

**Complément sur les caractéristiques physiques
et chimiques du milieu fluvial**

ANNEXE B-2: Caractéristiques fluviales

1. DESCRIPTION GÉNÉRALE

Le secteur à l'étude est situé sur la rive sud du fleuve Saint-Laurent à cheval entre les municipalités de Lévis et Beaumont

Le littoral est caractérisé par des plis émergés de la plate-forme rocheuse alors que l'estran comprend un champs de blocs déposés sur une distance allant de 200 à 250 m de la rive. Les figures 1A et 1B présentent le littoral de la zone à l'étude. Le roc est très plissé, fracturé et de dureté faible à moyenne selon qu'il s'agit de schiste argileux, de mudstone, de grès ou de conglomérat de calcaire (Harvey et Bélanger, 1996).



Figure 1A) Vue à marée basse du secteur à l'étude du côté *ouest* de la jetée d'Hydro-Québec

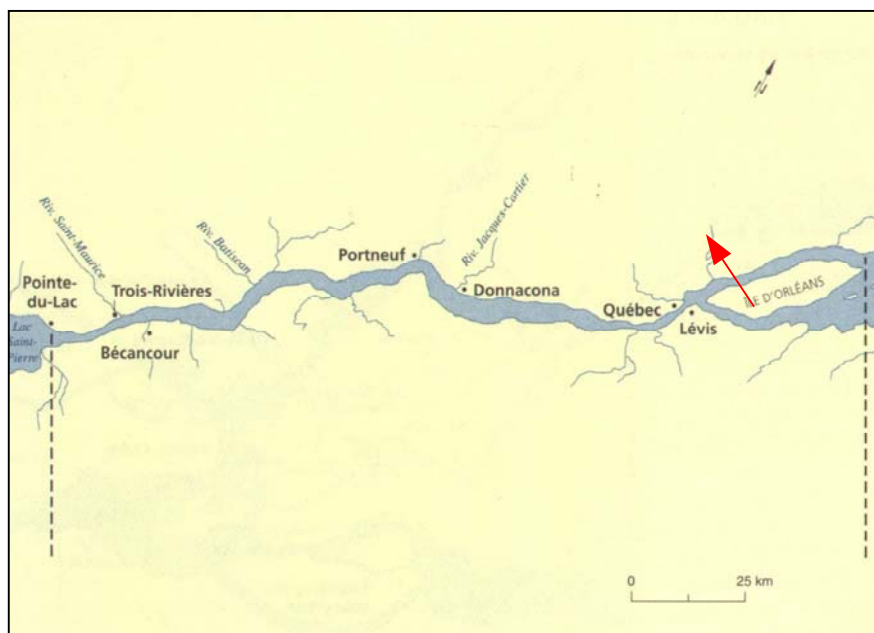


Figure 1B) Vue à marée basse du secteur à l'étude du côté est de la jetée d'Hydro-Québec. Les nombreux blocs glaciels sont présents sur tout l'estran

2. L'ESTUAIRE FLUVIAL

L'estuaire fluvial, qui englobe la zone d'étude, s'étend sur 160 km à partir de l'extrémité est du lac Saint-Pierre (Pointe-du-Lac) jusqu'à la pointe est de l'île d'Orléans (figure 2). Cette région hydrographique est caractérisée par la présence d'eau douce et d'eau légèrement saumâtre, de marées parfois fortes et par un corridor fluvial peu sinueux. La largeur de l'estuaire fluvial varie de 870 m, au pont de Québec, à 15 km à l'extrémité est de l'île d'Orléans. La profondeur du chenal principal sur ce tronçon varie en moyenne de 13 à 40 m. On retrouve des fosses de 21 m à Trois-Rivières-Ouest et de 60 m à Québec. Aux endroits où la profondeur naturelle du chenal est inférieure à 11,3 m un chenal navigable est maintenu par dragage sur une largeur de 240 m afin de permettre aux navires océaniques d'atteindre le port de Montréal.

Figure 2 Limites amont et aval de l'estuaire fluvial du Saint-Laurent du secteur à l'étude (indiqué par la flèche) (Source : CSL, 1996a)



2.1 Marées

Les marées de l'estuaire du Saint-Laurent ont un caractère semi-diurne, c'est-à-dire qu'elles comprennent deux oscillations complètes par jour. Chaque oscillation s'étend sur une période moyenne de 12h25 minutes (Pêches et Océans, 1997). La marée est le facteur le plus important dans le contrôle du niveau d'eau à Québec. L'onde de marée subit une forte amplification dans sa progression dans l'estuaire entre Rivière-du-Loup et Portneuf. C'est dans le secteur de Québec-Lévis que les marées sont les plus importantes de tout l'estuaire du Saint-Laurent. L'amplitude moyenne de la marée à Québec est de 4,4 m; la marée haute extrême atteint plus de 7 m d'élévation soit une amplitude supérieure à 8 m.

La marée à Québec présente la particularité d'être asymétrique. Cette asymétrie se traduit par une durée inégale du flot relativement au jusant. L'asymétrie est causée par des facteurs physiques dont le rétrécissement du fleuve et une diminution de la profondeur du fleuve dans ce secteur. La durée du flot et du jusant est aussi influencée par le débit fluvial. Pour des conditions de marée moyenne et de débit fluvial moyen, l'écoulement complet de la marée montante (le flot) se produit durant 4,5 à 5,5 heures, alors que le reflux (le jusant) dure entre 7,5 et 8,3 heures. L'amplitude des marées moyennes dans la région de Québec est de 4,4 m et de 4,7 m à l'île d'Orléans (tableau 1).

Tableau 1 Données de marée à différents sites d'intérêt (en fonction du zéro marégraphique)

Site	Québec (Lauzon)	Saint-Laurent (île d'Orléans)
Niveau moyen de l'eau (m)	2,6	2,5
Amplitude de marée (m)		
Marée moyenne	4,4	4,7
Grande marée	5,9	6,3
Niveaux d'eau extrêmes (m)		
Bas	-1,3	-0,1
Haut	7,1	6,6
Vitesse maximale des courants (nœuds)		
Flot	3,0	3,0
Jusant	4,0	4,5

(Source : <http://www.lau.chs-shc.dfo-mpo.gc.ca/cgi-bin/tide-shc.cgi>).

2.2 Courants

L'intensité et la direction des courants dans le Saint-Laurent à Québec sont assujetties à la marée et au débit fluvial (Pêches et Océans Canada, 1997). Le débit fluvial dans le Saint-Laurent peut varier largement d'une saison à l'autre. Ces variations entraînent des changements dans la vitesse de propagation de la marée et des temps prédits pour les étales. De plus, les courants de marée sont influencés par la bathymétrie et par la densité des masses d'eau, elle-même liée aux changements de la température et de la salinité.

De nombreuses mesures acquises depuis 1939, de paire avec l'utilisation de modèles de simulation numérique ont permis de réaliser une cartographie des courants du fleuve Saint-Laurent entre Cap de Bon-Désir et Trois-Rivières (Pêches et Océans, 1997). La carte des courants pour la région est présentée aux figures 3 et 4 pour les conditions de flot et de jusant.

Les courants indiqués sont les courants de surface; ils représentent la vitesse et la direction instantanée lors de conditions de marée moyenne en eau libre de glace. Ces courants sont également représentatifs des conditions climatiques moyennes rencontrées durant la

saison estivale (de juin à septembre)¹. De façon générale, les vents moyens produisent des courants d'une intensité faible.

De façon générale, de 3 à 0 heure avant la basse mer à Québec, la vitesse des courants de marée dans le secteur de Beaumont varie de 1 à 2 nœuds² (nd), soit de 0,5 à 1,0 m/s dans la zone côtière (figure 3). Au centre du chenal, la vitesse moyenne du courant atteint 3 à 4 nœuds, soit de 1,5 à 2,0 m/s. De 1 à 2 heures après la basse mer à Québec, les courants sont d'une faible intensité; la vitesse est alors inférieure à 1 nœud (0,5 m/s) le long de la côte et au centre du chenal. Lors du flot, un renversement de la direction des courants se produit au centre du chenal.

De 3 à 2 heures avant la pleine mer à Québec, la vitesse des courants au centre du chenal est de près de 2 nœuds au début du montant et de moins de 3 nœuds une heure après la pleine mer. De 2 à 1 heure avant la pleine mer à Québec, des courants de l'ordre de 2 nœuds longent la côte à l'extrémité aval de la zone d'étude et sont déviés vers le centre du chenal à cause de la morphologie de la côte à l'approche de la jetée d'Hydro-Québec (figure 4). Au centre du chenal les courants atteignent 3 nœuds dû au rétrécissement du chenal.

Tout de suite après la pleine mer à Québec (0 à 1 heure), la vitesse des courants de flot est pratiquement nulle dans la zone côtière et de près de 2 nœuds au centre du chenal. Dans les heures qui suivent, la vitesse des courants de jusant augmente à 3 nœuds 2 heures après la pleine mer, puis à 4 nœuds au centre du chenal 3 à 4 heures après la pleine mer; près de la côte, la vitesse du courant est d'environ 2 nœuds. La vitesse de 4 nœuds au centre du chenal sera maintenue pratiquement durant tout le jusant, jusqu'à la basse mer.

Il est à noter que les variations de courant aux échelles de moins d'un demi-kilomètre ne sont pas prises en compte. C'est la moyenne des courants aux alentours, dans un rayon d'environ un kilomètre, qui est représenté. Par exemple, la présence d'un obstacle tel un rocher, un haut-fond, le rivage, un quai ou un pilier est susceptible d'entraîner une modification de la circulation locale des courants. La présence de la jetée d'Hydro-Québec dans le secteur des travaux projetés à Beaumont est par conséquent susceptible d'entraîner un ralentissement, une déviation ou même une augmentation de la vitesse du courant près de cet obstacle.

Une synthèse des données de vitesse maximale des courants à proximité de Beaumont est présentée au tableau 2. Ces données montrent une différence de un (1) noeud entre la vitesse maximale au site du terminal Ultramar et celle indiquée pour Pointe-de-la-Martinière. La vitesse minimale du courant est semblable aux deux sites.

¹ Ces courants peuvent être utilisés pour représenter le mouvement de la glace flottante en l'absence de toute obstruction. Par contre, la croissance d'un champ de glace en rive peut modifier la distribution des courants. Aussi, la vitesse des courants rapportée représente la limite supérieure de la vitesse à laquelle la glace peut dériver.

² 1 noeud = 1 mille nautique à l'heure = 1,85 km/h = 0,51 m/s.

Tableau 2 Vitesse maximale du courant à proximité du secteur à l'étude

Site	Québec Terminal Ultramar	Pointe-de- la-Martinière
Vitesse maximale du courant (nd)	2,0	3,0
Vitesse minimale du courant (nd)	-2,5	-2,5
Différence de vitesse (nd)	4,5	5,5

(Source : Roche, 2004).

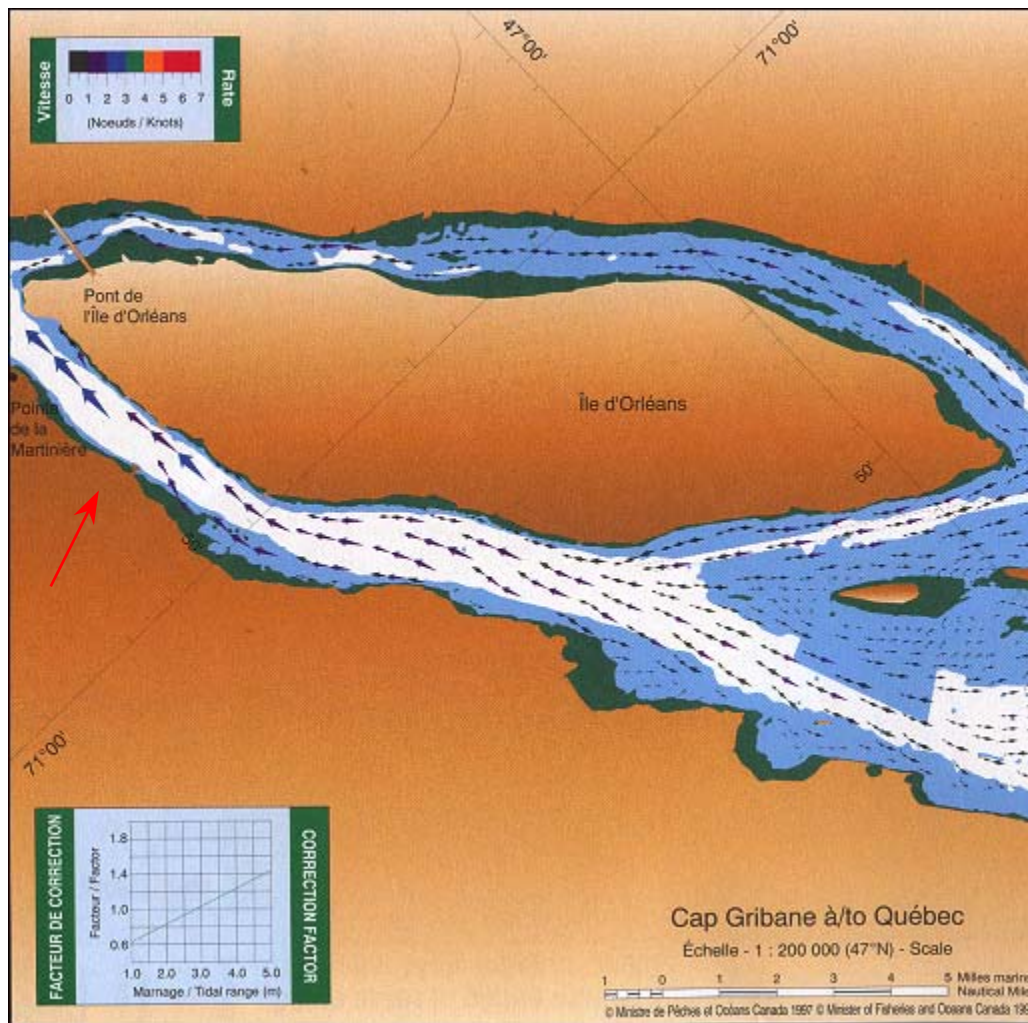


Figure 3 Vitesse du courant dans le secteur fluvial près du site d'étude (indiqué par la flèche) de 1 à 0 heure avant la pleine mer à Québec (Source : Pêches et Océans, 1997)

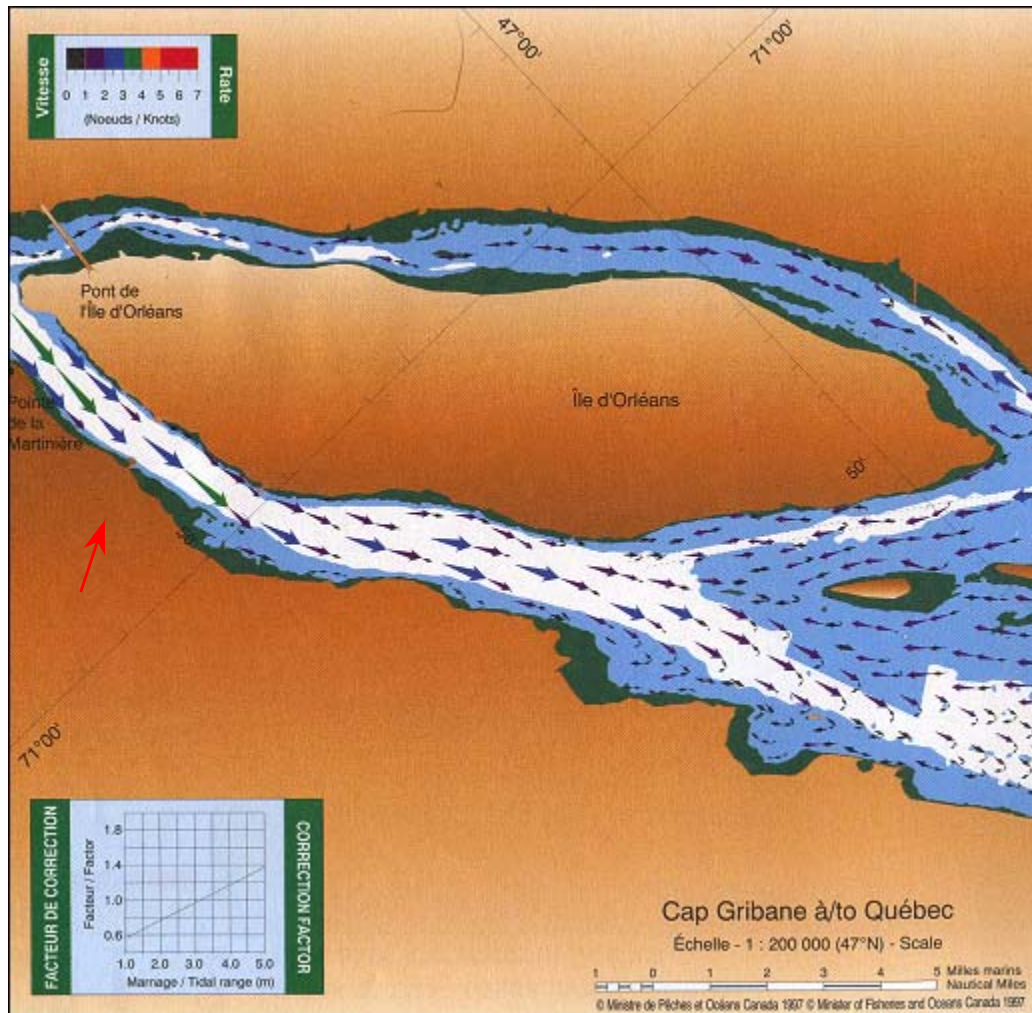


Figure 4 Vitesse du courant dans le secteur fluvial du site d'étude (indiqué par la flèche) fluvial près de Québec, de 0 à 1 heure après la basse mer à Québec
(Source : Pêches et Océans, 1997)

2.3 Vagues

Les vagues sont engendrées par les vents. La course du vent (fetch) sur un plan d'eau, sa durée et sa force déterminent la dimension des vagues au large. Les vagues se propagent à une vitesse qui dépend de la force du vent et de la proximité du fond du fleuve. Sur le fleuve Saint-Laurent, les vagues sont susceptibles de se former du mois d'avril au mois de décembre soit pendant la période d'eau libre de glaces (Drapeau, 1990). La présence de glace pendant la période hivernale limite la formation et la propagation des vagues. Lors de tempêtes, les vents forts en provenance du *nord-est* peuvent contribuer à la formation de vagues d'une hauteur (H) pouvant atteindre deux (2) mètres près de la zone d'étude (BAPE, 1992).

Sur les côtes de Beaumont, le régime des vagues est contrôlé par les vents dominants qui soufflent parallèlement à l'axe du fleuve soit des secteurs *sud-ouest* et *nord-est*. Les prédictions de vagues réalisées dans le secteur de Ville-Guay, rapportent que les vagues excédant 1,5 mètre de hauteur ne sont obtenues que 0,02% du temps soit 1,2 heure durant la période d'eau libre allant du 1^{er} avril au 31 décembre (figure 5). La période de vagues correspondante est de 5 à 6 secondes (Roche, 2004). Les vagues ayant la fréquence la plus élevée sont d'une hauteur significative³ (H_s) inférieure à 0,2 m.

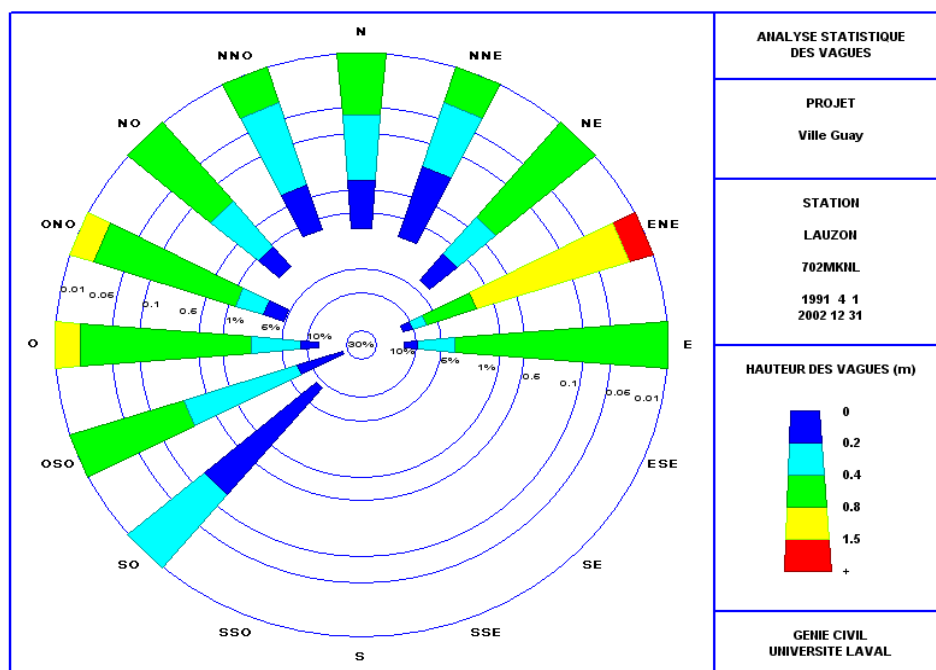


Figure 5 Régime des vagues obtenu pour la région de Ville-Guay
(Source : Roche, 2004).

2.4 Couvert de glace

La croissance de la glace dans le secteur de Québec débute habituellement vers la troisième semaine de novembre et est parfois retardée jusqu'à la fin décembre. La fonte de la glace est normalement observée en mars-avril (Drapeau, 1990). La croissance de la glace dépend de la température de l'air et de l'eau, de la salinité de l'eau, et des précipitations nivales. La combinaison de ces facteurs contribue à la formation de floes⁴ de glace de différentes tailles et formes.

La glace retrouvée dans le fleuve Saint-Laurent est constituée d'un mélange de glace formée localement et de glace provenant de l'amont (PCAI, 2003). Le mouvement des glaces varie avec le mouvement général du courant local (à prédominance vers l'aval), des marées, des obstacles et des vents dominants. L'analyse des zones d'accumulation

³ Correspond à la moyenne des hauteurs des tiers supérieurs de vagues.

⁴ Blocs de glace flottants dont la taille varie de 20 m à plus de 10 km.

potentielle des hydrocarbures a été étudiée en fonction des zones d'accumulation de glace (Procéan, 1993). Cette analyse montre que les zones d'accumulation de glace sur la côte de Beaumont dans le secteur de l'île d'Orléans peuvent atteindre une superficie d'environ 875 km² (dans la zone d'étude) au flot et au jusant (figures 6 et 7).

Les vents dominants en provenance du *nord-ouest*, de paire avec la force de Coriolis, tendent à confiner les floes sur la rive sud du fleuve, d'où la plus forte probabilité de retrouver une plus grande quantité de glace d'une épaisseur plus importante de ce côté du fleuve. La glace peut demeurer attachée à la côte et éventuellement former une banquise dont la largeur est fonction de la largeur de l'estran.

Sur les rives de Beaumont, la présence d'un estran relativement étroit (\approx 200 m de largeur) tend à limiter l'expansion de la banquise vers le large. Cette caractéristique, de paire avec l'importante amplitude de marée, créent une discontinuité à la marge externe de la banquise. D'importants blocs de glace peuvent alors se détacher de la banquise et demeurer échoués jusqu'à la prochaine marée haute, ou même pendant plusieurs cycles de marée. Éventuellement cette glace est emportée avec les courants. Toutefois, la probabilité de rencontrer de larges floes est faible dans le secteur à l'étude dû à l'intervention constante des navires de la Garde côtière canadienne dans le secteur du pont de Québec.

La taille prédominante des floes de glace dans le secteur à l'étude est de 20 à 100 m plus de 50% du temps (PCAI, 2003). Les floes de taille supérieure à 100 m sont de plus en plus présents vers l'aval, avec des fréquences d'observation de 9%, 12% et 26% à Ultramar, Pointe-de-la-Martinière et Saint-Vallier respectivement. La prédominance de floes de taille moindre près de Québec peut être expliquée par la diminution de la largeur du fleuve dans ce secteur ce qui contribue à la fragmentation des floes, soit naturellement soit par l'action des brises-glace de la Garde côtière canadienne.

Depuis 1959, le Service Canadien des Glaces (SCG) produit des cartes décrivant le type de glace à des échelles de couverture variables pour les eaux navigables. De 1982 à 2003, des données ont été recueillies à petite échelle, afin de couvrir le fleuve Saint-Laurent. Les éléments d'information récupérés sur ces cartes ont été analysés pour différents sites d'intérêt dont Pointe-de-la-Martinière. Au total, 1322 cartes de glace ont été analysées pour ce secteur (PCAI, 2003). La série de données présentées ci-après représente des conditions de croissance de glace en eau clame. Ces cartes sont préparées à partir d'observations bihebdomadaires par des patrouilles effectuées en hélicoptère. À titre d'exemple, la carte WIS 91 Port de Québec du SCG présente le détail relatif au couvert de glace pour le 1^{er} avril de l'année 2004 (figure 8). Tel qu'indiqué sur la carte, le secteur d'intérêt était pratiquement libre de glace (moins de 1/10 de glace) à cette période de l'année.

2.5 Concentration totale de glace

Une étude récente réalisée dans la région de Pointe-de-la-Martinière, a permis de démontrer que la concentration totale de glace est de 8/10 plus de 25% du temps (PCAI, 2003). À Pointe-de-la-Martinière, la concentration de glace est légèrement inférieure à ce qui est observé aux sites d'Ultramar et de Saint-Vallier. Les concentrations les plus élevées sont observées en janvier et février. La concentration totale de glace dans ce secteur est

de 6/10 de décembre à mars et les conditions d'eau libre sont rares. La diminution de la largeur du fleuve dans le secteur de Québec relativement aux régions situées plus en aval contribue à l'accumulation de glace dans cette partie fluviale.

2.6 Épaisseur de la glace

À partir des données obtenues aux stations les plus près du site d'étude, l'épaisseur moyenne et maximale (équivalente à la moyenne plus deux fois l'écart-type) de la glace à Ville-Guay a été évaluée respectivement à 40 et 100 cm (tableau 3).

Tableau 3 Estimation de l'épaisseur du couvert de glace à Ville Guay

	Ville Guay
Épaisseur moyenne (cm)	40
Écart type (sd) épaisseur (cm)	30
Épaisseur maximale (cm) = moyenne + 2 sd	100

(Source : Roche, 2004).

Il est à noter que ces estimations ne prennent pas en considération les effets potentiels de la dynamique glacielle, laquelle peut entraîner la formation de crêtes, de glace échouée, de radeaux de glace, d'accumulation de gadoue et les effets de consolidation de la glace. Par conséquent, l'épaisseur réelle de la couverture de glace peut être largement supérieure à l'estimation présentée plus haut. En effet, la faible profondeur d'eau sur l'estran, le site relativement abrité et les variations tidales importantes sont des facteurs pouvant contribuer localement à la formation d'un pied de glace de plusieurs mètres d'épaisseur le long de la côte.

La fréquence la plus élevée (> 50%) d'épaisseur maximale (15 à 120 cm) du couvert de glace est observée de janvier à mars à Ultramar et à Pointe-de-la-Martinière alors que l'épaisseur minimale (< 10 cm) est observée 10% du temps en décembre et mars, ce qui correspond respectivement à la période d'englacement et de fonte (PCAI, 2003).

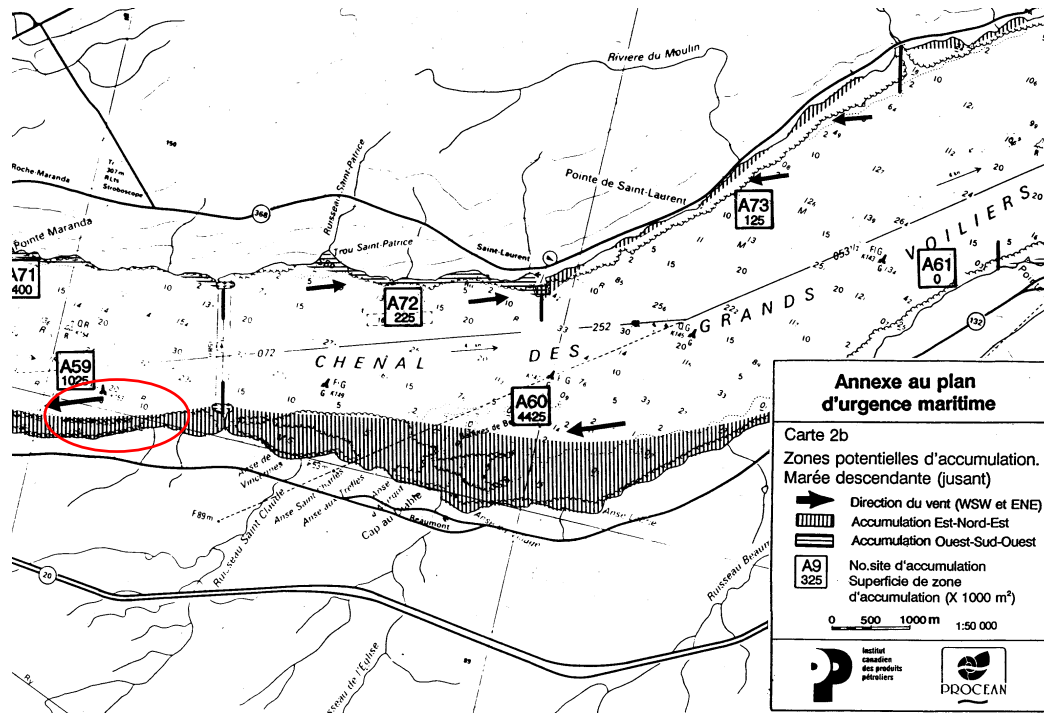


Figure 6 Zones d'accumulation de glace dans le secteur de l'île d'Orléans et de la zone d'étude (zone encadrée) lors de la marée descendante (Source : Procéan, 1993)

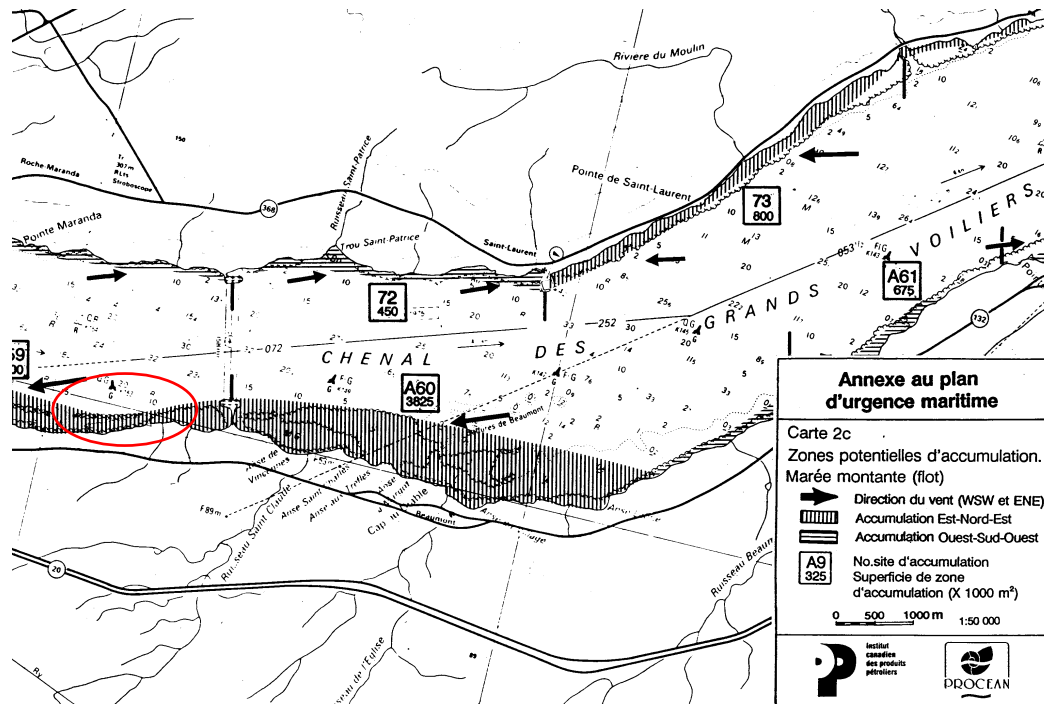


Figure 7 Zones d'accumulation de glace dans le secteur de l'île d'Orléans et la zone d'étude (zone encerclée) lors de la marée montante (Source : Procéan, 1993)

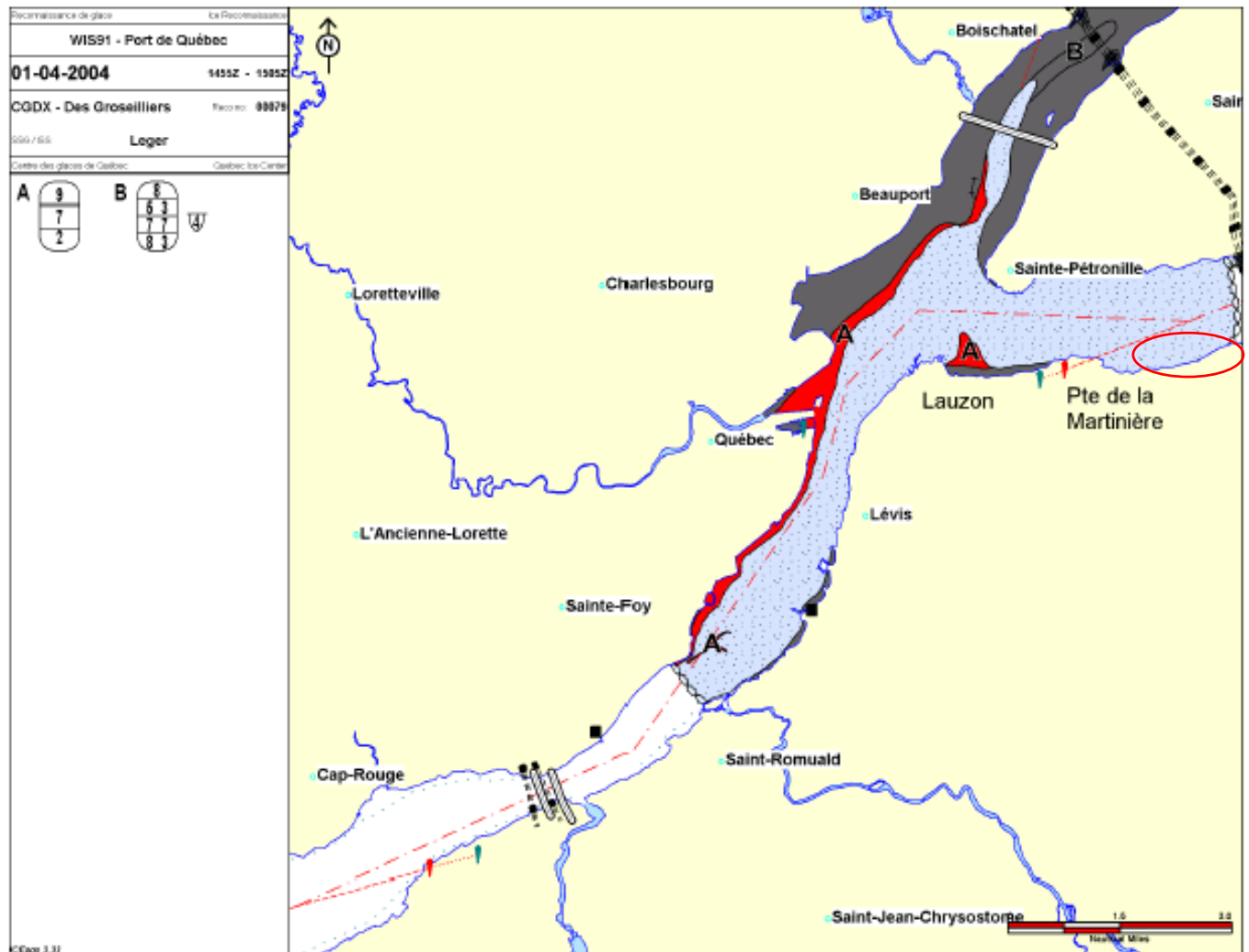


Figure 8 Conditions de glace rencontrées le 1^{er} avril 2004 dans le secteur de Québec. La superficie du secteur à l'étude (zone encadrée) était libre de glace (< 1/10 de glace) à cette période de l'année
 (Source : http://ice.ec.gc.ca/sid/WIS91C/20040401163914_WIS91C_0001369081.pdf)

2.7 Bathymétrie

La figure 9 présente la bathymétrie du secteur à l'étude localisé à environ 500 mètres de la rive sud de l'île d'Orléans, dans un passage étroit du fleuve Saint-Laurent (≈ 2 km). Le chenal de navigation normal, le chenal des Grands Voiliers, est situé du côté *sud* de l'île d'Orléans. La bathymétrie dans le secteur est caractérisée par un estran⁵ de faible pente d'une largeur moyenne de près 225 m, la largeur maximale (L_{max}) de l'estran étant de 340 m et la largeur minimale (L_{min}) de 80 m du côté *ouest* de la jetée. À l'*est* de la jetée, la largeur moyenne de l'estran dans la zone d'étude est de 200 m (L_{max} = 300 m et L_{min} =

⁵ Zone alternativement couverte et découverte par la marée.

100 m). Le niveau des basses eaux (zéro marégraphique équivalent à l'élévation géodésique de $-2,0$ m) correspond à la limite externe d'un champ de blocs glaciels omniprésent sur toute la zone d'étude.

Au-delà de la limite externe du champ de blocs, la profondeur passe rapidement de 0 à 10 mètres sur une distance variant entre 100 à 200 m. La profondeur maximale qui caractérise la zone d'étude est de 32 mètres dans le chenal des Grands Voiliers. Cette profondeur est atteinte à environ 700 m de la limite externe de la zone intertidale.

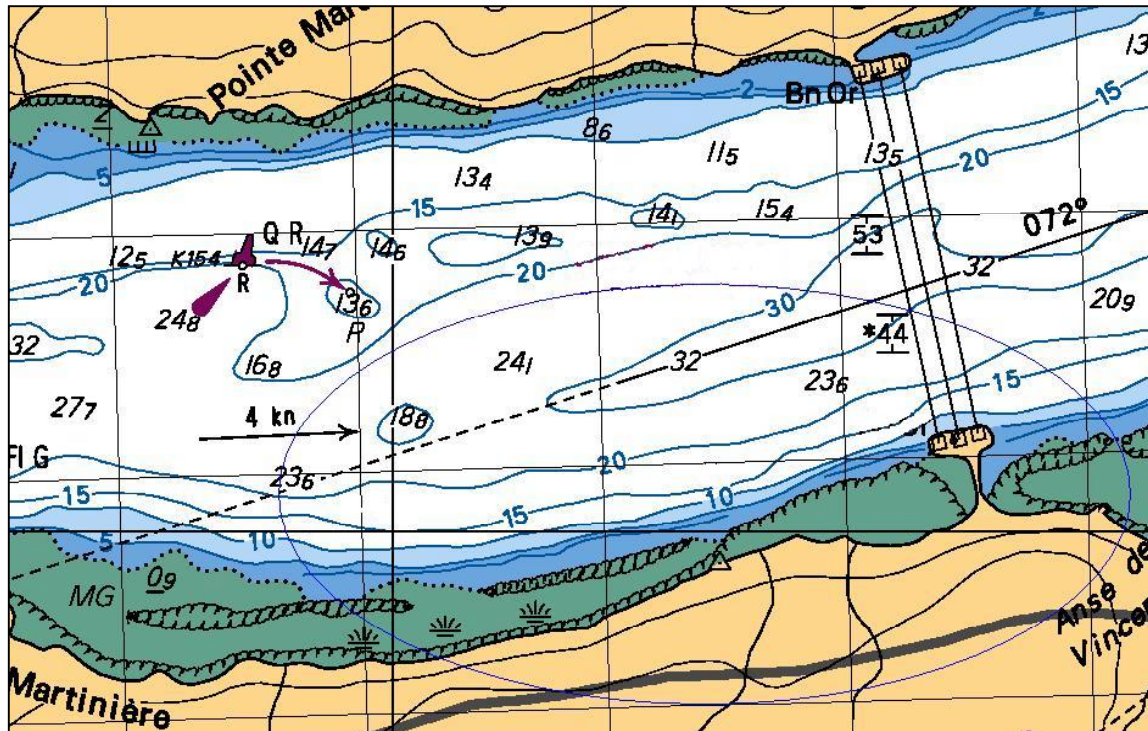


Figure 9 Bathymétrie du secteur à l'étude (zone encadrée). Les isobathes représentent les profondeurs relativement au zéro marégraphique (Source : Service Hydrographique du Canada, 2004, carte marine 131702)

2.8 Le débit du fleuve

Certains facteurs influencent localement les niveaux d'eau et le débit du Saint-Laurent soit les précipitations, l'évaporation, le ruissellement, les embâcles de glace, la présence d'herbiers denses, les marées, les vents, etc. À Québec, le débit moyen du fleuve est de $12\,309\text{ m}^3/\text{s}$. Cette eau provient des Grands Lacs (62%) et des tributaires du Saint-Laurent entre les grands Lacs et Québec (38%). Les tributaires, qui transportent une portion significative des eaux de ruissellement et qui débouchent dans le secteur Québec-Lévis, n'augmentent ce débit que d'environ 2%. En aval de Québec, 90% du débit emprunte le

chenal des Grands Voiliers alors que le reste s'écoule dans le chenal de l'île d'Orléans. La crue⁶ moyenne est de 21 000 m³/s et l'étiage moyen est de 9 000 m³/s (figure 10).

Les niveaux d'eau de l'estuaire et du golfe sont principalement influencés par les vents forts et les marées, et les variations inter-annuelles y sont faibles. Les écarts de niveaux présentent de grandes variabilités d'un endroit à l'autre du tronçon fluvial à cause de l'apport des tributaires et des caractéristiques morphométriques de la section transversale du fleuve (CSL, 1997).

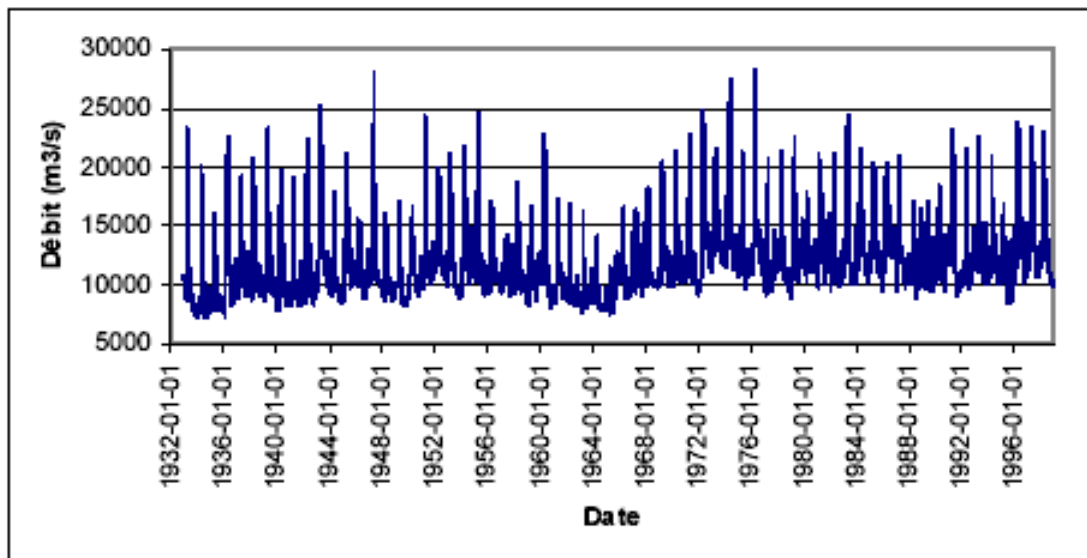


Figure 10 Série hebdomadaire des débits reconstitués sur le fleuve Saint-Laurent à Québec de 1932 à 1996
(Source : Bouchard et Morin, 2000)

⁶ La crue survient au printemps lors de la fonte des neiges.

3. PHYSICO-CHIMIE DES EAUX FLUVIALES

Dans le secteur de Québec, la marée exerce une influence de plus en plus grande, ce qui se traduit par un renversement du courant à marée montante et un effet de mélange accru des masses d'eau. Dans le secteur de Québec-Lévis, ce mélange produit une masse d'eau caractérisée par le mélange final des eaux brunes en provenance des rivières de la rive nord du fleuve, des eaux vertes des Grands Lacs et des tributaires de la rive sud en aval du Lac Saint-Pierre (Fortin et Pelletier, 1995). Ces eaux demeurent douces jusqu'à l'extrémité est de l'île d'Orléans et la salinité (S) des eaux fluviales dans le secteur à l'étude demeure inférieure à 2 USP.

La figure 11 dépeint les conditions physico-chimiques moyennes des eaux de l'estuaire moyen du fleuve Saint-Laurent (figure 11A, B et C). On note que dans le secteur à l'étude, la salinité estivale des eaux fluviales est de 0,5 à 2,0 USP (Gagnon, 1995; Gagnon et al., 1998). Dans cette portion de l'estuaire, la température estivale des eaux fluviales est d'environ 20°C et les concentrations de matières en suspension (MES) généralement faibles (1 à 10 mg/L) mais peuvent atteindre 15 à 20 mg/L (Frenette et al. 1989; Gagnon, M., 1995).

En aval de la zone d'étude, dans l'estuaire moyen, l'influence de la marée sur le type d'écoulement fluvial contribue à la formation d'une zone de turbidité élevée où les concentrations en MES varient généralement de 25 à 70 mg/L et peuvent atteindre 200 mg/L (d'Anglejan, 1990). Cependant ces conditions varient beaucoup en fonction du débit et de la marée de sorte que la salinité et le bouchon de turbidité maximal peuvent s'avancer beaucoup plus loin vers l'amont à la faveur de débit fluvial faible, de forte marée et de forts vents d'est. Il est à noter que le bouchon de turbidité ne rejoint pas le site d'implantation de la jetée.

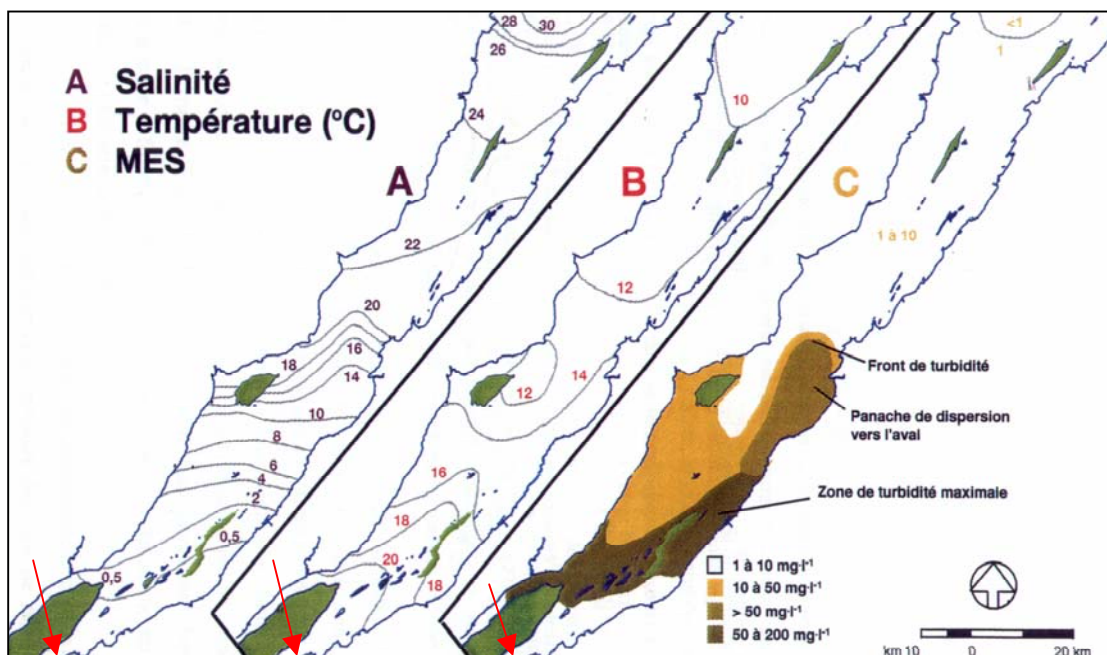


Figure 11 Distribution estivale des caractéristiques physico-chimiques des eaux de l'estuaire moyen dans le fleuve Saint-Laurent. Les flèches indiquent la localisation approximative du secteur à l'étude (Source : Gagnon et al., 1998)

Les résultats de l'analyse d'échantillons d'eau récoltés sur une base journalière de 1989 à 1991 en face de la ville de Québec ont été examinés (Barbeau et al., 1993). Les résultats montrent que les concentrations de MES varient de 8 mg/L en moyenne pendant l'hiver, à 30 mg/L au printemps. Les valeurs estivales sont de 10 à 15 mg/L alors que les valeurs obtenues en automne varient de 14 à 19 mg/L. Les concentrations maximales sont observées au printemps et sont d'environ 100 mg/L. Ces valeurs élevées correspondent à des épisodes de forts courants à l'exception de la période automnale où de telles valeurs sont obtenues indépendamment de l'intensité des courants. Les tributaires de la rive sud dans le secteur de Lévis, principalement les rivières Chaudière (valeur estimée de 23 000 t/a; Frenette et al., 1989) et Etchemin (valeur estimée de 10 000 t/a; Frenette et al., 1989), transportent la moitié de la charge sédimentaire à Lévis pendant les périodes de faibles concentrations en MES et plus du deux-tiers pendant les périodes de fortes concentrations. Les concentrations de matières en suspension pour le secteur de Lévis sont présentées à la figure 12. L'augmentation des concentrations de MES au printemps et à l'automne est évidente pour les deux années d'échantillonnage, ce qui suggère un phénomène récurrent naturel.

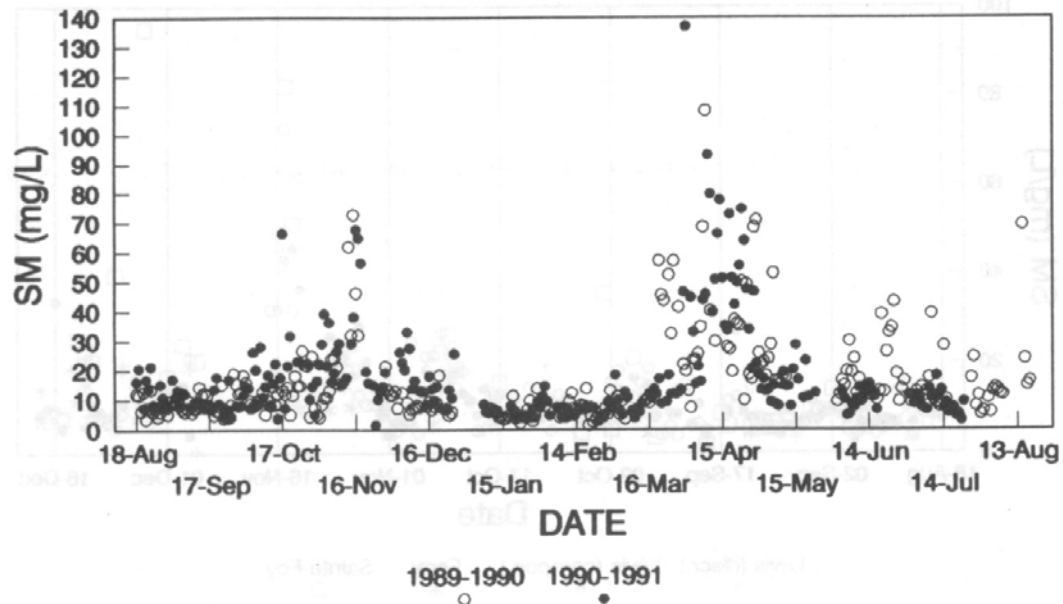


Figure 12 Concentrations de matières en suspension (suspended matter - SM) du fleuve Saint-Laurent, dans le secteur de Lévis de 1989 à 1991
(Source : Barbeau et al., 1993)

4. DYNAMIQUE SÉDIMENTAIRE

La zone à l'étude est située dans l'estuaire fluvial. Les conditions hydrodynamiques prévalant dans cette portion de l'estuaire sont typiquement estuariennes propices à la formation de marais (Drapeau, 1990). Les marées, les vagues et la glace exercent un effet dominant sur les processus sédimentaires dans cette portion de l'estuaire. La présence de la glace d'estran joue à la fois un rôle protecteur contre l'érosion (Drapeau, 1990) et un rôle d'agent de transport des sédiments incorporés dans le couvert de glace (Dionne, 1971). Le cycle saisonnier d'érosion et de sédimentation peut être décrit de la façon suivante : au printemps, la fonte du couvert de glace laisse les zones intertidales sans protection contre l'érosion par les vagues et la crue du fleuve Saint-Laurent. L'action de ces facteurs résulte en une période d'érosion qui s'étale de la mi-avril à la mi-juin (Sérodès et Troude, 1984). La croissance estivale de la végétation, de paire avec la diminution de l'intensité des vagues et des courants en période estivale contribue à la sédimentation en milieu côtier et ce, jusqu'en octobre où la disparition de la végétation favorise à nouveau l'érosion.

Dans un cours d'eau le transport des particules se fait par deux modes principaux. Les matériaux les plus fins sont transportés en suspension alors que les matériaux grossiers sont transportés près du fond. Les matériaux de taille intermédiaire sont transportés par un mode mixte appelé saltation, se déplaçant à la fois sur le fond et en suspension. L'érosion, le transport et la sédimentation des particules sont fonction de la vitesse du courant à laquelle elles sont soumises.

Chaque année, près de 6,5 millions de tonnes de matières en suspension entrent à la tête du secteur Québec-Lévis, dont 70% lors de la crue printanière. Une portion importante (65%) de ces sédiments provient de l'érosion des berges et du lit du fleuve Saint-Laurent (Rondeau et al., 2000). Le long du cours principal du fleuve, en amont de Québec et dans le chenal des Grands Voiliers, plusieurs facteurs dont le débit du fleuve, les marées, les vagues, les courants, le mélange et le débit des eaux fluviales influencent la dynamique sédimentaire; entre autres la forte turbulence des eaux empêche le dépôt des matières en suspension sur le fond du fleuve et sur les battures (Gagnon, 1995). Considérant les vitesses moyennes des courants dans le secteur d'étude, les particules fines sont constamment transportées par le courant si elles se retrouvent dans le chenal. Par contre, la vitesse des courants étant beaucoup plus faible près de la côte et particulièrement dans les anses, la zone intertidale constitue généralement un milieu favorable à la sédimentation des particules.

Dans le tronçon et l'estuaire fluvial du Saint-Laurent, des vitesses supérieures à 0,3 m/s sont généralement rencontrées au centre du fleuve. De telles vitesses ne permettent pas la sédimentation des particules fines. La sédimentation de ces particules s'effectue plutôt dans les secteurs abrités tels les herbiers, les baies, les ports et les marinas où les vitesses du courant sont inférieures à 0,1 m/s.

À titre d'exemple, les zones de transport et de sédimentation potentielles dans la région de Québec sont présentées à la figure 13. Quoiqu'une faible sédimentation des particules soit possible pendant les étales de marée, les rives dans le secteur de Beaumont ne sont pas caractérisées par la sédimentation des matières en suspension (MES) probablement due à la proximité du chenal de navigation et de la falaise qui limitent la largeur de l'estran. Cette zone côtière est plutôt caractérisée par le transport et l'érosion (CSL, 1996a).

Les zones propices à la sédimentation et l'accumulation des particules se retrouvent plus à l'est dans les grandes baies et anses comme par exemple, à l'est de Saint-Michel-de-Bellechasse où les zones de sédimentation peuvent atteindre 1000 mètres de largeur. En aval de l'île d'Orléans, la présence d'eau salée (saumâtre) modifie les qualités physico-chimiques de l'eau du fleuve et favorise l'agglomération et éventuellement la sédimentation des particules fines en suspension. C'est d'ailleurs dans ce secteur que les dragages pour dégager la voie maritime sont les plus intensifs dans la région même si dans ce cas il s'agit plutôt d'accumulation de sable sous forme de dunes. Comme en témoigne la distribution des sédiments de surface dans la région de Québec-Lévis et de l'île d'Orléans, les sédiments à texture grossière dominant dans cette partie de l'estuaire fluvial (figure 14). De plus, la zone intertidale du secteur à l'étude est caractérisée par la présence d'un substratum rocheux alors que le lit du chenal est une zone d'accumulation temporaire caractérisée par des sables et graviers.

4.1 Transport sédimentaire par la glace

La glace de rivage incorpore les sédiments sous-jacents dans la matrice de glace. Le balancement des marées joue un rôle important sur l'incorporation des sédiments sous le pied de glace (Dionne, 1970). L'action la plus spectaculaire des glaces est le transport de blocs glaciels et leur délestage sur l'estran. Les blocs pouvant être transportés par la glace peuvent atteindre 7,25 m de long et peser environ 176 tonnes (Dionne, 1988) quoique la majorité d'entre eux mesurent entre 1 et 2,5 m. Le secteur à l'étude est caractérisé par un champs de blocs glaciels déposés sur l'estran et émergés à marée basse et témoignant de l'action importante des glaces dans la zone côtière de ce secteur (figure 15).

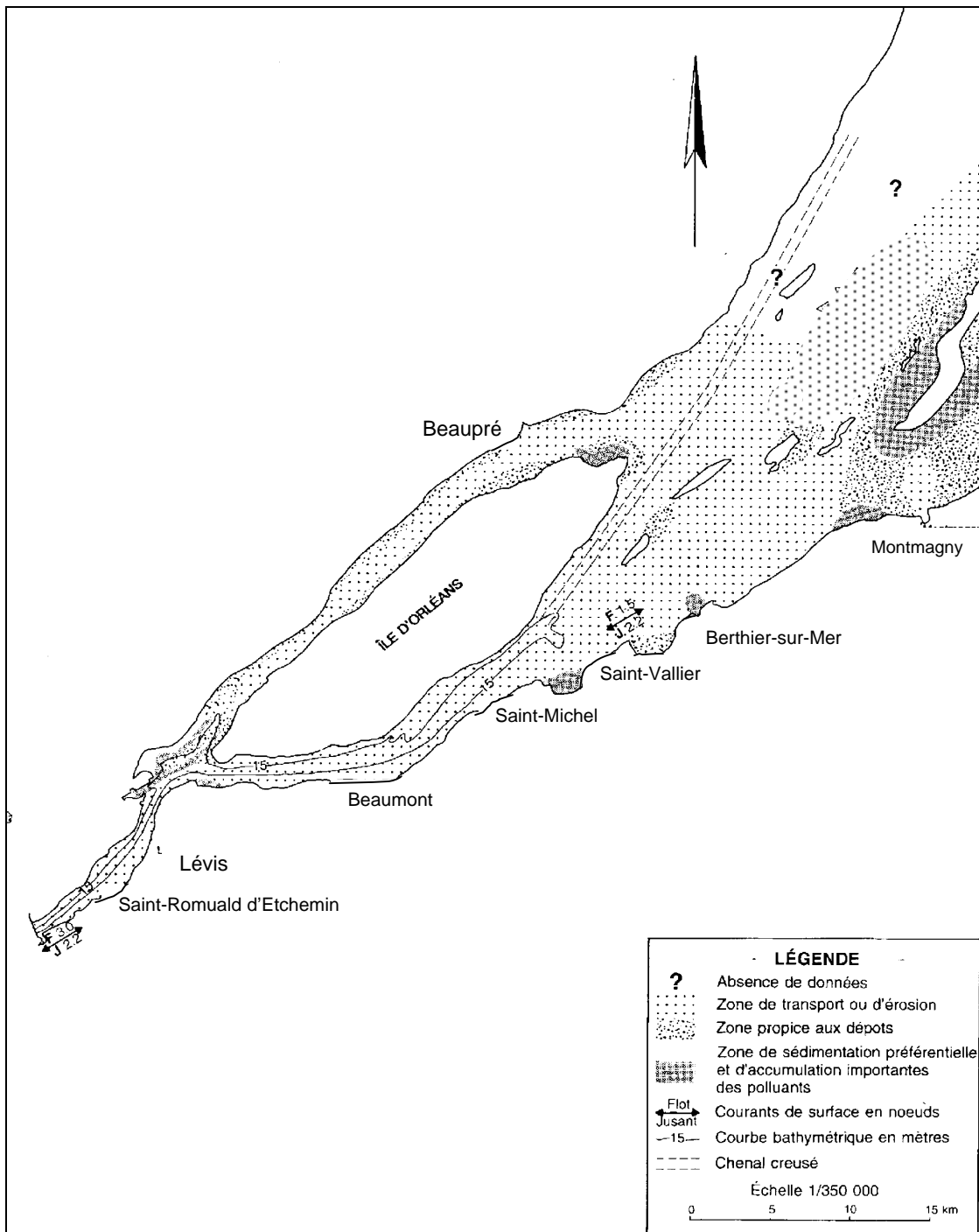


Figure 13 Zones de transport et de sédimentation potentielles dans le fleuve Saint-Laurent, région de Québec
(Source BAPE, 1992)

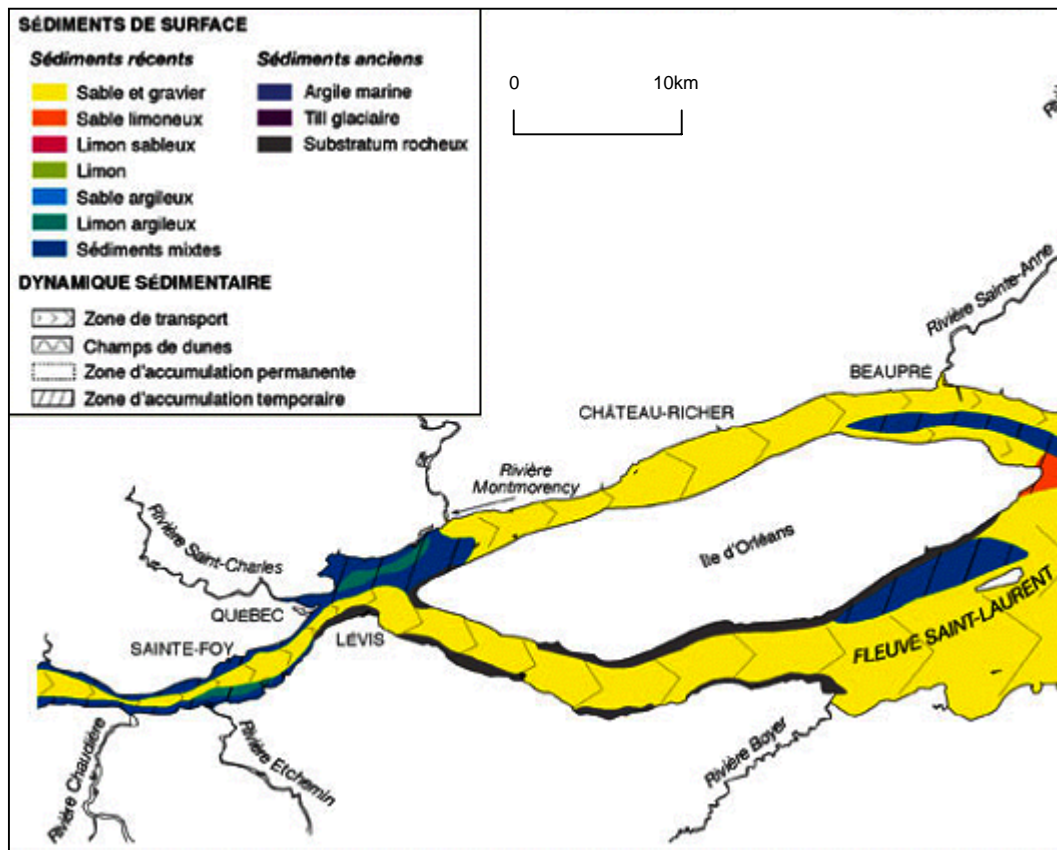


Figure 14 Distribution des sédiments de surface dans le secteur fluvial de Québec-Lévis et Île d'Orléans
(Source : CSL, 1997)

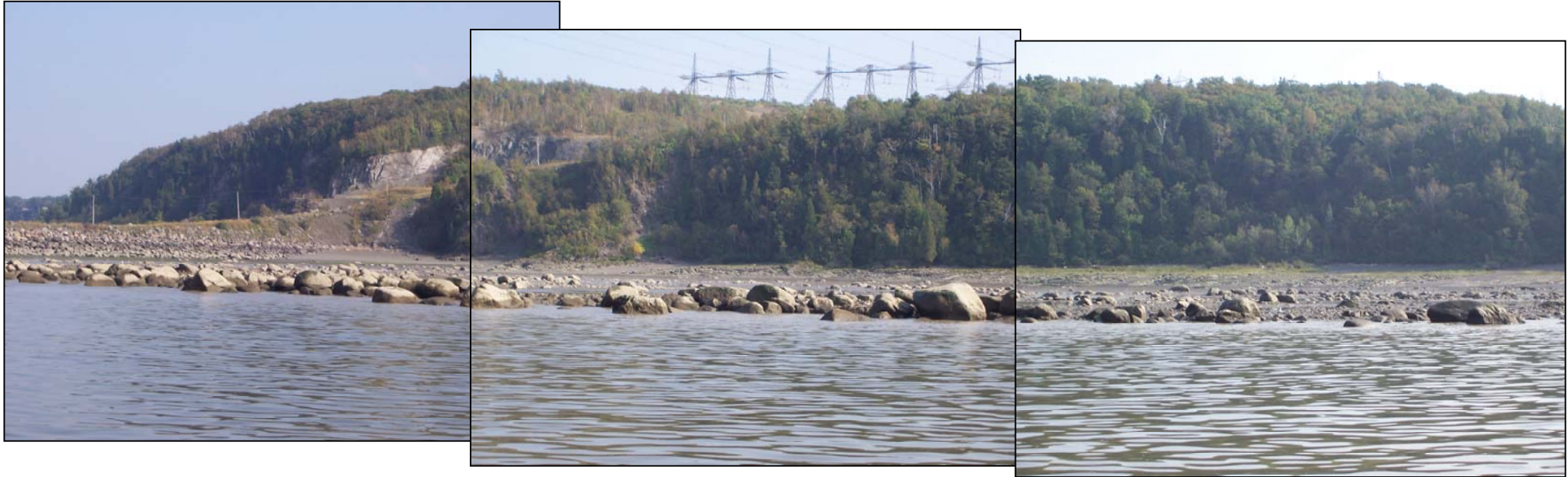


Figure 15 La zone intertidale caractérisant le secteur à l'étude est parsemée de blocs glaciels dont la densité augmente de la côte vers le large

5. QUALITÉ DE L'EAU

5.1 Sources de pollution

Les relevés de la qualité de l'eau dans le fleuve indiquent que les sources potentielles du secteur Québec-Lévis sont les eaux du fleuve elles-mêmes et celles de ses tributaires, les émissaires d'eaux usées municipales et industrielles et les eaux de ruissellement des zones portuaires (Gagnon, 1995; Fortin et Pelletier, 1995). Les industries sont habituellement les principales sources de produits toxiques, tandis que les rejets municipaux contiennent des matières en suspension, des substances organiques nutritives, des coliformes fécaux ainsi que des métaux.

La qualité de l'eau peut être définie en fonction des indicateurs choisis pour évaluer la qualité des eaux douces et salées. Les indicateurs de qualité sont liés à quatre (4) usages particuliers soit la vie aquatique, la consommation humaine, les activités récréatives et la cueillette des mollusques (MENVIQ, 1992). Des critères de qualité de l'eau ont été établis pour chacun des principaux paramètres physico-chimiques et microbiologiques qui caractérisent la qualité d'une eau. À ce jour, de nombreuses études portant sur la qualité des eaux du fleuve Saint-Laurent et de la région de Québec-Lévis ont été réalisées en fonction des différents usages (Gagnon, 1995; CSL, 1992; CSL, 1996a, 1996b; CSL, 1997, Cossa et al., 1998; Hébert, 2002). Ces études ont été effectuées sur des données couvrant une période allant du milieu des années 1970 à 2002.

De façon générale, l'historique de la qualité de l'eau de la région de Québec indique que la turbidité ne respectait pas les critères de qualité de 1978 à 1988. Les données récoltées dans le secteur Québec-Lévis entre 1985 et 1992 montrent que le seuil relatif à l'eau brute (5 UNT) a été dépassé plus de 62% du temps (Fortin et Pelletier, 1995; CSL, 1996a). À Sainte-Foy et Lauzon, les fréquences de dépassement du critère de qualité lié à la turbidité sont légèrement supérieures à ce qui est observé dans le chenal de navigation (chenal des Grands Voiliers). Toutefois, la turbidité relativement élevée est une caractéristique propre du secteur. Une valeur de turbidité moyenne de 6,0 UNT est rapportée pour les eaux de la région de Québec (CSL, 1996a).

Entre 1985 et 1992, les teneurs moyennes en phosphore total variaient entre 0,034 et 0,047 mg/l. Les données recueillies entre la période de 1990 à 1994 ont montré une diminution importante du phosphore. Toutefois, la fréquence de dépassement du critère de qualité relatif au phosphore (0,03 mg/L) est demeurée supérieure à 40% à l'exception du secteur de Saint-Romuald. Entre 1995 et 2001, dans le secteur de Québec, on observe une diminution des concentrations de phosphore d'environ 30%, soit de 0,032 à 0,022 mg/L (tableau 4). Cette valeur est pratiquement équivalente au critère de qualité de protection de la vie aquatique (0,2 mg/L). Cette baisse est toutefois attribuée à une diminution du débit fluvial et par conséquent du ruissellement et de l'érosion et non à des interventions d'assainissement ou à une diminution des rejets ponctuels (Hébert, 2002). Étant donné l'hydrodynamisme du fleuve dans la région de Québec, l'eutrophisation ne constitue pas un problème potentiel. Entre 1995 et 1996, dans le chenal de navigation, la fréquence de dépassement du critère lié au phosphore varie entre 30% et 40% (Hébert, 1999).

Les analyses relatives à la quantité de coliformes fécaux ont été effectuées pendant les saisons estivales de 1990 à 1993 (juillet à octobre). De façon générale, ces données

mettaient en évidence une contamination bactérienne causée par les rejets urbains (Fortin et Pelletier, 1995). En aval des émissaires d'eaux usées, la fréquence de dépassement des critères était de 40% ou plus dans les stations du chenal des Grands Voiliers. De 1990 à 1994, une nette amélioration de la qualité bactérienne aux prises d'eau de Lévis et Saint-Romuald est observée. Depuis, les données présentées par Hébert (2002) rapportent qu'à la hauteur de Québec, les concentrations de coliformes fécaux n'ont pas changé de façon significative entre 1995 et 2001. Il est à noter que la qualité des eaux du fleuve à la hauteur de Québec est jugée satisfaisante, aucun dépassement du critère relatif à la baignade n'ayant été dépassé ou atteint à Sainte-Foy et Lauzon entre 1995 et 1996 alors que les fréquences de dépassement de ce critère variaient entre 20% et 50% dans le chenal de navigation (Hébert, 1999).

Les métaux qui ont dépassé fréquemment le critère d'eau brute⁷ dans le secteur Québec-Lévis dans les années 1980 sont le fer, l'aluminium et l'arsenic. Les teneurs en fer enregistrées au cours de la période de 1985-1990 ont dépassé le critère de qualité pour l'eau brute destinée à l'approvisionnement en eau potable. Au cours de cette même période, les teneurs en manganèse ont dépassé occasionnellement le critère le plus sensible, soit celui relatif à l'eau brute (< 0,05 mg/L) dans le chenal de navigation. Les résultats des travaux effectués par Cossa et al. (1998) sur des relevés effectués en 1995 et 1996 montrent que parmi ces métaux, seulement l'arsenic présente un dépassement du critère le plus restrictif, soit le critère de prévention de la contamination (eau et organismes aquatiques) (tableau 4). En ce qui a trait à l'aluminium, la très grande majorité des données obtenues entre 1985 et 1990 dépassait le critère de l'eau brute (0,2 mg/L). Ces teneurs sont en partie attribuées à la composition des roches du Bouclier canadien (Fortin et Pelletier, 1995). Les valeurs indiquées au tableau 4 montrent que la quantité moyenne d'aluminium, mesurée dans le secteur de Québec entre 1995 et 1996, est inférieure au critère le plus restrictif indiqué (87 µg/L - critère de protection de la vie aquatique). Les teneurs en arsenic mesurées entre 1985 et 1990 étaient élevées partout et dépassaient le critère de l'eau brute (0,022 µg/L). Les données obtenues pour les années 1995 et 1996 montrent également que la concentration moyenne d'arsenic est supérieure au critère de prévention de la contamination des organismes aquatiques (0,67 µg/L) (tableau 4).

Les teneurs en nickel n'ont dépassé aucun critère pour la période de 1985-1990. À ce moment, la teneur maximale (0,0038 mg/L) était atteinte dans le chenal de navigation (critère = 0,0134 mg/L). Les résultats présentés au tableau 4 montrent que dans le secteur de Québec, la concentration moyenne de nickel atteint 0,6 µg/L, ce qui est en dessous des valeurs mesurées auparavant.

De 1985-1990, les teneurs en cadmium total variaient de 0,1 µg/L à 3,3 µg/L. Cette dernière valeur a été observée le long de la rive sud, dans le chenal de navigation. Dans le secteur de Québec, la concentration de cadmium était inférieure à 0,1 µg/L. Entre 1995 et 1996, une valeur moyenne de 0,011 µg/L a été mesurée (tableau 4) ce qui est largement inférieur aux valeurs obtenues quelques années plus tôt pour ce secteur. Cette valeur est inférieure au critère indiqué de prévention de la contamination de l'eau et des organismes aquatiques (5,0 µg/L; tableau 4).

⁷ Ce critère signifie la concentration aqueuse d'une substance à ne pas dépasser dans le milieu pour préserver les usages liés à l'alimentation en eau potable et à la consommation d'organismes aquatiques vivant dans ce même plan d'eau (Gagnon, 1995).

Entre 1985 et 1990, les teneurs en cuivre ont montré des dépassements à toutes les stations de mesures dans le secteur de Québec-Lévis. Les données de 1985 à 1990 indiquaient des dépassements du critère de toxicité chronique pour la vie aquatique (2,7 µg/L) relativement aux valeurs mesurées dans les chenaux de l'île d'Orléans (CSL, 1996a). Toutefois, les teneurs en zinc n'ont pas dépassé les critères de qualité au cours de cette période. D'après les concentrations moyennes obtenues pour le zinc, les teneurs obtenues entre 1995 et 1996 n'ont pas dépassé le critère de qualité de protection de la vie aquatique (tableau 4). Les résultats montrent une diminution de ces valeurs relativement au critère de toxicité chronique pour la vie aquatique. En ce qui a trait au plomb, les concentrations obtenues durant la période de 1985-1990 ont montré un dépassement du critère de toxicité chronique pour la vie aquatique à une seule reprise, soit au centre du chenal de navigation où une teneur de 4,2 µg/L a été obtenue (Fortin et Pelletier, 1995). Les teneurs moyennes récentes pour le plomb montrent un dépassement du critère pour la protection de la vie aquatique (8,5 µg/L) d'un facteur 2 (tableau 4).

Quant aux biphényles polychlorés (BPC) et aux hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), les teneurs mesurées entre 1990 et 1991 ont également dépassé le critère d'eau brute et de contamination d'organismes aquatiques de 0,079 ng/L et 2,8 ng/L respectivement (Gagnon, 1995; CSL, 1996b). Les teneurs moyennes obtenues pour 1995-1996 sont supérieures aux valeurs précédemment obtenues. Il est à noter que dans le cas des HAP, cette différence atteint un facteur 2, ce qui suggère une augmentation des émissions de HAP pour le secteur de Québec-Lévis.

Malgré les dépassements observés, il semble que de façon générale, la qualité de l'eau pour les usages différents se soit améliorée au cours des dernières années compte tenu de la diminution des apports toxiques et de la plus grande proportion de la population riveraine desservie par des stations d'épuration. Les résultats de la qualité de l'eau dans la région de Québec et couvrant la période allant de 1955 à 2001 sont présentés au tableau 4 en fonction des critères de qualité de l'eau les plus restrictifs.

Tableau 4 Valeurs des paramètres de qualité des masses d'eau de la région de Québec

Paramètres	Critères de qualité (le plus restrictif)¥	Qualité de l'eau, Région de Québec (concentrations moyennes)	
		Cossa et al. (1998)	Hébert (1999; 2002)
Paramètres physico-chimiques			
Phosphore total (mg/L)	0,02	NP	<u>0,022</u>
Matières en suspension (mg/L)	5,0	NP	<u>12,2</u>
Coliformes fécaux (UFC*/100 mL)	0	NP	< <u>200</u>
Turbidité (UNT)	2,0	NP	ND
BPC totaux (mg/L)	$1,2 \times 10^{-7}$	<u>$1,37 \times 10^{-7}$</u>	NP
HAP (mg/L)	$4,4 \times 10^{-6}$	<u>0,005</u>	NP
Métaux (µg/L)			
Aluminium	87	15,5	NP
Arsenic	0,018	<u>0,67</u>	NP
Cadmium	5,0	0,011	NP
Cuivre	3,7	0,86	NP
Fer	30	15,9	NP
Manganèse	50	4,9	NP
Nickel	8,3	0,627	NP
Plomb	8,5	<u>16,0</u>	NP
Zinc	86	0,48	NP

(Source : CSL, 1996a; Cossa et al., 1998; MENVIQ, http://www.menv.gouv.qc.ca/eau/criteres_eau/critere_p1.htm#pH; Hébert 2002).

¥ : le critère de qualité indiqué représente le critère le plus restrictif, tout usage considéré.

NP : ne s'applique pas.

ND : non disponible.

* UFC : unités formant des colonies.

Les valeurs soulignées dépassent le critère de qualité de l'eau le plus restrictif.

6. QUALITÉ DES SÉDIMENTS

La taille des sédiments conditionne leur capacité à adsorber des contaminants (van Olphen, 1963). La surface chimiquement active des sédiments fins peut adsorber ou désorber des ions selon la composition de la phase aqueuse, et les matières en suspension peuvent alors devenir des vecteurs de polluants. La granulométrie des matières en suspension joue donc un rôle important sur la distribution des polluants. Par conséquent, les zones de sédimentation de particules de la taille des argiles sont susceptibles de contenir une plus grande quantité de contaminants due au fait que les argiles présentent des capacités d'échange ioniques ainsi que des surfaces de contact beaucoup plus fortes que les sables et graviers (Gagnon, 1995).

Tel que discuté précédemment, la force des courants et l'influence des marées limitent considérablement les zones de dépôt de sédiments fins dans le chenal fluvial du Saint-Laurent et sur la majeure partie de son littoral. Il existe néanmoins des zones où les conditions hydrodynamiques et les caractéristiques physiographiques peuvent favoriser la sédimentation de particules fines auxquelles peuvent être liés des contaminants.

Quoique l'estuaire fluvial ait été peu étudié sur le plan physico-chimique, les tendances observées comportent l'augmentation des teneurs en cuivre, plomb et zinc au cours de la période 1976-1989, la diminution des teneurs en cadmium et en chrome et finalement le maintien de niveaux stables pour le mercure (CSL, 1996a). Ces travaux rapportent que les teneurs en cadmium et en cuivre mesurées entre Pointe-du-Lac et Lévis sont plutôt faibles; une contamination par ces métaux modérée a été notée à Lévis, Lauzon ainsi que dans la traverse du nord. À proximité du secteur à l'étude, d'importants problèmes de contamination par le cadmium, le cuivre et le zinc, ont été identifiés dans l'estuaire de la rivière Saint-Charles et le bassin Louise dans le périmètre du port de Québec (Procéan, 1990).

Le rapport thématique sur l'état du Saint-Laurent publié par le Centre Saint-Laurent (1997) présente les secteurs contaminés du fleuve Saint-Laurent (CSL, 1997). La cartographie des zones contaminées dans la région de Québec montre qu'à l'heure actuelle, aucune donnée sur la qualité des sédiments n'est disponible pour le secteur de Beaumont, cette zone n'ayant pas été échantillonnée. Tel que mentionné plus haut, des relevés montrent toutefois qu'à proximité du secteur d'étude, notamment à Lévis, Québec et Sainte-Foy, l'arsenic, le cadmium, le cuivre et le mercure présentent un dépassement du seuil de contamination significative⁸ (SCS) (CSL, 1997).

En ce qui a trait au chenal des Grands Voiliers, il présente essentiellement la même image géochimique que celle observée dans le chenal de l'île d'Orléans. Exception faite du plomb et de l'arsenic, l'analyse de la qualité des sédiments réalisée entre 1976 à 1989 révèle un dépassement du seuil d'effets mineurs (SEM) pour le chrome, le cuivre, le mercure, le

⁸ Dans le Saint-Laurent, on suppose que la teneur observée dans les sédiments fins datant du début du siècle, représente au mieux la teneur moyenne des sédiments exempts de contamination. Les teneurs supérieures à deux fois et demi la valeur observée dans les sédiments préindustriels du Saint-Laurent ne peuvent pas être expliquées par des variations dans la texture des sédiments et/ou de la géologie. Le seuil de contamination significative est atteint lorsque les teneurs en contaminants dépassent les valeurs préindustrielles par un facteur de 2,5.

nickel et le zinc dans le chenal des Grands Voiliers (Fortin et Pelletier, 1995). Aucune teneur ne dépassait le seuil d'effets néfastes (SEN). Toutefois, la caractérisation chimique des sédiments de ce secteur demeure difficile à cause du régime sédimentaire très actif dans ces chenaux.

En septembre et novembre 2004, une caractérisation chimique et physique des sédiments dans la zone intertidale du secteur à l'étude a été effectuée. La section suivante présente la méthodologie utilisée lors de l'échantillonnage ainsi que les résultats des analyses.

6.1 Travaux et méthodologie

Des travaux d'échantillonnage ont été réalisés au cours du mois de septembre 2004. Le plan d'échantillonnage original comprenait 21 stations numérotées de B1 à B21, et positionnées le long de six (6) transects dans le secteur d'étude projeté. En raison des difficultés rencontrées lors du prélèvement des échantillons, notamment la présence de sédiments très compacts et peu profonds lorsque présents en surface, sur une superficie rocheuse très étendue sur toute l'aire d'échantillonnage du secteur à l'étude, ont fait en sorte que le nombre d'échantillons récolté est moindre que le nombre prévu initialement. Par conséquent, 10 stations ont été effectivement échantillonnées (stations B1 à B10; figure 16). Le positionnement exact des stations d'échantillonnage sur le site d'étude a été réalisé par un système DGPS de marque GPS Garmin. Les sédiments ont été récoltés à l'aide d'une benne Ponar de 23 cm de côté et d'une benne Van Veen et d'une pelle.

Des sédiments ont également été récupérés à partir de forages effectués dans la zone côtière du site à l'étude en novembre 2004 (figure 16). Au total trois échantillons (F2, F8 et F9) ont été récoltés sur les forages effectués à l'aide d'une foreuse Diedrich, modèle D-50. Ce type de foreuse permet le forage au moyen d'une tarière évidée mais aussi avec du tubage d'acier. Les carottes sont prélevées avec des cuillères fendues de 50,8 mm de diamètre intérieur. Les échantillons non homogénéisés avant le prélèvement ont été prélevés au centre des carottes. La profondeur des forages est indiquée au tableau 5. La profondeur géodésique correspond à l'élévation géodésique (laquelle prend comme élévation de référence le niveau moyen des mers) alors que la profondeur marégraphique correspond à la profondeur sur la carte marine (laquelle se sert du zéro des cartes correspondant au plus bas niveau atteint par la marée).

Pour chaque échantillon de surface, une photographie a été prise et les paramètres suivants ont été notés :

- la date et l'heure du prélèvement;
- la position (longitude/latitude);
- le nombre d'essais;
- la nature du sédiment.

L'analyse de la granulométrie et de la qualité des sédiments a ensuite été effectuée sur neuf des échantillons prélevés en surface et sur deux des échantillons prélevés en profondeur (échantillons de forages). Le protocole d'assurance qualité a été effectué en conformité avec les directives du « *Guide méthodologique de caractérisation des*

sédiments » publié en 1992 par le Centre Saint-Laurent. La liste des paramètres analysés sur tous les échantillons est présentée ci-après :

- Arsenic, cadmium, chrome, cuivre, mercure, nickel, plomb, zinc;
- Hydrocarbures aliphatiques polycycliques, (HAP);
- Byphényles polychlorés (BPC);
- Hydrocarbures pétroliers (C₁₀-C₅₀);
- Carbone organique total (COT)⁹;
- Granulométrie : (% gravier, % sable, % silt, % argile).

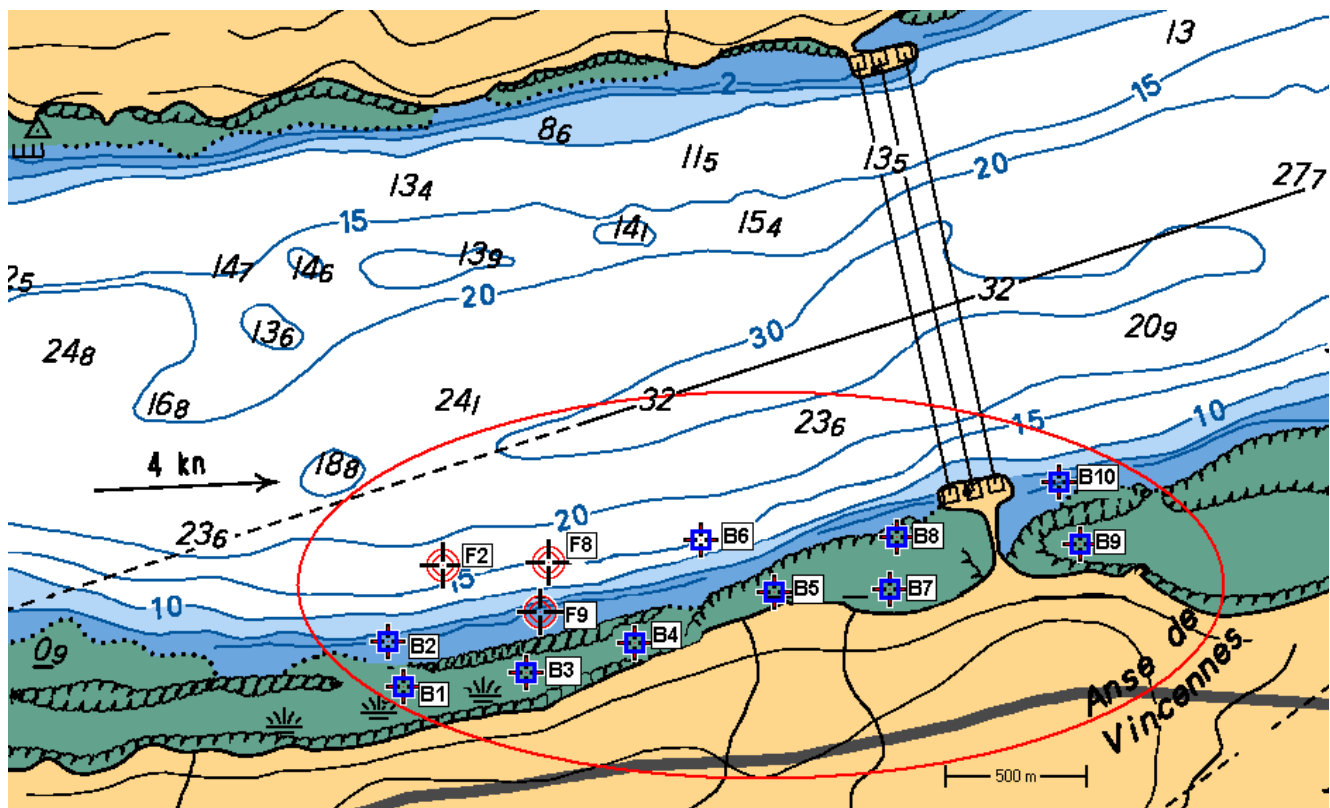


Figure 16 Localisation des stations d'échantillonnage en surface (B1 à B10) et en profondeur (forages F2, F8 et F9) dans le secteur d'étude projeté pour le terminal du port méthanier à Beaumont. Le trait en rouge délimite le secteur à l'étude
(Source : SHC, carte marine 131702)

⁹ L'analyse de la quantité de carbone organique totale (COT) a été effectuée sur les échantillons de surface seulement.

Tableau 5 Profondeur des échantillons prélevés sur les différents forages

Forages	Profondeur géodésique (m)	Profondeur marégraphique (m)
F2	17,62 - 18,22	15,66 - 16,26
F2	18,22 - 18,82	16,26 - 16,86
F8	17,81 - 18,41	15,85 - 16,45
F9	10,1 - 10,7	8,14 - 8,74
F9	10,7 - 11,3	8,74 - 9,34

6.2 Granulométrie des échantillons de surface

Les résultats des analyses granulométriques réalisées sur les échantillons prélevés en surface dans le secteur à l'étude sont présentés au tableau 6¹⁰. Ces résultats montrent une granulométrie variable des sédiments caractérisant la zone d'étude. En moyenne, les sédiments sont constitués à 17,6% de gravier, à 43,9% de sable, à 27,6% de silt et à 10,9% d'argiles. Les échantillons B1, B4 et B5 contiennent les proportions de graviers les plus élevées (> 32%). La proportion de sable retrouvée dans les échantillons est supérieure à 40%, exception faite de l'échantillon B3 caractérisé par une proportion importante de silt et d'argile (pourcentage cumulé > 97%). Cet échantillon est constitué essentiellement d'argiles compactes anciennes. L'hétérogénéité de la taille des matériaux de surface décrits et échantillonnés témoigne de la présence d'un till délavé tel que connu pour la région (Demers et Locat, 1985).

De plus, les résultats des analyses granulométriques des échantillons de surface indiquent que le milieu côtier à l'étude ne représente pas un secteur préférentiel pour la déposition des particules fines et par conséquent des sédiments contaminés. La sédimentation des particules fines demeure possible pendant l'étale de marée. La présence de la jetée d'Hydro-Québec peut toutefois stopper la dérive littorale et entraîner la sédimentation des particules fines.

6.3 Granulométrie des échantillons provenant des forages

Des analyses granulométriques ont été réalisées sur les échantillons prélevés sur les forages F8 et F9. Ces analyses montrent une granulométrie hétérogène des matériaux récoltés à une profondeur supérieure à 8 m (tableau 7). Les sédiments sont constitués essentiellement de sable dans une proportion moyenne de 43,6% et de 2,1% pour les échantillons F8 et F9 respectivement. Les silts et argiles constituent une importante fraction de l'échantillon F9, soit 51% et 46,7% respectivement alors qu'ils représentent 14,6% et 35,1% de l'échantillon F8. On note aussi une faible proportion de gravier dans les échantillons, soit 6,7% et 0,2% sur les forages F8 et F9 respectivement. De façon générale, ces résultats montrent que la granulométrie des sédiments prélevés plus près de la côte (forage F9) comprend une proportion plus importante de particules fines que les sédiments prélevés plus au large et plus en profondeur (forage F8).

¹⁰ Seul l'échantillon B6 n'a pu être analysé due à la faible quantité de matériel contenue dans l'échantillon.

On note également que la granulométrie des échantillons des forages est différente de la granulométrie des échantillons récoltés en surface (B1 à B10). En particulier, on note une plus importante proportion de graviers et de sables dans les échantillons de surface (moyenne de 61,5%) relativement aux quantités retrouvées dans les forages (moyenne de 26,4%).

Tableau 6 Résultats des analyses de granulométrie et de sédimentométrie des échantillons prélevés en surface dans le secteur d'étude projeté, à Beaumont, septembre 2004

Numéro d'échantillon	Gravier (%)	Sable (%)	Silt (%)	Argile (%)
B1	36,3	51,0	5,4	7,2
B2	15,3	54,0	25,2	5,4
B3	1,0	2,4	55,5	41,0
B4	32,2	51,3	8,9	7,7
B5	34,3	47,9	10,9	6,8
B6	-	-	-	-
B7	2,5	46,6	45,6	5,3
B8	16,9	40,0	27,9	15,2
B9	9,3	45,6	38,7	6,3
B10	10,6	55,9	30,3	3,2
Moyenne	17,6	43,9	27,6	10,9

Tableau 7 Résultats des analyses granulométriques des sédiments prélevés en profondeur lors des forages réalisés dans le secteur d'étude projeté, Beaumont, LNG-Rabaska, novembre 2004

Numéro d'échantillon	Granulométrie			
	Gravier	Sable	Silt	Argile
	(%)	(%)	(%)	(%)
F8	6,7	43,6	14,6	35,1
F9	0,2	2,1	51,0	46,7
Moyenne	3,5	22,9	32,8	40,9

6.4 Qualité des sédiments de surface

Les résultats des analyses chimiques effectuées sur les échantillons prélevés en surface dans la zone côtière de Beaumont sont présentés aux tableaux 8 et 9. Il est à noter que les analyses de HAP et BPC n'ont pu être effectuées sur l'échantillon B6 étant donné la quantité insuffisante de sédiments récoltés à cet emplacement. Les résultats montrent que pour tous les paramètres analysés (métaux, HAP et BPC), aucun dépassement du seuil d'effet mineur n'est présent (tableau 8). Les résultats montrent également que certains HAP sont détectés à six (6) des neuf (9) stations échantillonnées. De plus, les BPC et Aroclors ont été détectés à quelques stations (B2, B4, B7, B9 et B10). Le seuil d'effet mineur (SEM) est atteint pour l'Aroclor 1248.

6.5 Qualité des sédiments de forage

Les échantillons prélevés en profondeur ont été analysés en fonction des Critères intérimaires d'évaluation des sédiments du Saint-Laurent d'Environnement Canada. Les résultats des analyses chimiques montrent que la majorité des échantillons respectent les critères intérimaires, et ce pour tous les paramètres étudiés (métaux, HAP et BPC) (tableau 9). Les résultats montrent cependant un léger dépassement du SEM pour le chrome et le nickel (échantillon F2 prélevé à 16,3 m de profondeur). De façon générale, on note une très faible augmentation des teneurs en arsenic, chrome, cuivre et zinc avec l'augmentation de la profondeur d'échantillonnage. Il est à noter que les teneurs naturelles de nickel, de cuivre et de chrome des sédiments pré-industriels du fleuve Saint-Laurent dépassent fréquemment le seuil d'effet mineur (SEM) et aussi fréquemment le seuil d'effet néfaste (SEN) (Saulnier et Gagnon, 2003). Parmi les HAP, seuls le pyrène et le chrysène ont été détectés dans l'échantillon F9.

Tableau 8 Résultats des analyses chimiques réalisées sur les échantillons de surface prélevés dans le secteur d'étude, septembre 2004

Paramètres	Critères intérimaires ¹			Numéros d'échantillons									
	Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10
	(SSE)	(SEM)	(SEN)										
Carbone organique total (%)	-	-	-	0,3	0,8	0,5	0,5	0,5	-	1,0	-	0,8	0,5
Humidité (%)	-	-	-	14,0	18,0	20,0	11,0	13,0	< 0,5	20,0	15,0	25,0	29,0
Hydrocarbures pétroliers C10-C50 (mg/kg)	-	-	-	< 100	110	< 100	150	< 100	< 100	160	< 100	120	< 100
Métaux													
Arsenic extractible (mg/kg)	3,0	7,0	17	1,8	3,4	3,1	2,1	2,1	2,9	2,1	1,9	1,7	1,1
Cadmium extractible (mg/kg)	0,2	0,9	3,0	< 0,5	0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5	0,5	< 0,5	< 0,5	< 0,5
Chrome extractible (mg/kg)	55	55	100	16,0	41,0	30,0	18,0	12,0	15,0	28,0	16,0	21,0	16,0
Cuivre extractible (mg/kg)	28	28	86	14,0	23,0	21,0	17,0	17,0	8,0	23,0	15,0	16,0	13,0
Mercure (mg/kg)	0,05	0,2	1,0	0,02	0,05	0,03	0,03	0,02	< 0,02	0,09	0,02	0,05	0,04
Nickel extractible (mg/kg)	35	35	61	15,0	28,0	27,0	16,0	14,0	16,0	21,0	16,0	18,0	15,0
Plomb extractible (mg/kg)	23	42	170	7,0	17,0	11,0	11,0	8,0	12,0	15,0	11,0	10,0	7,0
Zinc extractible (mg/kg)	100	150	540	59,0	130,0	77,0	70,0	52,0	84,0	110,0	51,0	78,0	56,0

¹ : - Critères intérimaires pour l'évaluation de la qualité des sédiments du Saint-Laurent (Environnement Canada et ministère de l'Environnement du Québec, 1992).

SSE = Seuil sans effet.

SEM = Seuil d'effets mineurs.

SEN = Seuil d'effets néfastes.

- Tous les critères sont exprimés en milligrammes par kilogrammes (mg/kg) de sédiments secs à l'exception des paramètres organiques de niveau 3 qui sont exprimées en microgrammes par gramme de sédiments secs pour 1% de carbone organique total (COT). Pour établir le critère de qualité d'un paramètre organique non polaire de niveau 3 dans une situation donnée, il faut multiplier le critère de ce tableau par le pourcentage de COT de l'échantillon à évaluer jusqu'à un maximum de 10% de COT.

- Note : ° Les valeurs soulignées dans les cases ombragées (ex: 4,5) signifient un dépassement du seuil d'effets mineurs (niveau 2).

° Les valeurs soulignées et en caractère gras (ex: **4,5**) signifient un dépassement du seuil d'effets néfastes (niveau 3).

Tableau 8 Résultats des analyses chimiques réalisées sur les échantillons de surface prélevés, septembre 2004 (suite)

Paramètres	Critères intérimaires ¹			Numéros d'échantillon									
	Niveau 1 (SSE)	Niveau 2 (SEM)	Niveau 3 (SEN)	B1	B2	B3	B4	B5	B6	B7	B8	B9	B10
HAP													
Naphtalène (mg/kg)	0,02	0,40	0,60	< 0,019	< 0,019	< 0,019	< 0,019	< 0,019	-	< 0,019	< 0,019	< 0,019	< 0,019
2-méthylnaphtalène (mg/kg)	0,02	-	-	< 0,014	< 0,014	< 0,014	< 0,014	< 0,014	-	< 0,014	< 0,014	< 0,014	< 0,014
Acénaphthylène (mg/kg)	0,01	-	-	< 0,009	< 0,009	< 0,009	< 0,009	< 0,009	-	< 0,009	< 0,009	< 0,009	< 0,009
Acénaphthène (mg/kg)	0,01	-	-	< 0,009	< 0,009	< 0,009	< 0,009	< 0,009	-	< 0,009	< 0,009	< 0,009	< 0,009
Fluorène (mg/kg)	0,01	-	-	< 0,010	< 0,010	< 0,010	< 0,010	< 0,010	-	< 0,010	< 0,010	< 0,010	< 0,010
Phénanthrène (mg/kg)	0,03-0,07	0,40	0,80	< 0,013	0,016	< 0,013	< 0,013	< 0,013	-	0,036	< 0,013	0,025	0,026
Anthracène (mg/kg)	0,02	-	-	< 0,010	< 0,010	< 0,010	< 0,010	< 0,010	-	0,010	< 0,010	< 0,010	< 0,010
Fluoranthène (mg/kg)	0,02-0,2	0,60	2,0	< 0,012	0,023	< 0,012	< 0,012	< 0,012	-	0,057	< 0,012	0,033	0,034
Pyrène (mg/kg)	0,02-0,1	0,70	1,0	< 0,012	0,025	< 0,012	< 0,012	< 0,012	-	0,061	< 0,012	0,032	0,030
Benzo(c) phénanthrène	-	-	-	< 0,012	< 0,012	< 0,012	< 0,012	< 0,012	-	< 0,012	< 0,012	< 0,012	< 0,012
Benzo(a) anthracène (mg/kg)	0,05-0,1	0,40	0,50	< 0,013	< 0,013	< 0,013	< 0,013	< 0,013	-	0,032	< 0,013	0,020	0,018
Chrysène (mg/kg)	0,10	0,60	0,80	< 0,012	0,023	< 0,012	0,013	0,015	-	0,045	< 0,012	0,024	0,018
1,2-Benzanthracène-7,12-diméthyl	-	-	-	< 0,009	< 0,009	< 0,009	< 0,009	< 0,009	-	< 0,009	< 0,009	< 0,009	< 0,009
Benzo(b,j,k) fluoranthène (mg/kg)	0,30	-	-	< 0,035	< 0,035	< 0,035	< 0,035	< 0,035	-	0,063	< 0,035	< 0,035	< 0,035
Benzo(a) pyrène (mg/kg)	0,01-0,1	0,50	0,70	< 0,008	< 0,008	< 0,008	< 0,008	< 0,008	-	0,031	< 0,008	0,018	0,016
3-Méthylcholanthrène	-	-	-	< 0,018	< 0,018	< 0,018	< 0,018	< 0,018	-	< 0,010	< 0,018	< 0,018	< 0,018
Indéno(1,2,3-cd) pyrène (mg/kg)	0,07	-	-	< 0,016	< 0,016	< 0,016	< 0,016	< 0,016	-	0,018	< 0,016	< 0,016	< 0,016
Dibenzo(ah) anthracène (mg/kg)	0,01	-	-	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	< 0,005	-	0,007	< 0,005	< 0,005	< 0,005
Benzo(g,h,i) pérylène (mg/kg)	0,10	-	-	< 0,016	< 0,016	< 0,016	< 0,016	< 0,016	-	0,024	< 0,016	< 0,016	< 0,016
Dibenzo (a,l) pyrène (mg/kg)	-	-	-	< 0,015	< 0,015	< 0,015	< 0,015	< 0,015	-	< 0,015	< 0,015	< 0,015	< 0,015
Dibenzo (a,i) pyrène (mg/kg)	-	-	-	< 0,019	< 0,019	< 0,019	< 0,019	< 0,019	-	< 0,019	< 0,019	< 0,019	< 0,019
Dibenzo (a,h) pyrène (mg/kg)	-	-	-	< 0,011	< 0,011	< 0,011	< 0,011	< 0,011	-	< 0,011	< 0,011	< 0,011	< 0,011
BPC													
BPC totaux (mg/kg)	0,02	0,20	1,0	< 0,02	0,02	< 0,02	0,03	< 0,02	-	0,07	< 0,02	0,03	0,03
Aroclor 1016 (mg/kg)	-	0,01	0,4	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	-	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02
Aroclor 1242 (mg/kg)	-	-	-	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	-	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02
Aroclor 1248 (mg/kg)	-	0,05	0,6	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	-	0,05	< 0,02	< 0,02	< 0,02
Aroclor 1254 (mg/kg)	-	0,06	0,3	< 0,02	0,02	< 0,02	0,03	< 0,02	-	< 0,02	< 0,02	0,03	0,03
Aroclor 1260 (mg/kg)	-	0,005	0,2	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	-	0,018	< 0,02	< 0,02	< 0,007

¹ : - Critères intérimaires pour l'évaluation de la qualité des sédiments du Saint-Laurent (Environnement Canada et ministère de l'Environnement du Québec, 1992).
SSE = Seuil sans effet.

SEM = Seuil d'effets mineurs.

SEN = Seuil d'effets néfastes.

- Tous les critères sont exprimés en milligrammes par kilogrammes (mg/kg) de sédiments secs à l'exception des paramètres organiques de niveau 3 qui sont exprimées en microgrammes par gramme de sédiments secs pour 1% de carbone organique total (COT). Pour établir le critère de qualité d'un paramètre organique non polaire de niveau 3 dans une situation donnée, il faut multiplier le critère de ce tableau par le pourcentage de COT de l'échantillon à évaluer jusqu'à un maximum de 10% de COT.
- *Note* :
 - ° Les valeurs soulignées dans les cases ombragées (ex: 4,5) signifient un dépassement du seuil d'effets mineurs (niveau 2).
 - ° Les valeurs soulignées et en caractère gras (ex: **4,5**) signifient un dépassement du seuil d'effets néfastes (niveau 3).

Tableau 9 Synthèse des résultats des analyses chimiques des sédiments échantillonnés en profondeur lors des forages réalisés dans le secteur d'étude projeté, Beaumont, LNG-Rabaska, novembre 2004

Paramètres	Critères intérimaires ¹			Numéros d'échantillons profondeur (m)				
	Niveau 1 (SSE)	Niveau 2 (SEM)	Niveau 3 (SEN)	F2 15,6*	F2 16,3*	F8 15,8*	F9 8,1*	F9 9,3*
Humidité (%)	-	-	-	15,0	41,0	27,0	42,0	20,0
Hydrocarbures pétroliers C ₁₀ -C ₅₀ (mg/kg)	-	-	-	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100
Métaux								
Arsenic extractible (mg/kg)	3,0	7,0	17,0	4,6	3,1	4,4	2,2	4,2
Cadmium extractible (mg/kg)	0,2	0,9	3	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1	< 0,1
Chrome extractible (mg/kg)	55	55	100	22,0	59,0	31,0	45,0	25,0
Cuivre extractible (mg/kg)	28	28	86	19,0	27,0	20,0	20,0	21,0
Mercure (mg/kg)	0,05	0,2	1	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,03
Nickel extractible (mg/kg)	35	35	61	26,0	41,0	29,0	31,0	25,0
Plomb extractible (mg/kg)	23	42	170	13,0	10,0	12,0	9,0	11,0
Zinc extractible (mg/kg)	100	150	540	74,0	97,0	81,0	80,0	100,0
HAP								
Naphtalène (mg/kg)	0,02	0,40	0,60	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02
2-méthylnaphtalène (mg/kg)	0,02	-	-	< 0,01	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,01
Acénaphtylène (mg/kg)	0,01	-	-	< 0,009	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,009
Acénaphène (mg/kg)	0,01	-	-	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Fluorène (mg/kg)	0,01	-	-	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Phénantrène (mg/kg)	0,03-0,07	0,40	0,80	< 0,01	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,01
Anthracène (mg/kg)	0,02	-	-	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Fluoranthène (mg/kg)	0,02-0,2	0,60	2,0	< 0,01	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,01
Pyrène (mg/kg)	0,02-0,1	0,70	1,0	< 0,01	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,01
Benzo(c) phénanthrène	-	-	-	< 0,01	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,01
Benzo(a) anthracène (mg/kg)	0,05-0,1	0,40	0,50	< 0,01	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,01

Tableau 9 Synthèse des résultats des analyses chimiques des sédiments échantillonnés en profondeur lors des forages réalisés dans le secteur d'étude projeté, Beaumont, LNG-Rabaska, novembre 2004 (suite)

Paramètres	Critères intérimaires ¹			Numéros d'échantillons profondeur (m)				
	Niveau 1 (SSE)	Niveau 2 (SEM)	Niveau 3 (SEN)	F2 15,6*	F2 16,3*	F8 15,8*	F9 8,1*	F9 9,3*
Chrysène (mg/kg)	0,10	0,60	0,80	< 0,01	< 0,02	< 0,02	< 0,02	0,01
1,2-Benzanthracène-7,12-diméthyl	-	-	-	< 0,009	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,009
Benzo(b,j,k) fluoranthène (mg/kg)	0,30	-	-	< 0,04	< 0,05	< 0,05	< 0,05	< 0,04
Benzo(a) pyrène (mg/kg)	0,01-0,1	0,50	0,70	< 0,008	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,008
3-Méthylcholanthrène	-	-	-	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Indéno(1,2,3-cd) pyrène (mg/kg)	0,07	-	-	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02
Dibenzo(ah) anthracène (mg/kg)	0,01	-	-	< 0,005	< 0,007	< 0,007	< 0,007	< 0,005
Benzo (g,h,i) pérylène (mg/kg)	0,10	-	-	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02
Dibenzo (a,l) pyrène (mg/kg)	-	-	-	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02
Dibenzo (a,i) pyrène (mg/kg)	-	-	-	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02	< 0,02
Dibenzo (a,h) pyrène (mg/kg)	-	-	-	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
BPC								
BPC totaux (mg/kg)	0,02	0,20	1,0	< 0,02	< 0,03	< 0,02	< 0,03	< 0,02
Arochlore 1016 (mg/kg)	-	-	-	< 0,02	< 0,03	< 0,02	< 0,03	< 0,02
Arochlore 1242 (mg/kg)	-	-	-	< 0,02	< 0,03	< 0,02	< 0,03	< 0,02
Arochlore 1248 (mg/kg)	-	-	-	< 0,02	< 0,03	< 0,02	< 0,03	< 0,02
Arochlore 1254 (mg/kg)	-	-	-	< 0,02	< 0,03	< 0,02	< 0,03	< 0,02
Arochlore 1260 (mg/kg)	-	-	-	< 0,006	< 0,008	< 0,006	< 0,008	< 0,006

* Profondeur marégraphique.

- ¹ : - Critères intérimaires pour l'évaluation de la qualité des sédiments du Saint-Laurent (Environnement Canada et ministère de l'Environnement du Québec, 1992).
 SSE = Seuil sans effet.
 SEM = Seuil d'effets mineurs.
 SEN = Seuil d'effets néfastes.
- Tous les critères sont exprimés en milligrammes par kilogrammes (mg/kg) de sédiments secs à l'exception des paramètres organiques de niveau 3 qui sont exprimées en microgrammes par gramme de sédiments secs pour 1% de carbone organique total (COT). Pour établir le critère de qualité d'un paramètre organique non polaire de niveau 3 dans une situation donnée, il faut multiplier le critère de ce tableau par le pourcentage de COT de l'échantillon à évaluer jusqu'à un maximum de 10% de COT.
 - Note : ° Les valeurs soulignées dans les cases ombragées (ex: 4,5) signifient un dépassement du seuil d'effets mineurs (niveau 2).
 ° Les valeurs soulignées et en caractère gras (ex: **4,5**) signifient un dépassement du seuil d'effets néfastes (niveau 3).

RÉFÉRENCES

- Barbeau, C., Sérodes, J. B. et Côté, J. E., 1993. Water at the Outlet of the St. Lawrence River Part II – Suspended Matter and Solid Loadings from 1989 to 1991. Water Poll. Res. J. Canada, Vol. 28, No. 2, Pp. 433–450.
- Bouchard, A. et J. Morin, 2000. Reconstitution des débits du fleuve Saint-Laurent entre 1932 et 1998. Environnement Canada, Service Météorologique du Canada, Monitoring et Technologies, Section Hydrologie, Rapport Technique RT-101, Pp. 71.
- Bureau d'Audiences Publiques en Environnement, 1992. Programme décennal de dragage MIL Davie Lauzon. Rapport d'enquête et d'audience publique, chapitre 4, 77 pp.
- Centre Saint-Laurent, 1996a. Rapport-synthèse sur l'état du Saint-Laurent. Volume I : L'écosystème du Saint-Laurent. Environnement Canada – région du Québec. Conservation de l'environnement et Éditions MultiMondes, Montréal. Coll. « Bilan Saint-Laurent ».
- Centre Saint-Laurent, 1996b. Rapport-synthèse sur l'état du Saint-Laurent. Volume II : L'écosystème du Saint-Laurent. Environnement Canada – région du Québec. Conservation de l'environnement et Éditions MultiMondes, Montréal. Coll. « Bilan Saint-Laurent ».
- Centre Saint-Laurent, 1997. Le Saint-Laurent : Dynamique et contamination des sédiments. Bilan Saint-Laurent, Rapport thématique sur l'état du Saint-Laurent, publié par le Centre Saint-Laurent, Environnement Canada, Conservation de l'environnement, Région du Québec.
- Cossa, D., Pham, T. T., Rondeau, B., Quémerais, B., Proulx, S. et C. Surette, 1998. Bilan massique des contaminants chimiques dans le fleuve Saint-Laurent. Environnement Canada – Région du Québec, Conservation de l'environnement, Centre Saint-Laurent. Rapport scientifique et technique ST-163, Pp. 258.
- D'Anglejan, B., 1990. Recent Sediments and Sediment Transport Processes. In : the St. Lawrence Estuary. Coastal and Estuarine Studies, Oceanography of a Large-Scale Estuarine System, The St. Lawrence. Springer Verlag, El-Sabh et Siverberg (eds.), vol 39, Pp. 434.
- Demers, D. and Locat, J., 1985. Stratigraphie du Quaternaire et phoque fossile, région de La Durantaye, Québec. Géographie physique et Quaternaire, 39: 25-34.
- Dionne, J. C., 1970. Aspects morpho-sédimentologiques du glacié, en particulier des côtes du Saint-Laurent. Université de Paris, Thèse doct. Pp. 412.
- Dionne, J.C., 1970. Ploughing boulders along shorelines with particular reference to the St. Lawrence Estuary. Geomorphology, Vol. 1, no. 4, Pp. 297-308.
- Drapeau, G., 1990. Nearshore Sediment Dynamics in the St. Lawrence Estuary in : the St. Lawrence Estuary. In : Coastal and Estuarine Studies, Oceanography of a Large-Scale Estuarine System, The St. Lawrence. Springer Verlag, El-Sabh et Siverberg (eds.), Pp. 130-154.
- Environnement Canada, 2004. Service canadien des glaces. Disponible en ligne : http://ice.ec.gc.ca/sid/WIS91C/20040401163914_WIS91C_0001369081.pdf.

- Environnement Canada et Ministère de l'Environnement du Québec, 1992. Critères intérimaires pour l'Évaluation de la qualité des sédiments du Saint-Laurent Centre Saint-Laurent et Ministère de l'Environnement du Québec.
- Environnement Canada et Ministère de l'Environnement du Québec, 1992. Guide méthodologique de caractérisation des sédiments. Centre Saint-Laurent. 160 pages.
- Fortin, G. et M. Pelletier, 1995. Synthèse des connaissances sur les aspects physiques et chimiques de l'eau et des sédiments du secteur d'étude Québec-Lévis. Environnement Canada, Conservation de l'environnement, Centre Saint-Laurent. Rapport technique. Zone d'intervention prioritaire 14, Pp. 206.
- Frenette, M., Barbeau, C. et J. L. Verrette, 1989. Aspects quantitatifs, dynamiques et qualitatifs des sédiments du Saint-Laurent. Hydrotech inc., pour Environnement Canada et le Gouvernement du Québec, Pp. 185 p.
- Gagnon, M., 1995. Bilan régional Québec-Lévis. Zones d'intervention prioritaire. Saint-Laurent Vision 2000. Environnement Canada – Région du Québec, Centre Saint-Laurent. Rapport technique. Zones d'intervention prioritaire 14, Pp. 65.
- Gagnon, M., P. Bergeron, J. Leblanc et R. Siron 1998. Synthèse des connaissances sur les aspects physiques et chimiques de l'eau et des sédiments de l'estuaire moyen du Saint-Laurent. Pêches et Océans Canada – Région Laurentienne, Division de la gestion de l'habitat et des sciences de l'environnement, Institut-Maurice-Lamontagne et Environnement Canada – Région du Québec, Conservation de l'Environnement, Centre Saint-Laurent. Rapport technique. Zones d'intervention prioritaire 15, 16 et 17, Pp. 132.
- Harvey, B. P. et S. Bélanger, 1996. Secteur Ville-Guay (Lévis). Caractérisation biophysique et cadre géographique de conservation et de mise en valeur. Rapport présenté au Groupe d'initiatives et de recherches appliquées au milieu (GIRAM) par les Consultants en Environnement Argus inc. Sainte-Foy, Pp. 38.
- Hébert, S., 1999. Qualité des eaux du fleuve Saint-Laurent, 1990 à 1997. Direction des écosystèmes aquatiques, ministère de l'Environnement du Québec.
- Hébert, S., 2002. La qualité de l'eau du secteur fluvial – Paramètres physico-chimiques et bactériologiques. Direction du suivi de l'état de l'environnement, ministère de l'Environnement, Québec, Fiche d'information de la collection « Suivi de l'état du Saint-Laurent ». Disponible en ligne : http://www.slv2000.qc.ca/plan_action/phase3/biodiversite/suivi_ecosysteme/fiches/Qualite_eau_parametre_f.pdf.
- Lebel, D. et C. Hubert ,1995. Géologie de la région de Saint-Raphaël Chaudières-Appalaches. Ministère de l'Énergie et des Ressources du Québec, ET 93-02.
- Ministère de l'Environnement du Québec (MENVIQ), 1992. Critères de qualité de l'eau. Service d'évaluation des rejets toxiques et Direction de la qualité des cours d'eau, ministère de l'Environnement du Québec, Québec, 425 p.
- PCAI (Paul Croteau et associés inc.), 2003. Study of ice conditions at selected sites on the St.Lawrence River for the location of a LNG marine terminal. Rapport final présenté à Gaz Métropolitain, projet 0117, Pagination multiple.

- Pêches et Océans Canada, 1997. Atlas des courants de marée – Estuaire du Saint-Laurent, du Cap de Bon-Désir à Trois-Rivières. Ministère des Pêches et Océans, Pp. 108.
- Pêches et Océans Canada, 2004. Service Hydrographique du Canada. Disponible en ligne : <http://www.lau.chs-shc.dfo-mpo.gc.ca/cgi-bin/tide-shc.cgi>.
- Procéan, 1990. Caractérisation de la qualité des sédiments du Port de Québec. Rapport final. Préparé pour Environnement Canada, Conservation et Protection, Région du Québec, Direction de la protection de l'environnement, Montréal.
- Procéan, 1993. Annexe au plan d'urgence maritime, Tome 2, Atlas cartographique. Institut canadien des produits pétroliers.
- Roche, 2004. Construction of a LNG Terminal on the Saint-Laurent Pre-feasibility of the Jetty Component of the Project. Février, Rapport présenté à Gaz Metro, Pagination multiple.
- Rondeau, B., Cossa, D., Gagnon, P. et L., Bilodeau, 2000. Budget and sources of suspended sediment transported in the St. Lawrence River, Canada. Hydrological Processes, 14, Pp. 21-36.
- Saulnier, I., et C. Gagnon, 2003. Background Levels of Cr, Cu and Ni in St. Lawrence River Sediments: Implications for Sediment Quality Criteria and Environmental Management. In: Actes du 2e Symposium international sur les sédiments contaminés, Québec, Québec, mai 2003, pp. 29-33.
- Sérodès, J. B. et J. P. Troude, 1984. Sedimentation cycle of freshwater tidal flat in the St. Lawrence Estuary. Estuaries, 7, Pp. 119-124.
- Van Olphen, H., 1963. Clay Colloid Chemistry for Clay Technologists, Geologists, and Soil Scientists. Interscience Publishers a division of John Wiley & Sons, New york, London.