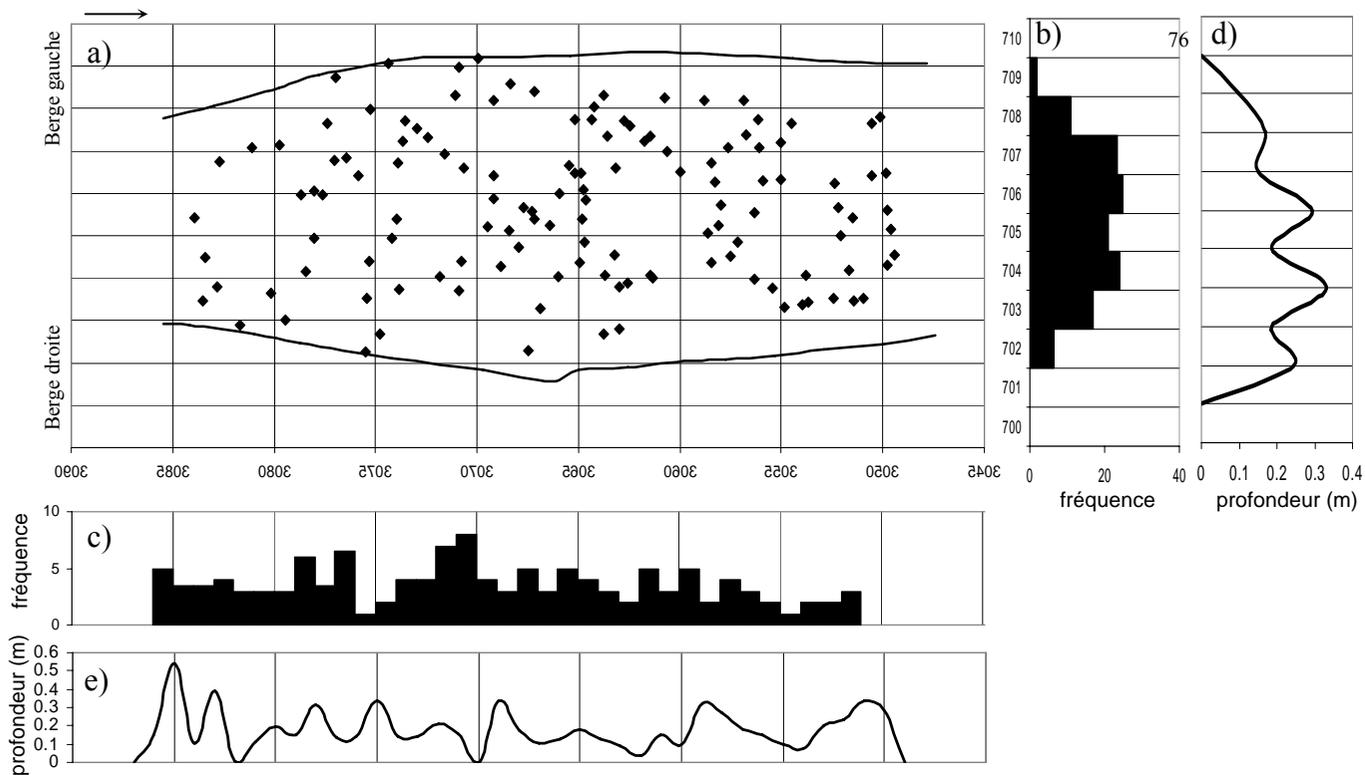


Figure 3.7 : Distribution des obstacles sur le ruisseau Moras : a) répartition des obstacles, b) fréquence des obstacles à une coupe transversale, c) fréquence des obstacles à une coupe longitudinale, d) profondeurs de l'écoulement à une coupe transversale, e) profondeurs de l'écoulement à une coupe longitudinale.

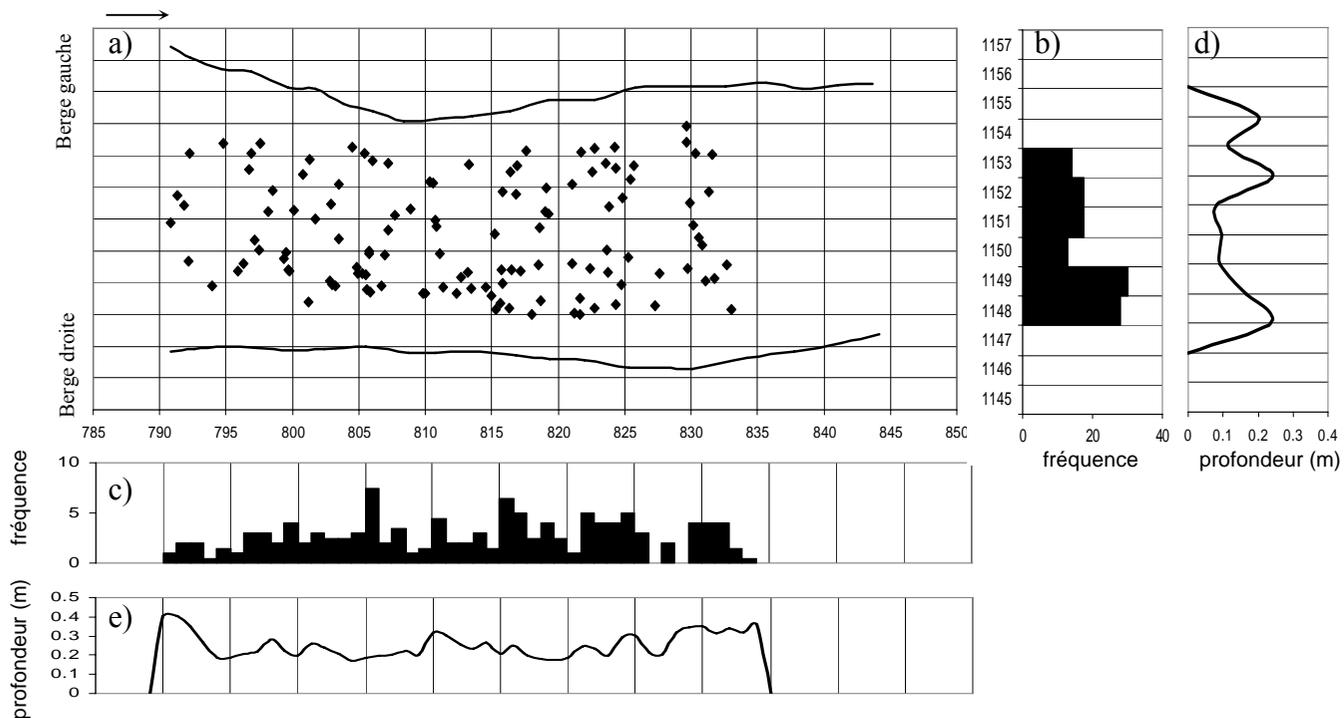


Figure 3.8 : Distribution des obstacles sur le ruisseau Guertin : a) répartition des obstacles, b) fréquence des obstacles à une coupe transversale, c) fréquence des obstacles à une coupe longitudinale, d) profondeurs de l'écoulement à une coupe transversale, e) profondeurs de l'écoulement à une coupe longitudinale.

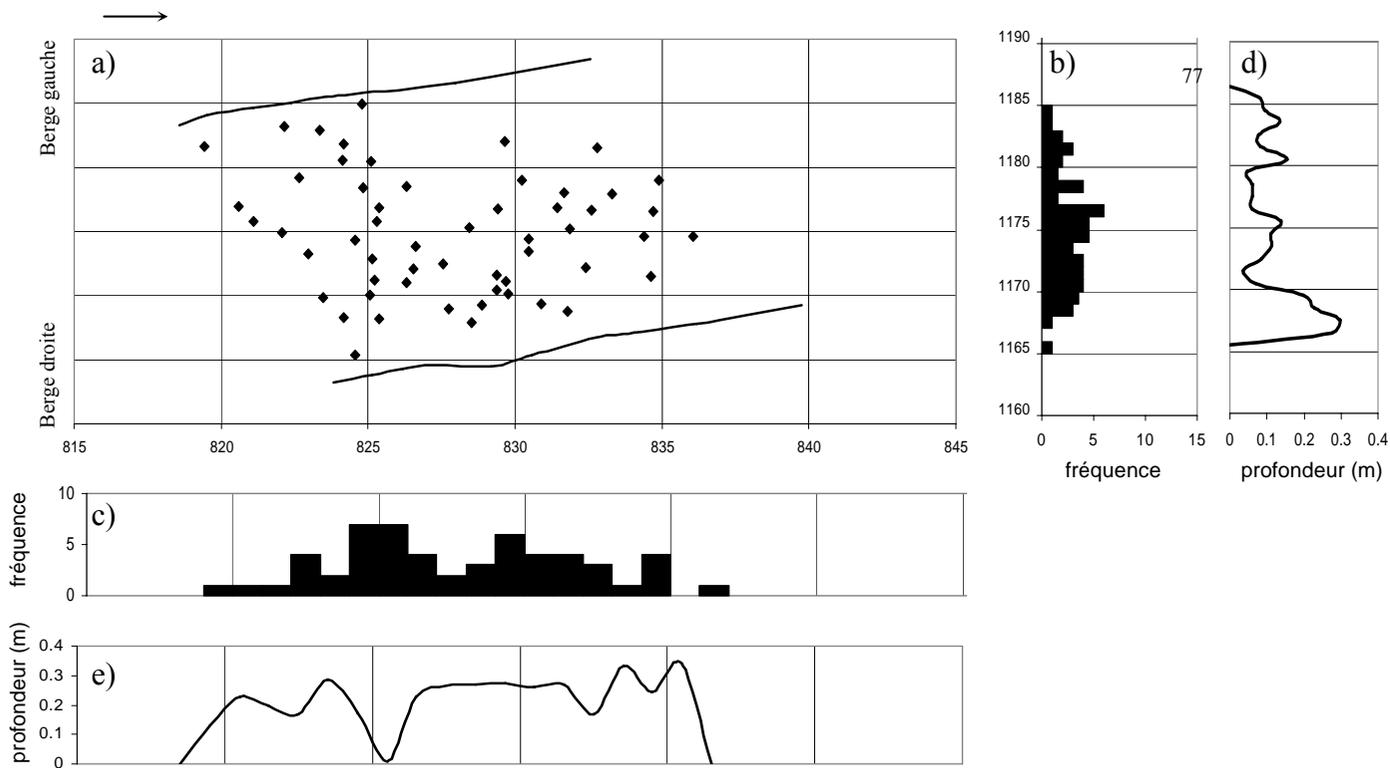


Figure 3.9 : Distribution des obstacles sur la rivière Eaton Nord-1999 : a) répartition des obstacles, b) fréquence des obstacles à une coupe transversale, c) fréquence des obstacles à une coupe longitudinale, d) profondeurs de l'écoulement à une coupe transversale, e) profondeurs de l'écoulement à une coupe longitudinale.

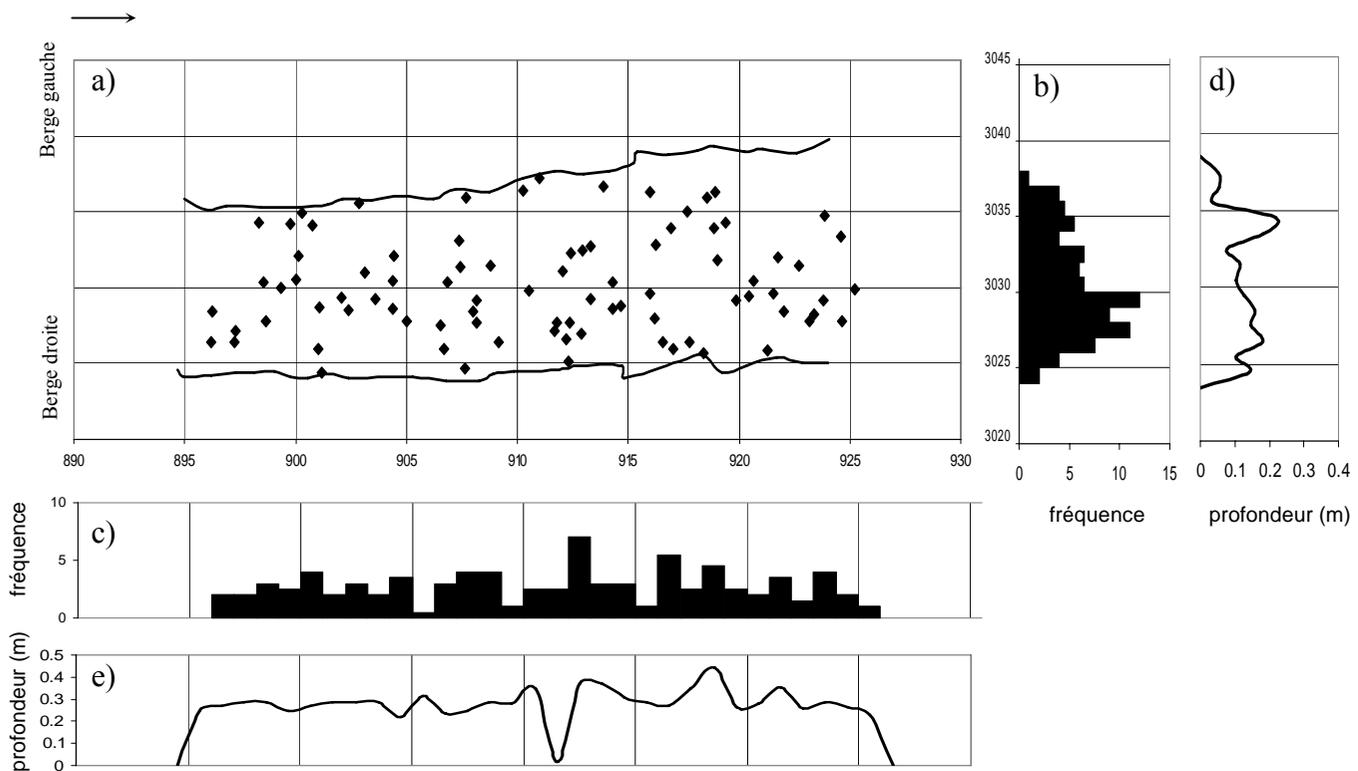


Figure 3.10 : Distribution des obstacles sur la rivière Eaton Nord-2000 : a) répartition des obstacles, b) fréquence des obstacles à une coupe transversale, c) fréquence des obstacles à une coupe longitudinale, d) profondeurs de l'écoulement à une coupe transversale, e) profondeurs de l'écoulement à une coupe longitudinale.

d'un mètre dans l'écoulement. Ces tranches sont d'abord le résultat de plusieurs coupes longitudinales (figure 3.7b à 3.10b). Elles représentent la concentration moyenne des obstacles et expriment leur variabilité d'une rive à l'autre du tronçon de cours d'eau. Les tranches sont ensuite associées à des coupes transversales et permettent d'identifier les changements du nombre d'obstacles de l'amont vers l'aval (figure 3.7c à 3.10c). Les diagrammes de fréquence font ressortir des zones d'accumulation en alternance avec des zones où les éléments de rugosité sont presque absents. Les intervalles entre ces zones sont étudiés en détail. Les profondeurs de l'écoulement (figure 3.7d à 3.10d), qui caractérisent l'épaisseur de la tranche d'eau, sont associées à chacun des diagrammes de fréquences. Les profondeurs sont le résultat de la hauteur de la surface de l'eau moins les élévations topographiques de la surface du lit à l'étiage.

Sur les deux ruisseaux dont la largeur est inférieure à 10 m, les distributions de fréquence latérale des obstacles sont différentes. Sur le ruisseau Moras, les fréquences les plus élevées se retrouvent au centre du chenal. Le pourcentage des obstacles s'élève jusqu'à 72% pour l'intervalle de quatre mètres qui représente la portion centrale du cours d'eau. La variabilité du nombre d'obstacles pour une tranche d'un mètre de la surface du lit est liée aux changements de profondeurs de l'écoulement. En fait, tant au centre du chenal que près des berges, l'augmentation des fréquences d'obstacles est associée à de légères augmentations de profondeur d'eau ($\approx 0,10$ m). Les zones où il y a une plus grande quantité d'obstacles sur le ruisseau Guertin se positionnent près des berges, particulièrement près de la berge droite. La proportion d'obstacles qui se positionnent jusqu'à deux mètres de cette rive est de 50%. Les tranches où l'on observe une augmentation du nombre d'obstacles apparaissent pour les profondeurs les plus importantes de l'écoulement. Les concentrations d'obstacles sur une coupe transversale pour ces cours d'eau de petite taille sont donc plus importantes pour des profondeurs élevées peu importe si ces fluctuations sont observées au centre du chenal ou près des berges.

Les figures 3.9b et 3.10b des fréquences latérales d'obstacles échantillonnés sur la Eaton Nord illustrent que les zones de densité d'obstacles les plus élevées se retrouvent dans la portion centrale du chenal. En 1999, c'est sur la portion près de la rive droite que les concentrations d'obstacles sont en général plus importantes que la moyenne. Les distributions du nombre maximal d'obstacles sont aussi légèrement décalées vers la rive

droite en 2000. Les concentrations maximales comprenant 50% de la distribution totale se situent à l'intérieur d'un intervalle de quatre mètres à une distance de deux mètres de la rive droite. Pour les deux sections, les fluctuations du nombre d'obstacles sont inversement liées aux fluctuations des profondeurs de l'écoulement. Les portions de la surface du lit qui montrent les plus fortes densités d'obstacles s'associent à des profondeurs inférieures à 15 cm.

La distribution longitudinale des obstacles pour tous les sites d'échantillonnage décrit des fluctuations pour lesquelles on observe des intervalles évidents de distance où il y a très peu d'obstacles à la surface du lit. On identifie les sections où le nombre d'obstacles est inférieur à la fréquence moyenne des obstacles pour l'ensemble de la coupe longitudinale. La distance moyenne entre ces sections permet d'identifier les intervalles de distance pour lesquels on observe peu d'éléments de rugosité à la surface du lit. Ces intervalles sont similaires peu importe la méthode d'échantillonnage et la taille des sections d'étude. Sur le ruisseau Moras, les fréquences d'obstacles diminuent en moyenne à tous les 4,6 m vers l'aval. À cet intervalle, on observe des zones où il y a une absence ou une diminution prononcée d'obstacles à la surface du lit. Ces zones prennent place à des profondeurs supérieures à la moyenne. La variabilité du nombre d'obstacles est directement associée aux fluctuations des profondeurs de l'écoulement. Dans le cas où les fluctuations de ces variables ne sont pas exactement coordonnées, les zones de faibles densités d'obstacles précèdent d'environ un mètre celles de profondeurs plus importantes. Les portions du chenal où le nombre d'obstacles est plus important que la moyenne peuvent aussi être décalées soit vers l'amont ou soit vers l'aval. Sur le ruisseau Guertin, les fréquences d'obstacles inférieures aux fréquences moyennes apparaissent pour des intervalles moyens de distance de 4,1 m vers l'aval. La distribution des fréquences d'obstacles sur la Eaton Nord-1999 est semblable à celle des ruisseaux. En effet, l'intervalle entre les plus faibles fréquences d'obstacle à la surface du lit reste près de 4 mètres. Cet intervalle diminue à 3,1 m pour les obstacles échantillonnés en 2000. Pour cette campagne, les valeurs maximales d'obstacles apparaissent environ un mètre à l'aval des zones de profondeurs plus faibles.

Les caractéristiques morphologiques des sections de cours d'eau ne semblent pas intervenir de façon marquée sur la répartition des obstacles dans l'écoulement. La distribution des obstacles sur la largeur des tronçons de cours d'eau est semblable pour

tous les sites d'étude. On observe généralement une augmentation du nombre d'obstacles à la surface du lit de la berge gauche vers le centre du chenal alors qu'à un ou à deux mètres des berges leur fréquence d'apparition est moins importante sauf dans le cas du ruisseau Guertin. Longitudinalement, les distributions de fréquence des formes du lit montrent plus de fluctuations à l'échelle d'une dizaine de mètres. Les zones où l'on note l'absence de particules apparaissent à des distances qui varient entre approximativement trois ou quatre mètres. Les sections où le nombre d'obstacles est plus important que la moyenne varient avec les profondeurs de l'écoulement. Les faibles profondeurs d'écoulement sont associées à l'augmentation du nombre d'obstacles.

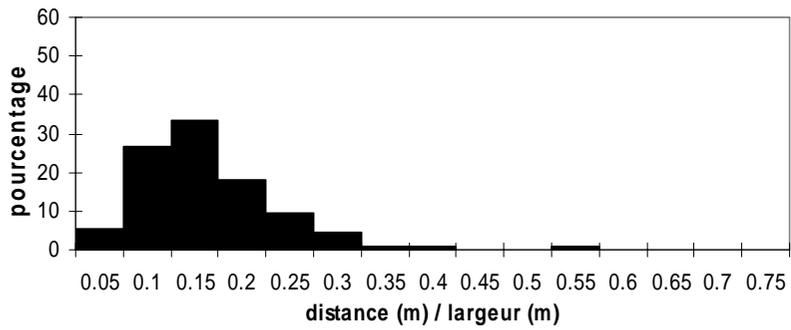
3.3.1.2) Distribution des obstacles les plus près.

Les figures 3.11 a) à d) présentent les distributions de distance entre les obstacles les plus près à la surface du lit pour toutes les sections d'étude. À chacun des obstacles est associée la distance qui le sépare de son plus proche voisin vers l'aval. Les distributions et les caractéristiques de ces distributions de distance sont présentées pour chacune des sections et normalisées par la largeur des cours d'eau.

La forme des histogrammes et les caractéristiques descriptives moyennes sont très similaires entre les cours d'eau de même taille particulièrement en ce qui concerne les valeurs moyennes et le mode des distributions. En fait, pour les ruisseaux Moras et Guertin, les moyennes de distance entre les obstacles voisins sont respectivement de 0,139 et 0,189 fois la largeur des cours d'eau. Dans 50% des cas, la distance entre les obstacles les plus près à la surface du lit est supérieure à 0,09 fois la largeur. Sur la Eaton Nord, les moyennes augmentent jusqu'à 0,193 et 0,156 fois la largeur des sections de rivière pour les campagnes 1999 et 2000. Les modes sont aussi très semblables. L'intervalle où le nombre de distances entre obstacles voisins est le plus fréquent est, pour toutes les sections, entre 0,1 et 0,15 fois la largeur du cours d'eau exception faite de la section Eaton Nord-1999 où l'intervalle est plus faible, soit entre 0,05 et 0,1 fois. Un obstacle a donc une distance de positionnement privilégiée avec son voisin qui le précède à la surface du lit. Cette distance est fonction de la largeur des sections à l'étude.

Les distances minimales et maximales qui séparent les obstacles proximaux sont aussi particulièrement semblables entre les cours d'eau de même taille. Sur les ruisseaux Moras et Guertin, les obstacles se trouvent rarement à l'aval d'un autre pour des intervalles

a)

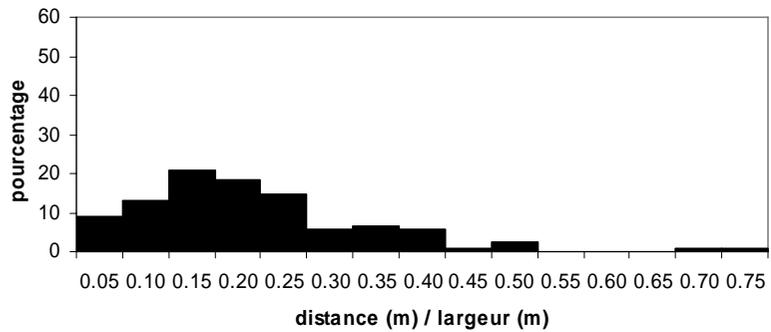


Moyenne : 0,139

Mode : 0,1-0,15

Coefficient d'asymétrie : 1,56

b)

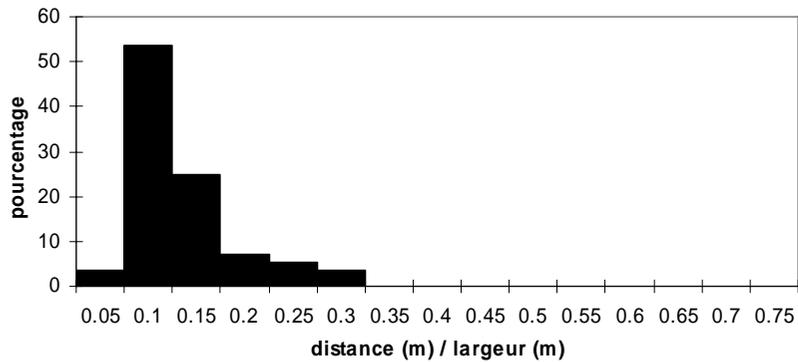


Moyenne : 0,189

Mode : 0,1-0,15

Coefficient d'asymétrie : 1,46

c)

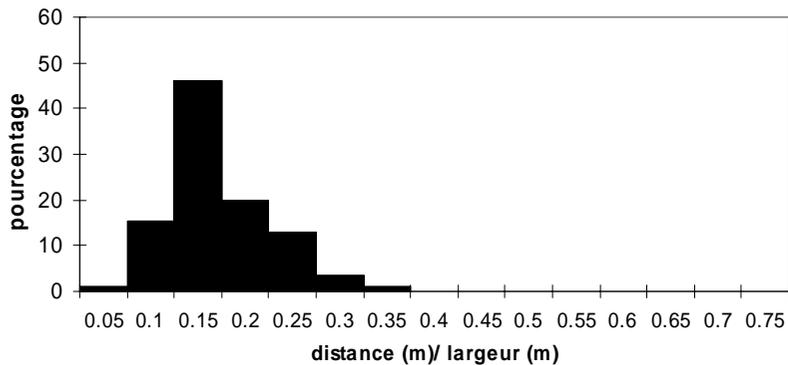


Moyenne : 0,193

Mode : 0,05-0,1

Coefficient d'asymétrie : 2,30

d)



Moyenne : 0,156

Mode : 0,1-0,15

Coefficient d'asymétrie : 0,89

Figure 3.11 : Distribution des distances entre les obstacles les plus près : a) ruisseau Moras, b) ruisseau Guertin, c) Eaton Nord-1999, d) Eaton Nord-2000.

de distance entre 0 et 0,05 fois la largeur du cours d'eau. En fait, à l'intérieur de cette classe on retrouve aussi peu qu'entre 5% et 9% des distances observées. La distance maximale entre les obstacles les plus près à la surface du lit varie entre 0,55 et 0,75 fois la largeur du cours d'eau. Cet intervalle correspond aux distances où l'on observe l'absence d'obstacles à la surface du lit à partir des diagrammes longitudinaux de fréquence présentés précédemment. Pour les deux campagnes effectuées sur la Eaton Nord, l'intervalle de distance minimale entre les obstacles les plus près est aussi de 0 à 0,05 fois la largeur du cours d'eau. Cette classe contient les plus faibles fréquences associées à la distance qui sépare deux obstacles voisins à la surface du lit. La distance maximale entre les obstacles voisins est de 0,35 fois la largeur, distance pour laquelle on retrouve moins de 6% des valeurs de distance pour chacune des distributions.

3.3.1.3) Relation entre la distance des obstacles les plus près et l'angle que prennent ces obstacles à la surface du lit.

La relation entre les distances et l'angle entre les éléments de rugosité voisins les plus près à la surface du lit est illustrée dans les diagrammes de pourcentage présentés aux figures 3.12 a à d. Sur le ruisseau Moras, le nombre d'observations augmente pour les distances plus éloignées entre des obstacles voisins à la surface du lit. Il est effectivement plus rare d'apercevoir un obstacle qui se positionne directement à l'aval d'un autre à des distances inférieures à un mètre. La grande majorité des obstacles voisins est séparée par des distances plus importantes soit de 3, 4 ou 5 mètres. De plus, on observe que lorsque la distance augmente entre les obstacles les plus près, ces derniers ont tendance à prendre une orientation qui montre de faibles angles avec le sens de l'écoulement. Les éléments de rugosité voisins s'orientent moins fréquemment de façon perpendiculaire avec le sens de l'écoulement. Enfin, on observe que très peu de paires d'obstacles dont l'angle est supérieur à 30 degrés et ce, peu importe la distance entre ces obstacles. La distribution des pourcentages sur le ruisseau Guertin se présente de la même façon. En effet, l'orientation préférentielle des obstacles indépendamment de la distance proximale qui les sépare est de ± 30 degrés. Cette orientation est particulièrement évidente pour des distances supérieures à deux mètres. Plus la distance proximale entre les obstacles est élevée, plus le pourcentage de faibles angles entre ces obstacles et l'écoulement augmente. Les paires d'obstacles s'orientent alors dans le sens de l'écoulement. Lorsque la distance entre les obstacles est inférieure à deux mètres l'orientation préférentielle des éléments de rugosité à la surface du

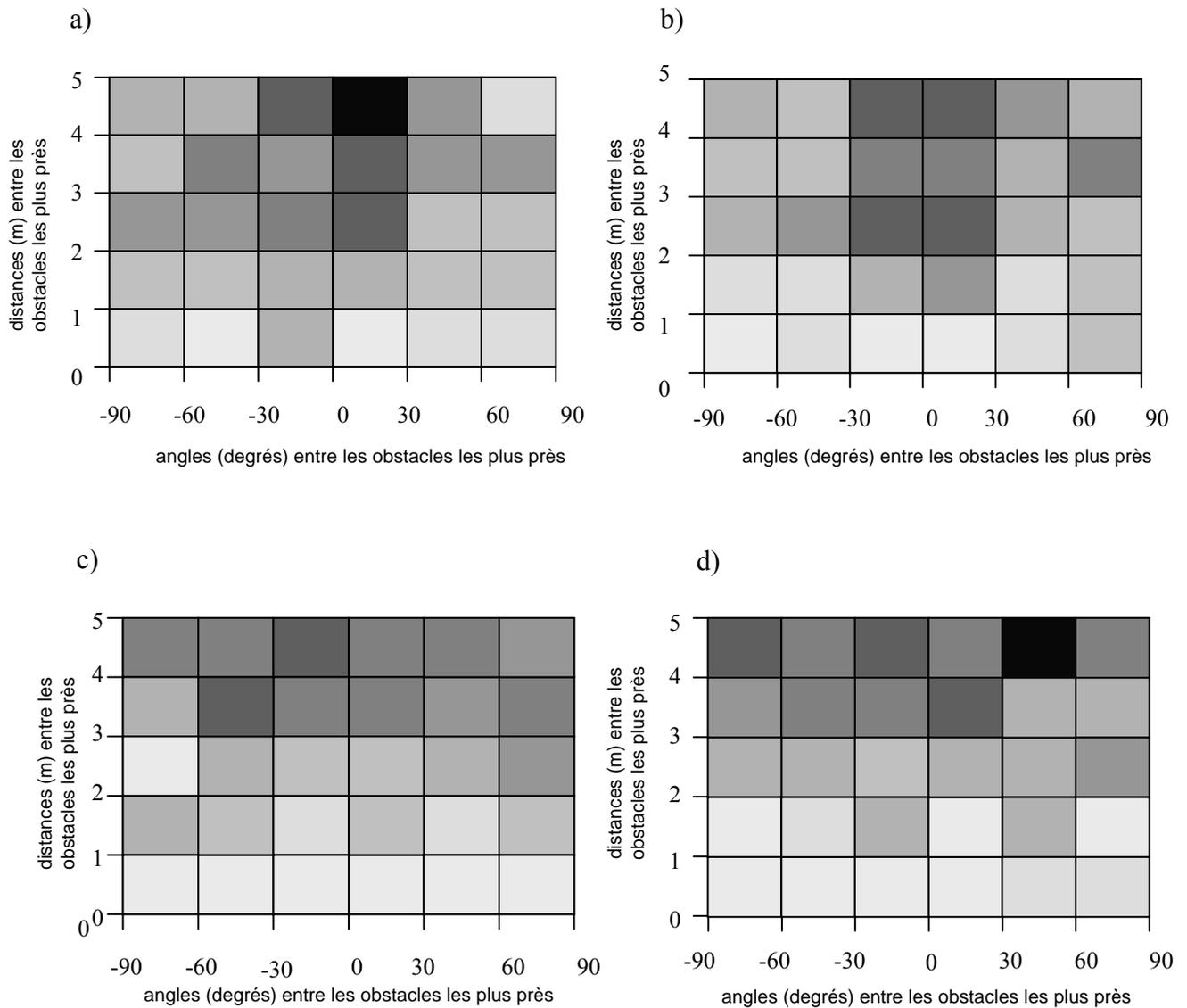


Figure 3.12: Distribution en pourcentage de la distance d'obstacles voisins en fonction de l'angle que prennent les obstacles par rapport au sens de l'écoulement : a) ruisseau Moras, b) ruisseau Guertin, c) Eaton Nord-1999, d) Eaton Nord-2000.

lit est moins évidente. En fait, les pourcentages sont très faibles et les angles variables pour les éléments de rugosité qui se trouvent très près les uns des autres.

Pour les diagrammes associés aux campagnes effectuées sur la Eaton Nord, les pourcentages sont plus diffus que ceux que l'on observe pour les deux ruisseaux. En effet, les zones dominantes sont plus difficiles à extraire. Les diagrammes permettent d'abord de noter qu'effectivement il y a toujours peu d'observations pour les distances de un ou deux mètres entre des obstacles voisins. À cet intervalle de distance, on ne note aucune orientation préférentielle des obstacles les plus près. Les pourcentages varient de 0% à 4% pour toutes les classes d'angles présentées et pour les obstacles voisins qui sont séparés par une distance de 0 à 2 m. Les voisins pour lesquels on observe une forte proximité prennent alors des orientations très variables avec le sens de l'écoulement. Un obstacle peut donc se positionner à l'aval d'un autre mais aussi directement à côté vers l'une ou l'autre des berges tout en respectant les seuils de proximité tel que précédemment illustrés par les diagrammes de fréquence des distances entre les obstacles les plus près. Les obstacles voisins pour lesquels les distances sont plus élevées sont beaucoup plus nombreux. Les obstacles voisins qui se positionnent à des distances plus importantes les uns des autres ont tendance à prendre une orientation plus spécifique avec le sens de l'écoulement. Un plus grand nombre d'éléments de rugosité dont les distances d'éloignement sont supérieures à trois mètres ont un angle entre -60 et 60 degrés. Ils peuvent former une diagonale avec le sens de l'écoulement. Par ailleurs, les patrons d'organisation d'angles et ce, même pour des distances qui augmentent, sont difficiles à percevoir notamment à cause des faibles pourcentages que l'on retrouve sur un grand éventail de possibilités d'angles.

3.3.1.4) Alignement des éléments de rugosité protubérants

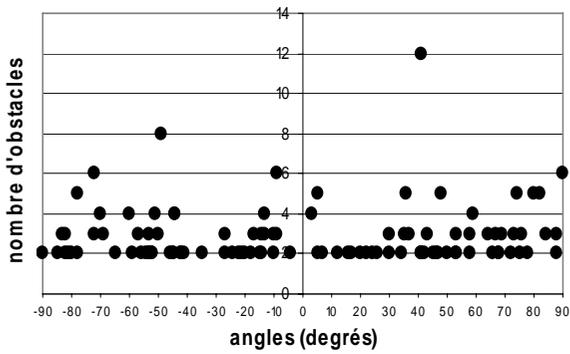
À la surface du lit, les principaux éléments de rugosité ont tendance à s'organiser en plan sous différentes formes que nous examinons à partir des cartes morphologiques du lit. Les obstacles forment des alignements qui occupent différentes parties du chenal, qui prennent diverses orientations et qui peuvent s'étendre sur des distances variables. Ces patrons d'organisation sont perceptibles sur l'ensemble de nos sections d'étude et apparaissent peu importe le nombre d'obstacles échantillonnés dans une section.

Les alignements existent à plusieurs échelles de rugosité. En fait, sur le ruisseau Moras, les alignements sont en moyenne composés de trois éléments de rugosité (tableau

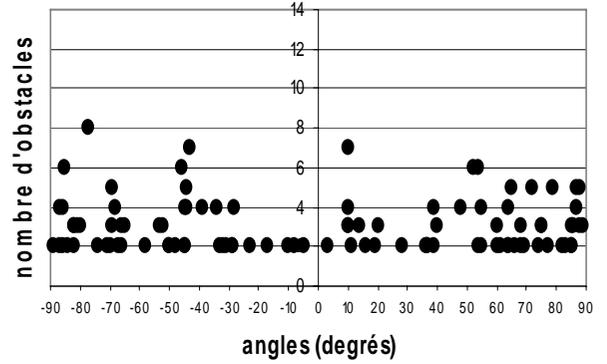
3.3). Ce nombre peut atteindre jusqu'à 12 pour l'alignement le plus long. Seulement, les alignements composés de plus de six obstacles ne représentent que 4% de l'ensemble des alignements identifiés. Ces derniers traversent le chenal d'une rive à l'autre avec un angle variant entre 40 et 50 degrés par rapport au sens de l'écoulement (figure 3.13a). D'autres alignements, plus nombreux, existent mais ils sont composés de deux, trois ou quatre éléments de rugosité. L'orientation de ces petits alignements varie considérablement selon leur emplacement dans la section d'étude. Sur le Ruisseau Guertin, les alignements qui traversent le chenal d'une rive à l'autre ont une orientation qui devient presque perpendiculaire avec le sens de l'écoulement (figure 3.13b) et sont composés au maximum de huit obstacles. Les alignements composés de plus de six obstacles représentent toujours qu'une faible proportion de l'ensemble des alignements soit 7% mais ils occupent, tout comme ceux du ruisseau Moras, une portion considérable de la surface du lit compte tenu de la taille des tronçons de cours d'eau investigués (tableau 3.3).

Les alignements que l'on peut observer sur la Eaton Nord sont moins bien développés. Ils sont caractérisés par un faible nombre d'éléments de rugosité. Pour chacune des campagnes, aucun alignement n'est composé de plus de cinq obstacles selon les critères utilisés (tableau 3.3). En moyenne, les alignements sont composés d'une suite consécutive de deux ou trois obstacles. Ces petits alignements sont composés de particules qui ne sont pas particulièrement imbriquées les unes avec les autres. Aussi, à partir de ce nombre, il est difficile d'identifier que les suites de particules constituent de réels alignements tels qu'observés par Jong et Ergenzinger (1995). La distance moyenne entre les obstacles qui se succèdent dans l'écoulement est plus importante pour les alignements qui sont composés d'un petit nombre d'obstacles (figure 3.14). Lorsque les alignements sont composés de plusieurs éléments de rugosité, la distance entre ces obstacles est limitée par la largeur des cours d'eau. Ainsi, la moyenne des distances entre quatre ou cinq obstacles formant un alignement est inférieure à 1,35 m et ces alignements sont plus faciles à identifier. Pour la campagne effectuée en 1999, l'orientation de l'alignement le plus long est de -80 degrés. Il traverse le chenal de la rive gauche vers la droite avec un angle très accentué par rapport au sens de l'écoulement (figure 3.13c). Sur la Eaton Nord-2000, l'orientation de l'alignement le plus long est de 60 degrés (figure 3.13d). Les alignements de deux ou trois particules prennent des orientations variables à la surface du lit pour chacune des campagnes.

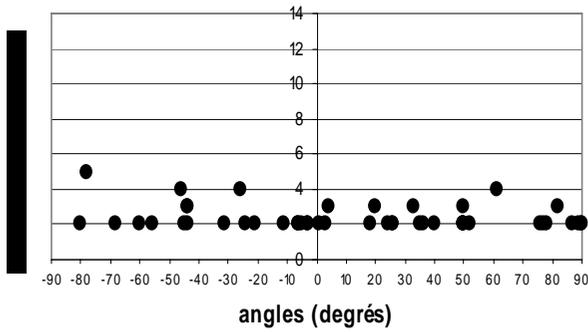
a)



b)



c)



d)

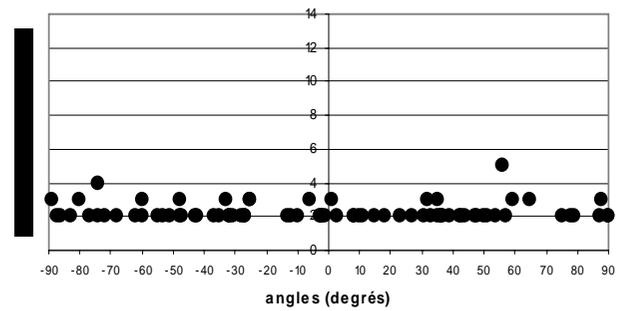


Figure 3.13 : Relation entre le nombre d'éléments de rugosité dans un alignement et l'orientation de l'alignement avec l'écoulement: a) ruisseau Moras b) ruisseau Guertin, c) Eaton Nord-1999, d) Eaton Nord-2000.

	ruisseau Moras	ruisseau Guertin	Eaton Nord - 1999	Eaton Nord-2000
Nombre moyen d'éléments de rugosité par alignement	3	3	2,3	2,2
Nombre maximal d'éléments par alignement	12	8	5	5
Pourcentage d'alignement composé de plus de 6 éléments	4	7	0	0

Tableau 3.3 : Principales caractéristiques des alignements observés sur le ruisseau Moras, ruisseau Guertin, Eaton Nord-1999 et Eaton Nord-2000.

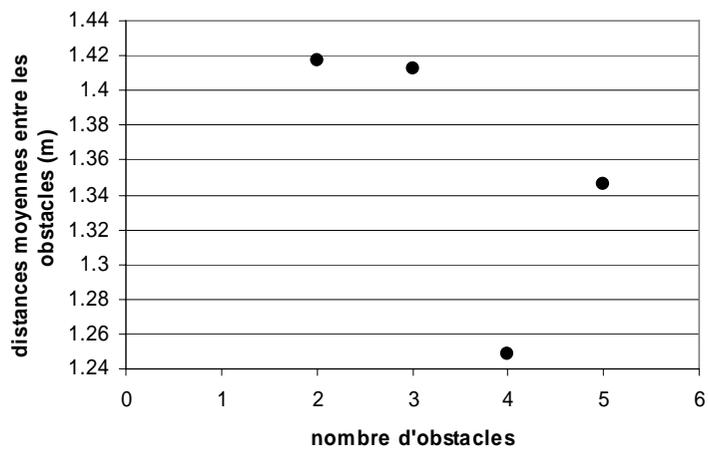


Figure 3.14 : Relation entre le nombre d'obstacles dans un alignement et la distance moyenne entre chacun des obstacles qui forment les alignements pour les campagnes effectuées sur la Eaton Nord 1999 et 2000.

3.3.2) Comparaison avec des distributions aléatoires d'obstacles

3.3.2.1) Distance entre les obstacles les plus près

Les distributions aléatoires de distance entre les obstacles les plus près sont présentées et comparées à celles des distributions réelles afin de tester la présence d'organisation dans les éléments de rugosité en milieu naturel. Nous avons généré 1000 distributions aléatoires d'obstacles pour quatre tailles de cours d'eau. Les bornes de ces distributions correspondent à la largeur et à la longueur des sections échantillonnées sur le terrain. Pour chacune des sections nous présentons les distributions moyennes des distances entre les plus proches voisins et les écarts-types pour chacune des classes de distances. La forme des distributions est semblable à celle présentée pour les distributions réelles et ce, particulièrement pour les cours d'eau de petites tailles et où le nombre d'obstacles à la surface du lit est plus important. Nous avons testé la qualité d'ajustement entre les distributions réelles et les distributions aléatoires à l'aide du test de conformité de Khi-carré.

Sur les ruisseaux Moras et Guertin, les distributions réelles sont conformes aux distributions aléatoires d'éléments de rugosité. À un seuil de signification $\alpha=5\%$ et des degrés de liberté respectifs de $v=4$ et $v=6$, les valeurs observées du χ^2 sont égales à 6,125 et 10,041. Ces valeurs sont toutes deux inférieures aux valeurs critiques. Les observations réelles sont donc similaires à celles obtenues à partir de distributions aléatoires. Les principales différences que l'on observe avec les distributions aléatoires d'obstacles se retrouvent pour les plus faibles et les plus fortes distances entre les obstacles voisins (figure 3.15a et 3.15b). En fait, la proportion des distances que l'on observe dans les classes inférieures, entre 0 et 0,05 fois la largeur du cours d'eau, sont 3,3 fois plus importantes pour les distributions aléatoires d'obstacles que pour les distributions du ruisseau Moras et 0,1 fois plus importante que pour les distributions du ruisseau Guertin. Les distributions aléatoires permettent que les obstacles se positionnent fréquemment à l'aval d'un autre pour des distances très courtes alors que pour les distributions réelles des deux ruisseaux, peu de distances se trouvent dans ces classes. La proximité des obstacles à la surface du lit semble limitée par la taille des éléments de rugosité ou l'étendue des amas de galets.

Sur des distributions aléatoires d'obstacles, on observe aussi des différences sur les distances maximales entre des obstacles voisins par rapport aux distributions des ruisseaux.

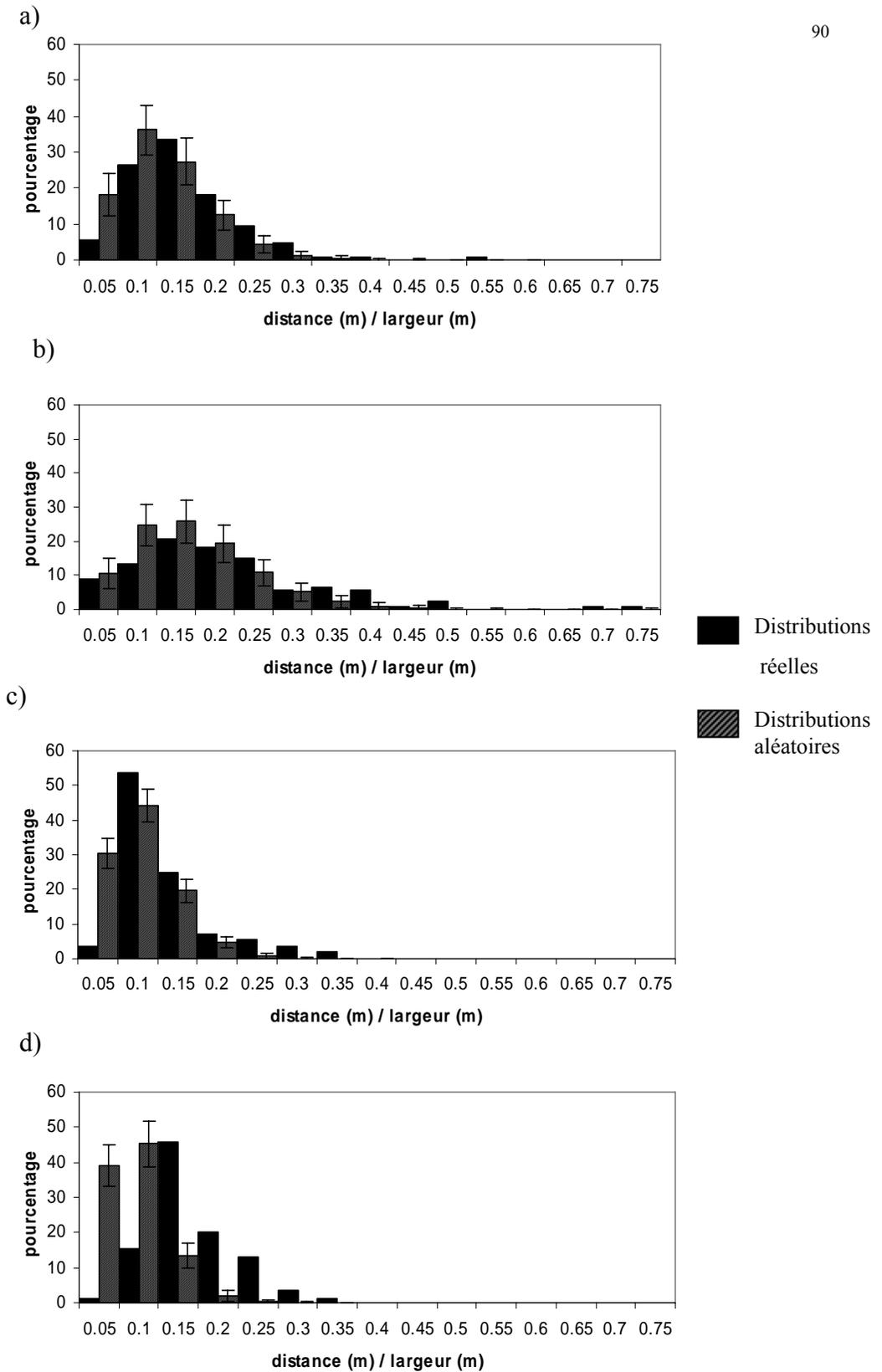


Figure 3.15 : Distribution des distances entre les obstacles les plus près et erreur-type de chacune des classes de distance pour les distributions aléatoires: a) ruisseau Moras, b) ruisseau Guertin, c) Eaton Nord-1999, d) Eaton Nord-2000.

À partir du mode de chacune des distributions aléatoires, les fréquences de distance diminuent progressivement pour des classes qui reflètent des distances plus élevées. Par contre, on observe plusieurs fluctuations pour les distributions réelles d'obstacles. Sur les deux ruisseaux, on observe aussi que les distances maximales entre les obstacles voisins sont plus grandes que pour les distributions aléatoires. En fait, la distance entre les obstacles les plus près peut s'élever jusqu'à 0,55 fois la largeur du cours d'eau pour le ruisseau Moras et 0,75 fois la largeur pour le ruisseau Guertin.

La similarité entre les distributions aléatoires de distances et celles réalisées à partir des campagnes sur la Eaton Nord est plus difficile à observer. Seule la distribution réelle échantillonnée en 2000 est similaire à la distribution aléatoire des éléments de rugosité à un seuil de signification $\alpha=5\%$ et à un degré de liberté $\nu=2$. La valeur de χ^2 observée est inférieure à la valeur critique. Pour les deux campagnes les formes de chacune des distributions restent semblables dans la mesure où elle montre une asymétrie positive (figure 3.15c et 3.15d). Seulement, les caractéristiques descriptives moyennes des distributions peuvent varier. En fait, le mode des distributions aléatoires d'éléments de rugosité diffère de celui des distributions de distances réelles. De plus, les pourcentages qui représentent les intervalles de faibles distances entre les obstacles voisins sont plus importants pour les distributions aléatoires d'obstacles. Le pourcentage de distances entre 0 et 0,05 fois la profondeur du cours d'eau sont 7,6 fois et 33 fois moins grand sur la Eaton Nord-1999 et 2000 respectivement que sur les distributions aléatoires de distance entre les obstacles voisins. Sur la Eaton Nord-2000, les pourcentages sont aussi beaucoup plus élevés pour des distances qui varient entre 0,1 et 0,15 fois la largeur du cours d'eau. Enfin, le pourcentage d'obstacles pour des intervalles qui représentent de grandes distances entre les obstacles les plus près est plus grand pour les distributions d'obstacles sur les campagnes de la Eaton Nord que pour les distributions aléatoires d'éléments de rugosité.

3.3.2.2) Relation angle et plus proche voisin

La relation entre les angles et les distances qui séparent les éléments de rugosité les plus près à la surface du lit a été effectuée pour une distribution aléatoire dont la taille d'échantillon correspond à chacune des distributions récoltées en milieu naturel. Les liens qui existent entre l'orientation d'éléments de rugosité voisins par rapport au sens de l'écoulement et la distance qui les sépare vers l'aval sont présentés de la même façon que

pour les distributions réelles d'obstacles. À l'aide de diagramme de pourcentage, nous illustrons l'orientation préférentielle de deux obstacles proximaux en fonction de la distance à laquelle un premier obstacle se positionne d'un second plus à l'aval. Les diagrammes correspondant à chacune des sections d'étude sont présentés dans les figures 3.16a à 3.16d.

Sur les distributions aléatoires du ruisseau Moras et Guertin, on retrouve qu'un très faible pourcentage d'observations pour des distances inférieures à deux mètres. À ces distances, on n'observe aucune orientation préférentielle des obstacles voisins par rapport au sens de l'écoulement. En effet, les angles que forment ces paires d'obstacles avec l'écoulement sont très variables et pour aucune classe d'angle spécifique on observe une augmentation significative des pourcentages. Les pourcentages les plus élevés apparaissent pour des distances plus grandes. À des intervalles de distance supérieure à deux mètres, les pourcentages augmentent légèrement pour des angles de ± 30 degrés. Les obstacles les plus éloignés ont tendance à s'orienter dans le sens de l'écoulement. Ces observations sont semblables à celles des distributions réelles notamment en ce qui concerne les pourcentages d'observations qui se trouvent pour des distances inférieures à deux mètres (figure 3.12). En effet, le nombre de voisins qui se positionnent très près les uns des autres est peu élevé et ils n'ont pas d'orientation préférentielle à la surface du lit. Ce nombre augmente pour des distances plus éloignées. Le cas échéant, on observe que les pourcentages sont souvent plus importants pour des angles entre -30 et 30 degrés avec le sens de l'écoulement.

À partir des distributions aléatoires générées pour la Eaton Nord-1999 et 2000, la répartition des pourcentages est assurément moins structurée. En fait, on retrouve toujours des faibles pourcentages pour les obstacles voisins qui se positionnent dans un environnement très proximal mais l'orientation que prennent les obstacles est variable et ce, pour toutes les distances inférieures à 5 m. Pour des distances supérieures à deux mètres on n'observe aucune orientation préférentielle. Par contre, on peut noter l'existence de petits corridors pour lesquels les pourcentages augmentent de 2 ou 3 %. Par exemple, pour la distribution aléatoire d'obstacles de la rivière Eaton Nord-1999, on remarque que pour des distances entre deux et trois mètres, le nombre d'obstacles voisins est plus important pour des angles entre 0 et 60 degrés.

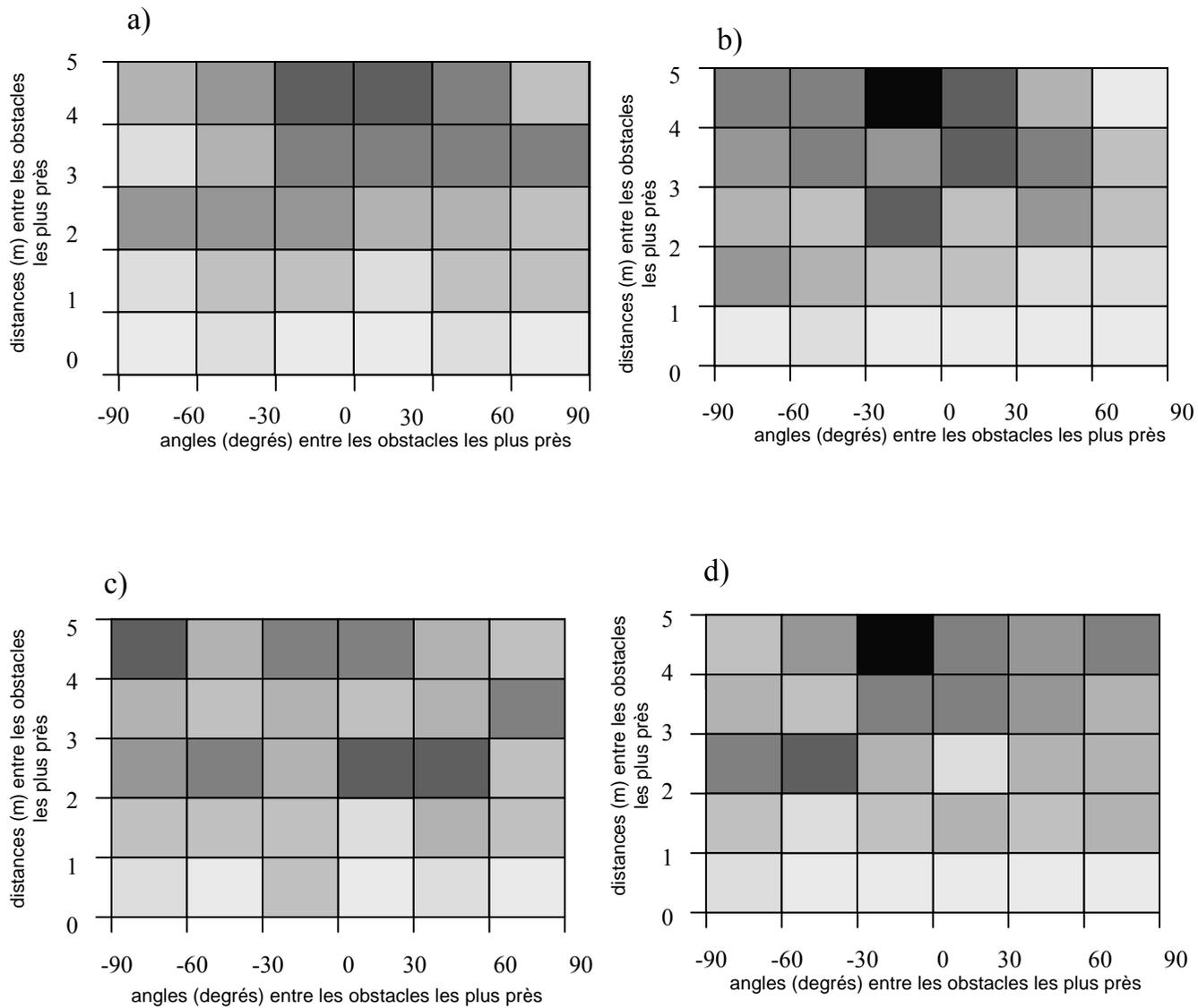


Figure 3.16: Distribution en pourcentage de la distance d'obstacles voisins en fonction de l'angle que prennent les obstacles par rapport au sens de l'écoulement pour des distributions aléatoires: a) ruisseau Moras, b) ruisseau Guertin, c) Eaton Nord-1999, d) Eaton Nord-2000.

Pour la Eaton Nord, peu importe que les distributions soient aléatoires ou naturelles, les patrons d'organisation sont plus difficiles à identifier à partir des diagrammes de pourcentage. En fait, l'orientation que prennent les obstacles les plus près n'est pas fonction de la distance entre ces derniers et pour une distance donnée on observe rarement une orientation préférentielle des obstacles à la surface du lit. La taille du cours d'eau et le nombre d'obstacles jouent un rôle important sur la détection d'organisation morphologique dans l'espace. L'augmentation de la taille de la section jumelée à une diminution du nombre d'obstacles à la surface du lit rendent l'identification de patrons d'organisation plus complexe.

3.3.2.3) Alignement des éléments de rugosité protubérants

Nous avons identifié les principaux alignements formés à partir des distributions aléatoires d'éléments de rugosité. Les critères d'identification sont les mêmes que ceux présentés précédemment. Ils permettent de localiser une suite d'obstacles qui se succèdent de l'amont vers l'aval à la surface du lit. Les caractéristiques de ces organisations sont présentées et comparées à celles des distributions réelles des quatre sections échantillonnées en milieu naturel.

Les alignements identifiés sur les distributions aléatoires d'obstacles ayant les caractéristiques du ruisseau Moras sont en moyenne composés d'une série de trois obstacles (tableau 3.4). Les alignements les plus longs prennent une orientation pratiquement perpendiculaire avec le sens de l'écoulement. Ils traversent le chenal d'une rive à l'autre de la berge gauche vers la berge droite ou vice versa (figure 3.17a). Les alignements qui sont composés d'un plus petit nombre d'obstacles, soit entre deux et cinq, ont une orientation très variable.

Sur les distributions aléatoires d'obstacles du ruisseau Guertin, les alignements ont des caractéristiques similaires à celles que l'on observe sur les distributions aléatoires du ruisseau Moras. En effet, les alignements se composent en moyenne de trois obstacles (tableau 3.4). Ces petits alignements n'ont pas d'orientation préférentielle. Ils prennent un éventail d'angles et comme ils forment 50 % de l'ensemble de la distribution du nombre d'obstacles par alignement, ils occupent une grande partie de la surface du lit. Le pourcentage d'alignements composés de plus de six obstacles est de 6,1%. Les alignements

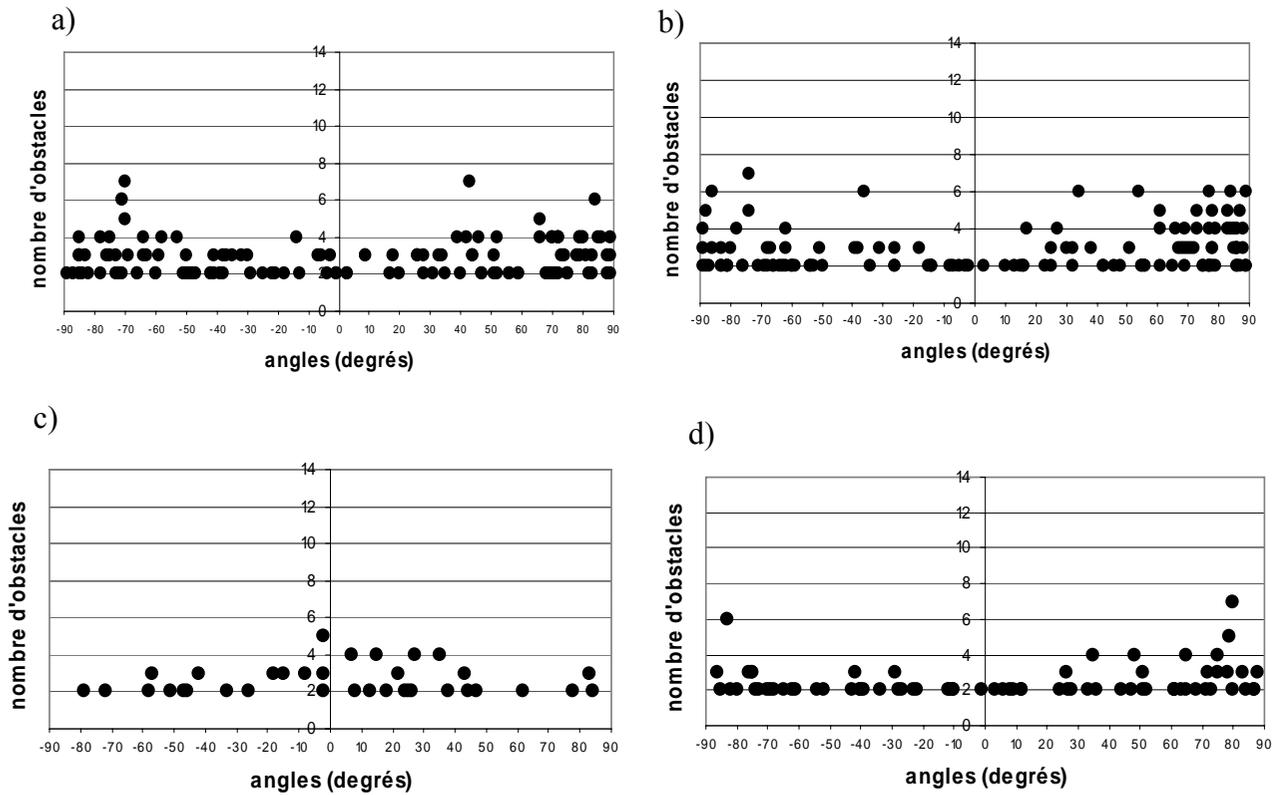


Figure 3.17 : Relation entre le nombre d'éléments de rugosité dans un alignement et l'orientation de l'alignement avec l'écoulement pour des distributions aléatoires: a) ruisseau Moras b) ruisseau Guertin, c) Eaton Nord-1999, d) Eaton Nord-2000.

	ruisseau Moras	ruisseau Guertin	Eaton Nord - 1999	Eaton Nord- 2000
Nombre moyen d'éléments de rugosité par alignement	3	3	3	3
Nombre maximale d'éléments par alignement	7	7	5	7
Pourcentage d'alignement composé de plus de 6 éléments	4,0	6,1	0	2,8

Tableau 3.4 : Principales caractéristiques des alignements observés à partir des distributions aléatoires : a) le ruisseau Moras, b) ruisseau Guertin, c) Eaton Nord-1999 et d) Eaton Nord-2000.

les plus longs contiennent six ou sept obstacles et ont un angle supérieur à 30^0 ou inférieur à -30^0 (figure 3.17b).

Les alignements observés à partir des distributions aléatoires ont des caractéristiques similaires aux alignements identifiés à partir des distributions réelles. Pour les ruisseaux, le nombre moyen d'obstacles, le pourcentage d'alignements composés de plus de six obstacles ainsi que l'orientation des alignements qui comprennent plusieurs éléments de rugosité donnent des valeurs semblables pour les deux types de distribution.

Les distributions de distances aléatoires d'obstacles réalisées pour la Eaton Nord 1999 et 2000 montrent peu de particularités qui les distinguent l'une de l'autre. Les alignements formés sont en moyenne composés d'une série de trois obstacles (tableau 3.4). Ces petits alignements n'ont pas d'orientation préférentielle. Les différences entre les caractéristiques des distributions s'observent en ce qui a trait aux pourcentages d'alignement composé de plus de six obstacles ainsi qu'à l'orientation que prennent les alignements les plus longs. Sur la Eaton Nord-1999, aucun alignement n'est composé de plus de six obstacles. L'alignement le plus long de cinq obstacles s'oriente avec le sens de l'écoulement à un angle de moins de cinq degrés (figure 3.17c). L'orientation devient plus perpendiculaire avec le sens de l'écoulement pour la distribution générée à partir de la campagne de la Eaton Nord-2000 (figure 3.17d). Pour cette distribution, l'angle de l'alignement formé de sept obstacles est de 60 degrés avec le sens de l'écoulement et le pourcentage d'alignement composé de plus de six obstacles est 2,8%.

Les formes et les caractéristiques des distributions aléatoires sont semblables à celles des distributions réelles d'obstacles et ce, pour les deux campagnes effectuées sur Eaton Nord. Les alignements sont composés en moyenne du même nombre d'obstacles et les pourcentages d'alignements composés de plus de six obstacles sont dans tous les cas inférieurs à 2,8 %. Les alignements les plus petits n'ont pas d'orientation préférentielle à la surface du lit alors que les alignements les plus longs ne sont pas composés de plus de sept obstacles.

3.4) DISCUSSION

À l'échelle de la section de cours d'eau plusieurs conclusions sont similaires entre les distributions d'éléments de rugosité. D'abord, la concentration des éléments de rugosité à la surface du lit est fonction de la variabilité des profondeurs de l'écoulement sur les quatre sections échantillonnées en milieu naturel. Sur les cours d'eau de petite taille, la fréquence latérale d'obstacle augmente avec les profondeurs. Pour les sections où la largeur est plus importante l'augmentation du nombre d'obstacles est associée à une diminution de l'épaisseur de la tranche d'eau. Seulement, pour toutes les distributions réelles, les portions du chenal où l'on observe une diminution importante du nombre d'éléments de rugosité longitudinalement dans l'espace se trouvent pour des intervalles moyens de distances entre 3 et 4,6 mètres et sont associées à une augmentation des profondeurs de l'écoulement.

Ensuite, les distances préférentielles du positionnement d'un élément de rugosité sont identiques entre les distributions réelles et les distributions aléatoires. Ces distances sont égales à 0,1 fois la largeur des cours d'eau. L'identification de cette organisation préférentielle ne fait pas intervenir des facteurs externes au système d'obstacles, ces facteurs n'étant pas impliqués dans les distributions aléatoires des éléments de rugosité. Aussi, l'angle que prennent les paires d'obstacles avec l'écoulement est en général, pour chacun des types de distribution, lié à la distance qui les sépare. Les éléments de rugosité qui se positionnent à de petites distances les uns des autres ont une orientation très variable et ceux qui sont séparés par des distances plus importantes ont tendance à s'orienter dans le sens de l'écoulement. En fait, plus la distance augmente entre les éléments de rugosité, plus l'orientation que les paires d'obstacles prennent avec le sens de l'écoulement est limitée par la taille de la section de cours d'eau.

La caractérisation des alignements nous a permis d'observer que le nombre d'éléments de rugosité qui les compose contribue à leur orientation préférentielle en fonction de leur longueur totale à la surface du lit. Les alignements les plus longs s'orientent perpendiculairement à l'écoulement. Cette orientation préférentielle des alignements avait déjà été identifiée par Johansson (1963). Par contre, le nombre d'éléments de rugosité qui compose les alignements est relativement inférieur à ce qu'avait proposé McDonald et Banerjee (1971). En effet, sur les distributions réelles et aléatoires

d'éléments de rugosité, les alignements ne sont formés en moyenne que de trois obstacles. Le pourcentage d'alignements composé de plus de six obstacles est plus élevé sur les ruisseaux que sur la Eaton Nord pour les deux types de distribution.

La taille des sections et le nombre d'éléments de rugosité dans les distributions réelles et les distributions aléatoires ont une influence sur les caractéristiques d'organisation que l'on perçoit à partir des différentes analyses. En fait, l'organisation est plus complexe à identifier lorsque les obstacles sont moins nombreux et lorsque la taille de la section est plus grande. Les analyses de plus proche voisin permettent de constater qu'il est plus difficile d'identifier une distance et une orientation préférentielle entre deux éléments de rugosité voisins à la surface du lit. Aussi, les alignements semblent moins bien développés sur les deux sections échantillonnées sur la rivière Eaton Nord. Le pourcentage d'alignement composé d'un plus grand nombre d'éléments de rugosité est inférieur à la moyenne dans les cours d'eau dont la taille est supérieure à 10 mètres.

Quelles que soient les méthodes d'échantillonnage des formes du lit et que les distributions soient aléatoires ou non, les caractéristiques qui définissent l'organisation des formes à la surface du lit sont similaires et ce, particulièrement pour les cours d'eau de même dimension. Les distributions de distance entre les plus proches voisins, la relation entre cette distance et l'angle que forment ces paires d'obstacles avec l'écoulement et les caractéristiques qui définissent les alignements se manifestent, à quelques différences près, de la même façon pour l'ensemble des distributions d'éléments de rugosité. On peut alors croire que la distribution des éléments de rugosité à la surface du lit est aléatoire et que l'organisation que l'on perçoit à la surface du lit n'est qu'apparente. Cette interprétation est contraire à celle présentée par Hassan et Reid (1990) où la distribution des éléments de rugosité n'est pas ubiquiste dans l'espace. Les auteurs observent que le nombre d'amas de galets augmente dans les sections plus étroites du cours d'eau.

Des différences apparaissent cependant au niveau de la distance minimale que l'on peut observer entre deux obstacles. En fait, pour les distributions aléatoires d'obstacles, il est plus fréquent d'observer des obstacles qui se positionnent très près les uns des autres que pour les distributions réelles. La proximité des obstacles à la surface du lit en milieu naturel devrait particulièrement être influencée par la taille des obstacles. Ces caractéristiques ne sont pas prises en compte dans les distributions aléatoires et n'ont pas

été quantifiées sur les sections de rivières en milieu naturel. L'influence de la morphologie des obstacles sur leur organisation proximale n'est donc que spéculative mais elle permettrait d'expliquer une part de la variabilité entre les distributions aléatoires et les distributions réelles.

Puisqu'on observe des changements dans la concentration des éléments de rugosité en fonction des profondeurs de l'écoulement et différents types d'organisation identifiés autant à partir de distributions réelles qu'à partir de distributions aléatoires d'obstacles, nous proposons en discussion une interprétation dynamique qui permet d'intégrer ces deux observations et notamment d'expliquer comment et dans quelle mesure se mettent en place ces différentes structures d'organisation. En fait, l'accumulation première de particules et par la suite l'arrangement de ces particules à la surface du lit se ferait en deux temps distincts et en fonction de différents facteurs qui n'interagissent pas de la même façon sur le positionnement des obstacles à l'échelle d'une section de rivière.

On stipule d'abord qu'à de forts débits presque toutes les particules du lit sont en mouvement. Aux périodes de décrue, les obstacles grossiers se mettent en place à des endroits préférentiels à la surface du lit. La diminution des forces de traction permet le dépôt des premiers éléments de rugosité. Sur les cours d'eau qui montrent de faibles gradients de pente et des changements peu fréquents de profondeur, les obstacles ont tendance à se positionner dans des sections moins profondes du cours d'eau où le ralentissement des vitesses se fait d'abord sentir. Si on observe plus de variabilité dans les profondeurs de l'écoulement sur la section d'étude, les obstacles grossiers peuvent se positionner à des profondeurs plus importantes. Dans chacun des cas, l'accumulation des obstacles protubérants est liée à la variabilité topographique du lit à l'échelle du tronçon de cours d'eau.

Ensuite, le positionnement des obstacles subséquents, peu importe leur taille, est fonction des obstacles déjà présents à la surface du lit. Les obstacles s'organisent à petite échelle dans la mesure où le système qu'ils forment à la surface du lit n'est régi que par les caractéristiques des obstacles protubérants, celles des obstacles qui éventuellement se joignent à eux ainsi qu'aux limites du système soit la taille du cours d'eau. En fait, l'organisation des obstacles ne fait plus appel aux forces extérieures et la profondeur du cours d'eau par exemple, ne joue plus un rôle important dans le positionnement local des

particules. Ce sont les obstacles même qui conditionnent leur emplacement en modifiant la structure de l'écoulement en fonction de leur nombre et de leurs caractéristiques dimensionnelles. Par exemple, les probabilités qu'une particule se positionnent directement à l'aval d'un autre diffèrent en fonction de la taille des obstacles qui se déposent à la surface du lit. À l'échelle du centimètre, les obstacles modifient l'écoulement notamment en permettant la naissance de zones de recirculation et permettent le dépôt de particules plus fines directement à l'aval de l'obstacle. Seulement, les particules plus grossières peuvent entrer en collision avec les obstacles déjà en place et dans ce cas, elles se déposent rarement dans cette zone. Leur positionnement est plus fréquent à l'amont d'obstacles qui en agissant comme barrière limitent leur déplacement vers l'aval. À une échelle un peu plus importante, une accumulation de particules permet un ralentissement des vitesses de l'écoulement qui à son tour participent à la formation d'un environnement privilégié pour l'accumulation d'obstacles. Les éléments de rugosité se positionnent alors localement en fonction des interactions qui existent entre eux.

Le positionnement des obstacles à la surface du lit est donc associé en partie aux profondeurs de l'écoulement et, subséquentement, à l'interaction entre les particules à la surface du lit. Il est essentiel de déterminer à partir de quel moment l'organisation des obstacles n'est plus fonction des caractéristiques morphologiques du cours d'eau mais bien de l'interaction entre les obstacles afin de bien comprendre l'organisation apparente des formes du lit. Même si les interactions entre les obstacles modifient leur probabilité de positionnement, il n'en demeure pas moins que l'organisation résultante à l'échelle de la section de cours d'eau est sensiblement la même pour les distributions aléatoires que pour les distributions réelles et que peu de particularités les distinguent.

Il existe un contrôle de la position des éléments de rugosité à l'échelle des particules mais ce contrôle ne se manifeste pas sur l'organisation apparente des obstacles à l'échelle d'une section de cours d'eau notamment, en ce qui concerne les types d'organisation qui sont représentés par plusieurs éléments de rugosité. La formation des structures d'organisation plus importante comme la formation des alignements est aléatoire et leur développement est uniquement limité par la taille de la section de cours d'eau et le nombre d'éléments de rugosité disponibles à la surface du lit.

Les mécanismes qui mettent en place ces organisations morphologiques sont alors difficiles à évaluer et nécessitent la prise en compte d'autres facteurs associés aux éléments protubérants notamment leurs caractéristiques dimensionnelles. De plus, les vitesses de l'écoulement doivent être investiguées de manière à mieux comprendre leur impact sur l'organisation des formes du lit. Dans un contexte dynamique de transport des sédiments, les étapes de formation des alignements par exemple pourraient alors permettre de mieux comprendre l'organisation apparente des formes du lit dans les cours d'eau à lit de graviers.

3.5) Conclusion

Les méthodes d'identification des formes du lit que nous avons développées à partir de différentes stratégies d'échantillonnage sur le terrain sont efficaces pour représenter et mieux comprendre l'organisation des formes du lit à l'échelle d'un tronçon de cours d'eau. La cartographie ponctuelle des formes du lit et la cartographie détaillée de la topographie permettent de localiser les éléments de rugosité protubérants à l'écoulement, de déterminer comment les obstacles se positionnent les uns par rapport aux autres et enfin de quelle manière ils s'organisent dans un tronçon de rivière. Ces méthodes se prêtent à plusieurs types d'analyses et sont assurément moins complexes que les méthodes de photogrammétrie des éléments de rugosité utilisées dans le passé (Ibbenken et Schleyer, 1986 ; Jong et Ergenzinger, 1995 ; Church *et al.*, 1998).

Nous avons identifié les principales caractéristiques des manifestations de l'organisation des formes du lit dans les cours d'eau à lit de graviers. Nous observons d'abord qu'à la surface du lit les éléments de rugosité ont tendance à se concentrer dans certaines portions du chenal. L'augmentation du nombre d'obstacles sur une coupe longitudinale des sections d'étude est associée à de faibles profondeurs de l'écoulement ou à des changements brusques d'élévation de la surface du lit. Ensuite, nous avons identifié que les éléments de rugosité se positionnent à une distance privilégiée égale à environ 0,1 fois la largeur des cours d'eau. Aussi, les diagrammes de pourcentage indiquent qu'on observe beaucoup plus de variabilité dans l'orientation des obstacles voisins qui se positionnent à des distances inférieures à deux mètres. À des distances supérieures, les obstacles ont tendance à s'orienter dans le sens de l'écoulement. Enfin, les alignements constituent la principale organisation dans les cours d'eau à lit de graviers. Nous avons

déterminé les caractéristiques moyennes de ces alignements pour chacun des tronçons investigués. Les alignements sont en moyenne composés d'une série de trois éléments de rugosité. Peu d'alignements sont formés de plus de six éléments contrairement à ce qui est présenté dans la littérature.

La concentration des obstacles, les distances en les obstacles voisins, l'orientation qu'ils prennent avec l'écoulement et l'identification des alignements décrivent la morphologie du lit à l'échelle d'une section de cours d'eau. La comparaison de ces observations avec celles provenant de distributions aléatoires d'obstacles permettent de proposer certaines interprétations qui contribuent à mieux comprendre l'organisation apparente des formes du lit. Le positionnement des éléments de rugosité protubérants à la surface du lit serait alors d'abord fonction des changements topographiques et des profondeurs de l'écoulement. La localisation des éléments subséquents serait ensuite liée aux caractéristiques mêmes des obstacles qui se positionnent déjà à la surface du lit et limitée par la taille du chenal.

L'organisation que l'on perçoit à travers les différentes distributions d'échantillonnage reste importante parce qu'elle assure une certaine stabilité du lit en retardant la mise en transport des particules. Le regroupement d'obstacles permet une augmentation des forces de friction et une imbrication des particules qui limitent la disponibilité du matériel à être transporté lors d'un événement de fort débit. Aussi, les formes du lit sont le reflet de l'écoulement dans leur environnement proximal. En effet, à petite échelle les obstacles modifient les caractéristiques moyennes des vitesses de l'écoulement et permettent la formation de structures turbulentes. Par contre, à l'échelle de la section de cours d'eau, les différents types d'organisation observés apparaissent aussi pour des distributions aléatoires d'obstacles. Les facteurs qui contrôlent leur position et leur formation sont alors plus difficiles à prévoir. Il n'en demeure pas moins que ces différents types d'organisation pourraient expliquer une part de la variabilité spatiale des caractéristiques de l'écoulement sur une section de cours d'eau. La description de l'organisation morphologique du lit doit donc être investiguée plus longuement afin de bien connaître son influence sur l'écoulement. L'identification des principales formes du lit pourrait alors permettre une meilleure compréhension de la variabilité de la rugosité du lit et de la résistance, contribuer à des estimations adéquates de vitesses de l'écoulement et être intégrée dans les équations de transport des sédiments.

Enfin, d'autres types d'arrangements structuraux peuvent être étudiés de façon systématique. En effet, la présence des structures en diamants, circulaires et en arc de cercle n'a pas encore été testée à partir de distributions aléatoires d'obstacles. Les facteurs qui contrôlent leur positionnement dans un tronçon de cours d'eau sont peu connus. Par contre, leur effet sur la variabilité spatiale des caractéristiques morphologiques du lit n'est pas négligeable. Ces types d'arrangement circonscrivent la présence de zones où l'on observe l'absence de particules et d'autres où la concentration des obstacles à la surface du lit est plus importante. Ces zones transforment la topographie du lit et interviennent sur la naissance des formes, l'écoulement et le transport des sédiments.

4) RÔLE DE LA MORPHOLOGIE DU LIT SUR LA VARIABILITÉ SPATIALE DE L'ÉCOULEMENT À L'ÉCHELLE D'UN TRONÇON DE COURS D'EAU EN MILIEU GRAVELEUX

4.1) INTRODUCTION

L'agencement des particules qui composent la surface du lit des cours d'eau en milieu graveleux influence la résistance à l'écoulement à plusieurs échelles (Dietrich et Whiting, 1989). Les grains (Bathurst, 1978), les microformes du lit (Brayshaw, 1985; Naden et Brayshaw, 1987; Chin, 1999) et les grandes ondulations topographiques telles que les séquences seuil-mouille (Clifford, 1993; Sear, 1996) interviennent sur la structure de l'écoulement. Les paramètres qui décrivent les mesures de rugosité pour estimer les vitesses dans les équations de mise en transport des sédiments doivent donc tenir compte de la taille des particules mais aussi de leur agencement et de leur organisation à l'échelle d'une section de cours d'eau.

Des estimations adéquates des vitesses de l'écoulement effectuées à partir d'observations sur la morphologie du lit permettraient de calculer les taux de transport et d'érosion rapidement (Smart, 1999). Plusieurs de ces estimations ont été réalisées dans des canaux expérimentaux rectangulaires où le cisaillement est constant sur toute la section d'étude (Clifford *et al.*, 1992). Elles ont été appliquées pour des systèmes où l'on observe un faible ratio entre la taille des particules et la profondeur de l'écoulement (Wiberg et Smith, 1991). Or, en milieu graveleux la variabilité des profondeurs et de la rugosité du lit influence la répartition spatiale des valeurs de cisaillement au lit (Dietrich et Whiting, 1989). Les obstacles à l'écoulement sont nombreux, occupent une grande part du chenal et leur agencement produisent des patrons complexes de l'écoulement (Bray, 1982; Brayshaw, 1985; Naden et Brayshaw, 1987; Billi, 1988; Clifford *et al.*, 1999; Buffin-Bélanger et Roy, 1998).

On commence à comprendre l'effet d'un amalgame isolé sur la distribution verticale des vitesses de l'écoulement et des intensités turbulentes. Robert *et al.* (1992, 1996) et Lawless et Robert (2001) ont montré les effets de changements de rugosité sur la structure de l'écoulement. Ils ont observé qu'à l'amont d'un obstacle, les vitesses longitudinales augmentent du lit jusqu'à la surface en suivant une forme logarithmique. On

y observe aussi de faibles intensités turbulentes (Dancey, 2000 ; Tacchie, 2000). Immédiatement à l'aval de l'obstacle, le profil est segmenté en deux parties. Les gradients de vitesses longitudinales sont de plus en plus prononcés et les vitesses de friction s'intensifient. Les vitesses verticales sont fréquemment négatives et les vecteurs se dirigent vers le lit. En présence d'un obstacle, l'intensité turbulente maximale se retrouve à une hauteur au-dessus du lit égale à près de deux fois la hauteur de l'élément de rugosité. Lorsque l'on s'éloigne de l'obstacle, les transitions de rugosité n'ont pratiquement plus d'influence sur la forme logarithmique des profils de vitesse.

L'ensemble de ces travaux fait suite à plusieurs autres réalisés en laboratoire (Acarlar et Smith, 1987 ; Brayshaw, 1983 ; Kirkbride, 1993) où l'écoulement a été décrit en fonction d'un élément de rugosité ponctuel à la surface du lit. Or, sur un tronçon de rivière, les obstacles à l'écoulement prennent différentes organisations spatiales complexe qui jouent un rôle prépondérant sur la structure de l'écoulement (Clifford *et al.*, 1992). On observe notamment la présence d'alignements qui sont composés de plusieurs éléments de rugosité et qui prennent différentes orientations dans le chenal (Johansson, 1963 ; McDonald et Banerjee, 1971 ; Gustavson, 1974 ; Teisseyre, 1977 ; Naden et Brayshaw, 1987 ; Jong et Ergenzinger, 1995). Les blocs et les amas de galets forment aussi des structures circulaires fermées qui stabilisent le lit en retardant la mise en transport des sédiments (Bluck, 1987 ; Tait et Willetts, 1992 ; Ahnert, 1994 ; Church *et al.*, 1998 ; Hassan et Church, 2000). L'influence de la concentration des éléments de rugosité sur l'écoulement a été peu examinée à l'échelle de la section de cours d'eau en raison de la complexité et de la grande variabilité des éléments de rugosité de taille, de géométrie et d'organisation différentes (Dancey, 2000).

Cet article examine comment l'écoulement réagit à la présence de blocs et d'amas de galets qui constituent les principaux éléments morphologiques du lit. Les objectifs de cette étude sont 1) de montrer si la présence des éléments de rugosité joue un rôle important sur la forme de profils de vitesse et d'écart-type récoltés à haute résolution spatiale à l'échelle de la section de cours d'eau, 2) d'examiner si la variabilité spatiale des écarts-types des distributions de vitesse longitudinale, de la hauteur où les vitesses sont nulles et du cisaillement est le reflet des changements de concentration d'éléments morphologiques et enfin 3) de présenter un modèle de prévision de la variabilité spatiale de

l'écoulement en fonction de la taille et de la concentration des éléments morphologiques du lit.

4.2) MÉTHODE

Le site que nous avons retenu est situé sur une section rectiligne de la rivière Eaton Nord, à 180 km au sud-est de Montréal, Québec. Ce cours d'eau à lit de graviers se situe dans la partie amont du bassin-versant de la rivière St-François et s'étend sur une distance de près de 32 km. Le cours d'eau à la section d'étude a une largeur de 22 m. La profondeur moyenne est de 0,30 m lors de l'échantillonnage et la pente de la section d'étude est de 0,005 m. Enfin, la taille médiane des sédiments est égale à 37 mm et le coefficient de tri est de 2,9. Nous avons effectué deux campagnes sur la Eaton Nord. Une première à l'automne 1999 et une seconde à l'été 2000 en augmentant le nombre de profils de vitesse récoltés sur l'ensemble de la section. À une densité spatiale plus élevée, l'estimation de la variabilité spatiale de l'écoulement exprime une plus grande proportion des éléments de rugosité à la surface du lit. Cette seconde campagne permet aussi de valider la méthode d'échantillonnage et les résultats obtenus lors de la première. Les caractéristiques de chacune des campagnes sont présentées au tableau 4.1. Elles ont été menées à des niveaux d'étiage dans la même portion du chenal et ont des stratégies d'échantillonnage semblables malgré quelques modifications apportées en 2000 notamment à propos du montage des courantomètres pour caractériser l'écoulement.

Nous avons réalisé deux types d'échantillonnage pour chacune des campagnes. Une cartographie détaillée de la topographie du lit à haute résolution spatiale est jumelée à un échantillonnage systématique des vitesses de l'écoulement. La cartographie détaillée permet d'extraire les éléments de rugosité protubérants à l'écoulement à l'échelle de la section de cours d'eau. On identifie les principaux obstacles du lit à partir de coupes topographiques longitudinales et d'une description visuelle des cartes morphologiques du lit. Les éléments morphologiques sont ensuite liés à la variabilité spatiale des vitesses de l'écoulement. Comme les vitesses en un point dans l'espace sont influencées par les caractéristiques du lit et par celles de l'écoulement qui le précède dans le cours d'eau, plusieurs mètres de topographie du lit ont été échantillonnés à l'amont des sites d'échantillonnage des vitesses.

	longueur (m)	largeur (m)	Profondeur (m)	Vitesse moyenne (cm/s)
Eaton Nord- 1999	20	17	0,3	58,3
Eaton Nord- 2000	35	16	0,4	34,4

Tableau 4.1 : Caractéristiques des sections à l'étude sur la Eaton Nord en 1999 et 2000. Ces caractéristiques sont similaires sauf en ce qui à trait à la longueur de la section d'échantillonnage.

4.2.1) Cartographie du lit

La cartographie détaillée de la topographie du lit est effectuée à l'aide d'une station tachéométrique Leica TC805L. Elle est d'une grande précision dans la localisation spatiale des points. La résolution de l'échantillonnage est de 2 mm en terme de distance et de 6 secondes en terme d'orientation. La cartographie détaillée de la surface du lit est effectuée en fonction des mêmes critères lors des deux campagnes d'échantillonnage. La topométrie du lit s'est fait de façon systématique à tous les 30 cm. Elle prend aussi en compte les ruptures de pente importantes du lit et les changements brusques de rugosité. La densité d'échantillonnage est égale ou supérieure à 2 points par m². Cette précision permet d'obtenir des cartes détaillées à partir desquelles on peut extraire les principales formes du lit par un examen des cartes résultantes. Les critères de taille qui permettent de relever la présence d'un élément protubérant à l'écoulement à partir des cartes topographiques sont présentés dans le chapitre précédent.

L'analyse de la cartographie détaillée du lit nous permet d'identifier certaines variables quantitatives associées aux éléments morphologiques du cours d'eau. Nous utilisons un indice de distance à l'obstacle pour traduire les changements de rugosité associés à la présence des formes du lit. Il s'obtient grâce à la réalisation de coupes topométriques longitudinales en amont d'un point d'échantillonnage des vitesses d'écoulement. Ces coupes permettent de localiser et de déterminer la distance entre les profils de vitesse et l'élément de rugosité le plus près en amont. Cet élément de rugosité doit avoir une hauteur supérieure à 10 cm. La distance à l'obstacle est utilisée pour quantifier les effets de la morphologie du lit sur la variabilité spatiale des caractéristiques turbulentes de l'écoulement à l'échelle de la section de cours d'eau.

4.2.2) Vitesses de l'écoulement

Les mesures de vitesse sont récoltées à l'aide de plusieurs courantomètres électromagnétiques bi-directionnels Marsh-McBirney placés verticalement dans l'écoulement. Chaque courantomètre est composé de quatre électrodes placées orthogonalement sur les parois d'une sonde sphérique. Ces électrodes forment le plan de mesure. Le fonctionnement des courantomètres s'explique par le principe de Faraday. Un aimant situé dans la sonde génère un champ magnétique. En passant dans ce champ magnétique, l'écoulement produit un voltage proportionnel à sa vitesse. Les mesures de voltage sont ensuite transformées en vitesses. Le volume d'échantillonnage et la fréquence

des réponses sont limités par la taille des senseurs (Soulsby, 1980). Les senseurs ont un diamètre de 0,013 m et leur volume d'échantillonnage est 2,5 à 3 fois plus grand que leur diamètre. Le temps de réponse des senseurs est de 0,05 s et leur signal est passé dans un filtre R/C ayant une fréquence de demi-puissance de 3,18 Hz. La présence du filtre permet de minimiser les bruits électroniques et atténue les fluctuations de haute fréquence (Roy *et al.*, 1997). Les signaux sont emmagasinés dans un accumulateur de données Campbell 21X et sont ensuite enregistrés et visualisés à partir d'un portable. Il faut enfin noter que les courantomètres ne permettent d'investiguer simultanément que deux des trois composantes de l'écoulement.

L'utilisation de plusieurs courantomètres en simultané permet de quantifier la variabilité spatiale de l'écoulement. Le montage de courantomètres en série a d'abord été utilisé pour caractériser l'écoulement à différentes hauteurs au-dessus du lit et en un point dans l'espace (Robert *et al.*, 1992, 1993 ; Ferguson *et al.*, 1996). Les senseurs ont ensuite été déployés dans le sens de l'écoulement et perpendiculaire au chenal de manière à décrire quantitativement l'extension tridimensionnelle de structures turbulentes (Buffin-Bélanger *et al.*, 1998 , 2000b). Le déploiement de plusieurs courantomètres permet d'évaluer le comportement spatial de structures de l'écoulement à partir de séries temporelles de vitesse à de fortes intensités turbulentes (Kirkbride et Ferguson, 1995 ; Ferguson *et al.*, 1996).

En 1999, nous avons utilisé quatre senseurs enregistrant les vitesses en simultanée. La hauteur des senseurs au-dessus du lit ne varie pas entre les différents sites d'échantillonnage. Les senseurs sont positionnés respectivement à 0,05, 0,13, 0,21 et 0,29 m au-dessus du lit sur une perche de bois (figure 4.1). Le positionnement des senseurs permet de caractériser l'ensemble de la tranche d'eau qui est en moyenne de 30 cm. Le choix des paramètres d'échantillonnage des senseurs s'effectue en établissant un compromis entre la capacité de l'accumulateur de données et les plus faibles fréquences que l'on tente d'examiner à partir des séries temporelles de vitesse. L'échantillonnage est effectué à une fréquence de 20 Hz et pour une durée de 100 secondes. Buffin-Bélanger (2001) a montré que les caractéristiques moyennes de l'écoulement se stabilisent au-delà de 60 secondes à partir de fichiers de vitesse qui ont une durée de 20 minutes. Les vitesses échantillonnées pour 60 secondes génèrent des statistiques relativement stables et sont représentatives de plus longues séries. Des mesures de vitesse longitudinale $\langle u \rangle$ et verticale $\langle v \rangle$ de l'écoulement ont été échantillonnées. Nous avons récolté une seule série

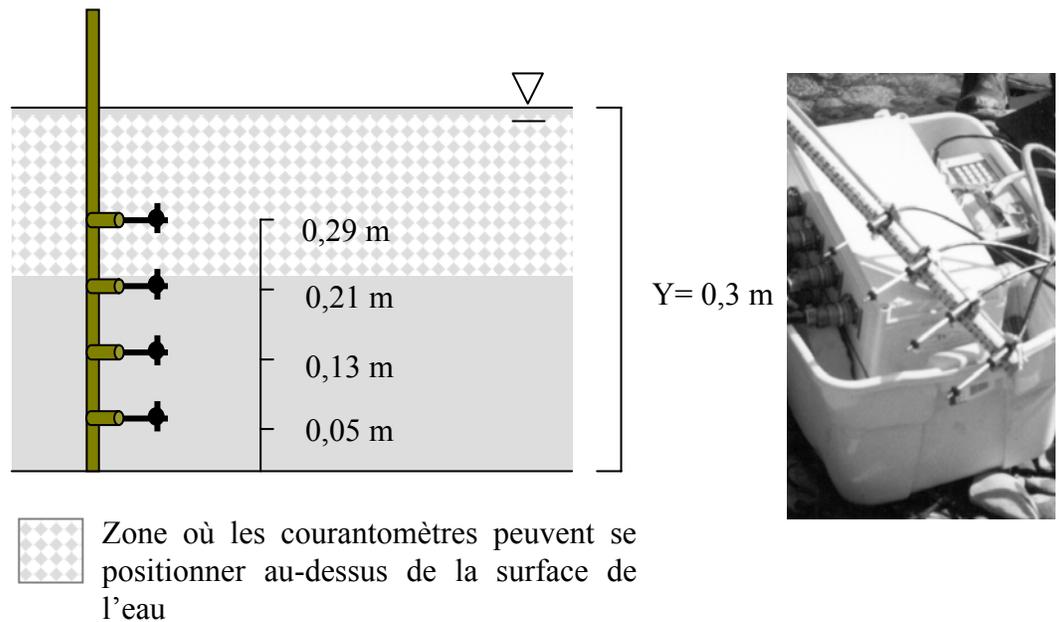


Figure 4.1 : Déploiement vertical des courantomètres dans l'écoulement sur la Eaton Nord-1999. Chacun des courantomètres est séparé par une distance verticale de 8 cm.

de vitesse à chacun des 27 sites d'échantillonnage (figure 4.2). Ces sites sont choisis de façon systématique à tous les 1,75 m le long de trois coupes transversales délimitées perpendiculairement à l'écoulement ainsi qu'aux éléments de rugosité importants. Sur chacune de ces coupes, nous avons relevé respectivement, de l'amont vers l'aval, 10, 8 et 9 sites. Le nombre de sites, de séries de vitesse et la durée de l'échantillonnage choisis permettent d'obtenir des mesures dans un intervalle de temps court où les conditions hydrauliques ne changent pas. Ces conditions sont essentielles pour réaliser une cartographie spatiale sans représenter les fluctuations temporelles de l'écoulement.

Des profils de vitesse avec une résolution spatiale beaucoup plus détaillée ont été récoltés en 2000. Nous avons utilisé sept senseurs pour caractériser l'ensemble de la tranche d'eau. L'élévation des senseurs change en fonction des variations topographiques. Le senseur près du lit a donc une élévation qui varie en fonction de son emplacement sur la section d'étude. Il y a quatre centimètres entre chaque senseur pour les quatre courantomètres les plus près du lit. Les senseurs près de la surface de l'eau se positionnent à tous les huit centimètres (figure 4.3). Le nombre de courantomètres est plus important dans la portion inférieure de l'écoulement. Il permet de saisir les principales modifications de l'écoulement près du lit (Dancey, 2000). Lors de cette campagne, seule la composante des vitesses longitudinales a été échantillonnée. En fait, l'accumulateur de données ne possède que huit canaux d'entrée. Une seule composante de l'écoulement peut donc être investiguée si l'on utilise plus de quatre senseurs pour caractériser les vitesses. À chaque site, l'échantillonnage des vitesses s'est effectué à une fréquence de 20 Hz pour une durée de 120 secondes. Une série de vitesses a été récoltée pour 40 sites choisis sur cinq coupes transversales perpendiculaires à l'écoulement. Les coupes sont séparées par une distance d'environ 2 m (figure 4.4).

La figure 4.5 illustre des séries temporelles de vitesse longitudinale de l'écoulement enregistrées à partir de sept courantomètres sur une verticale. La validation de ces séries de vitesse peut être effectuée à partir d'un examen visuel, des statistiques descriptives moyennes et d'analyses spectrales. L'examen visuel permet d'identifier certaines anomalies qui seraient liées à des problèmes d'échantillonnage. On soulève la présence de vitesses instantanées significativement supérieures ou inférieures à la moyenne. Cet examen permet aussi d'évaluer la cohérence des signaux dans le temps entre les vitesses échantillonnées à différentes élévations au-dessus du lit. Les statistiques moyennes

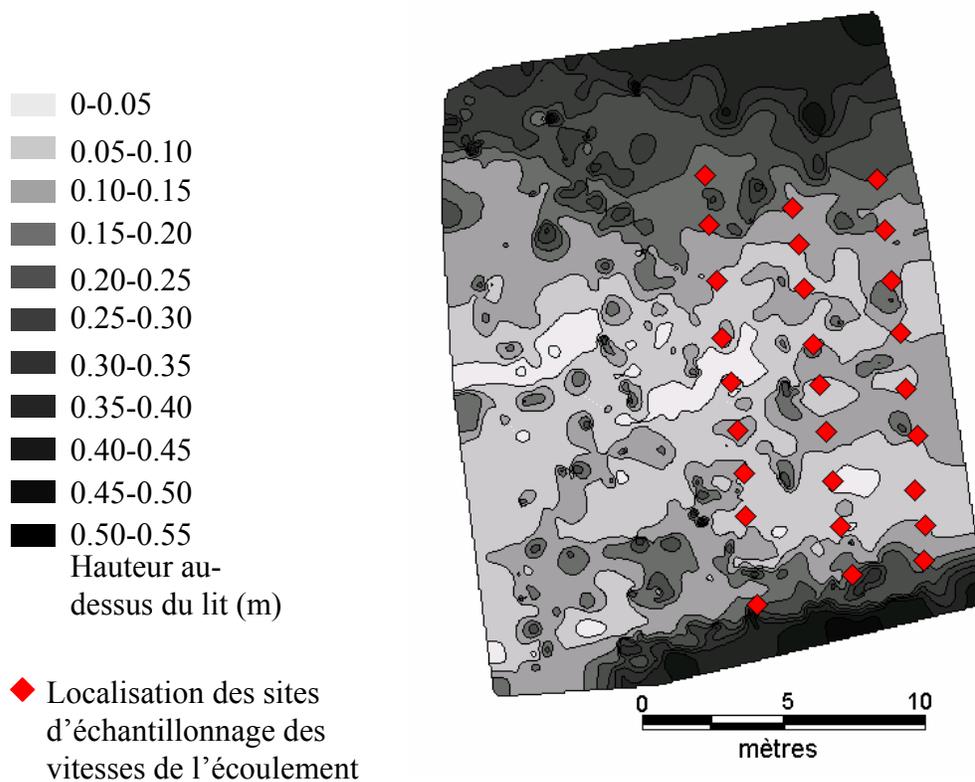


Figure 4.2 : Topographie et localisation des sites d'échantillonnage des vitesses de l'écoulement (Eaton Nord-1999). La hauteur au-dessus du lit est représentée par rapport à la profondeur maximale de la section.

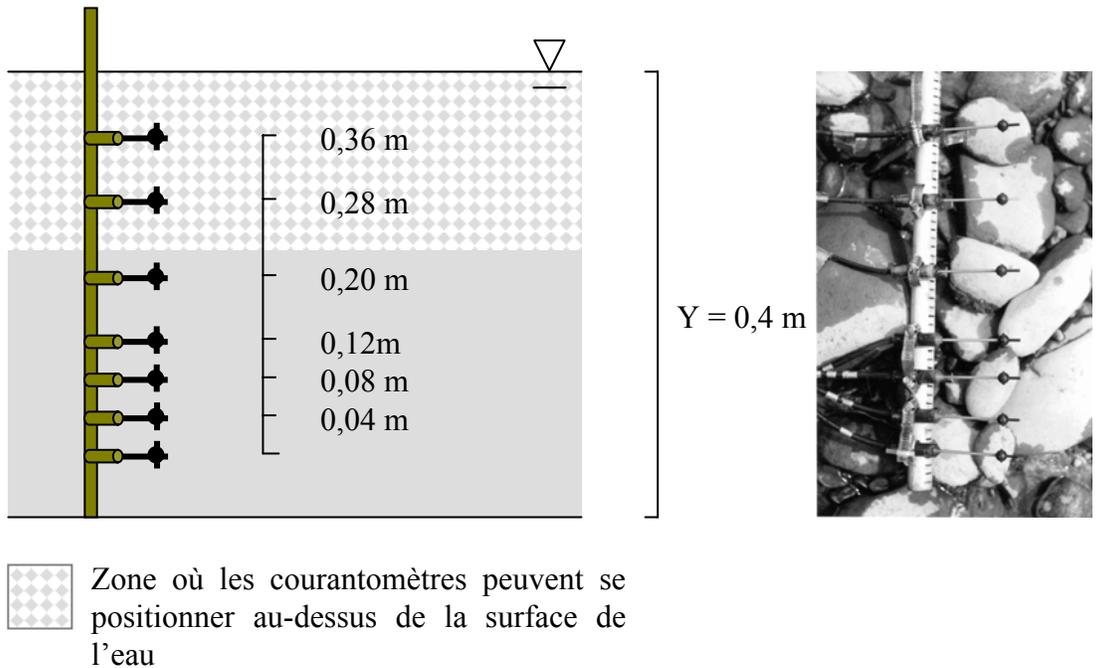


Figure 4.3 : Déploiement vertical des courantomètres dans l'écoulement sur la Eaton Nord-2000. La densité des courantomètres est plus élevée près du lit. Dans la portion proximale au lit, les senseurs sont séparés par une distance de 4 cm. Près de la surface, il y a 8 cm entre chacun des senseurs.

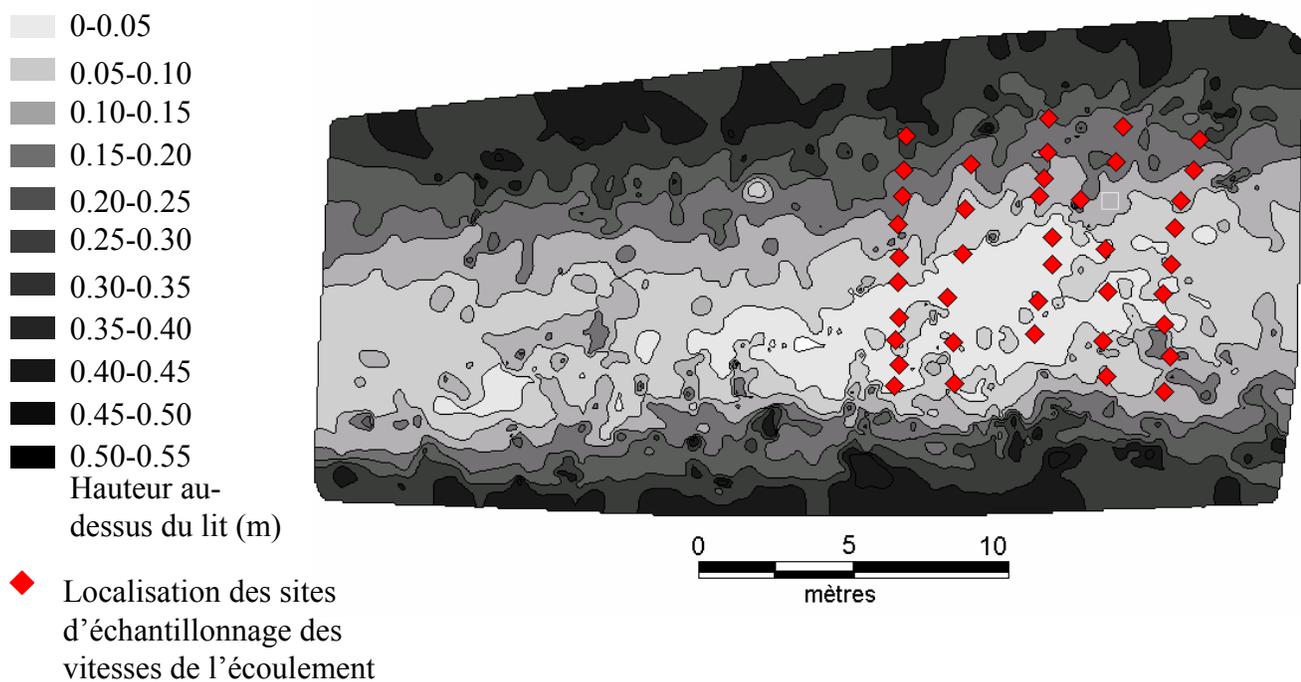


Figure 4.4 : Topographie et localisation des sites d'échantillonnage des vitesses de l'écoulement (Eaton Nord-2000). La hauteur au-dessus du lit est représentée par rapport à la profondeur maximale de la section.

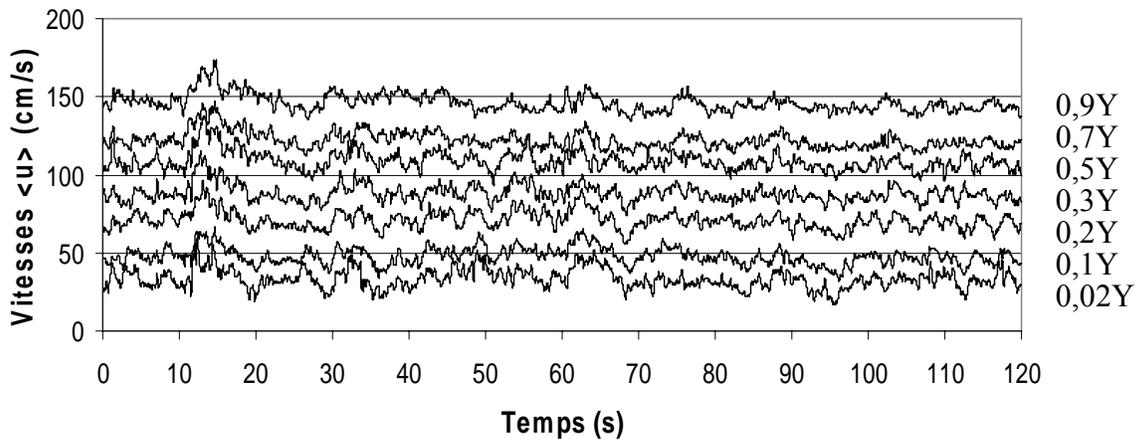


Figure 4.5 : Séries de vitesse enregistrées à sept hauteurs différentes au-dessus du lit (cm) pour une durée de 120 secondes. La validation des données peut être effectuée à partir des caractéristiques descriptives moyennes de chacune des séries et de la cohérence des signaux à chacune des hauteurs au-dessus du lit.

obtenues à partir des séries permettent de conclure sur la qualité des mesures enregistrées par les senseurs et ce, particulièrement lorsqu'on utilise plusieurs courantomètres dans l'écoulement. Enfin, les analyses spectrales permettent de détecter la présence de bruits dans les séries de vitesse récoltées en milieu turbulent (Lapointe *et al.*, 1996).

Les méthodes de validation de données permettent entre autres de conclure sur le fonctionnement des courantomètres, sur la qualité des signaux, ainsi que de s'assurer que les électrodes soient orientées dans un système de référence constant dans le temps et dans l'espace. Un mauvais alignement des courantomètres déployés dans le plan de mesure constitue le problème majeur de ce type d'appareil. Il peut éventuellement entraîner une distorsion des données. Roy *et al.* (1996) ont discuté de la méthode de correction qui consiste à effectuer une rotation des données dans les cas évidents de désalignement. Seulement, cette méthode complique considérablement l'étape de validation des données d'autant plus qu'il est difficile de déterminer si les données sont affectées par le désalignement ou si elles reflètent seulement la complexité de l'écoulement en milieu naturel. Aucune rotation n'a été appliquée dans cette étude compte tenu de la constance du système de référence. Le courantomètre électromagnétique bi-directionnel reste enfin un outil fiable pour caractériser l'écoulement (Lane *et al.*, 1993 ; Roy *et al.*, 1996) et est particulièrement intéressant dans la mesure où il permet une certaine latitude quant à la fréquence et à la durée de l'échantillonnage.

Certaines séries de vitesse verticale ont été retirées des analyses notamment en raison des statistiques descriptives moyennes qui les caractérisent. En 1999, pour deux des quatre senseurs les fluctuations des vitesses verticales ne correspondent pas à celles généralement observées dans les cours d'eau à lit de graviers. Les valeurs moyennes de vitesse verticale sont une dizaine de fois inférieures à celle que l'on observe généralement dans ce type de cours d'eau. Ces valeurs sont directement associées à un mauvais fonctionnement des courantomètres lors de l'échantillonnage. Une caractérisation de l'écoulement effectuée qu'à partir de deux courantomètres ne permet pas d'évaluer les caractéristiques moyennes des vitesses verticales de l'écoulement pour l'ensemble de la tranche d'eau. L'ensemble des séries de vitesse verticale n'a donc pas été traité. Pour les séries de vitesse longitudinale récoltées en 1999 et en 2000, les seules corrections effectuées sont le retrait de vitesses instantanées supérieures à trois fois l'écart-type de la distribution. Ces valeurs inhabituelles persistent généralement pour une durée inférieure à

0,25 secondes et peuvent être associées à des débris en suspension en contact avec les senseurs lors de l'échantillonnage des vitesses (Lapointe *et al.*, 1996). Elles sont remplacées par la moyenne pondérée des valeurs voisines de vitesse qui se trouvent à l'intérieur d'une fenêtre d'une demi seconde.

Plusieurs mesures peuvent être extraites des séries temporelles de vitesse. Nous nous concentrerons sur les vitesses longitudinales moyennes à différentes hauteurs au-dessus du lit ($\langle u \rangle_y$), l'écart-type de ces séries de vitesses ($rmsu$), la hauteur où la vitesse est nulle (y_0) et les contraintes de cisaillement (τ). La hauteur où la vitesse est nulle et le cisaillement sont estimés à partir de l'équation universelle des distributions des vitesses de *Prandtl-von Karman* (1926). Ce modèle postule une distribution des vitesses qui suit la forme logarithmique suivante :

$$\langle u \rangle_y = 2.5u^* \ln\left(\frac{y}{y_0}\right)$$

La hauteur où la vitesse est nulle nous donne une indication quant aux échelles de rugosité présentes à la surface du lit. On peut déterminer la contrainte de cisaillement par $\tau = \rho g Y S_0$ et on connaît la relation $u^* = (g Y S_0)^{1/2}$ où ρ est la densité du fluide, g l'accélération gravitationnelle, Y la profondeur de l'écoulement et S_0 la pente. Le cisaillement est donc estimé par l'équation suivante à partir du profil de vitesse :

$$\tau = \rho u_*^2$$

Ce modèle est l'un des plus utilisés pour caractériser les vitesses de l'écoulement à différentes hauteurs au-dessus du lit (Chow, 1959, Dingman, 1984). L'évaluation de la hauteur où la vitesse est nulle et du cisaillement au lit à partir du profil de vitesse permet d'exprimer la variabilité spatiale des caractéristiques de l'écoulement à l'échelle d'un tronçon de cours d'eau. Échantillonnées à haute densité spatiale, ces mesures estimées à partir de chacun des profils de vitesse sont interpolées sur l'ensemble de la section d'étude.

Pour des distributions verticales de vitesses qui ne suivent pas une forme logarithmique, l'estimation de la hauteur où la vitesse est nulle et du cisaillement peut s'effectuer à partir de la portion proximale au lit du profil de vitesse. Robert *et al.* (1992) ont utilisé les vitesses échantillonnées dans 30% de la profondeur totale. Hassan et Church (1992) ont utilisé les vitesses qui caractérisent 20% du profil. Ces portions semblent être

celles qui sont les plus influencées par les éléments de rugosité à la surface du lit. Seulement, dans l'intérêt de préserver le détail des profils de vitesse, nous avons utilisé la totalité des valeurs moyennes de vitesse récoltées verticalement dans l'écoulement pour estimer les valeurs de y_0 et de τ . La figure 4.6 présente la correspondance entre les estimations effectuées à partir des vitesses récoltées sur l'ensemble des profils et celles provenant de vitesses échantillonnées par les deux premiers senseurs près du lit. En fait, l'utilisation de l'ensemble du profil permet une estimation de la hauteur où la vitesse est nulle et du cisaillement au lit similaire à celle effectuée à partir des deux senseurs contrairement aux résultats présentés par Biron *et al.* (1998) où une utilisation de toute la tranche d'eau engendrait une sous-estimation des contraintes de cisaillement. Les changements ponctuels qui se produisent à différentes hauteurs au-dessus du lit suite à la présence d'éléments morphologiques du lit sont préservés et examinés en détail dans une description des profils de vitesse. Par contre, en estimant la hauteur où la vitesse est nulle et le cisaillement à partir de l'ensemble du profil de vitesse, la variabilité spatiale des caractéristiques de l'écoulement à l'échelle de la section d'étude est exprimée à partir du comportement moyen de l'écoulement sur l'ensemble de la tranche d'eau et intègre à la fois les effets de rugosité associés à la taille des grains et aux microformes du lit.

4.3) RÉSULTATS

La variabilité des vitesses de l'écoulement, à différentes élévations au-dessus du lit, s'exprime dans la forme des profils de vitesse longitudinale et d'écart-type. La forme des profils permet de conclure rapidement sur l'augmentation des vitesses et des fluctuations de vitesses du lit vers la surface de l'eau. Il constitue un indicateur sur la manière dont évolue un profil en fonction de la position qu'il occupe dans l'espace par rapport aux éléments morphologiques du lit. Nous présentons d'abord les profils de vitesse longitudinale et d'écart-type que l'on observe dans les cours d'eau à lit de graviers. Les profils de vitesse sont présentés sur des axes standardisés par les valeurs maximales observées sur chacune des sections de cours d'eau. Cette normalisation permet de comparer l'ensemble des profils de vitesse entre eux. À partir de tous les profils, on extrait les profils types en fonction de différents critères d'identification. Les profils types sont ensuite mis en relation avec leur distance moyenne à l'élément de rugosité le plus près. Enfin, nous montrons la correspondance de la variabilité spatiale des valeurs d'écart-type des distributions de vitesse longitudinale, des hauteurs où les vitesses sont nulles et du

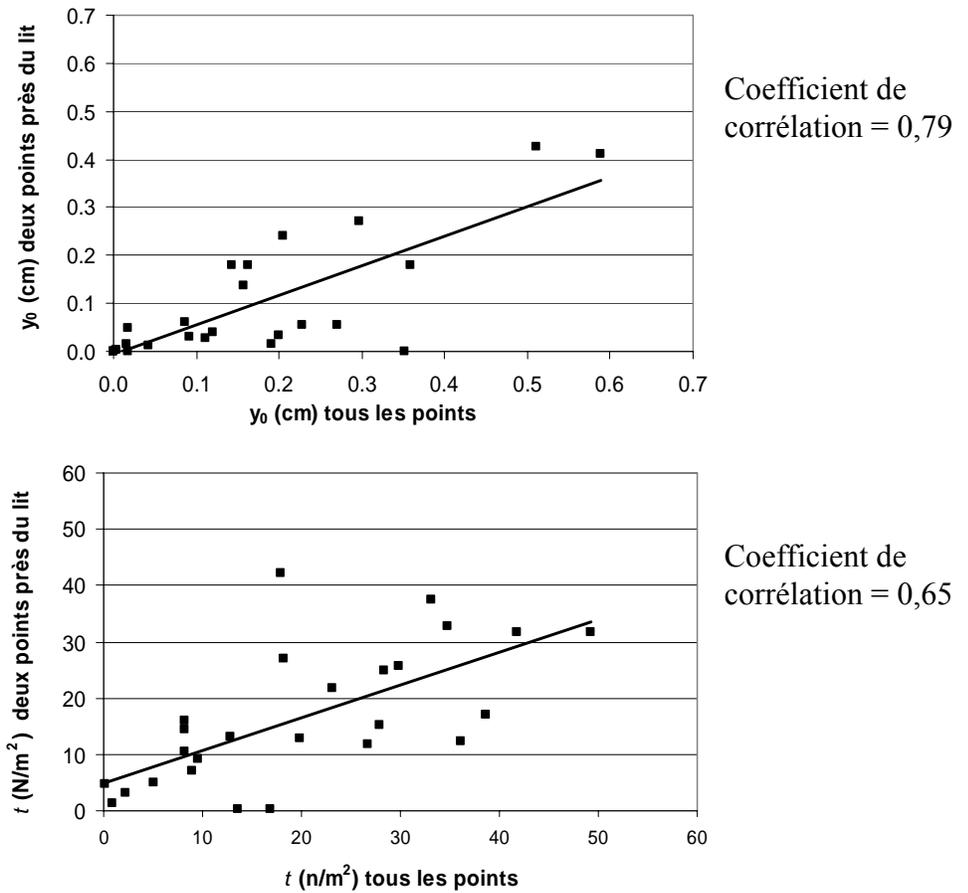


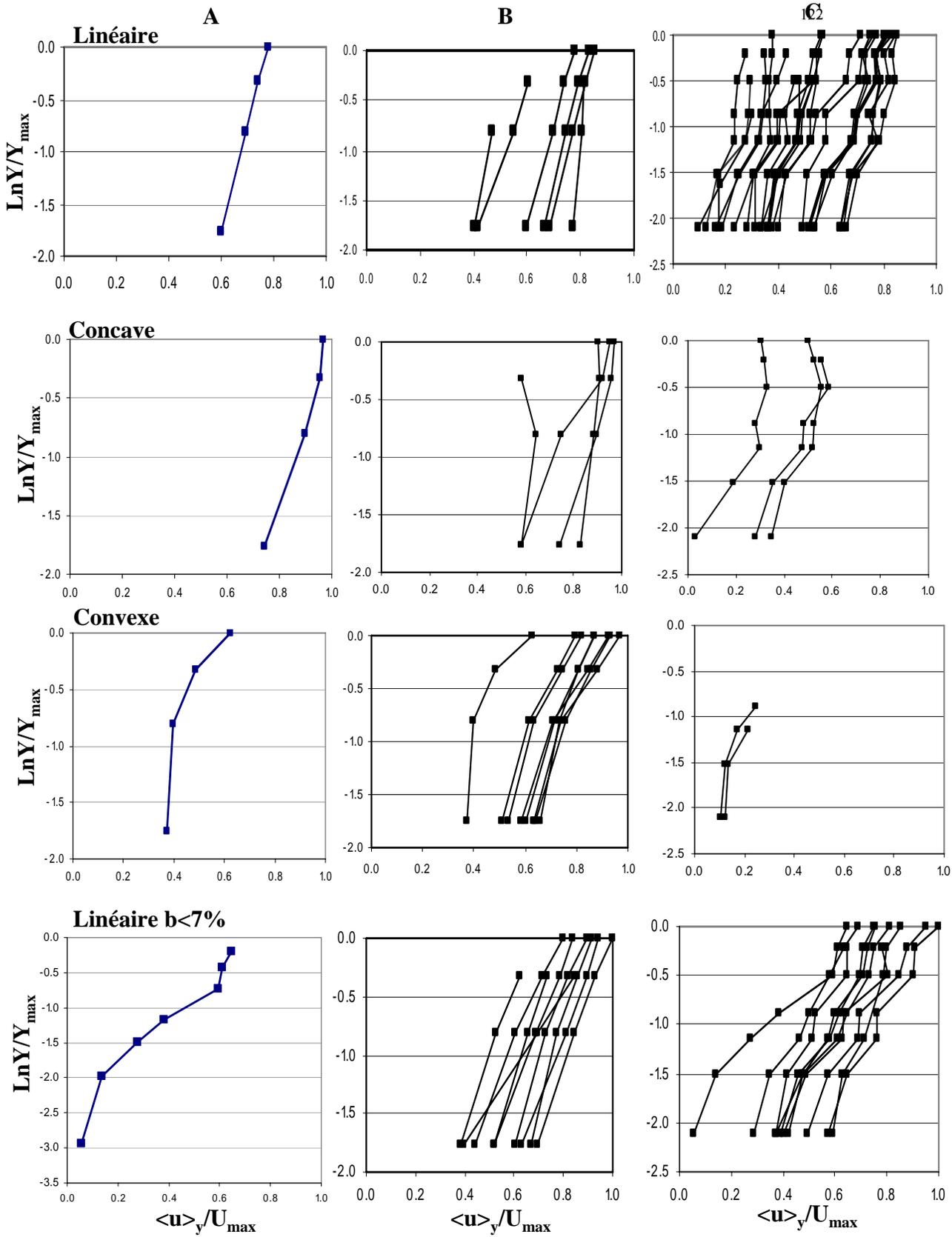
Figure 4.6: Correspondance entre les valeurs (y_0 , τ) estimées à partir de tous les points des profils de vitesse et celles évaluées à partir des deux points les plus près du lit.

cisaillement avec les changements morphologiques du lit à l'échelle de la section de cours d'eau.

4.3.1) La forme des profils de vitesse longitudinale

À la figure 4.7, nous présentons les profils de vitesse longitudinale classés en fonction de profils types représentatifs d'un comportement particulier dans l'écoulement. Les catégories de profils sont déterminées en fonction de la magnitude des vitesses à différentes hauteurs au-dessus du lit, des gradients de vitesse, des bris de pentes et du nombre de segments qui forment les profils. Nous pouvons extraire quatre types de profil de vitesse longitudinale parmi tous les profils échantillonnés : 1) les profils linéaires, 2) les profils linéaires dont la pente est inférieure à 7%, 3) les profils concaves et 4) convexes. À ces classes s'ajoute une classe où un profil de vitesse prend une forme linéaire et une pente inférieure à 7% mais montre aussi un ralentissement important à proximité du lit. Enfin, une dernière classe comprend un seul profil dont la particularité est d'avoir une pente négative. Ces deux derniers types de profil représentent aussi peu que 2% de l'ensemble des profils de vitesse échantillonnés. Ils font donc exception à l'échelle de la section de cours d'eau mais sont tout de même traités comme étant des profils qui réagissent directement aux particularités de leur environnement morphologique proximal.

Dans les écoulements turbulents, les profils de vitesse prennent généralement une forme linéaire sur une échelle semi-logarithmique. Les profils linéaires reflètent l'écoulement dans les cours d'eau à lit de graviers et ce, tant que la profondeur de l'écoulement est plus importante que la hauteur de rugosité du lit. Ils sont généralement présents sur des surfaces où il y a peu de changements de rugosité et où peu d'obstacles ponctuels viennent perturber l'écoulement que se soit à la surface de l'eau ou près du lit (Bayazit, 1975; Hammond, 1984 ; Wiberg et Smith, 1991; Robert *et al.*, 1992, 1996 ; Tacchie, 2000). L'absence de bris de pente important est l'une des principales caractéristiques qui nous permet d'identifier un profil linéaire. Aussi, ces profils peuvent montrer des vitesses variables près du lit mais ont toujours de faibles gradients de vitesse sur toute la tranche d'eau. Pour les deux campagnes, 40% des profils de vitesse récoltés font partie de cette classe (tableau 4.2). Lorsque la pente s'atténue sur des profils qui n'ont toujours pas de bris de pente important, on voit apparaître les profils dont la pente est inférieure 7%. Ces profils sont caractérisés par des vitesses généralement plus rapides à la surface de l'eau que pour les profils linéaires.



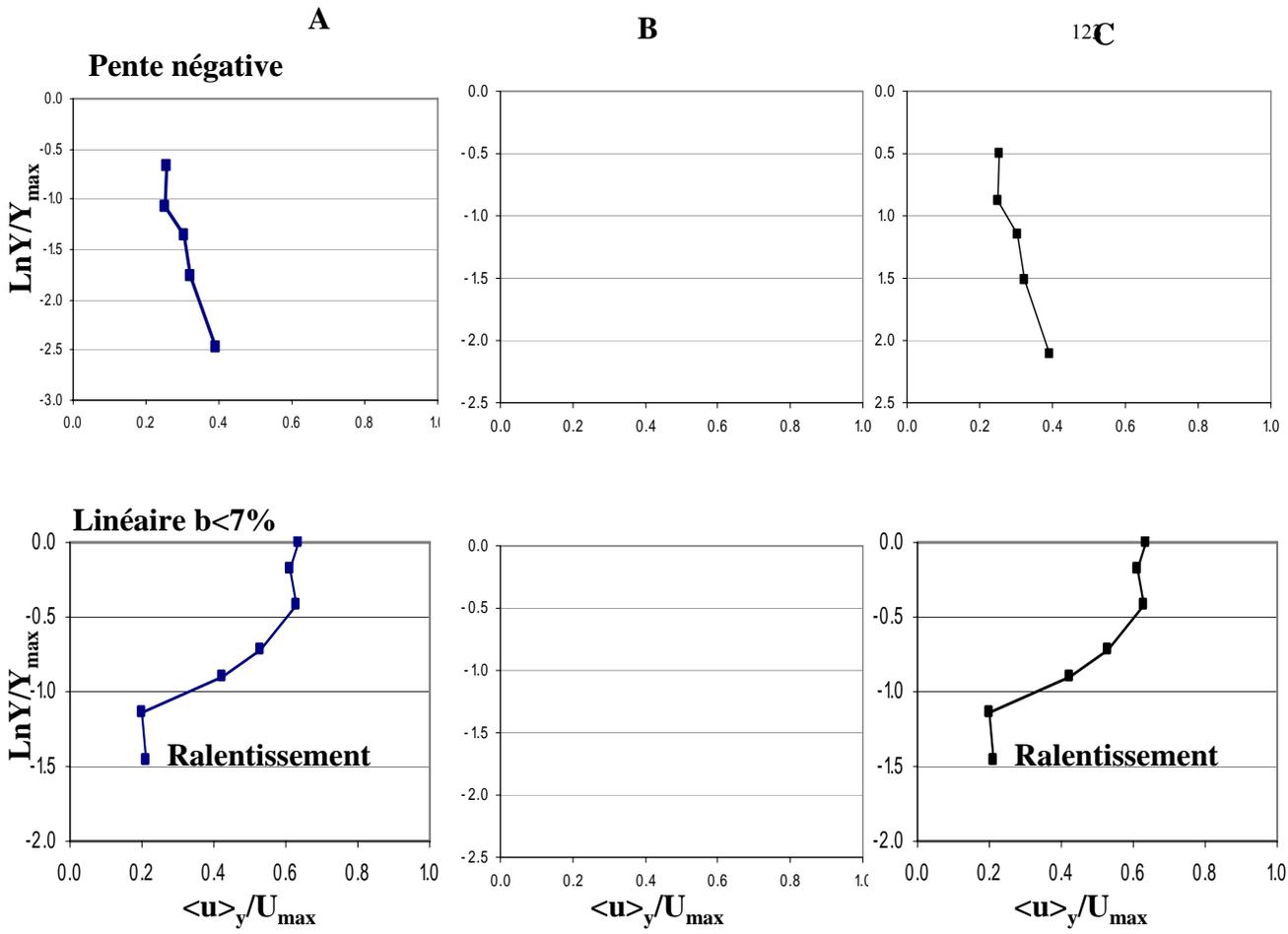


Figure 4.7: Classification des profils de vitesse longitudinale: a) profils types, b) profils récoltés en 1999, c) profils récoltés en 2000.

Types de profil	Nombre de profils (1999)	Nombre de profils (2000)	Pourcentage de profils pour les deux campagnes
Linéaire	6	22	41
Concave	4	3	10
Convexe	8	2	14
Linéaire<7%	9	11	29
Pente négative	(-)	1	1
Linéaire<7% ralentissement à la base du profil	(-)	1	1
	27	40	

Tableau 4.2 : Nombre de profils de vitesse pour chacun des types de profil identifiés pour les deux campagnes d'échantillonnage.

Lorsque l'on observe des changements de rugosité liés à la présence d'obstacles importants, les profils de vitesse tendent à se segmenter en deux parties chacune ayant des caractéristiques distinctes. Pour les profils concaves, la partie inférieure des profils se définit par des vitesses relativement lentes près du lit. Les vitesses s'accroissent vers la couche supérieure de l'écoulement jusqu'au bris de pente à partir duquel elles commencent à ralentir. On voit alors apparaître une légère concavité dans la partie supérieure du profil. Le ralentissement des vitesses à la base du profil est certainement associé à l'effet d'un obstacle qui se trouve à l'amont dans la section d'écoulement. Cet obstacle doit avoir une hauteur assez importante pour entraîner des modifications dynamiques de l'écoulement. On estime que la hauteur au-dessus du lit où cet effet se produit est supérieure 10 cm en 1999 et en 2000.

Dans les profils convexes, le bris de pente entre les deux segments est similaire à celui pour les profils concaves. Seulement, la partie supérieure du profil montre certaines particularités. En fait, les vitesses augmentent du lit jusqu'à la surface où l'effet des obstacles ne se fait pratiquement plus sentir. Dans la portion supérieure du profil, les gradients de vitesse sont plus marqués que dans la portion inférieure. Les différences entre les gradients de vitesse qui représentent chacune des parties du profil sont moins importantes que celles observées pour les profils concaves. Les profils convexes représentent l'accélération des vitesses suite à la diminution des forces de résistance près du lit. Ces profils sont beaucoup plus fréquents sur la section échantillonnée en 1999. Pour l'année qui suit, seulement deux profils de cette classe ont été observés (tableau 4.2) et ces profils ne sont pas complets en raison des faibles profondeurs (28 et 20 cm) qui ne permettent pas de déployer l'ensemble des courantomètres à ces sites d'échantillonnage.

Enfin, lors de la plus récente campagne d'échantillonnage nous avons observé quelques types de profil dont les caractéristiques ne permettent pas de les intégrer dans les classes ayant déjà été décrites dans la littérature. Leur présence est associée à des conditions spécifiques de l'écoulement ou à un problème d'échantillonnage des vitesses. Un des profils montre une pente négative du lit jusqu'à la surface de l'eau. Il est aussi caractérisé par de forts gradients de vitesse près du lit. Ce gradient a tendance à diminuer dans la partie supérieure du profil. On observe aussi un profil linéaire dont la pente est inférieure à 7% mais dont les vitesses à proximité du lit sont plus rapides que ce que nous

observons habituellement pour ce genre de profil. Il est aussi caractérisé par une diminution des vitesses sur les quatre premiers centimètres au-dessus du lit.

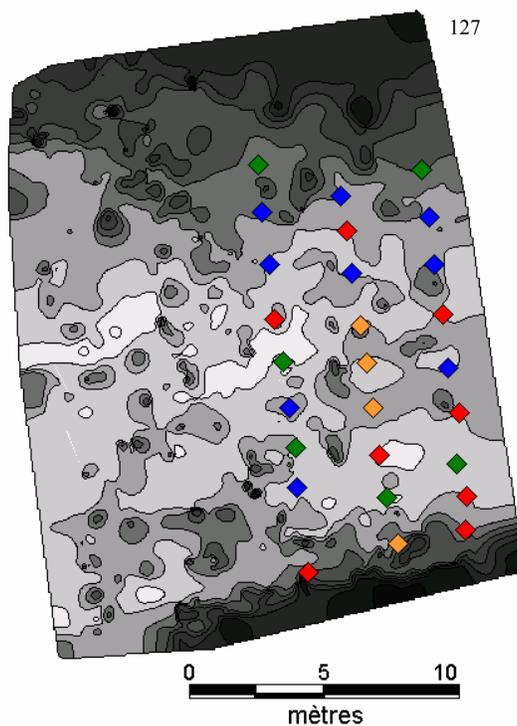
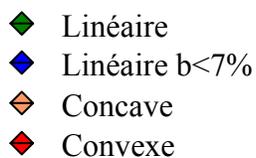
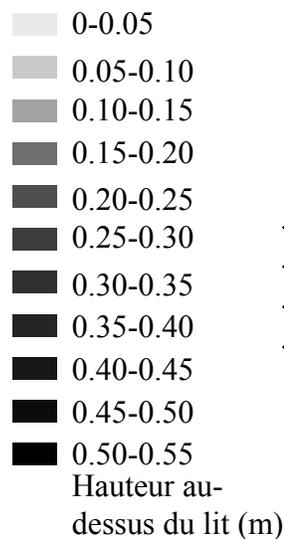
4.3.2) Distribution spatiale des profils types à l'échelle de la section de cours d'eau

La distribution spatiale des profils types est fonction des changements morphologiques de la surface du lit. La localisation des obstacles et leur concentration dans l'espace modifient l'écoulement. La superposition de la carte topographique du lit à la distribution des types de profil permet d'observer qu'ils ont tendance à se regrouper dans l'espace et à se distribuer de façon structurée en fonction de la distance qu'ils occupent par rapport à la présence d'un obstacle (figure 4.8).

Les profils linéaires se retrouvent généralement dans les sections où il y a peu d'obstacles protubérants et où il y a une absence de ruptures de pente importantes dans la topographie du lit. Ils occupent particulièrement les sections près des berges et une petite portion seulement de la section centrale du chenal où les profondeurs sont plus importantes. Dans ce cas, les obstacles sont moins influents sur l'ensemble de la tranche d'eau. On note des exceptions dans la mesure où certains profils linéaires prennent place à l'aval de surélévation de la surface du lit. Il semble que les forces de résistance associées à ces changements de rugosité n'interviennent pas sur la forme des profils de vitesse. Les profils linéaires se retrouvent à une distance moyenne d'environ 2,4 à 2,8 m à l'aval d'un obstacle (tableau 4.3). Ces profils représentent l'écoulement soumis à l'échelle de rugosité liée aux particules de taille semblable qui composent le lit. Les profils linéaires ayant une pente inférieure à 7% se retrouvent à une distance moyenne entre 2,6 et 4,2 m à l'aval d'un obstacle. Leur distribution spatiale montre qu'ils sont précurseurs de profils linéaires ayant une pente qui s'accroît dans la mesure où aucun obstacle ne vient perturber l'écoulement. Ils se situent donc à l'aval distal d'un obstacle et représentent le retour à leur forme linéaire.

Les profils concaves se localisent à l'aval proximal d'obstacles qui ont une influence assez importante pour ralentir considérablement les vitesses de l'écoulement près du lit. Cette relation est plus évidente pour les données récoltées en 1999 (figure 4.8). Dans la majorité des cas, lorsqu'on retrouve la présence d'un obstacle à la surface du lit on voit, immédiatement à l'aval, des profils qui prennent une forme concave. Les profils concaves ont tendance à se regrouper dans l'espace. En 1999, ils se présentent tous sur la même

a)



b)

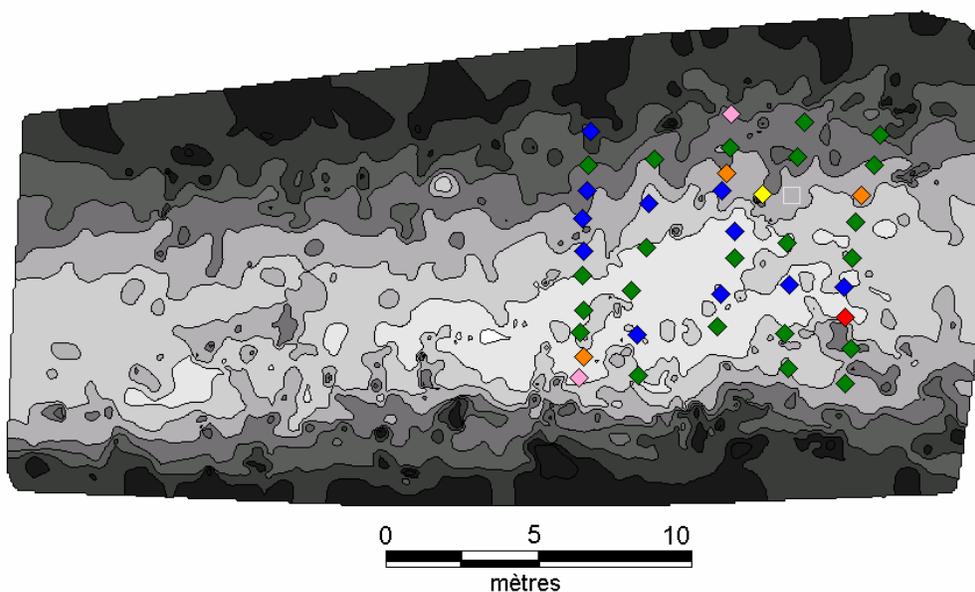
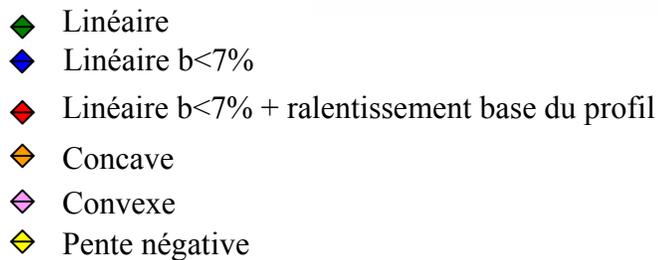
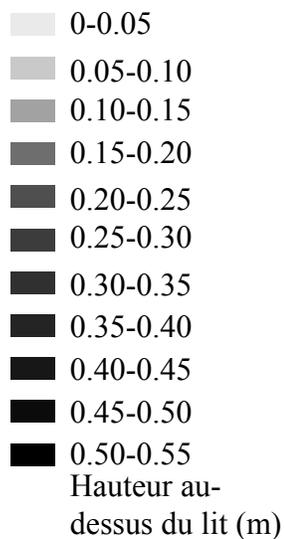


Figure 4.8: Distribution spatiale des profils types de vitesse longitudinale de l'écoulement en fonction de la morphologie du lit: a) 1999, b) 2000.

Types de profil	Distance moyenne à l'obstacle (1999)	Distance moyenne à l'obstacle (2000)	Moyenne des distances pour les deux campagnes
Linéaire	2,8 m (aval)	2,4 m (aval)	2,6 m
Concave	1,4 m (aval)	1,4 m (aval)	1,4 m
Convexe	2 m (aval)	1,4 m (aval)	1,7 m
Linéaire<7%	2,6 m (aval)	2,3 m (aval)	2,4 m
Pente négative	(-)	0,2 m (au-dessus)	0,2 m
Linéaire<7% ralentissement à la base du profil	(-)	0,9 m	0,9 m

Tableau 4.3: Distance des profils types de vitesse longitudinale à un obstacle protubérant à la surface du lit.

coupe transversale. Seulement, pour les données récoltées en 2000, la densité des obstacles dans la section d'étude est moins importante. La proximité entre les obstacles et les profils concaves est plus difficile à percevoir. Il semble que les changements brusques d'élévation de la surface du lit aient une influence aussi importante que la présence des obstacles sur la modification de la forme des profils de vitesse. Les profils concaves représentent l'état de l'écoulement ayant récemment subi des transformations suite à la présence de changements de rugosité du lit. La distance moyenne entre les obstacles et les profils est de 1,4 m.

On stipule que les profils convexes devraient se situer à l'aval d'un obstacle. Ils représenteraient le passage de l'écoulement entre les profils concaves et linéaires. Les profils convexes se retrouvent sur des sections de rugosité homogène mais ils ont d'abord été influencés par la présence d'un obstacle ou d'un changement topographique à la surface du lit. Ils reflètent les changements morphologiques à l'amont. Les profils convexes se positionnent à une distance moyenne d'environ 1,7 m à l'aval d'un obstacle. On les retrouve fréquemment près des berges mais ils peuvent aussi se positionner dans la portion centrale du chenal.

Le profil dont la pente est négative est situé au-dessus d'un obstacle. Seulement, on ne possède qu'une seule réplique de ce type de profil de vitesse. On suppose tout de même que l'accélération importante des vitesses au-dessus d'un élément de rugosité pourrait être à la source de cette localisation spatiale. Les profils linéaires ayant une pente inférieure à 7% et qui montrent aussi un ralentissement à la base sont difficiles à expliquer. Ces profils se positionnent à la suite de quelques petits obstacles dont la hauteur est inférieure à 10 cm. Par contre, on observe plusieurs obstacles un peu plus à l'amont à une distance d'environ 4,5 m. Ces profils peuvent alors représenter l'étape précédant le retour des profils à leur forme linéaire. Le ralentissement des vitesses à la base du profil serait donc le reflet d'une ancienne perturbation qui persiste dans le temps et dans l'espace.

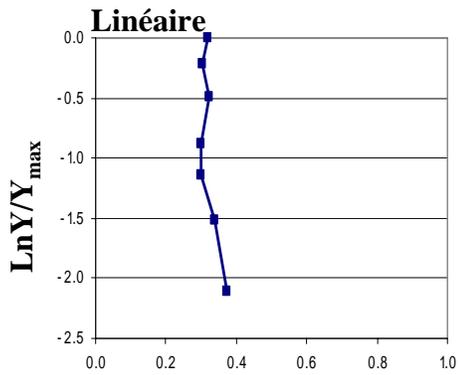
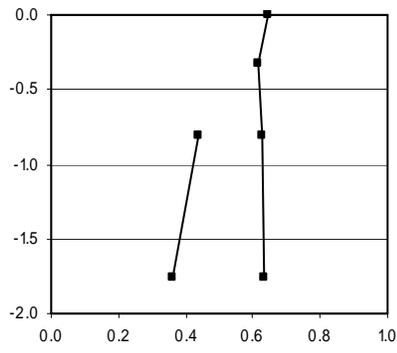
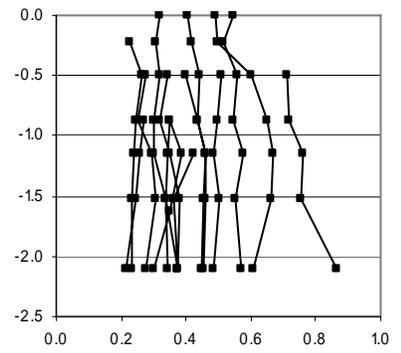
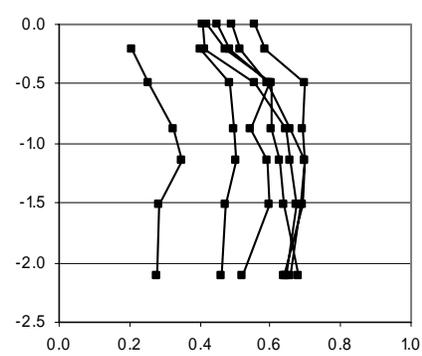
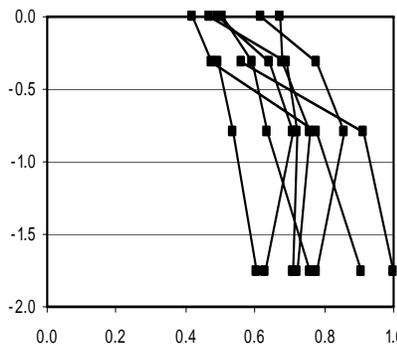
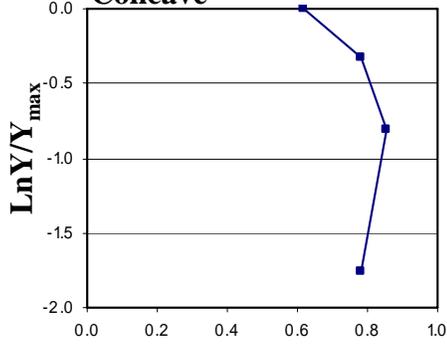
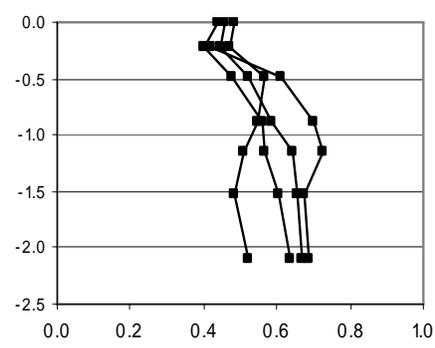
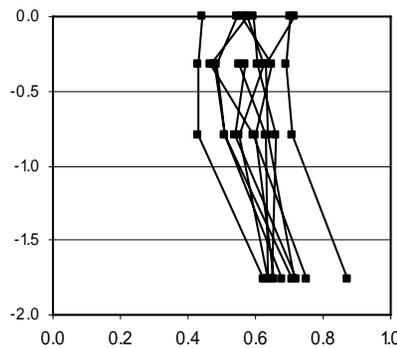
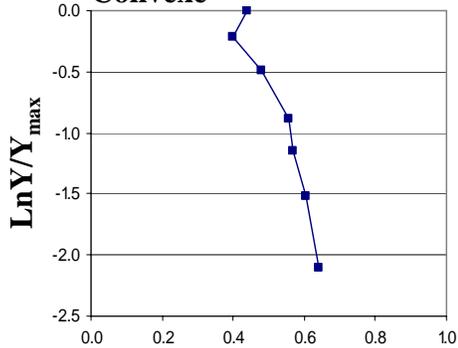
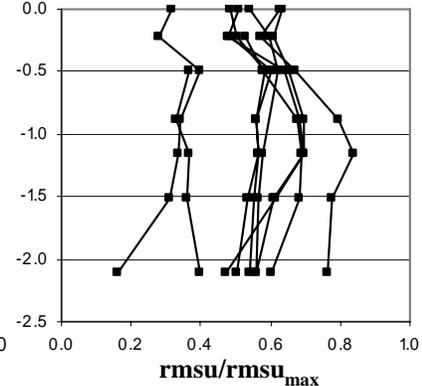
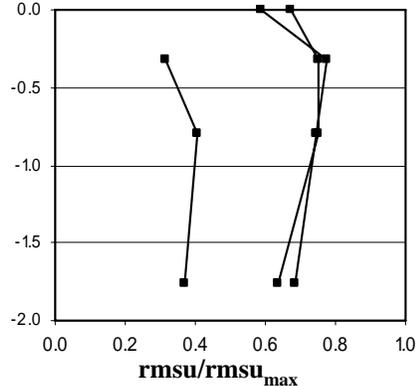
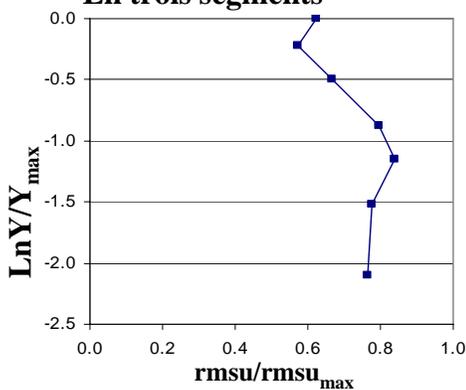
Les profils de vitesse longitudinale se positionnent de façon structurée par rapport à la morphologie du lit. À partir des distances moyennes entre les profils et un obstacle protubérant, on observe la séquence de distribution suivante : concave, convexe, linéaire ayant une pente inférieure à 7% et linéaire. Seulement, à partir des cartes de la répartition spatiale des profils, on observe que leur position et leur persistance dans l'espace varient en fonction de la concentration et de la taille de plusieurs obstacles. Ces facteurs ne sont

pas pris en compte dans notre indice de distance où seul l'obstacle le plus près est considéré. D'abord, les profils concaves deviennent souvent convexes vers l'aval. Or, ce passage n'est pas obligé et il arrive fréquemment que les profils concaves deviennent directement linéaires à cause de la présence d'obstacles de petite taille, au début de la séquence, qui n'entraînent pas de modifications spatiales importantes sur l'écoulement. Le retour du profil à sa forme linéaire se fait alors plus rapidement que le laisse entendre la séquence typique. Ensuite, les profils convexes sont fréquemment entrecoupés de profils concaves avant de prendre éventuellement une forme linéaire ou deviennent directement linéaires. Enfin, les profils linéaires aux pentes inférieures à 7% demeurent présents vers l'aval si les obstacles n'interviennent pas sur la résistance à l'écoulement. Dans ce cas, et à une distance supérieure à 2 ou 3 m, la pente des profils s'accroît et on peut observer la présence de profils linéaires.

4.3.3) La forme des profils de *rmsu*

Nous avons repris la même description de profils et de répartition spatiale à partir des écarts-types des distributions de vitesse longitudinale à différentes hauteurs au-dessus du lit (*rmsu*). Ces valeurs permettent de décrire la variabilité spatiale des fluctuations de vitesse à une position dans l'espace. En 1999 et 2000, nous avons relevé cinq différents types de profil de *rmsu* qui caractérisent l'ensemble des profils observés (figure 4.9). Ces profils montrent autant de particularités que les profils de vitesse longitudinale. Le premier type de profil de vitesse que l'on observe prend une forme linéaire. Les autres types de profil sont segmentés en plusieurs parties distinctes. Pour les deux campagnes d'échantillonnage, on observe la présence de profils : 1) de quatre ou 2) trois segments, 3) de forme concave ou 4) convexe. Pour tous les profils, les valeurs de *rmsu*, les gradients de pente et le nombre de segments qui les composent changent en fonction de leur position par rapport à un obstacle protubérant à la surface du lit.

Les profils linéaires composent 23% de l'ensemble des profils de *rmsu* récoltés sur la Eaton Nord (tableau 4.4). Ils sont caractérisés par de faibles *rmsu* sur l'ensemble du profil. Dans certains cas, l'écart-type diminue légèrement à la surface de l'eau mais pour la majorité des profils, il varie seulement de plus ou moins 0,1 fois les valeurs maximales observées pour une section. On observe de faibles gradients qui persistent sur l'ensemble de la tranche d'eau. Ces profils devraient se retrouver dans les portions du chenal où les éléments morphologiques ne contribuent pas particulièrement en terme de résistance à

A**B****C₃₁****Concave****Convexe****En trois segments**

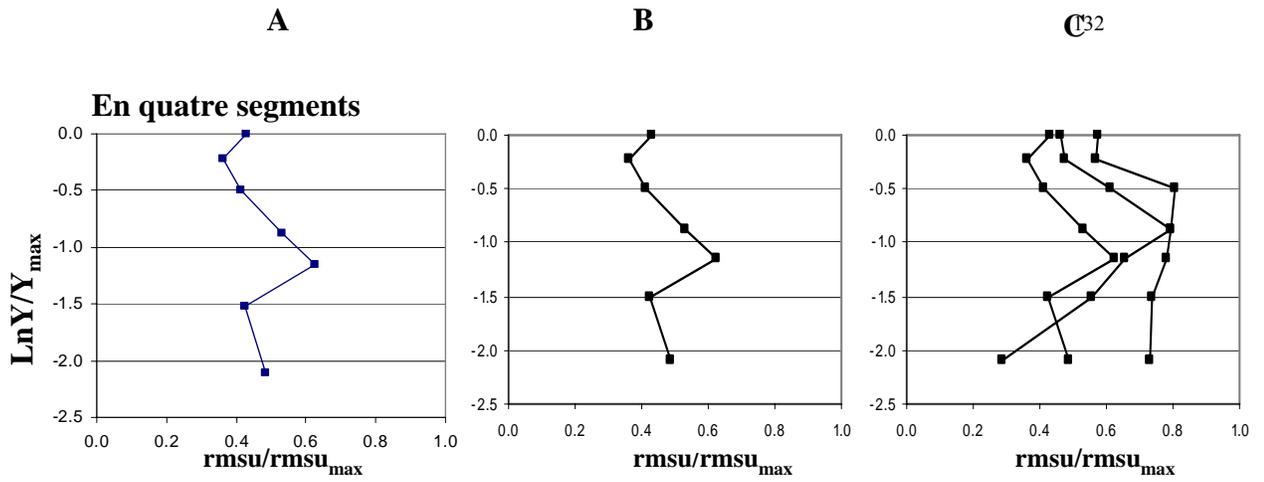


Figure 4.9: Classification des profils de $rmsu$: a) profils types, b) profils récoltés en 1999, c) profils récoltés en 2000.

Types de profil	Nombre de profils (1999)	Nombre de profils (2000)	Pourcentage de profils pour les deux campagnes
Linéaire	2	14	23
Concave	8	7	22
Convexe	13	6	26
Trois segments	3	10	19
Quatre segments	1	3	7
	27	40	

Tableau 4.4 : Nombre de profils de *rmsu* pour chacun des types de profil identifiés pour les deux campagnes d'échantillonnage.

l'écoulement. Les profils linéaires sont le reflet de l'absence d'obstacles protubérants à l'amont et ce même si les valeurs de $rmsu$ sont élevées près du lit.

Les profils divisés en quatre segments montrent de nombreuses fluctuations de $rmsu$ en fonction des profondeurs de l'écoulement. À proximité du lit, l'écart-type est inférieur à 0,5 fois l'écart-type maximal observé sur la section d'étude. Ces valeurs persistent pour une tranche de l'écoulement d'environ 4 cm près de la surface du lit. Elles augmentent progressivement pour les hauteurs qui représentent la portion centrale des profils pour ensuite diminuer vers la surface. Enfin, les écarts-types augmentent dans les huit derniers centimètres qui caractérisent la couche supérieure de l'écoulement. Les valeurs maximales de $rmsu$ sont obtenues pour une hauteur au-dessus du lit égale à $-1,02 \ln Y/Y_{max}$. Lawless et Robert (2001) ont observé ce type de profil immédiatement à l'amont de l'obstacle. Lorsque l'écoulement s'approche d'un élément de rugosité important, les fluctuations commencent à augmenter pour des hauteurs au-dessus du lit égales à la moitié de la hauteur moyenne des obstacles qui composent la surface du lit. Plus près du lit, les $rmsu$ restent inférieurs à 4 cm/s. Les profils qui se définissent par quatre segments ne représentent que 7 % de l'ensemble des profils récoltés (tableau 4.4).

Pour les trois derniers types de profil, l'écart-type près du lit s'élève jusqu'à 0,6 et 0,8 cm/s fois les valeurs maximales observées sur chacune des sections. Les fluctuations des vitesses longitudinales par rapport à la moyenne s'intensifient et les gradients de fluctuation sont plus importants. On suppose alors que ces profils se positionnent à l'aval des transitions de rugosité qui modifient les fluctuations des vitesses longitudinales de l'écoulement à différentes hauteurs au-dessus du lit. Les profils qui sont composés de trois segments sont d'abord caractérisés par de forts $rmsu$ pour toute la partie proximale du lit. Sur la portion centrale du profil, les $rmsu$ diminuent légèrement et dans les huit derniers centimètres du profil, près de la surface de l'eau, on observe une augmentation. Ces profils reflètent une augmentation significative des $rmsu$ sur un peu moins de la moitié de l'épaisseur de la tranche d'eau ce qui correspond à $-1,0 \ln Y/Y_{max}$. À la surface de l'eau, les effets de l'obstacle sur les vitesses de l'écoulement ne se font pratiquement plus sentir. Plus on s'éloigne de l'obstacle, plus on observe une diminution de $rmsu$ dans la zone proximale du lit. Les effets de l'obstacle s'atténuent particulièrement pour des hauteurs inférieures à environ $-1,0 \ln Y/Y_{max}$.

Les profils concaves sont aussi caractérisés par une augmentation des écarts-types jusqu'à un peu moins de 0,5 fois la profondeur totale et ensuite par une diminution jusqu'à la surface de l'eau. Les plus hautes valeurs de *rmsu* atteignent 0,8 fois les valeurs maximales observées sur le tronçon de cours d'eau. Pour les profils convexes, les *rmsu* diminuent à chacune des hauteurs au-dessus du lit. Ils semblent de moins en moins sensibles à la présence de l'obstacle. Les profils ont tendance à retrouver une forme linéaire.

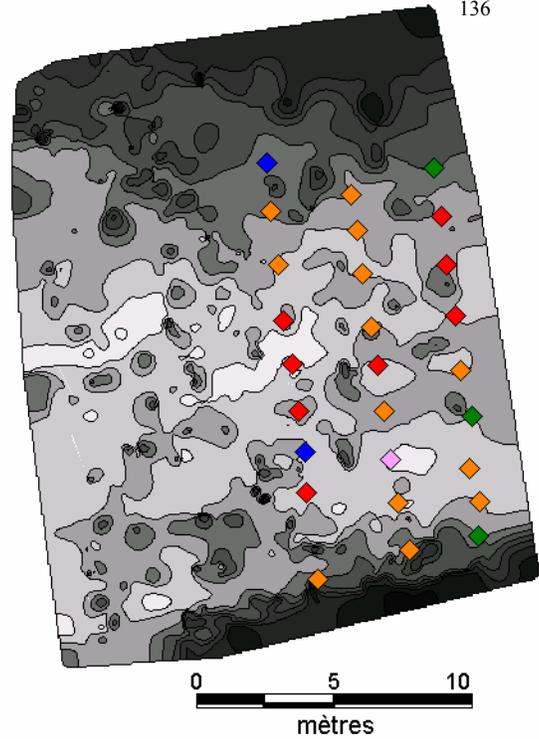
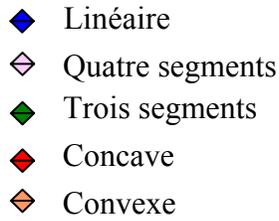
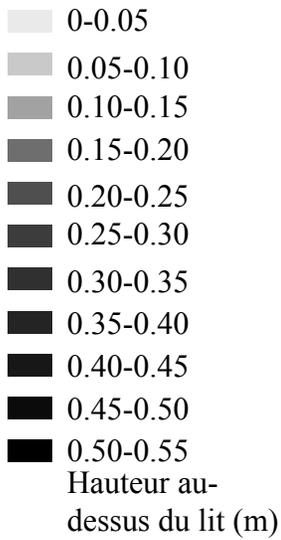
4.3.4) Distribution spatiale des profils types de *rmsu*

La figure 4.10 présente les différents types de profil de *rmsu* en fonction de leur position dans l'espace. Leur répartition reflète les principaux changements de rugosité à la surface du lit. Les profils s'expriment en fonction de la distance à laquelle ils se trouvent d'un obstacle majeur de l'écoulement. Ils aussi ont tendance à se regrouper dans l'espace par rapport aux zones où l'on note des changements dans la concentration des obstacles à la surface du lit.

Les profils linéaires se situent à des distances moyennes de 2,8 m à l'aval d'un obstacle (tableau 4.5). Ce sont les profils qui s'éloignent le plus d'un élément de rugosité. En 1999, ce type de profils se retrouve uniquement dans la portion amont de la section échantillonnée alors qu'en 2000, on le retrouve particulièrement près des berges où l'on observe peu de changements morphologiques à la surface du lit. Les profils linéaires qui se positionnent au centre du chenal sont influencés par les profondeurs de l'écoulement. En fait, dans cette portion du chenal, le ratio entre la taille des obstacles et la profondeur de l'écoulement diminue. La présence des obstacles à la surface du lit n'influence pas les caractéristiques moyennes de l'écoulement. Enfin, pour les deux campagnes, les profils linéaires se positionnent sur des portions du lit où l'on observe une faible concentration d'obstacles à l'amont et où les changements topographiques de la surface du lit sont peu accentués. Pour toutes les hauteurs au-dessus du lit, on observe peu de fluctuations de vitesse par rapport aux vitesses moyennes de l'écoulement.

À partir de leur forme et de leur distance moyenne à un obstacle sur une coupe longitudinale, nous avons estimé que les profils de *rmsu* divisés en quatre segments devraient se positionner immédiatement à l'amont d'un obstacle en raison des écarts-types qui augmentent dans la section proximale du lit. Seulement, à partir des cartes de

a)



b)

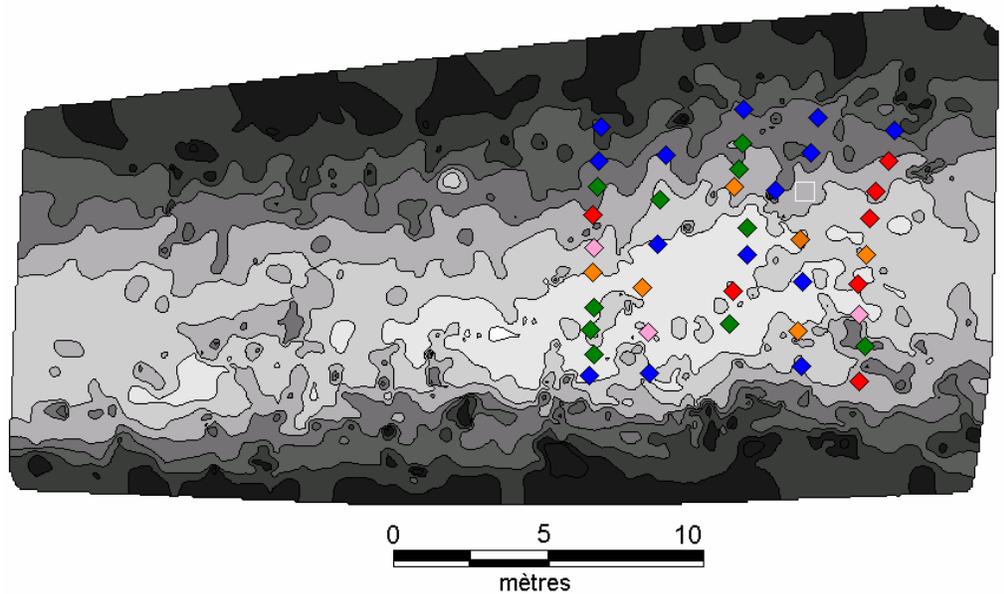
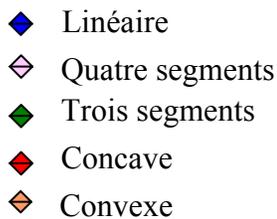
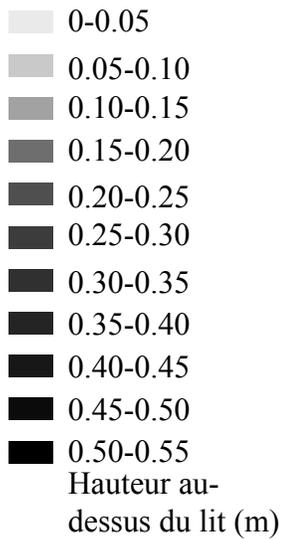


Figure 4.10: Distribution spatiale des profils types de *rmsu* en fonction de la morphologie du lit: a) 1999, b) 2000.

Types de profil	Distance moyenne à l'obstacle (1999)	Distance moyenne à l'obstacle (2000)	Moyenne des distances pour les deux campagnes
Linéaire	2,8m (aval)	2,9 m (aval)	2,8 m
Concave	1,4 m (aval)	2,6 m (aval)	2,0 m
Convexe	2,7 m (aval)	2,6 m (aval)	2,6 m
Trois segments	2,6 m (aval)	1,8 m (aval)	2,2 m
Quatre segments	1,5 (amont)	1,2 m (amont)	1,4 m

Tableau 4.5: Distance des profils types de *rmsu* à un obstacle protubérant à la surface du lit.

distribution de profils cette relation est beaucoup moins claire. En effet, un profil sur deux se positionne réellement à l'amont d'un obstacle important la surface du lit. Le cas échéant, ils se trouvent à une distance moyenne de 1,4 m de l'obstacle. Or, il est fréquent d'observer les profils en quatre segments dans des sections où l'on observe peu de variabilité topographique et où la présence des obstacles ne se manifeste pas particulièrement dans l'environnement proximal du profil. La forme de ces profils est donc difficile à interpréter à partir des cartes morphologiques du lit.

Pour les deux campagnes, les profils en trois segments et les profils concaves se situent à l'aval d'obstacles importants ou à l'aval de zones où l'on observe une accumulation de plus petits obstacles ayant une taille inférieure à 10 cm. Ils reflètent donc bien les éléments morphologiques du lit. Les profils se positionnent à des distances moyennes de 2,2 et 2 m respectivement à l'aval d'un élément de rugosité. Seulement, en 2000, certains profils se retrouvent aussi dans des sections de faible rugosité notamment ceux qui sont échantillonnés sur la coupe transversale située la plus à l'aval du tronçon de cours d'eau. Les profils concaves se regroupent dans l'espace près de la berge gauche et on observe peu de variabilité topographique dans ces sections. Leur position pourrait s'expliquer par des perturbations morphologiques ayant lieu à des distances supérieures à 2,2 m à l'amont. Les profils seraient alors de reflet de perturbations antérieures persistantes.

Enfin, les profils de *rmsu* convexes se retrouvent à des distances moyennes de 2,6 m. Ces profils à l'aval distal d'obstacles montrent des valeurs d'écart-types qui diminuent à toutes les élévations au-dessus du lit et une segmentation qui n'est pratiquement plus apparente. Leur distribution spatiale montre que pour être observé dans l'écoulement ce type de profil doit se positionner dans des environnements où l'on observe peu de variabilité morphologique. Il est fréquent d'observer un profil convexe directement à l'aval d'un autre. La forme des profils persiste sur des distances qui peuvent s'élever jusqu'à quatre mètres, soit sur plus d'une coupe transversale, si l'écoulement n'est pas soumis à de nouvelles perturbations à la surface du lit.

Les profils types de *rmsu* s'organisent aussi de façon séquentielle en fonction des changements morphologiques amont-aval de la surface du lit à l'échelle d'un tronçon de cours d'eau. Ces séquences apparaissent une fois l'écoulement en contact avec un obstacle.

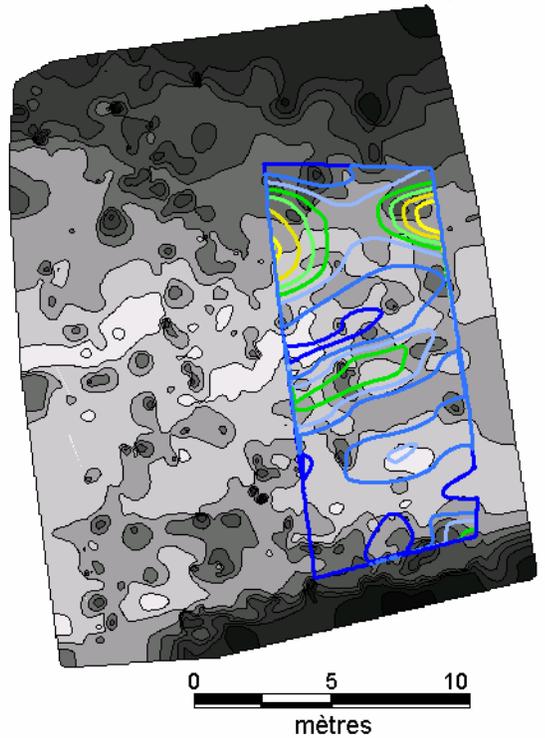
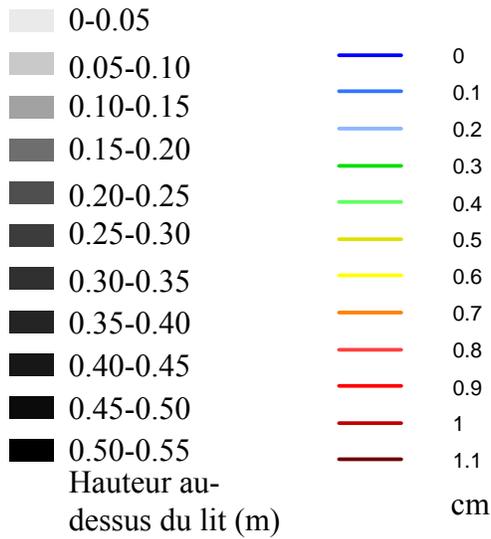
Les différents types de profil se présentent habituellement sous la séquence suivante : 1) trois segments, 2) concave, 3) convexe, 4) linéaire et 5) quatre segments. À partir des distances moyennes à un obstacle et de la forme des profils, on observe que les quatre premiers types de profils se retrouvent à l'aval d'un obstacle. Les profils en quatre segments devraient se positionner immédiatement à l'amont d'un obstacle subséquent à la surface du lit. Les profils linéaires soumis à la présence d'obstacles se transforment fréquemment en profil de trois segments. Par contre, à partir des cartes de répartition de l'ensemble des obstacles à la surface du lit, les profils en quatre segments n'apparaissent que dans quelques cas immédiatement à l'amont d'obstacle. Non seulement la distance à l'obstacle est alors essentielle pour caractériser les changements dans la forme des profils mais la concentration des éléments de rugosité à la surface du lit joue aussi un rôle important. Enfin, les profils concaves sont dans la majorité des cas suivis vers l'aval de profils convexes. Ces derniers persistent généralement avant de retrouver leur forme linéaire s'ils ne sont pas soumis à de nouvelles perturbations.

4.3.5) Liens entre la variabilité des caractéristiques de l'écoulement obtenues à partir des profils de vitesse et les changements morphologiques du lit

La variabilité des valeurs de y_0 , du cisaillement et de $rmsu$ estimées à partir des profils de vitesse est liée à une description détaillée des cartes topographiques du lit. Cette superposition permet de montrer les liens qui existent entre la morphologie du lit et la distribution spatiale des caractéristiques turbulentes de l'écoulement.

La variabilité des valeurs de y_0 estimées à partir des profils de vitesse est le reflet des changements morphologiques qu'on perçoit à partir de la cartographie détaillée du lit (figure 4.11). En 1999 par exemple, les corridors où les valeurs de y_0 sont plus élevées sont liés aux zones où la concentration des obstacles est plus importante, particulièrement près de la berge gauche ainsi que dans la section centrale du chenal. La taille des obstacles est une particularité qui est moins importante que le nombre d'obstacles qui s'accumule à la surface du lit. La diminution des valeurs de y_0 apparaît pour des sections de rugosité relativement homogène. En fait, les zones de faibles valeurs sont associées à la présence des creux topographiques les plus importants à la surface du lit. Pour la campagne effectuée en 2000, la correspondance entre les valeurs estimées à partir des profils de vitesse et les éléments de rugosité cartographiés est aussi impressionnante. Les zones où

a)



b)

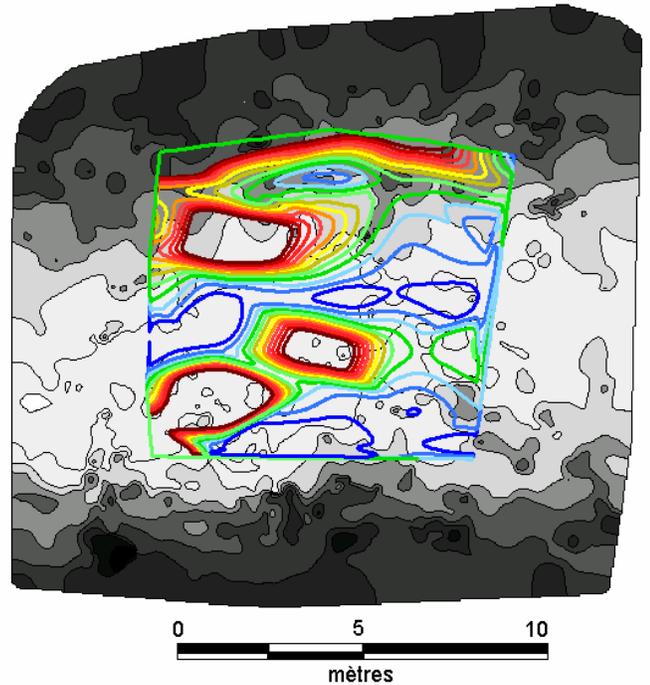
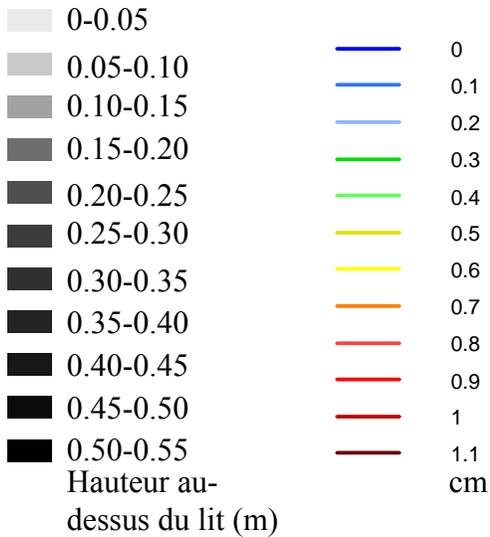


Figure 4.11 : Distribution spatiale des valeurs de y_0 (cm) en fonction de la morphologie du lit : a) 1999, b) 2000.

l'on observe une augmentation des valeurs de y_0 apparaissent à l'aval de concentrations d'obstacles plus importantes.

Les contraintes de cisaillement (τ) varient dans l'espace en fonction des éléments ponctuels de rugosité à la surface du lit. La taille et la concentration de ces obstacles interviennent sur les valeurs maximales de cisaillement. Le noyau des zones maximales de cisaillement est localisé directement au-dessus d'obstacles importants (figure 4.12). La zone où les valeurs sont maximales peut apparaître après un certain délai. Par exemple, en 1999, on observe que les valeurs maximales de cisaillement dans la portion aval, près de la berge gauche, s'éloignent de l'obstacle principal de cette section. Les répercussions d'un obstacle sur les valeurs de cisaillement sont importantes à l'échelle spatiale. Les effets des éléments de rugosité peuvent se faire sentir sur des distances de 5,2 m vers l'aval et vers l'amont. Les zones de transition de rugosité du lit ont aussi une influence sur les valeurs de cisaillement. Dans ce cas, la force de traction augmente beaucoup moins rapidement dans l'espace. Pour les données recueillis en 2000, on remarque une diminution progressive des effets de la rugosité du lit sur le cisaillement. Les zones de faibles valeurs de cisaillement se positionnent particulièrement près des berges. À l'étiage, l'influence de la morphologie du lit sur le cisaillement se fait sentir surtout au centre de l'écoulement. Dans la portion centrale de la section d'étude, les valeurs de cisaillement peuvent s'élever jusqu'à 47 N/m².

La répartition spatiale des valeurs de $rmsu$ près du lit est particulièrement influencée par les changements morphologiques. La correspondance entre les zones de forts $rmsu$ et les portions du chenal qui comprennent une grande densité d'obstacles de taille importante est frappante (figure 4.13). En 1999, en bordure de la berge gauche, la zone d'augmentation des fluctuations de vitesse longitudinale est directement associée à la présence d'un obstacle protubérant à moins d'un mètre. L'écart-type de la distribution des vitesses longitudinales augmente déjà à l'amont de l'obstacle pour atteindre son maximum directement au-dessus de la portion la plus élevée de la surface du lit dans cette section du chenal. Il tend enfin à diminuer progressivement vers l'aval. Au centre du chenal, l'augmentation des $rmsu$ est associée à une dépression topographique. Les fortes valeurs peuvent alors refléter les obstacles qui se positionnent à l'amont. Les valeurs maximales sont observées immédiatement à l'aval de surélévation de la surface du lit. L'effet de l'obstacle se fait sentir pour des distances d'environ 5 mètres. À partir de cette distance, les fluctuations deviennent moins importantes. La dernière zone où l'on observe de fortes

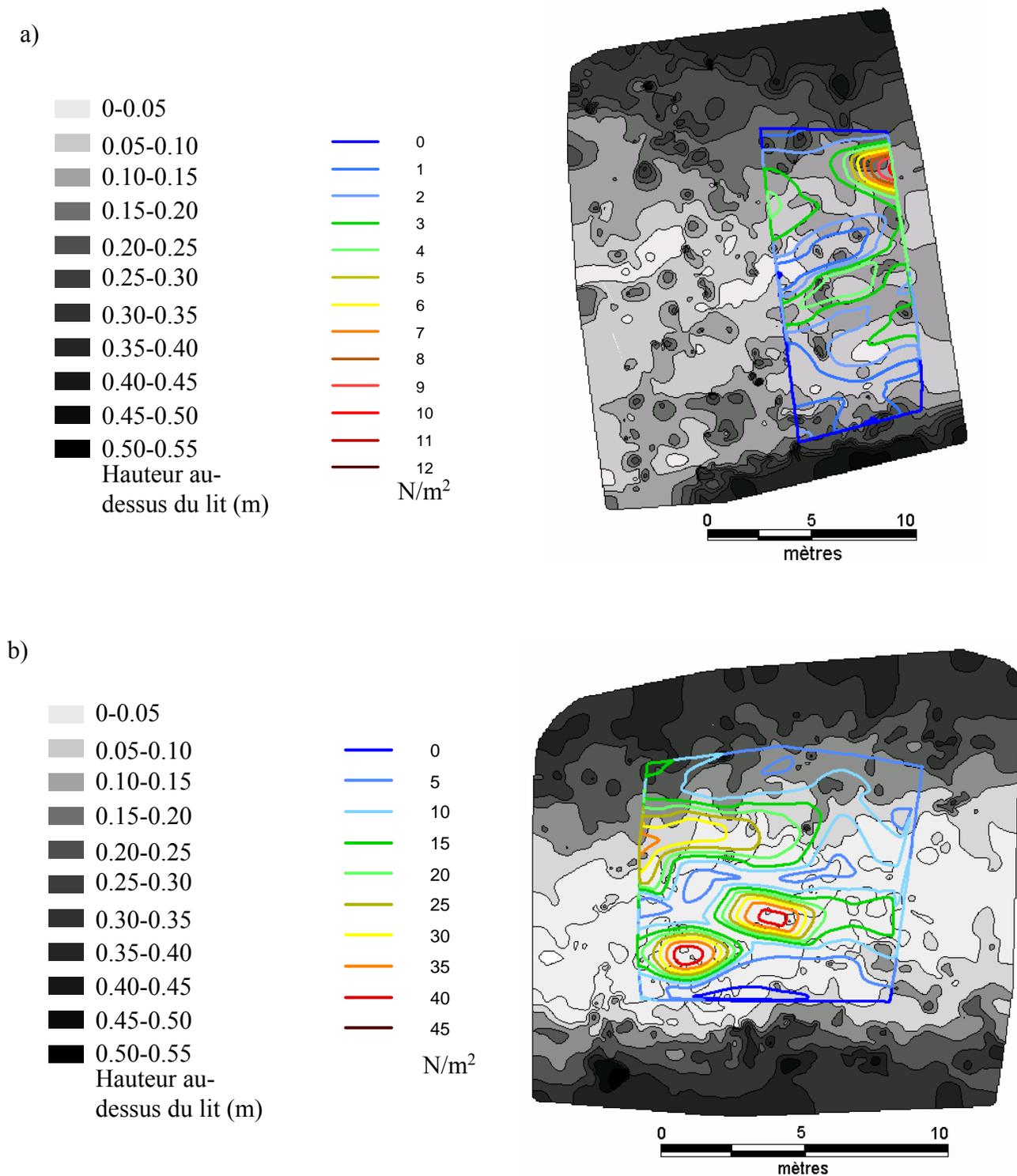
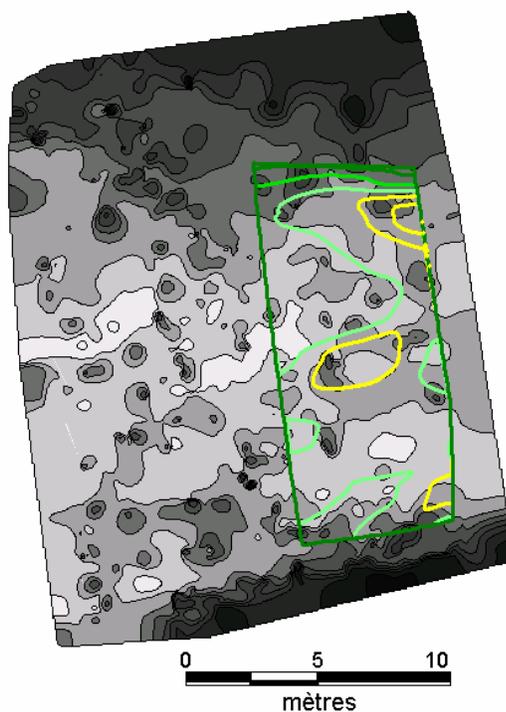
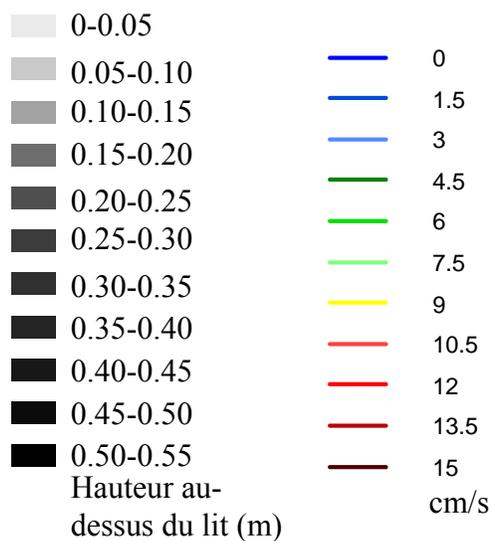


Figure 4.12: Distribution spatiale des valeurs de cisaillement (N/m^2) en fonction de la morphologie du lit: a) 1999, b) 2000.

a)



b)

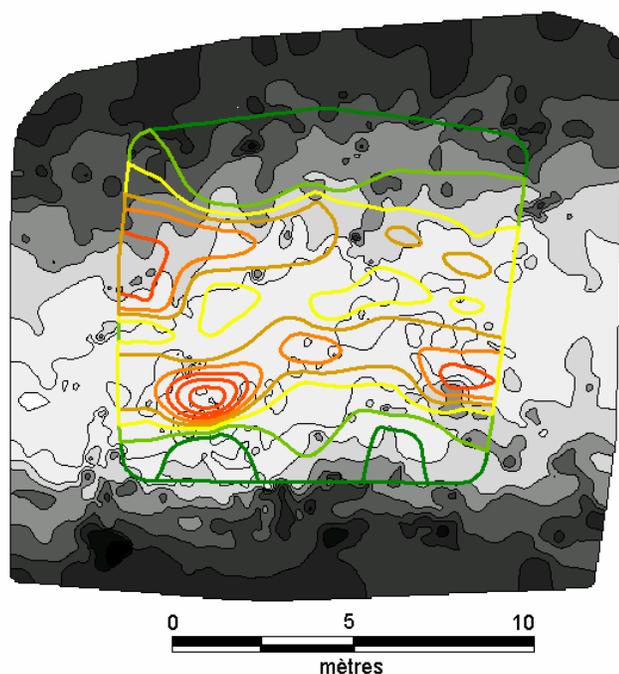
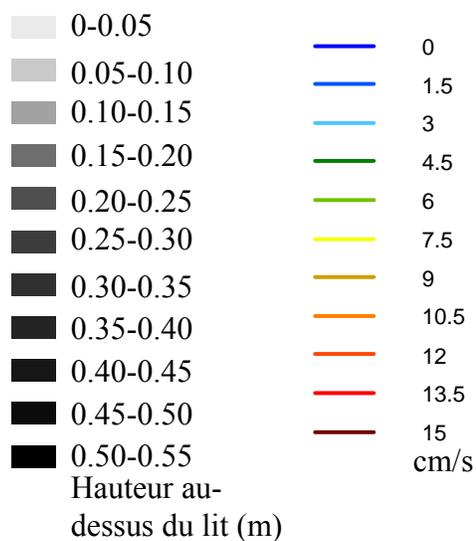


Figure 4.13 : Distribution spatiale des valeurs de *rmsu* en fonction de la morphologie du lit: a) 1999, b) 2000.

valeurs de *rmsu* est localisée près de la berge droite où l'on observe des dénivellations topographiques importantes. Les changements topographiques modifient les échelles de rugosité qui peuvent influencer les fluctuations des vitesses de l'écoulement sur une section de rivière. En 2000, l'augmentation des valeurs de *rmsu* est liée à l'augmentation du nombre et de la taille des obstacles près de la berge. Les portions du chenal où l'on observe peu de changements morphologiques sont associées à de faibles valeurs de *rmsu*.

4.4) DISCUSSION

L'identification de différents types de profil de vitesse longitudinale et de *rmsu* contribue à une meilleure compréhension de l'effet de la morphologie du lit et surtout des obstacles protubérants à l'écoulement dans les cours d'eau à lit de graviers. Ces obstacles jouent un rôle crucial sur les échelles de rugosité, les vitesses longitudinales, les fluctuations de vitesse et le cisaillement au lit. Les liens entre les changements morphologiques du lit et la variabilité des caractéristiques de l'écoulement sur un tronçon de cours d'eau peuvent être décrits en fonction de la position des obstacles à la surface du lit.

Contrairement à Lawless et Robert (2001) par exemple, où les profils ont été récoltés en laboratoire et autour d'éléments de rugosité espacés de façon régulière dans l'espace, on observe beaucoup plus de variabilité dans la forme des profils de vitesse que nous avons échantillonnés sur le terrain. Nous avons d'abord identifié les profils linéaires qui ont fréquemment été décrits au-dessus de surface où les particules du lit ont une taille relativement homogène (Bayazit, 1975; Hey, 1979; Krogstad et Antonia, 1999; Smart 1999). Ils sont caractéristiques de l'échelle de rugosité associée à la taille des grains (Clifford *et al.*, 1992). Ces profils ne montrent aucune rupture de pente importantes et présentent de faibles gradients sur l'ensemble de la tranche d'eau (Robert *et al.*, 1992, 1996). Nous avons différencié les profils linéaires des profils linéaires dont la pente est inférieure à 7%. Ces derniers ne montrent aucune rupture de pente importantes et présentent des vitesses similaires à proximité du lit mais les gradients de vitesse sont un peu plus accentués. Ils font alors partie d'une classe distincte et représentent le retour des profils à leur forme linéaire. Soumis à la présence d'obstacles, les profils ont tendance à se segmenter en deux parties ayant des caractéristiques distinctes (Krogstad *et al.*, 1992). La partie inférieure serait toujours liée à l'échelle de rugosité des grains et la partie supérieure

à la présence des formes à la surface du lit (Nowell et Church, 1979; Robert, 1990). Les profils concaves et convexes se trouvent à l'aval d'éléments de rugosité. Ils sont particulièrement caractérisés par des vitesses plus lentes près du lit en raison de l'augmentation des forces de résistance créées par la présence d'un obstacle majeur sur le lit. Mis à part ces types de profils qui ont été décrits dans la littérature, nous avons observé la présence de profils types de vitesse longitudinale qui sont fonction des caractéristiques locales de l'environnement dans lequel ils se trouvent. Le profil dont la pente est négative se trouve au-dessus d'un obstacle et celui dont la pente est inférieure à 7% avec un ralentissement à sa base semble le reflet d'anciennes perturbations liées à la présence de plusieurs éléments de rugosité dont la taille est inférieure à 10 cm.

Nous avons aussi identifié différents types de profils de *rmsu* qui sont décrits en fonction du nombre de segments qui les compose. Les profils linéaires montrent des valeurs de *rmsu* variables près du lit mais sur l'ensemble du profil ces valeurs sont constantes. Lorsqu'ils sont soumis à la présence d'éléments de rugosité, les profils de *rmsu* se caractérisent par plusieurs segments (Nowell et Church, 1979). La hauteur où les valeurs maximales de *rmsu* sont observées augmente avec la proximité des profils à l'aval d'un élément de rugosité (Tacchie, 2000; Lawless et Robert, 2001b). Les profils en trois segments se retrouvent alors immédiatement à l'aval d'un obstacle. C'est généralement sur ces profils que l'on observe l'augmentation la plus importante des *rmsu* du lit jusqu'à $-1,0 \ln Y/Y_{max}$. On observe aussi cette augmentation sur les profils concaves mais les gradients de *rmsu* sont dans la majorité des cas plus faibles. Sur les profils convexes, on observe une diminution des écarts-types pour des hauteurs inférieures à $-1.5 \ln Y/Y_{max}$ près du lit. Les profils ont tendance à reprendre leur forme linéaire s'ils ne sont pas soumis à de nouvelles perturbations.

La forme des profils peut s'exprimer en fonction de la distance à un obstacle qui possède une hauteur égale ou supérieure à 10 cm. Au-dessous de cette taille les obstacles n'ont pas été répertoriés comme étant des éléments de rugosité protubérants. La taille et la distance d'un obstacle qui se trouve en amont d'un profil sont alors les principaux indicateurs des changements spatiaux de la structure de l'écoulement à l'échelle d'une section de rivière. Seulement, ces distances sont estimées à partir d'une seule coupe topographique longitudinale en amont d'un profil de vitesse ou de *rmsu*. Elles ne tiennent pas nécessairement compte des changements dans la concentration et dans la taille des

obstacles qui se trouvent sur des coupes voisines mais toujours à l'amont des profils. Le détail des cartes morphologiques du lit est un outil supplémentaire pour expliquer les patrons séquentiels des changements dans la forme des profils. Il permet aussi d'identifier les zones de fortes valeurs de *rmsu*, de hauteur où la vitesse est nulle et de cisaillement. La cartographie détaillée des formes du lit s'avère alors un outil de prévision de la structure verticale des vitesses de l'écoulement.

La figure 4.14 présente les modifications de l'écoulement à partir des profils de vitesse en fonction de la distribution spatiale des éléments de rugosité à la surface du lit. Le premier cas présente les séquences typiques de changement dans la forme des profils de vitesse en fonction d'un seul obstacle à la surface du lit. Les profils de vitesse varient en fonction de leur distance par rapport à la présence de l'élément de rugosité. À l'aval de l'obstacle, les profils concaves expriment le ralentissement des vitesses dans la section proximale du lit. L'effet de l'obstacle sur la segmentation des profils peut se faire sentir sur des distances d'environ 14 fois la hauteur minimale des obstacles les plus importants répertoriés à la surface du lit. Cet effet s'atténue sur des distances allant jusqu'à 17 fois la hauteur de l'obstacle. Au-delà de cette distance, lorsqu'il n'est plus soumis à des changements de rugosité, le profil de vitesse tend vers son état linéaire. La segmentation des profils n'est pratiquement plus apparente et les gradients de vitesse sont semblables dans la portion supérieure et inférieure du profil. Pour retrouver sa forme linéaire, les profils de vitesse doivent se retrouver à des distances égales ou supérieures à 26 fois la hauteur de l'obstacle. L'augmentation des vitesses du lit vers la surface n'est alors qu'associée aux grains qui ont une forme et une taille relativement homogène et qui sont fortement imbriqués sur une portion du chenal.

En présence d'un seul obstacle, on observe aussi une séquence amont-aval dans la répartition des profils de *rmsu*. D'abord, le profil qui se divise en quatre segments se positionne à des distances de 13 fois la hauteur minimale des obstacles vers l'amont. Déjà à cette distance, l'écoulement est influencé par les éléments morphologiques du lit. À l'aval de l'obstacle, on voit apparaître des profils qui prennent une forme concave ou en trois segments. Ces profils se retrouvent à des distances de 20 à 22 fois la hauteur de l'obstacle. Dans certains cas les profils concaves sont les premiers à se former à l'aval de l'obstacle mais les profils en trois segments peuvent aussi prendre cette position. Ces deux types de profil expriment de fortes augmentations des valeurs de *rmsu* près du lit. Leur

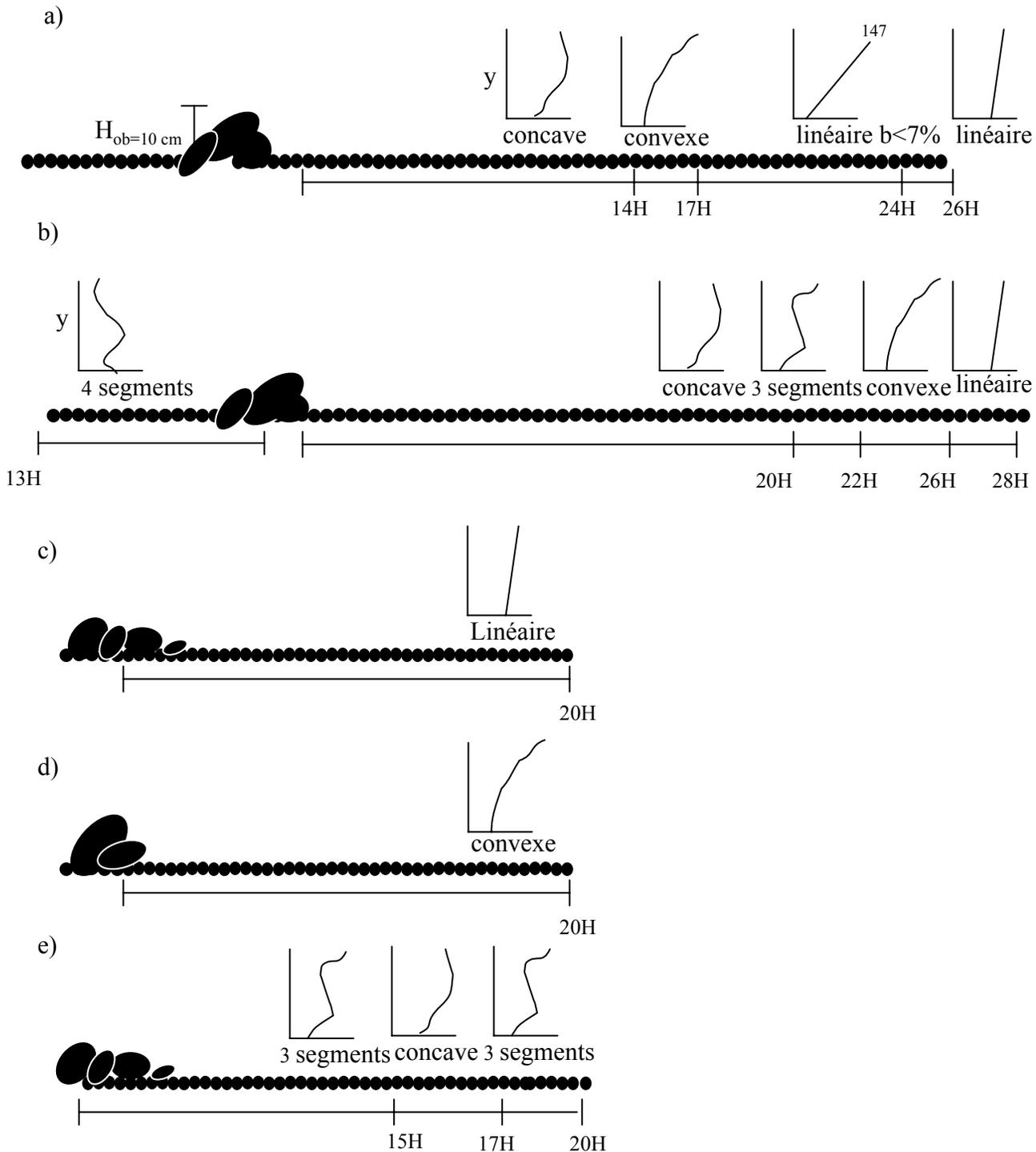


Figure 4.14 : Changements séquentiels de forme de profils de vitesse et de $rmsu$ en fonction de la distance moyenne à un obstacle (a et b) et de l'ensemble des éléments morphologiques à la surface du lit (c, d, e). a) Séquence type des profils de vitesse longitudinale de l'écoulement en fonction d'un obstacle. b) Séquence type des profils de $rmsu$ en fonction d'un obstacle. c) Effet de l'augmentation du nombre d'obstacles sur la séquence de profil de vitesse. d) Effet de l'augmentation de la taille d'un obstacle sur la séquence de profil de vitesse longitudinale. e) Effet de l'augmentation du nombre d'obstacles sur la séquence de profil de $rmsu$.

distribution séquentielle s'explique donc en fonction des gradients de *rmsu* qui varient dans la portion centrale du profil. On suppose alors que les profils concaves devraient se positionner immédiatement à l'aval d'éléments de rugosité dans la mesure où l'obstacle offre une résistance assez importante pour modifier les *rmsu* sur plus de la moitié du profil. Dans le cas où l'influence des obstacles se ferait moins sentir sur l'écoulement, les profils en trois segments qui expriment une diminution des *rmsu* dans la portion supérieure du profil seraient les premiers à apparaître à l'aval de l'obstacle. Le retour du profil à sa forme linéaire passe d'abord par les profils convexes. Ces profils montrent une diminution des valeurs moyennes de *rmsu* sur toute la tranche d'eau. Ils se positionnent à des distances égales à 26 fois la hauteur de l'obstacle. Enfin, l'obstacle ne modifie plus la forme des profils de *rmsu* pour des distances égales ou supérieures à 28 fois sa hauteur.

Les conditions morphologiques présentées représentent un idéal en milieu naturel pour observer les séquences de profil de vitesse et de *rmsu*. En réalité, les amas de galets et les blocs sont nombreux et leur concentration varie dans les cours d'eau à lit de graviers. Leur organisation à l'échelle d'une section de cours d'eau intervient alors sur les séquences de profil. Nous présentons différentes possibilités en ce qui a trait à la taille et au nombre d'éléments de rugosité à la surface du lit en milieu graveleux. En ajoutant un seul obstacle à la surface du lit, on observe des changements importants notamment sur la distance nécessaire aux profils de vitesse pour retrouver leur forme linéaire, avant d'être soumis à de nouveaux éléments de rugosité.

En présence d'obstacles dont la taille est inférieure à la taille minimale des obstacles protubérants identifiés à partir des cartes morphologiques du lit, la phase de retour à l'état linéaire des profils de vitesses longitudinales s'effectue pour des distances plus courtes que celles observées pour les séquences typiques et ce, même si la concentration des obstacles augmente. Les profils linéaires, en présence de nombreux obstacles de taille inférieure à 10 cm, peuvent prendre place dans l'écoulement pour des distances inférieures à 20 fois la hauteur des obstacles protubérants alors que pour un seul obstacle ayant une taille plus importante nous avons observé que les profils linéaires ne pouvaient pas apparaître à des distances inférieures à 26 fois la hauteur de l'obstacle (figure 4.14b). Lorsqu'on augmente la hauteur d'un obstacle à la surface du lit, le retour des profils linéaires se fait pour des distances plus importantes (figure 4.14c). Les profils

convexes sont alors observés pour des distances supérieures à 17 fois la hauteur de l'obstacle.

D'autres exemples peuvent aussi être développés à partir des patrons séquentiels de changement de forme de profils de *rmsu*. L'augmentation du nombre d'obstacles dans la section permet d'observer une persistance des fortes fluctuations de vitesse, notamment près du lit. Une des séquences que l'on voit apparaître fréquemment est d'abord constituée de profils en trois segments. Ces profils se positionnent à des distances vers l'aval inférieures à 22 fois la hauteur minimale des obstacles protubérants. Ils sont fréquemment suivis de profils concaves à de faibles distances vers l'aval. Ensuite, ils peuvent à nouveau se segmenter. Les distances entre les types de profil sont en moyenne de 2,5 fois la hauteur d'un obstacle.

4.5) CONCLUSION

Les liens entre les éléments morphologiques du lit et la structure de l'écoulement ont été investigués en utilisant en simultanée différentes stratégies d'échantillonnage. La cartographie détaillée de la surface du lit permet d'extraire les principaux éléments morphologiques qui façonnent le lit dans les rivières graveleuses. Les blocs et les amas de galets sont identifiés en terme d'obstacles majeurs à l'écoulement. À l'échelle de la section de cours d'eau, on suppose que ces formes contribuent largement aux changements de la structure de l'écoulement. Les vitesses récoltées à haute résolution spatiale et temporelle permettent de décrire l'écoulement à plusieurs hauteurs au-dessus du lit ainsi qu'à de nombreuses positions dans l'espace en fonction de la présence des obstacles. L'échantillonnage des vitesses longitudinales nous a permis de décrire en détail les profils de vitesse longitudinale et de *rmsu* et d'estimer la hauteur au-dessus du lit pour laquelle les vitesses sont nulles, l'écart-type des distributions de vitesse longitudinale ainsi que le cisaillement au lit.

Les profils de vitesse longitudinale et de *rmsu* montrent de quelles manières les obstacles contribuent aux modifications de l'écoulement à différentes hauteurs au-dessus du lit. Les gradients et la forme des profils expriment l'effet des obstacles, sur la variabilité verticale de l'écoulement à l'échelle locale. On peut alors observer que les obstacles influencent particulièrement les vitesses et les *rmsu* dans l'environnement proximal du lit.

Lorsque les profils ne sont pas soumis à l'effet des obstacles ces derniers gardent leur forme linéaire caractéristique des écoulements turbulents sur une surface plus lisse. Non seulement les profils expriment l'effet des obstacles sur l'écoulement en fonction de différentes hauteurs au-dessus du lit mais ils sont le reflet des changements de rugosité qui apparaissent à l'amont (Smart, 1999). Ils expliquent alors une part de la variabilité spatiale des caractéristiques turbulentes de l'écoulement à l'échelle du tronçon de cours d'eau. Soumis à un seul obstacle, les types de profils de vitesse longitudinale et d'intensité turbulente se positionnent en suivant un patron séquentiel de l'amont vers l'aval. Seulement, les obstacles sont nombreux dans les cours d'eau à lit de graviers. Leur taille et leur concentration dans l'espace modifient l'organisation des types de profil.

Cette étude a permis de montrer que la cartographie détaillée de la topographie du lit s'avère un outil efficace pour identifier les principales formes à la surface du lit et conséquemment, d'évaluer les effets des changements de rugosité sur des profils de vitesse et de *rmsu*. Les vitesses échantillonnées à différentes hauteurs au-dessus du lit peuvent être aussi utilisées pour détailler la signature turbulente de l'écoulement à l'échelle de la section de cours d'eau. L'identification et la caractérisation des structures turbulentes de l'écoulement devraient être jumelées à la distribution spatiale des éléments de rugosité à la surface du lit. L'étude de la variabilité spatiale des structures turbulentes à cette échelle permettrait de mieux comprendre les liens entre les formes du lit, la structure de l'écoulement et le transport des sédiments ainsi que de mieux saisir l'influence de ces relations sur la morphologie du cours d'eau. Enfin, un échantillonnage à haute résolution spatiale dans des zones de la surface du lit caractérisées par des patrons typiques d'organisation des formes du lit comme les alignements et les structures circulaires est essentiel pour déterminer dans quelle mesure l'organisation des formes du lit influence ou reflète la structure de l'écoulement.

5) CONCLUSION

L'organisation des blocs et des amas de galets qui composent la surface du lit dans les rivières à lit de graviers et les liens qui existent entre les éléments de rugosité et l'écoulement sont des composantes essentielles de la dynamique fluviale. Ces éléments de rugosité agissent sur la résistance à l'écoulement et entraînent des modifications importantes sur la morphologie des cours d'eau. Une connaissance approfondie de l'ensemble de ces composantes permet de mieux saisir les relations entre les formes du lit, l'écoulement et le transport des sédiments dans un milieu où les particules sont hétérométriques et où l'on observe différents agencements de cailloux.

Les contributions de ce projet reposent d'abord sur l'élaboration de nouvelles stratégies d'échantillonnage qui permettent de caractériser le lit et l'écoulement d'un tronçon de rivière à lit de graviers. La cartographie détaillée de la topographie du lit peut être réalisée pour un éventail de conditions liées à la taille des sections de cours d'eau. Un échantillonnage systématique du lit permet de bien extraire les éléments de rugosité à partir des cartes résultantes. Ce type d'échantillonnage requiert peu de décisions sur le terrain. Il constitue donc un outil prometteur en ce qui a trait à la caractérisation et à l'organisation des principaux éléments de rugosité. Il est aussi un outil complémentaire idéal qui peut être jumelé à d'autres types de mesure. En effet, la cartographie peut être effectuée en même temps qu'un échantillonnage des vitesses de l'écoulement à l'échelle d'un tronçon de cours d'eau. Cette combinaison permet de décrire l'écoulement en fonction de la position des principaux éléments de rugosité à des conditions hydrauliques constantes.

Les résultats obtenus permettent aussi une meilleure compréhension 1) des lits de graviers et 2) de l'influence des éléments de rugosité sur la variabilité spatiale des caractéristiques de l'écoulement. Nous avons d'abord identifié que la densité des obstacles est plus importante dans les portions les moins profondes du chenal. Aussi, les caractéristiques d'organisation des principaux éléments de rugosité sont similaires à celles observées pour des distributions aléatoires et ce peu importe la méthode d'échantillonnage. Ces résultats nous ont permis de proposer certaines interprétations liées à l'accumulation et à l'organisation des éléments de rugosité à la surface du lit. Lors de période de réduction de débit, les éléments les plus importants en terme de taille se localisent en fonction des profondeurs d'eau. Le positionnement des éléments de rugosité subséquents est fonction

des caractéristiques des obstacles déjà présents à la surface. Enfin, l'organisation apparente des formes du lit comme les alignements est aléatoire et leur formation ne serait liée qu'à la taille de la section de cours d'eau et au nombre d'éléments de rugosité.

L'organisation des éléments de rugosité dans les cours d'eau à lit de graviers semble refléter celle de l'écoulement. Nous avons observé que la distance à l'obstacle est un bon indicateur pour prédire la forme des profils de vitesse dans les cours d'eau à lit de graviers. Elle permet d'estimer les vitesses longitudinales, les *rmsu*, la hauteur où la vitesse est nulle et le cisaillement à différentes hauteurs au-dessus du lit. À l'échelle du tronçon de cours d'eau, on voit apparaître des séquences typiques de profils de vitesse et de *rmsu* en fonction de changements dans la rugosité du lit. Ces changements ont des effets sur l'écoulement pour de longues distances vers l'aval. En présence d'un seul élément de rugosité, les séquences reflètent les modifications de l'écoulement à l'aval d'obstacles. Seulement, les conditions où nous sommes en présence d'un seul obstacle à la surface du lit sont fort peu probables dans les cours d'eau à lit de graviers. Les éléments de rugosité sont nombreux. La concentration et la taille des obstacles à l'écoulement vont alors aussi jouer un rôle important sur les séquences typiques de profil de vitesse le long d'une coupe longitudinale du cours d'eau.

Ce projet se poursuit sous des conditions dynamiques de l'écoulement. C'est-à-dire que la caractérisation du lit et de l'écoulement doit se faire sous des conditions où l'on observe un transport de sédiments. Ces conditions ont rarement été investiguées en milieu naturel en raison des problèmes d'échantillonnage notamment associés aux séries de vitesse de l'écoulement. Le déploiement d'appareils dans l'écoulement s'avère problématique, d'où la nécessité d'échantillonner les vitesses de l'écoulement à l'aide d'appareils non-intrusifs. Ces derniers permettent de caractériser l'écoulement à de forts débits et d'avoir une meilleure compréhension de la structure de l'écoulement au moment critique de la naissance des formes du lit en milieu graveleux. Non seulement l'influence des formes du lit sur l'écoulement pourrait alors être investiguée mais les effets de la structure de l'écoulement sur le positionnement des éléments de rugosité à la surface du lit pourraient nous permettre de proposer d'autres hypothèses qui expliqueraient comment les formes du lit s'organisent dans l'écoulement et reflètent la structure de l'écoulement sous des conditions de transport des sédiments.

6) BIBLIOGRAPHIE

ACARLAR M.S. ET SMITH, C.R., A study of hairpin vortices in a laminar boundary layer. Part 1. Hairpin vortices generated by a hemisphere protuberance, *Journal of fluid mechanics*, **175**, 1-41, 1987.

ALLEN, P.A., *Earth surface processes*, (ed) Blackwell science, chapitre 5, 404 p., 1997.

BATHURST, J.C., Flow resistance of large-scale roughness, **104**, *Journal of hydraulics division, Proceedings of the American society of civil engineers*, no. HY12, 1587-1603, 1978.

BATHURST, J.C., Theoretical aspects of flow resistance. In Hey, R.D., Bathurst, J.C. et Thorne, C.R., (ed) *Gravel-bed rivers: fluvial processes, engineering and management*, 83-108, 1982.

BAYAZIT, M., Free surface flow in a channel of large relative roughness, *Journal of hydraulic research*, **14**, no. 2, 115-127, 1975.

BLACKWELDER R.F. ET KOVASNAY L.S.G., Time scales and correlation in a turbulent boundary layer, *Physics of fluids*, **15**, no. 9, 1545-1555, 1972.

BERGERON, N.E., Scale-space analysis of streambed roughness in coarse gravel-bed streams, *Mathematical geology*, **28**, no. 5, 537-561, 1996.

BERGERON, N. ET CHARBONNEAU, P., The effect of sediment concentration on bedload roughness, *Hydrological processes*, **13**, 2583-2589, 1999.

BEST, J.L., On the interaction between flow structure, sediment transport and bedform development: some considerations from recent experimental research. In Clifford, N.J., French, J.R et Hardisty, J. (ed), *Turbulence: perspective on flow and sediment transport*, 61-92, 1993.

BILLI, P., A note on cluster bedform behaviour in a gravel-bed river, *Catena*, **15**, 473-481, 1988.

BIRON P.M, LANE, S., ROY., A.G., BRADBROOK, K.F., ET RICHARDS, K.S., Sensitivity of bed shear stress estimated from vertical velocity profiles : the problem of sampling resolution, *Earth surface processes and landforms*, **23**, 133-139, 1998.

BLUCK, B.J., Bed forms and clast size changes in gravel-bed rivers, In Richards, K.S., (ed) *River channels: environment and process*, chapitre 7, 159-179, 1987.

BOGARD, D.G. ET TIEDERMAN, W.G., Burst detection with single-point velocity measurements, *Journal of fluid mechanics*, **162**, 389-413, 1986.

BRADSHAW, P., *An introduction to turbulence and its measurements*, (ed) Pergamon Press, 218 p., 1971.

- BRAY, D.I., Evaluation of effective boundary roughness for gravel-bed rivers, *Canadian journal of civil engineering*, **7**, no. 2, 392-397, 1980.
- BRAY, D.I., Flow resistance in gravel-bed rivers. In Hey, R.D., Bathurst, J.C. et Thorne, C.R., (ed) *Gravel-bed rivers: fluvial processes, engineering and management*, 109-137, 1982.
- BRAYSHAW, A.C., *Bed microtopography and bedload transport in coarse-grained alluvial channels*, Ph. D. thesis : London, England, University of London, 415 p., 1983 .
- BRAYSHAW, A.C., Characteristics and origin of cluster bedforms in coarse-grained alluvial channels. In Koster, E.H and Steel, R.J., (ed) , *Sedimentology of gravels and conglomerates*, Canadian society of petroleum geologist, 77-85, 1984.
- BRAYSHAW, A.C., Bed microtopography and entrainment thresholds in gravel-bed river, *Geological society of American bulletin*, **96**, 218-223, 1985.
- BRAVARD J-P. ET PETIT, F., *Les cours d'eau : Dynamique du système fluvial*, (ed) Armand Colin, Paris, 1997.
- BRIDGE J.S ET JARVIS, J., Velocity profiles and bed shear stress over various bed configurations in river bend, *Earth surface processes*, **2**, 281-294, 1977.
- BROWN, G.L. ET THOMAS, S.W., Large structure in a turbulent boundary layer, *Physics of fluids*, **20**, s243-s252, 1977.
- BUFFIN-BÉLANGER, T. ET ROY, A.G., Effects of a pebble cluster on the turbulent structure of a depth-limited flow in a gravel-bed river, *Geomorphology*, **25**, 254-267, 1998.
- BUFFIN-BÉLANGER, T., ROY, A.G. ET KIRKBRIDE, A., Vers l'intégration des structures de l'écoulement dans la dynamique d'un cours d'eau à lit de graviers, *Géographie physique et Quaternaire*, **54**, 105-117, 2000a.
- BUFFIN-BÉLANGER, T., ROY, A.G. ET KIRKBRIDE, A., On large-scale flow structures in a gravel-bed river, *Geomorphology*, **32**, 417-435, 2000b.
- BUFFIN-BÉLANGER, T., *Structure d'un écoulement turbulent dans un cours d'eau à lit de graviers en présence d'amas de galets*, [Thèse de doctorat], Montréal, Canada, 242 p., 2001.
- CARLING, P., Implications of sediment transport for instream flow modeling of aquatic habitat, *The ecological basis for river management*, (ed) D.M Harper et Ferguson, Wiley, 1995.
- CHIN, A., The morphologic structure of step-pools in mountain streams, *Geomorphology*, **27**, 191-204, 1999.
- CHOW V.T., *Open channel hydraulics*, (ed) McGraw-Hill, New York, 1959.

- CHURCH, M., HASSAN, M.A. ET WOLCOTT J.F, Stabilizing self-organized structures in gravel-bed stream channels : Field experimental observations, *Water resources research*, **34**, no 11, 3169-3179, 1998.
- CLIFFORD, N.J., Formation of riffle-pool sequences: field evidence for an autogenetic process, *Sedimentary geology*, **85**, 39-51, 1993.
- CLIFFORD, N.J. ET FRENCH, J.R., Monitoring and modeling turbulent flow : historical and contemporary perspectives. In Clifford, N.J., French, J.R et Hardisty, J. (ed), *Turbulence: perspective on flow and sediment transport*, 2-34, 1993a.
- CLIFFORD, N.J ET FRENCH, J.R., Monitoring and analysis of turbulence in geophysical boundaries: some analytical and conceptual issues, In Clifford, N.J., French, J.R et Hardisty, J. (ed), *Turbulence: perspective on flow and sediment transport*, 93-120, 1993b.
- CLIFFORD N.J., ROBERT, A. ET RICHARDS, K.S., Estimation of flow resistance in gravel-bedded rivers: a physical explanation of the multiplier of roughness length, *Earth surface processes and landforms*, **17**, 111-126, 1992.
- DAL CIN, R., «Pebble clusters»: Their origin and utilization in the study of paleocurrents, *Sedimentary geology*, **2**, 233-21, 1968.
- DANCEY, C.L., The spatial inhomogeneity of turbulence above a fully rough packed bed in open channel flow, *Experiments in fluids*, **29**, 402-410, 2000.
- DEFINA, A., Transverse spacing of low-speed streaks in a channel flow over a rough bed. In Ashworth, P., Bennett, S., Best, J. et McLelland (ed), *Coherent flow structures in open channels*, Wiley, 86-99, 1996.
- DIETRICH, W.E. ET WHITING, P., Boundary shear stress and sediment transport in river meanders of sand and gravel. In Ikeda S. et Parker, G. (ed), *River meandering*, 1-50, 1989.
- DINEHART, R., Correlative velocity fluctuations over a gravel river bed, *Water resources research*, **35**, no 2, 569-582, 1999.
- DINGMAN, S.L., *Fluvial hydrology*, (ed) W.H Freeman and company, New York, chapitre 6, 283 p., 1984.
- DROUIN, D., *Génération d'un modèle numérique d'élévation adéquate pour la modélisation hydrologique d'un petit bassin versant*, mémoire de maîtrise, Montréal, Canada, Université de Montréal, 1999.
- FALCO, R.E., Coherent motions in the outer region of turbulent boundary layer, *The physics of fluid*, **20**, no.10, 124-132, 1977.
- FERGUSON, R.I., KIRKBRIDE, A. ET ROY. A.G., Markov analysis of velocity fluctuations in gravel-bed rivers. In Ashworth, P., Bennett, S., Best, J. et McLelland (ed), *Coherent flow structures in open channels*, Wiley, 165- 184, 1996.

GRASS, A.J., Structural features of turbulent flow over smooth and rough boundaries, *Journal of fluid mechanics*, **50**, 233-255, 1971.

GRASS, A.J. ET MANSOUR-TEHRANI, M., Generalized scaling of coherent bursting structures in the near-wall region of turbulent flow over smooth and rough boundaries. In Ashworth, P., Bennett, S., Best, J. et McLelland (ed), *Coherent flow structures in open channels*, Wiley, 3-37, 1996.

GRIFFITH, G.A., Flow resistance in coarse gravel bed rivers, *Journal of hydraulics division, proceedings of the American society of civil engineers*, **107**, no. HY7, 899-918, 1981.

GUSTAVSON, T.C., Sedimentation on gravel outwash fans, Malaspina glacier foreland, Alaska, *Journal of sedimentary petrology*, **44**, no. 2, 374-389, 1974.

HAMMOND, F.D.C., A comparison between Shields' threshold criterion and the movement of loosely packed gravel in a tidal channel, *Sedimentology*, **31**, 51-62, 1984.

HASSAN M.A ET CHURCH, M., Experiments on surface structure and partial sediment transport on a gravel bed, *Water resources research*, **36**, no.7, 1885-1895, 2000.

HASSAN M.A. ET REID, I., The influence of microform bed roughness elements on flow and sediment transport in gravel bed river, *Earth surface processes and landforms*, **15**, 739-750, 1990.

HEY, R.D., Flow resistance in gravel-bed rivers, *Journal of the hydraulics division, American society of civil engineers*, **105**, no. HY4, 365-379, 1979.

IAMOTO, H ET ISHIGAKI, T., Velocity vector measurements by laser-doppler velocimeter in an open channel flow, *Bulletin Disaster Prevention Research Institute*, **28**, 471-486, 1985.

IBBEKEN, H ET SCHLEYER, R., Photo-sieving : a method for grain size analysis of coarse-grained, unconsolidated bedding surfaces, *Earth surface processes and landforms*, **11**, 59-77, 1986.

JACKSON, R.G., Sedimentological and fluid-dynamic implications of the turbulent bursting phenomenon in geophysical flows, *Journal of fluid mechanics*, **77**, 531-560, 1976.

JOHANSSON, C.E., Orientation of pebbles in running water. A laboratory study, *Geografiska annaler*, **45**, 85-111, 1963.

JONG C. ET ERGENZINGER P., The interrelations between mountain valley form and river-bed arrangement, In Hickin. E.J (ed), *River geomorphology*, Chapitre 4, 55-91, 1995.

JONG C. ET ERGENZINGER P., Dynamic roughness, sediment transport and flow structures in a mountain stream, In Kingeman, P.C, Bescha, R.L, Komar, P.D. et Bradley, J.B (ed), *Gravel-bed rivers in the environment*, Chapitre 4, 39-60, 1998.

KELLER, E.A., Areal sorting of bed material, *Geological society of American bulletin*, **82**, 753-756, 1971.

KELLER E.A., ET MELHORN W.N., Rhythmic spacing and origin of pools and riffles, *Geological society of American bulletin*, **89**, 723-730, 1978.

KIM K.C ET ADRIAN, R.J., Very large-scale motion in the outer layer, *Physics of fluids*, **11**, no. 2, 1999.

KIRKBRIDE, A.D, Observations of the influence of bed roughness on turbulence structure in depth-limited flows over gravel beds. In Clifford, N.J., French, J.R et Hardisty, J., (ed) *Turbulence: perspectives on flow and sediment transport*, 186-196, 1993.

KIRKBRIDE A.D. ET FERGUSON, R.I., Turbulent flow structure in a gravel-bed river: Markov chain analysis of the fluctuating velocity profile, *Earth surface processes and landforms*, **20**, 721-733, 1995.

KLINE, S.J., REYNOLDS, W.C., SCHRAUB, F.A ET RUNSTADLER, P.W., The structure of turbulent boundary layers, *Journal of fluid mechanics*, **30**, 741-773, 1967.

KOMORI S. ET UEDA, H., Turbulence structure and transport mechanism at the free surface in an open channel flow, *Int. Journal heat transfer*, **25**, no. 4, 513-521, 1982.

KOMORI S., MURAKAMI Y. ET UEDA. H., The relationship between surface-renewal and bursting motions in an open-channel flow, *Journal of fluid mechanics*, **203**, 103-123, 1989.

KOSTASCHUK, R.A. ET CHURCH, M.A., Macroturbulence generated by dunes: Fraser river, Canada, *Sedimentary geology*, **85**, 25-37, 1993.

KNIGHTON, D., *Fluvial forms and processes: a new perspective*, (ed) Oxford university press, 375 p., 1998.

KROGSTAD, P.A ET ANTONIA, R.A., Surface roughness effects in turbulent boundary layers, *Experiments in fluids*, **27**, 450-460, 1999.

KROGSTAD, P.A., ANTONIA, R.A ET BROWNE, L.W., Comparison between rough and smooth wall turbulent boundary layers, *Journal of fluid mechanics*, **245**, 599-617, 1992.

LANE, S.N. RICHARDS, K.S. ET WARBURTON, J., Comparison between high frequency velocity records obtained with spherical and discoidal electromagnetic current meters. In Clifford, N.J., French, J.R et Hardisty, J. (ed), *Turbulence: perspective on flow and sediment transport*, 122-163, 1993.

LAPOINTE, M.F., DE SERRES, B, BIRON, P. ET ROY, A.G., Using spectral analysis to detect sensor noise and correct turbulence intensity and shear stress estimates from EMCM flow records, *Earth surface processes and landforms*, **21**, 195-203, 1996.

LARONNE, J.B., ET CARSON, M.A., Interrelationship between bed morphology and bed-material transport for a small, gravel-bed channel, *Sedimentology*, **23**, 67-85. 1976.

LAUFER, J., Investigation of turbulent flow in a two-dimensional channel, *Technical note 2123 : Nat. Adv. Comm. on aeronautic*, 68 p., 1950.

- LAWLESS M. ET ROBERT, A., Three-dimensional flow structure around small-scale bedforms in a simulated gravel-bed environment, *Earth surface processes and landforms*, **25**, no. 5, 507-522, 2001a.
- LAWLESS M ET ROBERT, A. Scales of boundary resistance in coarse-grained channels: turbulent velocity profiles and implications, *Geomorphology*, 2001b.
- LEOPOLD, L. B., WOLMAN, M.G., River channel patterns: braided, meandering and straight, *Professional paper united states geological survey*, **282b**, 34-85, 1957.
- LEOPOLD, L. B., WOLMAN, M.G., ET MILLER J.P., *Fluvial processes in geomorphology*, (ed) W.H. Freeman, San Francisco, 1964.
- LU L.J ET SMITH, C.R., Use of flow visualization data to examine spatial-temporal velocity and burst-type characteristics in a turbulent boundary layer, *Journal of fluid mechanics*, **232**, 303-340, 1991.
- LUCHIK, T.S. ET TIEDERMAN, W.G., Timescale and structure of ejections and bursts in turbulent channel flow, *Journal of fluid mechanics*, **174**, 529-552, 1987.
- MCDONALD, B.C ET BANERJEE, I., Sediment and bed forms on a braided outwash plain, *Canadian journal of earth science*, **8**, 1282-1301, 1971.
- MILLAR, R., Grain and form resistance in gravel-bed rivers, *Journal of hydraulic research*, **37**, no. 3, 303-312, 1999.
- MORRIS, H.M., Flow in rough conduits, *Transactions of American society of civil engineers*, **120**, 373-398, 1955.
- NADEN, P. ET BRAYSHAW, A.C., Small and medium-scale bedforms in gravel-bed rivers. In Richards, K.S., (ed) *River channels: environment and process*, 249-271, 1987.
- NEZU I ET NAKAGAWA, H., Structure of space-time correlations of bursting phenomena in an open-channel flow, *Journal of fluid mechanics*, **104**, 1-43, 1981.
- NEZU, I. ET NAKAGAWA, H., *Turbulence in open-channel flows*, International association for hydraulic research, (ed) A.A Balkema, Rotterdam, Brookfield, 281 pp., 1993.
- NOWELL A.R.M. ET CHURCH M., Turbulent flow in a depth limited boundary layer, *Journal of geophysical research*, **84**, no. c8, 4816-4824, 1979.
- PRETEGAARD, K.L., Bar resistance in gravel streams at bankfull stage, *Water resources research*, **19**, no. 2, 472-476, 1983.
- RAUPACH, M.R., Conditional statistic of Reynolds stress in rough-wall and smooth-wall turbulent boundary layers, *Journal of fluid mechanics*, **108**, 363-382, 1981.
- RAUPACH, M.R., ANTONIA, R.A ET RAJAGOPALAN S., Rough-wall turbulent boundary layer, *Applied mechanic revue*, **44**, no.1, 1-23, 1991.

- REID, I. ET FROSTICK L.E., Particle interaction and its effect on the thresholds of initial and final bedload motion in coarse alluvial channels, In Koster, E.H and Steel, R.J., (ed) *Sedimentology of gravels and conglomerates, Canadian society of petroleum geologist*, 61-68, 1984.
- RICHARDS, K.S., The morphology of riffle-pool sequences, *Earth surface processes and landforms*, **1**, 71-98, 1976.
- ROBERT, A., Boundary roughness in coarse-grained channels, *Progresses in physical geography*, **14**, 42-70, 1990.
- ROBERT, A., Characteristics of velocity profiles along riffle-pool sequence and estimates of bed shear stress, *Geomorphology*, **19**, 89-98, 1997.
- ROBERT, A., ROY, A.G. ET DE SERRES, B., Changes in velocity profiles at roughness transitions in coarse-grained channels, *Sedimentology*, **39**, 725-735, 1992.
- ROBERT, A., ROY, A.G. ET DE SERRES, B., Space-time correlations of velocity measurements at a roughness transition in a gravel river. In N.J Clifford, J.R. French and Hardisty (ed), *Turbulence: Perspectives on flow and sediment transport*, 165-184, 1993.
- ROBERT, A., Turbulence at a roughness transition in a depth limited flow over a gravel bed, *Geomorphology*, **16**, 175-187, 1996.
- ROY, A.G. ET ABRAHAMS, A.D., Rhythmic spacing and origin of pools and riffles: Discussion and reply, *Geological society of America bulletin*, **89**, 248-250, 1980.
- ROY, A.G. ET BUFFIN-BÉLANGER, T., Advances in the study of turbulent flow structures. In Mosley, P. (ed), *Gravel-bed rivers*, 2001(sous presse).
- ROY, A.G., BIRON, P. ET DE SERRES, B., On the necessity of applying a rotation to instantaneous velocity measurements in river flows, *Earth surface processes and landforms*, **21**, 817-827, 1996.
- ROY, A.G., BIRON, P. ET LAPOINTE, M., Implications of low-pass filtering on power spectra and autocorrelation functions of turbulent velocity signals, *Mathematical geology*, **29**, no.5, 653-668, 1997.
- ROY, A.G., BIRON, P.M., BUFFIN-BÉLANGER, T. ET LEVASSEUR, M., Combined visual and quantitative technique in the study of natural turbulent flows, *Water resources research*, **35**, no. 3, 871-877, 1999.
- SEAR, D.A., Sediment transport processes in pool-riffle sequences, *Earth surface processes and landforms*, **21**, 241-262, 1996.
- SMART, G.M., Turbulent velocity profiles and boundary shear in gravel bed rivers, *Journal of hydraulic engineering*, **125**, no. 2, 106-116, 1999.

- SMITH, C.R., Coherent flow structures in smooth-wall turbulent boundary layers: facts, mechanisms and speculation. In Ashworth, P., Bennett, S., Best, J. et McLelland (ed), *Coherent flow structures in open channels*, Wiley, 3-37, 1996.
- SOULSBY, R.L., Selecting record length and digitization rate for near-bed turbulence measurements, *Journal of physical oceanography*, **10**, 208-219, 1980
- TACCHIE, M.F., Bergstrom. D.J. et Balachandar, R., Rough wall turbulent boundary layers in shallow open channel flow, *Journal of fluids engineering*, **122**, 533-541, 2000.
- TAIT, S.J, WILLETTS, BB., ET MAIZELS, J.K, Laboratory observation of bed armouring and changes in bedload composition. In Billi, P., Hey. R.D, Thorne C.R et Tacconi, P. (ed), *Dynamics of gravel-bed rivers*, chapitre 10, Wiley, 1992.
- TEISSEYRE, A.K., Pebble cluster as a directional structure in fluvial gravels : modern and ancient examples, *Geologia sudetica*, **12**, no. 2, 80-89, 1977.
- THEODORSEN, T., *Mechanism of turbulence*, Proceeding of the 2^e Midwestern conference on fluid mechanics, Ohio State university, Columbus, 1-8, 1952.
- TRIBE S. ET CHURCH, M., Simulations of cobble structure on a gravel streambed, *Water resources research*, **35**, no.1, 311-318, 1999.
- VOGEL, S., *Life in moving fluids : The physical biology of flow*, (ed) Princeton university press, N.J., 1994.
- WIBERG, P.L., SMITH, D., Velocity distribution and bed roughness in high-gradient streams, *Water resources research*, **27**, no. 5, 825-838, 1991.
- WOHL, E.E. ET IKEDA, H., The effect of roughness configuration on velocity profiles in an artificial channel, *Earth surface processes and landforms*, **23**, 159-169, 1998.
- WOLMAN, M.G., The natural channel of Brandywine Creek, Pennsylvania, *Professional paper, United states geological survey*, 271 p., 1955.
- WOODING, R.A., BRADLEY, E.F ET MARSHALL J.K., Drag due to regular arrays of roughness elements of varying geometry, *Boundary layer-meteorology*, **5**, 285-308, 1973.
- YALIN, M.S., *River mechanics*, (ED) PERGAMON, EXETER., 1992.