

Vers l'intégration des structures turbulentes de l'écoulement dans la dynamique d'un cours d'eau à lit de graviers

On the integration of turbulent flow structures within the dynamics of a gravelbed river reach.

Die Integration der Turbulenz-Strukturen der Strömung in die Dynamik eines Wasserlaufs mit Kiesbett.

Thomas Buffin-Bélanger et André G. Roy

Volume 54, numéro 1, 2000

URI : <https://id.erudit.org/iderudit/004776ar>

DOI : <https://doi.org/10.7202/004776ar>

[Aller au sommaire du numéro](#)

Éditeur(s)

Les Presses de l'Université de Montréal

ISSN

0705-7199 (imprimé)

1492-143X (numérique)

[Découvrir la revue](#)

Citer cet article

Buffin-Bélanger, T. & Roy, A. G. (2000). 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(1), 105-117. <https://doi.org/10.7202/004776ar>

Résumé de l'article

La compréhension de la dynamique des cours d'eau nécessite la connaissance des interactions qui lient l'écoulement, le transport des sédiments et le développement des formes sur le lit. Ceci implique la caractérisation des structures individuelles présentes dans l'écoulement mais aussi une prise en compte de leur organisation spatiotemporelle dans la section du cours d'eau. Trois structures turbulentes sont fréquemment utilisées pour décrire les écoulements sur lit de graviers : les structures d'éjection au lit, les structures d'échappement à l'aval d'obstacles protubérants et les structures à grande échelle se développant sur toute la tranche de l'écoulement. Il est possible de décrire les mécanismes de formation de ces structures de même que d'envisager leurs interactions dans un écoulement turbulent. Par exemple, les structures à grande échelle changent la dynamique des zones de recirculation à l'aval d'obstacle, ce qui donne naissance à différentes manifestations des structures d'échappement. Il est cependant plus difficile de regrouper ces structures à l'échelle d'une section de rivière. À partir des mécanismes de formation des structures et de leurs interactions, nous illustrons la complexité de l'organisation d'un écoulement à l'échelle d'une section de rivière. Bien que spéculative, cette illustration fait ressortir (1) l'étroite relation entre les échelles de rugosité du lit et les échelles des structures qui organisent l'écoulement ; (2) la présence de zones de production et de dissipation des structures ; et (3) l'anisotropie structurale de l'organisation de l'écoulement caractérisée par des interactions complexes entre les différentes structures. Cet essai souligne que les interactions entre les structures sont tout aussi importante que les structures elles-mêmes dans notre compréhension de l'organisation de l'écoulement.

Essai

VERS L'INTÉGRATION DES STRUCTURES TURBULENTES DE L'ÉCOULEMENT DANS LA DYNAMIQUE D'UN COURS D'EAU À LIT DE GRAVIERS

Thomas BUFFIN-BÉLANGER*, André G. ROY et Alistair D. KIRKBRIDE, Département de géographie, Université de Montréal, C.P. 6128, Succ. Centre-ville, Montréal, Québec H3C 3J7.

RÉSUMÉ La compréhension de la dynamique des cours d'eau nécessite la connaissance des interactions qui lient l'écoulement, le transport des sédiments et le développement des formes sur le lit. Ceci implique la caractérisation des structures individuelles présentes dans l'écoulement mais aussi une prise en compte de leur organisation spatio-temporelle dans la section du cours d'eau. Trois structures turbulentes sont fréquemment utilisées pour décrire les écoulements sur lit de graviers : les structures d'éjection au lit, les structures d'échappement à l'aval d'obstacles protubérants et les structures à grande échelle se développant sur toute la tranche de l'écoulement. Il est possible de décrire les mécanismes de formation de ces structures de même que d'envisager leurs interactions dans un écoulement turbulent. Par exemple, les structures à grande échelle changent la dynamique des zones de recirculation à l'aval d'obstacle, ce qui donne naissance à différentes manifestations des structures d'échappement. Il est cependant plus difficile de regrouper ces structures à l'échelle d'une section de rivière. À partir des mécanismes de formation des structures et de leurs interactions, nous illustrons la complexité de l'organisation d'un écoulement à l'échelle d'une section de rivière. Bien que spéculative, cette illustration fait ressortir (1) l'étroite relation entre les échelles de rugosité du lit et les échelles des structures qui organisent l'écoulement ; (2) la présence de zones de production et de dissipation des structures ; et (3) l'anisotropie structurale de l'organisation de l'écoulement caractérisée par des interactions complexes entre les différentes structures. Cet essai souligne que les interactions entre les structures sont tout aussi importante que les structures elles-mêmes dans notre compréhension de l'organisation de l'écoulement.

ABSTRACT *On the integration of turbulent flow structures within the dynamics of a gravel-bed river reach.* Understanding the dynamics of a river involves knowledge on the interactions between flow, sediment transport and bedform development at a range of scales. This requires the characterisation of flow structures and of the flow organisation at the reach scale. Three types of flow structures have been commonly described in flows over gravel-bed rivers: the bursting motions in the near-bed region (ejections), the shedding motions from the larger protruding particles and the large-scale flow structures which develop in the outer region of the flow. We describe the processes that give birth to these flow structures along with the possible interactions between them. As an example, the passage of large-scale flow structures changes the dynamics of the separation of flow in the wake of an obstacle, thus affecting the manifestation of shedding motions. These processes and interactions are then combined into an illustration of the complex organisation of flow at the scale of a river reach. Although speculative, this illustration highlights that (1) the scales and locations in space of the structures are closely related to the scale and distribution of the roughness elements, (2) the flow is organized into clear zones of production and dissipation of flow structures, and (3) the organization of the flow presents a strong structural anisotropy with complex interactions between the flow structures. This essay outlines that the interactions between flow structures are as important as the presence of the structures themselves in the description of turbulent flows over gravel-bed rivers.

ZUSAMMENFASSUNG *Die Integration der Turbulenz-Strukturen der Strömung in die Dynamik eines Wasserlaufs mit Kiesbett.* Für das Verständnis der Dynamik der Wasserläufe ist eine Kenntnis der Wechselwirkung zwischen der Strömung, der Beförderung der Sedimente und der Entwicklung der Flussbettformen notwendig. Dies schließt sowohl die Beschreibung der in der Strömung vorhandenen typischen individuellen Strukturen ein, als auch die Berücksichtigung ihrer räumlich-zeitlichen Organisation im Wasserlaufabschnitt. Drei Turbulenz-Strukturen werden häufig benutzt, um die Strömung auf Kiesbetten zu beschreiben: Strukturen des Auswurfs auf das Bett, Strukturen des Entweichens unterhalb herausragender Hindernisse und Strukturen großen Umfangs, die sich über den ganzen Bereich der Strömung entwickeln. Es ist möglich, die Mechanismen der Bildung dieser Strukturen zu beschreiben, sowie ihre Wechselwirkungen in einer Turbulenz-Strömung in Betracht zu ziehen. Z.B. verändern die Strukturen großen Umfangs die Dynamik der Abschnitte des erneuten Fließens unterhalb eines Hindernisses, was zu einer veränderten Form der Strukturen des Entweichens führt. Doch ist es schwieriger diese Strukturen auf der Ebene eines Flussabschnittes zu gruppieren. Ausgehend von den Mechanismen der Bildung der Strukturen und ihrer Wechselwirkungen stellen wir die Komplexität der Organisation einer Strömung auf der Ebene eines Flussabschnittes dar. Obwohl diese Darstellung spekulativ ist, hebt sie drei Dinge hervor: (1) Die enge Beziehung zwischen dem Umfang der Rauheit des Bettes und dem Umfang der Strukturen, welche die Strömung organisieren; (2) die Existenz von Produktions- und Auflösungs-zonen der Strukturen; (3) die strukturelle Anisotropie der Organisation der Strömung, bestimmt durch komplexe Wechselwirkungen zwischen den verschiedenen Strukturen. Dieser Essay hebt hervor, dass für das Verständnis der Organisation der Strömung die Wechselwirkungen zwischen den Strukturen ebenso wichtig sind wie die Strukturen selbst.

INTRODUCTION

L'observation d'un cours d'eau peut laisser croire que son écoulement est aléatoire et sans organisation. En y regardant d'un peu plus près, on s'aperçoit cependant qu'il existe ce que l'on peut appeler des *structures turbulentes*. Ces structures prennent des formes parfois très visibles. Les tourbillons formés à la rencontre de deux cours d'eau ou à l'aval de blocs protubérants en sont de bons exemples. D'autres, comme les pulsations de vitesses, sont des structures plus subtiles à identifier. On peut ensuite observer que ces structures naissent, interagissent les unes avec les autres puis disparaissent dans l'écoulement ambiant, et ce, de manière plus ou moins périodique. De cette façon, les structures turbulentes contribuent activement à l'organisation des écoulements. La description de cette organisation dans les cours d'eau à lit de graviers représente le défi autour duquel cet essai s'articule.

CONTEXTE

Les structures de l'écoulement fascinent depuis longtemps. Leonardo da Vinci (1452-1519), par exemple, s'intéressait aux formes de l'écoulement créées au pied des piliers de ponts. Il fut l'un des premiers à décrire des tourbillons récurrents dans des écoulements en rivière (voir l'historique dans Nezu et Nakagawa, 1993). Plus récemment, Matthes (1947) présentait une typologie détaillée de plusieurs structures observées dans des cours d'eau américains et soulignait, de ce fait, leur importance dans la dynamique fluviale. Aujourd'hui, la recherche sur les structures rencontrées dans les écoulements génère une quantité impressionnante de travaux en laboratoire dans les champs du génie et de la mécanique des fluides (voir les recensions de Robinson [1991] et Smith [1996]), mais également en géomorphologie fluviale, comme le soulignent les récents comptes rendus de conférences de Clifford *et al.* (1993) et de Ashworth *et al.* (1996). Les structures de l'écoulement ont en effet un rôle à jouer dans les processus de prise en charge et de transport des sédiments et dans le développement des formes sur le lit. Les formes du lit donnent également naissance à des structures qui interagissent avec l'écoulement ambiant. Ces interactions entre les structures de l'écoulement, les mécanismes propres au transport des sédiments et le développement des formes du lit sont cruciales pour décrire la dynamique fluviale (Leeder, 1983 ; Best, 1993). Elles soulignent également l'importance de comprendre l'organisation des écoulements naturels.

L'ensemble des travaux faits en laboratoire a apporté des connaissances fondamentales sur les types de structures que l'on retrouve dans les écoulements et sur leur mécanisme de formation. Toutefois, ces connaissances sont souvent tirées d'expériences qui reproduisent mal les écoulements naturels. Les échelles d'observation ne sont tout d'abord pas les mêmes et, bien que les structures résultent de mécanismes qui peuvent exister à différentes échelles spatiales et temporelles, il n'est pas certain que les mécanismes de formation soient indépendants de l'échelle. Ensuite, les instruments de mesure et d'observation utilisés

dans les écoulements ne permettent pas de caractériser les structures de façon aussi fine en milieux naturels qu'en laboratoire. Jusqu'à tout récemment, par exemple, on avait réalisé peu de visualisation détaillée de l'écoulement en rivière (Roy *et al.*, 1999). La diversité des surfaces d'écoulement en milieu naturel rend également difficile l'application de modèles développés en laboratoire. Par exemple, l'organisation des écoulements sur les lits sablonneux sera différente de celle retrouvée dans les écoulements sur lit de graviers. La rugosité des éléments du lit, leur agencement et la dynamique même du lit en réponse à l'écoulement font que l'organisation de ces écoulements doit être approchée de manière différente. Finalement, la variabilité des structures et la complexité des interactions entre elles rendent difficile leur identification en milieu naturel. Pour ces raisons, il est délicat de transférer les connaissances obtenues en laboratoire à une section de rivière.

Les auteurs ont depuis quelques années participé à de nombreuses campagnes de terrain dans des cours d'eau à lit de graviers. Lors de ces campagnes, nous avons progressé dans notre compréhension de la dynamique des structures turbulentes en adaptant des techniques généralement réservées au laboratoire à des études en milieu naturel. Ainsi, nous avons (1) mesuré les vitesses de l'écoulement à l'aide de courantomètres électromagnétiques à haute résolution spatiale et temporelle (Robert *et al.*, 1996 ; Roy *et al.*, 1996 ; Buffin-Bélangier et Roy, 1998), (2) utilisé en simultanée plusieurs courantomètres électromagnétiques (Kirkbride et Ferguson, 1995 ; Ferguson *et al.*, 1996 ; Buffin-Bélangier *et al.*, 2000) et (3) mis en œuvre une technique de visualisation de l'écoulement en simultanée à la prise de mesure de vitesses (Roy *et al.*, 1999). Les résultats de ces campagnes ont mis en évidence de nouveaux éléments concernant l'organisation des écoulements dans les cours d'eau à lit de graviers.

Dans ce contexte, cet essai examine trois types de structures turbulentes présentes dans les cours d'eau à lit de graviers et discute de leur intégration dans la dynamique de l'écoulement de sections rectilignes de rivière. Nous décrivons d'abord l'origine des trois structures et leur développement dans l'écoulement. Ces descriptions s'inspirent d'observations et de mesures laissant présumer la présence des structures autant dans les écoulements en laboratoire que ceux en milieu naturel. Nous discutons ensuite des interactions potentielles entre les trois types de structures. Et enfin, nous illustrons la complexité de l'intégration des structures à l'échelle de sections caractéristiques des milieux à lit de graviers. Dans la perspective où l'écoulement est vu comme une organisation complexe de structures qui naissent, interagissent et meurent, cet essai discute d'une intégration originale de trois types de structures turbulentes rencontrées en rivières à lits graveleux.

STRUCTURES TURBULENTES

Plusieurs types de structures de l'écoulement ont été étudiés jusqu'à maintenant (Matthes, 1947 ; Nezu et Nakagawa, 1993 ; Best, 1993), mais il ressort que l'on a recours

plus fréquemment à trois structures pour décrire l'écoulement turbulent d'une section de rivière à lit graveleux : les structures d'éjection au lit (*bursting motion*), les structures d'échappement des zones de séparation (*shedding motion*) et les structures à grande échelle (*large-scale flow structures*). Nous décrivons ici ces trois structures à la lumière de plusieurs études en mécanique des fluides, où les observations sont faites en laboratoire, et en géomorphologie fluviale, où l'on travaille surtout sur le terrain.

LES STRUCTURES D'ÉJECTION

La figure 1a présente la formation des structures d'éjection selon le modèle récemment proposé par Smith (1996). Ce modèle repose sur les échanges de quantité de mouvement entre les zones inférieure et supérieure de la couche-limite turbulente d'un écoulement sur une surface lisse. La couche-limite turbulente comporte trois zones : la sous-couche visqueuse, la zone tampon et la zone supérieure. La sous-couche visqueuse est la zone de l'écoulement située à proximité du lit où dominent les forces visqueuses du fluide par rapport aux forces turbulentes. Le modèle se fonde sur la présence, dans la sous-couche visqueuse, de traînée longitudinales de faible vitesse d'où s'échappent des parcelles de fluide qui montent lentement vers la couche supérieure de l'écoulement. Ce mouvement vers le haut est intermittent et donne naissance aux structures d'éjection. Dans leur ascension, les structures d'éjection prennent souvent la forme de vortex en fer à cheval qui s'élèvent et se développent dans la zone supérieure. Ces structures finissent par se dissiper ou par s'amalgamer à d'autres structures. Les structures d'éjections sont souvent suivies par des incursions dans la sous-couche visqueuse de fluide à forte vitesse provenant de la zone supérieure. Ainsi, les structures d'éjection et d'incursion se succèdent dans un cycle continu mais non périodique.

L'identification des structures d'éjection et le modèle qui en résulte se fondent largement sur la visualisation des écoulements en laboratoire. Ce modèle provient de travaux s'étalant sur plusieurs décennies. Depuis les travaux pionniers de Theodorsen (1952), un grand nombre de chercheurs en mécanique des fluides dont Blackwelder, Grass, Kim, Kline, Lu, Offen, Smith, Willmarth et William ont contribué à l'avancement des connaissances entourant le modèle. Robinson (1991), Smith *et al.* (1991) et Smith (1996) présentent des revues exhaustives des travaux ayant mené à l'émergence du modèle des structures d'éjection. Aujourd'hui, bien que certaines caractéristiques du modèle soient toujours à l'étude, il demeure l'un des plus utilisés pour expliquer les échanges de momentum dans la couche-limite turbulente des écoulements en laboratoire (Smith, 1996).

L'intérêt de ce modèle pour la compréhension de la structure des écoulements des cours d'eau à lit de graviers réside dans le fait que les mécanismes identifiés sur un lit à surface lisse semblent persister dans des écoulements sur des lits rugueux comme les lits de graviers. Grass et Mansour-Tehrani (1996) et Defina (1996) ont présenté des synthèses de travaux en laboratoire montrant l'existence des traînée

de faible vitesse dans les écoulements sur un lit à rugosité homogène (fig. 1b). Tout comme dans les écoulements sur un lit lisse, ils associent ces traînée à l'éjection de fluide lent provenant de la portion de l'écoulement située à proximité du lit (Grass *et al.*, 1991).

L'application de ce modèle d'éjection à des écoulements sur des lits de graviers demeure toutefois délicate en raison de l'échelle du mécanisme d'éjection et du fait que les traînée à l'origine des structures n'ont jamais été formellement observées en milieu naturel. On évalue l'échelle déterminante du processus d'éjection (Y^+) à partir de mesures empiriques de la distance latérale entre les traînée et de la hauteur à l'intérieur de laquelle se développent les structures d'éjection (Smith, 1996). Cette échelle est habituellement décrite par

$$Y^+ = Y \frac{u^*}{\nu} = 100 \quad (1)$$

où Y est une mesure de distance latérale ou verticale (m), u^* est la vitesse de cisaillement (ms^{-1}) et ν la viscosité cinématique de l'eau (m^2s^{-1}). Des profils de vitesse réalisés dans des cours d'eau à lit de graviers permettent d'évaluer l'échelle des vitesses de cisaillement dans ces milieux : elle varie de 0,02 à 0,07 ms^{-1} (Robert *et al.*, 1992 ; Biron *et al.*, 1998 ; Buffin-Bélangier et Roy, 1998). À une température de 10 °C, la viscosité cinématique de l'eau est égale à $1,30 \times 10^{-6} \text{m}^2\text{s}^{-1}$. Dans ces cours d'eau, l'échelle dominante des processus d'éjection oscillent donc entre 2 et 6 mm. Ces valeurs sont près d'un ordre de grandeur plus petit que le diamètre médian des sédiments des sites où ont travaillé ces chercheurs (diamètre entre 21 et 33 mm). L'échelle des processus ne semble pas adéquate étant donné que la rugosité du lit risque d'inhiber la présence des traînée. Pour expliquer la présence des traînée sur les lits rugueux, Grass et Mansour-Tehrani (1996) montrent que l'écoulement qui enveloppe les portions supérieures des éléments de rugosité se présente comme une région où la viscosité effective du fluide est augmentée. Ils indiquent alors que l'échelle dominante dans ces milieux peut-être définie par

$$Y^+ = \frac{Y}{k} = 3,8 \quad (2)$$

où k est le diamètre moyen des particules. Dans les exemples précédents, l'application de cette équation donne des échelles dominantes entre 80 et 120 mm, ce qui semble plus adéquat pour ce type de milieu.

Les traînée à l'origine du processus d'éjection n'ont pas encore été visuellement identifiées en rivières naturelles. Dans ces milieux, la recherche s'est plutôt faite à partir de l'analyse de fluctuations de vitesse mesurées à haute résolution temporelle. En pratique, ces analyses permettent d'identifier le passage des structures d'éjection : on associe les éjections aux vitesses lentes et orientées vers la surface et les incursions aux vitesses rapides et orientées vers le lit. Bogard et Tiederman (1986), entre autres, ont décrit plusieurs méthodes de détection de ce type de structures à

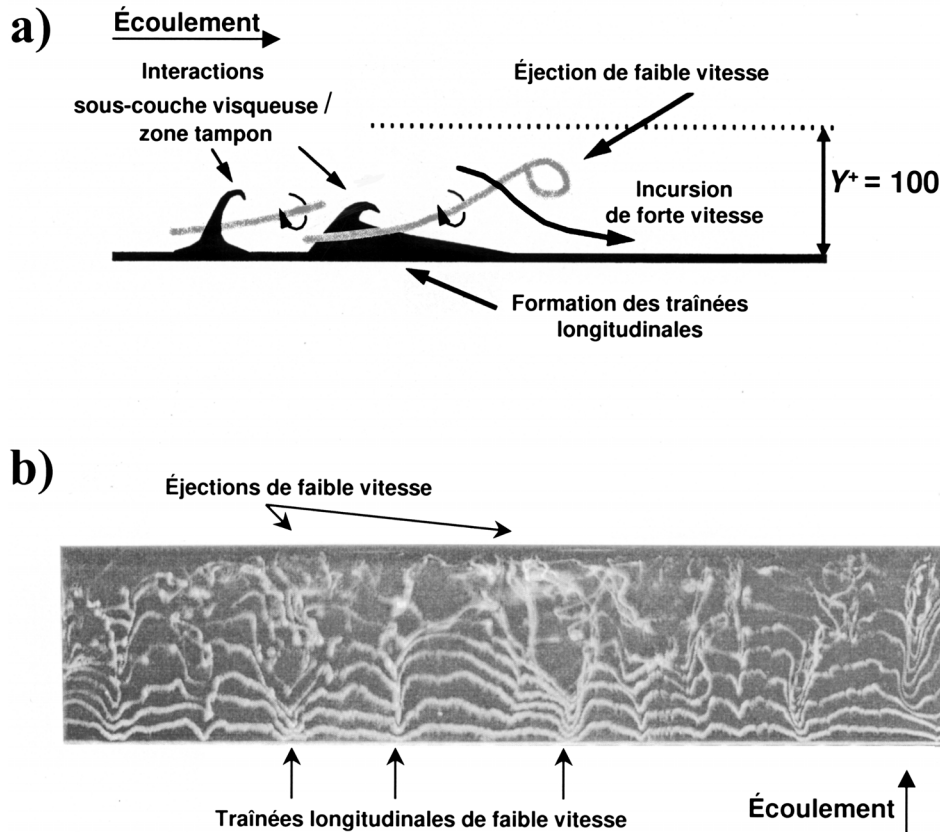


FIGURE 1. (a) Vue latérale d'un modèle conceptuel liant les trainées de faibles vitesses et les structures d'éjection dans un écoulement sur lit lisse (d'après Smith, 1996). (b) Vue en plan d'une visualisation à l'aide de bulles d'hydrogène dans l'écoulement sur une surface de rugosité homogène (profondeur de l'écoulement = 48.9 mm ; diamètre des particules sphériques = 6 mm) (d'après Grass et Mansour-Tehrani, 1996). Cette image permet d'observer des trainées de faible vitesse et les structures d'éjection qui leur sont associées.

(a) Side view of low speed streaks and bursting motions in a boundary layer over a smooth bed (from Smith, 1996). (b) Plan view of a boundary layer flow over a homogeneous rough surface (depth of flow = 48.9 mm; particle diameter = 6 mm) using hydrogen bubble flow visualization (from Grass and Mansour-Tehrani, 1996). This image shows the presence of low speed streaks and the associated bursting motions.

partir de séries temporelles de fluctuations de vitesses. Pour situer les structures dans la série de vitesses, ces méthodes comportent habituellement trois éléments : un critère de détection (une accélération soudaine par exemple), un seuil de détection et une fenêtre de détection (un intervalle d'une demi-seconde, par exemple). Une fois les structures situées dans le temps, il est possible d'en déterminer la fréquence et d'en calculer la durée moyenne. Ces paramètres permettent, entre autres, de comparer les caractéristiques turbulentes de différents milieux. En utilisant des techniques et des seuils identifiés par Bogard et Tiederman (1986), Roy *et al.* (1996) comparent les résultats de plusieurs techniques de détection de structures pour deux profondeurs dans un cours d'eau à lit de graviers. Ils montrent que les échelles temporelles des structures ne varient pas de façon significative selon la hauteur au-dessus du lit. Cette absence de variabilité est contraire aux mécanismes d'évolution des structures d'éjection puisqu'ils impliquent une augmentation de la taille des structures et une diminution de leur fréquence de passage lorsque l'on s'éloigne du lit. Roy *et al.* (1996) avancent que ces techniques, plutôt que de détecter des structures d'éjection, permettent d'identifier des structures à grande échelle (elles seront décrites plus loin dans le texte).

Ainsi, bien que la présence des structures d'éjection n'ait pas été formellement démontrée en rivière, certains indices laissent croire qu'elles risquent de se développer dans les cours d'eau à lit de graviers, particulièrement là où la rugosité est homogène. Une description de la structure de l'écou-

lement dans ces milieux doit par conséquent inclure les structures d'éjection et leur mécanisme de formation.

LES STRUCTURES D'ÉCHAPPEMENT

La figure 2a présente un modèle de structure en fer à cheval proposé par Acarlar et Smith (1987) pour décrire l'échappement de fluide à l'aval d'un obstacle hémisphérique. Le modèle identifie, entre autres choses, des zones de naissance, de développement et de dissipation des structures d'échappement. Les structures d'échappement proviennent de l'interaction entre la zone de recirculation de l'écoulement à l'aval d'une obstruction et le mouvement du fluide ambiant. Des parcelles de fluide à faible vitesse possédant un mouvement de rotation plus ou moins prononcé s'échappent périodiquement de la zone de recirculation et se propagent vers l'aval dans l'écoulement ambiant. Ces structures sont responsables d'importants échanges de quantité de mouvement entre les zones de forte vitesse de l'écoulement ambiant et celles de faible vitesse provenant de la zone de recirculation. Les structures d'échappement sont reconnues en mécanique des fluides depuis les travaux pionniers de Strouhal à l'aval d'obstacles cylindriques. Depuis lors, les travaux d'observation et de description ont été faits principalement à l'aval d'obstacles cylindriques (voir les nombreux travaux de Zdravkovich, dont Zdravkovich (1996)) mais aussi d'obstacles sphériques (Achenbach, 1974 ; Sakamoto et Haniu, 1995), hémisphériques (Acarlar et Smith, 1987 ; Kawanisi *et al.*, 1993) et de bien d'autres formes (Nakamura, 1996). Dans les cours d'eau à lit de graviers, les amas de galets et les blocs

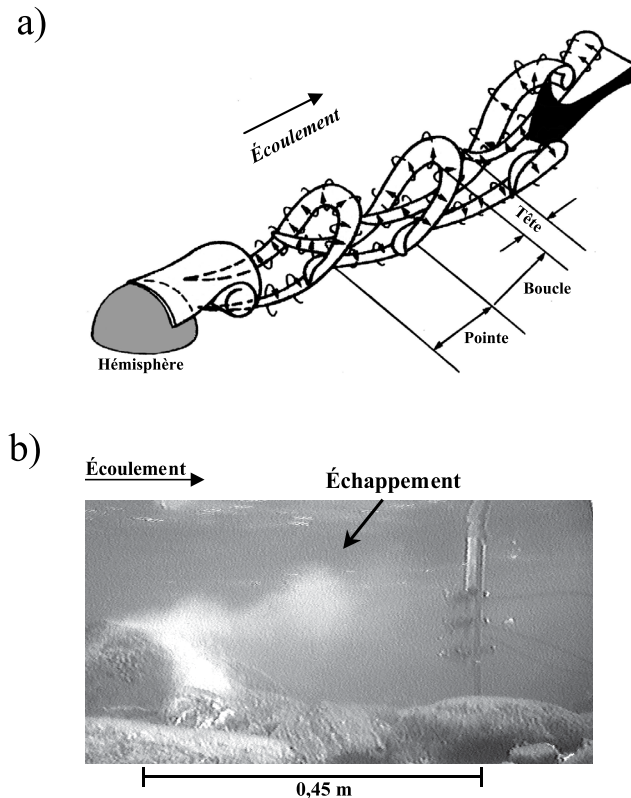


FIGURE 2. (a) Modèle de structures d'échappement en fer-à-cheval à l'aval d'un obstacle hémisphérique dans un écoulement laminaire (d'après Acarlar et Smith, 1987). Ce modèle identifie des zones de naissance, de développement et de dissipation des structures d'échappement. (b) Vue de côté d'une visualisation à l'aide d'un traceur lacté injecté dans la zone de recirculation d'un amas de galets dans un cours d'eau à lit de graviers (profondeur de l'écoulement = 0.35 m) (d'après Roy *et al.*, 1999). Cette image montre une portion de fluide lent, provenant de la zone de recirculation, qui s'échappe vers la surface dans l'écoulement ambiant.

(a) Horse-shoe model of shedding motions downstream from a hemisphere in laminar flow (from Acarlar and Smith, 1987). Implicit in this model are zones of birth, development and decay of the shedding flow structures. (b) Side view of the lee side of a pebble cluster in a natural gravel-bed river flow (depth of flow = 0.35 m) where flow motions are visualised by the injection of a milky white fluid (from Roy *et al.*, 1999). This images shows a low velocity fluid parcel being shed from the recirculating flow region towards the surface.

protubérants conditionnent la structure des écoulements. Grossièrement, ces formes peuvent se comparer aux obstacles hémisphériques. Aussi, les modèles élaborés pour des obstacles hémisphériques demeurent les plus intéressants pour interpréter l'effet des amas de galets et blocs protubérants qui caractérisent la morphologie du lit.

Le modèle de Acarlar et Smith (1987) est le fruit d'une quantité impressionnante de visualisations d'un écoulement laminaire, à faible nombre de Reynolds, à la rencontre d'un obstacle hémisphérique. Le nombre de Reynolds ($R = UY/\nu$ où U représente la vitesse, Y la profondeur et ν la viscosité cinématique) permet de discriminer les écoulements laminaires des écoulements turbulents : plus il augmente, plus l'écoulement est turbulent. Peut-on présumer que, dans les

écoulements des cours d'eau naturels où le nombre de Reynolds est élevé, les mécanismes d'échappement sont similaires à ceux décrits par Acarlar et Smith (1987) ? À ce jour, peu d'observations visuelles permettent d'élaborer un modèle d'échappement dans les écoulements turbulents des milieux naturels. Kirkbride (1993), a présenté des images provenant d'une visualisation réalisée en laboratoire à partir d'une configuration qui se rapproche des conditions observées en rivière. Il a identifié le mécanisme d'échappement se produisant à l'aval de graviers protubérants et a élaboré un modèle d'échappement où la croissance d'une structure dans la zone de recirculation joue un rôle important dans ce mécanisme. Roy *et al.* (1999) sont cependant les premiers à présenter des images de structures d'échappement dans un cours d'eau à lit de graviers (fig. 2b). Les images qu'ils présentent montrent l'existence d'un mécanisme d'échappement ayant plusieurs manifestations qui semblent être commandées par la dynamique de la zone de recirculation et la structure même de l'écoulement ambiant. De plus, des mesures de vitesse dans un écoulement ayant un nombre de Reynolds élevé ont révélé des signatures qui permettent de caractériser les structures d'échappement. Buffin-Bélanger et Roy (1998) ont montré l'existence de fortes fluctuations de vitesse à l'aval d'un amas de galets qui sont associées à l'alternance de mouvements lents vers la surface de l'eau et de mouvements rapides plongeant vers le lit. Ils ont émis l'hypothèse que cette dynamique est associée à l'échappement de fluide de faible vitesse provenant de la zone de recirculation.

La fréquence d'échappement est l'une des mesures révélatrices de la présence de structures s'échappant à l'aval d'obstacles protubérants. Cette fréquence (f en Hz) peut être normalisée par le diamètre de l'obstacle (D en m) et la vitesse moyenne de l'écoulement (U en ms^{-1}) pour obtenir le coefficient d'échappement de Strouhal (S) :

$$S = f \frac{D}{U} \quad (3)$$

Acarlar et Smith (1987) ont montré que ce coefficient était proportionnel au nombre de Reynolds de l'obstacle ($Re_o = UD/\nu$ où D est le diamètre de l'obstacle). Acarlar et Smith (1987) ont ainsi observé que dans un écoulement où le nombre de Reynolds (Re_o) est inférieur à 3400, les structures s'échappaient avec une fréquence relativement bien déterminée alors qu'à des nombres de Reynolds supérieurs, la fréquence d'échappement devenait fortement imprévisible. Dans les cours d'eau à lit de graviers, le nombre de Reynolds peut facilement être supérieur à 100 000. Or, malgré ce nombre élevé et l'absence d'une fréquence révélatrice, des structures d'échappement sont nettement présentes dans les écoulements turbulents en rivière (Kirkbride, 1993 ; Buffin-Bélanger et Roy, 1998 ; Roy *et al.*, 1999). L'augmentation du nombre de Reynolds joue sur la complexité de la structure de l'écoulement ambiant, ce qui peut influencer le mécanisme d'échappement des structures à la fois dans sa récurrence et dans ses manifestations.

Ainsi, bien que les fréquences d'échappement soient difficiles à déterminer pour les écoulements turbulents, plusieurs recherches ont montré que les structures d'échappement font partie intégrante des écoulements sur les lits de graviers. La description de l'organisation de l'écoulement dans ces cours d'eau doit par conséquent inclure ces structures et leur mécanisme de formation.

LES STRUCTURES À GRANDE ÉCHELLE

Les figures 3a et 3b présentent une schématisation idéalisée des structures à grande échelle proposée par Yalin (1992). Sur la verticale (fig. 3a), ces structures se présentent comme des régions de fluide de vitesse rapide qui s'inclinent vers le lit et entre lesquelles se trouve une région de fluide de plus faible vitesse qui s'élève tranquillement vers la surface. La particularité de ces structures provient du fait qu'elles semblent occuper toute la profondeur de l'écoulement. Plusieurs études en laboratoire ont montré la présence de ces structures (Falco, 1977 ; Nakagawa et Nezu, 1981). Latéralement, elles sont également décrites comme des portions de fluide ayant des vitesses plus élevées ou plus faibles que la vitesse moyenne de l'écoulement. Peu d'études permettent cependant de raffiner l'étendue et la dynamique latérale de ces structures. Aussi, ces structures demeurent difficiles à expliquer, et ce, autant en laboratoire qu'en milieu naturel. En laboratoire et sur des lits à surface lisse, deux mécanismes ont été avancés pour expliquer leur présence. Le premier implique l'expansion des structures d'éjection dans la totalité de la couche-limite de l'écoulement (Falco, 1977 ; Yalin, 1992) alors que le second comporte plutôt l'idée d'une hiérarchisation des structures d'éjection à différentes échelles (Perry et Chong, 1982 ; Defina, 1996). À noter que dans les deux cas, les structures d'éjection au lit sont étroitement liées au mécanisme de formation des structures à grande échelle.

En milieu naturel, bien que des structures à grande échelle aient été observées il y a plusieurs années (Matthes, 1947 ; Jackson, 1976), la mesure du passage de ces structures est toute récente. En effet, même si la présence des grandes structures peut être inférée à l'aide d'un seul courantmètre (Lapointe, 1996 ; Roy *et al.*, 1996), la possibilité d'utiliser plusieurs courantmètres en simultanément a vraiment permis de décrire le passage de ces structures (Kirkbride et Ferguson, 1995). L'analyse de fluctuations de vitesses échantillonnées sur une verticale dans une colonne d'eau a permis de montrer l'existence, dans des cours d'eau à lit de graviers, de fronts alternés de fortes et de faibles vitesses (Kirkbride et Ferguson, 1995 ; Ferguson *et al.*, 1996 ; Dinehart, 1999 ; Buffin-Bélangier *et al.*, 2000). La figure 3c illustre le passage de ces fronts à l'aide d'une matrice des fluctuations de vitesse provenant de trois courantmètres (Buffin-Bélangier *et al.*, 2000). Cette matrice spatio-temporelle comporte la distance verticale entre les courantmètres sur l'axe des ordonnées et le temps d'échantillonnage sur l'axe des abscisses. Les cellules de la matrice sont colorées en blanc ou noir selon que la fluctuation de vitesse au temps et à la position donnée soit plus petite ou plus grande que la moyenne de la série temporelle à laquelle elle appartient.

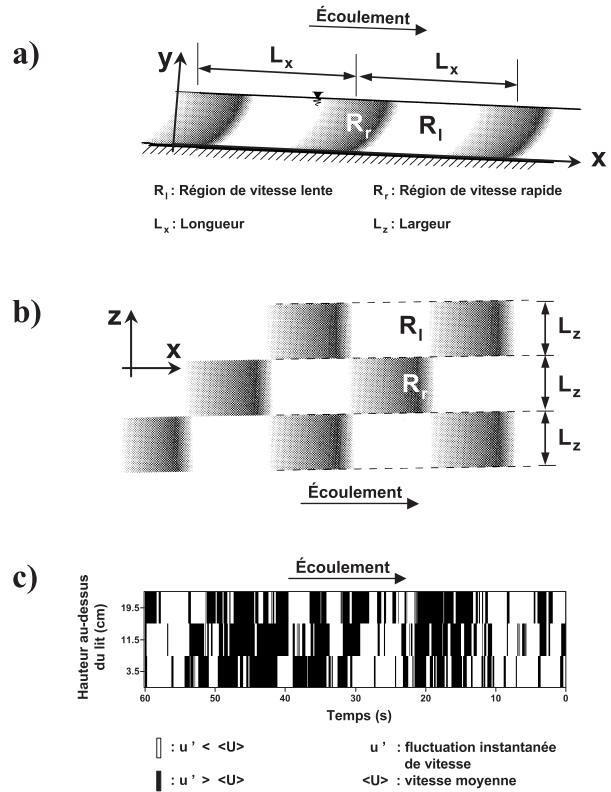


FIGURE 3. Vue (a) de côté et (b) en plan des structures à grande échelle telles qu'imaginées par Yalin (1992). (c) Matrice spatio-temporelle des fluctuations de vitesse à partir de mesures simultanées de vitesse longitudinale dans un écoulement (profondeur = 0,35 m) à trois hauteurs au-dessus d'un lit de graviers (Buffin-Bélangier *et al.*, 2000). Dans cette matrice, les cellules noires sont associées à des vitesses instantanées plus élevées que la moyenne alors que les cellules blanches sont associées à des vitesses instantanées plus faibles que la vitesse moyenne. La cohérence spatiale et temporelle dans la distribution des cellules noires et blanches fait ressortir la présence dans l'écoulement de régions alternées de fluide lent et rapide qui occupent toute la tranche d'eau.

View from (a) the side and (b) from the top of the assemblage of large-scale flow structures proposed by Yalin (1992). (c) Spatio-temporal matrix of velocity fluctuations from the downstream velocity component measured at three heights above the bed in a gravel-bed river (from Buffin-Bélangier *et al.*, 2000). In this matrix, the black cells represent velocity fluctuations that are higher than the average velocity at the specified depth, whereas the white cells are related to lower than average velocity fluctuations. The spatial and temporal coherence of white and black cells highlights the presence of flow structures occupying the entire flow depth.

Sur cette figure, on peut ainsi observer la cohérence spatiale et temporelle de ces fluctuations à partir de l'organisation des cellules blanches ou noires.

Le passage de ces structures a été caractérisé par une fréquence normalisée :

$$f^+ = f \frac{Y}{U} \tag{4}$$

où f^+ est une fréquence sans dimension, f une fréquence mesurée du passage des structures, Y la profondeur de

l'écoulement et U la vitesse moyenne. L'équation (4) a également été présentée pour obtenir une période normalisée (Jackson, 1976). Des valeurs de f^* oscillant entre 0,04 et 0,36 ont été mesurées dans une variété de milieux (Jackson, 1976 ; Lapointe, 1996 ; Roy *et al.*, 1996 ; Dinehart, 1999). Ces auteurs associent les fréquences obtenues à des structures dont les échelles spatiales font plusieurs fois la profondeur de l'écoulement. La figure 3c permet d'illustrer ces échelles spatiales. On observe sur la figure des régions noires et blanches durant plus de huit secondes. En multipliant cette durée par la vitesse moyenne de l'écoulement (0,36 m/s), on obtient une dimension spatiale des structures de l'ordre de 2,8 m (Buffin-Bélanger *et al.*, 2000). La profondeur moyenne se situait entre 0,35 et 0,40 m, ainsi ces structures sont de sept à huit fois plus longues que la profondeur de l'écoulement.

L'explication de la présence des structures à grande échelle en rivière demeure cependant spéculative. Comme en laboratoire, on présume que ces structures sont liées à l'évolution d'une structure à plus petite échelle ou encore à la coalescence de plusieurs d'entre elles. D'un autre côté, peut-on tout simplement envisager qu'elles émergent de la complexité de l'organisation des écoulements turbulents ? Dans une approche plus déterministe, ces structures peuvent être le reflet de mécanismes qui impliquent des éléments de la morphologie à l'échelle de la section du cours d'eau. Les seuils et les mouilles représentent des formes qui peuvent être associées à la présence de structures à grande échelle (Clifford, 1993). Nous avons vu que certains paramètres reliés aux structures d'éjection et d'échappement peuvent être, dans des conditions simplifiées, normalisées par des mesures morphométriques comme le diamètre des grains et des obstacles (équations 2 et 3). Dans cette perspective, on peut émettre l'hypothèse selon laquelle les paramètres des structures à grande échelle observées en milieu naturel pourraient être normalisés, par exemple, par une mesure de distance entre les seuils et les mouilles. Pour valider une telle hypothèse, une caractérisation plus complète de ces structures est nécessaire. Les informations sur ces structures ne sont en effet disponibles que pour un petit nombre de milieux et, lorsqu'elles le sont, elles concernent principalement l'extension verticale et la durée des structures. Nous avons peu d'information sur l'extension spatiale longitudinale et latérale des structures à grande échelle. Or, ces informations s'avèrent cruciales dans la recherche d'un mécanisme pour expliquer la présence des structures.

Les structures à grande échelle font partie de l'organisation de l'écoulement qui interagit avec les sédiments et les formes présentes sur le lit. Elles risquent ainsi de jouer un rôle dans la compréhension générale des écoulements en milieu graveleux et il importe de les inclure dans un modèle de la structure de l'écoulement d'une section de cours d'eau.

UNE GAMME D'INTERACTIONS

Dans une section de cours d'eau, les structures décrites précédemment sont non seulement présentes à différentes échelles, mais elles interagissent les unes avec les autres.

Dans cette partie, nous discutons des interactions possibles entre les différentes structures.

STRUCTURES D'ÉJECTION ET STRUCTURES À GRANDE ÉCHELLE

Deux types d'interaction ont été présentés pour relier le cycle d'éjection et d'incursion à la présence des structures à grande échelle. Ces deux types d'interaction s'illustrent bien par les modèles proposés par Yalin (1992) et Nezu et Nakagawa (1993) (fig. 4). Ces modèles proviennent d'études faites en laboratoire sur les couches-limites turbulentes se développant sur lit lisse. Le modèle proposé par Yalin attribue un effet générateur aux structures à grande échelle (fig. 4a). Dans son modèle, le cisaillement intense entre la zone de plus forte vitesse et celle de plus faible vitesse des structures à grande échelle est intimement lié au développement des cycles d'éjection et d'incursion. Par suite du passage d'une structure à grande échelle, une structure d'éjection se développe et prend de l'expansion le long d'une trajectoire d'élévation dictée par la forme du front. L'élévation de la structure d'éjection dans l'écoulement laisse place au passage près du lit d'une partie de la structure à grande échelle qui vient former sur le lit un événement similaire au passage d'une incursion. Le modèle de Yalin conçoit donc que les cycles d'éjection-incursion proviennent directement du passage d'une structure à grande échelle. Il importe de noter, dans ce sens, que les traînées longitudinales identifiées dans la description des structures d'éjection ne font pas partie du modèle de Yalin.

Le modèle de Nezu et Nakagawa est plus conforme aux mécanismes à l'origine des structures d'éjection (fig. 4b). Ce modèle se fonde sur la double structure de l'écoulement produite par les structures d'éjection et par les structures à grande échelle. Il diffère du modèle de Yalin en ce sens que la succession des éjections-incursions donne naissance aux structures à grande échelle et non l'inverse. Dans le modèle de Nezu et Nakagawa, les structures à grande échelle sont formées par la coalescence de structures d'éjection et représentent ainsi un héritage structural dans l'écoulement. Le modèle contient des boucles de rétroaction particulièrement complexes entre la récurrence des cycles d'éjection-incursion et les structures à grande échelle qu'ils génèrent (fig. 10.5, Nezu et Nakagawa, 1993).

Ces deux modèles illustrent deux types d'interaction entre les structures d'éjection et les structures à grande échelle. Dans le premier cas, les structures à grande échelle entraînent les cycles éjection-incursion, alors que dans le deuxième les structures à grande échelle sont créées par l'intermittence et la récurrence des cycles. Ces deux modèles ne sont pas aussi incompatibles que ce qu'il paraît. En première analyse, dans un milieu turbulent, ces deux types d'interaction sont en effet susceptibles de se produire.

STRUCTURES D'ÉCHAPPEMENT ET STRUCTURES À GRANDE ÉCHELLE

Les structures à grande échelle, caractérisées par l'intermittence de fluide rapide et de fluide lent, risquent d'influencer la forme et la dynamique de la zone de recirculation de

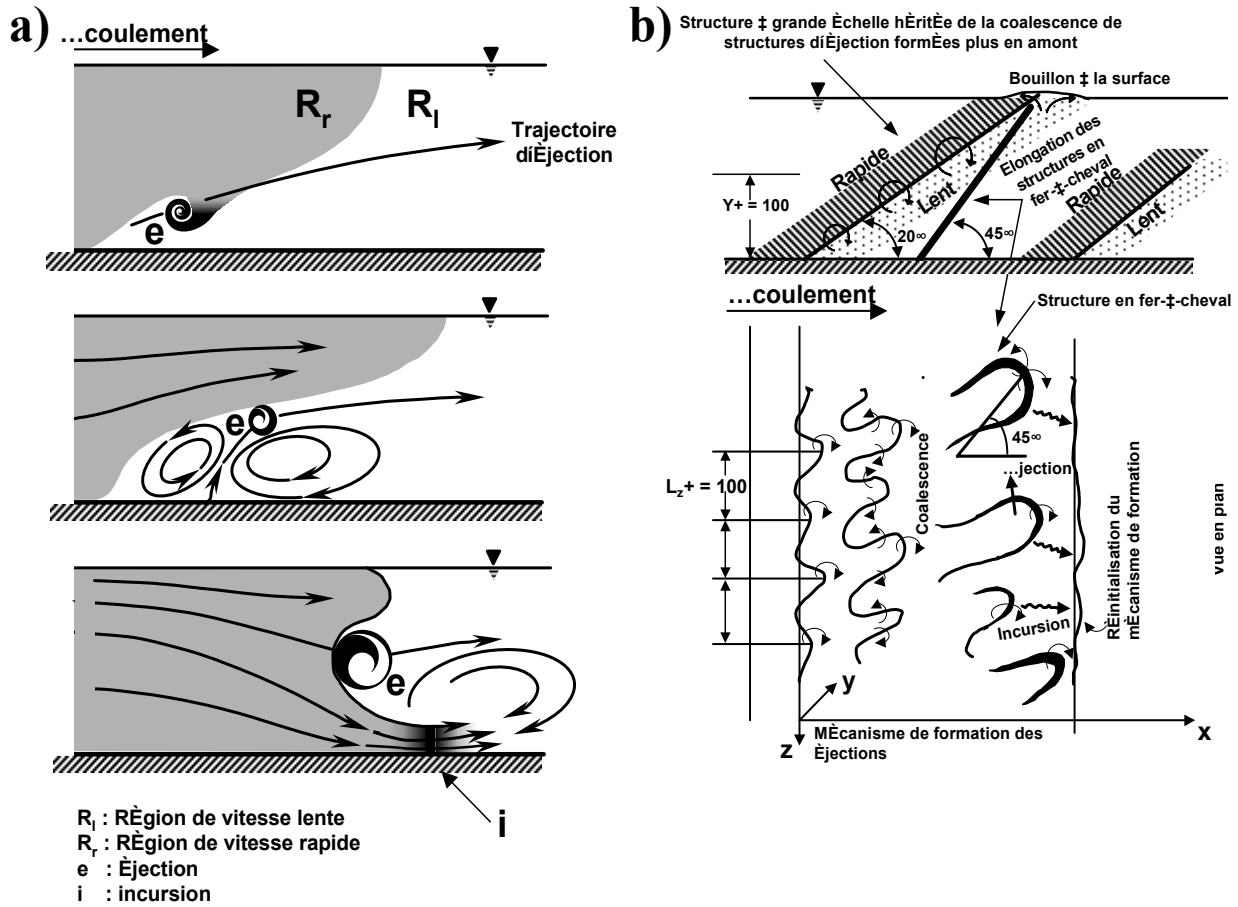


FIGURE 4. (a) Formation de structures d'éjection et de structures d'incursion associées au passage d'une structure à grande échelle (d'après Yalin, 1992). (b) Le modèle d'interactions de Nezu et Nakagawa (1993) où la formation et la coalescence des structures d'éjection au lit contribuent à la formation des structures à grande échelle.

(a) Development of bursting and sweeping motions in relation to the passage of a large-scale flow structure (from Yalin, 1992). (b) A model of the turbulent boundary layer where coalescence of bursting motions contributes to the development of large-scale flow structures (after Nezu and Nakagawa, 1993).

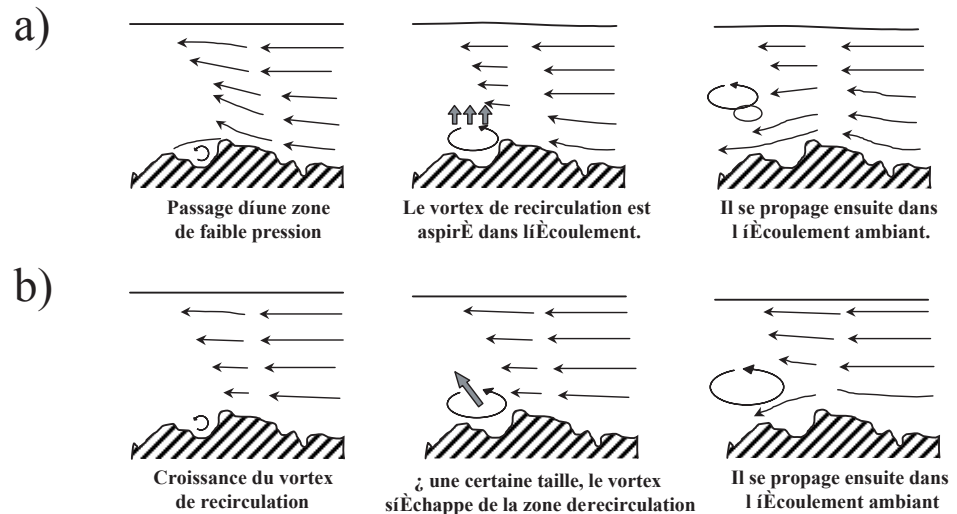
l'écoulement en aval d'obstacles. Puisque cette zone est étroitement associée aux structures d'échappement, il est très probable que les deux structures interagissent. Peu d'études ont tenté d'identifier les interactions possibles entre la présence des structures à grande échelle et le mécanisme de formation des structures d'échappement. À partir d'une visualisation de l'écoulement en laboratoire, Kirkbride (1993) propose deux mécanismes pour expliquer l'échappement des vortex de recirculation formés à l'aval de blocs et galets protubérants : les changements de pression au-dessus de l'obstacle (fig. 5a) et la dynamique interne de la zone de recirculation (fig. 5b). Ces deux mécanismes peuvent être associés aux passages des structures à grande échelle. En effet, lors du passage d'une portion rapide, la pression exercée sur la zone de recirculation diminue et, selon le principe de Bernoulli, la zone de recirculation est aspirée vers la surface. Une portion de fluide lent s'échappe alors et se propage vers l'aval. Ensuite, la taille et l'intensité de la zone risquent de changer avec le passage des fronts. Après le passage d'un front à haute vitesse, le mouvement de retour de l'écoulement est plus intense et

cela entraîne un mouvement important vers le haut et le long de l'obstacle. Ce mouvement peut alors donner naissance à un échappement de fluide provenant de cette zone. La visualisation en rivière de Roy *et al.* (1999) permet de mieux définir l'étroite relation entre les deux structures turbulentes. Ils identifient en effet deux manifestations distinctes de structures d'échappement après le passage de fronts de forte et de faible vitesse. Lors du passage d'un front de haute vitesse, la structure d'échappement prend de l'expansion vers le lit et vers la surface lorsqu'elle se propage vers l'aval alors que, lors du passage d'un front de faible vitesse, elle s'élève vers la surface de manière plus cohérente. Ils laissent ainsi supposer que la réponse de la zone de recirculation varie selon les passages des structures à grande échelle.

D'autres types d'interactions peuvent être envisagés entre les structures à grande échelle et les structures d'échappement. Par exemple, la réponse de la zone de recirculation au passage de structures à grande échelle pourrait être envisagée en fonction de l'écoulement sur les flancs même de l'obstacle. Selon la forme de l'obstacle, le rattachement latéral peut

FIGURE 5. Illustration de mécanismes d'échappement à partir (a) des changements de pression de l'écoulement ambiant et (b) de la dynamique interne de la zone de recirculation (d'après Kirkbride, 1993). Ces deux mécanismes sont liés aux passages des structures à grande échelle.

Cartoon of shedding mechanisms related to (a) the presence of a low pressure flow region in the advecting flow and (b) the internal dynamics of the recirculating flow region (after Kirkbride, 1993). These two mechanisms are linked to the passage of large-scale flow structures.



survenir une fraction de temps après le passage de la portion rapide provenant du sommet de l'obstacle. Cela peut accentuer l'échappement du vortex de recirculation. De plus, selon l'extension latérale des structures à grande échelle, il est possible que la zone de recirculation soit touchée d'un côté par une région de vitesse rapide et de l'autre par une portion de vitesse lente. Cela pourrait expliquer, par exemple, le sens de rotation des structures d'échappement. D'un autre côté, l'intermittence des échappements pourrait renforcer la structure des fronts de vitesse. Les travaux de Buffin-Bélanger et Roy (1998) ont montré l'existence des fortes structures d'incursion à l'aval d'un obstacle protubérant. Ces structures d'incursion à grande échelle peuvent se propager sur toute la hauteur de l'écoulement. Donc, un processus de rétroaction positive peut exister entre la formation des structures à grande échelle et l'échappement des structures de la zone de recirculation à l'aval d'un obstacle protubérant.

STRUCTURES D'ÉJECTION ET STRUCTURES D'ÉCHAPPEMENT

Les échelles de la couche-limite turbulente et de la rugosité du lit influencent nécessairement les types d'interaction possibles entre les structures d'éjection et d'échappement. Un premier type d'interaction survient lorsque les particules constituant le lit sont de tailles homogènes et que la hauteur de la couche-limite est illimitée, ce qui est rarement le cas dans les cours d'eau à lit de graviers. Dans ces conditions, les traînées de faible vitesse se développent et la formation des structures d'éjection devient possible (Grass et Mansour-Tehrani, 1996). Les structures d'éjection possèdent alors une échelle spatiale plus grande que les faibles structures d'échappement qui se développent à l'aval de grains peu protubérants. Dans ce contexte, les structures d'éjection commandent, de la même façon que les structures à grande échelle le font sur un lit plus hétérogène, l'échappement des structures de la zone de recirculation à l'aval des grains.

Un second type d'interaction survient lorsque les particules sont de tailles fortement hétérogènes et que la profondeur de la couche-limite est restreinte, ce qui est le cas de la

majorité des cours d'eau à lit de graviers. Dans ces conditions, les traînées de faible vitesse peuvent difficilement être créées parce que la protubérance des obstacles perturbe fortement la structure de l'écoulement à proximité du lit (Kirkbride, 1993). Les structures d'éjection sont donc peu présentes et les structures d'échappement dominent alors l'écoulement. Des éjections à petite échelle peuvent cependant se former sur la surface des grains (Kirkbride, 1993) et le passage de structures d'échappement peut influencer leur développement dans l'écoulement.

Entre ces deux conditions idéalisées, il existe plusieurs scénarios. Les interactions entre les structures d'éjection et d'échappement risquent cependant de s'expliquer par des interactions similaires à celles présentées entre les structures à grande échelle et les structures d'éjection, de même qu'entre les structures d'échappement et les structures à grande échelle.

VERS UNE INTÉGRATION DES STRUCTURES ET DE LEURS INTERACTIONS DANS L'ÉCOULEMENT D'UNE SECTION DE RIVIÈRE

La présence simultanée des trois structures et de la gamme d'interactions donnent naissance à une organisation complexe des écoulements en rivières à lit de graviers. Pour illustrer cette organisation, les figures 6 et 7 présentent des schémas idéalisés de l'écoulement dans des sections rectilignes de cours d'eau. La figure 6 illustre les patrons d'écoulement tels qu'imaginés à partir de la combinaison des trois structures dans une colonne d'eau. Elle souligne également les interactions dont nous avons discuté dans les paragraphes précédents. La figure 7 présente les mêmes structures et leurs interactions mais dans une perspective en plan. Ce second schéma est plus spéculatif que le premier étant donné le faible nombre de données disponibles sur la dynamique de l'écoulement à l'échelle d'une telle section. Ces schémas visent à alimenter une discussion plutôt qu'à représenter fidèlement une réalité. Aussi, bien qu'ils soient spéculatifs en partie, notamment dans la représentation

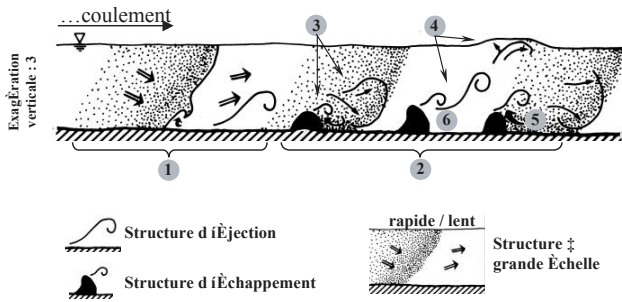


FIGURE 6. Vue de côté d'une intégration des trois structures turbulentes dans une section rectiligne d'une rivière à lit de graviers. La distribution spatiale des blocs s'inspire d'une distribution rapportée par Robert et al. (1996). La figure présente une exagération verticale de 3. Le schéma intègre les mécanismes à l'origine des structures et les interactions discutées dans le texte. Il met en évidence (1) la dynamique des structures d'éjection et des structures à grande échelle dans la portion amont du lit où il y a peu d'obstacles protubérants et (2) la dynamique des structures d'échappement et des structures à grande échelle là où se trouvent des obstacles protubérants. L'image montre aussi les différentes manifestations des structures d'échappement : (3) lors du passage d'une région de vitesse rapide, l'échappement se produit à la fois vers la surface et vers le lit alors que (4) lors du passage d'une région de vitesse lente, l'échappement s'élève vers la surface où il génère éventuellement des bouillons à la surface. Ces différentes manifestations peuvent en partie être associées à la dynamique de la zone de recirculation qui devient (5) plus active et donne naissance à un mouvement vers le haut le long de l'obstacle suite au passage d'une région de vitesse rapide alors que (6) ce mouvement est moins prononcé lors du passage d'une région de faible vitesse.

Side view of the boundary layer of a straight gravel-bed channel reach showing the integration of the three flow structures. The spatial distribution of the boulders follows that of Robert et al. (1996). Details of the integration of mechanisms and origins of the structures are in the text, but note: (1) the dominance of ejection and large scale flow structures (LSFS) near to the bed where few protuberant obstacles are present, (2) the dominance of shedding motions and LSFSs where there are protuberant clasts. The image also shows the association of shedding motions with the passage of LSFSs; during the passage of a LSFS, if the velocity is (3) relatively fast, this produces shedding both towards the surface and the bed whereas (4) relatively slow velocity produces shedding towards the surface only, this producing weak surface boils. These different manifestations can, in part, be associated with the dynamics of the re-circulation zone during the passage of LSFSs. In (5), the re-circulation zone is more active and gives birth to upward movements along the length of the obstacle following the passage of high-speed fluid while in (6) this is less pronounced.

tridi-mensionnelle de l'évolution des structures, ils permettent de mettre en évidence des éléments clés pour la caractérisation de l'organisation d'un écoulement dans un cours d'eau à lit de graviers.

Les figures 6 et 7 permettent, tout d'abord, de soulever le lien entre les éléments de rugosité et les trois structures turbulentes. Robert (1990) classe les éléments de rugosité dans un cours d'eau à lit de graviers en trois catégories : la taille des grains constituant le lit, les formes associées à l'organisation des grains sur le lit et les formes associées aux ondulations du profil longitudinal de la rivière. L'influence de ces formes sur la résistance de l'écoulement est connue à partir des descriptions de profils de vitesse (Robert, 1990 ; Robert et al., 1992 ; Clifford et al., 1992). Dans une approche simplifiée, la description des mécanismes a révélé que

les structures d'éjection peuvent être normalisées par la taille des grains présents sur le lit (équation 2), que les structures d'échappement peuvent être normalisées par la taille des obstacles (équation 3) et que les structures à grande échelle sont associées à des paramètres généraux de l'écoulement et, de manière spéculative, à la succession seuil-mouille. Le mécanisme responsable de la formation de ces dernières à partir des ondulations du lit est cependant hautement spéculatif. Dans ce sens, les structures à grande échelle sont illustrées dans les schémas mais le lien mécanistique ne l'est pas, d'où l'absence des séquences seuils-mouilles sur les figures. Les trois structures turbulentes peuvent ainsi être étroitement corrélées à la caractérisation des échelles de rugosité du lit. Une connaissance détaillée de la morphologie du lit est nécessaire pour bien représenter et caractériser l'organisation des structures de l'écoulement sur cette surface.

Les schémas font aussi ressortir la présence dans l'organisation de l'écoulement de zones de production et de dissipation intense de structures turbulentes. Aux échelles représentées, les zones de production les plus frappantes sont celles associées aux structures d'échappement. L'évolution des structures d'échappement présentée par Acarlar et Smith (1987) souligne également cette idée de production et de dissipation. Dans le contexte d'une section de cours d'eau, les schémas montrent que l'organisation de l'écoulement est reproductrice étant donné que les zones de production se succèdent le long du gradient amont-aval. Cette distribution des zones de production et de dissipation entraîne une variabilité spatiale dans la prédominance des mécanismes et des structures, mais contribue à la conservation d'un certain niveau d'organisation. Ce niveau d'organisation peut être crucial pour la dynamique d'une section de rivière. Dans ce sens, la description des changements de niveau d'organisation selon les changements hydrauliques, comme la vitesse et la profondeur moyennes de l'écoulement, permettrait de mieux comprendre la dynamique d'une section de rivière (Clifford, 1996).

Finalement, il est important de souligner l'anisotropie structurale que font émerger ces schémas pour des conditions d'écoulement similaire. L'échelle temporelle du développement des structures dépend en partie de la vitesse moyenne de l'écoulement. Or cette vitesse varie selon la position dans l'écoulement. En effet, dans une section rectiligne, les vitesses plus rapides se retrouvent au centre de la section ; les plus faibles, près des berges. L'échelle temporelle du développement d'une même structure, particulièrement les structures d'éjection au lit et les structures d'échappement, variera donc en fonction de la position dans l'écoulement où la structure est créée. Il en va de même pour les échelles de rugosité. Dans une section ayant une granulométrie homogène, la rugosité relative (D/Y , où D est le diamètre moyen et Y la profondeur d'eau) varie selon la position dans la section étant donné que la profondeur change selon la position dans la section. De plus, la variabilité des formes du lit peut entraîner une complexité dans les mécanismes de formation des structures. Par exemple, Rubin et McDonald (1995) ont montré que, dans des conditions

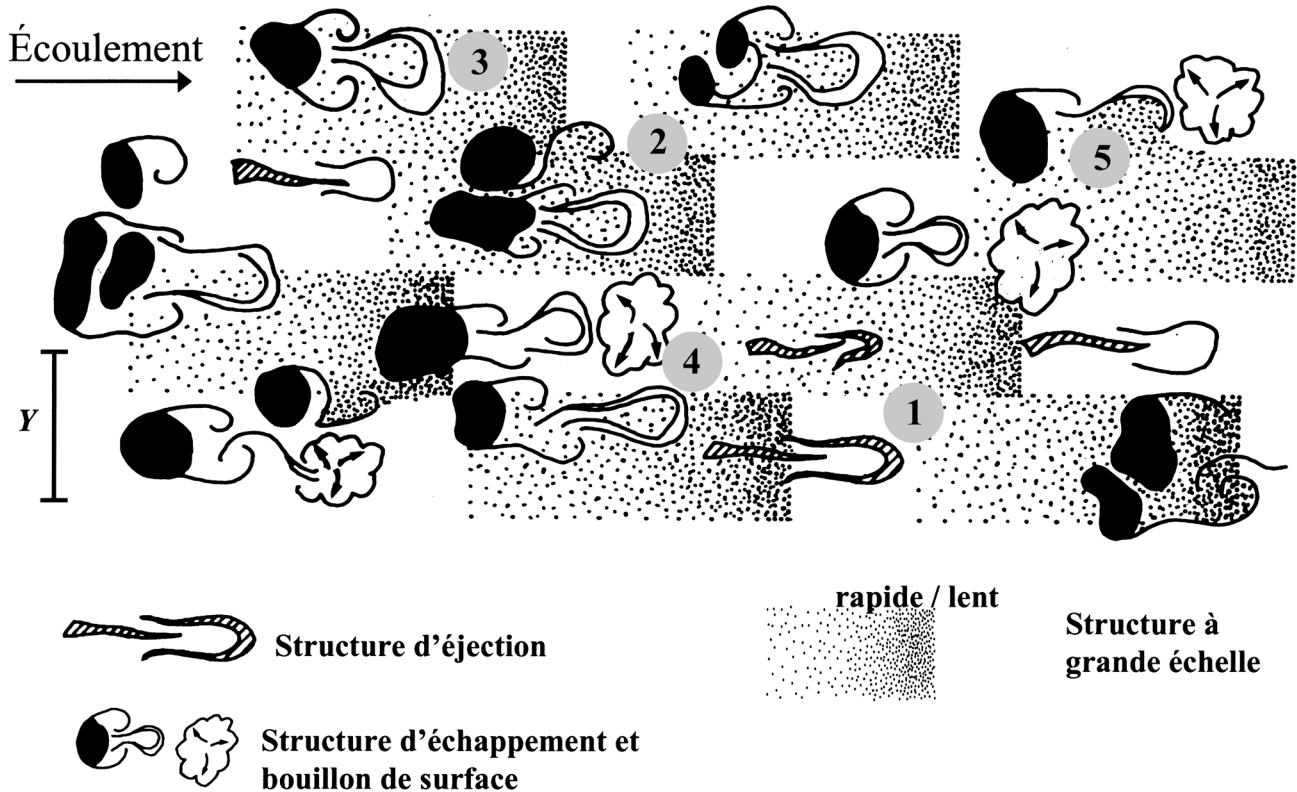


FIGURE 7. Vue en plan de l'intégration des trois structures turbulentes dans une section rectiligne d'une rivière à lit de graviers. La distribution spatiale des blocs est similaire à celle décrite par Church *et al.* (1998). Sur cette figure, Y est une échelle relative indicatrice de la profondeur de l'écoulement. Le schéma intégrateur montre (1) la dynamique des structures d'éjection et des structures à grande échelle dans les zones à rugosité homogène et (2) la dynamique des structures d'échappement et des structures à grande échelle dans les zones où se trouvent des blocs protubérants et des amas de galets. On observe aussi les différentes manifestations d'échappement lors du passage d'une région de vitesse (3) rapide et (4) lente, cette dernière donnant naissance à des bouillons à la surface. Finalement, l'effet de la présence des structures à grande échelle sur la dynamique de la zone de recirculation ressort en (5).

Plan view of a straight gravel-bed river reach showing the integration of the three flow structures; the spatial distribution of the clasts follows that of Church *et al.* (1998); Y represents the depth of flow as an indicative length-scale. This image shows (1) the dominance of ejection and large scale flow structures (LSFSs) in zones of homogeneous roughness and (2) the dominance of shedding structures and LSFs where there are protuberant clasts and clusters. Also note the different manifestations of shedding during the passage of flow which is (3) fast and (4) slow, the latter giving birth to weak surface boils. Finally, note the effect of the presence of LSFs on the re-circulation zone dynamics (5).

similaires, la forme des obstacles influence les fréquences d'échappement des structures. En comparant deux spectres de puissance, ils ont observé que le changement d'orientation d'un cylindre peut transformer un échappement possédant une certaine périodicité en un échappement qui n'en possède plus. Ces éléments, combinés à bien d'autres, donnent naissance à une anisotropie structurale à l'échelle de la section de l'écoulement qu'il importe de considérer dans une intégration des structures de l'écoulement.

CONCLUSION

En géomorphologie fluviale, l'organisation des écoulements joue un rôle important dans la dynamique qui lie l'écoulement au transport des sédiments et au développement des formes sur le lit (Leeder, 1983 ; Best, 1993). Dans cet essai, nous avons décrit trois types de structures turbulentes qui organisent l'écoulement : les structures d'éjection au lit, les structures d'échappement et les structures à

grande échelle. Ces trois structures se produisent à différentes échelles et elles interagissent les unes avec les autres. Ainsi, bien que les mécanismes à l'origine des trois structures puissent être décrits distinctement, leur identification dans un milieu complexe demeure délicate.

Nous avons présenté des éléments d'intégration qui visent à guider la caractérisation de l'organisation de l'écoulement dans une section de rivière. Les schémas intégrateurs, bien que spéculatifs, soulignent (1) une relation entre les échelles de rugosité et l'organisation de l'écoulement, (2) la présence de zones de production et de dissipation des structures qui organisent l'écoulement et (3) l'anisotropie structurale de cette organisation dans une section de cours d'eau.

Les schémas intégrateurs illustrent la variabilité spatiale et temporelle d'un écoulement dans une section de cours d'eau en considérant les trois structures turbulentes décrites. Les schémas soulignent surtout l'importance d'interactions

complexes entre les différentes structures turbulentes. Cette variabilité et ces interactions limitent le pouvoir de discrimination des structures dans les écoulements et les séries temporelles extraites de ces écoulements. Éventuellement, les interactions donnent naissance à des structures que l'on ne peut expliquer par l'un des trois mécanismes appliqués de manière individuelle. Dans ce sens, l'identification des interactions possibles de même que la caractérisation des échelles des structures demeurent des avenues potentielles pour le développement d'un modèle d'intégration à l'échelle d'une section de cours d'eau.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient Pascale Biron pour les commentaires constructifs résultant d'une lecture préliminaire, de même que les deux lecteurs critiques, André Robert et François Petit, ainsi que Pierre Richard pour leurs remarques et commentaires qui ont contribué à l'amélioration de la qualité du texte. 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 appui financier.

RÉFÉRENCES

- Acarlar, M. S. et Smith, C. R., 1987. A study of hairpin vortices in a laminar boundary layer. Part 1. Hairpin vortices generated by a hemispherical protuberance. *Journal of Fluid Mechanics*, 175 : 1-41.
- Achenbach, E., 1974. Vortex shedding from spheres. *Journal of Fluid Mechanics*, 62 : 209-221.
- Ashworth, P. J., Bennett, S. J., Best, J. L. et McLelland, S. J., 1996. Coherent Flow Structures in Open Channels. John Wiley, Chichester, 733 p.
- Best, J. L., 1993. On the interactions between turbulent flow structure, sediment transport and bedform development : Some considerations from recent experimental research, p. 61-92. *In* N. J. Clifford, J. R. French et J. Hardisty, édité., *Turbulence : Perspectives on Flow and Sediment Transport*, John Wiley, Chichester, 360 p.
- Bogard, D. G. et Tiederman, W. G., 1986. Burst detection with single-point velocity measurements. *Journal of Fluid Mechanics*, 162 : 389-413.
- Biron, P. M., Lane, S. N., Roy, A. G., Bradbrook, K. F. et Richards, K. S., 1998. Sensitivity of bed shear stress estimated from vertical velocity profiles : The problem of sampling resolution. *Earth Surface Processes and Landforms*, 23 : 133-139.
- Buffin-Bélanger, T. et Roy, A. G., 1998. Effects of a pebble cluster on the turbulent structure of a depth-limited flow in a gravel-bed river. *Geomorphology*, 25 : 249-267.
- Buffin-Bélanger, T., Roy, A. G. et Kirkbride, A. D., 2000. On large-scale flow structures in a gravel-bed river. *Geomorphology*, 32 : 417-435
- Clifford, N. J., 1993. Formation of riffle-pool sequences : Field evidence for an autogenetic process. *Sedimentary Geology*, 85 : 39-51.
- 1996. Morphology and stage-dependent flow structure in a gravel-bed river, p. 545-566. *In* P. J. Ashworth, S. J. Bennett, J. L. Best et S. J. McLelland, édité., *Coherent Flow Structures in Open Channels*. John Wiley, Chichester, 733 p.
- Clifford, N. J., French, J. R. et Hardisty, J., 1993. *Turbulence : Perspectives on Flow and Sediment Transport*, John Wiley, Chichester, 360 p.
- Clifford, N. J., Robert, A. et 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 : 111-126.
- Church, M., Hassan, M. A. et Wolcott, J. F., 1998. Stabilizing self-organised structures in gravel-bed stream channels : Field and experimental observations. *Water Resources Research*, 34 : 3169-3179.
- Defina, A., 1996. Transverse Spacing of low-speed streaks in a channel flow over a rough bed, p. 87-99. *In* P. J. Ashworth, S. J. Bennett, J. L. Best et S. J. McLelland, édité., *Coherent Flow Structures in Open Channels*. John Wiley, Chichester, 733 p.
- Dinehart, R. L., 1999. Correlative velocity fluctuations over a gravel river bed. *Water Resources Research*, 35 : 569-582.
- 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. et Roy, A. G., 1996. Markov analysis of velocity fluctuations in gravel-bed rivers, p. 165-183. *In* P. J. Ashworth, S. J. Bennett, J. L. Best et S. J. McLelland, édité., *Coherent Flow Structures in Open Channels*. John Wiley et Sons Ltd, Chichester, 733 p.
- Grass, A. J., Stuart, R. J., et Mansour-Tehrani, M., 1991. Vortical structures and coherent motion in turbulent flow over smooth and rough boundaries, *Philosophical Transactions Royal Society of London A*, 336 : 35-65.
- Grass, A. J. et Mansour-Tehrani, M., 1996. Generalized scaling of coherent bursting structures in the near-wall region of turbulent flow over smooth and rough boundaries, p. 41-61. *In* P. J. Ashworth, S. J. Bennett, J. L. Best et S. J. McLelland, édité., *Coherent Flow Structures in Open Channels*. John Wiley, Chichester, 733 p.
- Jackson G., 1976. Sedimentological and fluid-dynamic implications of the turbulent bursting phenomenon in geophysical flows. *Journal of Fluid Mechanics*, 77 : 531-560.
- Kawanisi, K., Maghrebi, M. F. et Yokosi, S., 1993. An instantaneous 3-D analysis of turbulent flow in the wake of a hemisphere. *Boundary-Layer Meteorology*, 64 : 1-14.
- Kirkbride, A. D., 1993. Observation of the influence of bed roughness on turbulence structure in depth limited flows over gravel beds, p. 185-196. *In* N. J. Clifford, J. R. French et J. Hardisty, édité., *Turbulence: Perspectives on Flow and Sediment Transport*, John Wiley, Chichester, 360 p.
- Kirkbride, A. D. et 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.
- Lapointe, M., 1996. Frequency spectra and intermittency of the turbulent suspension process in a sand-bed river. *Sedimentology*, 43 : 439-449.
- Leeder, M. R., 1983. On the interactions between turbulent flow, sediment transport and bedforms mechanics in channelized flows, p. 5-18. *In* J. D. Collinson et J. Lewin, édité., *International Association of Sedimentologists Special Publication 6*.
- Matthes, G. H., 1947. Macroturbulence in natural stream flow. *Transactions of American Geophysical Union*, 28 : 255-265.
- Nakagawa, H. et Nezu, I., 1981. Structure of space-time correlations of bursting phenomena in an open-channel flow. *Journal of Fluid Mechanics*, 104 : 1-43.
- Nakamura, Y., 1996. Vortex shedding from bluff bodies with splitter plates. *Journal of Fluids and Structures*, 10 : 147-158.
- Nezu, I. et Nakagawa, H., 1993. *Turbulence in Open-Channel Flows*. A.A.B., Rotterdam, 281 p.
- Perry, A. E. et Chong, M. S., 1982. On the mechanism of wall turbulence. *Journal of Fluid Mechanics*, 119 : 173-217.
- Robert, A., 1990. Boundary roughness in coarse-grained channels. *Progress in Physical Geography*, 14 : 42-70.
- Robert, A., Roy, A. G., et De serres, B., 1992. Changes in velocity profiles at roughness transitions in coarse grained channels. *Sedimentology*, 39 : 725-735.
- 1996. Turbulence at a roughness transition in a depth limited flow over 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., Buffin-Bélanger, T. et Levasseur, M., 1999. Combined visual and quantitative technique in the study of natural turbulent flows. *Water Resources Research*, 35 : 871-877.
- Roy, A. G., Buffin-Bélanger, T. et Deland, S., 1996. Scales of turbulent coherent flow structures in a gravel-bed river, p. 147-164. *In* P. J.

- Ashworth, S. J. Bennett, J. L. Best and S. J. McLelland, édit., *Coherent Flow Structures in Open Channels*. John Wiley, Chichester, 733 p.
- Rubin, D. M. et McDonald, R. R., 1995. Nonperiodic eddy pulsations. *Water Resources Research*, 31 : 1595-1605.
- Sakamoto, H., et Haniu, H., 1995. The formation mechanism and shedding frequency of vortices from a sphere in uniform shear flow. *Journal of Fluids Mechanic*, 287 : 151-171.
- Smith, C. R., 1996. Coherent flow structures in smooth-wall turbulent boundary layers: facts, mechanisms and speculation, p. 1-39. *In* P. J. Ashworth, S. J. Bennett, J. L. Best et S. J. McLelland, édit., *Coherent Flow Structures in Open Channels*, John Wiley, Chichester, 733 p.
- Smith, C. R., Walker, D. J. A., Haidari, A. H. et Sobrun, U., 1991. On the dynamics of near-wall turbulence. *Philosophical Transactions Royal Society of London A*, 336 : 131-175.
- Theodorsen, T., 1952. Mechanism of turbulence, *Proceedings of the 2nd Midwestern Conference on Fluid Mechanics*, Ohio State University, Columbus. p. 1-18.
- Yalin, M. S., 1992. *River Mechanics*. Pergamon Press, Exeter, 219 p.
- Zdravkovich, M. M., 1996. Different modes of vortex shedding : An overview. *Journal of Fluids and Structures*, 10 : 427-437.