

Traçage minéralogique de l'origine des sédiments aux confluents de cours d'eau

Mineralogical Tracing of the Origin of Sediments at River Channel Confluences

Mineralogische Aufspürung der Herkunft der Sedimente am Zusammenfluss von Wasserläufen

Diane Chaumont, André G. Roy et François Courchesne

Volume 48, numéro 2, 1994

URI : <https://id.erudit.org/iderudit/032996ar>

DOI : <https://doi.org/10.7202/032996ar>

[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

Chaumont, D., Roy, A. G. & Courchesne, F. (1994). Traçage minéralogique de l'origine des sédiments aux confluents de cours d'eau. *Géographie physique et Quaternaire*, 48(2), 195–205. <https://doi.org/10.7202/032996ar>

Résumé de l'article

Traçage minéralogique de l'origine des sédiments aux confluents de cours d'eau. La dynamique sédimentaire des confluents de cours d'eau peut s'étudier par l'intermédiaire de traceurs marquant l'origine des particules. La connaissance de la source sédimentaire est essentielle pour comprendre les processus de mélange des sédiments du lit et établir des relations causales entre les sources de contamination et la dynamique des sites contaminés liés à l'arrivée d'un tributaire. On a examiné les particules du lit d'un confluent naturel sablonneux où la minéralogie des sédiments composant les bassins-versants est différenciée. En raison de leurs forme et densité, les feldspaths K s'avèrent des traceurs efficaces et indiquent qu'à la jonction étudiée le mélange des apports sédimentaires est presque complété à une distance de mélange de 2,1 (distance à partir de l'apex/largeur du confluent). Par contre, les micas et le pourcentage de minéraux lourds, sensibles au tri hydraulique, ne révèlent pas la provenance des particules. La méthode a aussi été employée pour déterminer le patron de dispersion des particules à un confluent du Saint-Laurent. Ici la minéralogie des particules diffère peu entre les bassins-versants. Toutefois, les variations spatiales du pourcentage de minéraux lourds sont directement liées à la morphologie du lit caractérisée par un banc d'accumulation se terminant par un abrupt à l'entrée du tributaire. Les faibles teneurs en minéraux lourds sur la pente de l'abrupt démontrent que le fluide est peu compétent à l'abri de la construction sédimentaire. Par contre, à son pied et à son sommet, le fluide effectue un tri hydraulique efficace, ce qui entraîne une concentration des particules lourdes. Ces variations des teneurs en minéraux lourds sont indicatrices du tri hydraulique plutôt que de la source sédimentaire.

TRAÇAGE MINÉRALOGIQUE DE L'ORIGINE DES SÉDIMENTS AUX CONFLUENTS DE COURS D'EAU

Diane CHAUMONT*, André G. ROY et François COURCHESNE, Département de géographie, Université de Montréal, C.P. 6128, Succursale Centre-Ville, Montréal, Québec H3C 3J7.

RÉSUMÉ *Traçage minéralogique de l'origine des sédiments aux confluents de cours d'eau.* La dynamique sédimentaire des confluents de cours d'eau peut s'étudier par l'intermédiaire de traceurs marquant l'origine des particules. La connaissance de la source sédimentaire est essentielle pour comprendre les processus de mélange des sédiments du lit et établir des relations causales entre les sources de contamination et la dynamique des sites contaminés liés à l'arrivée d'un tributaire. On a examiné les particules du lit d'un confluent naturel sablonneux où la minéralogie des sédiments composant les bassins-versants est différenciée. En raison de leurs forme et densité, les feldspaths K s'avèrent des traceurs efficaces et indiquent qu'à la jonction étudiée le mélange des apports sédimentaires est presque complété à une distance de mélange de 2,1 (distance à partir de l'apex/largeur du confluent). Par contre, les micas et le pourcentage de minéraux lourds, sensibles au tri hydraulique, ne révèlent pas la provenance des particules. La méthode a aussi été employée pour déterminer le patron de dispersion des particules à un confluent du Saint-Laurent. Ici la minéralogie des particules diffère peu entre les bassins-versants. Toutefois, les variations spatiales du pourcentage de minéraux lourds sont directement liées à la morphologie du lit caractérisée par un banc d'accumulation se terminant par un abrupt à l'entrée du tributaire. Les faibles teneurs en minéraux lourds sur la pente de l'abrupt démontrent que le fluide est peu compétent à l'abri de la construction sédimentaire. Par contre, à son pied et à son sommet, le fluide effectue un tri hydraulique efficace, ce qui entraîne une concentration des particules lourdes. Ces variations des teneurs en minéraux lourds sont indicatrices du tri hydraulique plutôt que de la source sédimentaire.

ABSTRACT *Mineralogical tracing of the origin of sediments at river channel confluences.* Sedimentary dynamics of river channel confluences may be studied through the use of natural tracers. The information supplied by tracers is of crucial interest to understand the mixing processes of bed material from the confluent channels and of potential zones of accumulation of contaminated sediments. We examined the bed material of a confluence where the mineralogy of the sediments of the tributary watershed differs from that of the main channel. The potential of two tracers (K feldspars and micas) and the heavy mineral concentrations is assessed. Due to its shape and density, K feldspars is the most efficient tracer to reveal the mixing between the sediment loads coming from the upstream channels. The spatial distribution of the tracer suggests a very rapid mixing of the loads: at a distance equivalent to 2.1 channel width, mixing is nearly completed. Micas and heavy mineral concentrations are less reliable indicators of the sedimentary dynamics. The technique was also applied at a confluence along the St. Lawrence River. In this case, clear mineralogical differences between the sediments of the watersheds are absent. The spatial pattern of heavy mineral concentrations is controlled by the main morphological feature of the confluence, that is, the avalanche face at the edge of a tributary mouth bar prograding within the St. Lawrence. Low heavy mineral concentrations are located on the avalanche face itself while higher concentrations are found at the foot and top of the face. This pattern reflects variations in sorting regime rather than origin of particles.

ZUSAMMENFASSUNG *Mineralogische Aufspürung der Herkunft der Sedimente am Zusammenfluss von Wasserläufen.* Die Sediment-Dynamik der Zusammenflüsse von Wasserläufen kann mit Hilfe von Aufspürern, welche die Herkunft der Teilchen markieren, studiert werden. Die Kenntnis der Sedimentquelle ist unerlässlich für das Verständnis der Mischprozesse der Flussbettsedimente und die Herstellung von kausalen Beziehungen zwischen den Quellen der Verunreinigung und der Dynamik der verunreinigten Plätze aufgrund eines tributären Zuflusses. Man hat die Teilchen des Bettes eines natürlichen sandigen Zusammenflusses untersucht, wo die Mineralogie der die Flussbecken bildenden Sedimente unterschiedlich ist. Wegen ihrer Form und Dichte erweisen sich die K-Feldspate als erfolgreiche Aufspürer und sie zeigen, dass am untersuchten Zusammenfluss die Mischung der Sedimentzufuhr in einer Mischungsentfernung von 2,1 (Entfernung vom Scheitel/ von der Breite des Zusammenflusses) fast vollständig ist. Dieselbe Methode wurde auch verwendet, um das Dispersionsmuster der Teilchen an einem Zusammenfluss des Sankt-Lorenz zu bestimmen. Hier unterscheidet sich die Mineralogie der Teilchen zwischen den Flussbecken wenig. Dennoch sind die räumlichen Abweichungen des Prozentsatzes schwerer Minerale direkt mit der Morphologie des Flusses verbunden, welche sich durch eine Aufschüttungsbank charakterisiert, die mit einem Abbruch am tributären Zufluss endet. Der geringe Anteil von schweren Mineralen am Gefälle des Abbruchs zeigt, dass die Flüssigkeit im Schutz des Sedimentbaus wenig Einfluss hat. Jedoch bewirkt die Flüssigkeit an seinem Fuss und seiner Spitze ein erfolgreiches hydraulisches Sortieren, was zu einer Konzentration der schweren Teilchen führt. Diese Abweichungen im Gehalt an schweren Mineralen spiegeln eher das hydraulische Sortieren als die Sedimentherkunft.

INTRODUCTION

La connaissance de l'origine des sédiments aux jonctions de cours d'eau constitue une information de grand intérêt pour comprendre et gérer le système fluvial. L'identification de l'origine des particules permet non seulement de caractériser la dynamique sédimentaire du confluent, mais aussi d'établir des relations entre les sources potentielles de contamination et la concentration des métaux lourds dans les sédiments. Dans le milieu fluvial, des zones de sédiments contaminés sont souvent associées aux apports des tributaires (Frenette *et al.*, 1989; Roy *et al.*, 1993).

À partir d'expériences en laboratoire sur la dynamique des confluents, Best (1987, 1988) a montré que le transport des sédiments en charge de fond se divise en bandes distinctes selon leur provenance. Best a réalisé ses expériences à la confluence de chenaux d'égale profondeur où un surcreusement bien défini et circonscrit d'abrupts nets s'est formé. Des cellules hélicoïdales se développent dans le surcreusement (Mosley, 1976; Best, 1988), ce qui entraîne la ségrégation des sédiments selon leur provenance. Or, en milieu naturel, on observe fréquemment une discordance entre les lits des affluents aux jonctions de cours d'eau (Kennedy, 1984). Best et Roy (1991) ont montré qu'à la faveur de la différence de profondeur entre des chenaux artificiels, une zone de séparation de l'écoulement se développe en aval du chenal moins profond et le fluide en provenance du chenal plus profond y est attiré. Ce transfert latéral de l'écoulement devrait accélérer le mélange des apports solides et liquides aux jonctions de cours d'eau. Cependant, bien qu'on ait observé un transfert latéral de l'écoulement en milieu naturel (De Serres, 1989; Biron *et al.*, 1993a), on en connaît encore peu les implications sur la dynamique sédimentaire, vu l'absence de connaissances quant à l'origine des particules rencontrées sur le lit du confluent. L'utilisation d'indicateurs de la provenance des particules est donc nécessaire pour améliorer notre connaissance de la dynamique des sédiments aux jonctions de cours d'eau.

Quelques études ont examiné la redistribution des sédiments aux confluents naturels en utilisant des graviers peints (Best, 1987, 1988; Roy et Bergeron, 1990). Cette technique se limite cependant à de petites échelles temporelle et spatiale et aux cours d'eau où les particules du lit sont grossières. Miller (1958) a estimé l'intensité du mélange à des jonctions de cours d'eau par la pétrographie des particules. L'échantillonnage effectué en un seul point au centre des confluents n'a pu révéler les variations spatiales. De plus, les résultats de Miller sur l'intensité du mélange sont discutables puisque la pétrographie des particules variait très peu entre les sources. Lodina et Chalov (1971) se sont intéressés aux variations temporelles de l'origine des sédiments à un confluent de grande taille en utilisant la méthode de l'assemblage des minéraux lourds. Les auteurs n'ont cependant pas considéré l'effet du tri hydraulique sur l'assemblage de ces minéraux, ce qui limite la fiabilité de la méthode. De plus, ils n'ont fourni aucun renseignement sur la distribution spatiale des minéraux traceurs. Seuls Reid *et al.* (1989) présentent les variations de la provenance des sédiments à une jonction de cours d'eau avec une densité spatiale d'échantillonnage

importante; cependant, l'étude portait sur deux affluents éphémères.

Ainsi, les connaissances limitées sur la distribution spatiale des apports sédimentaires aux confluents découlent en bonne partie de certaines lacunes au niveau des méthodes de traçage particulière : les graviers peints sont limités aux études à petites échelles temporelle et spatiale, alors que les méthodes basées sur les propriétés physico-chimiques des particules n'ont pas été éprouvées adéquatement. De plus, identifier l'origine de particules se complique lorsqu'il s'agit de confluents de grande taille où la minéralogie des sources diffère peu, puisque l'utilisation d'un traceur naturel est alors requise par la taille du cours d'eau, mais est compromise par l'absence de différenciation des sources sédimentaires. Les études sur le Saint-Laurent offrent un bon exemple des difficultés que présentent l'utilisation de traceurs pour de grands systèmes peu différenciés. Bien qu'on ait tenté d'utiliser le pourcentage de minéraux lourds comme traceur pour étudier la dynamique sédimentaire du fleuve (CENTREAU, 1973, 1974), ces tentatives ne se sont pas révélées probantes. Toutefois, Coakley et Poulton (1993) ont montré que la géochimie des particules de l'estuaire du Saint-Laurent est indicatrice de leur origine.

Cette recherche vise d'une part à éprouver une technique minéralogique indicatrice de la dynamique sédimentaire aux confluents de cours d'eau. Deux approches seront poursuivies en fonction des distinctions minéralogiques entre les apports sédimentaires. Lorsque la minéralogie diffère selon la source, l'ensemble de l'assemblage minéralogique permet d'identifier un traceur. Par contre, lorsque la minéralogie des apports sédimentaires diffère peu, le choix porte sur des minéraux lourds puisque leur assemblage varie davantage que l'assemblage minéralogique global. En second lieu, la méthode de traçage mise au point sert à comprendre la dynamique sédimentaire à deux confluents de cours d'eau.

LES SITES ÉTUDIÉS

Nous avons sélectionné deux sites localisés dans les basses terres du Saint-Laurent : la confluence des rivières Bayonne et Berthier et celle du Saint-Laurent et de la rivière Batiscan.

Les rivières Bayonne et Berthier, sont de même largeur (8 m) et se rencontrent à un angle d'environ 65° (fig.1). Le surcreusement du lit y est mal défini et le lit de la rivière Berthier se termine par un abrupt, ce qui entraîne une discordance entre les lits des deux affluents (fig. 2) (Biron *et al.*, 1993b). Des sables moyens forment la majeure partie de la matrice du lit des deux rivières ($D_{50}=0,35$ mm dans la Bayonne et 0,40 mm dans la Berthier). Il en est de même dans le confluent où on trouve surtout des sables de 0,30 à 0,50 mm. Comme le montre la figure 3, la texture et l'origine des dépôts de surface diffèrent beaucoup entre les deux bassins-versants. Dans la zone proximale de la rivière Bayonne, le matériel meuble est constitué d'un loam argileux d'origine lacustro-marine. Une mince couche de sables grossiers d'origine glaciaire ou deltaïque occupe aussi une superficie importante du bassin-versant. Par contre, près des rives de la rivière Berthier, on trouve des sables fluvio-marins et



FIGURE 1. Confluent Bayonne-Berthier.
The Bayonne-Berthier confluence.

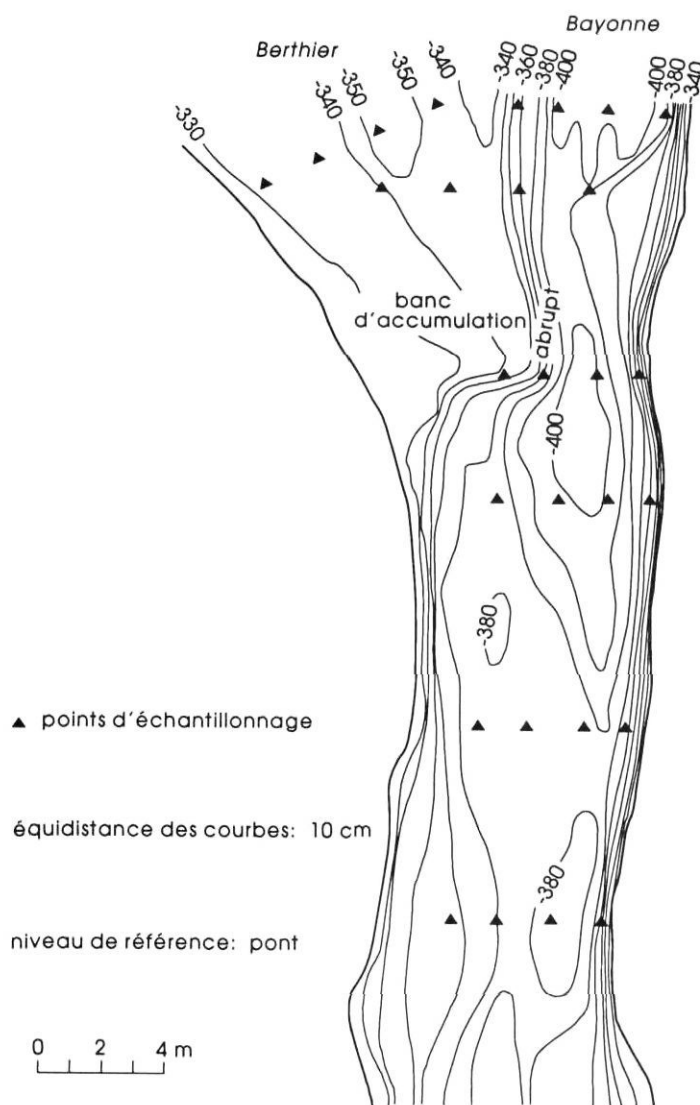


FIGURE 2. Carte bathymétrique du confluent Bayonne-Berthier d'après Biron *et al.* (1993b).

Bathymetric chart of the Bayonne-Berthier confluence after Biron *et al.* (1993b).

deltaïques de même qu'un loam sableux ou argileux. Des sables grossiers glaciaires ou deltaïques complètent la composition du matériel meuble du bassin-versant de la rivière Berthier.

Le confluent Saint-Laurent-Batiscan (fig. 4) est de plus grande taille : le tributaire, large de 200 m, se jette dans le cours d'eau principal d'une largeur de plus de 1 km. La morphologie du lit au confluent est dominée par un abrupt dont la pente s'accroît face à la rivière Batiscan (fig. 5) (Roy *et al.*, 1993). Le lit du Saint-Laurent est surtout composé de sables fins et moyens ($D_{50}=0,25$ mm) (Giguère, 1992). Dans la rivière Batiscan, des sables moyens et grossiers forment la matrice du lit ($D_{50}=0,55$ mm). En amont du confluent à l'étude, la majeure partie des apports sédimentaires dans le Saint-Laurent provient de la rivière Saint-Maurice (Frenette *et al.*, 1989). Tel qu'illustré à la figure 6, le matériel meuble des bassins-versants des rivières Saint-Maurice et Batiscan diffère peu : les deux rivières prennent leur source dans les matériaux précambriens des Laurentides et terminent leur cours dans les sables des basses terres du Saint-Laurent. Le long du parcours de la Batiscan, la moraine de Saint-Narcisse composée d'un till grossier en provenance des Laurentides marque la limite entre les basses terres du Saint-Laurent et les Laurentides. Près de l'embouchure de la rivière Batiscan, des sables de terrasses forment la trame des dépôts meubles. On observe aussi ces sables dans le bassin-versant de la rivière Saint-Maurice; par contre, la moraine de Saint-Narcisse y est moins présente, ayant été érodée ou recouverte par des dépôts deltaïques qui s'étendent jusqu'à l'embouchure de la rivière dans le Saint-Laurent.

Ainsi, au confluent Bayonne-Berthier, les dépôts de surface varient selon le bassin-versant. L'ensemble des particules fines a donc servi à dégager un traceur de l'origine des sédiments qui composent le lit du confluent. Puisque le site Bayonne-Berthier sert aussi à la validation de la méthode, le potentiel de traçage des minéraux lourds y a aussi été évalué. Par contre, au confluent Saint-Laurent-Batiscan, les distinctions minéralogiques des apports sédimentaires étant faibles, nous avons dû effectuer un échantillonnage conditionnel en isolant les minéraux lourds.

MÉTHODE

ÉCHANTILLONNAGE

À la confluence des rivières Bayonne et Berthier, l'échantillonnage s'est déroulé en octobre 1990 au cours de quatre événements hydrologiques couvrant des conditions hydrauliques variables (tabl. I). À chacun des événements, vingt échantillons des sédiments du lit (0 à 5 cm de profondeur) ont été prélevés le long de cinq transects situés en aval de la confluence (fig. 2). La cueillette s'est faite à partir d'un pont mobile monté sur rails. La structure surplombe ainsi l'ensemble du confluent de son apex jusqu'à 30 mètres vers l'aval et assure un positionnement précis tout en évitant de perturber le lit. Quatre échantillons récoltés à gué le long d'un transect dans chaque affluent ont servi à l'identification des minéraux traceurs de même qu'à la vérification de la méthode de traçage.

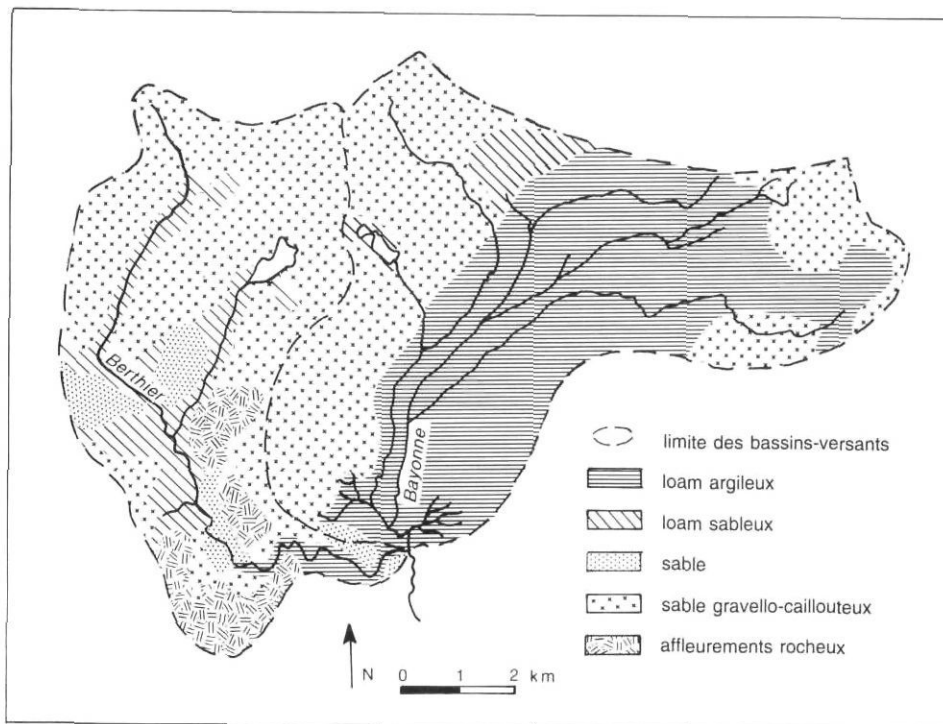


FIGURE 3. Texture du matériel meuble des bassins-versants des rivières Bayonne et Berthier d'après Godbout (1957) et Pageau (1961).

Texture of surficial materials in the Bayonne and Berthier river watersheds after Godbout (1957) and Pageau (1961).



FIGURE 4. Photo aérienne du confluent Saint-Laurent-Batiscan (n° Q90810-2, échelle 1/15 000, Ministère de l'Énergie et des Ressources, Gouvernement du Québec).

Aerial photograph of the Saint-Laurent-Batiscan confluence (scale 1:15 000).

Nous avons recueilli les sédiments du lit du confluent Saint-Laurent-Batiscan en juin 1991 au moment où l'étiage d'été commençait. Les relevés ont été effectués en bateau et un système de positionnement de type Motorola a permis de reporter les points d'échantillonnage sur une carte. Nous avons d'abord mesuré la bathymétrie du lit à l'aide d'un écho-sondeur afin de localiser les éléments morphologiques du confluent (Roy *et al.*, 1993). La morphologie du lit a ensuite déterminé le plan d'échantillonnage des sédiments (fig. 5). Ces derniers ont été récoltés le long de transects positionnés dans le but d'inclure les divers éléments morphologiques du confluent. Deux transects localisés en amont de la jonction ont servi à déterminer la nature des sédiments de chacun des

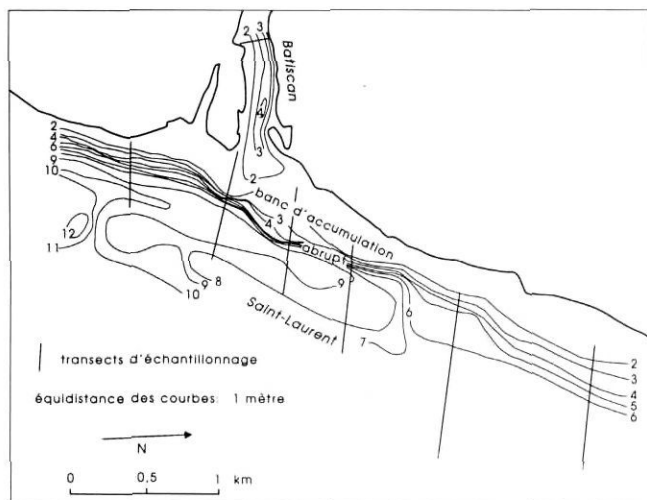


FIGURE 5. Carte bathymétrique du confluent Saint-Laurent-Batiscan d'après Roy *et al.* (1993).

Bathymetric chart of the Saint-Laurent-Batiscan confluence after Roy et al. (1993).

cours d'eau. Au total, 81 échantillons de la couche superficielle du lit (0 à 10 cm) ont été récoltés à l'aide d'une benne Ponar reliée à un treuil.

ANALYSE MINÉRALOGIQUE

Les échantillons recueillis aux deux sites ont été séchés au four à 60°C. L'analyse granulométrique des particules s'est faite par tamisage à sec. Pour les échantillons renfermant plus de 2 % de particules <63 µm, une analyse hydrométrique suivie d'un tamisage à sec a été faite sur les particules dispersées dans une solution d'hexamétophosphate de sodium (5 g l⁻¹).

La minéralogie des particules <63 µm des rivières Bayonne et Berthier a ensuite été établie par diffraction des rayons X selon la méthode décrite par Courchesne et Savoie (1991). En bref, les grains sont d'abord séparés en trois fractions granulométriques : argile (<2 µm), limon fin (2 à 20 µm), limon grossier (20 à 63 µm). Chaque fraction est ensuite traitée au Tiron pour détruire les oxydes de fer pouvant enrober les grains individuels et nuisant ainsi à la diffractométrie. Par la suite, le complexe d'échange des minéraux argileux est saturé au K et au Mg. Les particules montées sur des lames de microscope par sédimentation dans une bulle d'eau sont ensuite soumises à la diffraction des rayons X et l'intensité des pics est enregistrée sur une table traçante. La lame saturée au K est ensuite chauffée à 300°C puis à 550°C, alors que la lame Mg est saturée à l'éthylène glycol (EG). Une diffraction des rayons X est effectuée après chaque traitement. L'assemblage minéralogique de chacun des échantillons est donc déterminé à partir de cinq diffractogrammes (K-25°C, K-300°C, K-550°C, Mg et Mg-EG). L'identification des minéraux est basée sur les compilations de Brown et Brindley (1980). L'abondance relative des minéraux est estimée à partir de l'aire sous la courbe des pics de diffraction.

FIGURE 6. Texture du matériel meuble des bassins-versants des rivières Saint-Maurice et Batiscan d'après Gadd (1971).

Texture of surficial materials in the Saint-Maurice and Batiscan river watersheds after Gadd (1971).

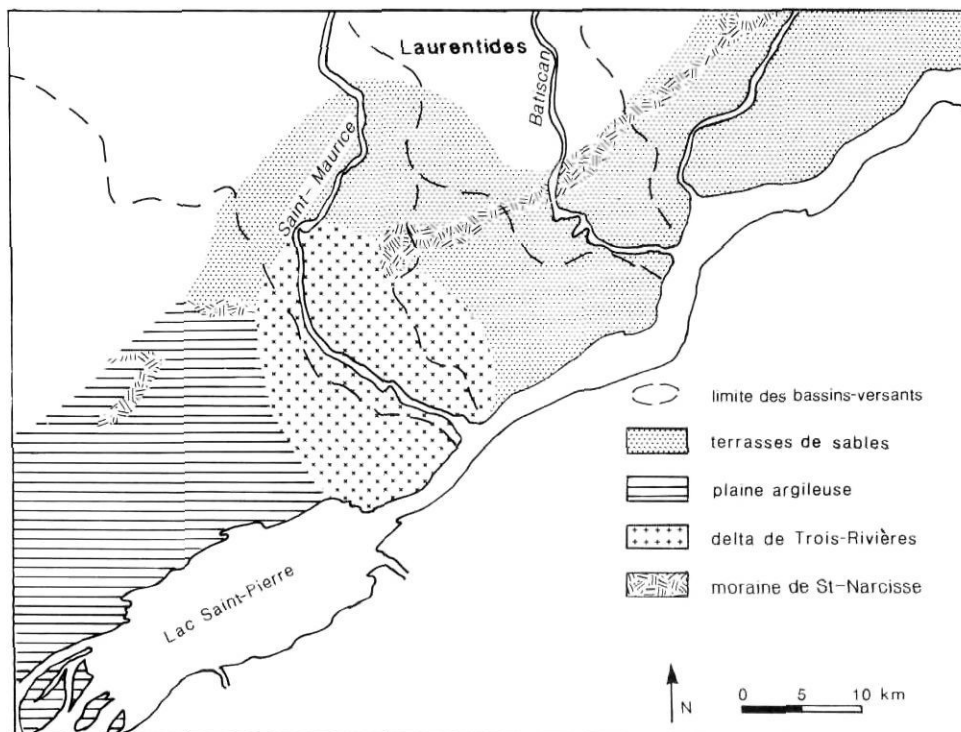


TABLEAU I

Conditions hydrauliques au confluent Bayonne-Berthier durant les journées d'échantillonnage

date	vitesse moyenne (cm/s)	Qr	Transport de sédiments
5 octobre	1 : 22 2 : 26	0,71	1 : non 2 : oui
12 octobre	1 : 48 2 : 22	0,38	1 : oui 2 : oui
13 octobre	1 : 36 2 : 28	0,67	1 : oui 2 : oui
16 octobre	1 : 22* 2 : 26*	0,70*	1 : non 2 : oui

1 : Bayonne; 2 : Berthier

Qr : rapport de débits (Q_2/Q_1)

* : valeurs estimées

L'assemblage des minéraux lourds a été déterminé pour les deux sites. Cette analyse a été réalisée sur les sables très fins (63 à 125 μm), les sables fins (125 à 250 μm) et les sables moyens (250 à 500 μm). La séparation densimétrique se fait par centrifugation dans du polytungstate de sodium (Torressan, 1987) dont la masse volumique a été fixée à 2,80 g/cm³. Les particules lourdes et légères sont ensuite séchées et pesées pour établir le pourcentage massique de minéraux lourds. Par la suite, les particules lourdes sont traitées au Tiron, broyées à l'aide d'un mortier en agathe et montées sur des lames pour identification par diffraction des rayons X. Les compilations de Brown et Brindley (1980) et de Milnes et Fitzpatrick (1989) ont servi à l'identification des minéraux lourds. Puisque les processus fluviaux concentrent les minéraux lourds, leurs teneurs ont été standardisées dans le but d'éliminer l'effet du tri hydraulique afin de s'assurer que les teneurs reflètent uniquement la provenance des particules plutôt que le milieu sédimentaire. Une méthode de standardisation fondée sur le concept d'équivalence hydraulique a été employée. Comme le propose Rittenhouse (1943), on rapporte les teneurs en minéraux lourds sur l'ensemble des particules ayant le même comportement hydraulique. Cet ensemble est déterminé à partir de la taille et de la densité des grains.

VÉRIFICATION DE LA MÉTHODE

Une fois les traceurs des rivières Bayonne et Berthier identifiés, nous avons mélangé les sédiments des deux provenances dans des proportions connues. Ces mélanges permettent de mesurer l'abondance des traceurs en fonction de la proportion de sédiments de chaque affluent. Puisque l'assemblage minéralogique variait très peu à l'intérieur des rivières Bayonne et Berthier, les quatre échantillons prélevés dans chaque cours d'eau ont été regroupés. Les mélanges ont été préparés à partir des deux échantillons obtenus et ont subi l'ensemble des traitements préliminaires à l'étude minéralogique. Onze rapports Bayonne/Berthier s'échelonnant de 100/0 à 0/100 par intervalle de 10 ont été testés. Des répliques des mélanges préparées à partir des échantillons

bruts ont permis de vérifier la fiabilité des méthodes. Pour chaque traceur, 32 répliques ont été réalisées (4 répliques des rapports 0/100, 10/90, 50/50, 90/10 et 100/0 et 2 répliques pour les autres rapports).

La teneur mesurée a ensuite été comparée à la teneur prévue par un modèle de mélange linéaire. Ce modèle s'applique aussi bien à un minéral traceur qu'aux proportions de minéraux lourds. Connaissant l'abondance des traceurs dans chaque affluent et le pourcentage de particules dans la classe granulométrique où se trouve le traceur, nous pouvons estimer la teneur du traceur dans le mélange en fonction de la proportion de particules de chaque affluent :

$$y = \frac{x m_1 f_1 + (1 - x) m_2 f_2}{x f_1 + (1 - x) f_2} \quad (1)$$

où les indices 1 et 2 identifient le cours d'eau principal et le tributaire respectivement. La teneur du minéral traceur dans chaque affluent (m) et le pourcentage de particules dans la fraction granulométrique où se trouve le traceur (f) sont constants pour un traceur donné et permettent de prévoir la teneur du minéral traceur dans les mélanges (y) en fonction de la proportion de particules du cours d'eau principal (x). Afin d'améliorer la précision du modèle, les constantes ont été estimées à partir d'une moyenne entre des répliques prélevées dans l'échantillon de chaque affluent. Le pourcentage de particules dans la fraction où se trouve le traceur (f) a été estimé à partir de deux répliques alors que quatre répliques ont été réalisées pour estimer la teneur du traceur dans chaque affluent (m).

RÉSULTATS ET DISCUSSION

CONFLUENT BAYONNE-BERTHIER

a) Identification des traceurs

Les traceurs minéralogiques dans les particules fines des rivières Bayonne et Berthier ont été identifiés en comparant l'aire sous la courbe des pics de diffraction des minéraux dans chaque fraction granulométrique. Comme le montre le tableau II, les différences minéralogiques les plus marquées se situent dans les limons grossiers (20 à 63 μm). Dans cette fraction granulométrique, les feldspaths potassiques sont plus abondants dans les sédiments de la rivière Berthier, alors que les micas de 20 à 63 μm sont présents uniquement dans ceux de la rivière Bayonne. Ces deux minéraux ont donc été retenus comme indicateurs potentiels de l'origine des sédiments dans le confluent.

Le pourcentage de minéraux lourds varie aussi selon le cours d'eau pour certaines fractions granulométriques (tabl. III). Par contre, l'analyse par diffraction des rayons X de ces minéraux a montré que les espèces minérales lourdes sont les mêmes dans les deux affluents (tabl. IV). Ainsi, en ce qui concerne les minéraux lourds, seul le pourcentage massique dans les sables très fins (63 à 125 μm) a été retenu comme traceur potentiel.

b) Vérification de la méthode

Une fois les traceurs du confluent Bayonne-Berthier connus, il importe d'estimer la fiabilité des méthodes utilisées. La

TABLEAU II

Aire sous la courbe des pics de diffraction (cm²) des minéraux dans les particules fines du lit des rivières Bayonne et Berthier

Minéral	Bayonne			Berthier		
	<2 µm	2-20 µm	20-63 µm	<2 µm	2-20 µm	20-63 µm
quartz (0,334 nm)	2,4	5,0	4,3	3,3	5,7	6,3
feldspaths						
Na,Ca (0,321 nm)	2,0	3,3	3,5	2,8	3,6	6,1
feldspaths K (0,325 nm)	1,2	1,8	1,9*	1,6	1,7	6,9*
amphiboles (0,85 nm)	0,4	1,0	0,7	0,5	0,5	1,3
micas (1,0 nm)	0,8	1,6*	0,5*	0,4	0,3*	0*
vermiculite (1,4 nm)	0,6	0,6	0	0,6	0,3	0

Les * identifient les différences majeures. Le quartz, les feldspaths Na,Ca et K et les amphiboles sont quantifiés par les diffractogrammes des lames saturées au K à 25°C; les micas et la vermiculite sont quantifiés par ceux des lames saturées au Mg.

TABLEAU III

Pourcentages bruts de minéraux lourds dans les sables des rivières Bayonne et Berthier

	63 à 125 µm	125 à 250 µm	250 à 500 µm
Bayonne	8,8 %	8,3 %	5,1 %
Berthier	40,4 %	22,1 %	9,6 %

validation repose sur deux points : 1) lorsque les particules des affluents sont mélangées, la teneur des traceurs se compare-t-elle à la teneur prévue par le modèle de mélange ? et 2) les méthodes de quantification sont-elles précises ? Pour répondre à ces questions, les particules des rivières Bayonne et Berthier ont été mélangées dans des proportions connues. Les limons grossiers et les sables très fins ont ensuite été extraits des mélanges afin de mesurer la teneur des traceurs retenus au préalable. Les teneurs observées sont ensuite comparées aux teneurs prévues par le modèle de mélange (équation 1).

La figure 7 présente la relation entre les teneurs prévues par le modèle théorique et les teneurs observées dans les mélanges pour chaque traceur. Les intervalles de confiance des coefficients de l'axe majeur réduit (tabl. V) montrent que pour les trois traceurs, la pente de la relation ne diffère pas significativement de 1 et l'ordonnée à l'origine de 0 ($\alpha = 0,05$). Les teneurs mesurées sont donc semblables aux teneurs prévues par le modèle de mélange et l'abondance des traceurs varie avec le pourcentage de particules provenant de chaque affluent. Par contre, l'abondance des feldspaths K (fig. 7a) et des micas (fig. 7b) diffère parfois considérablement entre les répliques. Les coefficients de variation calculés entre les quatre répliques de chaque rapport varient de 13 à 200 % pour les micas et de 19 à 73 % pour les feldspaths K. La difficulté à reproduire les résultats avec précision est peut-être liée à la taille des particules (20 à 63 µm). En effet, la précision de la quantification des minéraux par diffraction des rayons X diminue avec l'augmentation de la taille moyenne des particules (Alexander *et al.*, 1948). Pour éviter ce problème, on peut broyer les particules quoique l'on risque

alors de modifier la structure de certains minéraux. Cette possibilité a donc été rejetée. De plus, dans le cas des micas, on note que l'aire sous la courbe des pics de diffraction est petite à cause de leur rareté dans les limons grossiers des deux affluents. Une faible ampleur des pics de diffraction des minéraux entraîne une plus grande marge d'erreur lors de la quantification (Brindley, 1980). Par contre, la méthode de quantification des minéraux lourds est précise, comme le montre la faible variabilité entre les répliques (fig. 7c) (les coefficients de variation varient de 3 à 14 %).

La vérification concernant les minéraux lourds repose aussi sur l'importance de réduire l'effet du tri hydraulique en standardisant le pourcentage de minéraux lourds sur le pourcentage de particules ayant le même comportement hydraulique. En théorie, lorsque le mélange des apports sédimentaires est complété, le pourcentage de minéraux lourds à l'intérieur d'un affluent varie peu lorsque l'effet du tri hydraulique est éliminé. L'efficacité de la méthode de standardisation peut donc être vérifiée en comparant la variation du pourcentage brut de minéraux lourds à la variation du pourcentage standardisé à l'intérieur des affluents. Dans la rivière Bayonne, le coefficient de variation des teneurs brutes est de 19,2 %; il diminue à 6,0 % par suite de la standardisation ($n=4$). Dans la rivière Berthier, le coefficient passe de 22,1 % à 12,7 % ($n=4$) une fois les teneurs standardisées. Ainsi, la méthode de standardisation réduit l'effet du tri hydraulique.

c) Suivi des traceurs dans le confluent

Bien que l'abondance des traceurs dans le confluent varie entre les quatre événements étudiés, les observations montrent une constance dans le comportement des traceurs dans le confluent. La teneur des traceurs durant deux événements (13 et 16 octobre 1990) représentatifs de conditions hydrauliques différentes (tabl. I) est présentée à la figure 8. L'axe des distances fait référence à des distances sans dimension (distance/largeur moyenne du confluent) à partir de l'apex du confluent.

Dans trois des quatre cas étudiés, les variations spatiales de l'abondance des feldspaths K montrent le même patron. Jusqu'à la distance 1,25, les feldspaths K sont plus abondants près de la rive du côté de la rivière Berthier et leurs

TABLEAU IV

Aire sous la courbe des pics de diffraction (cm^2) des minéraux lourds ($\rho > 2,8$) dans les sables des rivières Bayonne et Berthier

	Bayonne			Berthier		
	63-125 μm	125-250 μm	250-500 μm	63-125 μm	125-250 μm	250-500 μm
amphiboles (0,85 nm)	1,8	2,3	1,9	1,3	1,4	1,4
pyroxènes (0,26 nm)	0,5	1,4	1,4	0,6	1,8	1,7
sillimanite (0,341 nm)	0,6	0,7	0,9	0,1	0,4	0,8
apatites (0,281 nm)	0,4	0,4	0,4	0,3	0,2	0,4
serpentes (0,237 nm)	0,2	0,3	0,4	0	0	0
magnétite (0,148 nm)	0,4	0,5	0,3	0,5	0,5	0,4
spinelles (0,144 nm)	0,5	0,6	0,4	0	0	0,7
ilménite (0,187 nm)	0,2	0,4	0,3	0,5	0,4	0,3
corindon (0,601 nm)	0,5	0,8	0,4	0	0,5	0,5

TABLEAU V

Coefficients de la relation entre les teneurs mesurées et les teneurs prévues

	feldspaths K	micas	% lourds
pente de l'axe majeur réduit	1,21	1,22	0,97
intervalles de confiance ($\alpha=0,05$)	de 0,83 à 1,78	de 0,71 à 2,10	de 0,91 à 1,03
ordonnée à l'origine	-0,65	-0,1	1,17
intervalles de confiance ($\alpha=0,05$)	de -2,59 à 0,66	de -0,40 à 0,02	de -0,57 à 2,81

teneurs diminuent progressivement vers la rive opposée (fig. 8a et b). Le gradient transversal des teneurs en feldspaths K diminue à la distance 2,1 et le traceur tend à se répartir uniformément.

Les variations spatiales des teneurs en feldspaths K concordent avec celles des micas, le 16 octobre (fig. 8b). Les micas se concentrent près de la rive du côté de la rivière Bayonne jusqu'au transect 1,25, alors que vers l'aval, les teneurs s'uniformisent transversalement. Par contre, dans les autres cas étudiés, les teneurs en micas montrent des variations moins régulières. Le 13 octobre, le minéral est virtuellement absent de certains transects (fig. 8a). Pourtant, durant cet événement, il y avait transport par charge de fond sur les deux affluents (tabl. I) ; la rivière Bayonne devait donc alimenter le confluent en micas.

Les variations spatiales du pourcentage standardisé de minéraux lourds montrent peu de concordance avec les autres traceurs. En effet, pour trois des quatre événements, les pourcentages standardisés de minéraux lourds sont plus bas au centre du confluent qu'à proximité de la rive du côté de la rivière Bayonne (fig. 8a et b). Pourtant, les minéraux lourds sont plus rares dans cette dernière. Dans d'autres cas, les pourcentages standardisés de minéraux lourds fluctuent de façon apparemment incohérentes le long de tous les transects (fig. 8a).

d) Discussion

En comparant les trois traceurs, il semble que les feldspaths K soient les plus révélateurs. Les feldspaths K montrent un gradient transversal marqué des teneurs à proxi-

mité des tributaires, gradient qui s'amenuise graduellement vers l'aval. Ces tectosilicates ont une structure similaire à celle du quartz, le minéral le plus abondant du site, et leur masse volumique avoisine $2,6 \text{ g/cm}^3$, alors que celle du quartz est de $2,65 \text{ g/cm}^3$. Nous posons en postulat que les grains de feldspaths K se comportent comme la majorité des particules apparaissant ainsi comme d'excellents indicateurs de la distribution des particules, à ce confluent. Les teneurs en feldspaths K mesurées dans la couche superficielle du lit du confluent indiquent qu'à une distance de mélange de 2,1 les particules introduites par les deux affluents sont presque uniformément distribuées le long du transect. Cette distance de mélange apparaît plus courte que celle déterminée par Best (1988) à partir d'expériences en laboratoire. Selon le modèle de Best, la ségrégation en bandes des sédiments demeure importante à une distance non dimensionnelle de 2,7 pour un angle de jonction de 70° . Ces écarts entre la distance de mélange au confluent Bayonne-Berthier et ceux tirés des expériences en laboratoire sont peut-être reliés aux conditions d'expérimentation : le débit était contrôlé et régulier durant l'expérimentation de Best alors que les particules recueillies sur le lit du confluent Bayonne-Berthier ont été déposées durant une série d'événements hydrologiques variés. Comme l'ont montré Biron *et al.* (1993b), le banc d'accumulation construit à l'embouchure de la rivière Berthier progresse dans le confluent lorsque le rapport de débits est élevé, puis est érodé par les eaux de la rivière Bayonne lorsque le rapport de débits diminue. Cette séquence d'accumulation des sédiments du tributaire et de remise en transport par les eaux du chenal principal entraîne une accélération du mélange des apports sédimentaires. De plus, Best a

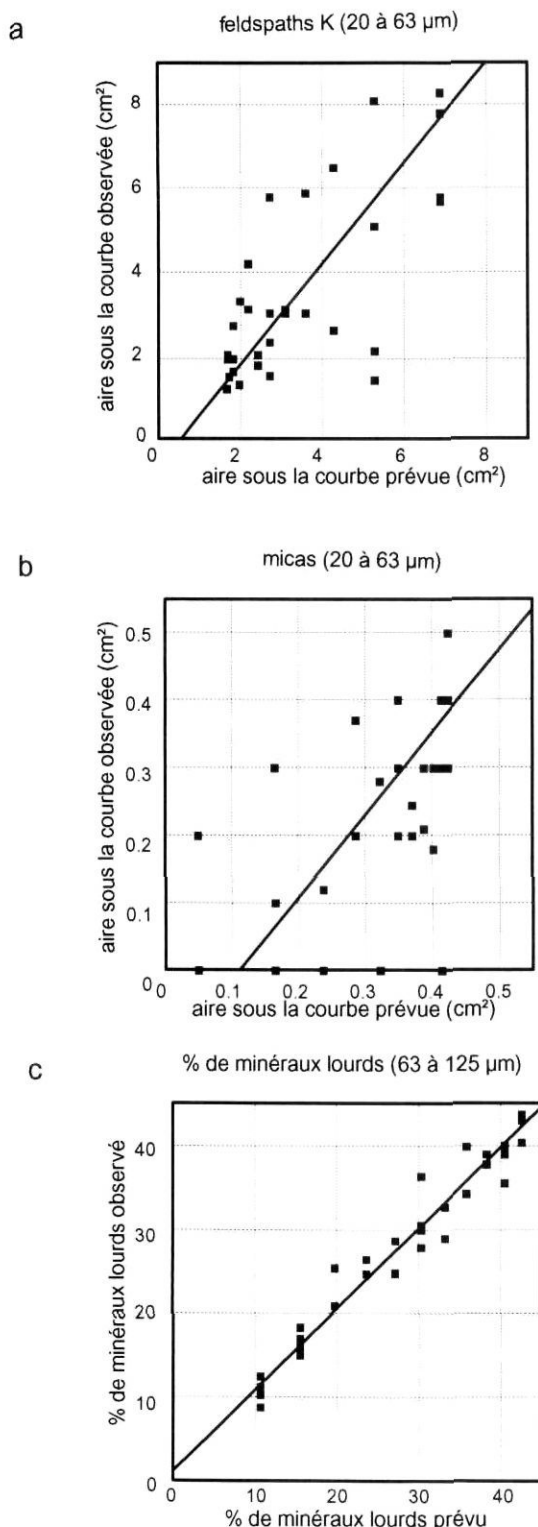


FIGURE 7. Relation entre les teneurs prévues par l'équation de mélange et les teneurs observées dans les mélanges pour : a) les feldspaths K dans les limons grossiers; b) les micas dans les limons grossiers; c) le pourcentage brut de minéraux lourds dans les sables très fins.

Relationship between predicted and observed tracer contents in mixture for: a) the K feldspars in the coarse silt fraction; b) the micas in the coarse silt fraction; c) the raw percentages of heavy minerals in the very fine sand fraction.

employé des sables comme traceurs, alors que des limons grossiers ont servi d'indicateurs au confluent Bayonne-Berthier. Il est possible que ces derniers soient occasionnellement transportés en suspension lors des crues, ce qui peut en accélérer le mélange.

La dispersion des sédiments obtenue avec les micas est plus erratique. Pour un seul des quatre événements (16 octobre), les micas révèlent une dispersion semblable à celle des feldspaths K. Le principal problème provient probablement de la faible abondance de ces minéraux dans les limons grossiers des deux affluents. Leur pic de diffraction est donc faible et leur quantification entraîne une plus grande marge d'erreur. D'ailleurs, ce problème ressort aussi des résultats sur les mélanges préparés en laboratoire (fig. 7b). Nous avons en effet observé une grande variation des teneurs en micas entre les répliques d'un même rapport de particules Bayonne-Berthier. De plus, à cause de leur structure en feuillets, les micas sont plus faciles à transporter en suspension que la majorité des minéraux et peuvent ainsi subir une dispersion accrue comparativement aux autres particules du lit. Ainsi, lors de fortes crues, les micas peuvent être mis en suspension et disparaître presque complètement des sédiments de surface.

Les minéraux lourds sont de pauvres indicateurs de l'origine des particules, ce qui reflète probablement la difficulté de standardiser leurs teneurs pour éliminer l'effet du tri hydraulique. Lors de la standardisation, nous supposons que la couche de particules récoltées est triée uniformément. Cependant, il est évident que le tri se réalise au cours de plusieurs événements hydrologiques. Si la dynamique de l'écoulement varie considérablement dans le temps, le tri hydraulique varie aussi et modifie la taille des particules déposées, de même que la teneur en minéraux lourds. La standardisation du pourcentage de minéraux lourds dans des échantillons de sédiments ayant été remaniés au cours d'une série d'événements hydrologiques devient donc inadéquate. Biron *et al.* (1993b) se sont intéressés aux variations temporelles et spatiales du diamètre des grains au confluent Bayonne-Berthier. Les variations temporelles les plus élevées (>50 %) se situent près de la rive du côté de la Bayonne, entre les distances sans dimension 0,6 et 1,6. Cette zone couvre des points d'échantillonnage où les pourcentages standardisés de minéraux lourds semblent incohérents (fig. 8a). Ainsi, bien que la standardisation soit adéquate dans les affluents, elle devient incorrecte dans le confluent à cause des importantes variations temporelles de la taille des particules.

CONFLUENT SAINT-LAURENT-BATISCAN

Au confluent Saint-Laurent-Batiscan, l'assemblage des minéraux lourds diffère très peu selon la source (tabl. VI). Puisque les observations au confluent Bayonne-Berthier nous ont montré que le pourcentage standardisé de minéraux lourds ne reflète pas bien l'origine des particules, il est impossible d'identifier un traceur minéralogique de l'origine des sédiments dans le milieu peu différencié qu'est le confluent Saint-Laurent-Batiscan.

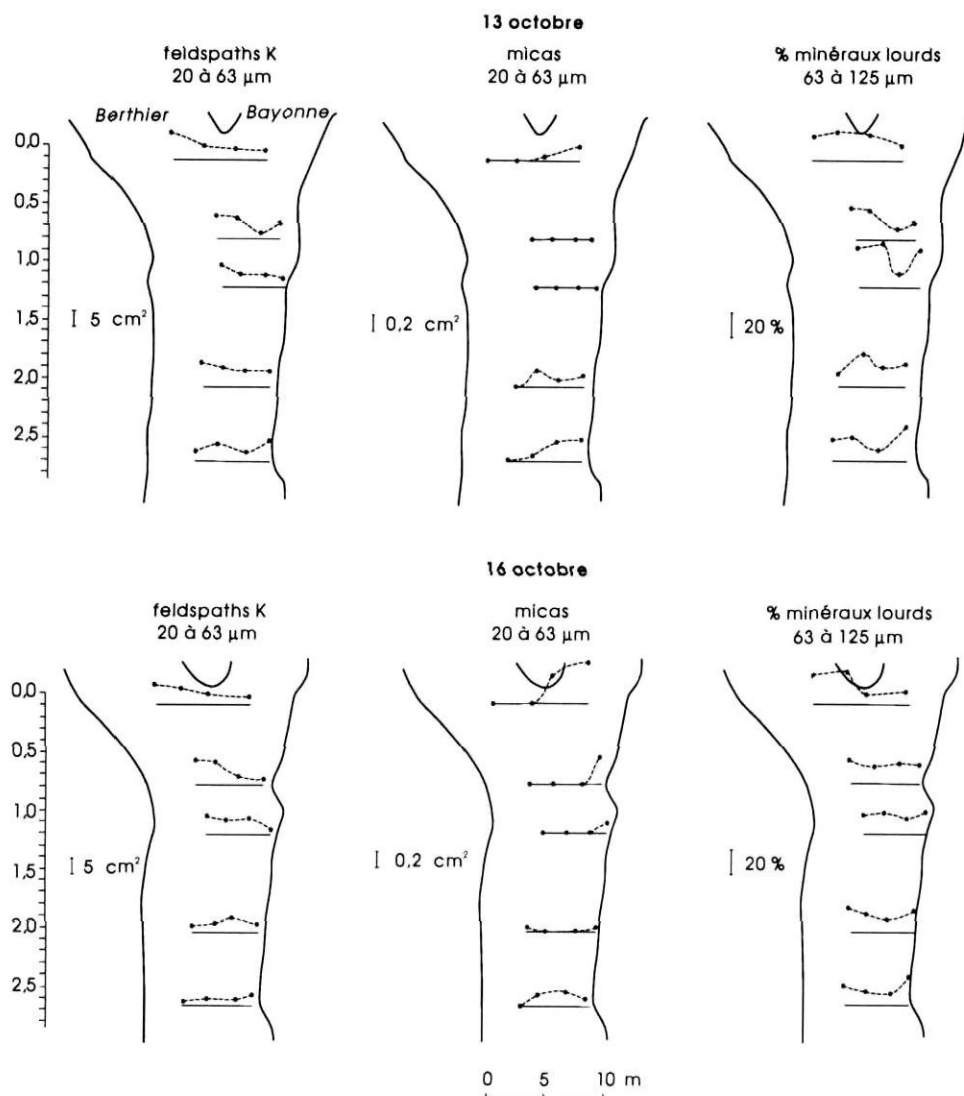


FIGURE 8. Suivi des traceurs au confluent Bayonne-Berthier pour les événements du a) 13 octobre 1990 et b) 16 octobre 1990. Les micas et les feldspaths K sont quantifiés par l'aire sous la courbe de leur pic de diffraction et les pourcentages de minéraux lourds sont standardisés. L'axe gradué présente la distance de mélange (distance à partir de l'apex/largeur du confluent).

Tracer contents at the Bayonne-Berthier confluence for the a) October 13th and b) October 16th, 1990 events. Micas and K feldspars are quantified using their peak area and heavy minerals percentages are standardized. The graduated axis refers to the dimensionless mixing distance (distance from the apex/width of the confluence).

TABEAU VI

Aire sous la courbe des pics de diffraction (cm^2) des minéraux lourds ($\rho > 2,8$) dans les sables du Saint-Laurent et de la Batiscan

Minéral	St-Laurent			Batiscan		
	63-125 μm	125-250 μm	250-500 μm	63-125 μm	125-250 μm	250-500 μm
amphiboles (0,85 nm)	2,0	1,5	3,0	3,2	3,0	2,8
pyroxènes (0,26 nm)	1,4	2,0	1,0	1,1	1,4	0,8
sillimanite (0,341 nm)	0,4	0,4	0	0,3	0,5	0
apatites (0,281 nm)	0,5	0,4	1,0	0,8	0,6	0,5
serpentes (0,237 nm)	0,6	0,3	0,3	0,4	0,5	0,7
magnétite (0,148 nm)	0	0,4	0,5	0	0	0,4
spinelles (0,144 nm)	0,6	0,6	0,5	0,8	0,7	0,6
ilménite (0,187 nm)	0,5	0,4	0,3	0	0,3	0
corindon (0,601 nm)	0,2	0	0,4	0,4	0,3	0,2

Toutefois, les variations spatiales du pourcentage brut de minéraux lourds nous renseignent sur la dynamique sédimentaire du confluent Saint-Laurent-Batiscan. Les informations découlent du tri hydraulique qui influence l'abondance des minéraux lourds. Le tri doit être vu sous deux angles : 1) à cause d'un manque de compétence du fluide les particules les plus lourdes s'accumulent sur le lit, alors que les plus légères demeurent en transport et 2) par suite d'une augmentation de la compétence du fluide, les sédiments du lit sont remaniés, les grains de faible densité sont alors remis en transport, alors que les plus lourds se concentrent dans le dépôt. Une augmentation du pourcentage de minéraux lourds dans la couche superficielle peut résulter de ces situations.

Au confluent Saint-Laurent-Batiscan, il est clair que l'entrée du tributaire dans le fleuve a un effet sur le tri hydraulique, puisque la distribution des minéraux lourds dans les sables très fins change à la jonction des deux cours d'eau (fig. 9). Dans le Saint-Laurent, en amont de la jonction (traverse n° 1), de faibles pourcentages de minéraux lourds sont observés près de la rive. Les teneurs augmentent sur l'abrupt et deviennent maximales à son pied. Dans le confluent (traverses n°s 2, 3 et 4) alors que l'abrupt s'accroît, la répartition des pourcentages en minéraux lourds est modifiée : les minéraux lourds sont rares sur la pente de l'abrupt et sont plus abondants de part et d'autre de la dénivelée. Vers l'aval, alors que la dénivelée s'adoucit (traverses n°s 5 et 6), la distribution des minéraux lourds redevient semblable à celle en amont de la jonction.

Les changements dans la distribution des minéraux lourds sont donc directement liés à la morphologie du lit. Les faibles pourcentages de minéraux lourds observés sur la pente de l'abrupt à l'entrée du tributaire montrent que les particules y sont peu triées. Ainsi, il y a perte de compétence du fluide à l'abri de la dénivelée et les particules y sont déposées. Il est aussi possible qu'une zone de séparation de l'écoulement se développe à la marge de la dénivelée dans le plan de mélange des fluides (Roy *et al.*, 1993). Il en découle un environnement sédimentaire particulier où les particules sont peu remaniées. Par contre, au pied de l'abrupt, les grains soumis aux fortes vitesses du fleuve subissent un tri hydraulique important, ce qui entraîne une concentration des minéraux lourds. Vers l'aval du confluent dès l'adoucissement de l'abrupt, l'impact du tributaire est atténué et la distribution des minéraux lourds redevient semblable à celle en amont de la jonction.

CONCLUSION

La méthodologie employée pour évaluer le potentiel de la minéralogie comme indicatrice de l'origine des sédiments aux confluents a permis de mieux comprendre la dynamique sédimentaire aux jonctions de cours d'eau. Pour qu'un minéral reflète l'origine des particules, il faut que ses propriétés physiques soient le plus semblable possible à celles de l'ensemble des particules du lit. Ainsi, dans notre étude, les feldspaths K sont plus efficaces puisqu'ils possèdent une structure et une densité semblables à celles des minéraux qui dominent le complexe minéralogique des particules du lit. Ce traceur a montré que le mélange des particules en prove-

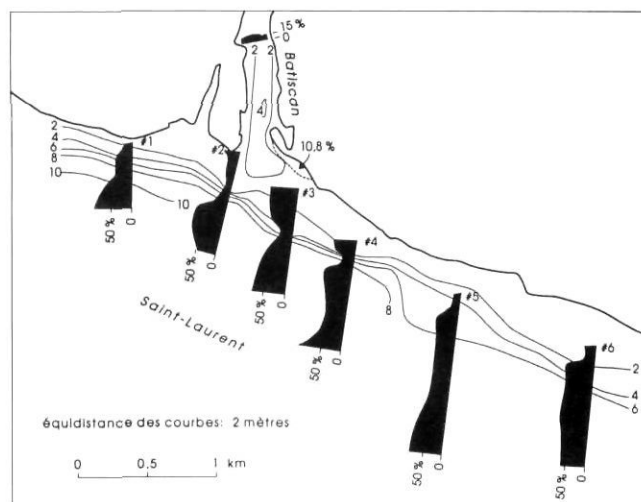


FIGURE 9. Pourcentage brut de minéraux lourds dans les sables très fins (63 à 125 μm) au confluent Saint-Laurent-Batiscan.

Heavy minerals raw percentage in the very fine sands (63 to 125 μm) of the Saint-Laurent-Batiscan confluence.

nance des rivières Bayonne et Berthier se fait sur une courte distance en aval du point de confluence. Par contre, il semble que les micas reflètent mal la provenance des sédiments à cause de leur structure en feuillets qui les rend sensibles au tri hydraulique. Les teneurs en minéraux lourds sont aussi de pauvres indicateurs de l'origine des particules puisqu'il est difficile d'éliminer l'effet du tri hydraulique en raison des importantes variations temporelles de la dynamique de l'écoulement aux jonctions de cours d'eau. Toutefois, en l'absence de distinctions minéralogiques entre les sources, les variations spatiales des teneurs en minéraux lourds peuvent révéler certains aspects de la dynamique sédimentaire. Ainsi, au confluent Saint-Laurent-Batiscan, les variations spatiales des teneurs en minéraux lourds dans les sédiments sont étroitement liées à la morphologie du lit. Les faibles teneurs en minéraux lourds sur la pente du banc d'accumulation indiquent que le fluide est peu compétent à l'abri de l'abrupt. La mise au point de techniques de traçage de l'origine des particules pour les confluents de grande taille où la minéralogie des sédiments est peu différenciée s'avère difficile. Une recherche sur le potentiel de techniques reposant sur les terres rares, par exemple, serait opportune afin de mieux comprendre les processus de la dispersion des contaminants dans ces milieux.

REMERCIEMENTS

Nous remercions Pascale Biron et Sylvain Savoie pour leur aide sur le terrain ou en laboratoire. Les commentaires constructifs de MM. John Coakley, Michael Church, Michel Lapointe et Gérard Middleton ont aussi été appréciés. Nous tenons également à remercier le CRSNG pour son appui financier et le Centre Saint-Laurent pour son aide technique.

RÉFÉRENCES

- Alexander, L., Klug, H.P. et Kummer, E., 1948. Statistical factors affecting the intensity of X-ray diffraction by crystalline powders. *Journal of Applied Physics*, 19 : 742-753.

- Best, J.L., 1987. Flow dynamics at river channel confluences : Implications for sediment transport and bed morphology. In F.G. Etheridge, R.M. Flores et M.D. Harvey, édit., Recent developments in fluvial sedimentology. Society of Economic Paleontologists and Mineralogists Publication, 39 : 27-35.
- 1988. Sediment transport and bed morphology at river channel confluences. *Sedimentology*, 35 : 481-498.
- Best, J.L. et Roy, A.G., 1991. Mixing layer distortion at the confluence of unequal depth channels. *Nature*, 350 : 6317 : 411-413.
- Biron, P., De Serres, B., Roy, A.G. et Best, J.L., 1993a. Shear layer turbulence at an unequal-depth channel confluence. In N.J. Clifford, J.R. French, et J. Hardisty, édit., *Turbulence : Perspectives on Flow and Sediment Transport*. Wiley & Sons Ltd, Chichester, p. 197-213.
- Biron, P., Roy, A.G., Best, J.L. et Boyer, C.J., 1993b. Bed morphology and sedimentology at the confluence of unequal depth channels. *Geomorphology*, 8 : 115-129.
- Brindley, G.W., 1980. Quantitative X-ray Mineral Analysis of Clays, p. 411-438. In G.W. Brindley et G. Brown, édit., *Crystal Structures of Clay Minerals and Their X-Ray Identification*. 2^e éd. Mineralogical Society, London, 495 p.
- Brown, G. et Brindley, G.W., 1980. X-Ray Diffraction Procedures for Clay Mineral Identification, p.305-360. In G.W. Brindley et G. Brown, édit., *Crystal Structures of Clay Minerals and Their X-Ray Identification*. 2^e éd. Mineralogical Society, London, 495 p.
- CENTREAU, 1973. Étude du fleuve Saint-Laurent : tronçon Cornwall-Varennnes. Aspects physiques et sédimentologiques entre Cornwall et Varennnes. Université Laval, Québec, volume 1, 143 p.
- 1974. Étude du fleuve Saint-Laurent : tronçon Varennnes-Montmagny. Aspects physiques et sédimentologiques entre Varennnes et Montmagny. Université Laval, Québec, volume 1, 266 p.
- Courchesne, F. et Savoie, S., 1991. Méthode de laboratoire en pédologie. Notes et Documents, n° 91-02, Université de Montréal, 56 p.
- De Serres, B., 1989. Dynamique des écoulements et du transport à une confluence de cours d'eau naturel à lits sablonneux. Thèse de maîtrise, Université de Montréal, 102 p.
- Frenette, M., Barbeau, C. et Verrette, J.L., 1989. Aspects quantitatifs, dynamiques et qualitatifs des sédiments du Saint-Laurent. Environnement Canada et Gouvernement du Québec, 185 p.
- Gadd, N.R., 1971. Pleistocene Geology of the Central St-Lawrence Lowland. Geological Survey of Canada, Memoir 359, 153 p.
- Giguère, N., 1992. Morphologie, sédimentologie et contamination des sédiments du lit d'un grand confluent : Le cas de la Batiscan et du Saint-Laurent. Thèse de maîtrise, Université de Montréal, 102 p.
- Godbout, G., 1957. Étude pédologique du comté de Berthier. Ministère de l'Agriculture, Division des sols, Québec, bulletin technique n° 5, 112 p.
- Kennedy, B.A., 1984. On Playfair's law of accordant junctions. *Earth Surface Processes and Landforms*, 9 : 153-173.
- Lodina, R.V. et Chalov, R.S., 1971. Effect of tributaries on the composition of river sediments and on deformations of the main river channel. *Soviet Hydrology*, 4 : 65-70.
- Miller, J.P., 1958. High mountain streams : Effects of geology on channel characteristics and bed material. New Mexico State Bureau of Mines and Mineral Resources, Memoir 4, 53 p.
- Milnes, A.R. et Fitzpatrick, R.W., 1989. Titanium and Zirconium Minerals, p. 1131-1205. In J.B. Dixon et S.B. Weed, édit., *Minerals in Soil Environments*. 2^e éd. Soil Science Society of America, 1244 p.
- Mosley, M.P., 1976. An experimental study of channel confluences. *Journal of Geology*, 107 : 1713-1733.
- Pageau, E., 1961. Étude pédologique du comté de Joliette. Ministère de l'Agriculture, Division des sols, Québec, bulletin technique n° 8, 120 p.
- Reid, I., Best, J.L. et Frostick, L.E., 1989. Floods and flood sediments at river confluences, p. 135-150. In K. Beven et P. Carling, édit., *Floods : Hydrological, Sedimentological and Geomorphological Implications*. John Wiley & Sons.
- Rittenhouse, G., 1943. The transportation and deposition of heavy minerals. *Geological Society of America Bulletin*, 35 : 939-955.
- Roy, A.G. et Bergeron, N., 1990. Flow and particle paths at a natural river confluence with coarse bed material. *Geomorphology*, 3 : 99-112.
- Roy, A.G., Courchesne, F., Giguère, N., Gaudet, J. et Chaumont, D., 1993. Dynamics of the confluence between the Batiscan and Saint-Lawrence rivers, p. 637-644. In *Proceedings of Joint CSCE-ASCE National Conference on Environmental Engineering*, p. 637-644.
- Torressan, M., 1987. The use of sodium polytungstate in heavy mineral separations. United States Geological Survey, Open-file report 87-590, 17 p.