

Programme Honor
Département de Géographie
Université de Montréal

**L'ÉTUDE PRÉLIMINAIRE DE L'ÉVOLUTION RÉCENTE
DU DELTA DE LA RIVIÈRE ST-FRANÇOIS**



Beaulieu Eric

Projet de recherche de fin d'études
sous la direction de
André Roy

Juin 2006

RÉSUMÉ

En conséquence des changements environnementaux globaux anticipés dans les prochaines décennies, on prévoit que le niveau d'eau du lac St-Pierre pourrait baisser de un mètre. Les deltas, à l'interface entre système fluvial et bassin d'eaux plus calmes, sont des milieux sensibles aux changements environnementaux. Ils constituent une archive sédimentaire précieuse qui peut servir à comprendre la réponse des tributaires à des fluctuations de niveau d'eau, entre autres. L'étude du delta de la rivière Yamachiche a montré une progradation récente et rapide associée principalement aux activités anthropiques depuis 200 ans couplées aux fluctuations de niveau d'eau du lac St-Pierre. Dans ce travail, nous avons étudié l'évolution du delta de la rivière St-François, sur la rive opposée à la Yamachiche, dans le lac St-Pierre. L'objectif de l'étude est de documenter l'évolution du delta et de comparer ces résultats à ceux obtenus sur la Yamachiche. L'étude repose sur un ensemble de méthodes incluant le géoradar, technique peu utilisée dans ce type de milieu. Ceci a permis d'aborder le problème à plusieurs échelles temporelles et spatiales. Une série de photos aériennes et des cartes anciennes ont servi à l'interprétation et la quantification des patrons de transformation du delta. Pour la période 1922-1993, une progradation du delta d'environ 800 m est observable, soit en moyenne 11 m an⁻¹. Deux coupes à proximité de l'embouchure révèlent une séquence de trois unités stratigraphiques : une première de sables massifs de banc d'accumulation, une deuxième de sédiments deltaïques et de passage graduel à une plaine d'inondation correspondant à la dernière unité de limons. Des datations par luminescence optique et ¹⁴C d'âge variant entre 767 et 1760 ans ont permis d'estimer des taux de sédimentation moyens compris entre 0,11 et 0,14 cm an⁻¹. L'analyse de profils géoradar (GPR) montre des surfaces radar subparallèles à une profondeur supérieure à 7,50 m, suivies d'une stratification complexe d'origine fluviale et d'une stratification parallèle à la surface attribuée aux dépôts de plaine d'inondation. Les données de cette étude, quoique préliminaires, permettent de conclure que la rivière St-François a été très

dynamique lors du dernier siècle, subissant un déplacement marqué de l'embouchure, des changements dans le tracé du chenal principal et la méandrisation des chenaux secondaires. La St-François est plus instable que la Yamachiche, où les processus fluviaux semblent être en meilleur équilibre avec les processus du lac St-Pierre. Considérant ces observations, une baisse du niveau d'eau du lac St-Pierre provoquerait une progradation rapide du delta, mais vu l'instabilité de la St-François et l'état préliminaire de l'étude, il est difficile de prévoir dans quelle direction. Le géoradar offre un potentiel considérable dans un environnement aussi diversifié que le delta de la St-François. L'information récoltée par cette étude supporte son utilisation dans un contexte semblable.

INTRODUCTION

Le lac St-Pierre, un élargissement du fleuve St-Laurent, est un lac fluvial peu profond (figure 1). La grande biodiversité de ses milieux humides et des rives de ses tributaires en ont fait une réserve mondiale de la biosphère de l'UNESCO. Au cours des 150 dernières années, le lac St-Pierre a subi une série de bouleversements d'origine anthropique qui ont affecté l'écosystème, la sédimentologie et les milieux humides (Bondue *et al.*, 2006). Les modèles numériques portant sur les changements climatiques suggèrent un réchauffement du climat nord-américain d'entre 1 et 7,5 °C au cours du prochain siècle (Cantin et Bouchard, 2002). Dans presque tous les cas, on prévoit une baisse des niveaux d'eau et débits du St-Laurent. Ces changements climatiques anticipés pourraient avoir des répercussions importantes sur la vallée du St-Laurent, particulièrement dans le lac St-Pierre, vu sa faible profondeur. En effet, une baisse de ses niveaux d'eau de l'ordre d'un mètre, prévue d'ici les 50 prochaines années (Environnement Canada, 2006a), pourrait appeler une réponse fluviale rapide des tributaires du fleuve St-Laurent.

Des conclusions variées ont été tirées d'études portant sur la réponse des systèmes fluviaux suite à une baisse de niveau d'eau. Par exemple, Overeem *et al.* (2003) ont observé une progradation des levées sur le delta de la Volga suite à une baisse de niveau d'eau de 3 m entre 1929 et 1977. Grâce à la comparaison temporelle de photos aériennes, Hassan et Klein (2002) ont constaté des changements majeurs dans la morphologie du chenal de la Jordan et des incisions marquées suite à une baisse rapide de niveau d'eau de la mer Morte. D'autres études axées sur la modélisation sont elles aussi arrivées à des conclusions variées. Par exemple, Ritchie *et al.* (2004) ont établi qu'un nombre limité de chenaux s'incisent suite à une baisse rapide de niveau d'eau et une incision mineure des chenaux survient pour une baisse plus lente. Grâce à un modèle numérique reconstruisant l'évolution du delta de la Meuse, Bogaart et

Van Balen (2000) ont montré quant à eux que les changements climatiques constituent le principal déterminant des changements morphologiques du delta.

L'état des connaissances des systèmes fluviaux tributaires du St-Laurent, particulièrement à leur embouchure, et leur réponse aux fluctuations de niveau d'eau du lac St-Pierre reste très limité. L'évolution récente du delta de la rivière St-François n'échappe pas à ce constat. Des résultats obtenus sur le delta de la rivière Yamachiche montrent une activité sédimentaire récente (<150 ans) très intense. Après l'étude du delta de la rivière Yamachiche, il reste à savoir si les résultats sont généralisables sur l'ensemble de l'axe fluvial. Certaines caractéristiques des bassins versants de ces deux rivières sont semblables, tel les températures, les précipitations, la géologie et les dépôts meubles, alors que des différences existent quant à leur taille, leurs débits et l'utilisation du sol. La comparaison entre ces deux deltas est nécessaire à la compréhension des réactions du système fluvial aux baisses prévues du niveau d'eau du lac St-Pierre. D'autant plus que les connaissances actuelles, portant essentiellement sur le delta du Mississippi et du Rhin/Meuse, font référence à une toute autre échelle de grandeur (Coleman, 1981).

Historiquement, l'analyse des deltas étaient vue sous l'angle d'un exercice de classification, comme celle de Galloway (1975). De même, Summerfield (1985) a proposé un modèle général de réponse fluvial à une baisse du niveau marin qui dépend principalement de l'inclinaison de la pente entre le plateau continental et la plaine côtière. Or, la complexité et la variabilité spatiale des deltas ne peuvent se résumer à l'application d'un modèle universel qui s'applique moins bien aux deltas de plus petite taille, puisque tous les deltas modernes sont uniques. Ainsi, il n'est pas possible d'utiliser une classification simpliste, ni un modèle universel pour caractériser les processus en cours sur le delta. C'est pourquoi aucun consensus n'est établi quant à la réponse des deltas aux variations climatiques et aux fluctuations de niveau d'eau des bassins récepteurs qui y sont associées (Elliott, 1978). Ainsi, l'augmentation graduelle des études

sur des deltas de partout dans le monde a servi à abandonner la simple classification pour un modèle de réponse des systèmes fluviaux plus complexe. Tout d'abord, Axelsson (1967) a précisé que la forme du front deltaïque est dépendante de la combinaison des processus fluviaux et côtiers, du ratio entre le dépôt et la mise en transport des sédiments (charge de fond et en suspension) et de la topographie initiale du bassin. Plus récemment, Schumm (1993) a proposé de décortiquer la complexité de la réponse du système fluvial à des fluctuations de niveau d'eau par l'analyse de 10 variables déterminantes regroupées en trois types de contrôle (tableau 1).

Contrôles du niveau de base	1. direction, 2. magnitude, 3. taux et 4. durée de la fluctuation du niveau de base
Contrôles géologiques	5. lithologie, 6. structure et 7. nature des alluvions de la vallée
Contrôles géomorphologiques	8. inclinaison des surfaces exposées 9. morphologie de la vallée 10. dynamique de la rivière a) morphologie b) capacité d'ajustement

TABLEAU 1 : Variables de la réponse complexe du système fluvial à des fluctuations de niveau d'eau (Schumm, 1993)

Cependant, la reconstitution de l'évolution d'un delta et de sa réponse complexe aux changements environnementaux requiert une stratégie. Il est ainsi nécessaire d'explorer l'utilité de plusieurs méthodes, afin d'obtenir les informations pertinentes aux différentes composantes du delta. Les approches plus traditionnelles fondées sur l'analyse de cartes et de photos aériennes et sur la description de coupes doivent s'accompagner de méthodes nouvelles de datation et d'investigation des dépôts de surface. Par exemple, le géoradar offre un potentiel intéressant. Pelpola et Hickin (2004) ont évalué le taux de progradation du delta de Fitzsimmons Creek, en Colombie Britannique. L'utilisation du géoradar, un appareil qui permet de générer rapidement des profils d'une profondeur d'une dizaine de mètres, semble appropriée. Cette

méthode a pour avantage ajouté de préciser la forme tridimensionnelle des unités stratigraphiques. De plus, par la méthode de la luminescence optique, appliquée aux quartz, Rittenour *et al.* (2003) ont réussi à obtenir une première chronologie absolue détaillée des dépôts fluviatiles provenant de la formation de trois paléochenaux de la basse vallée du Mississippi.

L'objectif de cette étude est de documenter l'évolution du delta de la St-François et de comparer ces résultats à ceux obtenus pour le delta de la Yamachiche. Comme la réponse attendue met en relation un ensemble de variables, l'utilisation du géoradar, combinée à une datation par la méthode de la luminescence optique, semble prometteuse.

SITE À L'ÉTUDE

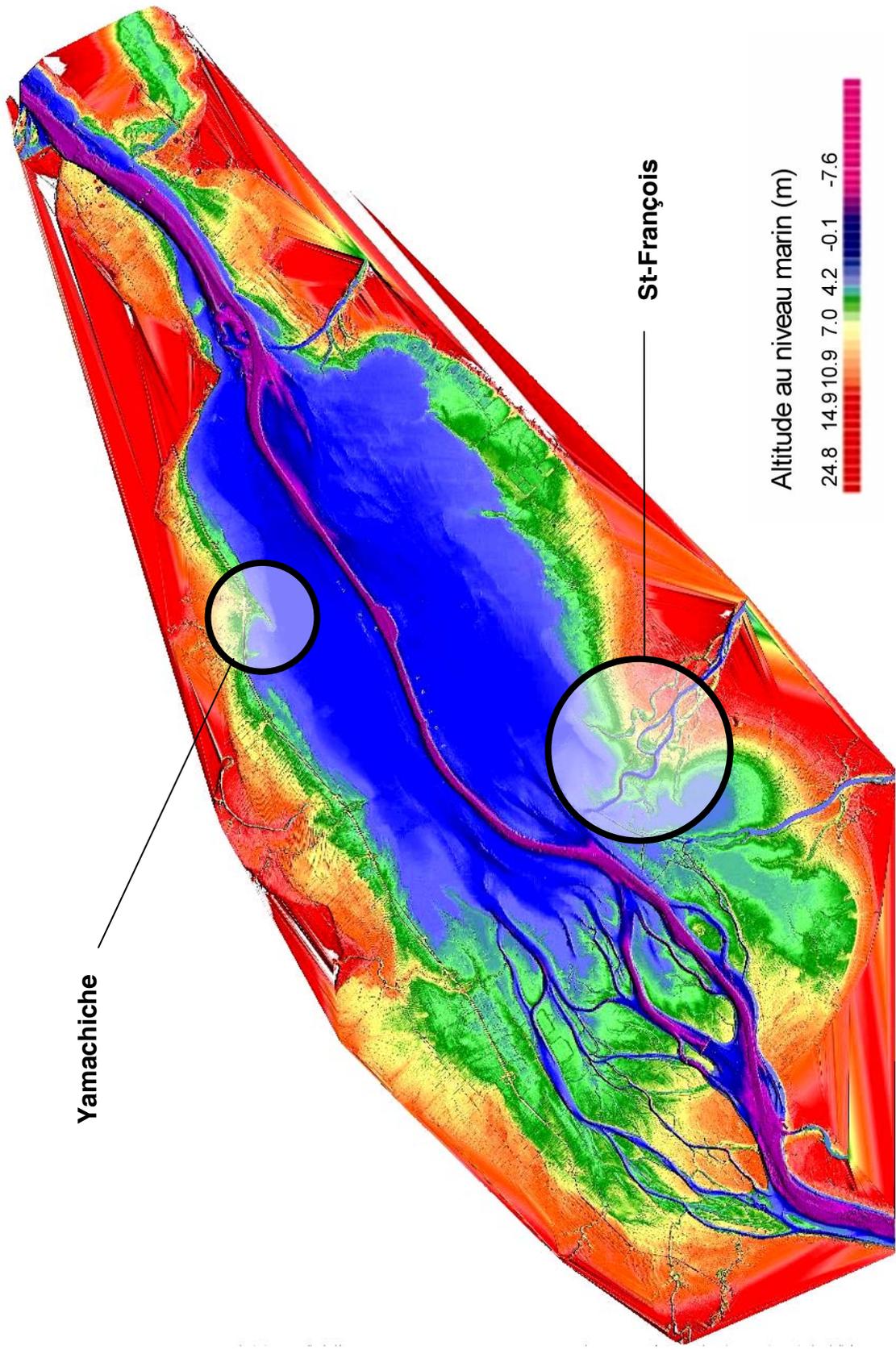
Bassins versants des rivières St-François et Yamachiche

Le climat des bassins est semblable: une température moyenne annuelle d'environ 5 °C et des précipitations moyennes annuelles avoisinant 1000 mm, dont 20% sous forme de neige (Environnement Canada, 2006b; stations de Pierreville et Louiseville). Quoique le signal des marées du lac St-Pierre soit faible, voire négligeable (Morin et Bouchard, 2001), les deux bassins sont soumis à l'effet des vagues du lac St-Pierre dont le fetch peut atteindre 30 km par grands vents au printemps (Morin *et al.*, 2005). Les bassins de la St-François et de la Yamachiche chevauchent les provinces géologiques des basses terres du St-Laurent et respectivement celle des Appalaches et du Bouclier canadien. Dans les basses terres, les deux rivières ont incisées des dépôts lacustres et les argiles de la mer de Champlain.

Delta de la rivière St-François

Le delta de la rivière St-François se situe sur la rive sud du lac St-Pierre (figure 1). À la différence du delta de la Yamachiche, celui de la St-François n'est pas monochenal, étant alimenté par trois chenaux principaux. Le plus important de ces chenaux est plus ou moins centré par rapport aux deux autres chenaux secondaires, dont un se jette dans le lac St-Pierre plus à l'est et un autre dans la baie séparant la zone deltaïque de la St-François de celle de la Yamaska (figure 1). Le bassin versant qui alimente le delta couvre une superficie de 10 228 km², dont 14 % en territoire américain (figure 2). Le bassin a une forme caractéristique qui occupe un vaste espace orienté SO-NE dans les Appalaches et qui se draine le long d'un corridor plus étroit orienté SE-NO dans les basses terres. Il prend sa source des lacs Memphrémagog et St-François. De cette dernière source, plus importante, la rivière prend la direction sud-ouest pour environ 100 km pour bifurquer aux environs de Lennoxville vers le nord-ouest pour environ 150 km. Le

FIGURE 1 : Bathymétrie du lac St-Pierre et localisation des deltas des rivières Yamachiche et St-François (tiré de Morin et al., 2005)



profil de la rivière est irrégulier (figure 3), en partie à cause du retrait des glaces (Booth, 1984). Le débit moyen à l'embouchure de la St-François est de $209 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ (Environnement Canada, 2006c; station 02OF019 à la centrale de Drummondville). Une carte des dépôts meubles de la portion à l'aval du bassin versant est présentée en figure 4. Les dépôts les plus près de l'embouchure sont des alluvions actuelles du St-Laurent en marge du lac St-Pierre qui ont servi à délimiter la zone d'étude. Plus en amont, une mosaïque d'argiles marines et d'alluvions anciennes dominent avec quelques parcelles du Till de Gentilly. En bordure de la rivière se trouvent de plus petites parcelles des autres types de dépôts, plus récents d'alluvions et plus vieux des unités litho-stratigraphiques des alluvions de St-Pierre et du Till de Bécancour. Une description de ces unités litho-stratigraphiques des basses terres du St-Laurent, entre autres de la zone d'étude de Pierreville aux abords de la St-François, est incluse dans les travaux de Lamothe (1989).

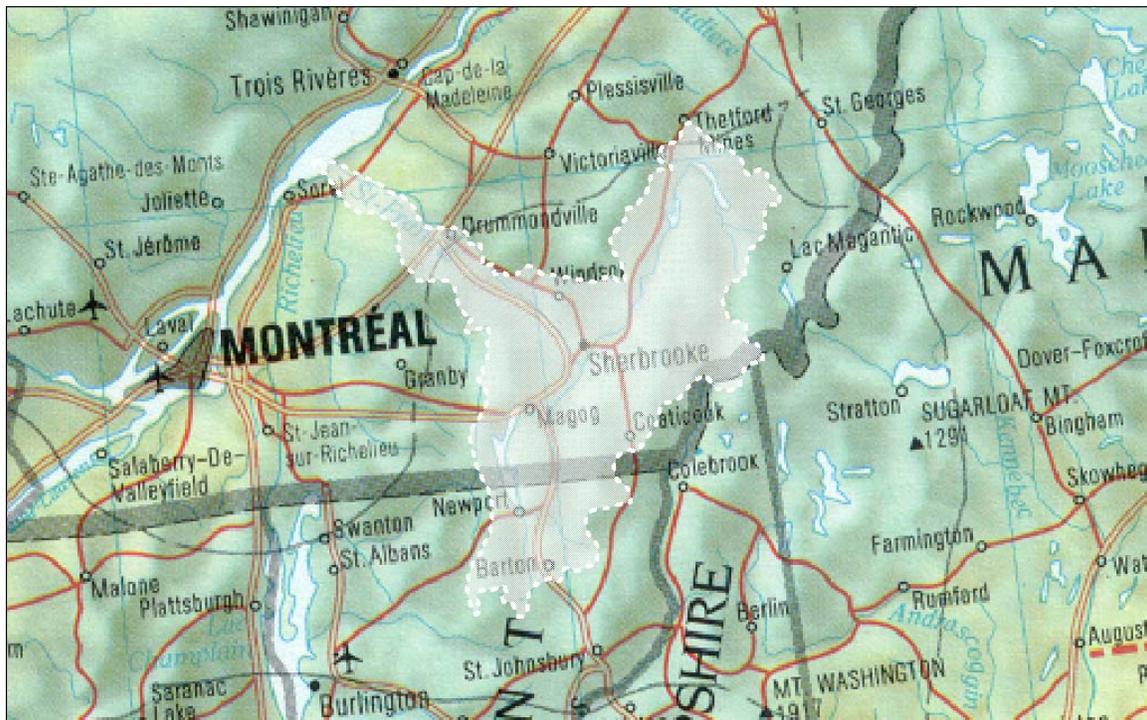


FIGURE 2 : Délimitation du bassin versant de la rivière St-François (1 : 1 500 000)

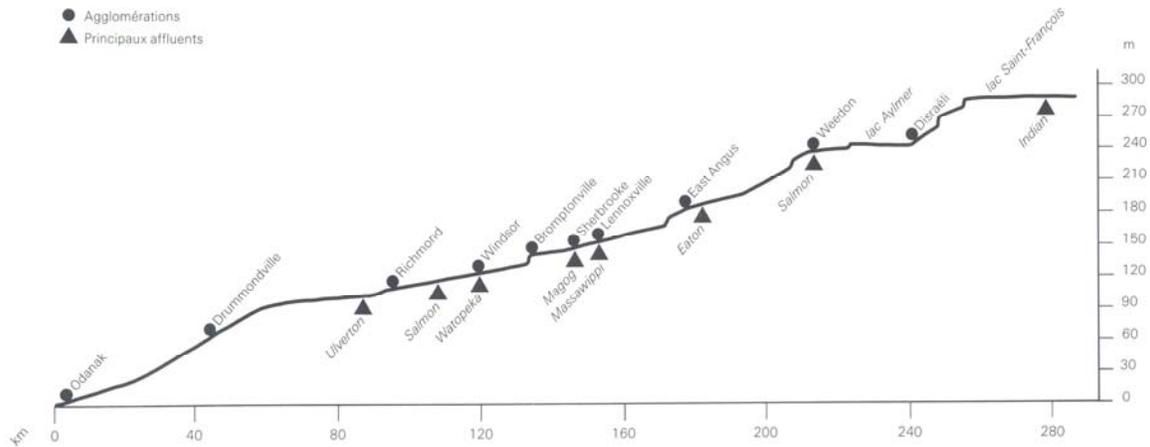
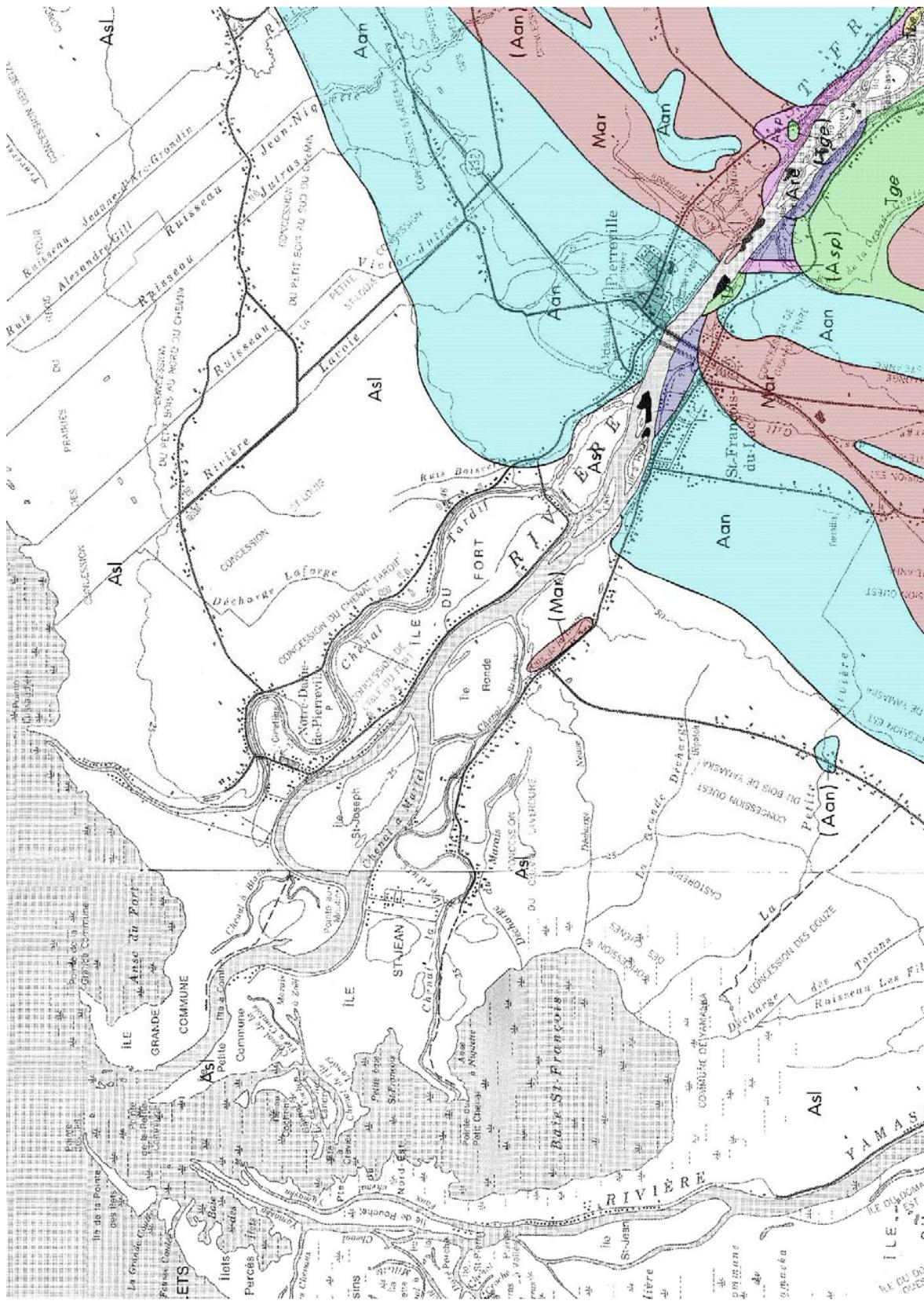


FIGURE 3 : Profil de la rivière St-François incluant principaux affluents et principales agglomérations (Gélinas, 1977)

Comme la colonisation de la Nouvelle-France s'est d'abord concentrée aux abords des cours d'eau, le bassin de la St-François est d'abord peuplé près de l'embouchure de la rivière. Divers peuples indiens, précédés par les Abénaquis, s'y installent au début du 18^e siècle avant que ne commence, à la fin du même siècle, la première grande vague d'immigration. Accédant au Canada par le lac Memphrémagog, des fermiers de la Nouvelle-Angleterre colonisent les hautes terres des Cantons de l'Est. Autour de 1850, les migrations internes massives des Canadiens français prennent de l'ampleur, assez pour provoquer le surpeuplement des basses terres du St-Laurent. Comme les fréquentes ruptures de pente de la St-François favorisent l'établissement d'usines reliées à l'industrie forestière le long de la rivière, plusieurs fermiers quittent leurs terres pour devenir bûcherons. L'industrie forestière s'intensifie en seconde moitié du 19^e siècle. Aujourd'hui, près de 75% du bassin est constitué de forêts, souvent exploitées, alors que lacs et rivières représentent 4%. Le bassin versant de la rivière St-François conserve une partie de sa vocation agricole initiale (20%), principalement dans les basses terres, tandis que les forêts dominent les sous-bassins de tête. Un maigre 1,4% du bassin est occupé de zones urbaines, les plus grandes agglomérations étant Sherbrooke et Drummondville.

FIGURE 4 : Dépôts meubles du delta de la rivière St-François (basé sur Ministère de l'Énergie et des Ressources, 1984; 1 : 15 000)



Aan=alluvions anciennes, Are=alluvions récentes, Asl=alluvions St-Laurent,
 Are=alluvions St-Pierre, Mar=argiles marines, Tbe=Till de Bécancour, Tge=Till de Gentilly

Delta de la rivière Yamachiche

Comme un des objectifs de l'étude est la comparaison des deltas de la St-François et de la Yamachiche, il est nécessaire de décrire ce dernier. La taille du bassin de drainage de la Yamachiche (380 km²) est près de 27 fois plus petit que celui de la St-François. L'utilisation du sol par l'agriculture est plus intense pour le bassin de la Yamachiche avec 38% (Bondue *et al.*, 2006). Le débit moyen à l'embouchure est de 7 m³ s⁻¹ (Environnement Canada, 2006c; station 02OC014 en amont de la route 132). Le delta s'organise autour d'un seul chenal et s'allonge dans le lac St-Pierre. Les photos aériennes et cartes ont montré une progradation rapide du delta dans un axe relativement rectiligne (figure 5). Sur la carte de 1859, le delta y figure d'une façon embryonnaire. La progradation lente de la période 1859-1921 est suivie de taux de 2200 m² an⁻¹ entre 1921 et 1964, 400 m² an⁻¹ de 1964 à 1988 et de 3000 m² an⁻¹ de 1988 à 1997. En moyenne, la progradation de la période 1921-1997 est d'environ 1850 m² an⁻¹. À la variabilité temporelle des taux de progradation s'ajoute la variabilité verticale des successions sédimentaires. Trois grandes unités témoignent des principaux types d'environnement de dépôt (figure 6). La zone amont du côté ouest du chenal est caractérisée par des unités sableuses à la base surmontées d'une unité limoneuse et la zone amont du côté est du chenal, proximale au chenal et au lac, par sa grande hétérogénéité. La zone aval se distingue par des alternances fréquentes de lits sableux et limoneux. Cette variabilité longitudinale et latérale s'expliquerait par le rôle des fluctuations du niveau d'eau du bassin récepteur et par l'action combinée des vagues et des migrations du chenal. Des taux d'accumulation moyens importants, compris entre 0,5 et 1 cm an⁻¹, seraient liés aux actions anthropiques depuis la colonisation des basses terres du Saint-Laurent il y a 200 ans. Le taux d'aggradation de la progradation entre 1921 et 1948 est estimé à 1850 m³ an⁻¹.

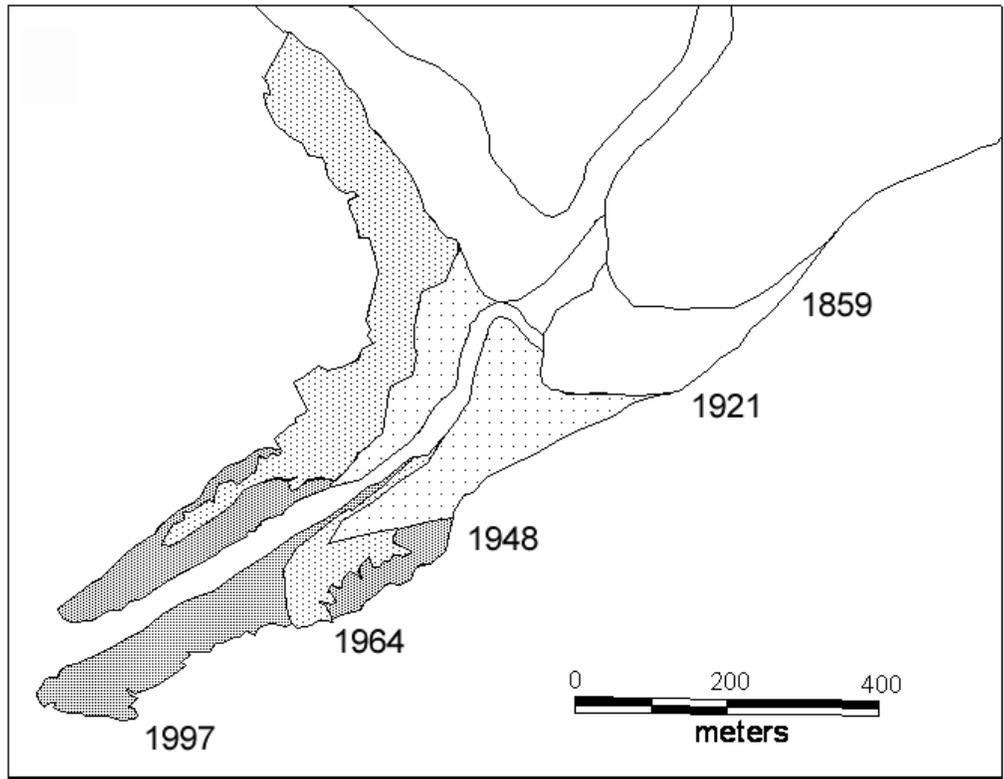


FIGURE 5 : Progradation du delta de la Yamachiche 1859-1997 (tiré de Bondue et al., 2006)

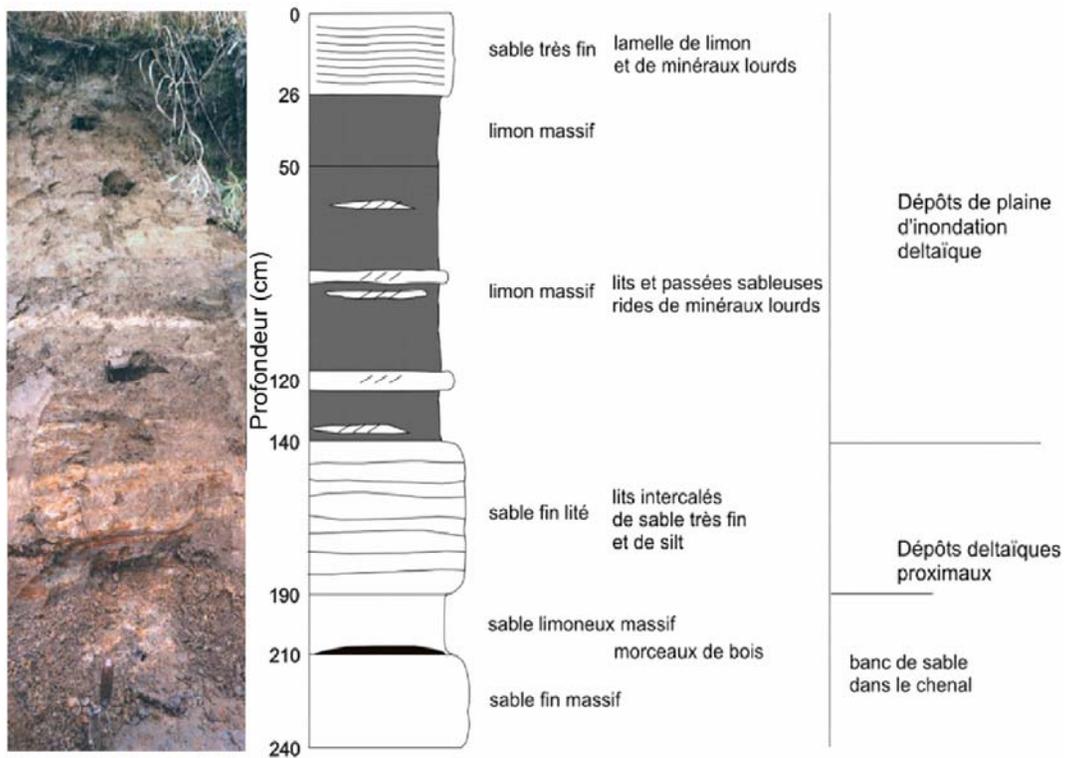


FIGURE 6 : Coupe typique du delta de la Yamachiche (tiré de Bondue et al., 2006)

MÉTHODOLOGIE

Afin de répondre aux objectifs de l'étude, deux aspects de la méthode ont été privilégiés: la chronologie et la stratigraphie. Des photos aériennes, des cartes anciennes datant du milieu du 19^e siècle et une carte topographique LIDAR (**l**ight **d**etection **a**nd **r**anging) plus récente ont été utilisées pour reconstituer les limites du delta et quantifier son évolution récente. Comme l'utilisation d'une approche multi-méthodes est recommandée pour obtenir une chronologie fiable de l'accumulation sédimentaire (Stanley, 2001), la datation de sédiments fluviaux s'est faite suivant la méthode de la luminescence optique, complétée du ¹⁴C. Les échantillons de morceau de bois et de macrorestes ont été identifiés par le laboratoire Rousseau de l'Université de Montréal. Ces éléments organiques ont été datés par le laboratoire Beta University Branch à Miami. Les échantillons de luminescence ont été datés au laboratoire de luminescence LUX de l'UQAM. Ces datations ont pour but d'estimer un taux de sédimentation moyen. L'aspect stratigraphique comprend l'analyse de coupes et de profils géoradar ou GPR (**G**round **P**enetrating **R**adar) sur des transects longitudinaux et transverses de la rivière.

Les variables chronologiques sont l'âge des sédiments échantillonnés, ainsi que les distances de progradation et de retrait du delta. Les variables d'ordre stratigraphique comprennent les différences granulométriques des lits observés (coupes et GPR) et leur épaisseur. Toutes ces variables sont associées à une localisation par leurs coordonnées géographiques et altitude. Le plan d'échantillonnage, tant pour les coupes que pour le sondage GPR, s'est fait en fonction d'optimiser la représentativité de la variabilité spatiale des unités stratigraphiques du delta (figure 7). Le GPS a permis de localiser les transects GPR.

Photos aériennes

Les informations relatives aux photos aériennes utilisées pour la délimitation de la rive et du déplacement des chenaux sont présentées dans le tableau 2. Ces photos couvrent la période 1951 à 1997 et leur échelle varie entre 1:15 000 et 1:20 000. Le choix de ces photos tient compte du niveau d'eau contemporain du lac St-Pierre, afin de réduire son influence sur la position du front deltaïque. Après avoir délimité les rives sur chacune des photos, nous avons mesuré, en termes de distances et de superficies, les migrations (progradation et retrait) du front deltaïque (tableau 4).

Code	Cliché	Date	Échelle (k)	Niveau d'eau à Sorel
A12802	N/A	1951*	15,84	5,33**
Q64531	155-157	25 août 1964	15,84	3,91
Q79876	73-75	18 octobre 1979	20	5,07
Q85330	61-65	26 mai 1985	15	4,97
HMQ97126	124-126	8 juin 1997	15	5,16

*aucune date précise disponible; **niveau moyen

TABLEAU 2 : Informations relatives aux photos aériennes utilisées

LIDAR

À la différence du RADAR (**radio detection and ranging**), le LIDAR couvre le domaine spectral des ondes visibles, des ultraviolets et des infrarouges. Le système envoie des ondes lumineuses à partir d'un télescope qui analyse les propriétés des ondes rétrodiffusées. Une de ces propriétés est le temps de retour qui permet d'obtenir la distance entre la surface et le système aéroporté. La résolution spatiale de la carte est variable, mais peut aller jusqu'à un espacement de 5 mètres entre les points qui ont un fort contraste d'altitude. L'altitude obtenue varie entre 0 et 15 m pour le secteur échantillonné. La précision au cm des points d'échantillonnage de cette carte permet de visualiser les subtilités de la topographie de la zone deltaïque, comme d'anciens chenaux autrement invisibles sur une carte topographique ordinaire.

Coupes

Deux coupes, STF01 et STF02, localisées sur chaque rive de la rivière et respectivement à environ 1,5 et 2,5 km en amont de l'embouchure (figure 7) ont été décrites. 21 échantillons de sédiments ont été prélevés pour analyse granulométrique. La granulométrie s'est faite à l'aide d'un tamisage aux demis phi, ce qui a permis une estimation satisfaisante des pourcentages de graviers, sables grossiers, moyens et fins et limons/argiles (tableau 5).

L'erreur de tamisage, obtenue en calculant la différence entre la somme des masses de sédiments récoltées dans chacun des tamis et la masse totale en début de tamisage, puis en la divisant par cette dernière, est en deçà de 0,6%. L'analyse GRADISTAT telle que décrite par Blott et Pye (2001) a été utilisée pour déterminer les différentes caractéristiques de la distribution granulométrique des échantillons, entre autres le groupe textural et la taille médiane des grains. Des échantillons destinés à la datation par luminescence ont aussi été prélevés en base de la coupe pour estimer un taux de sédimentation moyen. Pour des raisons inhérentes à la méthode de datation par luminescence optique, ces échantillons devaient contenir une quantité suffisante de sédiments de taille granulométrique autour des sables fins. De plus, comme la méthode de datation des sédiments fluviaux par luminescence est en développement, les échantillons ont été prélevés préférentiellement là où des éléments organiques étaient présents. Ainsi, les macrorestes ou morceaux de bois des lits de matière organique permettent d'obtenir une date ^{14}C servant de validation aux dates obtenues par luminescence.

Datation OSL

La luminescence stimulée optiquement (OSL) est une méthode de datation qui permet d'obtenir l'âge de la dernière exposition à la lumière solaire des grains de feldspath et de quartz (Aitken, 1998). Les radiations ionisantes et cosmiques auxquelles sont soumis ces minéraux piègent des électrons dans les défauts de leur structure cristalline. Ces électrons s'y logent jusqu'à une

prochaine exposition à la lumière. Une fois exposé, ils libèrent l'énergie emmagasinée sous forme de lumière (luminescence) dont l'intensité est proportionnelle à la durée d'enfouissement. La formule utilisée pour le calcul de l'âge dit apparent est:

$$\text{Âge (ka)} = D_E \text{ (Gy)} / D_A \text{ (Gy ka}^{-1}\text{)}$$

où D_E correspond à la dose équivalente et D_A à la dose annuelle

La dose équivalente, exprimée en grays ($1 \text{ Gy} = 1 \text{ J kg}^{-1}$), est définie comme la dose qui, en laboratoire, produit la même luminescence que la dose naturelle. La dose annuelle est définie comme le taux auquel s'accumule l'énergie dans le minéral. Cette énergie provient essentiellement des rayons α , β , γ émis suite à la désintégration des atomes de ^{40}K , ^{238}U , ^{235}U et ^{232}Th et, dans une moindre mesure, des rayons cosmiques.

Le protocole pour arriver à une date fiable commence par le tamisage des sédiments, dans le but de ne conserver que la fraction granulométrique 150-250 μm . Cette fraction est soumise à une attaque à l'acide chlorhydrique (HCl 20%) éliminant tout carbonate. Les sédiments résultant de ces étapes sont ensuite mis dans une liqueur de polytungstate de sodium afin d'isoler les grains de feldspath potassique des quartz par densimétrie. Ces grains de feldspath sont ensuite placés sur des disques d'un cm de diamètre, au nombre de 24 par échantillon, constituant l'aliquote finale.

Le protocole utilisé pour connaître la dose équivalente (D_E) est connu sous le nom de SAR (Single Aliquot Regeneration; Murray et Wintle, 2000). La méthode utilisée pour cette étude est celle adaptée pour les feldspaths par Lamothe *et al.* (2001) qui est résumée dans le tableau 3. En résumé, chaque feldspath est stimulé optiquement pour connaître son signal naturel et irradié pour construire une courbe de croissance. La dose équivalente (D_E) est obtenue en projetant le signal naturel sur la courbe de régénération. L'appareil qui a été utilisé est le Risø TL DA15 qui stimule optiquement les échantillons à l'aide de

diodes infrarouges. La luminescence est mesurée par un tube photomultiplicateur EMI 963QA muni d'une combinaison de filtres BG39 et Corning 7-59 laissant pénétrer les ondes de largeur 325-470 nm.

1	Préchauffe de l'échantillon naturel
2	Mesure du signal OSL naturel (L_n)
3	Irradiation bêta de la dose test fixe
4	Préchauffe de la dose test
5	Mesure du signal OSL de la dose test (T_n)
1	Irradiation bêta d'une dose de régénération
2	Préchauffe des échantillons irradiés
3	Mesure du signal OSL régénéré (L_x)
4	Irradiation bêta de la dose test
5	Préchauffe de la dose test
6	Mesure du signal OSL de la dose test (T_x)

TABLEAU 3 : Étapes de la méthode Single Aliquot Regeneration (Lamothe et al., 2001)

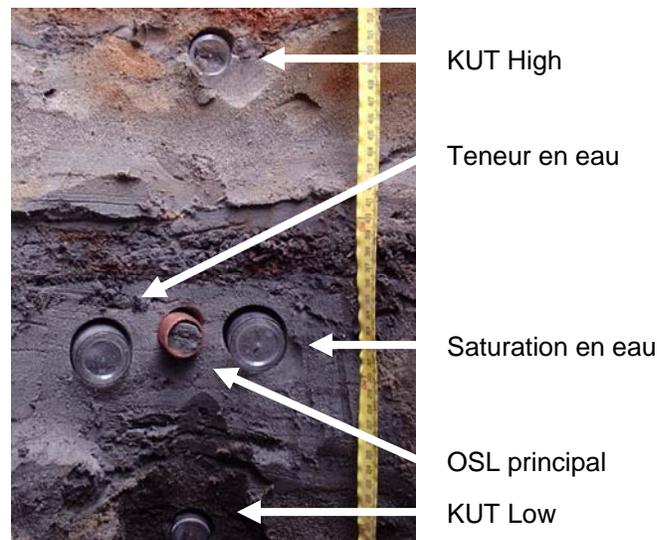


FIGURE 8 : Disposition des échantillons destinés à la datation à la luminescence optique

Pour obtenir la dose annuelle (D_A), les concentrations en K, U et Th ont été mesurées par activation neutronique sur deux échantillons de sédiments. Préalablement broyés, ces échantillons ont été prélevés à 20 cm en-dessous (KUT Low) et au-dessus (KUT High) de l'échantillon principal (figure 8). Les concentrations en éléments radioactifs ont été ajustées en fonction du rapport entre la teneur et la saturation en eau des échantillons de la même couche que l'échantillon principal. Comme l'analyse de ces échantillons est toujours en

cours, la valeur empirique de dose annuelle de 3 Gy ka^{-1} , prévalant habituellement dans les basses terres du St-Laurent, a été utilisée. C'est une valeur qui se rapproche des valeurs obtenues sur le delta de la Yamachiche, oscillant entre 2,73 et 3,48 Gy ka^{-1} (Bondue *et al.*, 2006) et à proximité du delta de la St-François (entre 3 et 4 Gy ka^{-1} ; Lamothe et Huntley, 1988). De plus, la précision de cette valeur suffit amplement aux besoins de l'étude.

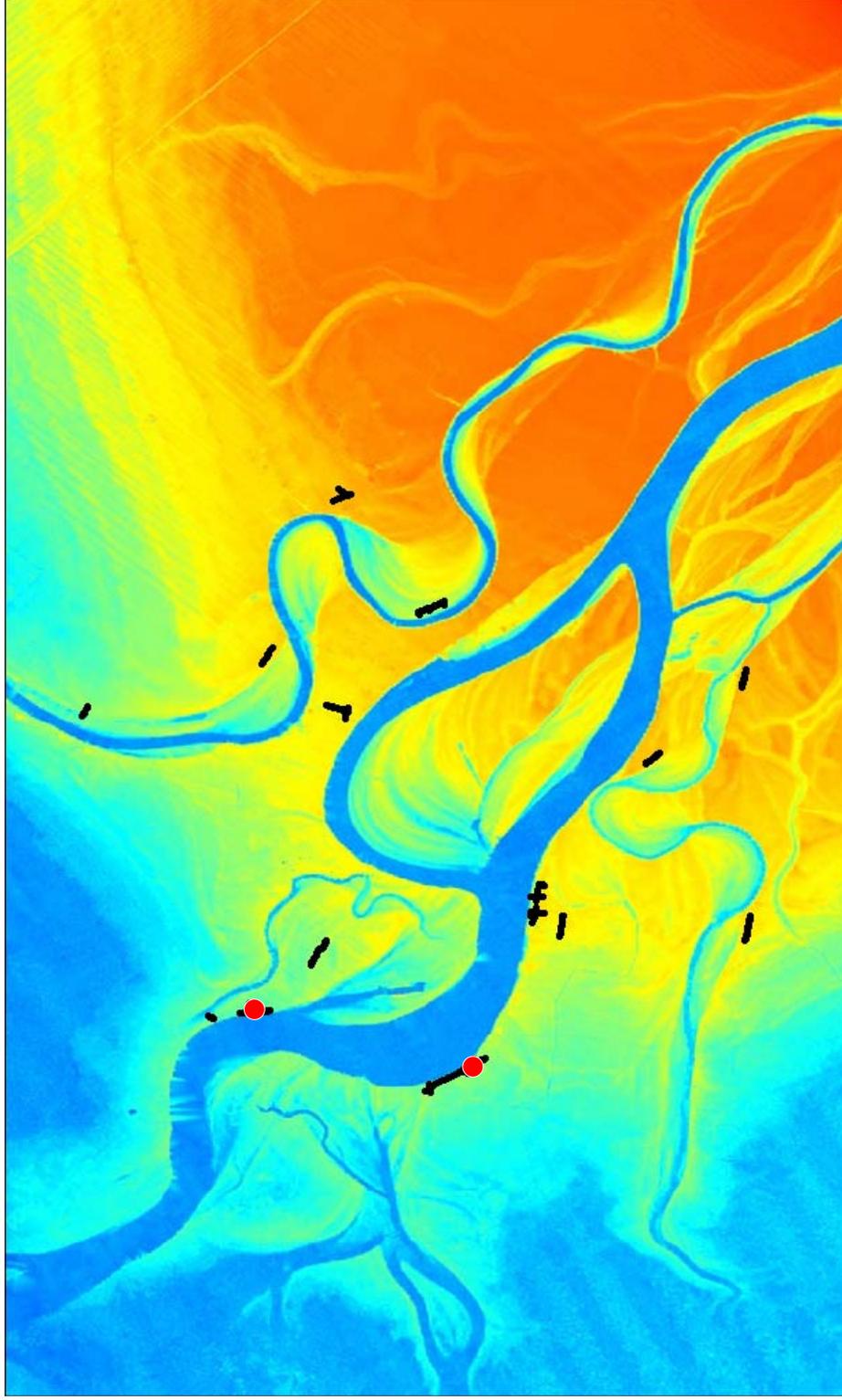
Le premier postulat de la méthode est la remise à zéro complète des grains échantillonnés lors du dernier événement de transport. Des travaux ont d'ailleurs montré qu'une remise partielle à zéro est un problème pouvant affecter les sédiments des environnements fluviaux, l'exposition à la lumière lors du transport précédent le dépôt pouvant être insuffisante (Rittenour *et al.*, 2003; Wallinga *et al.*, 2001). L'âge surestimé de quelques échantillons des coupes effectuées sur le delta de la Yamachiche ont d'ailleurs confirmé l'existence de ce problème dans un milieu similaire à celui du delta de la St-François (Bondue *et al.*, 2006).

Géoradar

Le géoradar est un appareil qui envoie des ondes électromagnétiques dans le sous-sol, dont une partie est retournée vers la surface et enregistrée à chaque contraste sédimentaire rencontré jusqu'à ce que le signal devienne trop faible pour pouvoir être retourné au récepteur. Ainsi, plus la fréquence des antennes utilisées est élevée, plus la résolution du profil obtenu est fine, mais plus les ondes sont atténuées en profondeur. Des antennes de 100 Mhz ont été utilisées lors des campagnes de terrain de cette étude, ce qui a permis de connaître les alternances de strates sur près de dix mètres. Les transects ont été choisis en fonction de leur potentiel d'explication de la dynamique deltaïque récente et de la variabilité des milieux de sédimentation et des formes sur l'image LIDAR. Ils ont donc été alignés suivant l'axe général de progradation, soit sud-est/nord-ouest ou à angle droit par rapport à ce même axe. Plus de 52 transects d'une longueur variant entre 16 et 115 mètres et totalisant plus de 2,4

km ont été investigués. Une carte topographique LIDAR est présentée en fond de la localisation des transects GPR et coupes (figure 7). En raison de contraintes de temps, l'espacement des antennes et le pas d'échantillonnage ont été fixés à un mètre, une distance réaliste et suffisamment précise pour les besoins de l'étude. Une approximation de la profondeur est obtenue en utilisant la valeur moyenne de $0,05 \text{ m ns}^{-1}$ qui correspond à la vitesse de pénétration moyenne des ondes électromagnétiques dans des limons humides. Des sondages CMP (**c**ommon-**m**id **p**oint) ont confirmé l'exactitude de cette valeur pour évaluer une échelle des profondeurs.

FIGURE 7 : Localisation des coupes (points rouges) et des transects GPR sur fond de carte topographique LIDAR (tiré de Fortin, 2002; 1 : 30 000)



RÉSULTATS

La dynamique du delta

a) Évolution tracée à partir des photos aériennes

Le delta a subi depuis 1951 des périodes successives de progradation et de retrait. Dans tous les cas, la progradation et le retrait du delta se sont faits dans un axe sud-ouest/nord-est sur une distance variant entre 600 et 1400 m (tableau 4). L'axe actuel est ainsi légèrement dévié (90°) dans le sens horaire par rapport à l'axe général de progradation plutôt sud-est/nord-ouest, ce qui laisse croire que les processus du lac St-Pierre influencent l'évolution du delta. En effet, l'embouchure de la St-François se trouve à proximité du chenal de navigation actuel et encore un peu plus près de l'ancien chenal de navigation rectiligne, abandonné peu après 1840. Les taux de progradation et de retrait moyens dérivés des distances de migration du front deltaïque sont estimés, dans l'ordre chronologique (tableau 4), à 46 m an^{-1} , -93 m an^{-1} , 58 m an^{-1} et -42 m an^{-1} . La dynamique deltaïque des périodes entre chacune des photos aériennes étudiées est quelque peu nuancée par les différences de niveau d'eau des photos aériennes (tableau 4). Par exemple, la photo aérienne de l'année 1964 est marquée par un niveau d'eau près du minimum annuel (figure 9), ce qui donne naturellement une superficie maximale du front deltaïque (figure 10a et b). Toutefois, les différences de niveau d'eau en elles-mêmes, variant entre -1,42 et 1,16 m (tableau 4), ont joué un rôle important dans l'évolution du delta, puisque la magnitude, la fréquence et la durée des battements du niveau d'eau dictent, du moins en partie, l'évolution du tracé du chenal (Schumm, 1993). L'interférence due aux fluctuations de niveau d'eau peut être atténuée en complétant l'analyse par l'évolution tracée à partir des cartes (figure 11) qui nous a permis de supposer que la progradation a été constante pour la couverture temporelle des photos aériennes.

Année antérieure	Année postérieure	Dynamique	Distance (m)	Direction	Δ niveau d'eau (m)
1951	1964	Progradation	600	NE	-1,42
1964	1979	Retrait	1400	SO	1,16
1979	1985	Progradation	350	NE	-0,1
1985	1997	Retrait	500	SO	0,19

TABLEAU 4 : Dynamique du front deltaïque pendant les périodes entre les photos aériennes sélectionnées

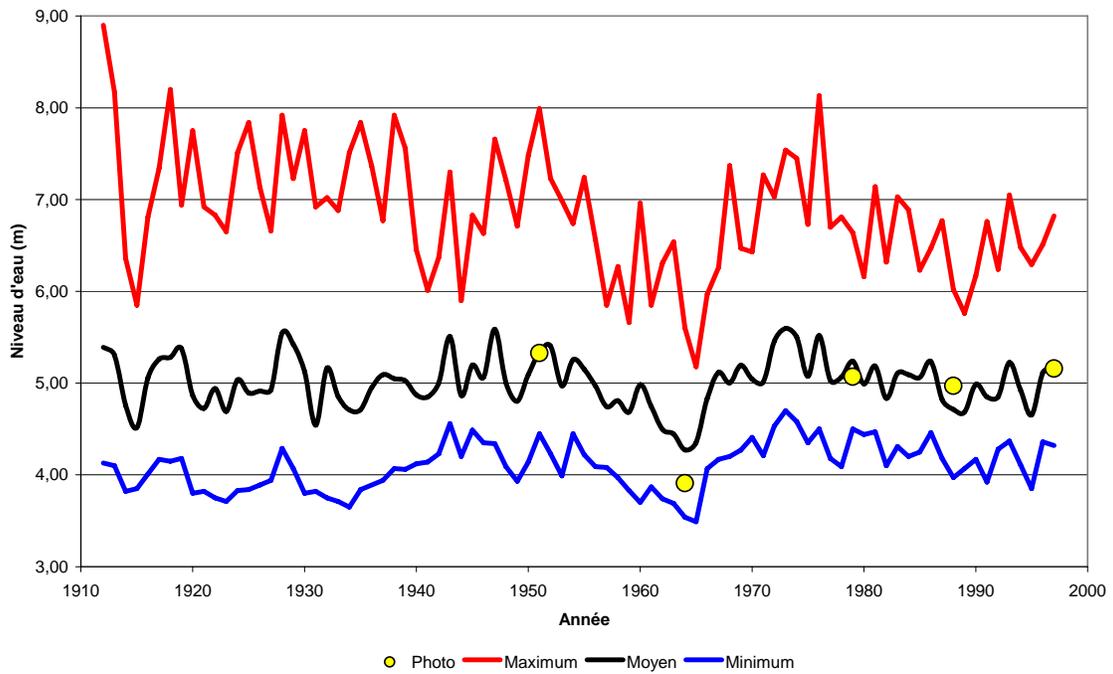
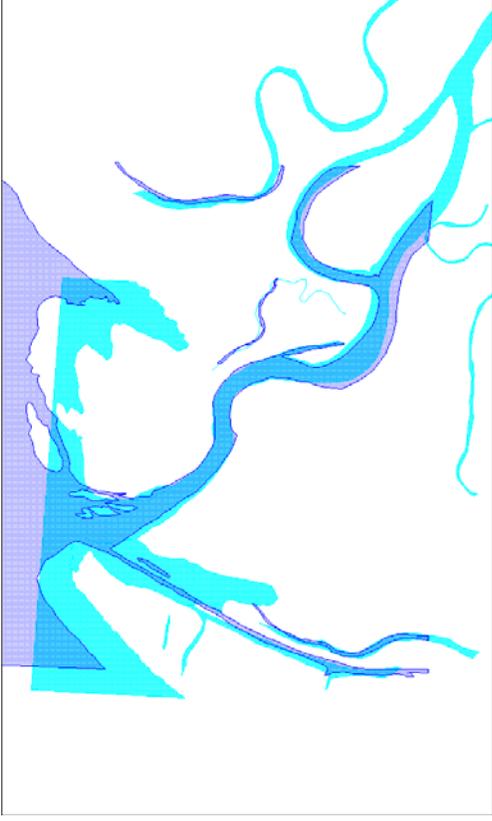


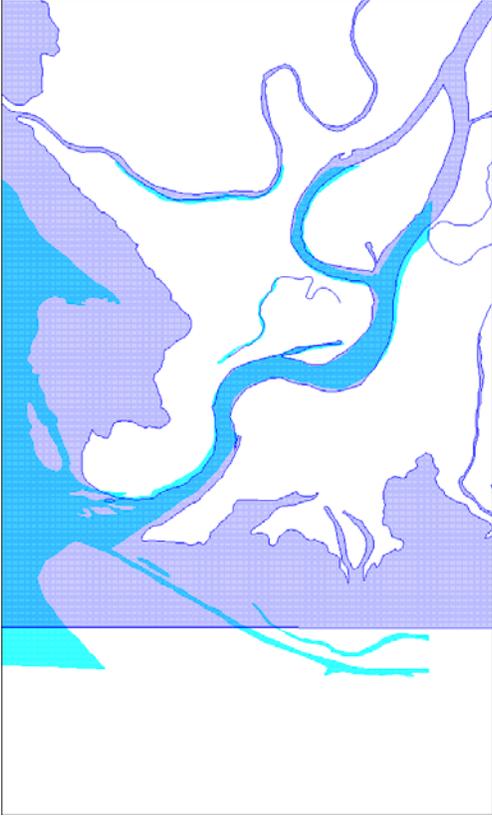
FIGURE 9 : Niveaux d'eau minimum, moyens et maximum annuels et niveaux ponctuels aux dates des photos aériennes utilisées (Environnement Canada, 2002)

FIGURE 10 : Délimitation de la rive à partir des photos aériennes (1 : 30 000)

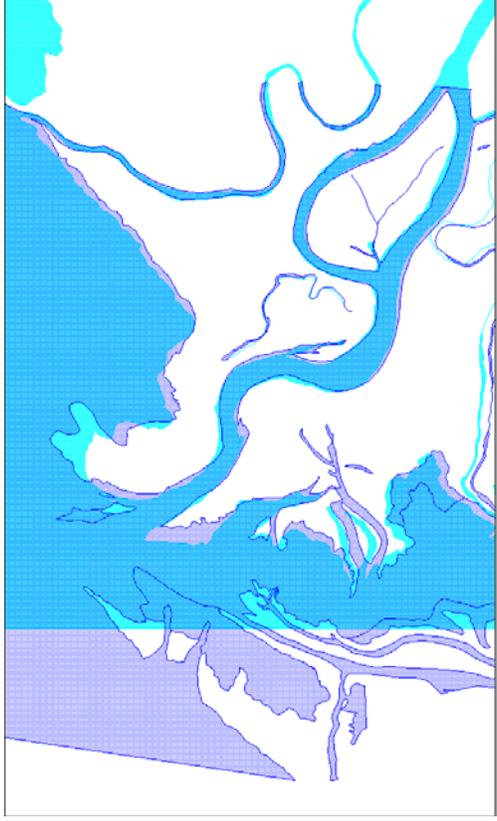
a) 1951-1964



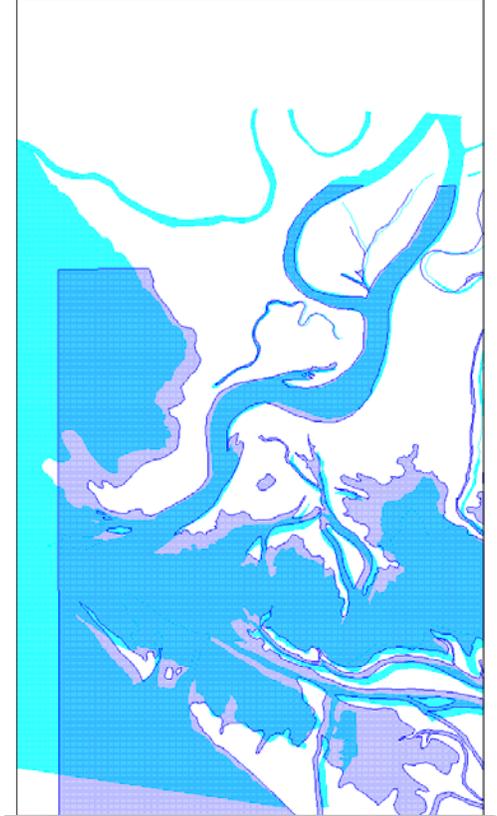
b) 1964-1979



c) 1979-1985



d) 1985-1997



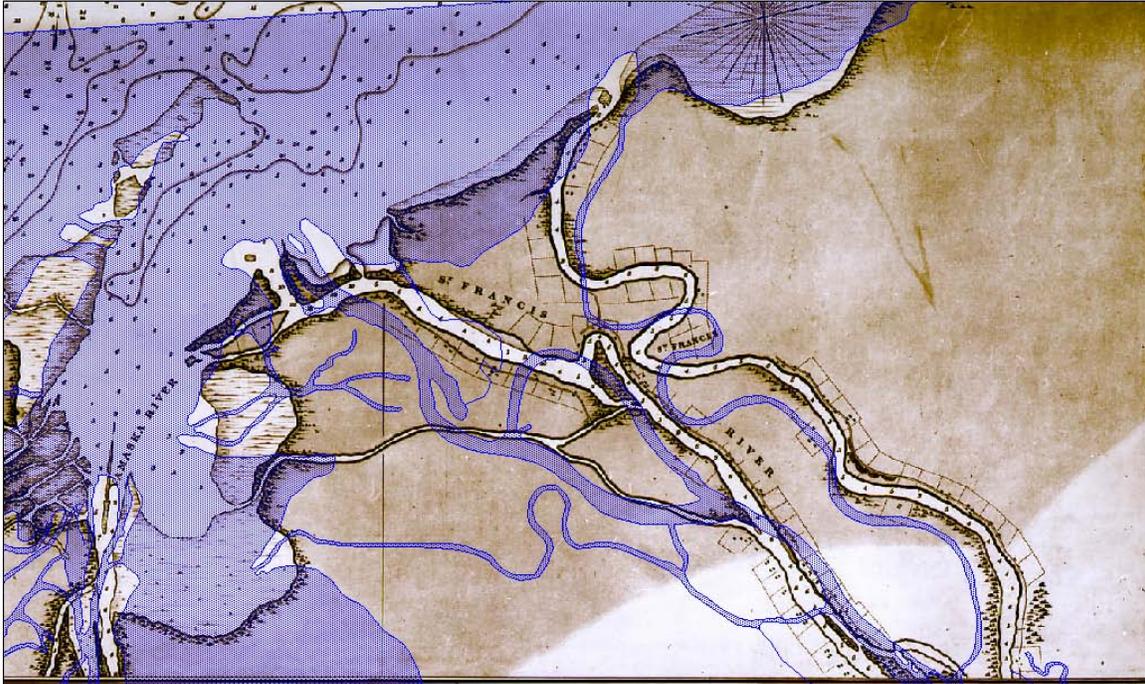
b) Évolution tracée à partir des cartes anciennes et récentes

Les cartes apportent des résultats plus clairs et précis de l'évolution du front deltaïque (figure 11), ce qui permet de compléter l'interprétation des photos aérienne. En effet, les cartes utilisées pour cette étude, à l'exception de la plus ancienne, sont mieux géoréférencées que les photos aériennes, en raison de l'abondance relative de points de contrôle. Conséquemment, les différences morphologiques du front deltaïque sont quantifiables avec plus de précision. Des trois cartes utilisées, la carte la plus ancienne de 1859 est la seule qui ne puisse être géoréférencée correctement, faute de points de contrôle fiables. Il est donc impossible de quantifier les changements morphologiques et l'évolution du tracé du chenal à partir de cette carte. Cette dernière est cependant riche en informations et permet de montrer le dynamisme du chenal principal et du front deltaïque entre 1859 et 1922. Pendant cette période, un déplacement complet de l'embouchure s'est produit (figure 11a). En effet, le tracé sinueux à l'embouchure de la rivière s'est altéré tout en se déplaçant vers l'est. De plus, les deux bras deltaïques secondaires, particulièrement celui à l'ouest, ont augmenté leur sinuosité. Le bras ouest, pratiquement rectiligne en 1859, est actuellement assez sinueux pour que l'extrémité nord d'un de ces méandres rejoigne quasiment le chenal principal. La méandrisation du bras est du delta s'est aussi intensifiée. Finalement, des îlots au centre du chenal se sont scindés et d'autres se sont fusionnés pour former l'île St-Joseph actuelle (figure 11b). L'érosion le long de la rive concave du méandre entourant cette île, visiblement très active durant cette période, a favorisé l'accrétion rapide du lobe de méandre sur la pointe septentrionale de cette île dans la même direction que la progradation du delta, c'est-à-dire NO.

La période 1922-1993 est caractérisée par une avancée de 800 m, soit en moyenne 11 m an^{-1} . La superficie de progradation (figure 11b) du front deltaïque est estimée à $465\,000 \text{ m}^2$, soit environ $6550 \text{ m}^2 \text{ an}^{-1}$. Une partie encore plus importante des sédiments apportés à l'embouchure ont été remaniés et redistribués sur le rivage entre le chenal principal et le chenal secondaire est

pour combler une superficie de 770 000 m². À l'ouest de l'embouchure, les chenaux gravitant autour de l'Île au Cochon et Petite Commune (figure 11b), passages obligés pour l'embouchure avant 1922, sont devenus plutôt éphémères. Du même côté de l'embouchure, le front deltaïque secondaire s'est légèrement aminci, l'accumulation sédimentaire ayant cours plutôt à l'est de l'embouchure. Tous ces constats nous amènent à penser que la redistribution de l'apport sédimentaire à l'embouchure, dans le sens de l'écoulement du lac St-Pierre, est un processus important dans l'évolution du delta de la St-François. L'action des vagues, qui jouent un rôle significatif dans le fleuve St-Laurent, particulièrement dans les lacs fluviaux (Morin *et al.*, 2005), pourrait expliquer ce phénomène de redistribution des sédiments. Tout comme la rive est du delta de la Yamachiche (Bondue *et al.*, 2006), le flanc ouest du front deltaïque principal peut être affecté par les vagues de haute énergie du lac St-Pierre.

a) 1859-1922



b) 1922-1993

(superficie de progradation)

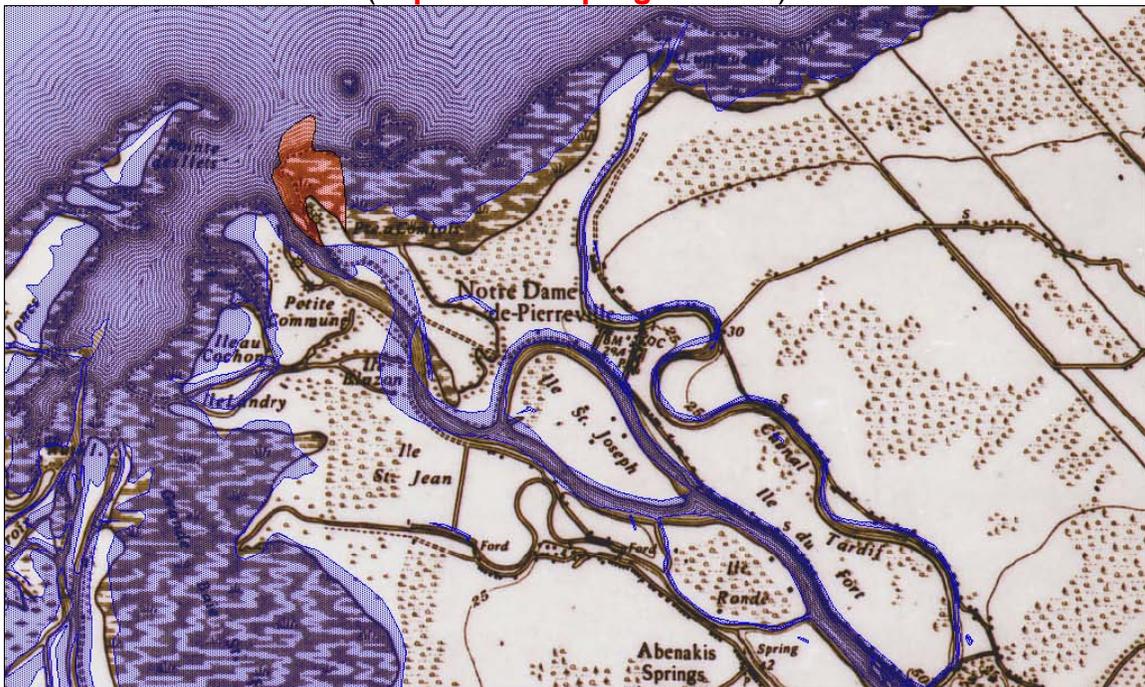


FIGURE 11 : Délimitation de la rive à partir des cartes de 1859, 1922 et 1993 (1 : 40 000)

Coupes et datations

Les deux coupes montrent chacune trois grandes unités stratigraphiques (figures 12 et 13). La première unité de sable moyen massif commence du fond des coupes jusqu'à une profondeur d'environ 2,40 m. Cette base de sable moyen massif est attribuée à la formation de bancs d'accumulation. Les lits de matière organique présents dans des sables oxydés juste au-dessus sont interprétés comme une colonisation temporaire de la végétation. La deuxième grande unité, d'une épaisseur d'environ 1,10-1,40 m, est relativement hétérogène et peut être subdivisée en deux unités. La première de celles-ci est de faible épaisseur, environ 40 cm, et se caractérise par une décroissance de la granulométrie jusqu'à une fine couche de limons, commune aux deux coupes, à une profondeur d'environ 2,00 m. Cette sous-unité de granulométrie décroissante est interprétée comme une migration du chenal puisque des dépôts riverains ont graduellement été remplacés par des dépôts plus fins jusqu'à une couche de dépôts de plaine d'inondation. Au-dessus de cette couche de limons, la granulométrie augmente jusqu'aux sables moyens pour revenir aux limons à partir de 1,60 m pour STF01 et 1,20 m pour STF02 (profondeur d'une fine couche de graviers). Cette dernière sous-unité montrant une séquence de granuloclassement qui s'inverse est interprétée comme la mise en place dépôts deltaïques suivie du passage graduel à une zone de plaine d'inondation. Le contraste le plus frappant entre les sous-unités des deux coupes est le faciès de lits entrecroisés de la coupe STF02. Il laisse croire que cette zone a été le témoin de séquences d'érosion et d'accumulation reflétant une dynamique intense du chenal. La dernière grande unité au sommet des deux coupes, d'une épaisseur d'environ 1-1,25 m, est constituée de limons plus ou moins massifs de plaine d'inondation. La granulométrie est détaillée dans le tableau 5 répertoriant les pourcentages des principales fractions granulométriques.

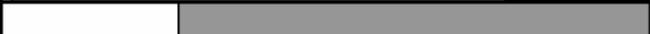
Échantillon	Profondeur	
	m	<i>Blanc=Argiles/Limons; Gris=Sables; Noir=Graviers</i>
STF0101	0,99	
STF0102	1,34	
STF0103	0,64	
STF0104	0,34	
STF0111	2,34	
STF0112	2,17	
STF0113	1,64	
STF0114	1,09	

TABLEAU 5 : Caractéristiques granulométriques des échantillons de sédiments prélevés sur la coupe STF01

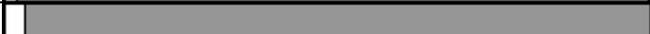
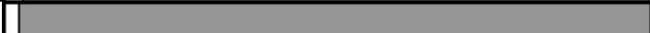
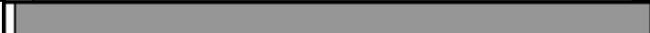
Échantillon	Profondeur	
	m	<i>Blanc=Argiles/Limons; Gris=Sables; Noir=Graviers</i>
STF0201	2,49	
STF0202	2,37	
STF0203	2,30	
STF0204	2,22	
STF0205	2,12	
STF0206	2,05	
STF0207	2,00	
STF0208	1,62	
STF0209	1,32	
STF0210	1,19	
STF0211	1,07	
STF0212	0,82	
STF0213	0,25	

TABLEAU 6 : Caractéristiques granulométriques des échantillons de sédiments prélevés sur la coupe STF02

Rivière St-François : rive droite 5 108 124 N, 350 805 E Altitude à la surface : 6,10 m		Description		Profondeur (m)		Interprétation
				min	max	
	Limons avec passages de lits de sable très fin	0	1,23	Dépôt de plaine d'inondation		
	Alternance de lits de sable très fin et fin; présence de lentilles de sable moyen; Morceaux de bois et matière organique	1,23	1,59	Passage graduel à la zone de plaine d'inondation		
	Lits plus ou moins démarqués de granulométrie autour du sable moyen	1,59	1,97	Dépôts deltaïques		
	Gradation des sables moyens aux limons; Lits de matière organique	1,97	2,33	Migration du chenal		
	Sables massifs	2,33	2,49	Banc d'accumulation		

FIGURE 12 : Coupe stratigraphique STF01
Profondeur (m) et position des échantillons de granulométrie à gauche et des datations à droite

Rivière St-François : rive gauche 5 107 016 N, 350 520 E Altitude à la surface : 6,72 m	Description	Profondeur (m)		Interprétation
		min	max	
	Limons plus ou moins massifs	0	0,98	Dépôt de plaine d'inondation
	Lits de sable subhorizontaux (< 10°)	0,98	1,18	Passage graduel à la zone de plaine d'inondation
	Sables à bonne proportion de graviers	1,18	1,20	Événement de crue
	Lits entrecroisés de sable moyen	1,20	1,43	Écoulement fluvial
	Sables lités parsemés de graviers	1,43	1,80	Dépôts deltaïques
	Lits entrecroisés de sable fin	1,80	1,96	Écoulement fluvial
	Gradation des sables moyens lités aux limons massifs	1,96	2,43	Migration du chenal
	Sables massifs; Lits de matière organique au sommet	2,43	2,82	Banc d'accumulation

FIGURE 13 : Coupe stratigraphique STF02

Profondeur (m) et position des échantillons de granulométrie (gauche) et des datations (droite)

Les deux échantillons datés par luminescence optique, OSL01/02 ont été prélevés de la coupe STF02 à respectivement 2,00 et 1,30 m (figure 12). Malgré l'espacement de 70 cm de ces échantillons sur la coupe, il semble que l'allure de la distribution des doses équivalentes des aliquotes soit semblable (figure 14). En effet, pour les deux distributions, la classe minimale a pour limite inférieure 2, la classe modale est de [2,5-3] et l'asymétrie est évidente. Cette dernière caractéristique est le reflet d'une remise à zéro partielle (Olley *et al.*, 1998), problème qui survient plus fréquemment dans les environnements fluviaux. Les résultats de Olley *et al.* (1998) suggèrent que la sélection des grains ayant la dose équivalente (D_E) la plus basse est la meilleure méthode pour déterminer la dose réelle d'enfouissement des sables fluviaux récents. Nous avons ainsi projeté la valeur minimale de l'histogramme (taux signal OSL naturel/dose test de 2; figure 14), identique pour les deux échantillons, sur la courbe régénération pour arriver à un temps d'irradiation moyen de 20,73 secondes (figure 15). La source d'irradiation utilisée de $0,111 \text{ Gy s}^{-1}$ nous donne une paléodose moyenne de 2,30 Gy pour les deux échantillons. En utilisant la valeur empirique de dose annuelle 3 Gy ka^{-1} prévalant sur les basses terres du St-Laurent, nous obtenons un âge apparent minimal moyen de 767 ans (tableau 6).

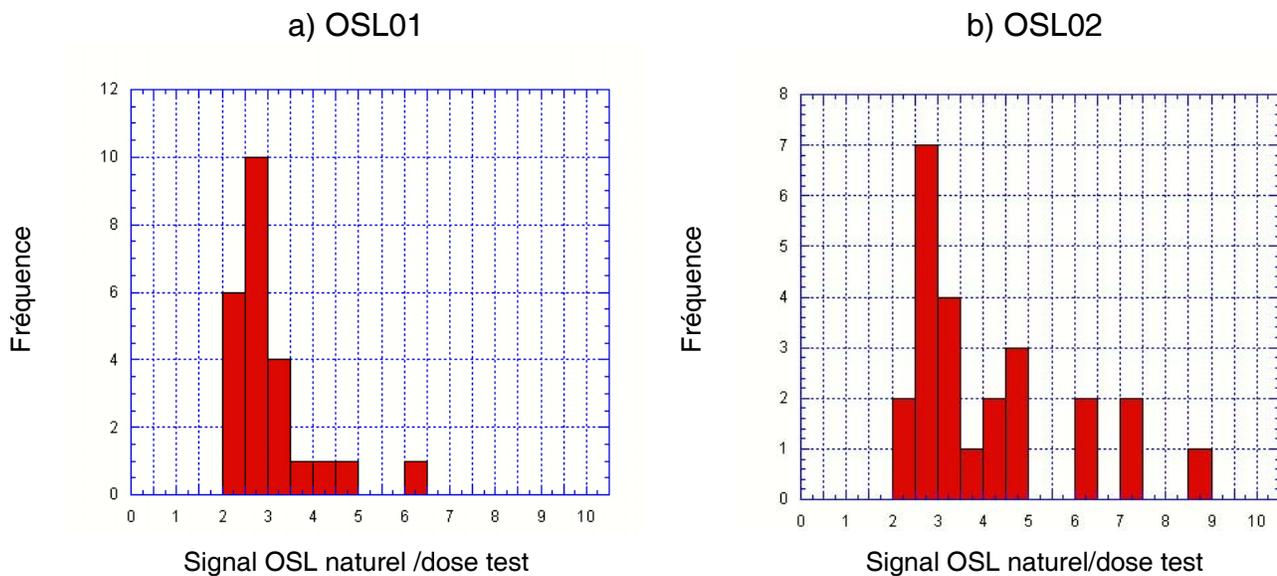


FIGURE 14 : Histogrammes du signal OSL naturel/dose test (Ln/Tn)

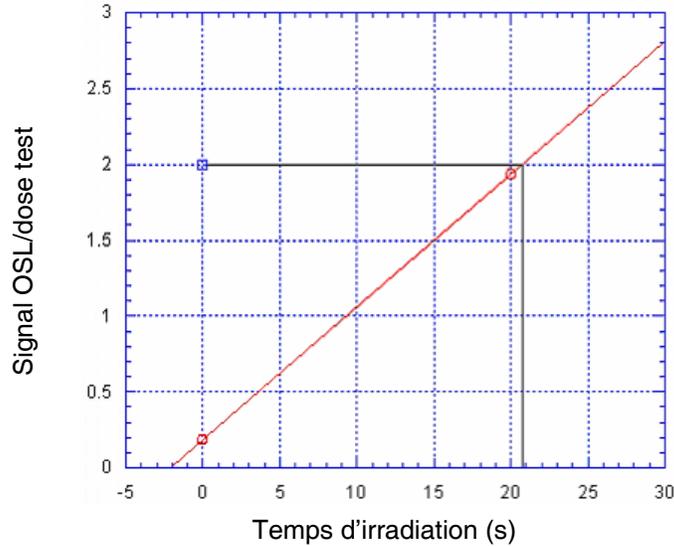


FIGURE 15 : Courbe du signal OSL régénéré/dose test (Lx/Tx en rouge) et projection du signal OSL naturel/dose test (Ln/Tn en bleu)

Sur l'autre coupe (STF01), l'abondance de matière organique nous a permis de dater au radiocarbone deux morceaux de bois d'une même strate et un macroreste (cône de *Thuja occidentalis*) plus près de la surface. Les premiers éléments organiques se situaient à une profondeur d'environ 2,30 m, tandis que le macroreste se trouvait à 1,40 m (tableau 7). Les dates obtenues concordent avec ces positions stratigraphiques, puisque le macroreste est plus jeune (1310 ± 50 BP) que les deux autres éléments organiques, à peu près du même âge, soit autour de 1700 BP.

Échantillon	Coupe	Profondeur	Matériel	Âge
OSL01/02	STF02	2,00/1,30 m	Feldspaths (150-250 μ m)	767 ans
CO3B	STF01	2,30 m	Morceau de bois	1760 ± 40 BP
C03C	STF01	1,40 m	Cône de <i>Thuja occidentalis</i>	1310 ± 50 BP
C04	STF01	2,30 m	Morceau de bois	1690 ± 40 BP

TABLEAU 7 : Dates obtenues par luminescence optique et radiocarbone

Géoradar

Comme une étude détaillée des profils géoradar est prévue dans une étape ultérieure de cette recherche, il ne sera traité ici que des résultats relatifs aux transects effectués près des coupes STF01 et STF02 (figure 7). Afin de tester cette méthode pour l'identification d'unités stratigraphiques à grande

échelle, ces coupes servent de canevas d'interprétation à leur profil géoradar correspondant,. En effet, en comparant les profils GPR aux coupes décrites sur le terrain (figures 16 et 17), nous parvenons à faire correspondre le temps de retour de signal des ondes radar aux strates observées. Les profils 24 et 65 sont dans un axe transverse à la rivière. Les coupes STF01 et STF02 se situent complètement à gauche respectivement des profils 65 et 24. Du bas vers le haut, les strates subparallèles, absentes du profil # 24, situées entre l'atténuation complète du signal et le temps 150 ns (équivalent à une profondeur de 7,50 m en utilisant la constante de $0,05 \text{ m ns}^{-1}$ correspondant à la vitesse de pénétration dans des limons humides) qui plongent en direction du chenal sont d'origine deltaïque. Sur ces strates induites repose une stratification complexe se terminant à un temps d'approximatif de 80 ns (4,00 m) qui correspond aux dépôts de chenaux instables. Les strates reflétées en haut de profil sont relativement parallèles à la surface et représentent des dépôts de plaine d'inondation.

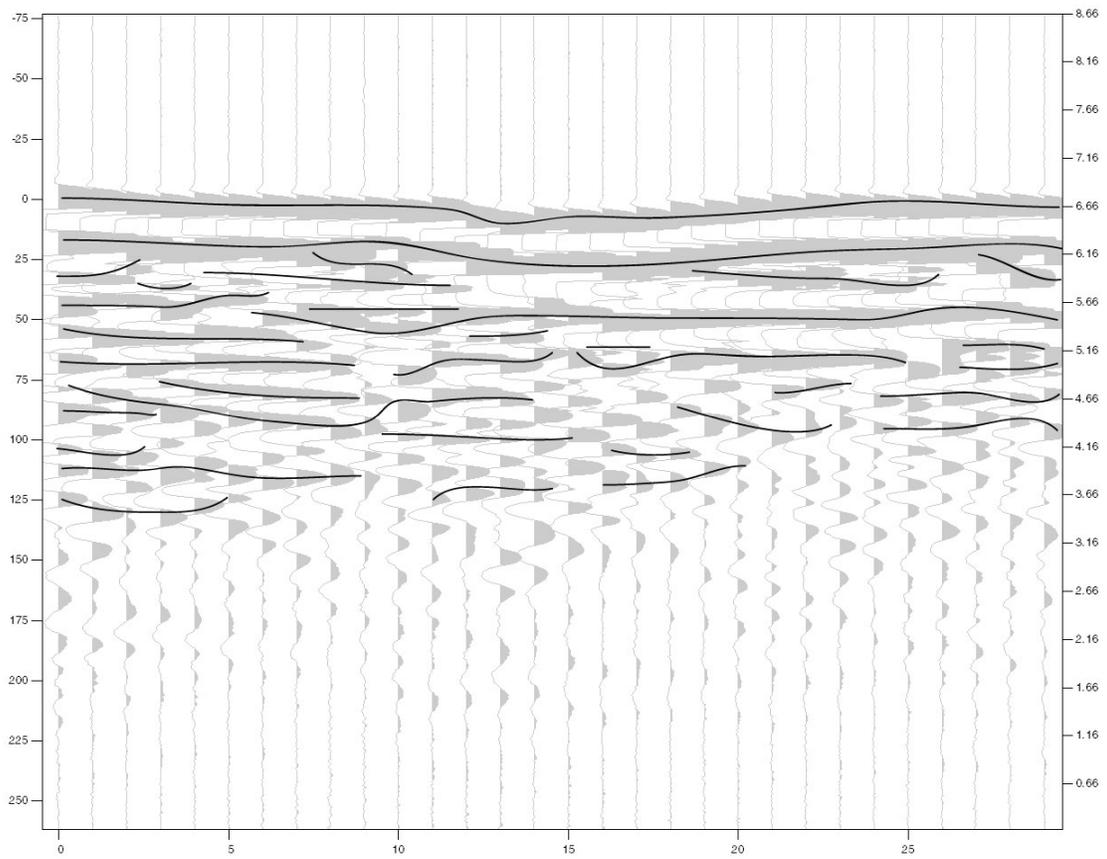


FIGURE 16 : Profil GPR # 24

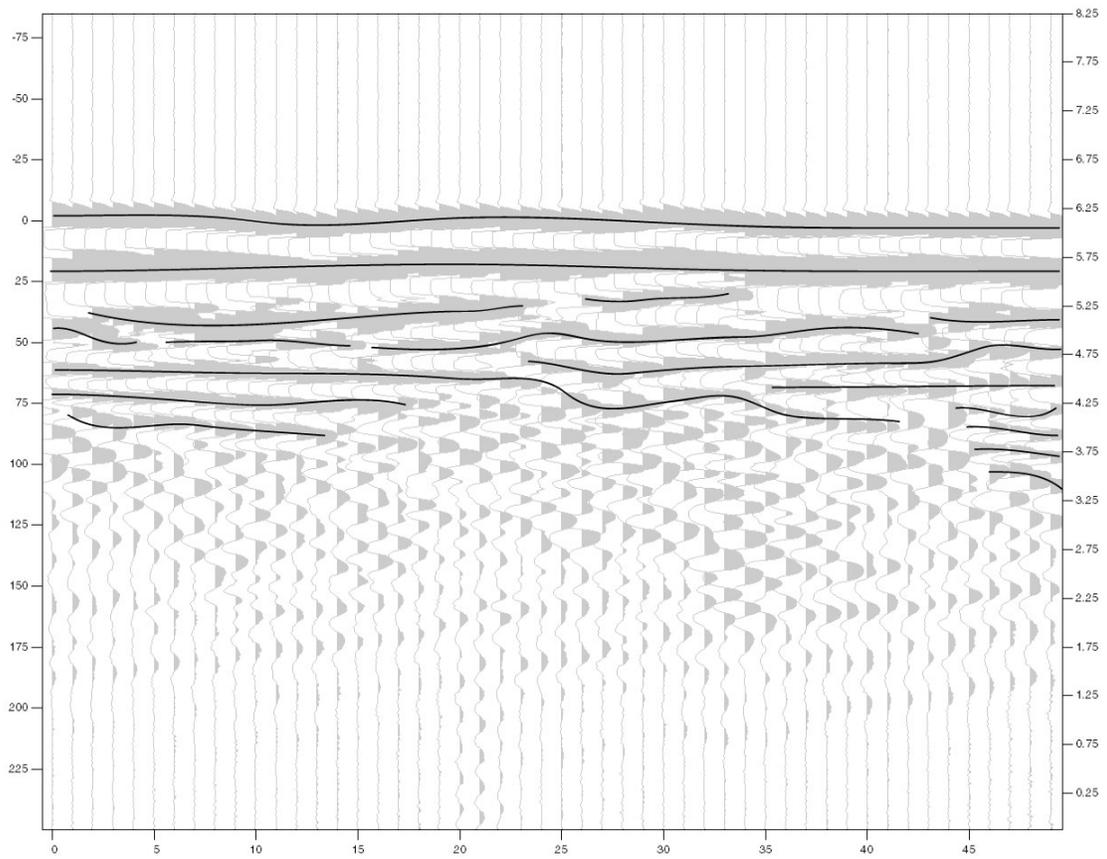


FIGURE 17 : Profil GPR # 65

DISCUSSION

Évolution du delta depuis 1859

Les photos nous montrent que le front deltaïque de la St-François migre suivant axe dévié dans le sens de l'écoulement du lac St-Pierre par rapport à l'axe général de progradation. Les taux de progradation issus de ces photos sont en moyenne de $\pm 60 \text{ m an}^{-1}$ pour la période 1951-1997. Les périodes de retrait sont attribuables à des montées du niveau d'eau du lac St-Pierre et à la prise en charge de l'apport sédimentaire de la St-François par les processus lacustres. Ces changements importants reflètent l'instabilité de l'embouchure de la St-François. Toutefois, cette instabilité doit être nuancée par les fluctuations de niveau d'eau du lac St-Pierre qui altère les distances de migration du front deltaïque. En fait, lors des épisodes de bas niveau, l'émancipation du front deltaïque illustre plutôt, l'importance des processus du lac St-Pierre dans la redistribution des sédiments dans la baie adjacente, entre autres. D'ailleurs, entre 1922 et 1993, la progradation du front deltaïque est accompagnée d'une redistribution importante des sédiments dans la baie adjacente. Le recours à des cartes anciennes, comme celle de 1859, souligne une fois de plus l'instabilité du delta. Entre 1859 et 1922, les bras secondaires ont augmenté leur sinuosité et un déplacement de l'embouchure s'est produit. De plus, les modifications du tracé de la rivière par l'intensification de l'érosion dans les méandres sont clairement illustrées par la formation de l'île St-Joseph (figure 11a), où l'accrétion semble avoir été très active entre 1859 et 1922. D'éventuelles campagnes de géoradar prévues dans ce secteur pourraient éclaircir cet aspect de la dynamique fluviale. Entre 1922 et 1993, le taux de progradation moyen de 11 m an^{-1} est faible par rapport au taux moyen issu de l'interprétation des photos aériennes. Ce taux est presque identique à celui de la Yamachiche, qui a progradé de 800 m entre 1921 et 1997 (figure 5), pour un taux de $10,5 \text{ m an}^{-1}$. En termes de superficie, la progradation du front deltaïque de la St-François est de $6550 \text{ m}^2 \text{ an}^{-1}$ (1922-1993), alors que le delta de la Yamachiche a progradé d'environ $1850 \text{ m}^2 \text{ an}^{-1}$ (1921-1997; Bondue, 2006), soit une croissance trois fois

et demi plus rapide. Il était attendu de constater une différence aussi grande de superficie de progradation, puisque les fronts deltaïques de la Yamachiche ont une forme beaucoup plus allongée dans le sens de la progradation. De plus, comme la taille du bassin de la Yamachiche est beaucoup plus petite que celle du bassin de la St-François, l'apport sédimentaire y est aussi beaucoup moins important. Ces données moyennes ne peuvent être corrélées à des fluctuations de niveau d'eau, et l'ajout de nouvelles photos aériennes dans l'interprétation de l'évolution deltaïque, en augmentant la résolution temporelle de l'étude, permettrait de mieux documenter l'effet des fluctuations récentes de niveau d'eau (figure 9).

Analyse des coupes et datations

Les coupes STF01 et STF02, situées respectivement à 1,5 et 2,5 km en amont de l'embouchure de part et d'autre de la rivière, se résument à trois grandes unités stratigraphiques. Une première de sables massifs de banc d'accumulation, une deuxième de sédiments deltaïques interprétés comme une séquence de migration du chenal et de passage graduel à une plaine d'inondation correspondant à la dernière unité de limons. Bien qu'il y ait des variantes à l'intérieur des unités stratigraphiques analogues, les deux coupes présentent des similitudes claires. Ces trois grandes unités sont les mêmes que sur une coupe typique de la Yamachiche (figure 6). Toutefois, il existe une importante variabilité longitudinale et latérale dans les sédiments du delta de la Yamachiche. Afin de montrer qu'une telle variabilité est aussi présente dans la St-François, il serait intéressant d'ajouter des coupes dans des secteurs ayant subi des modifications au cours du dernier siècle. Par exemple, l'île St-Joseph semble avoir été le témoin de la dynamique de la St-François entre 1859 et 1922. Elle pourrait apporter de nouveaux éléments sur l'évolution du tracé de la St-François et de son delta et sur les apports sédimentaires durant cette période.

La méthode de datation par luminescence optique nous a permis d'ajouter l'aspect temporel à l'évolution du delta. La méthode SAR assume que tous les

grains d'une aliquote ont été remis à zéro, mais il est difficile de l'affirmer avec certitude pour des sédiments fluviaux. Ainsi, quoique l'âge apparent de 767 ans de la coupe STF01 semble dans le bon registre, il est légitime de douter de sa précision. Pour palier au problème, il faudrait dater le matériel grain par grain. De cette façon, nous aurions une meilleure estimation de la proportion des grains mal remis à zéro et une estimation plus juste de l'âge minimal de l'événement sédimentaire à dater. Les dates ^{14}C sont plus vieilles que celles obtenues par OSL. Le matériel daté et la méthode reconnue nous permettent d'affirmer que ces dates, principalement celle du macroreste bien conservé (C03C), sont fiables. Le taux d'accumulation moyen dérivé de l'âge des échantillons datés au radiocarbone oscille donc entre environ 0,11 et 0,14 cm an⁻¹. Ces taux sont relativement faibles par rapport à ceux de la rivière Yamachiche, entre 0,5 et 1 cm an⁻¹. Cette différence est attribuée à l'instabilité de l'embouchure réflétée par l'expansion en plan du delta de la St-François, par opposition à la progradation rectiligne et verticale du delta de la Yamachiche.

Analyse des profils GPR

Tout comme sur les coupes, trois grandes unités sont présentes sur les profils géoradar. Les strates en profondeur pourraient correspondre à des lits d'origine deltaïque, mais une analyse approfondie est nécessaire pour en comprendre les orientations exactes et leur disposition dans l'espace par rapport à d'autres transects. La deuxième unité de stratification complexe suppose une dynamique tout aussi complexe qu'il nous reste à explorer. Les réflexions parallèles de surface correspondent grossièrement aux dépôts de plaine d'inondation et aux alluvions récentes de la rivière. Toutefois, il est difficile d'associer avec certitude les strates décrites sur les coupes et celles déduites des trois premiers mètres des profils géoradar. Le seuil du contraste sédimentaire nécessaire pour un retour de signal du GPR reste difficile à déterminer. D'ailleurs, comme l'amplitude granulométrique dans les sédiments deltaïques est faible, la précision de ces retours de signal n'est pas aussi grande qu'elle l'est dans des dépôts plus hétérogènes. Une étude plus approfondie est

nécessaire avec la comparaison systématique des profils géoradar à des coupes traditionnelles.

Synthèse

La superficie de progradation de la période 1922-1993 nous permet de calculer un taux d'aggradation. En effet, après la mise en place des sables massifs, l'accumulation s'est fait au rythme oscillant entre 0,11 à 0,14 cm an⁻¹. Autrement dit, considérant ces taux d'accumulation et une superficie de progradation de 465 000 m², le taux d'aggradation moyen annuel se situe dans un intervalle de [510-650] m³ an⁻¹. Dans une fenêtre temporelle plus étroite (1921-1948), le taux d'aggradation de la Yamachiche est entre 3 et 4 fois supérieure (1850 m³ an⁻¹). Comme la St-François draine un bassin d'une taille de près de 27 fois supérieure à celui de la Yamachiche, cette différence majeure ne peut être attribuable qu'à un mode contrastant d'expansion du delta, c'est-à-dire en plan par opposition verticale. En effet, comme ce calcul ne prend en considération que la surface de progradation du front deltaïque principal, il est possible que ce taux d'aggradation soit sous-estimé. Il est aussi important de noter que ces estimations sont des moyennes approximatives et qu'il est aussi possible que l'aggradation ait été plus intense durant la période 1921-1948 que pendant la période 1948-1993. Une des explications possibles des différences de taux d'accumulation et d'aggradation des deux deltas est la proportion d'utilisation agricole sur le bassin versant, deux fois plus importante aux abords de la Yamachiche. En effet, la Yamachiche maintient une charge de sédiments en suspension élevée, principalement à cause de l'influence anthropique des activités agricoles sur le bassin versant (Bondue *et al.*, 2006).

CONCLUSION

À son embouchure dans le lac St-Pierre, la rivière St-François a été très dynamique lors du dernier siècle. Entre 1859 et 1922, elle a subi un déplacement de son embouchure, des changements dans le tracé du chenal principal et une méandrisation des chenaux secondaires. S'en est suivie une progradation de 11 m an^{-1} (1922-1993) incluant une période d'instabilité marquée entre 1951 et 1997 ($\pm 60 \text{ m an}^{-1}$), dans un axe déviant près de l'embouchure. Cette déviation souligne l'influence des processus lacustres, comme vagues et courants, dans la redistribution de l'apport sédimentaire de la St-François. Pour sa part, le delta de la Yamachiche a progradé de façon rectiligne à un taux de $10,5 \text{ m an}^{-1}$ (1921-1997), presque égal au rythme de la St-François. Cette similitude est surprenante, compte tenu de la différence dans la forme des deltas et dans la taille des bassins. En termes de superficie, la progradation du delta de la St-François de $6550 \text{ m}^2 \text{ an}^{-1}$ (1922-1993), est plus grande que celle de la Yamachiche à $1850 \text{ m}^2 \text{ an}^{-1}$. La progradation du delta de la St-François est aussi rapide, mais plus étendue que celle de la Yamachiche, où les processus fluviaux semblent en meilleur équilibre avec les processus du lac St-Pierre. Considérant ces observations, une baisse du niveau d'eau du lac St-Pierre provoquerait une progradation rapide du delta, mais vu l'instabilité de la St-François et l'état préliminaire de l'étude, il est difficile de prévoir dans quelle direction.

Bien que l'interprétation des profils GPR soit dépendante d'une connaissance préalable du milieu sédimentaire sondé, l'information récoltée par cette étude montre que l'utilisation du géoradar dans un contexte semblable peut donner des résultats complémentaires intéressants. Le géoradar permet de connaître la stratigraphie rapidement et d'améliorer significativement la couverture spatiale du terrain. D'éventuelles précisions quant à l'interprétation des profils GPR pourraient permettre d'éclaircir la réponse prévue du système fluvial de la rivière St-François suite à des fluctuations de niveau d'eau du lac St-Pierre.

RÉFÉRENCES

- AITKEN, M.J. 1998. An introduction to optical dating: the dating of Quaternary sediments by the use of photon-stimulated luminescence. Oxford: Oxford University Press, 267 p.
- AXELSSON, V. 1967. The Laitaure Delta: A Study of Deltaic Morphology and Processes. *Geografiska Annaler - Physical Geography* 49, 1-127.
- BLOTT, S.J. et PYE, K. 2001. GRADISTAT: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. *Earth Surface Processes and Landforms* 26, 1237–1248.
- BLUM, M.D. et TÖRNQVIST, T.E. 2000. Fluvial response to climate and sea-level change: a review and look forward. *Sedimentology* 47 (s1), 1-48.
- BOGAART, P.W. et VAN BALEN, R.T. 2000. Numerical modeling of the response of alluvial rivers to Quaternary climate change. *Global and Planetary Change* 27, 147-163.
- BONDUE, V., BOYER, C., LAMOTHE, M., ROY, A.G. et GHALEB, B. 2006. L'évolution récente du delta de la rivière Yamachiche (Québec): processus naturels et impacts anthropiques. *Géographie physique et Quaternaire* (soumis avril 2006).
- BOOTH, J.D. 1984. Les Cantons de la Saint-François = Townships of the St. Francis. Montréal: Musée McCord, 83p.
- CANTIN, J.F. et BOUCHARD, A. 2002. Les bases de la modélisation du tronçon Montréal/Trois-Rivières. Rapport scientifique RS-100, Environnement Canada, SMC - Hydrologie, Sainte-Foy, 55 p.
- COLEMAN, J.M. 1981. Deltas: Processes of Deposition & Models for Exploration. Minneapolis: Burgess Publishing Company, 124 p.
- ELLIOTT, T. 1978. Deltas. *In Sedimentary Environments and Facies*, Ed. H.G. Reading, pp. 97–142. New York: Elsevier.
- ENVIRONNEMENT CANADA. 2002. Archives nationales des données hydrologiques, CD-ROM HYDAT version 2000.

- ENVIRONNEMENT CANADA(a), Vulnérabilité de l'eau au changement climatique - Bassin versant Grands Lacs - Saint-Laurent [http://www.ec.gc.ca/water/fr/info/pubs/FS/f_FSA9.htm] (31 mai 2006).
- ENVIRONNEMENT CANADA(b), Normales et moyennes climatiques Canada 1971-2000. [<http://climate.weatheroffice.ec.gc.ca>] (31 mai 2006).
- ENVIRONNEMENT CANADA(c), Relevés hydrologiques du Canada 1972-1994. [<http://www.wsc.ec.gc.ca>] (31 mai 2006).
- FORTIN, P., MARTIN, S. et PLANTE A., 2002. Post-processing, validation and integration of LIDAR data into the St.Lawrence river Digital Terrain Model. Rapport Technique RT-120. Environnement Canada, SMC - Hydrologie, Sainte-Foy, 43 p.
- GALLOWAY, W.E. 1975. Process Framework for describing the morphologic and stratigraphic evolution of deltaic depositional systems. *In Deltas, Models for Exploration*, Ed. M.L. Broussard, pp. 87-98. Houston: Houston Geological Society.
- GÉLINAS, J.P. 1977. Caractéristiques physiques: bassin versant de la Saint-François. Québec: Ministère des richesses naturelles, 103 p.
- HASSAN, M.A. et KLEIN, M. 2002. Fluvial adjustment of the Lower Jordan River to a drop in the Dead Sea level. *Geomorphology* 45, 21-33.
- LAMOTHE, M. et HUNTLEY, D.J. 1988. Thermoluminescence dating of late Pleistocene sediments, St. Lawrence lowland, Québec. *Géographie physique et Quaternaire* 42, 33-44.
- LAMOTHE, M. 1989. A new framework for the Pleistocene stratigraphy of the central St. Lawrence Lowland, southern Québec. *Géographie physique et Quaternaire* 43, 119-130.
- LAMOTHE, M., DULLER, G.A.T., HUOT, S. et WINTLE, A.G. 2001. Measuring a laboratory radiation dose in feldspar using SAR In 1st North American Luminescence Dating Workshop, Tulsa, United States, abstracts with program, p. 14.
- MINISTÈRE DE L'ÉNERGIE ET DES RESSOURCES. 1984. Compilation de la géologie du Quaternaire - région des Appalaches, DV 84-10, (1 : 50 000).

- MORIN, J. et BOUCHARD, A. 2001. Les bases de la modélisation du Tronçon Montréal/Trois-Rivières. Rapport scientifique RS-100, Environnement Canada, SMC - Hydrologie, Sainte-Foy, 56 p.
- MORIN, J., CHAMPOUX, O., MARTIN, S. et TURGEON, K. 2005. Modélisation intégrée de la réponse de l'écosystème dans le fleuve Saint-Laurent : Rapport final des activités entreprises dans le cadre du Plan d'étude sur la régularisation du lac Ontario et du fleuve Saint-Laurent. Rapport scientifique RS-108, Environnement Canada, SMC - Hydrologie, Sainte-Foy, 139 p.
- MURRAY, A.S. et WINTLE, A.G. 2000. Luminescence dating of quartz using an improved single-aliquot regenerative-dose protocol. *Radiation Measurements* 32, 57-73.
- OLLEY, J.M., CAITCHEON, G.G. et MURRAY, A.S. 1998. The distribution of apparent dose as determined by optically stimulated luminescence in small aliquots of fluvial quartz: implications for dating young sediments. *Quaternary Science Reviews* 17, 1033-1040.
- OVEREEM, I., KROONENBERG, S.B., VELDKAMP, A., GROENESTEIJN, K., RUSAKOV, G.V. et SVITICH, A.A. 2003. Small-scale stratigraphy in a large ramp delta: recent and Holocene sedimentation in the Volga delta, Caspian Sea. *Sedimentary Geology* 159, 133-157.
- PELPOLA, C.P. et HICKIN, E.J. 2004. Long-term bed load transport rate based on aerial-photo and ground penetrating radar surveys of fan-delta growth, Coast Mountains, British Columbia. *Geomorphology* 57, 169-181.
- RITCHIE, B.D., GAWTHORPE, R.L. et HARDY, S. 2004. Three-dimensional numerical modeling of deltaic depositional sequences 1: Influence of the rate and magnitude of sea-level change. *Journal of Sedimentary Research* 74, 203-220.
- RITTENOUR, T.M., GOBLE, R.J. et BLUM, M.D. 2003. An optical age chronology of Late Pleistocene deposits in the northern lower Mississippi valley. *Quaternary Science Review* 22, 1105-1110.

- SCHUMM, S.A. 1993. River response to baselevel change: Implications for sequence stratigraphy. *Journal of Geology* 101, 279-284.
- STANLEY, J.D. 2001. Dating Modern Deltas: Progress, Problems, and Pronostics. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 29, 257-294.
- SUMMERFIELD, M.A. 1985. Plate tectonics and landscape development on the African continent. *In* *Tectonic Geomorphology*, Ed. M. Morisawa et J. Hack, pp. 27-51. Boston: Allen and Unwin.
- WALLINGA, J., MURRAY, A.S., DULLER, G.A.T. et TÖRNQVIST, T.E. 2001. Testing optically stimulated luminescence dating of sand-sized quartz and feldspar from fluvial deposits. *Earth and Planetary Science Letters* 193, 617-630.
- WESCOTT, W.A. 1993. Geomorphic Thresholds and Complex Response of Fluvial Systems—Some implications for Sequence Stratigraphy. *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin* 77, 1208-1218.