

MORPHOLOGIE DU LIT ET DYNAMIQUE DES CONFLUENTS DE COURS D'EAU

André G. ROY et Bernard DE SERRES*

Mots-clés: confluents de cours d'eau, dynamique de l'écoulement, transport des sédiments, surcreusement.

RESUME

Les confluents de cours d'eau ont fait l'objet de plusieurs études en laboratoire mais les vérifications sur le terrain des résultats obtenus ont tardé à venir. Cependant, on peut déjà évaluer la pertinence des modèles qui découlent d'expériences contrôlées et conduites sur des modèles réduits. Cet article décrit ces expériences et fait état des études sur le terrain visant à comprendre la morphologie du lit et la dynamique des confluents. Les études en laboratoire ont montré que la morphologie du lit et plus particulièrement la profondeur de surcreusement aux confluents était fonction de l'angle de jonction et du rapport entre les débits du tributaire et du cours d'eau principal. Ces deux facteurs contrôlent la dynamique de l'écoulement et du transport des sédiments. Les résultats issus d'études sur le terrain corroborent les observations faites en laboratoire sur l'écoulement et le transport des sédiments. Par contre, les relations entre la morphologie et les deux facteurs dynamiques sont faibles ou inexistantes, illustrant ainsi la complexité des confluents naturels. Au-delà des conditions locales qui oblitèrent le rôle de l'angle et du rapport des débits, l'effet de plusieurs facteurs plus généraux, comme la disponibilité des sédiments, le synchronisme des crues et la différence d'élévation des lits tributaires, doit être évalué et analysé. Ces études permettront de raffiner les prévisions de la profondeur de surcreusement aux confluents de cours d'eau.

ABSTRACT

Several flume experiments on river channel confluences have lead to a comprehensive understanding of flow and sediment transport at these sites but field studies to confirm these results are scanty and incomplete. However, the data available in the literature from field experiments allow us to test the relevance of the models derived from controlled laboratory experiments. This paper describes these experiments and reports on the studies carried out in the field to understand bed morphology and the dynamics of river confluences. Results obtained in the flume have shown that bed morphology - especially scour depth - at confluences is governed by the junction angle and the ratio between the discharges of the tributary and main channels. These two factors control the flow and sediment transport dynamics at a confluence. Observations from experiments conducted in the field seem to confirm the presence of similar flow and transport patterns but the relations between bed morphology and the two controlling factors are tenuous, if existing at all. This shows the complexity of natural environments. In addition to local conditions which mask the role played by the discharge ratio and the junction angle, several general factors such as the sediment supply, flood peak coincidence and bed height differential between the confluent channels must be investigated in order to achieve an adequate explanation of scour depth variability.

INTRODUCTION

Bien que les confluent de cours d'eau revêtent une importance capitale dans l'acheminement de l'eau et des sédiments à l'intérieur d'un bassin versant, leur dynamique demeure encore méconnue. La même situation prévaut pour les confluent à l'intérieur des rivières à chenaux tressés. Parce qu'ils sont des milieux sédimentaires complexes où le mélange des écoulements des cours d'eau accentue la turbulence et ce, dans un champ tridimensionnel, les confluent résistent à une modélisation numérique. Aussi, les efforts de modélisation ont-ils plutôt porté sur une approche globale fondée sur les changements de la quantité de mouvement à l'intérieur du volume de la jonction des cours d'eau (TAYLOR, 1944; WEBBER et GREATED, 1966). Le but d'un tel exercice est de prévoir l'élévation de la surface de l'eau et les variations de la vitesse moyenne qu'occasionne la rencontre des écoulements. Les résultats d'une telle analyse sont d'un intérêt certain pour l'ingénieur aux prises avec des problèmes d'aménagement de cours d'eau mais apportent peu d'information utile aux géomorphologues et sédimentologues. La présence d'un lit mobile ajoute à la complexité du problème et toute tentative de modéliser le transport des sédiments aux confluent s'avère vaine si l'on ne peut décrire avec précision le comportement du fluide en tout lieu du volume de référence. Or, les modèles de la turbulence ne sont pas assez poussés pour qu'une modélisation numérique soit applicable à ce genre de problèmes (NALLASAMY, 1987). On se doit donc de recourir à des expériences en laboratoire afin de découvrir les facteurs qui gouvernent la morphologie du lit à l'endroit d'une confluence et la dynamique des écoulements et du transport des sédiments.

Depuis les premières expériences menées par TAYLOR (1944), une série de contributions récentes en génie (LIN et SOONG, 1979; BEST et REID, 1984, 1987; CHU et BABARUTSI, 1985; RAMAMURTHY *et al.*, 1988; HAGER, 1989a, 1989b) ont permis de mieux comprendre l'échange de mouvement et les caractéristiques de l'écoulement aux confluent de cours d'eau. En sciences de la terre, l'interaction entre l'écoulement et le lit des confluent a aussi fait l'objet d'expériences (MOSLEY, 1976; ASHMORE, 1982; ASHMORE et PARKER, 1983; BEST, 1985, 1986, 1987, 1988). Par contre, peu d'études de vérification sur le terrain ont fait suite à ces travaux en laboratoire. Dans la mesure où le laboratoire simule le milieu naturel, les résultats expérimentaux trouvent leur sens lorsqu'ils sont confrontés aux données de terrain. Cependant, la littérature sur le sujet laisse déjà entrevoir des indices importants sur la coïncidence entre le terrain et le laboratoire. Le but de cet article est de présenter les principaux résultats obtenus en laboratoire sur la morphologie du lit et la dynamique et de décrire ensuite les expériences menées sur le terrain aux confluent de cours d'eau. Cette revue permettra de constater les lacunes les

plus importantes dans notre compréhension de la dynamique des confluent de cours d'eau naturels et de dégager les voies de recherche les plus prometteuses. Afin de restreindre le champ, on ne traitera pas des changements dans la forme des chenaux qui surviennent aux confluent. A ce sujet, le lecteur est renvoyé aux travaux de RICHARDS (1980), KENNEDY (1984), ROY et WOLDENBERG (1986), ROY et ROY (1988) et RHOADS (1987).

FACTEURS CONTROLANT LA MORPHOLOGIE DU LIT ET LA DYNAMIQUE DES CONFLUENTS DE COURS D'EAU

A un confluent de cours d'eau, les interactions entre le fluide et le lit résultent en une morphologie typique marquée d'un surcreusement situé à la rencontre des écoulements (MOSLEY, 1976; ASHMORE, 1982; BEST, 1985, 1986, 1988) (Fig. 1). La zone d'affouillement est souvent ceinturée de rebords abrupts. Etant donné l'importance du surcreusement dans les travaux d'ingénierie fluviale surtout en ce qui concerne la navigation (MUSKATIROVIC et MILORADOV, 1980) et la construction de pipelines et de ponts chevauchant des cours d'eau à chenaux tressés (MOSLEY, 1982; ASHMORE et PARKER, 1983; KLAASSEN et VERMEER, 1988), il s'avère crucial d'obtenir une prévision acceptable de la profondeur et de la localisation du surcreusement. Les facteurs qui jouent sur la morphologie du surcreusement ont donc fait l'objet d'expériences approfondies.

En utilisant un modèle réduit d'un confluent entre des chenaux à lits sableux larges de 8 centimètres, MOSLEY (1976) a montré que la profondeur de surcreusement augmente avec l'angle de jonction mais qu'elle diminue avec une augmentation de la différence entre les débits ou entre les charges de fond des cours d'eau confluent. La relation entre la profondeur maximale de surcreusement et l'angle de jonction (Fig. 2) montre une augmentation rapide de la profondeur de surcreusement pour des angles variant entre 20° et 60°. A partir de 90°, la profondeur atteint un maximum: elle devient alors insensible à une augmentation de l'angle. A noter aussi l'augmentation de la variabilité dans la profondeur de surcreusement lorsque l'angle atteint 60°.

MOSLEY (1976) a observé que le surcreusement était associé à la présence de cellules hélicoïdales situées à la rencontre des écoulements (Fig. 3). Les cellules plongent et convergent vers le lit au centre du surcreusement pour remonter le long des abrupts qui délimitent la zone de surcreusement. Il résulte de ce mouvement que ces abrupts sont souvent maintenus à un angle supérieur à l'angle de repos des particules. La surface de l'eau est aussi bombée au dessus de la zone d'affouillement. L'injection de colorant dans l'eau a révélé la présence de

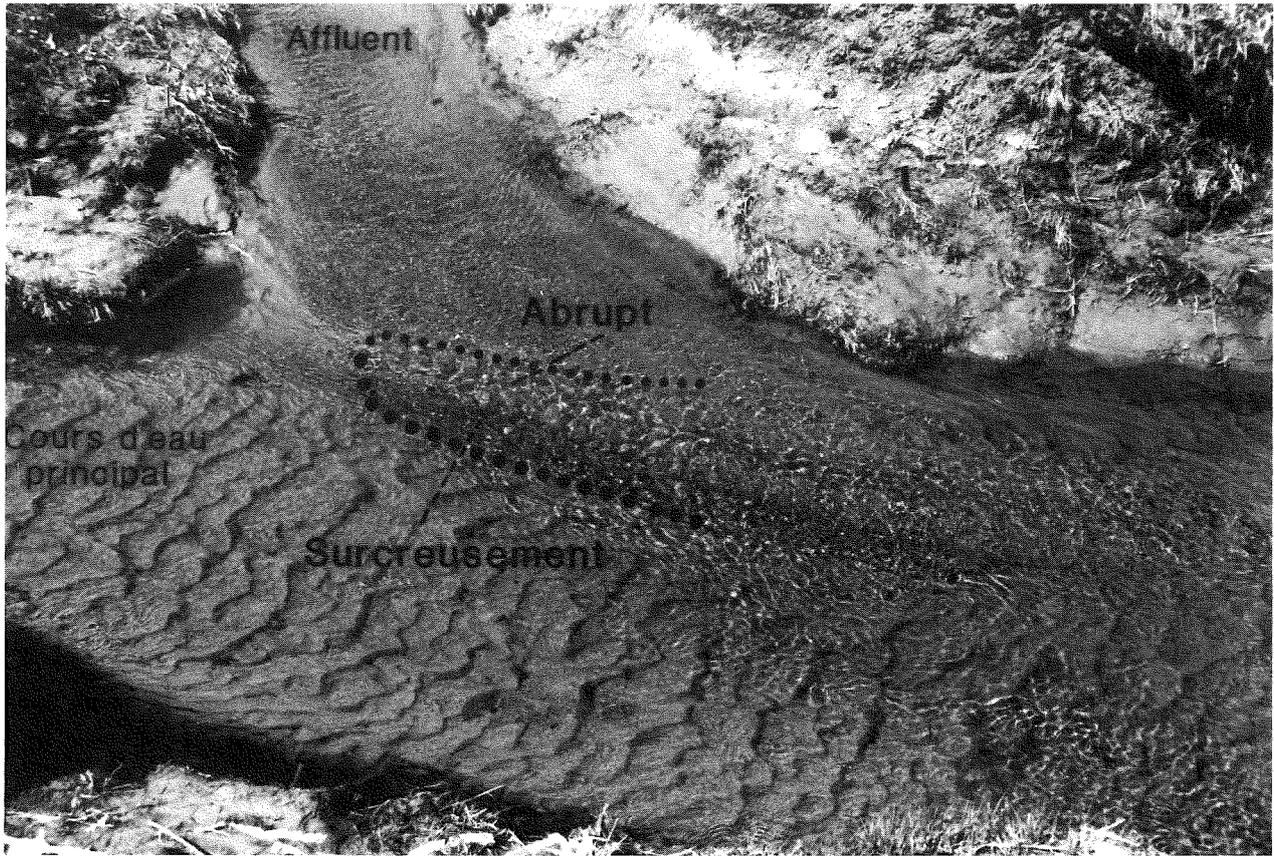


Figure 1: Morphologie typique à un confluent.

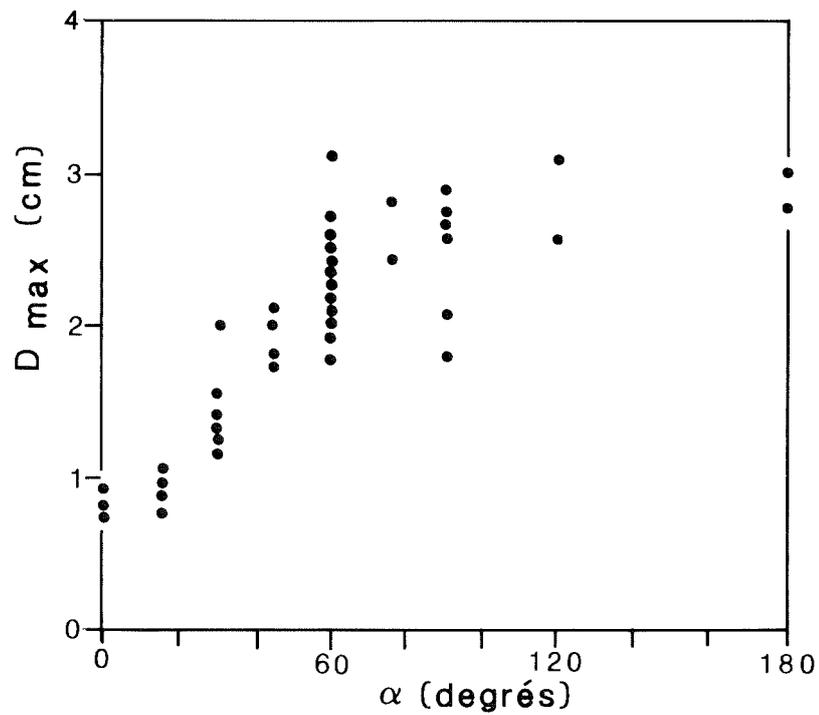


Figure 2 : Relation entre l'angle de jonction (α) et la profondeur maximale de surcreusement (D_{max}) établie d'après les expériences en laboratoire de MOSLEY (1976, fig.7).

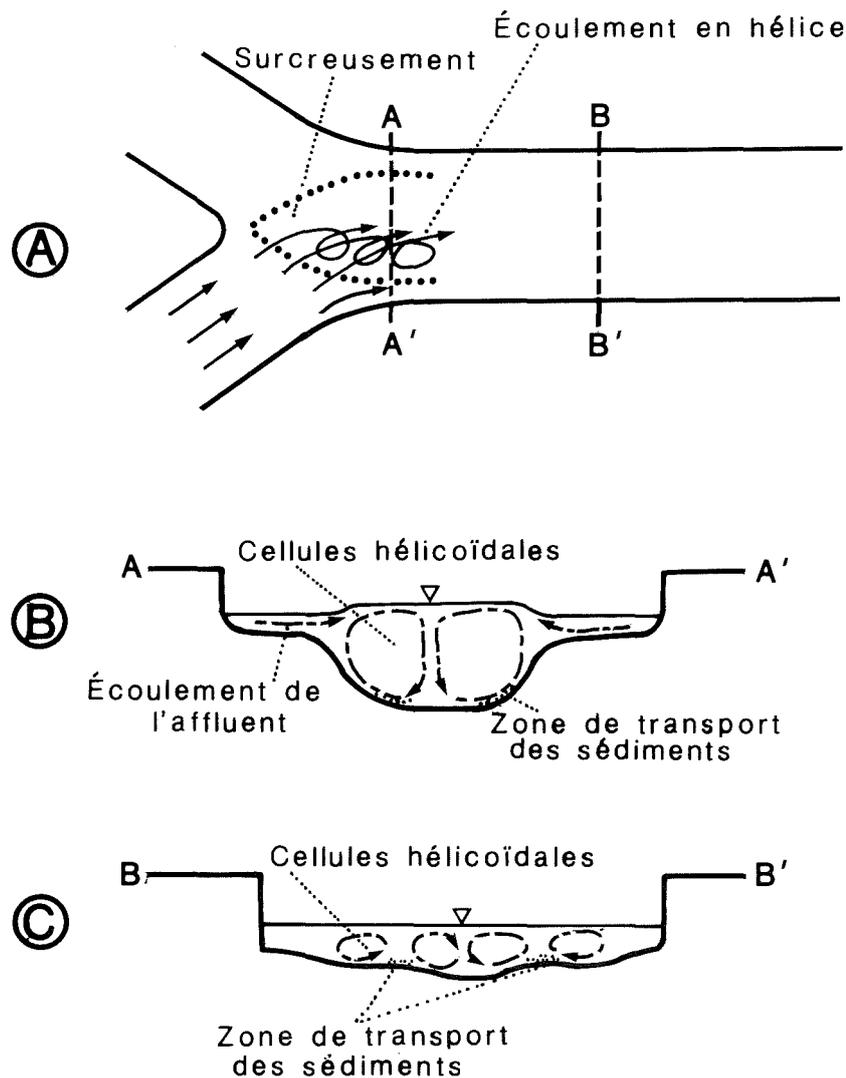


Figure 3 : Dynamique de l'écoulement dans la zone de surcreusement telle que rapportée par MOSLEY (1976, fig.4). A. vue en plan; B. et C. vue en coupe.

tourbillons à axe vertical probablement générés dans le plan de cisaillement situé entre les écoulements des cours d'eau tributaires lorsqu'ils se rejoignent. Ces tourbillons permettent l'interpénétration et le mélange entre les flux. L'écoulement dans la zone de surcreusement est tridimensionnel et très complexe. Parce qu'elles remontent le long des abrupts du surcreusement, les cellules hélicoïdales créent aussi une déviation des trajectoires des sédiments: les particules en provenance des chenaux tributaires longent et contournent le surcreusement. Les trajectoires se rejoignent plus loin en aval pour former une zone de transport intense au centre du chenal. MOSLEY rapporte l'absence virtuelle de transport en charge de fond dans le surcreusement.

Les observations de MOSLEY (1976) sur les écoulements aux confluent ont été confirmées par les expériences de

ASHMORE (1982) qui a étudié la genèse et l'évolution des chenaux tressés lors d'expériences menées dans un chenal hydraulique d'une largeur de 1,3 mètres. A la rencontre des chenaux, ASHMORE a noté la présence d'un surcreusement dont la forme est souvent plus complexe que celle décrite par MOSLEY (1976) et de cellules hélicoïdales plongeantes et convergentes. Le surcreusement semble donc lié à de forts courants secondaires qui érodent le lit. L'accumulation des sédiments se produit dans les zones de séparation de l'écoulement situées à l'embouchure des tributaires et au-dessus des abrupts. Bien qu'il ait observé les mêmes mécanismes que ceux rapportés par MOSLEY (1976), ASHMORE (1982, Fig. 12) n'a obtenu qu'une faible relation positive entre l'angle de jonction et la profondeur de surcreusement. A noter que les angles sont en général plus élevés que 60° et que la variation de la profondeur de

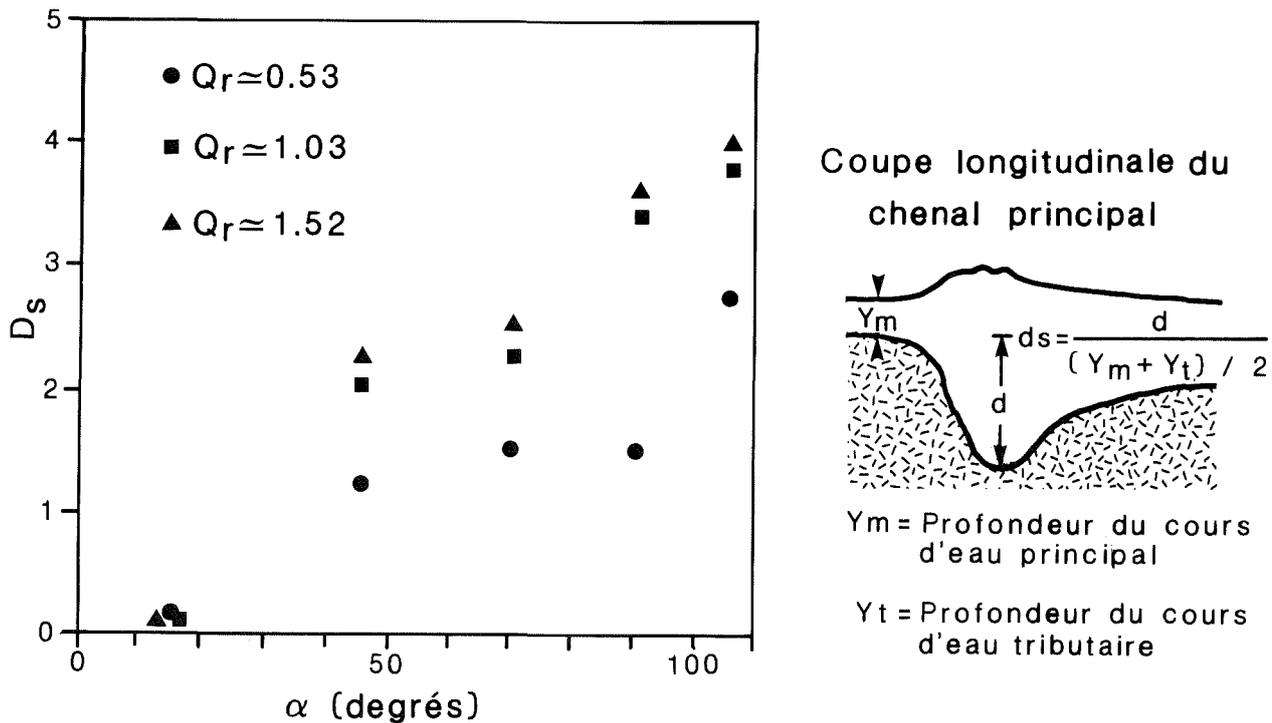


Figure 4 : Variation de la profondeur relative du surcreusement en fonction de l'angle de jonction (α) et du rapport de débits (Q_r). (Selon BEST, 1988, fig.5)

surcreusement est très grande pour chaque valeur d'angle.

Plus récemment, BEST (1985, 1987, 1988) a conduit une étude systématique et détaillée de l'effet de l'angle de confluence et du rapport de débits (Q_r) sur la morphologie du lit et la dynamique des écoulements et du transport des sédiments des confluits. Ses expériences ont porté sur un modèle réduit où les chenaux des trois cours d'eau de la jonction sont d'égale largeur (15 cm) et où l'angle de jonction peut varier entre 15° et 105° . BEST a obtenu une relation positive entre la profondeur relative de surcreusement et l'angle de jonction (Fig. 4) mais a aussi montré que cette relation diffère selon que le rapport entre le débit du tributaire et celui du cours d'eau principal en amont de la jonction est faible ou élevé (Fig. 4). L'angle de jonction et le rapport des débits régissent le comportement de l'écoulement du tributaire lorsqu'il entre dans le confluent: plus l'un ou l'autre de ces deux facteurs augmente, plus l'écoulement du tributaire pénétrera dans le confluent, accentuant ainsi la turbulence et l'échange de la quantité de mouvement à la rencontre des écoulements. De plus, non seulement la profondeur de surcreusement augmente-t-elle avec l'angle et Q_r , mais la localisation même du surcreusement est fonction de ces deux facteurs. BEST (1988) a montré que l'axe longitudinal du surcreusement pivote graduellement vers la berge opposée au tributaire lorsque l'angle ou le rapport de débits augmente.

D'un point de vue dynamique, les expériences de BEST ont mis en évidence des relations très nettes entre l'écoulement, le transport des sédiments et la morphologie du lit. Vu de haut, l'écoulement à un confluent se caractérise par six zones dynamiques (Fig. 5). Les zones qui revêtent un intérêt particulier sont les zones de déviation et de séparation de l'écoulement ainsi que le plan de cisaillement entre les flux provenant du tributaire et du cours d'eau principal. La localisation et l'expansion de chacune de ces zones sont aussi fonction de l'angle et du rapport de débits. BEST et REID (1984) ont montré que la largeur et la longueur de la zone de séparation causée par le détachement au coin aval du confluent de l'écoulement provenant du tributaire augmentent avec l'angle et Q_r . Cette zone de basse pression s'organise en une cellule de contre-courant à axe vertical, située au pied de la berge (Fig. 5). Puisque la vitesse du flux dans cette zone est faible, les particules qui y pénètrent sont piégées et s'y accumulent formant ainsi un banc (BEST, 1988). La localisation de la zone de déviation des écoulements et, par conséquent, celle du plan de cisaillement dépend de la quantité de mouvement de l'écoulement du tributaire, donc de l'angle de jonction, du débit et de la vitesse de l'écoulement. L'extension du plan de cisaillement est fonction des différences hydrauliques (surtout de la vitesse et de la densité du fluide) entre le tributaire et le chenal principal en amont du confluent.

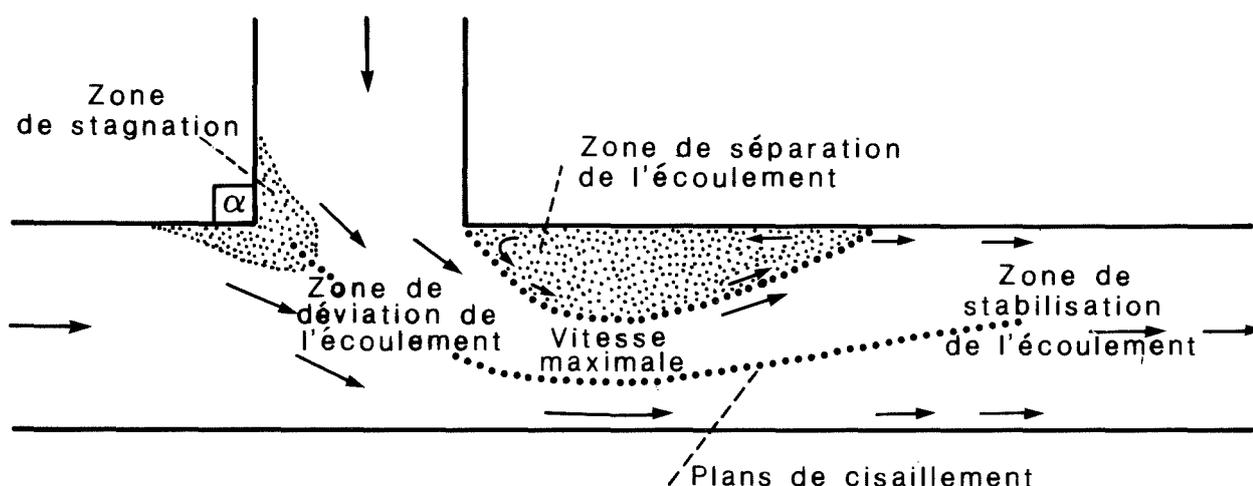


Figure 5 : Les zones dynamiques de l'écoulement à un confluent de cours d'eau. (Selon BEST, 1987, fig.1)

En profondeur, la dynamique de l'écoulement - et par conséquent celle du transport des sédiments - devient plus complexe. BEST a noté que la zone d'affouillement se situe sous le plan de friction et qu'elle se prolonge dans la zone d'accélération de l'écoulement (Fig. 5). Le début du surcreusement est peut-être lié à l'action érosive des vortex verticaux qui se forment et s'épanouissent longitudinalement et latéralement dans le plan de cisaillement. Une fois l'affouillement commencé, une rétroaction positive s'établit: l'écoulement se détache au-dessus des parois du surcreusement pour donner naissance à des cellules tourbillonnaires qui longent et accentuent les abrupts du surcreusement ce qui, en retour, entraîne une séparation plus prononcée de l'écoulement. Les diagrammes d'écoulement présentés par BEST (1988) montrent une dynamique très complexe à l'approche et à l'intérieur du surcreusement (Fig. 6). Les cellules hélicoïdales dans le surcreusement causent la déviation vers les berges des particules qui atteignent la tête du surcreusement. Ainsi, les sédiments qui proviennent du tributaire sont déviés vers la zone de séparation tandis que ceux du cours d'eau principal se dirigent vers la berge opposée au tributaire. Etant donné que la profondeur de surcreusement s'accroît avec l'angle et le rapport de débits, ces deux facteurs jouent aussi sur les trajectoires de l'écoulement et des particules en mouvement près du lit. Avec une augmentation de la profondeur du surcreusement, l'intensité des cellules hélicoïdales le long des abrupts s'accroît et empêche les particules d'entrer dans la zone d'affouillement. BEST (1988) a observé que la proportion de particules qui passent par le surcreusement diminue avec une augmentation de l'angle de jonction et du rapport de débits. A 105°, la quantité de particules en transport dans cette zone est presque nulle (BEST, 1988, Fig.9). Tout en permettant de mieux comprendre la complexité de l'écoulement et du transport des sédiments dans un confluent, les expériences de BEST corroborent celles de MOSLEY (1976) et de ASHMORE (1982).

EXPERIENCES EN MILIEU NATUREL

Les expériences en laboratoire fournissent des hypothèses intéressantes que l'on se doit de vérifier sur le terrain. En ce qui a trait aux confluent de cours d'eau, de telles tentatives sont rares. Ces sites sont des milieux dynamiques complexes et souvent difficiles d'approche d'un point de vue expérimental. Il existe néanmoins quelques études importantes d'où se dégagent des tendances très nettes.

La morphologie du lit

L'observation de quelques confluent naturels sis en différents milieux fluviaux a permis à MOSLEY (1976) de noter qu'ils sont sujets à une turbulence intense qui se traduit par des tourbillons à axe vertical qui remontent à la surface le long du plan de cisaillement. Une zone nette de surcreusement présente à tous les confluent se situe sous le plan de cisaillement. MOSLEY n'a pu quantifier les relations entre le rapport de débits et la profondeur de surcreusement à un confluent donné. Il souligne cependant la possibilité que le surcreusement soit une zone dynamique dont l'ampleur peut varier pendant un hydrogramme de crue, l'affouillement étant plus intense lors de débits élevés, ou en fonction de la coïncidence des hydrogrammes de crues des cours d'eau. Le caractère passager de la morphologie du lit peut compliquer l'application des relations empiriques obtenues en laboratoire pour des conditions d'équilibre.

KJERFVE *et al.* (1979) ont montré que la relation entre l'angle et la profondeur de surcreusement tient pour les chenaux qui se développent sur les estrans marins. Pour les milieux fluviaux, le premier test quantitatif de la relation entre la profondeur relative de surcreusement et l'angle de jonction est venu de MOSLEY (1982) qui a étudié 10 confluent de chenaux tressés. MOSLEY n'a pu établir de relation entre la profondeur relative de surcreusement

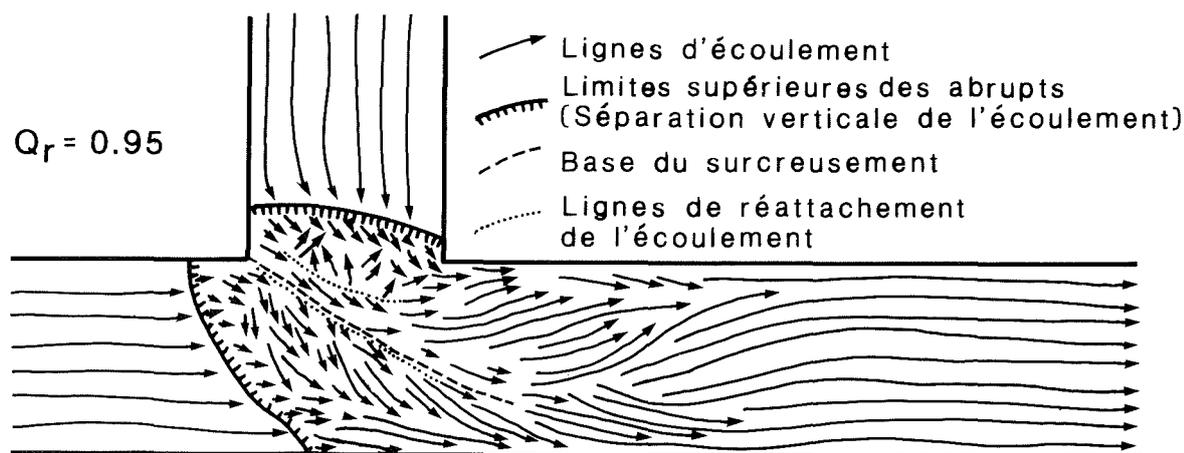


Figure 6 : Diagrammes d'écoulement près du lit à un confluent de cours d'eau. (Selon BEST, 1988, fig. 10).

et l'angle de jonction ou le rapport des débits. Il a cependant dégagé une relation positive entre la profondeur de surcreusement et le débit du cours d'eau principal à l'aval du confluent. ASHMORE et PARKER (1983) ont aussi utilisé des données morphologiques tirées de chenaux tressés obtenus en laboratoire ou levés sur le terrain. Une zone de surcreusement était évidente à tous les confluits. Par contre, le nuage de points entre la profondeur relative de surcreusement et l'angle de jonction est extrêmement dispersé ne laissant voir qu'une faible relation entre ces variables (Fig. 7). La dispersion la plus marquée se retrouve à 60° . L'introduction d'un rapport de débits dans la relation n'améliore pas la prévision de la profondeur de surcreusement. Des résultats similaires sont rapportés par KLAASSEN et VERMEER (1988) pour le surcreusement de très larges confluits des chenaux tressés de la Jamuna au Bangladesh. Ils avancent l'hypothèse que l'absence de relation entre l'angle et la profondeur relative de surcreusement soit due à l'importante charge en suspension. Il semble donc que l'angle de jonction seul ne permette pas de prévoir la profondeur de surcreusement aux confluits.

Les observations relatives à l'effet direct de changements dans le rapport des débits sur le surcreusement sont moins systématiques. Plusieurs chercheurs ont observé le déplacement de la zone de surcreusement en fonction de la prédominance hydrologique d'un des cours d'eau amont du confluent. JAEGGI (1986) a rapporté que la localisation du surcreusement à la rencontre de la Maggia et de la Melezza en Suisse changeait en fonction du cours d'eau qui avait le débit le plus élevé. Lorsque le tributaire a un débit plus important, son écoulement pénètre profondément dans le confluent, ce qui déplace le surcreusement et ses rebords abrupts vers la berge opposée. BEST (1985) et REID *et al.* (1989) ont décrit le même phénomène pour un confluent dans le Yorkshire

(Angleterre): ils ont enregistré les déplacements des rebords du surcreusement en fonction du rapport des débits. BERGERON et ROY (1988) ont étudié l'effet sur la morphologie d'un confluent à lit graveleux d'un embâcle de glace accumulée sur l'affluent. L'embâcle formant barrage retenait l'eau de l'affluent ce qui réduisait son débit. Durant cette période, le cours d'eau principal, a remblayé le surcreusement. Suite à la relâche subite de l'embâcle, le débit du tributaire est devenu beaucoup plus important que celui du cours d'eau principal ce qui a entraîné l'incision d'un surcreusement et la formation d'un banc graveleux à l'embouchure du cours d'eau principal en amont du confluent. Toutes ces observations montrent que la position et l'ampleur du surcreusement sont dynamiques. Peu de données existent cependant pour tester la relation entre la profondeur de surcreusement et le rapport des débits. DE SERRES (1988) a recueilli à un confluent donné une série de mesures concomitantes de profondeur du lit et des débits. Les résultats présentés en figure 8 montrent l'absence de relation entre les deux variables. Certaines des données recueillies lors d'hydrogrammes de crues montrent que la profondeur relative de surcreusement tend à se stabiliser entre 2,0 et 3,0 quel que soit le rapport des débits. Cette profondeur doit correspondre à un équilibre dynamique.

D'ores et déjà, il ressort que la morphologie du lit d'un confluent ne répond pas seulement à l'angle et au rapport de débits. On doit noter que les relations établies en laboratoire portent sur une morphologie en équilibre dynamique où l'apport en sédiments au confluent est égal à ce qui en est expulsé. Or, on ne peut garantir que les données de terrain correspondent à l'équilibre dynamique. Par surcroît, plusieurs facteurs contrôlés lors des expériences en laboratoire interviennent pour perturber la morphologie locale du lit. Il apparaît que la coïncidence entre les résultats de laboratoire et ceux de terrain est insatisfaisante.

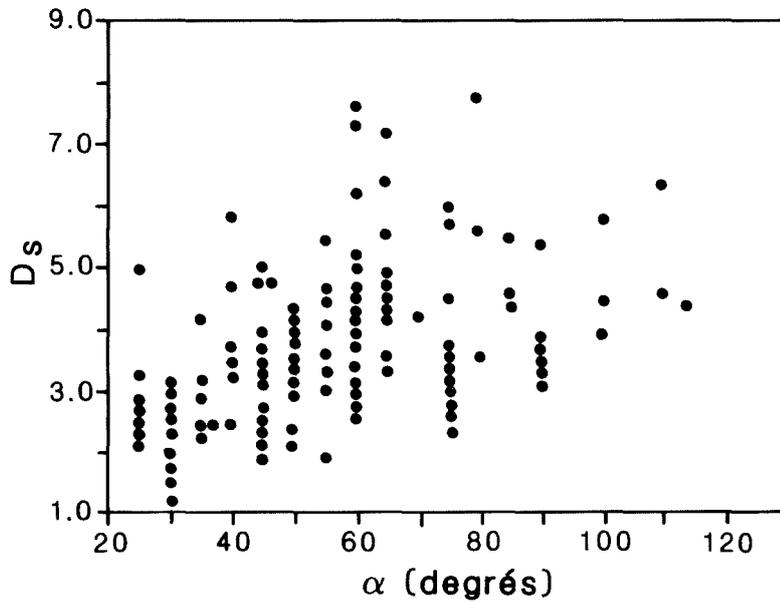
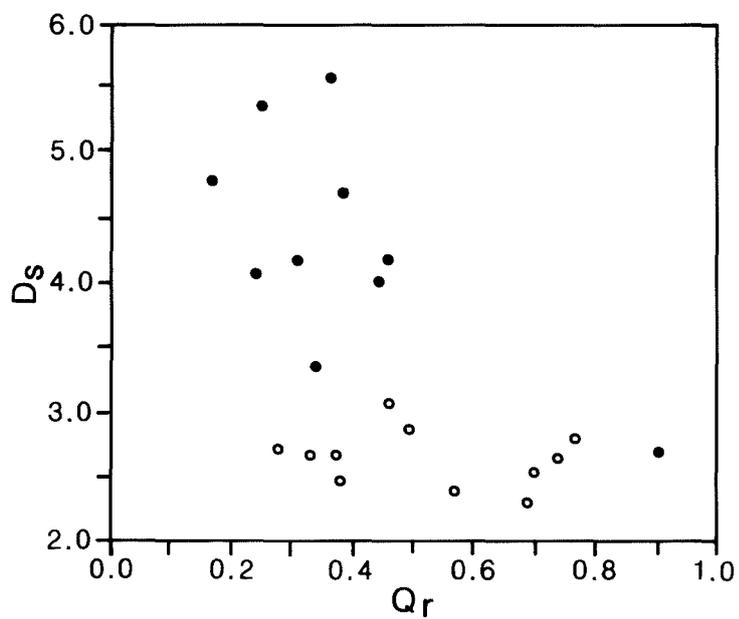


Figure 7 : Diagramme de dispersion entre la profondeur relative de surcreusement (D_s) et l'angle de jonction (α) selon ASHMORE et PARKER (1983, fig. 9a).



• Mesures effectuées à un niveau d'eau stable

◦ Mesures effectuées pendant une crue

Figure 8 : Relation entre le rapport de débits (Q_r) et la profondeur relative de surcreusement (D_s).

Liens écoulement, transport des sédiments et morphologie du lit

En ce qui concerne les processus dynamiques, les expériences sur le terrain sont plus rares. Le problème de telles études est de recueillir des observations simultanées sur l'écoulement, le transport des sédiments et la morphologie du lit. Le fait que la dynamique d'un confluent de cours d'eau soit complexe ajoute des difficultés techniques supplémentaires dans la conception d'expériences en milieu naturel. On soulève fréquemment l'impossibilité de saisir la totalité des processus qui jouent aux confluent. Bien que les premières études de processus aux confluent isolaient un aspect ou l'autre de la dynamique il paraît de plus en plus possible d'étudier plus d'une composante à la fois.

Etant donné l'importance sédimentologique des confluent de cours d'eau dans l'interprétation des faciès actuels et anciens, BEST (1988) a opté pour une expérience sur les trajectoires des particules en transport dans le confluent. Il a travaillé sur une jonction de cours d'eau à lits graveleux située dans le Yorkshire (Angleterre). Le confluent est marqué par un surcreusement relativement profond dont les abrupts raides dépassent souvent 35° (Fig. 9). A la position présumée de la zone de séparation de l'écoulement au coin aval du confluent, on note un banc d'accumulation affectant la forme d'un demi-cercle étiré. BEST (1988) rapporte la présence de cailloux plus gros en aval du dépôt et une décroissance de la taille des particules vers l'amont. Ceci confirme l'effet des courants de recirculation et du plan de cisaillement le long de la zone de séparation sur le transport des sédiments dans cette zone, la fraction la plus grossière se retrouvant là où la vitesse du flux est la plus élevée. L'expérience consistait à suivre durant une période de six mois la progression de particules marquées et initialement déposées sur le lit des cours d'eau en amont du confluent. Les résultats présentés à la figure 9 illustrent la déviation des particules lorsqu'elles approchent du surcreusement et le rôle de la zone de séparation de l'écoulement sur les trajectoires des particules provenant des tributaires. Bien que peu de particules aient migré du cours d'eau principal en amont du confluent, il semble que les trajectoires de transport contournent le surcreusement. Ceci tend à confirmer les résultats obtenus en laboratoire. Cependant, l'effet du surcreusement et de la zone de séparation sur le transport est accentué par le fait que l'affluent domine d'un point de vue hydrologique le cours d'eau principal et que l'angle de jonction du confluent soit de près de 90° (REID *et al.*, 1989). Par ailleurs, BEST (1988) n'a relevé que les hauteurs d'eau à l'aide de limnigraphes. Ces données lui ont permis d'estimer les rapports de débits sans lui fournir d'indications sur les processus d'écoulement dans le confluent. BEST (1985) a observé lors de forts débits la recirculation de l'écoulement dans la zone de séparation et la présence de puissants vortex au-dessus du surcreusement.

ROY *et al.* (1988) ont pour leur part étudié le confluent du ruisseau du Sud (Québec). Les cours d'eau y sont de plus petite taille (6 m de largeur) qu'au confluent étudié par BEST (1985, 1987, 1988) ce qui a permis l'installation de ponts légers au-dessus de la surface de l'eau. Les buts de l'expérience étaient d'une part d'établir les relations de la géométrie hydraulique pour les cours d'eau du confluent et d'autre part, de décrire les zones dynamiques de l'écoulement. Le site choisi n'avait cependant pas les caractéristiques typiques d'un confluent dans la mesure où, malgré l'angle de jonction important (60°), le surcreusement était peu marqué. La profondeur relative de surcreusement établie pour le niveau du débit à pleins bords est près de 1,0. Ceci est en partie explicable par le faible rapport des débits entre l'affluent et le cours d'eau principal dont la valeur oscille entre 0,5 et 0,6. Des relations de la géométrie hydraulique obtenues à partir de sept séries de mesures couvrant des niveaux du débit à pleins bords jusqu'à l'étiage, ROY *et al.* (1988) ont montré que l'écoulement était accéléré au confluent. L'accélération pouvait atteindre 1,6 fois la vitesse moyenne des écoulements en amont du confluent. Le flux le plus rapide se retrouvait dans le surcreusement. Etant donné l'absence d'abrupts marqués sur les rebords du surcreusement et la rapidité de l'écoulement, des cellules hélicoïdales nettes ne pouvaient s'y développer. Les zones dynamiques de l'écoulement ne correspondaient pas entièrement à ce que prescrit le modèle de BEST (1986). Sur la Figure 10, on remarque d'abord l'absence de la zone de séparation en aval de l'embouchure de l'affluent et ensuite la déviation précoce, c'est-à-dire en amont du confluent, des trajectoires de l'écoulement provenant de l'affluent. Cette déviation se produit à la faveur d'une courbure dans le parcours de l'affluent, courbure qui aligne l'écoulement tributaire avec celui du cours d'eau principal. La courbure est accentuée par le remplissage par des sables fluviatiles fins de la zone de stagnation située à l'apex du confluent. Il n'est donc pas surprenant que le plan de cisaillement entre les écoulements soit peu développé et qu'il ne donne naissance qu'à de faibles manifestations turbulentes. D'un point de vue dynamique et morphologique, le confluent reflète les caractéristiques d'une jonction de 15° telle que décrite par BEST (1988) à partir de ses expériences en laboratoire.

ROY et BERGERON (sous presse) ont poursuivi l'étude de ce confluent en documentant plus précisément l'écoulement et en retraçant la migration de particules marquées à l'intérieur du confluent. Leurs résultats confirment ceux de ROY *et al.* (1988) en montrant l'absence d'un écoulement secondaire important et d'une zone de séparation. Par contre, les directions d'écoulement dans le confluent changent selon le débit. A bas régime, les vecteurs de vitesse maximale sont contrôlés par la topographie du surcreusement. A plus haut régime, soit la moitié du niveau du débit à pleins bords, la géométrie en plan du confluent dicte les directions d'écoulement. L'influence locale du

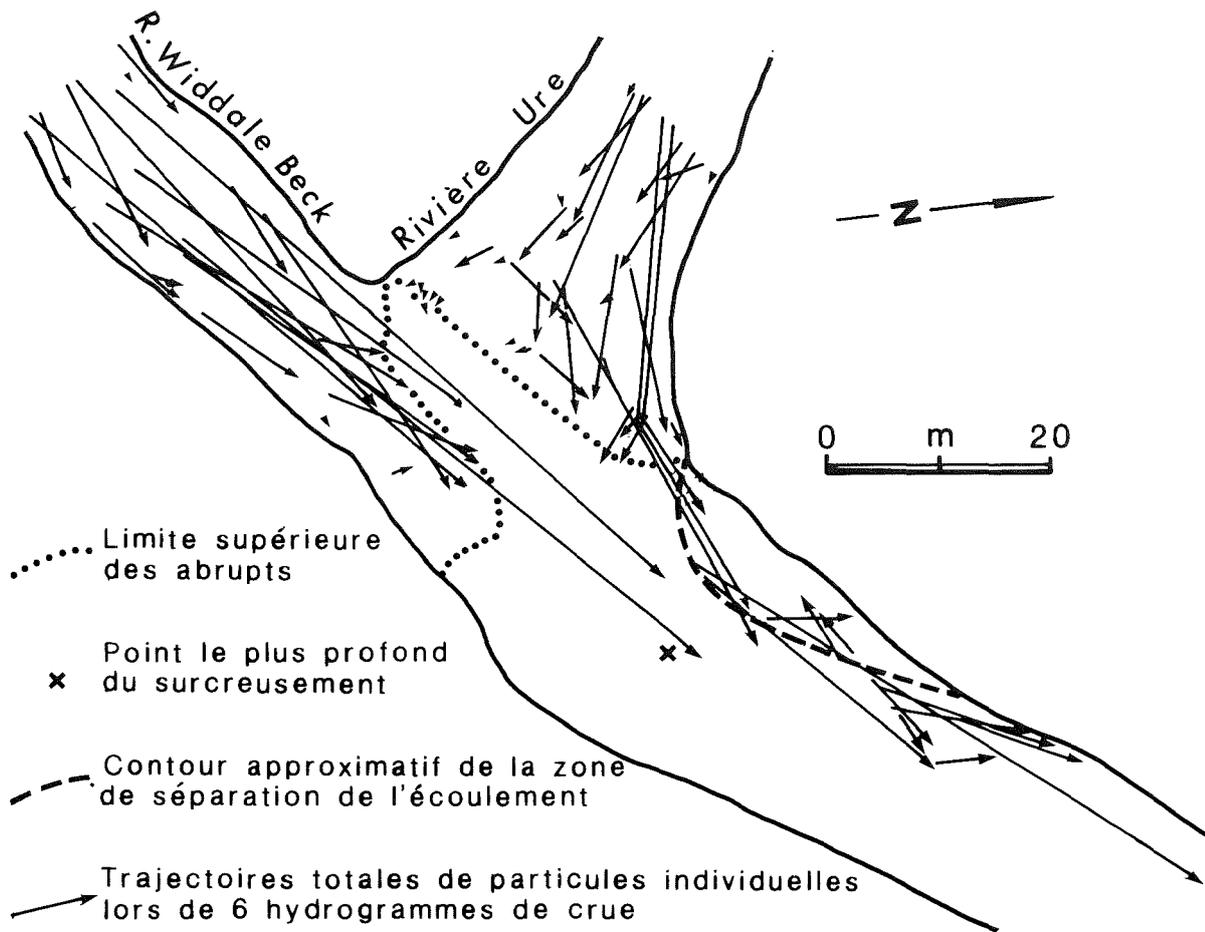


Figure 9 : Trajectoires de particules marquées à la jonction des rivières Ure et Widdale Beck (Royaume-Uni). (Figure modifiée tirée de BEST, 1988, fig.14)

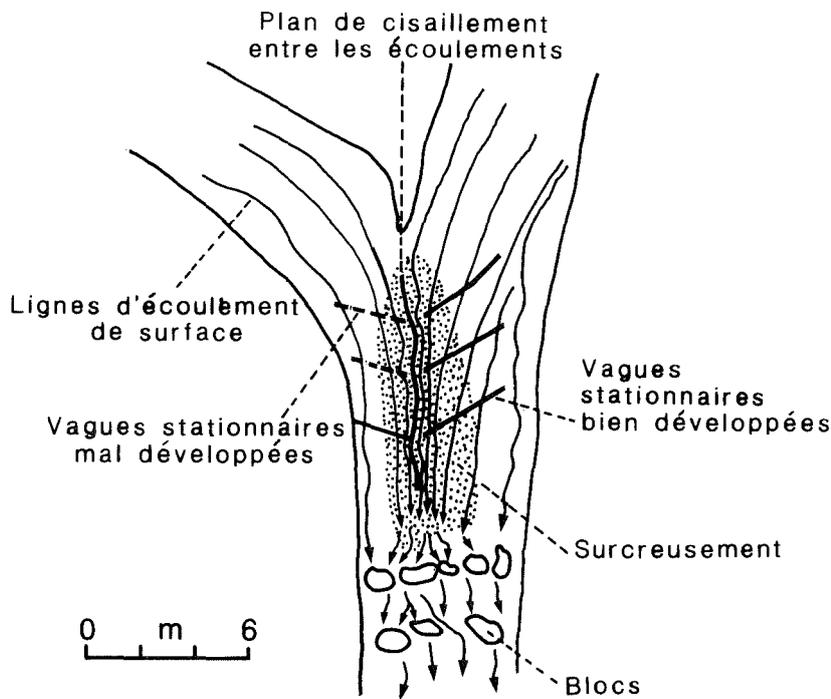


Figure 10 : Trajectoires de l'écoulement à la surface de l'eau du confluent du Ruisseau du Sud (Québec). (Selon ROY *et al.*, 1988, fig. 9)

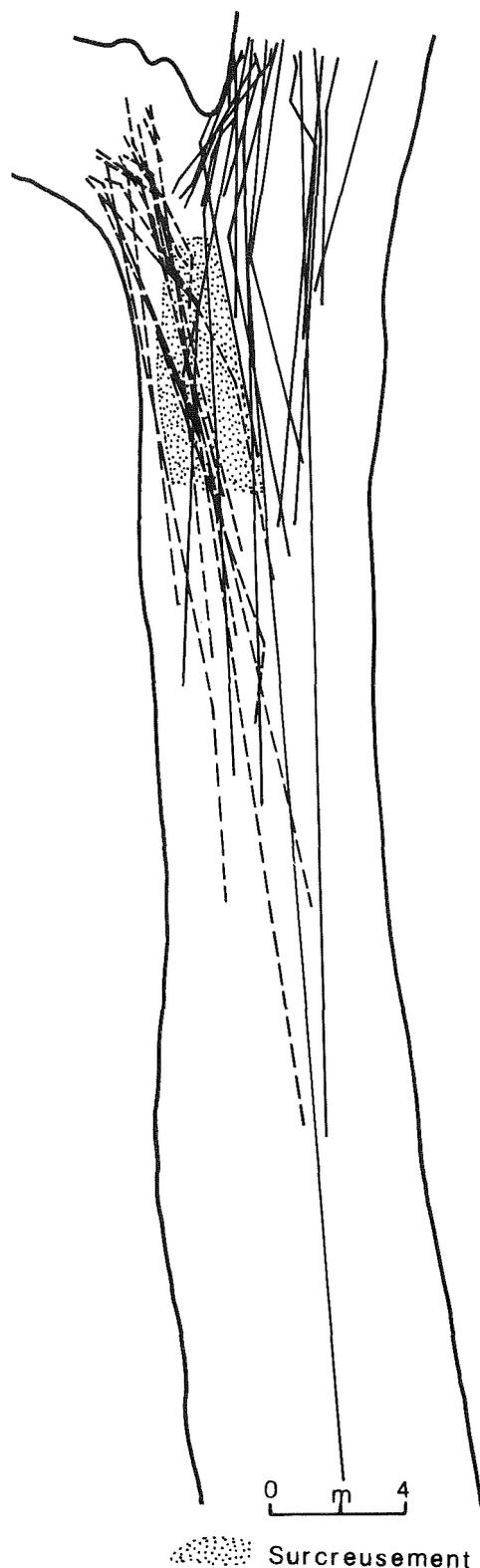


Figure 11 : Trajectoires de particules marquées en provenance du cours d'eau tributaire(- - -) et du cours d'eau principal (—) au confluent du Ruisseau du Sud (d'après ROY et BERGERON, sous presse fig.7)

surcreusement disparaît. La force de cisaillement appliquée sur le lit est aussi plus élevée au centre du surcreusement, qui est peu profond et soumis à un écoulement rapide. Le transport de la charge de fond se fait selon des trajectoires cohérentes avec l'absence d'un surcreusement marqué. Les particules qui se déplacent de l'affluent entrent à la tête du surcreusement et le traversent (Fig. 11). Celles qui partent du cours d'eau principal vers le confluent suivent deux tendances: certaines migrent vers le surcreusement selon une trajectoire oblique le long du gradient de pente le plus fort, tandis que d'autres se déplacent parallèlement aux berges. Cette double tendance s'expliquerait par un changement dans le régime hydrologique des cours d'eau pendant la saison, les crues étant plus fortes au fur et à mesure que la saison avançait (ROY et BERGERON, sous presse).

Ces travaux montrent que des modifications relativement mineures altèrent considérablement la dynamique d'un confluent. Au ruisseau du Sud, le détournement hâtif de l'écoulement de l'affluent causé par la construction d'un dépôt dans la zone de stagnation diminue la turbulence générée par la rencontre des écoulements et réduit l'importance de la zone de séparation sur l'écoulement et le transport des sédiments. Le confluent acquiert ainsi une géométrie qui minimise les pertes de puissance (WEBBER et GREATED, 1967; ROY *et al.*, 1988). Par conséquent, les trajectoires de l'écoulement et des particules sur le lit ne correspondent pas à ce que l'on attend d'un confluent de 60° mais plutôt à celui de 15°.

Une seule série d'expériences sur la dynamique des confluent a été menée sur les lits sableux. DE SERRES (1988) a travaillé sur un confluent de 70° entre des petits chenaux rectilignes de drainage agricole. La profondeur relative du surcreusement varie entre 2,0 et 6,0. DE SERRES a utilisé une combinaison de techniques de visualisation afin de recréer en trois dimensions les principales caractéristiques de l'écoulement en relation avec les changements morphologiques du confluent. Il a montré que le modèle de BEST (1986, 1988) est généralement valable sauf en ce qui concerne la variation de la taille de la zone de séparation. En effet, aucune relation n'existe entre la largeur relative de la zone de séparation et le rapport des quantités de mouvement, relation proposée par BEST et REID (1984). La zone de séparation est très réduite et elle se situe généralement le long de la berge de l'affluent plutôt qu'en aval de son embouchure. A forts débits, le détachement de l'écoulement au coin aval du confluent devient alors plus marqué et la zone de séparation s'accroît en taille. En dépit d'une absence de recirculation d'eau importante, les trajectoires de transport de sédiments sur le lit suivent les tendances décrites par BEST (1988). Les particules sont déviées aux abords du surcreusement de part et d'autre des abrupts. De fait, très peu de transport prend place au fond du surcreusement. Aussitôt qu'une particule y tombe, elle est rapidement évacuée en remontant selon une trajectoire



Figure 12 : Illustration du glissement et de la résurgence de l'écoulement du cours d'eau principal sous l'écoulement de l'affluent arrivant de la gauche. Les fanions montrent la complexité tri-dimensionnelle du mélange des écoulements dans le plan de cisaillement entre les flots des deux cours d'eau tributaires.

oblique le long des abrupts. Ceci indique que des cellules hélicoïdales dominent le surcreusement et contrôlent l'entrée des particules dans la zone d'affouillement. Seules les particules ayant une très grande quantité de mouvement sont en mesure de résister aux déviations liées aux courants secondaires et peuvent ainsi pénétrer dans le surcreusement. Si la particule est de suffisamment grande taille, elle pourra demeurer au fond du surcreusement.

Les travaux de DE SERRES ont aussi illustré qualitativement la complexité des écoulements lorsque le chenal de l'affluent est moins profond que celui du cours d'eau principal. Cette configuration crée une dynamique vorticelle intense dans un plan de cisaillement tridimensionnel. De fait, une partie de l'écoulement du cours d'eau principal glisse sous celui de l'affluent moins profond pour resurgir là où la vitesse est faible c'est-à-dire près du coin aval du confluent (fig. 12). Cet échange suit un gradient des régions de forte quantité de mouvement vers celles qui en ont moins. La résurgence est plus prononcée à faible débit, ce qui contribue à anéantir la zone de séparation. Cette dynamique vorticelle est variable dans le temps en fonction des rapports de débits mais elle affecte presque toujours un comportement périodique dans les incursions des écoulements l'un dans

l'autre. La figure 13 présente un exemple de la complexité du plan de cisaillement: notons que le front du plan de cisaillement est marqué par une rotation et une translation des vortex dans les trois dimensions. De tels systèmes sont extrêmement difficiles à analyser.

CONCLUSION

Les recherches en laboratoire sur les confluent de cours d'eau ont permis d'identifier deux facteurs qui interviennent sur la morphologie du lit et la dynamique. Elles ont ainsi fourni des hypothèses nécessaires pour entreprendre les travaux de terrain. Bien que ceux-ci soient peu nombreux, les résultats obtenus montrent bien les limites des relations établies en laboratoire et tracent la voie pour les recherches futures. De fait, il doit exister une rétroaction entre les expériences de laboratoire et celles menées sur le terrain.

Sur le plan de la morphologie du lit, les observations de terrain ne montrent que de faibles relations, quand elles existent, entre la profondeur relative de surcreusement d'une part, et l'angle de jonction et le rapport de débits d'autre part. Dans la mesure où aucun contrôle n'a guidé

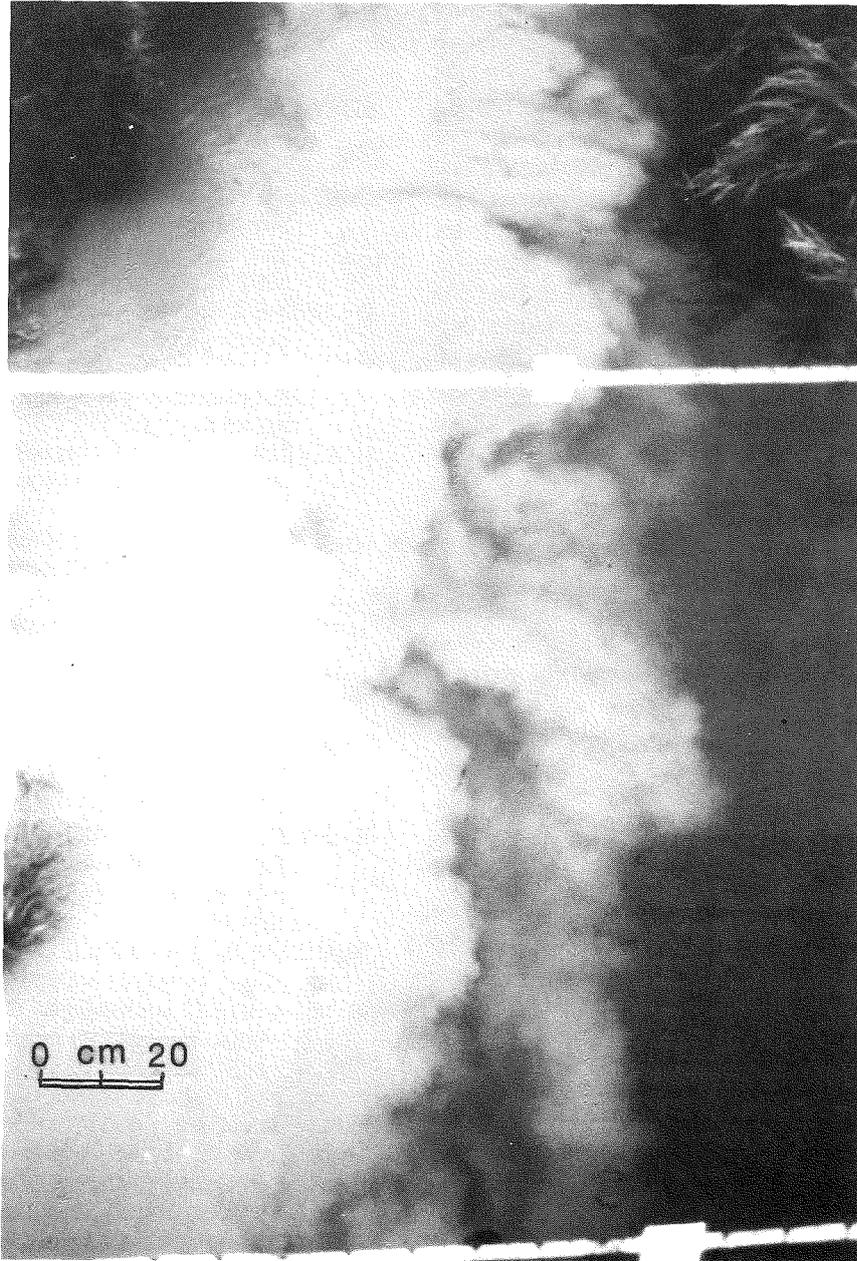


Figure 13 : Complexité du système vorticiel à un confluent où l'affluent est moins profond que le cours d'eau principal. L'eau turbide provient de l'affluent.

le choix des sites, il est évident que ces tests sont incomplets. Par la grande variabilité morphologique que l'on observe sur le terrain, il est clair que plusieurs facteurs autres que l'angle et Qr doivent être tenus en compte. Par exemple, DE SERRES (1988) a montré une dynamique originale des mélanges d'écoulement à des confluent où le chenal de l'affluent est moins profond que celui du cours d'eau principal. Puisque ce type de confluent est de loin le plus fréquent dans la nature (KENNEDY, 1984), on doit se pencher sur les implications morphologiques d'une telle dynamique en simulant en laboratoire de telles configurations des lits. Le rôle de la charge de fond doit aussi être pris en compte. MOSLEY (1976) avait remarqué

que la profondeur de surcreusement diminuait lorsque la charge de fond augmentait. Cette conclusion corrobore les travaux des ingénieurs sur le surcreusement autour de piliers de ponts (BREUSERS *et al.*, 1977; RAUDKIVI et ETTEMA, 1983). Afin d'obtenir des résultats qui permettraient une prévision adéquate de la profondeur de surcreusement aux confluent, on se doit d'élargir le nombre de facteurs considérés et de mieux comprendre leurs effets sur les processus.

L'étude des processus, quant à elle, doit procéder selon deux directions. D'abord, les observations de terrain montrent que plusieurs aspects du modèle de BEST (1988)

sont valables. Cependant, on ne saurait généraliser trop tôt sans avoir tenté de documenter de façon quantitative l'ensemble des liens entre l'écoulement, le transport et la morphologie. Pour ce faire, on doit choisir un site dont les caractéristiques se rapprochent le plus possible des conditions simulées en laboratoire. L'exécution d'une telle recherche dépend de moyens logistiques qui permettraient de décrire et mesurer la turbulence et les directions d'écoulement, d'estimer les forces de cisaillement sur le lit et de recueillir la charge de fond afin d'évaluer les taux de transport. Ce plan de recherche, déjà ambitieux en chenal rectiligne, est-il possible dans un milieu aussi complexe qu'un confluent de cours d'eau ? Les travaux de BRIDGE et JARVIS (1982) notamment ont montré l'utilité d'une telle approche pour l'étude des méandres. Cette étape de vérification des modèles obtenus en laboratoire est nécessaire. Parallèlement, des travaux en laboratoire s'imposent afin de modéliser les effets de nouveaux facteurs sur la dynamique des confluent. Ces expériences permettront de comprendre des environnements sédimentaires plus complexes et probablement plus près des conditions que l'on retrouve dans la nature.

REFERENCES

- ASHMORE, P. E., 1982. Laboratory modelling of gravel braided stream morphology. *Earth Surface Processes and Landforms*, 7: 201-225.
- ASHMORE, P. E. et PARKER, G., 1983. Confluence scour in coarse braided streams. *Water Resources Research*, 19: 392-402.
- BERGERON, N. et ROY, A. G., 1988. Les effets d'un embâcle sur la morphologie du lit d'une confluence de cours d'eau. *Géographie Physique et Quaternaire*, 42: 191-196.
- BEST, J. L., 1985. *Flow dynamics and sediment transport at river channel confluences*. Unpublished Ph.D. dissertation. Birkbeck College, University of London, 393pp.
- BEST, J. L., 1986. The morphology of river channel confluences. *Progress in Physical Geography*, 10: 157-174.
- BEST, J. L., 1987. Flow dynamics at river channel confluences: Implications for sediment transport and bed morphology. In: *Recent developments in fluvial sedimentology*, (Eds;) ETHRIDGE, F. G., FLORES, R. M. and HARVEY, M. D., Society Economic Paleontologists and Mineralogists Publication, 39: 27-35
- BEST, J. L., 1988. Sediment transport and bed morphology at river channel confluences. *Sedimentology*, 35: 481-498.
- BEST, J. L. et REID, I., 1984. Separation zone at open channel junctions. *Journal of Hydraulic Engineering*, 110: 1588-1594.
- BEST, J. L. et REID, I., 1987. Separation zone at open channel junctions: Closure. *Journal of Hydraulic Engineering*, 113: 545-548.
- BREUSERS, H. N. C., NICOLLET, G. N. et SHEN, H. W., 1977. Local scour around cylindrical piers. *Journal of Hydraulics Research*, 15: 211-252.
- BRIDGE, J. S. et JARVIS, J., 1982. The dynamics of a river bend: a study in flow and sedimentary processes. *Sedimentology*, 29: 499-541.
- CHU, V. H. et BABARUTSI, S., 1985. Confinement and bed-friction effects in shallow turbulent mixing layers. *Journal of Hydraulic Engineering*, 114: 1257-1274.
- DE SERRES, B., 1988. *Dynamique des écoulements et du transport à une confluence de cours d'eau naturels à lit sablonneux*. Thèse de M. Sc., Département de Géographie, Université de Montréal, 102 p.
- HAGER, W. H., 1989a. Transitional flow in channel junctions. *Journal of Hydraulic Engineering*, 115: 243-259.
- HAGER, W. H., 1989b. Supercritical flow in channel junctions. *Journal of Hydraulic Engineering*, 115: 595-616.
- JAEGGI, M. N. R., 1986. Non-distorted models for research on river morphology. *Proceedings IAHR Symposium on scale effects*, Toronto, 70-84.
- KENNEDY, B. A., 1984. On Playfair's law of accordant junctions. *Earth Surface Processes and Landforms*, 9: 153-173.
- KJERFVE, B., SHAO, C. C. et STAPOR, F. W. Jr., 1979. Formation of deep scour holes at the junction of tidal creeks: an hypothesis. *Marine Geology*, 33: M9-M14.
- KLASSEN, G. J. et VERMEER, K., 1988. Confluence scour in large braided rivers with fine bed material. *International Conference on Fluvial Hydraulics*, Delft Hydraulics, Budapest, 1-14.
- LIN, J. D. et SOONG, H. K., 1979. Junction losses in open channel flows. *Water Resources Research*, 15: 414-418.
- MOSLEY, M. P., 1976. An experimental study of channel confluences. *Journal of Geology*, 107: 1713-1733.
- MOSLEY, M. P., 1982. Scour depths in branch channel confluences, Ohau river, Otago, New Zealand. *Proceedings of New Zealand Institute of Professional Engineers*, 9: 17-24.
- MOSLEY, M. P. and SCHUMM S., 1977. Stream junctions - a probable location for bedrock placers. *Economic Geology*, 72: 691-694.
- MUSKATIROVIC, J. et MILORADOV, M., 1980. Some experiences in improving river confluences. *Proceedings of Symposium on River Engineering and its Interaction with Hydrological and Hydraulic Research*, Belgrade, Yougoslavie, Paper D.I.
- NALLASAMY, M., 1987. Turbulence models and their applications to the prediction of internal flows: a review. *Computer and Fluids*, 15 (2): 151-194.
- RAMAMURTHY, A. S., CARBALLADA, L. B. and TRAN, D. M., 1988. Combining open channel flow at right angled junctions. *Journal of Hydraulic Engineering*, 114: 1449-1460.
- RAUDKIVI, A. J. et ETTEMA, R., 1983. Clear water scour at cylindrical piers. *ASCE, Journal of Hydraulics*

- Engineering*, 109: 338-350.
- REID, I., BEST J. L. et FROSTICK, L. E., 1989. Floods and flood sediments at river confluences. *Proceedings of the Conference on Floods and their Geomorphological Impact*.
- RHOADS, B. L., 1987. Changes in stream channel characteristics at tributary junctions. *Physical Geography*, 8: 346-361
- RICHARDS, K. S., 1980. A note in changes in channel geometry at tributary junctions. *Water Resources Research*, 16: 241-244.
- ROY, A. G. et ROY, R. R., 1988. Changes in channel size at river confluence with coarse bed material. *Earth Surface Processes and Landforms*, 13: 77-84.
- ROY, A. G., ROY, R. R. et BERGERON, N., 1988. Hydraulic geometry and changes in flow velocity at a river confluence with coarse bed material. *Earth Surface Processes and Landforms*, 13: 583-598.
- ROY, A. G. et WOLDENBERG, M. J., 1986. A model for changes in channel form at a river confluence. *Journal of Geology*, 94: 401-411.
- ROY, A. G. et BERGERON, N., (sous presse). Flow and particle paths at a natural river confluence with coarse bed material. *Geomorphology*.
- TAYLOR, E. H., 1944. Flow characteristics at open channel junctions. *Transactions of the American Society of Civil Engineers*, 109: paper 223, 893-912.
- WEBBER, N. B. et GREATER, C. A., 1966. An investigation of flow behavior at the junction of rectangular channel. *Proceedings and Papers of the Institute of Civil Engineers*, Paper 6901, 321-334.

