

Interactions entre les structures d'échappement et les structures à grande échelle dans l'écoulement turbulent des rivières à lit de graviers

Dynamics of shedding motions in response to large-scale flow structures in turbulent gravel-bed rivers

T. Buffin-Bélanger, A. G. Roy et M. Levasseur

Volume 14, numéro 3, 2001

URI : <https://id.erudit.org/iderudit/705425ar>

DOI : <https://doi.org/10.7202/705425ar>

[Aller au sommaire du numéro](#)

Éditeur(s)

Université du Québec - INRS-Eau, Terre et Environnement (INRS-ETE)

ISSN

0992-7158 (imprimé)

1718-8598 (numérique)

[Découvrir la revue](#)

Citer cet article

Buffin-Bélanger, T., Roy, A. G. & Levasseur, M. (2001). Interactions entre les structures d'échappement et les structures à grande échelle dans l'écoulement turbulent des rivières à lit de graviers. *Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science*, 14(3), 381–407. <https://doi.org/10.7202/705425ar>

Résumé de l'article

Dans les rivières graveleuses, il est établi que les structures d'échappement formées dans la zone de recirculation à l'aval d'amas de galets génèrent d'intenses échanges turbulents. Le mécanisme responsable de l'échappement demeure par contre mal connu. Peu d'études sur la dynamique des structures d'échappement ont été réalisées dans des écoulements où le nombre de Reynolds est élevé comme c'est le cas en rivières. De plus, les connaissances actuelles ne tiennent pas compte des découvertes récentes sur la turbulence en rivière à lit de graviers où on a observé des structures de forte et de faible vitesse occupant toute la profondeur de l'écoulement et pouvant durer plusieurs secondes. Ces structures à grande échelle devraient jouer un rôle sur le mécanisme d'échappement étant donné l'influence de la vitesse ambiante sur la dynamique de la zone de recirculation. Nous rapportons les résultats de deux expériences originales sur les liens dynamiques entre les structures à grande échelle et le mécanisme d'échappement en aval d'un amas de galets. La première expérience repose sur l'analyse de corrélations croisées entre des séries de vitesses obtenues au sommet et à l'aval proximal d'un amas de galets. Les résultats montrent que les fortes fluctuations dans le sens de l'écoulement au sommet de l'obstacle sont liées, quelques instants plus tard, à de fortes fluctuations vers l'amont dans la zone de recirculation. La seconde expérience utilise la visualisation des structures d'échappement et la mesure simultanée des vitesses de l'écoulement. L'analyse combinée des images vidéo et de séries de vitesse suggère une relation entre le passage des structures à grande échelle et les manifestations de l'échappement. Ces résultats nous permettent de présenter un modèle où, lors du passage d'un front de haute vitesse, une structure d'échappement se développe et prend de l'expansion vers le lit et vers la surface en se propageant vers l'aval alors que, lors du passage d'un front de faible vitesse, elle s'élève vers la surface de manière plus cohérente. Cette étude propose un nouveau mécanisme d'échappement et révèle le rôle que joue la structure de l'écoulement ambiant sur le développement de structures dans les cours d'eau à lit graveleux.

Interactions entre les structures d'échappement et les structures à grande échelle dans l'écoulement turbulent des rivières à lit de graviers

Dynamics of shedding motions in response to large-scale flow structures in turbulent gravel-bed rivers

T. BUFFIN-BÉLANGER^{1*}, A.G. ROY², M. LEVASSEUR³

Reçu le 5 juillet 2000, accepté le 18 juin 2001**.

SUMMARY

The flow structure in a gravel-bed river is closely related to the presence of protruding clasts and of pebble clusters. It is well known that shedding motions from the lee side of large clasts and clusters are a recurrent process that explains the strong exchanges of momentum in river flows. However, shedding has yet to be fully characterised for high Reynolds number flows such as those found in gravel-bed rivers. Moreover, our current understanding of shedding mechanisms does not include the recent discovery that large-scale flow structures in the form of high- and low-speed wedges occupy the entire flow depth over a gravel-bed river. From two original experiments, this paper investigates the influence of these wedges on the nature of shedding in the lee of a pebble cluster. The interactions between the large-scale wedges and shedding may be a key element for understanding flow organisation at the river reach scale.

The first experiment provides an analysis of the space-time correlation of velocity time series obtained downstream from a pebble cluster in a natural river. Two pairs of one-minute time series were sampled. The first series of each pair was located in the region of flow separation downstream from the obstacle whereas the second was located at its crest. Results show that a significant negative correlation occurs with a negative time lag for the downstream velocity component. This reveals that a strong downstream velocity vector at the crest of the obstacle is followed 1 to 4 seconds later by a strong upstream velocity vector in the region of flow separation. The strength of the recirculation motion responds to the velocity fluctuations above the cluster. This is a crucial process in the development of vortex shedding.

1. Department of Geography, Loughborough University, Loughborough, Leics LE11 3TU, UK.

2. Département de géographie, Université de Montréal, CP 6128, Succursale Centre-Ville, Montréal, Québec, H3C 3J7.

3. INRS-Géoresources, Université du Québec, 880 Chemin Sainte-Foy, bur. 840, CP 7500, Ste-Foy, Québec, G1V 4C7.

* Correspondance. E-mail : T.buffin-Belanger@lboro.ac.uk

** Les commentaires seront reçus jusqu'au 14 août 2002.

The second experiment aimed at visualising the shedding motion downstream from an obstacle. An underwater camera was used to obtain images of fluid motion in the lee of a pebble cluster while three electromagnetic current meters measured streamwise and vertical velocity fluctuations along a vertical profile downstream from the obstacle. A white tracer was injected in the region of flow separation to depict the development of flow structures that are shed into the flow. Despite the high Reynolds number of the flow, we have obtained good quality images revealing the presence of different modes of vortex shedding initiated in the region of flow separation. From the velocity records, it was possible to identify the large-scale flow wedges and to show that the type of vortex shedding is controlled by high- and low-speed wedges.

Based on these results, we propose a model having two steps: when a high-speed wedge approaches the pebble cluster, the shedding motion develops vertically both towards the water surface and towards the bed as the structures convect downstream; when a low-speed wedge passes, the shedding motion advects mainly towards the surface and it conserves a stronger coherence. This response of the shedding motion to the type of flow wedge is a recurrent and fundamental phenomenon. The results and the model presented herein shed light on the complex nature of vortex shedding in flows at high Reynolds number such as those found in rivers.

Key-words: turbulent flowstructure, velocity measurements, space-time correlation, visualisation, river.

RÉSUMÉ

Dans les rivières graveleuses, il est établi que les structures d'échappement formées dans la zone de recirculation à l'aval d'amas de galets génèrent d'intenses échanges turbulents. Le mécanisme responsable de l'échappement demeure en revanche mal connu. Peu d'études sur la dynamique des structures d'échappement ont été réalisées dans des écoulements où le nombre de Reynolds est élevé comme c'est le cas en rivières. De plus, les connaissances actuelles ne tiennent pas compte des découvertes récentes sur la turbulence en rivière à lit de graviers où on a observé des structures de forte et de faible vitesse occupant toute la profondeur de l'écoulement et pouvant durer plusieurs secondes. Ces structures à grande échelle devraient jouer un rôle sur le mécanisme d'échappement étant donné l'influence de la vitesse ambiante sur la dynamique de la zone de recirculation. Nous rapportons les résultats de deux expériences originales sur les liens dynamiques entre les structures à grande échelle et le mécanisme d'échappement en aval d'un amas de galets. La première expérience repose sur l'analyse de corrélations croisées entre des séries de vitesses obtenues au sommet et à l'aval proximal d'un amas de galets. Les résultats montrent que les fortes fluctuations dans le sens de l'écoulement au sommet de l'obstacle sont liées, quelques instants plus tard, à de fortes fluctuations vers l'amont dans la zone de recirculation. La seconde expérience utilise la visualisation des structures d'échappement et la mesure simultanée des vitesses de l'écoulement. L'analyse combinée des images vidéo et de séries de vitesse suggère une relation entre le passage des structures à grande échelle et les manifestations de l'échappement. Ces résultats nous permettent de présenter un modèle où, lors du passage d'un front de haute vitesse, une structure d'échappement se développe et prend de l'expansion vers le lit et vers la surface en se propageant vers l'aval alors que, lors du passage d'un front de faible vitesse, elle s'élève vers la surface de manière plus cohérente. Cette étude propose un nouveau mécanisme d'échappement et révèle le rôle que joue la structure de l'écoulement ambiant sur le développement de structures dans les cours d'eau à lit graveleux.

Mots clés : structures turbulentes, mesures de vitesse, corrélations spatio-temporelles, visualisation, rivière.

1 – INTRODUCTION

La compréhension de la dynamique des rivières implique une caractérisation détaillée de l'organisation des écoulements (BEST, 1993 ; WILLIAMS, 1996). Cette organisation se définit par les formes que prennent les échanges de quantité de mouvement, les structures turbulentes, et par leurs interactions dans le fluide en mouvement. En mécanique des fluides, ces échanges ont été largement documentés et plusieurs recensions décrivent en détails la gamme de structures turbulentes (CANTWELL, 1981 ; ROBINSON, 1991) et leurs interactions (PRATURY et BRODKEY, 1978 ; NEZU et NAKAGAWA, 1993) dans les couches-limites turbulentes en chenal de laboratoire. Dans ces écoulements, la structure en boucle, et les cycles éjection-incursion qui lui sont associés, demeure la structure la plus documentée (SMITH, 1996). Plusieurs études ont décrit des structures turbulentes en milieu naturel (MATTHES, 1947 ; JACKSON, 1976 ; CLIFFORD *et al.*, 1993 ; WILLIAMS, 1996). Peu d'entre elles, en revanche, se sont penchées sur les interactions entre les différentes structures. Ces interactions sont pourtant cruciales pour la caractérisation de l'organisation de l'écoulement (PRATURY et BRODKEY, 1978 ; BUFFIN-BÉLANGER *et al.*, 2000b).

Dans les rivières à lit de graviers, on reconnaît généralement deux types de structures turbulentes : les structures d'échappement et les structures à grande échelle. Les structures d'échappement sont étroitement associées à la zone de recirculation à l'aval de blocs protubérants et des amas de galets qui constituent des obstacles à l'écoulement (BRAYSHAW, 1984). À l'aval de l'obstacle (*figure 1a*), le point de rattachement délimite l'endroit au lit où une portion du fluide s'écoule vers l'amont et l'autre vers l'aval. Le fluide s'écoulant vers l'amont donne naissance à une cellule de recirculation. Cette cellule interagit avec l'écoulement ambiant par le biais d'un plan de mélange attaché au sommet de l'obstacle. Le plan de mélange laisse s'échapper des portions de fluide lent provenant de la zone de recirculation. Ces portions constituent les structures d'échappement (*shedding motions*) et font partie du sillage à l'aval d'obstacles à l'écoulement (PAOLA *et al.*, 1986 ; MARTINUZZI et TROPEA, 1993 ; ZDRAVKOVICH, 1996). La succession dans le temps et l'espace des structures d'échappement constitue l'allée de Karman que l'on retrouve fréquemment à l'aval d'obstacles non profilés, e.g. des piliers de ponts dans une rivière (VIOLLET *et al.*, 1998). En laboratoire, SAVORY et TOY (1986), ACARLAR et SMITH (1987) et KAWANISI *et al.* (1993), entre autres, ont documenté les structures d'échappement se développant à l'aval d'obstacles hémisphériques posés sur un lit lisse. ACARLAR et SMITH (1987) ont montré que la fréquence d'échappement sans dimension, exprimée par le nombre de Strouhal ($S = fd/U$ où f est la fréquence d'échappement ; d , la hauteur de l'hémisphère ; U , la vitesse moyenne de l'écoulement) était proportionnelle au nombre de Reynolds de l'obstacle lorsque celui-ci est inférieur à 1 600. Au-delà de cette valeur, la fréquence d'échappement oscille fortement entre 0,2 et 0,4, ce qui rejoint le concept du nombre de Strouhal universel pour les écoulements ayant un nombre de Reynolds élevé (LEVI, 1983 ; NAKAMURA, 1996 ; VIOLLET *et al.*, 1998). Les structures d'échappement contribuent fortement à l'organisation de l'écoulement en rivière. En utilisant un nombre de Strouhal de 0,2, CLIFFORD *et al.* (1992) ont montré que la fréquence de passage des structures turbulentes en rivières graveleuses était liée à la taille des grains composant le lit de la rivière. Il est de plus reconnu que,

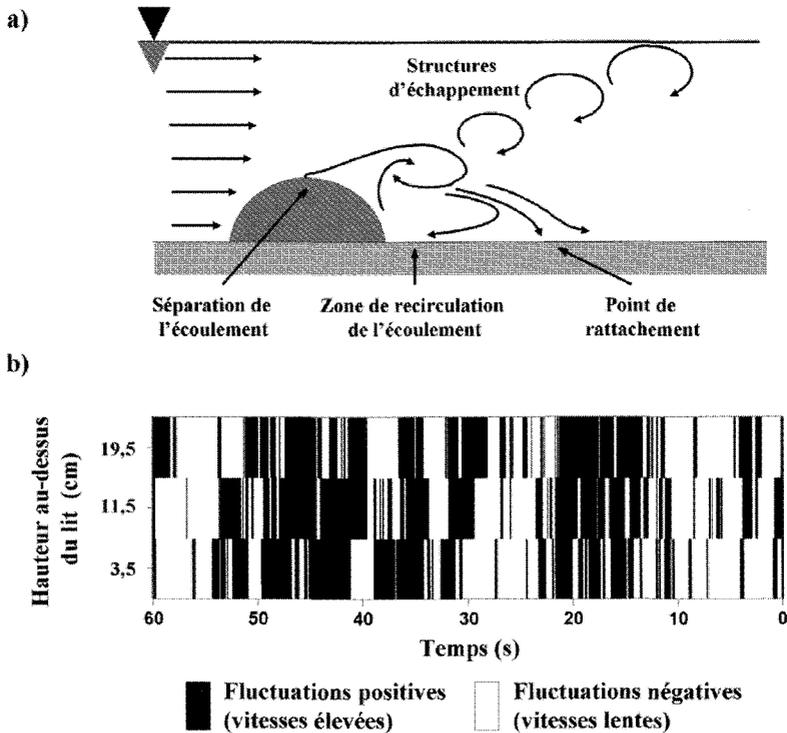


Figure 1a Schéma illustrant la séparation de l'écoulement, le point de rattachement, la zone de recirculation et les structures d'échappement associées à la présence d'un obstacle à l'écoulement.

The flow separation and reattachment points, the recirculating flow region and the shedding flow motions downstream from a hemispherical obstacle in a turbulent boundary layer.

Figure 1b Représentation matricielle de fluctuations de vitesse échantillonnées à trois hauteurs au-dessus du lit en rivière graveleuse. La cohérence des fluctuations positives et négatives révèle la présence de fronts de vitesse élevée (portions noires) entrecoupés par des fronts de vitesse plus lente (portions blanches) occupant toute la tranche de l'écoulement (BUFFIN-BÉLANGIER *et al.*, 2000a).

*Spatio-temporal matrix of simultaneous velocity fluctuations sampled at three different heights above a gravel-bed (average velocity = 36 cm/s; water depth: 35 cm; median grain diameter = 3.3 cm). The spatial and temporal coherence of the positive and negative velocity fluctuations highlight the presence of high-speed flow regions interlaced by low-speed flow regions that are advecting downstream within the entire water column (BUFFIN-BÉLANGIER *et al.*, 2000a).*

dans ces environnements, les structures d'échappement représentent le premier mécanisme responsable de la résistance à l'écoulement (CLIFFORD *et al.*, 1992 ; ROBERT *et al.*, 1996 ; BUFFIN-BÉLANGIER et ROY, 1998). BUFFIN-BÉLANGIER (2001) a mesuré des valeurs d'énergie cinétique normalisée quatre fois plus grandes à l'aval d'un amas de galets qu'en amont.

Les structures à grande échelle sont des portions de fluide rapide entrecoupées par des portions de fluide plus lent qui occupent toute la tranche de l'écoulement. La *figure 1b* illustre en deux dimensions le passage de ces portions de fluide à partir d'un échantillonnage des vitesses longitudinales instantanées à trois positions dans un écoulement sur lit de graviers. Des structures de ce type ont été observées dans des couches-limites en laboratoire (FALCO, 1977 ; PRATURY et BRODKEY, 1978 ; NAKAGAWA et NEZU, 1981) et plus récemment en rivières à lit graveleux (KIRKBRIDE et FERGUSON, 1995 ; FERGUSON *et al.*, 1996 ; BUFFIN-BÉLANGER *et al.*, 2000a). L'origine, l'extension tridimensionnelle et la dynamique de ces grandes structures n'ont pas encore été élucidées pour les écoulements en rivière. Il ne semble pas non plus exister de consensus concernant l'origine de ces structures dans les écoulements sur lit lisse en chenal de laboratoire. Pour certains auteurs (FALCO, 1977 ; BROWN et THOMAS, 1977 ; KOMORI *et al.*, 1989 ; NEZU et NAKAGAWA, 1993 ; KIM et ADRIAN, 1999), les structures à grande échelle sont le résultat de la croissance et de l'amalgame de structures d'éjection dans l'écoulement alors que pour d'autres (LAUFER, 1975 ; PRATURY et BRODKEY, 1978 ; YALIN, 1992), il semble plutôt que les structures à grande échelle contrôlent l'éjection du fluide provenant de la sous-couche visqueuse près du lit. Dans un écoulement sur lit de graviers, des mesures de vitesse ont révélé que les structures à grande échelle peuvent durer plusieurs secondes et qu'elles possèdent une longueur de 2 à 5 fois la profondeur de l'écoulement (BUFFIN-BÉLANGER *et al.*, 2000a). Des visualisations ont de plus révélé que ces structures sont intimement liées à la présence de portions de fluide de faible vitesse s'élevant de la région de l'écoulement située à proximité du lit (ROY et BUFFIN-BÉLANGER, 2001).

Dans un tronçon de rivière, les structures d'échappement et les structures à grande échelle coexistent et interagissent. Plusieurs études en laboratoire ont documenté des liens mécaniques entre le passage de structures à grande échelle et l'éjection de fluide à faible vitesse provenant de la zone proximale au lit (PRATURY et BRODKEY, 1978 ; YALIN, 1992 ; NEZU et NAKAGAWA, 1993 ; ROY et BLACKWELDER, 1994), d'autres ont décrit l'effet de paramètres moyens, comme la vitesse ou la profondeur de la couche-limite, sur la longueur de la zone de recirculation et la fréquence d'échappement des structures (ACARLAR et SMITH, 1987 ; SCHOFIELD et LOGAN, 1990 ; MARTINUZZI et TROPEA, 1993 ; BUFFIN-BÉLANGER, 2001), mais peu d'études ont tenté d'identifier l'existence d'interactions mécaniques entre le passage des structures à grande échelle dans l'écoulement et les structures d'échappement à l'aval d'un obstacle. Ces interactions pourraient permettre de mieux comprendre la forte variabilité de la fréquence d'échappement observée dans des écoulements où le nombre de Reynolds est élevé (ACARLAR et SMITH, 1987). Dans ce sens, KIRKBRIDE (1993) a proposé deux mécanismes pour expliquer une rétroaction entre le passage de structures à grande échelle et l'échappement des structures provenant de la zone de recirculation (voir *figures 7.3* et *7.4* dans KIRKBRIDE, 1993). Il a d'abord suggéré que les structures interagissent selon la dynamique même de la zone de recirculation à l'aval d'un obstacle. Pour qu'un échappement se produise, un tourbillon doit d'abord se développer dans la zone de recirculation. Lorsque ce tourbillon s'échappe, il bloque l'écoulement et donne naissance aux structures de forte et de faible vitesse. Le second mécanisme est lié aux pressions différentielles véhiculées par les grandes structures. Lors du passage d'une structure de forte vitesse, une zone de basse pression se produit au-dessus de

la zone de recirculation. Cette basse pression entraîne alors l'éjection dans l'écoulement ambiant d'une portion de fluide provenant de la zone de recirculation. ROY *et al.* (1999) ont également émis l'hypothèse d'un lien mécanique entre les structures d'échappement et le passage des structures à grande échelle. À partir de la visualisation d'un écoulement en rivière, ils ont tout d'abord identifié deux manifestations particulières des structures d'échappement à l'aval d'un obstacle. En combinant des mesures de vitesse à la visualisation, ils ont ensuite avancé que les structures de vitesse élevée sont associées à des structures d'échappement se diffusant à la fois vers le lit et la surface alors que les structures de faible vitesse sont plutôt associées à des structures d'échappement se propageant uniquement vers la surface. Ces différentes hypothèses s'appuyaient sur un nombre très restreint d'observations.

Dans cet article, nous présentons les résultats de deux analyses portant sur les interactions entre les structures à grande échelle et les structures d'échappement à l'aval d'un amas de galets. Nous nous concentrerons ainsi sur la mécanique des échanges plutôt que sur une caractérisation quantitative des événements turbulents. La première analyse se base sur un échantillonnage en simultané de séries temporelles de vitesse en aval d'un amas de galets. Cette analyse exploite les corrélations croisées entre séries de vitesses, mesurées à une grande résolution temporelle et spatiale, pour décrire la dynamique de l'écoulement. La seconde analyse se fait à l'aide d'images issues de la visualisation d'un écoulement réalisée en même temps qu'un échantillonnage de séries de vitesses. Ces deux approches nous ont permis de montrer l'effet du passage des structures à grande échelle sur la dynamique d'échappement et de présenter un modèle dynamique du développement des structures d'échappement en relation avec le passage des structures à grande échelle.

2 – ANALYSE DE CORRÉLATIONS CROISÉES ENTRE SÉRIES TEMPORELLES DE VITESSE

2.1 Mesure des vitesses de l'écoulement

La *figure 2* montre la position d'échantillonnage de deux paires de séries temporelles de vitesse en aval d'un amas de galets dans la rivière Eaton-Nord en Estrie, Québec (*tableau 1*). Ces séries proviennent de données décrites de manière exhaustive par BUFFIN-BÉLANGER et ROY (1998). Les composantes longitudinale et verticale des vitesses ont été mesurées à l'aide de courantomètres électromagnétiques Marsh-McBirney. La sonde des courantomètres possède un diamètre de 13 mm et un volume d'échantillonnage dont le diamètre est de 2,5 à 3 fois celui de la sonde. Les instruments ont un temps de réponse de 0,05 s et les vitesses sont filtrées. Le filtre utilisé dans les courantomètres Marsh-McBirney est un filtre exponentiel (RC) (ROY *et al.*, 1997). Les séries échantillonnées sont d'une durée de 1 min à une fréquence d'échantillonnage de 20 Hz.

Les paires comportent deux séries temporelles de vitesses échantillonnées simultanément par deux courantomètres dont l'un se trouve dans la zone de recirculation et l'autre à proximité du sommet de l'obstacle (*figure 2*). La simul-

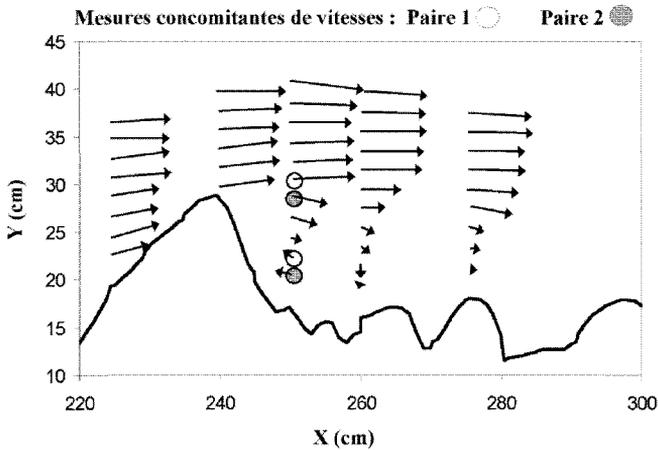


Figure 2 Positions d'échantillonnage des quatre séries temporelles de vitesses à proximité d'un amas de galets à l'aide de courantomètres électromagnétiques. Les quatre points composent deux paires synchrones d'une durée de 1 min à une fréquence d'échantillonnage de 20 Hz. Les vecteurs moyens de l'écoulement en périphérie de l'obstacle sont identifiés par les flèches. On note l'accélération au sommet de l'obstacle et la zone de recirculation à l'aval proximal.

Location of two pairs of time series sampled simultaneously with two electromagnetic current meters in the vicinity of a pebble cluster. Each time series is 1 min long and has a 20 Hz sampling frequency. Average flow vectors are identified on the figure and allow to observe a region of acceleration on top of the obstacle and a region of flow recirculation immediately downstream from the obstacle.

Tableau 1 Caractéristiques des sites d'échantillonnage.

Table 1 Characteristics of the sampling sites.

Rivières	V (cm/s)	Y (cm)	H ₀ (cm)	D ₅₀ (mm)	RE
Eaton-Nord	36	35	20	33	97 000
Nicolet	38	35	21	40	102 000

V : vitesse moyenne dans le sens de l'écoulement ; Y : profondeur moyenne de l'écoulement dans la portion d'échantillonnage ; D₅₀ : diamètre médian des graviers recouvrant la surface du lit ; H₀ : hauteur de protubérance de l'obstacle ; RE : nombre de Reynolds de l'écoulement donnée par l'expression VY/ν où ν est la viscosité cinématique.

V: mean stream velocity in the downstream direction; Y: mean depth in the sampled reach; D₅₀: median diameter of the gravel covering the stream bed; H₀: height of the submerged obstacle; RE: Reynolds number of the flow, given by the expression VY/ν , where ν is the kinematic viscosity.

tanéité permet le calcul de corrélations croisées entre les séries de chacune des paires. La corrélation croisée a été utilisée en laboratoire (BROWN et THOMAS, 1977 ; NAKAGAWA et NEZU, 1981) et plus récemment en rivière (ROBERT et

al., 1993 ; BUFFIN-BÉLANGER et al., 2000a) pour décrire les structures à grande échelle de l'écoulement. Ici, l'originalité provient du fait que les courantomètres se trouvent dans des zones différentes de l'écoulement : la zone de recirculation, associée aux structures d'échappement, et la zone sommitale, influencée par la présence des structures à grande échelle. Ce déploiement permettra d'établir des liens dynamiques entre les deux zones à partir de l'analyse spatio-temporelle des corrélations croisées.

2.2 Corrélation croisée

La distribution des corrélations croisées ($r_{u_1-u_2}$) s'obtient selon :

$$C_{u_1-u_2}(d) = \begin{cases} \sum_{t=1}^{N-d} (u_{1t} - \langle u_1 \rangle)(u_{2t+d} - \langle u_2 \rangle) & d = 0, 1, 2, \dots, N-1 \\ \sum_{t=1-d}^N (u_{1t} - \langle u_1 \rangle)(u_{2t+d} - \langle u_2 \rangle) & d = 0, -1, -2, \dots, -(N-1) \end{cases} \quad (1)$$

et

$$r_{u_1-u_2}(d) = \frac{C_{u_1-u_2}(d)}{s_{u_1} s_{u_2}} \quad (2)$$

où u_t , $\langle u \rangle$, s_u et N sont respectivement une vitesse instantanée au temps t , la vitesse moyenne, l'écart type et le nombre d'éléments (ici $N = 1\ 200$) des séries de vitesse U_1 et U_2 ; d , un décalage temporel ; et $C_{u_1-u_2}$, la covariance croisée.

L'interprétation des résultats de l'analyse des corrélations croisées se fait selon deux valeurs : (1) la corrélation absolue maximale, qui exprime l'intensité de la concomitance des fluctuations de vitesse, et (2) le décalage où survient la corrélation absolue maximale, qui montre l'existence d'un écart temporel entre les deux séries. Ici, un décalage temporel positif ($+d$) implique que les vitesses mesurées au temps t de la série située dans la zone de recirculation sont corrélées aux vitesses obtenues au temps $t+d$ de la série située au sommet de l'obstacle (figure 3). Le signe du décalage est important puisqu'il permet d'interpréter le sens d'un mouvement.

L'intervalle de confiance autour des valeurs de la corrélation croisée se calcule selon :

$$IC_\alpha = r_{u_1-u_2}(N-d) \pm Z_\alpha * Et_{(N-d)} \quad (3)$$

où $r_{u_1-u_2}$ est la valeur de corrélation croisée pour un décalage (d) donné ; z provient de la distribution normale pour une marge d'erreur α et Et est l'erreur-type. L'erreur-type des corrélations croisées pour deux distributions aléatoires non-corrélées est donnée par (CHATFIELD, 1989) :

$$Et = 1 / \sqrt{(N-d)} \quad (4)$$

Selon les équations 3 et 4, pour une marge d'erreur de 5 % et avec $N = 1\ 200$, nous obtenons un intervalle de confiance autour de zéro de $[-0,058 ; 0,058]$ avec $Et = 0,029$.

L'intervalle de confiance déterminé précédemment ne tient pas compte de la présence d'autocorrélation dans les séries temporelles de vitesse. Ces séries possèdent un niveau d'autocorrélation qui résulte du passage de structures

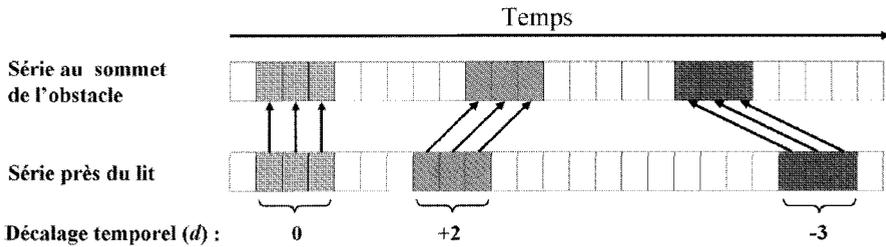


Figure 3 Interprétation du décalage temporel dans l'analyse spatio-temporelle des corrélations croisées.

Physical interpretation of the temporal lag in the space-time correlation analysis.

turbulentes cohérentes et, pour les courantomètres électromagnétiques, de la présence d'un filtre de type RC. Le niveau d'autocorrélation peut se mesurer à l'aide de l'*Integral Time Scale* (ITS) qui est généralement plus élevé dans la composante longitudinale que dans la composante verticale de l'écoulement (ROY *et al.*, 1996). La présence d'autocorrélation dans les séries implique que les corrélations croisées entre deux séries de vitesse sont rehaussées (ROY *et al.*, 1997). L'effet de l'autocorrélation sur les mesures de corrélations croisées doit être évalué de manière à déterminer un intervalle de confiance adéquat pour tester le niveau de signification des valeurs de corrélation obtenues entre deux séries temporelles de vitesse.

Pour évaluer l'effet de l'autocorrélation liée au filtre sur le niveau de signification des valeurs de corrélations croisées, vingt-cinq séries de 1 200 points tirés aléatoirement d'une distribution normale ont été générées. Des corrélations croisées entre ces séries ont été calculées pour 200 décalages. Les 25 séries ont ensuite été filtrées selon un filtre similaire à celui des courantomètres et les corrélations croisées, recalculées. Les figures 4a et b montrent la distribution des valeurs moyennes de corrélation croisée et l'erreur-type pour les séries non-filtrées et filtrées selon les décalages. L'erreur-type calculée à l'aide de l'équation 4 est également représentée. L'erreur-type des distributions filtrées ($Et_{filtrées}$) est supérieure à l'erreur-type des distribution non-filtrées ($Et_{non-filtrées}$). Pour l'ensemble des décalages, nous obtenons $Et_{non-filtrées} = 0,029$, ce qui correspond à la valeur obtenue selon l'équation 4, et $Et_{filtrées} = 0,036$. Cela représente une augmentation de 25 %.

Pour évaluer l'effet de l'autocorrélation liée au passage des structures turbulentes, quarante paires de séries temporelles de une minute ont été choisies dans les données de BUFFIN-BÉLANGER et ROY (1998). Pour obtenir un estimateur de l'erreur-type le plus représentatif possible, les séries retenues possédaient des valeurs d'ITS similaires aux séries utilisées dans cet article. De plus, pour assurer que les corrélations soient le fruit du hasard, les paires comportaient deux séries de vitesses échantillonnées à des instants différents. Les corrélations croisées pour chacune des 40 paires ont été compilées pour 200 décalages. La figure 4c montre la corrélation moyenne ainsi que l'erreur-type des distributions d'échantillonnage pour chacun des décalages. D'après ces distributions, l'erreur-type moyenne est 0,095, ce qui représente une augmentation de plus de 250 % par rapport à l'estimateur proposé à l'équation 4.

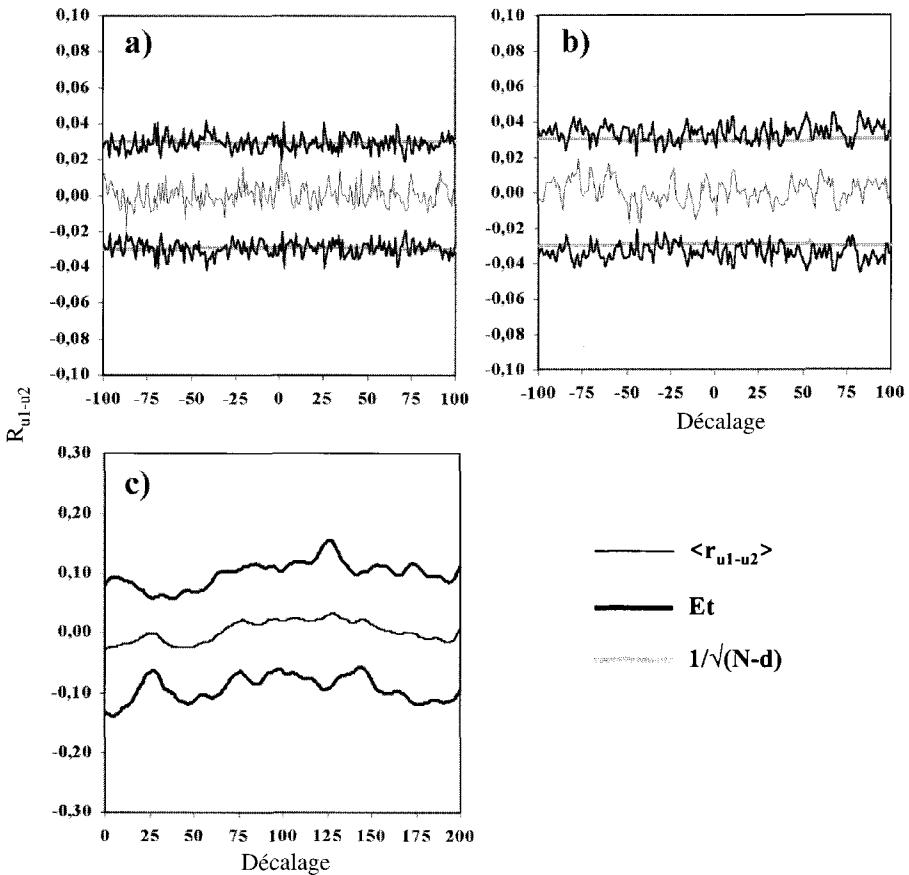


Figure 4 Distribution d'échantillonnage de corrélations croisées pour a) des distributions aléatoires non-filtrées, b) des distributions aléatoires filtrées selon un filtre RC et c) des séries temporelles de vitesses mesurées en rivière à des moments différents. Et représente l'erreur-type de ces distributions.

Sampling distribution of cross-correlation for a) white-noise time series; b) filtered white-noise time series and c) velocity time series sampled at different moments within a river reach. Et is the standard error for the sampling distribution.

Ces résultats illustrent le rôle que joue l'autocorrélation liée au filtre et à la structure des vitesses longitudinales dans un écoulement sur l'intensité des corrélations croisées. Nous retiendrons ici l'erreur-type de 0,095 pour déterminer un intervalle de confiance tenant compte de la présence d'autocorrélation dans les séries temporelles de vitesse.

2.3 Résultats

La figure 5 présente la distribution des vecteurs de vitesse instantanée et le vecteur de vitesse moyenne pour les quatre séries temporelles. Cette représentation est préférée à celle plus classique des quadrants (LU et WILLMARTH,

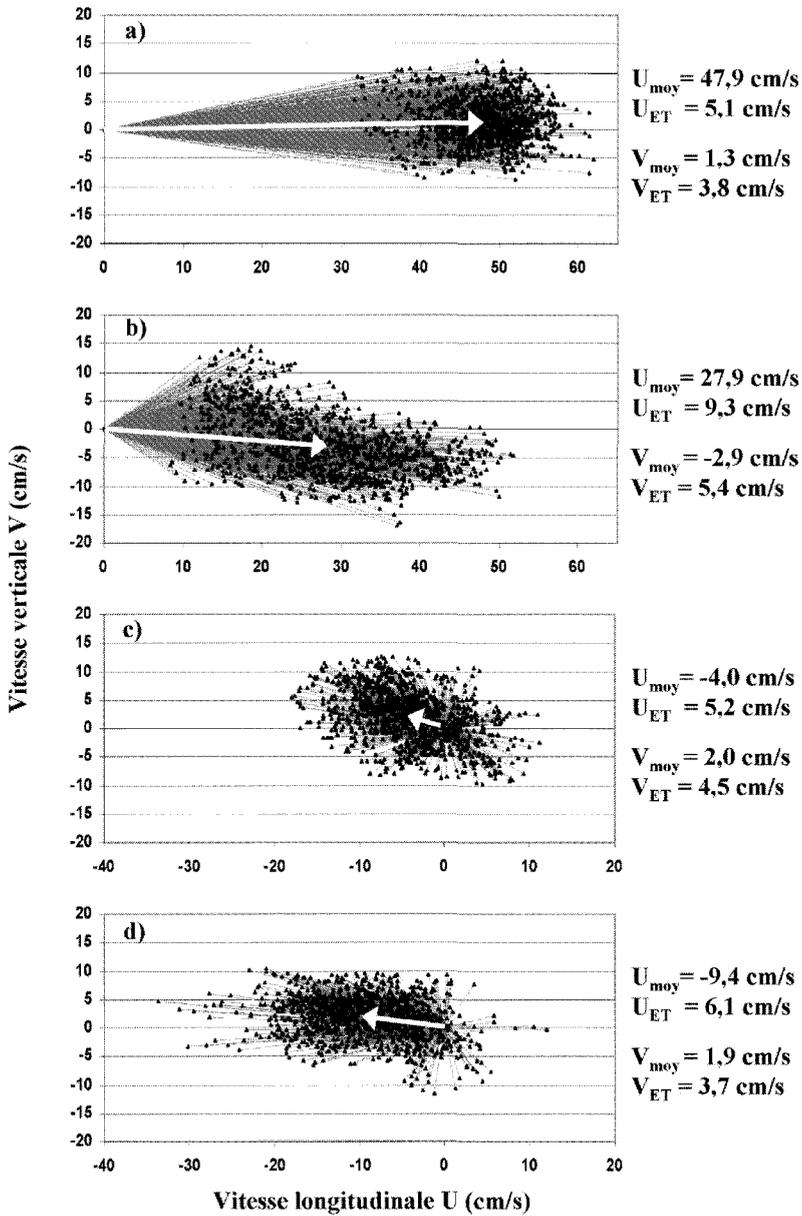


Figure 5 Distribution des vecteurs de vitesse instantanée (trait gris avec pointe noire) et moyenne (flèche en blanc) selon les composantes longitudinale et verticale de l'écoulement : a) Paire 1, sommet de l'obstacle ; b) Paire 2, sommet de l'obstacle ; c) Paire 1, zone de recirculation de l'écoulement ; d) Paire 2, zone de recirculation de l'écoulement.

Instantaneous (grey arrow) and averaged (white arrow) velocity vectors for the vertical and downstream velocity components: a) Pair 1, top of the obstacle; b) Pair 2, top of the obstacle; c) Pair 1, region of flow recirculation; d) Pair 2, region of flow recirculation.

1973) car elle permet une meilleure visualisation de la dynamique de l'écoulement aux positions d'échantillonnage. À la position la plus élevée (*figure 5a*), on note la présence d'un écoulement rapide généralement parallèle au lit. À la seconde position sommitale (*figure 5b*), la distribution des vecteurs diffère significativement. La majorité des vecteurs sont orientés vers le lit avec des vitesses rapides comparativement à la vitesse moyenne. On note également la présence de vecteurs de magnitude plus faible orientés vers la surface. Ces vecteurs peuvent être associés aux structures d'échappement provenant de la zone de recirculation à l'aval de l'obstacle. Lorsqu'un échappement se produit, on anticipe obtenir une vitesse lente dans le sens longitudinal combinée à une vitesse verticale vers le haut. Ici, on observe une distribution de vecteurs caractéristiques de la région du plan de mélange formé entre la zone de recirculation et l'écoulement ambiant passant au sommet de l'obstacle. Pour les séries situées dans la zone de recirculation (*figure 5c et d*), les vecteurs de vitesse sont orientés vers l'amont (vitesse négative dans le sens longitudinal) et possèdent une nette tendance vers la surface. Dans la zone de recirculation, le mouvement de retour du fluide semble bloqué par l'obstacle et le lit. Le fluide ne peut ainsi que se diriger vers la surface le long de l'obstacle pour éventuellement contribuer au processus d'échappement. Même s'ils permettent de décrire la dynamique de l'écoulement à chacune des positions, ces diagrammes ne traduisent pas clairement les relations entre les différentes zones d'écoulement. Puisque les vitesses de la *figure 5a et c* et *figure 5b et d* ont été échantillonnées en simultané (*figure 2*), les corrélations croisées entre ces vitesses permettront de mettre en relation les dynamiques de l'écoulement aux différentes positions.

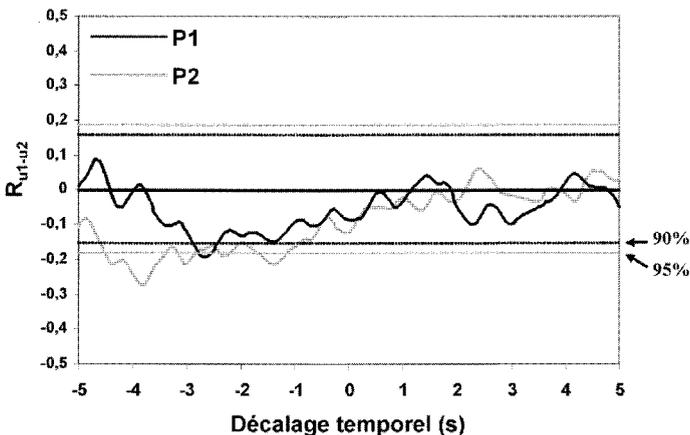


Figure 6 Corrélations croisées pour les deux paires de séries temporelles. Les intervalles de confiance à 90 % et à 95 % sont indiqués.

Space-time correlation for the two pairs of velocity time series. Confidence intervals at 90% and 95%.

La *figure 6* donne les résultats obtenus par l'analyse des corrélations croisées de la composante longitudinale de vitesse pour les deux paires de séries temporelles. Deux faits ressortent de ce diagramme. Tout d'abord, l'ensemble des valeurs significatives de corrélation de même que la corrélation absolue maximale sont de signe négatif. Une corrélation négative signifie que les

vitesse plus élevée que la moyenne au sommet de l'obstacle sont associées à des vitesses plus faibles que la moyenne dans la zone de recirculation. Ainsi, selon les vitesses moyennes aux deux positions, une vitesse élevée au sommet de l'obstacle est corrélée à une vitesse élevée dans la zone de recirculation mais de signe contraire (*figure 7a*).

Ensuite, les corrélations significatives et la corrélation absolue maximale surviennent selon un décalage négatif. D'après la convention utilisée (*figure 3*), le décalage négatif implique que, en moyenne, la cohérence des mouvements se produit du point d'échantillonnage situé au sommet de l'obstacle vers celui situé dans la zone de recirculation. En d'autres mots, une vitesse plus élevée que la moyenne se produit d'abord au point 1 (P1, *figure 7b*) et est suivie par une vitesse élevée mais de signe contraire au point 2 quelques instants plus tard (P2, *figure 7b*). D'après les valeurs significatives des corrélations croisées et les pics de corrélation, le décalage temporel entre ces mouvements se situe entre 1 et 4 s.

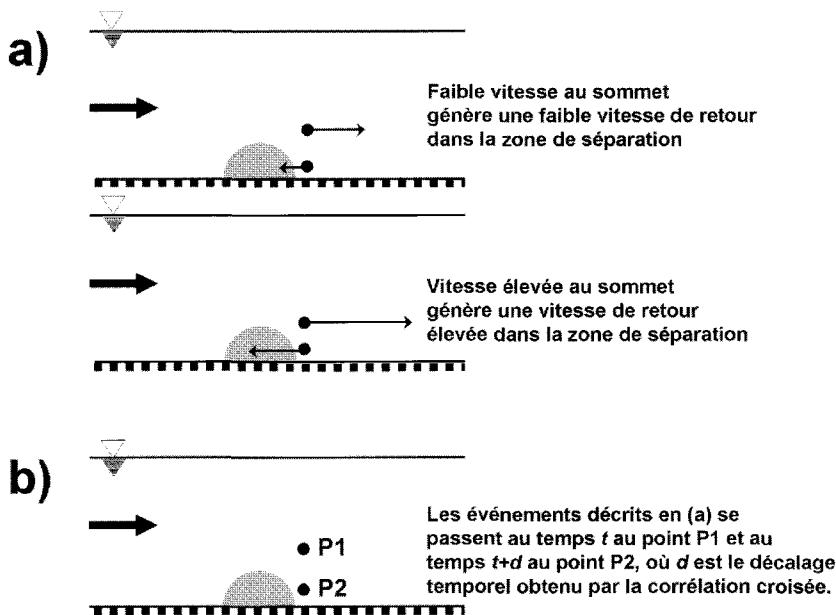


Figure 7 Interprétation des résultats de l'analyse spatio-temporelle des corrélations croisées : **a)** implication de la corrélation négative et **b)** implication du pas négatif où survient la corrélation absolue maximale.

Physical interpretation of the space-time correlation analysis: a) meaning of a negative correlation and b) meaning of a negative lag of maximum correlation.

La dynamique de la zone de recirculation semble répondre aux variations de vitesse observées au sommet de l'obstacle. L'intensité du mouvement de retour est plus grande suite au passage d'une portion de fluide ayant une vitesse élevée au sommet que lors du passage d'une portion plus lente. Des corrélations croisées faites à partir de la magnitude des vecteurs de vitesse

mènent à des conclusions similaires. Cette dynamique peut avoir des conséquences sur le développement des structures d'échappement provenant de la zone de recirculation. C'est ce que nous examinerons à l'aide d'une visualisation de l'écoulement à l'aval d'un amas de galets.

3 – ANALYSE COMBINÉE DE SÉQUENCES VIDÉO ET DE SÉRIES DE VITESSES

3.1 Visualisation et mesures de vitesse

L'analyse visuelle permet d'observer et de décrire le développement des structures de l'écoulement dans le temps et dans l'espace (PRATURY et BRODKEY, 1978). Elle sert aussi à mieux comprendre la complexité des fluctuations observées dans les séries de vitesses mesurées dans les écoulements turbulents. ROY *et al.* (1999) ont montré qu'il était possible de mettre en œuvre une méthode de visualisation en rivière malgré les valeurs élevées du nombre de Reynolds qu'on y retrouve. Cette méthode utilise un traceur lacté qui, une fois injecté en un point, permet de suivre à l'aide d'une caméra sous-marine le développement des structures dans le fluide. Des traceurs lactés ont déjà été utilisés en laboratoire parce que la faible quantité de gras qu'ils contiennent améliore grandement la qualité de la visualisation (DEFINA, 1996). De plus, ce traceur est blanc, ce qui facilite le rehaussement des contrastes lors de l'analyse des images en noir et blanc. En positionnant les courantomètres dans le champ de la caméra, il devient possible de combiner les mesures quantitatives de la vitesse de l'écoulement à l'observation qualitative du développement de structures turbulentes. La *figure 8* montre quatre images tirées de la séquence vidéo de ROY *et al.* (1999) illustrant le développement d'une structure d'échappement à l'aval d'un bloc protubérant dans la rivière Nicolet, Québec (*tableau 1*). Dans cette visualisation, le traceur est injecté directement dans la zone de recirculation au pied de l'obstacle. La structure d'échappement s'apparente à celles décrites par KAWANISI *et al.* (1993) à l'aval d'un obstacle hémisphérique dans un écoulement turbulent puisqu'elle ne possède pas d'élongation vers les flancs de l'obstacle, comme l'avaient observé ACARLAR et SMITH (1987) dans des écoulements laminaires.

En partant de l'hypothèse de ROY *et al.* (1999) et en utilisant la même séquence vidéo, nous avons développé une méthodologie visant à caractériser l'évolution de structures d'échappement. La méthode se scinde en deux étapes. La première consiste à identifier dans les séries de vitesse le passage des structures à grande échelle. Pour ce faire, la méthode de la série moyenne des fluctuations centrées réduites (BUFFIN-BÉLANGER *et al.*, 2000a) est retenue. Cette méthode consiste à générer une nouvelle série temporelle à partir de plusieurs séries selon la formule suivante :

$$\langle u_i \rangle = \frac{\sum_{j=1}^k \left[\left(\sum_{l=-W/2}^{l=W/2} u'_{ij} \right) / (W+1) \right]}{k} \quad (5)$$

où u' est la fluctuation centrée et réduite au temps i pour le courantomètre j ; k , le nombre de courantomètres (3 dans le cas présent) ; et W , une largeur de

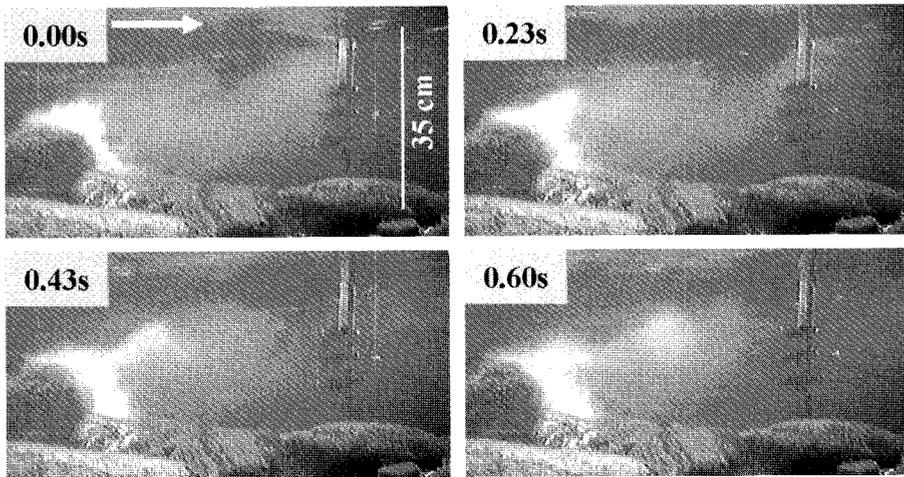


Figure 8 Quatre images provenant d'une visualisation à l'aide d'un traceur lacté injecté dans la zone de recirculation à l'aval d'un bloc protubérant dans un cours d'eau à lit de graviers (vitesse moyenne : 38 cm/s ; profondeur : 35 cm) (ROY *et al.*, 1999).

Ces images montrent clairement l'échappement d'une portion de fluide provenant de la zone de recirculation à l'aval du bloc protubérant. À noter, la position des trois courantomètres électromagnétiques utilisés pour mesurer les vitesses de l'écoulement.

*Images from the flow visualisation of the recirculating flow region downstream from a pebble cluster in a gravel-bed river using a milky white tracer injected in the lee of the obstacle (ROY *et al.*, 1999).*

A region of low-speed fluid is seen to be shed from the recirculating flow region into the main flow. The three electromagnetic current meters can be seen on the right-hand side of the images.

fenêtre en nombre de mesures pour tenir compte du décalage vertical des structures à grande échelle (dans le cas présent, 20 mesures, soit une seconde). Cette nouvelle série permet d'identifier le passage des structures de forte et de faible vitesse sur toute la tranche de l'écoulement à partir d'un critère de détection basé sur l'amplitude des fluctuations de la série moyenne. Cette approche s'apparente ainsi à la méthode *U-Level* (BOGARD et TIEDERMAN, 1986) à la différence qu'elle s'applique sur une série regroupant plusieurs séries temporelles de vitesse. En utilisant cette technique, nous avons localisé et retenu 10 événements d'amplitude marquée : cinq de forte vitesse et cinq de faible vitesse dans la série temporelle de cinq minutes échantillonnée pendant la visualisation (*figure 9*).

La seconde étape consiste à analyser les images vidéo associées au passage des dix structures à grande échelle que nous avons identifiées. Lors de l'échantillonnage sur le terrain, on avait synchronisé l'enregistrement des images à l'échantillonnage de vitesse (ROY *et al.*, 1999). Il est alors possible de lier précisément les séquences d'images au passage des structures à grande échelle. Pour chacun des 10 événements, nous avons analysé cinq images. La fréquence des images vidéo est de 30 images par seconde. À partir du

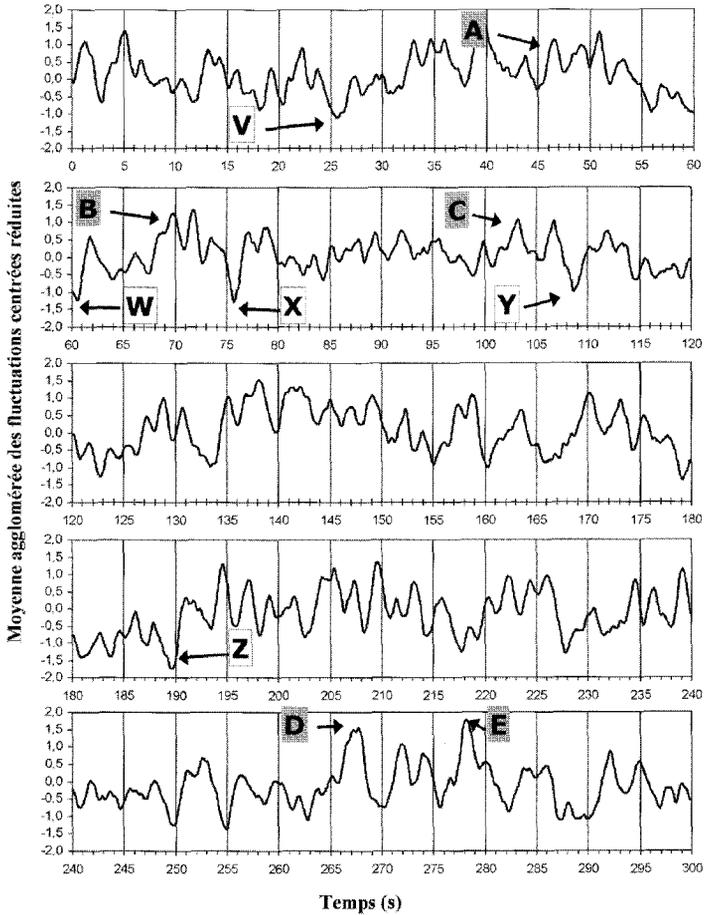


Figure 9 Série des moyennes agglomérées et position des structures à grande échelle. Les lettres A à E identifient les événements de vitesse rapide; les lettres V à Z identifient les événements de vitesse lente.

The location of large-scale flow structures are identified on a time series based on the average velocity signature sampled at three heights above the bed. Letters A-E locate the high-speed flow regions whereas letters V-Z locate the low-speed flow regions.

moment où le début d'une structure à grande échelle était détecté au niveau des courantomètres, nous avons analysé de manière rétrograde dans le temps une image sur 8. Cela permet de couvrir une période d'un peu plus d'une seconde, i.e. le temps que prennent les structures qui s'échappent de la zone de recirculation pour atteindre la position des courantomètres (figure 8). Cette période correspond aussi à la durée du passage des structures à grande échelle. Une grille d'échantillonnage placée sur l'écran (figure 10) permet de construire pour chacune des images (i.e. 50 images) une représentation binaire de la propagation du traceur lacté. Les valeurs des cellules de la matrice étaient attribuées selon l'intensité de la concentration du traceur d'après la fonction suivante :

$$D[i, j, t, n] = \begin{cases} 0 & \text{si absence de traceur} \\ 1 & \text{si pr sence de traceur} \end{cases} \quad (6)$$

où i et j sont les indices vertical et horizontal de la matrice ($i = 10 ; j = 18$) ; t , le temps en secondes ; et n , l'indice d'événement (A-E ; V-Z) Cette attribution était faite de manière visuelle plutôt qu'automatique étant donnée la difficulté de mettre en œuvre un algorithme tenant compte de la diminution de la densité du fluide traceur à mesure que l'on s'éloigne du point d'injection. Bien que cette densité s'atténue, elle conserve une information sur la dynamique du mouvement que l'œil peut percevoir.

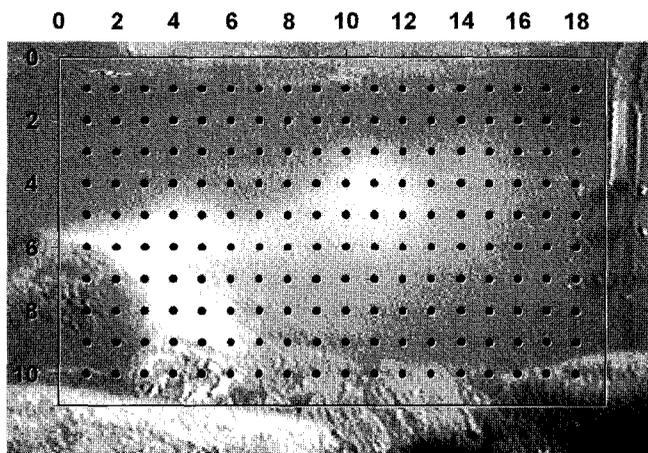


Figure 10 Grille placée sur l'écran pour obtenir les matrices binaires de la densité du traceur dans le fluide.

Sampling grid used to generate the binary matrices.

La figure 11 présente les cinquante matrices binaires provenant de l'analyse des images. Ces matrices se prêtent à des manipulations arithmétiques pour faire ressortir des patrons de distribution du traceur selon le type de structure. On peut ainsi calculer la matrice de densité moyenne pour chaque pas temporel selon le type d'événement :

$$M_{moy}[i, j, t] = \frac{\sum_{n=0}^{n=N} M[i, j, t, n]}{N} \quad (7)$$

où N est le nombre de structures pour chaque type d'événement (5). M_{moy} est calculé pour les événements de forte et de faible vitesse. Une matrice de densité moyenne pour chaque type de structure peut aussi être calculée selon :

$$M_{moy}[i, j] = \frac{\sum_{n=0}^{n=N} \sum_{t=0}^{t=T} M[i, j, t, n]}{NT} \quad (8)$$

où N est le nombre de structures pour chaque type d'événement (5) et T , le nombre d'images binaires pour chaque structure (5).

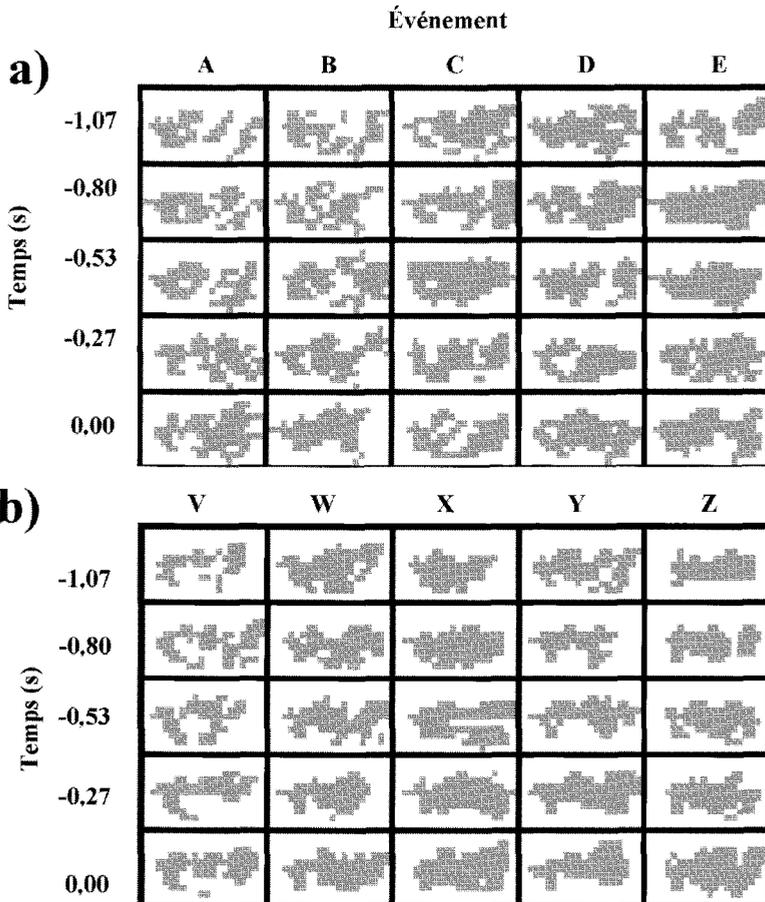


Figure 11 Les cinquante matrices binaires de la densité de traceur associées aux événements a) de vitesse rapide et b) de vitesse lente.

Fifty binary matrices showing the tracer density according to a) a high-speed flow region and b) a low-speed flow region passing the pebble cluster.

3.2 Résultats

La figure 12 présente les matrices de densité moyenne associées au passage des structures à forte et à faible vitesse pour les cinq images rétrogrades ($M_{moy} [i, j, t]$). Cette image montre les étapes de progression des mouvements d'échappement à l'aval de l'amas de galets pour les deux types de front. Deux tendances se dégagent des matrices. Tout d'abord, la dispersion du traceur est plus étendue verticalement pour la séquence d'images associées au front de vitesse rapide que pour celle associée au front de vitesse lente. Ensuite, il semble que la densité du traceur soit moins prononcée au centre du nuage de dispersion pour la séquence d'images associée au front rapide que celle associée au front lent. Ceci est particulièrement visible pour les images au temps 0,00 s, 0,27 s et 0,53 s.

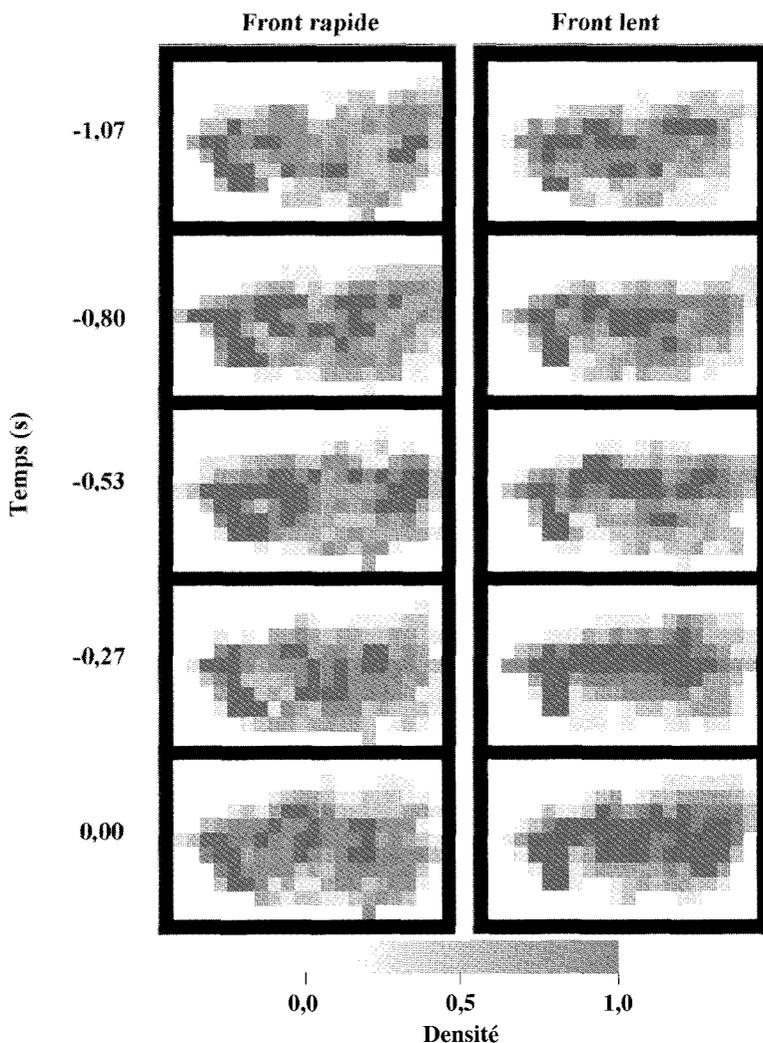


Figure 12 Les matrices de densité moyenne selon les types d'événement pour les cinq images rétrogrades selon les fronts de vitesse rapide et lente. *Averaged density matrices for each time step of the high- and low-speed flow regions.*

La figure 13 présente les matrices de densité moyenne pour toutes les matrices binaires associées au passage des structures à forte et à faible vitesse ($M_{moy} [i,j]$). Ces images font ressortir de manière plus évidente les deux tendances précédemment observées. Il apparaît clairement que l'extension verticale des structures d'échappement est plus grande lors du passage d'une structure à forte vitesse que lors de celui d'une structure de faible vitesse. En effet, l'étendue des valeurs élevées de densité moyenne est plus grande pour la matrice des vitesses élevées que pour celles des vitesses faibles, notamment entre les positions horizontales 12 et 16. Il ressort finalement que la den-

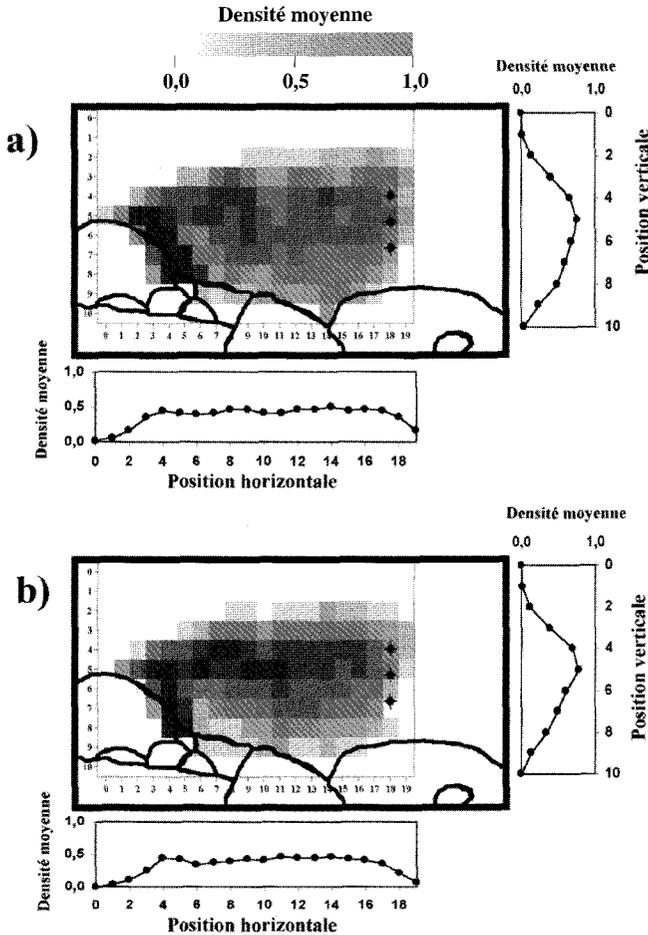


Figure 13 Densité moyenne du traceur pour les 25 matrices binaires associées au passage des fronts de a) vitesse rapide et b) vitesse lente. Les diagrammes en-dessous et à droite des matrices représentent la distribution des densités moyennes selon la position horizontale et verticale respectivement.

Ensemble average density matrices for a) the high-speed flow region and b) the low-speed flow region. Diagrams on the right-hand side and at the bottom show horizontal and vertical average density.

sité du traceur est plus élevée au centre de la matrice associée aux fronts de vitesse faible. Ceci indique la zone de propagation préférentielle des structures d'échappement lors du passage des grandes structures à faible vitesse.

La matrice des différences entre les valeurs de densité moyenne obtenues lors du passage des structures à forte vitesse et à faible vitesse synthétise ces résultats (figure 14). Les régions noires indiquent les portions où la densité du traceur est plus importante lors du passage des structures à faible vitesse alors que les régions blanches indiquent des régions où la densité du traceur est plus importante lors du passage des structures à forte vitesse. Cette image fait

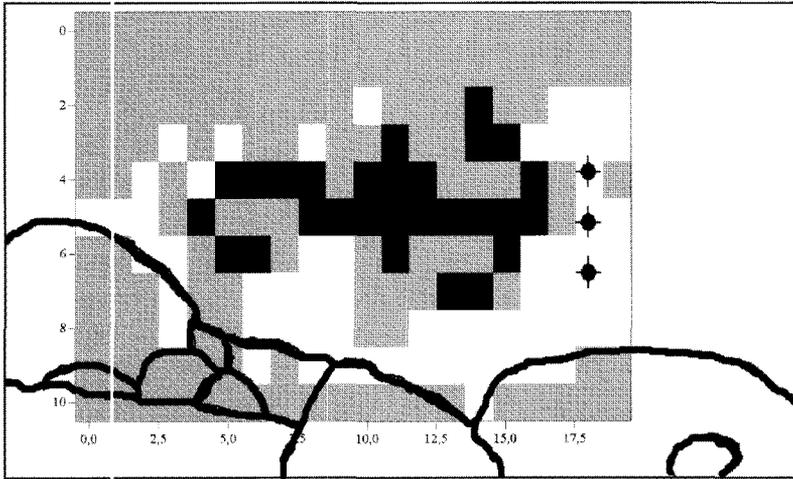


Figure 14 Matrice des différences de densité du traceur lacté : les régions noires indiquent une densité plus forte lors du passage d'une structure de faible vitesse ; les régions blanches, une densité plus forte lors du passage d'une structure de vitesse élevée ; les régions grises, une densité similaire lors du passage des deux types de structure.

Matrix of the tracer density difference between the high-speed and low-speed images: black regions represent a higher tracer density when a low-speed region is advecting; white regions represent a higher tracer density when a high-speed region is advecting; grey regions indicate that the same tracer density is occurring during the advection of high- and low-speed flow regions.

ressortir clairement la différence entre la propagation des structures d'échappement suite au passage des deux types de structures à grande échelle et elle nous permet de confirmer que la trajectoire des structures d'échappement associées aux structures de faibles vitesses est mieux définie dans l'espace et le temps.

4 – UN MODÈLE D'INTERACTIONS ENTRE STRUCTURES TURBULENTES

Il y a une forte convergence entre les observations faites à partir des résultats de l'analyse spatio-temporelle des corrélations croisées et de ceux de l'analyse des matrices de densité. En combinant les interprétations, nous pouvons présenter un modèle en quatre étapes de la dynamique liant les structures d'échappement au passage des structures à grande échelle (figure 15).

À l'étape 1, des structures à grande échelle s'approchent d'un bloc protubérant. Les structures à grande échelle sont incessantes dans l'écoulement (BUFFIN-BÉLANGER *et al.*, 2000a). Pour l'élaboration du modèle, nous isolons cependant trois structures et décrivons leurs interactions avec la zone de cir-

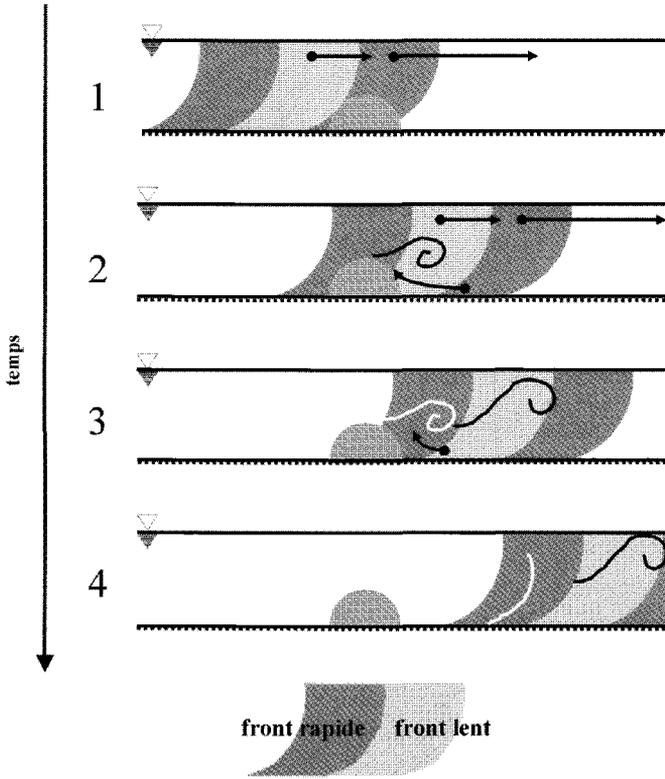


Figure 15 Modèle de la dynamique liant le passage des structures à grande échelle aux différentes manifestations des structures d'échappement. La présence des fronts de forte et de faible vitesse est révélée par la longueur des vecteurs et la couleur des fronts. Les différentes étapes du modèle sont décrites dans le texte.

Conceptual model linking the advection of large-scale flow structures to the distinct mode of shedding motions downstream from an obstacle. The model is fully described in the text.

culation lors de leur déplacement vers l'aval. De plus, étant donnée l'absence de mesure tridimensionnelle sur le passage des structures à grande échelle, d'une part, et l'absence d'un consensus sur l'origine de ces structures, d'autre part, nous définissons les structures à grande échelle comme des fronts de fluide rapide ou lent se propageant vers l'aval. Sur le diagramme, la longueur des vecteurs et le niveau de gris révèlent la nature des fronts de forte et de faible vitesse. Ainsi, la première structure atteignant l'obstacle est une structure à forte vitesse, d'où la présence d'un vecteur de vitesse rapide au sommet du bloc.

L'étape 2 illustre le moment où se produit le mouvement de retour de forte magnitude dans la zone de recirculation suite au passage du front de forte vitesse à l'étape précédente. La présence du bloc limite l'extension de ce mouvement de retour vers l'amont et force le fluide à se diriger vers le haut. Ce mouvement se produit avec un décalage de 1 à 4 secondes après le passage

du front à forte vitesse au-dessus de l'obstacle. BUFFIN-BÉLANGER *et al.* (2000a) ont montré que la durée des structures à grande échelle, dans ce même environnement, oscillait entre 2 et 5 secondes. Ainsi, au moment où le fort mouvement de retour se produit, une structure à faible vitesse passe au-dessus de l'obstacle. Ces observations rejoignent également la fréquence d'échappement de 1 événement par 5 secondes mesurée par BUFFIN-BÉLANGER et ROY (1998) à l'aval du même obstacle (*figure 12* dans BUFFIN-BÉLANGER et ROY, 1998). De plus, BUFFIN-BÉLANGER *et al.* (2000a) ont montré que les fronts de faible vitesse avaient tendance à présenter des vitesses verticales positives (i.e. mouvement orienté vers la surface) alors que les fronts de forte vitesse présentaient plutôt des vitesses verticales négatives (i.e. mouvement plongeant vers le lit). Cela, combiné au fait que le mouvement de retour possède une magnitude élevée vers le haut, donne naissance à des structures d'échappement dont la composante verticale vers la surface sera dominante.

À l'étape 3, le développement de ces structures d'échappement se poursuit vers la surface. Les structures conservent une cohérence le long d'une trajectoire oblique. Cette cohérence provient du faible cisaillement lié à la concordance des vitesses verticales vers la surface des mouvements d'échappement et des fronts de faible vitesse. Cette description rejoint l'observation tirée des matrices binaires montrant la relation entre les zones de faible vitesse et la propagation des structures d'échappement. Pendant ce temps, la structure à faible vitesse passant au-dessus de l'obstacle à l'étape 2 entraîne un mouvement de retour de faible magnitude à l'aval de l'obstacle. La magnitude des mouvements d'échappement verticaux sera moindre. De plus, au moment où se forment les structures d'échappement, une structure de forte vitesse passe au-dessus de l'obstacle. Étant donnée que ces structures présentent des vitesses verticales orientées vers le lit, cette situation donne naissance à des structures d'échappement dans un environnement où le cisaillement vertical sera plus intense. Cela se traduira notamment par une extension verticale plus prononcée du traceur liquide lors de sa propagation vers l'aval.

La dernière étape montre l'évolution de l'échappement généré à la suite du passage d'un front de vitesse lente. Cette structure prend de l'expansion à la fois vers le lit et vers la surface en se propageant vers l'aval. La dispersion verticale du traceur provenant des matrices binaires illustre d'ailleurs bien cette dynamique. Cette étape ferme la boucle d'une dynamique qui se répétera avec la récurrence des structures à grande échelle.

5 – CONCLUSION

Nous proposons un modèle qui décrit le lien dynamique entre le passage de structures à grande échelle et l'échappement de portions lentes de fluide à l'aval de blocs protubérants dans une rivière à lit graveleux. Ce modèle se fonde sur des observations provenant de deux expériences novatrices en milieu naturel. Le lien dynamique entre les deux types de structures s'exprime selon (1) les corrélations spatio-temporelles entre les fluctuations de vitesse associées au passage des structures à grande échelle et celles des vitesses

dans la zone de recirculation et (2) les différentes manifestations des structures d'échappement associées au passage des grandes structures.

Les observations et le modèle appuient et raffinent l'hypothèse avancée par ROY *et al.* (1999) quant à la relation entre les différentes manifestations de l'échappement et la présence des structures à grande échelle dans l'écoulement. Il ressort que les structures à grande échelle jouent un rôle crucial dans la dynamique d'échappement à l'aval des obstacles. Le modèle rejoint ainsi d'autres modèles décrivant les interactions entre les structures à grande échelle et les éjections provenant de la zone proximale au lit. Dans ces modèles, les structures à grande échelle sont critiques à la dynamique des échanges de quantité de mouvement entre la région à proximité du lit et l'écoulement ambiant (PRATURY et BRODKEY, 1978).

Le modèle décrit un mécanisme dynamique que l'on peut intégrer dans un tronçon de rivière pour mieux comprendre l'organisation de son écoulement (BUFFIN-BÉLANGER *et al.*, 2000b). L'une des difficultés de la description de cette organisation provient de la variabilité des structures qu'on y retrouve. Dans ce sens, ce modèle que nous proposons décrit un mécanisme qui peut expliquer une partie de la variabilité des structures d'échappement en les liant aux structures à grande échelle. Le modèle n'incorpore cependant pas toutes les variables inhérentes à la complexité du milieu naturel. Par exemple, les structures à grande échelle sont ici caractérisées uniquement par leur extension verticale et longitudinale, or leur extension latérale peut jouer un rôle crucial dans la dynamique de la zone de recirculation. La forme et l'agencement des obstacles affectent aussi la dynamique de cette zone ainsi que la distribution des structures à grande échelle. Ces éléments devront éventuellement être considérés pour renforcer le modèle.

Cet article illustre finalement la nécessité de caractériser les structures à grande échelle pour bien comprendre l'organisation de l'écoulement en rivières à lit de graviers. Les structures à grande échelle constituent l'élément fondamental de l'écoulement turbulent, à tout le moins en rivière à lit de graviers (ROY et BUFFIN-BÉLANGER, 2001). À l'échelle d'un tronçon de rivière, on postule que ces structures sont liées à la variabilité de la force tractrice et à la dynamique du transport des sédiments et du développement des formes du lit (DRAKE *et al.*, 1988 ; HASSAN et REID, 1990 ; BEST, 1993 ; BUFFIN-BÉLANGER *et al.*, 2000a). Il appert également que l'on doit tenir compte des structures à grande échelle dans la description des habitats aquatiques (NOWELL et JUMAS, 1984 ; DAVIS et BARMUTA, 1989). La reconnaissance de l'importance des structures à grande échelle amène un regard neuf qui peut éclaircir les liens existant entre l'organisation des écoulements et ces différentes problématiques.

REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier N. Bergeron pour la camera sous-marine et M. Lapointe pour des commentaires critiques ayant permis d'améliorer la qualité des analyses. Les auteurs remercient aussi les trois réviseurs anonymes pour

leurs commentaires et suggestions ayant permis de rehausser la qualité de l'ensemble du document. Finalement, les auteurs remercient le Fonds pour la formation des chercheurs et l'aide à la recherche (FCAR) et le Conseil de recherche en sciences naturelles et en génie (CRSNG) pour leur soutien financier.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ACARLAR M.S., SMITH C.R., 1987. A study of hairpin vortices in a laminar boundary layer. Part 1. Hairpin vortices generated by a hemispherical protuberance. *J. of Fluid Mechanics*, 175, 1-41.
- BEST J.L., 1993. On the interactions between turbulent flow structure, sediment transport and bedform development: some considerations from recent experimental research. In: Clifford N.J., French J.R., Hardisty J. (Ed.): *Turbulence: Perspectives on Flow and Sediment Transport*. Wiley, Chichester, 61-92.
- BOGARD D.G., TIEDERMAN W.G., 1986. Burst detection with single-point velocity measurements. *J. of Fluid Mechanics*, 162, 389-413.
- BRAYSHAW A.C., 1984. Characteristics and origin of cluster bedforms in coarse-grained alluvial channels. In: Koster E.H., Steel R.J. (Ed.): *Sedimentology of gravels and conglomerates*. *Canadian Society of Petroleum Geologists*, 10, 77-85.
- BROWN G.L., THOMAS S.W., 1977. Large structure in a turbulent boundary layer. *Physics of Fluids*, 20, s243-s252.
- BUFFIN-BÉLANGER T., ROY A.G., 1998. Effects of a pebble cluster on the turbulent structure of a depth-limited flow in a gravel-bed river. *Geomorphology*, 25, 249-267.
- BUFFIN-BÉLANGER T., 2001. Structure d'un écoulement dans un lit de graviers en présence d'amas de galets. Thèse de doctorat, Université de Montréal, 244 p.
- BUFFIN-BÉLANGER T., ROY A.G., KIRBRIDE A.D., 2000a. On large-scale flow structures in a gravel-bed river. *Geomorphology*, 32, 417-435.
- BUFFIN-BÉLANGER T., ROY A.G., KIRBRIDE A.D., 2000b. Vers l'intégration des structures turbulentes de l'écoulement dans la dynamique d'un cours d'eau à lit de graviers. *Géographie physique et Quaternaire*, 54, 105-117.
- CANTWELL B.J., 1981. Organized motions in turbulent flow. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 13, 457-515.
- CHATFIELD C., 1989. The analysis of time series: an introduction - 4th Edition. Chapman and Hall, London, 241 p.
- CLIFFORD N.J., FRENCH J.R., HARDISTY J., 1993. *Turbulence: Perspectives on Flow and Sediment Transport*. Wiley, Chichester, 360 p.
- CLIFFORD N.J., ROBERT A., RICHARDS K.S., 1992. Estimation of flow resistance in gravel-bedded rivers: a physical explanation of the multiplier of roughness length. *Earth Surface Processes and Landforms*, 17, 111-117.
- DAVIS J.A., BARMUTA L.A., 1989. An ecologically useful classification of mean and near-bed flows in streams and rivers. *Freshwater Biology*, 21, 271-282.
- DEFINA A., 1996. Transverse Spacing of low-speed streaks in a channel flow over a rough bed. In: Ashworth P., Best J.L., Bennett S.J., McLelland S.J. (Ed.): *Coherent Flow Structures in Open Channels*. Wiley, Chichester, 87-99.
- DRAKE T.G., SHREVE R.L., DIETRICH W.E., WHITING P.J., LEOPOLD L., 1988. Bedload transport of fine gravel observed by motion picture. *J. of Fluid Mechanics*, 192, 2193-2217.
- FALCO R.E., 1977. Coherent motions in the outer region of turbulent boundary layers. *Physics of Fluids*, 20, s124-s132.
- FERGUSON R.I., KIRKBRIDE A.D., ROY A.G., 1996. Markov analysis of velocity fluctuations in gravel-bed rivers. In: Ashworth P., Best J.L., Bennett S.J., McLel-

- land S.J. (Ed.): Coherent Flow Structures in Open Channels. Wiley, Chichester, 165-183.
- HASSAN M.A., REID I., 1990. The influence of microform bed roughness elements on flow and sediment transport in gravel bed rivers. *Earth Surface Processes and Landforms*, 15, 739-750.
- JACKSON G., 1976. Sedimentological and fluid-dynamic implications of the turbulent bursting phenomenon in geophysical flows. *J. of Fluid Mechanics*, 77, 531-560.
- KAWANISI K., MAGHREBI M.F., YOKOSI S., 1993. An instantaneous 3-D analysis of turbulent flow in the wake of a hemisphere. *Boundary-Layer Meteorology*, 64, 1-14.
- KIM K.C., ADRIAN R.J., 1999. Very large-scale motion in the outer layer. *Physics of Fluids*, 11, 417-422.
- KIRKBRIDE A.D., 1993. Observation of the influence of bed roughness on turbulence structure in depth-limited flows over gravel beds. In: Clifford N.J., French J.R., Hardisty J. (Ed.): Turbulence: Perspectives on Flow and Sediment Transport. Wiley, Chichester, 185-196.
- KIRKBRIDE A.D., FERGUSON R.I., 1995. Turbulent flow structure in a gravel-bed river: Markov chain analysis of the fluctuating velocity profile. *Earth Surface Processes and Landforms*, 20, 721-733.
- KOMORI S., MURAKAMI Y., UEDA H., 1989. The relationship between surface-renewal and bursting motions in an open-channel flow. *J. of Fluid Mechanics*, 203, 103-123.
- LAUFER J., 1975. New trends in experimental turbulent research. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 7, 307-326.
- LEVI E., 1983. A universal Strouhal law. *J. of Engineering Mechanics*, 109, 718-727.
- LU S.S., WILLMARTH W.W., 1973. Measurements of the structure of the Reynolds stress in a turbulent boundary layer. *J. of Fluid Mechanics*, 60, 481-511.
- MATTHES G.H., 1947. Macroturbulence in natural stream flow. *Transactions of American Geophysical Union*, 28, 255-265.
- MARINUZZI R., TROPEA C., 1993. The flow around surface-mounted, prismatic obstacles placed in a fully developed channel flow. *J. of Fluids Engineering*, 115, 85-92.
- NAKAGAWA H., NEZU I., 1981. Structure of space-time correlations of bursting phenomena in an open-channel flow. *J. of Fluid Mechanics*, 104, 1-43.
- NAKAMURA Y., 1996. Vortex shedding from bluff bodies and a universal Strouhal number. *J. of Fluids and Structures*, 10, 159-171.
- NEZU I., NAKAGAWA H., 1993. Turbulence in Open-channel Flows, IAHR/AIRH, Monograph series, A.A. Balkema, Rotterdam, 281 p.
- NOWELL A.R.M., JUMARS P.A., 1984. Flow environments of aquatic benthos. *Annual Review of Ecological Systems*, 15, 303-328.
- PAOLA C., GUST G., SOUTHARD J.B., 1986. Skin friction behind isolated hemispheres and the formation of obstacle marks. *Sedimentology*, 33, 279-293.
- PRATURY A.K., BRODKEY R.S., 1978. A stereoscopic visual study of coherent structures in turbulent shear flow. *J. of Fluid Mechanics*, 89, 251-272.
- ROBERT A., ROY A.G., DE SERRES B., 1993. Space-time correlations of velocity measurements at a roughness transition in a gravel-bed river. In: Clifford N.J., French J.R., Hardisty J. (Ed.): Turbulence: Perspectives on Flow and Sediment Transport. Wiley, Chichester, 165-184.
- ROBERT A., ROY A.G., DE SERRES B., 1996. Turbulence at a roughness transition in a depth-limited flow over a gravel-bed river. *Geomorphology*, 16, 175-187.
- ROBINSON S.K., 1991. Coherent motions in the turbulent boundary layer. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 23, 601-639.
- ROY A.G., BIRON P., LAPOINTE M.F., 1997. Implications of low-pass filtering on power spectra and autocorrelation functions of turbulent velocity signals. *Mathematical Geology*, 29, 653-668.
- ROY A.G., BIRON P., BUFFIN-BÉLANGER T., LEVASSEUR M., 1999. Combined visual and quantitative techniques in the study of natural turbulent flows. *Water Resources Research*, 35, 871-877.

- ROY A.G., BUFFIN-BÉLANGER T., 2001. *In*: Mosley P (ed.): Gravels-Bed Rivers V. New Zealand Hydrological Society, 375-397.
- ROY A.G., BUFFIN-BÉLANGER T., DELAND S., 1996. Scales of turbulent coherent flow structures in a gravel bed river. *In*: Ashworth P., Best J.L., Bennett S.J., McLelland S.J. (Ed.): Coherent Flow Structures in Open Channels. Wiley, Chichester, 147-164.
- ROY Y.M., BLACKWELDER R.F., 1994. On the role of the outer region in the turbulent-boundary-layer bursting process. *J. of Fluid Mechanics*, 259, 345-373.
- SAVORY E., TOY N., 1986. Hemisphere and hemisphere-cylinders in turbulent boundary layers. *J. of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 23, 345-364.
- SCHOFIELD W.H., LOGAN E., 1990. Turbulent shear flow over surface mounted obstacles. *J. of Fluid Engineering*, 112, 376-385.
- SMITH C.R., 1996. Coherent flow structures in smooth-wall turbulent boundary layers: facts, mechanisms and speculation. *In*: Ashworth P., Best J.L., Bennett S.J., McLelland S.J. (Ed.): Coherent Flow Structures in Open Channels. Wiley, Chichester, 1-39.
- VIOLLET P.-L., CHABARD J.-P., ESPOSITO P., LAURENCE D., 1998. Mécanique des fluides appliquée. *Presses des Ponts et Chaussées*, Paris, 367 p.
- WILLIAMS J.J., 1996. Turbulent flow in rivers. *In*: Carling P.A., Dawson M.R. (Ed.): Advances in fluvial dynamics and stratigraphy. Wiley, Chichester, 1-32.
- YALIN M.S., 1992. River Mechanics. Pergamon Press, Exeter, 219 p.
- ZDRAVKOVICH M.M., 1996. Different modes of vortex shedding: an overview. *J. of Fluids and Structures*, 10, 427-437.