

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À RIMOUSKI

**TRANSPORT SÉDIMENTAIRE DANS UN MARAIS
LITTORAL DU SAINT-LAURENT : IMPORTANCE DE LA
VÉGÉTATION ET DES VAGUES**

Mémoire présenté

dans le cadre du programme de maîtrise en océanographie

en vue de l'obtention du grade de maître ès sciences

PAR

© **THIBAUT COULOMBIER**

JUIN 2011

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À RIMOUSKI
Service de la bibliothèque

Avertissement

La diffusion de ce mémoire ou de cette thèse se fait dans le respect des droits de son auteur, qui a signé le formulaire « *Autorisation de reproduire et de diffuser un rapport, un mémoire ou une thèse* ». En signant ce formulaire, l'auteur concède à l'Université du Québec à Rimouski une licence non exclusive d'utilisation et de publication de la totalité ou d'une partie importante de son travail de recherche pour des fins pédagogiques et non commerciales. Plus précisément, l'auteur autorise l'Université du Québec à Rimouski à reproduire, diffuser, prêter, distribuer ou vendre des copies de son travail de recherche à des fins non commerciales sur quelque support que ce soit, y compris l'Internet. Cette licence et cette autorisation n'entraînent pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits moraux ni à ses droits de propriété intellectuelle. Sauf entente contraire, l'auteur conserve la liberté de diffuser et de commercialiser ou non ce travail dont il possède un exemplaire.

Composition du jury :

André Rochon, président du jury, Université du Québec à Rimouski

Urs Neumeier, directeur de recherche, Université du Québec à Rimouski

Pascal Bernatchez, codirecteur de recherche, Université du Québec à Rimouski

Philip Hill, examinateur externe, Commission Géologique du Canada, CGC Pacifique

Dépôt initial le 17 mars 2011

Dépôt final le 20 juin 2011

[À mon grand-père et ses
bateaux...]

REMERCIEMENTS

Les premiers mots vont à Urs Neumeier, mon directeur, qui a su être disponible et patient tout au long d'un projet riche en découvertes et apprentissages variés. Pour ma première expérience de rédaction d'un article scientifique en anglais, sa patience et ses judicieux conseils ont été grandement appréciés. Merci également à Pascal Bernatchez, mon co-directeur pour le prêt du matériel d'arpenteur et l'intérêt témoigné aux résultats obtenus. Lors de la conception des installations de terrain et des sorties terrain l'aide de Paul Nicot, Bruno Cayouette, Gilles Desmeules et Sylvain Leblanc s'est révélée indispensable et je les en remercie.

Merci également à l'ensemble des étudiants et des employés que j'ai eu l'occasion de côtoyer pour leur aide et les conseils qu'ils m'ont apportés au cours de ces 2 ans de projet. Je remercie notamment les membres du laboratoire O-240, les géologues, les professeurs, l'équipe du NR-Coriolis II... Je remercie également ma famille qui me soutient depuis toujours.

Enfin je remercie l'administration du Parc du Bic de permettre l'accès au marais de la Pointe-aux-Épinettes aux scientifiques pour leurs recherches. Cette étude a été possible grâce à un financement de recherche du Conseil de recherches en sciences naturelles et en génie du Canada (CRSNG).

L'espace de remerciement tout comme le temps à consacrer à une maîtrise est rapidement limité. Une dernière pensée pour les gens que j'ai croisés, perdu, ceux que j'espère revoir: RDV dans le futur, le monde n'est pas si grand quand on ne voit pas petit !

AVANT-PROPOS

« On fait la science avec des faits, comme on fait une maison avec des pierres: mais une accumulation de faits n'est pas plus une science qu'un tas de pierres n'est une maison. (*Henri Poincaré*) ».

Un projet de maîtrise apparaît comme une bonne opportunité d'apprendre à faire de la recherche scientifique. Ce projet de maîtrise m'a permis d'aborder de nombreux points : la conception de supports pour appareils, l'organisation et les contraintes de terrain, la gestion et le traitement des données numériques, l'optimisation du temps de laboratoire, l'analyse et l'interprétation des résultats.

Le transport sédimentaire côtier conditionne l'environnement littoral qui attise depuis longtemps ma curiosité. Le marais de la Pointe-aux-Épinettes dans le parc du Bic, qui a été sélectionné pour les expériences de terrain afin d'y mesurer le transport sédimentaire, est étudié depuis 2006 dans le cadre d'un projet CRSNG par Urs Neumeier. Mon projet de maîtrise s'ancre dans un objectif global de mieux comprendre les processus de sédimentation durant la période libre de glace.

RÉSUMÉ

Couverts de glace durant les mois d'hiver, les marais de l'estuaire du Saint-Laurent présentent des processus sédimentaires complexes peu étudiés. Cette étude présente les premières recherches détaillées sur les processus estivaux de transport sédimentaire dans l'estuaire maritime du Saint-Laurent. Des mesures de courants, vagues, sédiments en suspension, dépôts sédimentaires ont été réalisées entre juin et octobre 2009. Pour comprendre le rôle des saisons, la croissance végétale a été suivit mensuellement pendant un an.

Le couvert végétal atténue les courants et les vagues, cette atténuation varie durant l'année car la végétation disparaît en hiver. Les résultats de l'étude montrent que le transport en suspension et le dépôt sédimentaire sont influencés par la végétation, les vagues, l'hydrodynamisme et la distance des sources locales de sédiments. Les concentrations en sédiments en suspensions ainsi que les dépôts sédimentaires sont fortement influencés par les vagues qui apparaissent comme un mode de remise en suspension et de transport sédimentaire. Le flux sédimentaire est minimum en août où la végétation est haute et les vagues faibles. Malgré cela, la croissance de la végétation ne change pas fondamentalement le transport sédimentaire dans le marais, les dépôts sédimentaires restent de l'ordre de $1-10 \text{ g m}^{-2} \text{ marée}^{-1}$ de juin à octobre. À l'échelle de la marée, une part significative du transport sédimentaire est locale. Des forts dépôts ont ainsi été observés proches des zones nues qui sont des surfaces de remises en suspension, et les secteurs proches de zones nues ont 40% de plus de sédiments en suspension. Ces nouvelles données fournissent une meilleure compréhension des processus sédimentaire estivaux se déroulant à l'échelle spatiale dans un marais en climat froid.

Mots clés : Variation saisonnière, profils de courants, atténuation des vagues, dynamique sédimentaire, taux de sédimentation, Spartina alterniflora.

ABSTRACT

Covered by ice during winter, the St. Lawrence salt marshes follow complex sedimentary processes that have been little studied. The present study explores sedimentary processes in the Pointe-aux-Épinettes marsh during the ice-free period. Currents, waves, suspended sediments, and sedimentation rates have been measured in June, August, and October 2009. Vegetation growth was monitored during one year on a monthly basis to understand the seasonal variations.

Vegetation attenuates currents and waves, but this attenuation changes over the year as vegetation disappears during winter. Results show that suspended sediment transport and deposition are controlled by vegetation, wave height, currents, distance from the marsh edge and from local sediment sources. Suspended sediment concentrations and sedimentation rates were significantly correlated to wave height, highlighting the importance of waves for sediment resuspension and transport. Sediment flux was lowest in August when vegetation was high and wave occurrence low. However, vegetation growth didn't change fundamentally sediments dynamic of the marsh, sediment deposition remain close to $1-10 \text{ g m}^{-2} \text{ tide}^{-1}$ from June to October. Within one tide, an important part of sediment transport is only local within the marsh, as shown by the maximum sedimentation rates occurring near unvegetated areas and the 40% increase in suspended sediment near these areas. These data provide a spatial understanding of a cold climate marshes summer sedimentology.

Keywords : Seasonal vegetation variations, velocity profiles, wave attenuation, sediment dynamics, sedimentation rate, Spartina alterniflora.

TABLE DES MATIÈRES

REMERCIEMENTS.....	IX
AVANT-PROPOS	XI
RÉSUMÉ.....	XIII
ABSTRACT	XV
TABLE DES MATIÈRES	XVII
LISTE DES TABLEAUX	XIX
LISTE DES FIGURES.....	XXI
CHAPITRE 1: INTRODUCTION GENERALE	1
1.1 LES MARAIS LITTORAUX	1
1.2 L'ETAT DES CONNAISSANCES DES MARAIS DU SAINT-LAURENT.....	4
1.3 MON PROJET DE MAITRISE	6
1.4 TRAVAUX REALISES	7
CHAPITRE 2: SEDIMENT TRANSPORT IN A COLD CLIMATE SALT MARSH (ST. LAWRENCE ESTUARY, CANADA), THE IMPORTANCE OF VEGETATION AND WAVES.....	9
RESUME EN FRANÇAIS.....	10
ABSTRACT	11
RESEARCH HIGHLIGHTS	11
KEYWORDS.....	11
2.1 INTRODUCTION.....	12
2.2 MATERIAL AND METHODS	14

2.2.1	Study location.....	14
2.2.2	Hydrodynamics measurements	16
2.2.3	Environmental context	19
2.2.4	Sedimentation.....	20
2.3	RESULTS	22
2.3.1	Vegetation growth.....	22
2.3.2	Velocity profiles	24
2.3.3	Current meter and SSC data.....	26
2.3.4	Sedimentation rates	29
2.4	DISCUSSION	32
2.4.1	Influence of vegetation on current and waves	32
2.4.2	Spatial control on sediment dynamic	35
2.4.3	Temporal trends.....	39
2.4.4	Regional comparison.....	41
2.5	CONCLUSIONS	42
	ACKNOWLEDGEMENTS	42
	CHAPITRE 3: CONCLUSION GÉNÉRALE.....	43
	RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	47
	ANNEXE I : Localisation du marais de la Pointe-aux-Épinettes	59
	ANNEXE II : Calibration des turbidimètres.....	62
	ANNEXE III : Pièges à sédiments	63
	ANNEXE IV : Végétation.....	68
	ANNEXE V : Programmation des appareils	70

LISTE DES TABLEAUX

Table 1. Multiple linear regression of Sed_{min} for all six deployments ($R^2=0.57$, $n=165$). The regression equation of the model is: $\log(Sed_{min} + 1) = 1.616 + 0.025 \times d - 1.040 \times RR - 5.323 \times Alt + 36.216 \times H_{m0}$	30
Table 2. Sed_{min} (g/m^2) for each trap experiment averaged for different marsh sectors: "a" the upper marsh, "b" homogeneous lower marsh, "c" lower marsh stations with unvegetated area at less than 10 m distance, and "d" stations near the tidal creek.....	31
Table 3. Sediment budgets computed with equation 4 over one tide from OBS and current meter data at ADV3 for the trap deployments (positive values = import).	37
Table 4. SSC (mg/L) measured in June, August, and October. Measurements were also divided between calm and agitated conditions; the limit being 0.05 m waves at ADV3. Mean sediment budgets computed over each study month with equation 4 from OBS and current meter data at ADV3.	37
Table 5. Positions levées avec le GPS différentiel ProMark3 des instruments et zones de mesures de la végétation dans le marais de la Pointe-aux-Épinettes. Les positions sont exprimées selon le système de coordonnées MTM fuseau 6 (NAD 83), l'altitude est en mètres au-dessus du niveau marin moyen (NMM29).	60
Table 6. Calibration des OBS à partir d'un échantillon de sédiments collecté à ADV2, signal et écart type (SD) pour chaque appareil.	62
Table 7. Données des stations pièges à sédiments.....	64
Table. 8. Biomasse et hauteur de la végétation aux stations V1, V2 et V3.....	69

Table 9. Programmation des courantomètres ADV (Vector), paramètres communs.....	70
Table 10. Paramètres d'installation des courantomètres ADV.	70
Table 11. Programmation du profileur de courant PRO (Aquadopp Profiler).....	71
Table 12. Programmation du profileur de courant AWAC.....	71
Table 13. Programmation des capteurs de pression PT (TWR-2050).....	72

LISTE DES FIGURES

- Fig. 1: Infrared aerial photography of the study area with marsh zones, position of instruments and vegetation measurements, and elevation above mean sea level (contour interval 0.25 m). 14
- Fig. 2. Station ADV2 consists of a current-meter, an OBS, and an autosampler. 16
- Fig. 3. Vegetation variations at V1, V2, and V3 during the sampling year: mean lateral obstruction at 10 cm above bed, vegetation height, and above ground biomass. 22
- Fig. 4. Velocity profiles, measured during flood condition at the PRO station on 24 June 2009 (upper panel) and on 21 August 2009 (lower panel), with the lateral obstruction profiles of vegetation measured in the same period at the nearby station V2. Time of each velocity profile is specified relative to high tide. Z_0 (m) is computed from the logarithmic profile section above the canopy. 24
- Fig. 5. Time series of water height in August, current direction and magnitude, turbulent kinetic energy (TKE), significant wave height (H_{m0}), and suspended sediment concentration (SSC) at ADV1, ADV2, and ADV3. Also, H_{m0} offshore, in the Baie de l'Original at AWAC. 26
- Fig. 6. Time series for 22 August showing water height, current direction and magnitude, turbulent kinetic energy (TKE), significant wave height (H_{m0}), and suspended sediment concentration (SSC). 28
- Fig. 7. Mineral sedimentation rate (g/m^2) measured on 21 August 2009. 29

- Fig. 8. Relationship between water level (at the landward transducer) and wave attenuation coefficient a for (a) the sandflat between PT3 and PT2, and (b) the lower marsh between PT2 and PT1. Individual observations (points) and exponential regression (lines).....34
- Fig. 9. Topographic marsh profile from trap 12 to 26 (black line) with vegetation height in August (dashed line). Mean grain size of surface sediments (grey lines) at traps 1 to 11 (×), 12 to 26 (+), and 27 to 36 (●).....39
- Fig. 10. Localisation du marais de la Pointe-aux-Épinettes : situé dans le secteur maritime de l'estuaire du Saint-Laurent, le parc du Bic abrite le marais de la Pointe-Aux-Épinettes (en orange sur la figure) au fond de l'Anse à l'Original (Carte modifiée d'un document du Parc National du Bic).....59
- Fig. 11. Carte de zonation du marais, des instruments et zones de mesures de la végétation60
- Fig. 12. Panorama du marais de la Pointe-aux-Épinettes, en septembre 2008 et Janvier 2009.....61
- Fig. 13. Profils d'obstruction latérale depuis la surface du sédiment aux stations de suivis de la végétation durant la période d'étude.68

CHAPITRE 1

INTRODUCTION GENERALE

1.1 LES MARAIS LITTORAUX

Les marais littoraux sont des environnements caractérisés par une végétation halophyte régulièrement recouverte par la mer (Bertness et al., 1992). Zones d'accumulations sédimentaires, les marais littoraux jouent un rôle essentiel dans l'écosystème côtier en faisant office de zone tampon entre la mer et la terre, ce qui réduit le risque d'érosion et de submersion du trait de côte (Kirwan and Murray, 2008).

Il existe une grande diversité géomorphologique, sédimentaire et écologique parmi les marais, qui est étroitement liée aux paramètres physiques du milieu. Pye et French (1993) ont proposé une classification des marais en fonction de la morphologie côtière. Ces auteurs différencient ainsi les marais sur les côtes ou baies ouvertes, généralement plutôt sableux, les marais en ria et estuaires plus vaseux, les marais en baies abritées et en arrière d'îles barrières qui présentent des sédiments sablo-vaseux. Les marais présentent une pente faible avec parfois une rupture de pente entre marais supérieur et inférieur. Dans la plupart des marais, des chenaux de marées traversent le marais, modifient la topographie locale et assurent un rôle de zone transit des masses d'eau (Leonard, 1997 ; Christiansen et al., 2000; Culberson et al., 2004; Wood et Hine, 2007).

La sédimentation à la surface des marais est contrôlée par l'interaction entre le régime tidal, les vagues, la topographie de la zone, la concentration en sédiments en suspension importés du large, la nature des sédiments et l'influence de la végétation (Leonard, 1997; Leonard et Reed, 2002). L'interaction de ces nombreux facteurs d'influence fait des dépôts sédimentaires un processus complexe. Les courants et la turbulence diminuent progressivement vers la terre et en s'éloignant des grands chenaux de marée ou des

ruisseaux parcourant le marais (Leonard et Luther, 1995). Un gradient d'affinement granulométrique vers la côte a été observé par bon nombre d'auteurs (Beeftink et al., 1977; Yeo et Risk, 1981; Woolnough et al., 1995; Kastler et Wiberg, 1996; Shi et Chen, 1996; Zhang et al., 2002; Dashtgard et Gringras, 2005; Allen et al., 2006; Yang et al., 2008), ce qui correspond aux tendances observées dans les environnements dominés par la marée (Van Rijn, 1998). La granulométrie des marais est ainsi le reflet des conditions hydrodynamiques locales. Celle-ci joue un rôle déterminant pour la géochimie de ces zones humides, pour la répartition de la faune et flore benthique, ainsi que pour les biofilms (Clifton et al., 1999; Dyer et al., 2000; Shroder et al., 2002; Armynot du Châtelet et al., 2009). L'estran en contrebas des marais présente également une granulométrie variable, généralement proche de celle du marais (Steel et Pye, 1997).

La végétation a une influence sur les courants : des études ont démontré l'atténuation de l'énergie hydrodynamique par le couvert végétal (Leonard et al., 2002; Neumeier et Ciavola, 2004; van Proosdij et al., 2006a; Silva et al., 2009). Au cœur du couvert végétal, les courants sont fortement réduits (Neumeier et Ciavola, 2004). Il en est de même pour la turbulence (Neumeier et Amos, 2006a). À l'interface entre la végétation et la colonne d'eau, courants et turbulence augmentent rapidement (Neumeier, 2007). Les vagues sont fortement atténuées par la végétation, leur hauteur et leur énergie diminuent rapidement vers la côte (Möller et al., 1999). Selon Stumpf (1983), les dépôts fins dans les zones denses en végétation ne peuvent s'expliquer que par l'action de la végétation sur les courants et donc les processus de sédimentation. La végétation représente également une protection contre l'érosion des dépôts de particules fines (Torres et al., 2006, Yang et al., 2008). La répartition, la densité, la hauteur et la structure de la végétation sont très variables (Bertness et al., 1992; Shroder et al., 2002). Ainsi, l'interaction entre la végétation et la dynamique du site apporte une certaine hétérogénéité aux dépôts sédimentaires du marais.

La végétation n'est pas seule responsable de variations spatiales des dépôts sédimentaires, la sédimentation dépend aussi de la distance au plus proche chenal de marée et de la topographie locale. Voie préférentielle de transit des masses d'eau et ainsi des

sédiments en suspension, les chenaux de marée modifient les processus de sédimentation à l'échelle locale en créant des dépôts irréguliers (Stumpf, 1983; Reed et al., 1999; Allen, 2000; Voulgaris et Meyers, 2004). Beeftink et al., (1977) et Phleger (1977) mentionnent la présence de dépôts locaux grossiers sur les bordures des chenaux de marée, ces variations à l'échelle locale peuvent se surimposer au gradient de granulométrie à grande échelle.

Les vagues agissent sur le marais de manière variable suivant la morphologie de la côte et les caractéristiques du marais. De nombreux auteurs ont montré le lien direct qui existe entre vagues et sédiments en suspension dans les marais, particulièrement au flot (par exemple Leonard et al., 1995; Fagherazzi et Priestas, 2010). Les vagues sont parfois considérées comme des causes d'érosion (Callaghan et al., 2010), dans d'autres cas l'érosion causée par les vagues est considérée comme négligeable (Ravens et al., 2009). Les conditions de vagues varient dans le temps et selon les saisons : les dépôts et l'érosion à l'échelle saisonnière seraient selon certains auteurs essentiellement dus aux vagues (Pye, 1995).

Généralement, le transport sédimentaire en zone intertidale dépend des sédiments fournis au secteur côtier ; la source des sédiments a donc une importance non négligeable (Perry et Taylor, 2007). Allen (2000) présente les sédiments des marais littoraux comme une combinaison de trois principales sources : fluviale, littorale et marine. La nature des dépôts sédimentaires varie en fonction des saisons, dépendamment des sources de sédiments, de la végétation et des conditions hydrodynamiques (Ranwell, 1972; Fan et al., 2002; Yang et al., 2008).

Plusieurs études menées dans des marais en climat tempéré ont montré une variation spatiale de la concentration des sédiments en suspension, des courants et des dépôts, en parallèle avec la densité de la végétation (par exemple: Leonard et al., 1995; Neumeier et Amos, 2006b).

1.2 L'ÉTAT DES CONNAISSANCES DES MARAIS DU SAINT-LAURENT

Les rivages de l'estuaire du Saint-Laurent sont localisés en zone tempérée froide presque subarctique, caractérisée par des hivers relativement longs (Dionne, 1972). La principale différence existant entre ces systèmes côtiers du Saint-Laurent et ceux en climat plus tempéré vient de l'action de la glace de mer (Drapeau, 1992). Un pied de glace fixe couvre le marais supérieur durant les mois d'hiver pour fondre sur place au printemps (Annexe 1, Fig. 12). Dans le marais inférieur et sur l'estran, la glace de rive subit l'action des marées et présente une structure plus fragmentée (Dionne, 1973).

Sables, vases, et blocs de toutes tailles composent la zone intertidale. Les glaces dérivantes en fin de saison hivernale déplacent des radeaux de végétation, des roches et des sédiments non consolidés, et induisent ainsi un engraissement irrégulier des zones de dépôt (Dionne, 1972; Dionne, 1984; Troude et Sérodes, 1988; Dionne, 1991; Bélanger et Bédard, 1994; Dionne, 1998). Le déplacement de radeaux de végétation contribue aussi à la formation de nombreuses marelles (Gauthier et Goudreau, 1983; Fournier et al, 1987). Le marais inférieur (aussi appelé schorre inférieur ou haute slikke) est dominé par *Spartina alterniflora* (Dionne, 1972; Gauthier, 1982). Le marais supérieur (aussi appelé schorre supérieur) présente une végétation diversifiée avec en premier la zone à *Spartina patens*, puis la zone à *Carex* spp. et à *Spartina pectinata*. Quelques auteurs ont étudié la dynamique estivale des dépôts sédimentaires et montré d'importantes variations saisonnières à Kamouraska et Cap Tourmente (situés dans la zone de turbidité maximale, dans l'estuaire moyen) et à l'échelle de l'estuaire (Sérodes et Dubé, 1983; Sérodes et Troudes, 1984; Drapeau, 1992). L'étude réalisée par Sérodes et al. (1983) dans le marais de Cap Tourmente met en évidence l'augmentation des concentrations en sédiments en suspension vers la côte de 20-55 mg/L à près de 100 mg/L, ainsi qu'une diminution des dépôts sédimentaires à l'automne. Sérodes et Dubé (1983) ont insisté sur la baisse significative des sédiments en suspension durant la marée montante. Les auteurs ont également remarqué l'influence de la végétation sur les processus sédimentaires, mai et septembre étant considérés comme des périodes d'érosion avec une végétation basse ou partiellement couchée. Des études ont évoqué la problématique de l'érosion latérale des marais de

l'estuaire moyen (Dionne, 2000; Dionne, 2004) et de l'estuaire maritime (Morissette, 2007). Les récentes mesures à grande échelle ont confirmé le phénomène d'érosion des berges et la sensibilité des marais littoraux de l'estuaire maritime (Bernatchez et Dubois, 2004).

L'influence de la glace hivernale a aussi été étudiée dans d'autres régions. En Baie de Fundy, des études ont montré une variation saisonnière de la sédimentation (Davidson-Arnott et al., 2002; van Proosdij et al., 2006b). L'influence de la glace de rivage a également été étudiée le long de la côte Danoise de la mer des Wadden. Dans cette étude, la redistribution des sédiments par la glace est considérée comme une unidirectionnelle car la croissance végétale au printemps stabilise les dépôts sédimentaires (Pejrup et Andersen, 2000). Il subsiste malgré tout des incertitudes concernant les processus en jeu, le rôle que joue la croissance végétale sur la structure de la colonne d'eau, et donc la sédimentation, en particulier pour les types de marais présents dans l'estuaire du Saint-Laurent. Les variations saisonnières du transport sédimentaire sont encore mal connues. La glace hivernale modifie l'équilibre annuel du milieu, les processus sédimentaires observés en été permettent alors de mieux comprendre le fonctionnement du marais.

Le marais de la Pointe-aux-Épinettes, sujet du présent mémoire, est étudié depuis quelques années sur différents aspects : la dynamique sédimentaire des marelles (Rogé, 2010), les échanges géochimiques entre le marais et l'estuaire (Poulin et al., 2007; Poulin et al., 2009), la biogéochimie des marelles (Huard, 2010), et la distribution végétale (Bourgon-Desroches, 2010).

1.3 MON PROJET DE MAÎTRISE

Le but est de déterminer le transport sédimentaire dans un marais littoral de l'estuaire du Saint-Laurent pendant la période libre de glace et d'en décrire les mécanismes détaillés.

Les **objectifs** sont :

- 1) *Mesurer et comprendre le transport sédimentaire et l'hydrodynamisme en bordure externe et dans un marais.*
- 2) *Etudier l'influence des variations saisonnières de la végétation sur les processus de transport sédimentaire.*

Les **hypothèses** de travail sont les suivantes :

- 1) *Les marais du Saint-Laurent se comportent différemment des marais de climat tempéré.*
- 2) *Les variations saisonnières de la végétation ont une influence importante sur les processus de sédimentation.*

L'étude parallèle de ces objectifs permet une meilleure compréhension des phénomènes de sédimentation durant la période libre de glace, en corrélation avec l'évaluation de la structure de la végétation dans le temps. Les processus remarqués pourront être mis en relation avec les données annuelles de l'accumulation sédimentaire (étude menée par Urs Neumeier depuis 2006). Bien que la saison hivernale n'est pas couverte par ma maîtrise, comprendre la dynamique sédimentaire pendant la période où le marais est bien accessible apporte des éléments nécessaires à la compréhension du cycle annuel du marais littoral.

1.4 TRAVAUX RÉALISÉS

Les mesures du courant, des sédiments en suspension et des vagues ont été réalisées pendant la période libre de glace, durant trois expériences de 20 jours en juin, août et octobre 2009 dans le marais de la Pointe-aux-Épinettes. Les périodes de prise de données ont été sélectionnées pour couvrir un éventail représentatif d'amplitudes de marées. Répartis dans la zone à *S. alterniflora*, trois courantomètres à effet Doppler ADV et un profileur de courant à effet Doppler ADCP ont apporté des informations importantes sur l'hydrodynamisme dans le marais (Annexe V). Des turbidimètres (OBS) placés sur les sites d'étude ont enregistré la turbidité de façon continue au cours des cycles de marée. Ces données ont été transformées en concentration de sédiments en suspension à l'aide de calibrations réalisées au laboratoire (Annexe II). Trois autoéchantillonneurs d'eau installés auprès des courantomètres à effet doppler ADV permettent une validation de la calibration des OBS. Trois houlographes dans le marais et un profileur de courant à effet doppler ADCP dans la Baie de l'Orignal apportent des informations complémentaires sur la propagation des vagues dans le marais.

Les 180 pièges à sédiments répartis sur 36 sites dans le marais ont été placés 6 fois (2 fois durant chaque expérience). À chaque station, un échantillon de sédiments de surface a été récolté et une analyse granulométrique a été effectuée (Annexe III).

La végétation (*S. alterniflora*) a été quantifiée mensuellement sur trois sites avec des prélèvements (biomasse et densité) et des photographies selon la méthode de Neumeier (2005) (Annexe IV). Des photographies ont de nouveau été effectuées en avril 2010. Un levé topographique de plus de 1000 points a été réalisé en septembre 2009.

Ce large jeu de données a été traité afin de mettre en évidence l'importance de la végétation, des vagues et des variations locales de l'environnement sur l'hydrodynamisme et le transport sédimentaire. Les résultats sont présentés dans l'article scientifique (Chapitre 2), plus de détails sont disponibles en annexes.

CHAPITRE 2
SEDIMENT TRANSPORT IN A COLD CLIMATE SALT MARSH (ST. LAWRENCE ESTUARY, CANADA), THE IMPORTANCE OF VEGETATION AND WAVES

TRANSPORT SÉDIMENTAIRE DANS UN MARAIS LITTORAL EN CLIMAT FROID (ESTUAIRE DU SAINT-LAURENT, CANADA), L'IMPORTANCE DE LA VÉGÉTATION ET DES VAGUES

THIBAUT COULOMBIER¹, URS NEUMEIER¹, PASCAL BERNATCHEZ²

1. Institut des sciences de la mer de Rimouski, Université du Québec à Rimouski, 310 allée des Ursulines, Rimouski QC G5L 3A1, Canada.

2. Département de biologie, chimie et géographie, Université du Québec à Rimouski, 300 allée des Ursulines, Rimouski QC G5L 3A1, Canada

RÉSUMÉ EN FRANÇAIS

Couverts de glace durant les mois d'hiver, les marais de l'estuaire du Saint-Laurent présentent des processus sédimentaires complexes peu étudiés. Cet article présente les premières recherches détaillées sur les processus estivaux de transport sédimentaire dans l'estuaire maritime du Saint-Laurent. Des mesures de courants, vagues, sédiments en suspension, dépôts sédimentaires ainsi que des mesures de végétation ont été réalisées entre juin et octobre 2009. Le couvert végétal, arrachée par les tempêtes d'automne et la glace de rivage, repousse progressivement durant les mois d'été. Les résultats de l'étude montrent que le transport en suspension et le dépôt sédimentaire sont influencés par la végétation, les vagues, l'hydrodynamisme et la distance de la source de sédiments. La végétation atténue vagues et courants et protège ainsi les sédiments déposés. Les concentrations en sédiments en suspensions ainsi que les dépôts sédimentaires sont fortement influencés par les vagues qui apparaissent comme le principal moteur du transport sédimentaire. Le transport sédimentaire est minimum en août où la végétation est haute et les vagues faibles. Malgré cela, la croissance de la végétation ne change pas fondamentalement le transport sédimentaire dans le marais. Une part significative du transport sédimentaire est locale ; des forts dépôts ont ainsi été observés proches des zones nues qui sont des surfaces de remises en suspension.

Cet article, intitulé « Sediment transport in a cold estuarine salt marsh, the importance of vegetation and waves », fut corédigé par moi-même ainsi que par les professeurs Urs Neumeier et Pascal Bernatchez. Soumis en mars 2011 aux éditeurs de la revue *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, il n'a pas encore été accepté pour publication. En tant que premier auteur, ma contribution à ce travail fut la recherche bibliographique, la mise en place du plan d'échantillonnage, le travail de terrain, le traitement et l'interprétation des données. Le professeur Urs Neumeier, second auteur, a fourni l'idée originale. Il a aidé à l'organisation et participé au travail de terrain, au traitement automatisé des données ainsi qu'à la révision de l'article. Le professeur Pascal Bernatchez, troisième auteur, a contribué à la compréhension géomorphologique du site d'étude ainsi qu'à la révision de l'article.

ABSTRACT

Salt marshes in the St. Lawrence Estuary are subjected to strong seasonal variations with sub-arctic winter conditions. The present paper explores sedimentary processes in the Pointe-aux-Épinettes marsh during the ice-free period. Currents, waves, suspended sediment, and sedimentation rates have been measured in June, August and October 2009. Vegetation growth were monitored during one year on a monthly basis to understand the seasonal impact on the marsh. Vegetation attenuates currents and waves, but this attenuation changes over the year as vegetation disappears along winter. Results show that suspended sediment transport and deposition are controlled by vegetation, wave height, currents, distance from the marsh edge and from sediment sources. Suspended sediment concentrations and sedimentation rates were significantly correlated to wave height, highlighting the importance of waves for sediment resuspension transport. Transport was lowest in August when vegetation was high and wave occurrence low. However, vegetation growth didn't change fundamentally sediments dynamic of the marsh. Within one tide, an important part of sediment transport is only local within the marsh, as shown by the maximum sedimentation rates occurring near unvegetated areas of the marsh. Data provide a spatial understanding of a cold climate marshes summer sedimentology.

RESEARCH HIGHLIGHTS

Currents, waves, sediment transport were measured at different stages of vegetation growth.

Sediment dynamic is controlled by vegetation, wave, distance from marsh edge and altitude.

Waves are attenuated by vegetation and drive resuspension on unvegetated areas.

Local intra-marsh transport is significant in this spatially heterogeneous environment.

KEYWORDS

Seasonal variations, velocity profiles, wave attenuation, sediment dynamics, sedimentation rate, *Spartina alterniflora*.

2.1 INTRODUCTION

Salt marshes serve a buffering function between sea and land, dissipating the energy of tidal currents and waves. Halophytic vegetation, which is responsible of the major part of the energy dissipation, is very sensitive to the inundation frequency (Donnelly and Bertness, 2001; Suchrow and Jensen, 2010). Therefore, persistence of these coastal wetlands depends upon sediment deposition that controls the vertical position of the marsh surface (Reed et al., 1999). Particularly in a sea-level rise context, it is essential to understand the resistance of these environments to erosion and drowning (Reed 1995).

Sediment dynamics of salt marshes are a complex result of many factors including tides, waves, coastal morphology, and vegetation (French et al., 1995; Leonard, 1997; Christiansen et al., 2000; Leonard and Reed, 2002; Culberson et al., 2004) and induce an important spatial and temporal variability across the marsh (e.g. French et al., 1995; Wood and Hine, 2007). The transported sediments originated generally from the open water or the fronting tidal flats although some local resuspension from bare areas can also occur. They are brought into the marsh by the flood tide using tidal creeks as preferred transit ways (Reed et al., 1999; Culberson et al., 2004; Wood and Hine, 2007). Suspended sediments then progressively settle out during the over-marsh flow, when vegetation reduces turbulence and slows down currents (Leonard et al., 1995; Neumeier and Amos, 2006a). As a result the sedimentation rate generally decreases with distance from the seaward marsh edge and from the creeks, in parallel with a grain-size fining (Beefink et al., 1977; Reed et al., 1999; Allen et al., 2006; Marion et al., 2009).

Suspended sediment concentrations are typically correlated with currents and waves, which control the erosion and settling processes (Yang et al., 2007; Uncles and Stephens, 2009). Some recent studies have highlighted the turbulence dissipation effects of salt marsh vegetation, which favours sedimentation and bed protection against erosion (Neumeier and Ciavola, 2004; van Proosdij et al., 2006a; Li and Yang, 2009).

The sedimentation rate can be investigated at different time scales. Seasonal or pluriannual evolution is commonly measured with surface elevation tables (Cahoon et al.,

2002, Marion et al., 2009), accretion poles (Uncles and Stephens, 2009), marker horizons (Goodman et al., 2007) or buried plates (van Proosdij et al., 2006b). Short term rate over one tide is more accurately measured with sediment traps (French et al., 1995; Leonard et al., 1995; Wood and Hine, 2007) and can then be related to the local hydrodynamic conditions.

Salt marshes in sub-arctic regions are also affected by sea-ice processes (Dionne 1989; Drapeau, 1992). In the St. Lawrence Estuary, the ice-foot covers the upper marsh from December to April. More or less mobile sea-ice is present in the intertidal zone during the same period. Ice floes can carry rocks, sediments, and vegetation rafts frozen to the ice, which leads to very local sediment erosion and deposition (Dionne, 1972; Dionne, 1985a; Troude and Sérodes, 1988; Pejrup and Andersen, 2000; Neumeier, in press). Furthermore, the vegetation varies greatly over the year due to the temperature. Fall storms impact the faded vegetation and the sea ice mows the remaining stems on the lower marsh, leaving only short stubbles, which seem to reduce sedimentation during spring (Dionne, 1972; Sérodes and Dubé, 1983; Drapeau, 1992). Research on ice-influenced marshes in the Bay of Fundy, the St. Lawrence Estuary and Denmark emphasized seasonal variations of sediment deposition (Sérodes et al., 1983; Davidson-Arnott et al., 2002; van Proosdij et al., 2006b). However, most other studies looked at temperate marshes, and knowledge of the processes of cold climate marshes is still limited, especially concerning the effect of annual vegetation variations on hydrodynamics and marsh dynamics.

Our research aims at understanding hydrodynamic and sedimentary patterns across a St. Lawrence marsh during the ice-free period and to investigate effects of the seasonal vegetation shift on sediment transport and sedimentation rates. This paper presents the first detailed studies of cold marsh sedimentology with a full year of vegetation measurements as well as a seasonal dataset of in situ velocity profiles and spatial variations of currents, turbulence, waves, suspended sediments, short-term sedimentation rates, and surficial sediment compositions. Measurements were focused on the lower marsh as this zone is the more dynamic and most susceptible to respond to seasonal changes of vegetation and

hydrodynamics. Each station were characterized with vegetation, distance from unvegetated area or the tidal creek

Although this work investigates a cold climate marsh, the observations can be applied to most marshes: we compare exactly the same sites through different seasons, whereas most previous studies compared sites with different vegetation (Fan et al., 2006; Silva et al., 2009).

2.2 MATERIAL AND METHODS

2.2.1 Study location

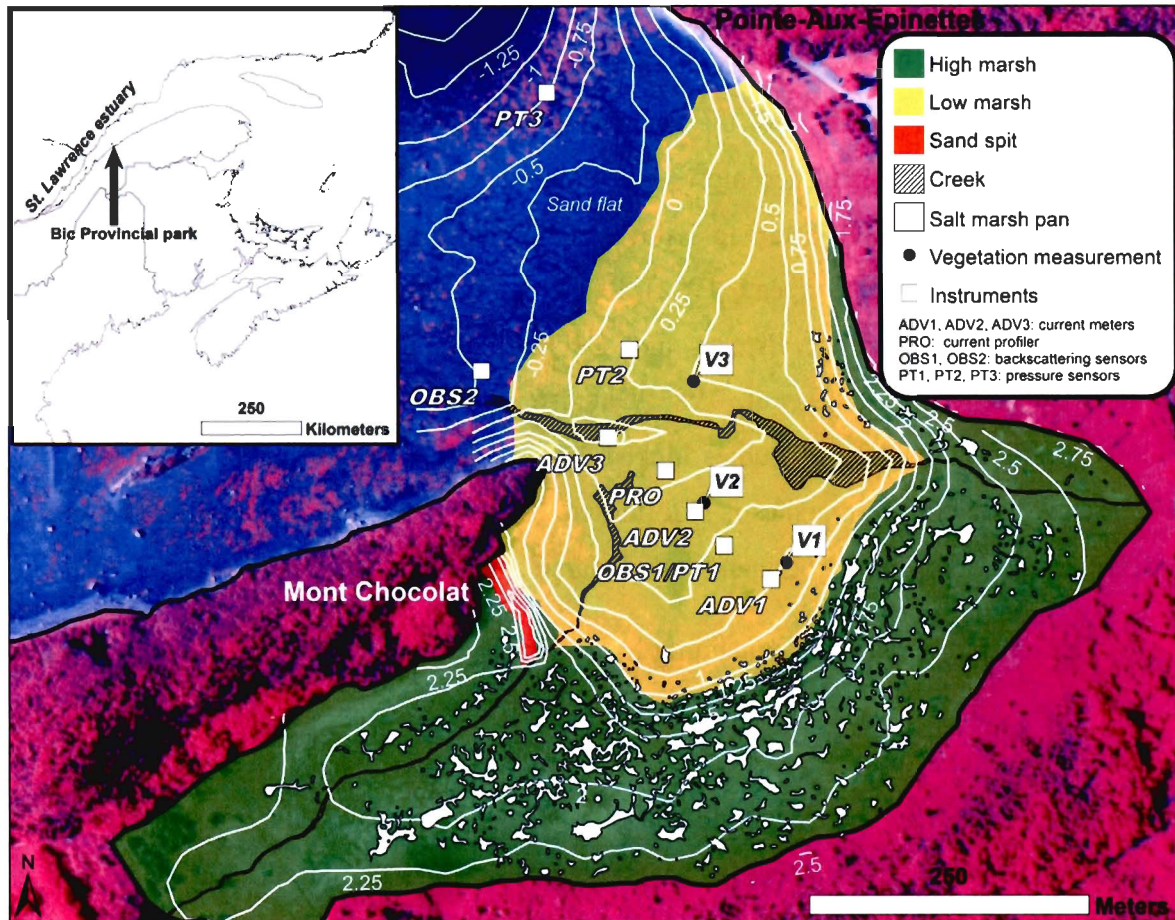


Fig. 1: Infrared aerial photography of the study area with marsh zones, position of instruments and vegetation measurements, and elevation above mean sea level (contour interval 0.25 m).

The study was performed at the Pointe-aux-Épinettes marsh (48°21'N, 68°47'W) in the Bic National park on the southern coast of the lower St. Lawrence Estuary, Quebec, Canada. Due to the large dimensions of the estuary at the study site (40 km wide and 300 m deep), oceanographic conditions are typically marine and the salinity of surface water is around 30. Tides are semi-diurnal with a diurnal asymmetry, mean tidal range is about 3.4 m, and spring range is 4.5 m. The seasonal sea-ice cover extends from December to April, playing an important role in erosion, transport and sedimentation processes (Dionne, 1985a). The surrounding land area is composed of steep hills and rocky islands that are composed of folded Cambro-Ordovician shales and greywackes. The study area is at the southeast end of the Baie de l'Original between Pointe aux Épinettes and Mont Chocolat (Dionne, 2003). It is partially sheltered by several islands and reefs (Annexe I).

Marsh sediments consist of 5 to 80 cm of Holocene sediments over-lying glacio-marine clays deposited during the Wisconsinan deglaciation prior to 10 000 BP (Dionne, 2003). The upper marsh (177 000 m²) with numerous plant species (e.g., *Spartina pattens*, *Carex* spp., *Spartina pectinata*, *Salicornia europaea*) is only flooded during the highest tides and storms. Separated from the upper marsh with a steeper slope of 1.5-2.5%, the lower marsh (123 000 m²) is covered predominantly by *Spartina alterniflora*. The upper part of the lower marsh is riddled with salt marsh pans, which become larger in the upper marsh. Across the lower marsh, a shallow tidal creek crosses the shore from west to south-east (Fig. 1). A sandflat is located immediately in front of the marsh, below the mean water line. Some ice-transported boulders up to 2 m wide (Dionne, 2003) and some cobble concentrations are present on the lower marsh and the sandflat (Fig. 2).

The highest parts of the marsh were subject to agriculture activities and drainage in the past. Since the park was created in 1984, these activities have been forbidden. This marsh does not appear to suffer from erosion by geese, compared to other St. Lawrence marshes (Dionne, 1985b; Belanger and Bédard, 1994). Post-glacial crustal uplift is still active: Gehrels et al. (2004) predict a regional rate of 2 mm/year, while Koohzare et al. (2008) predict a lower rate of 0-1 mm/year. This should partially compensate the expected

global sea level rise ranging from 75 to 190 cm for the period 1990-2100 (Vermeer and Rahmstorf, 2009).

2.2.2 Hydrodynamics measurements

Currents, waves and suspended sediment concentrations (SSC) were monitoring during three periods: from 5 to 25 June, from 17 August to 5 September and from 8 to 27 October 2009. Hydrodynamic measurements were performed on the lower marsh (Fig. 2), on the sandflat and in the bay. Near bed velocity (11 cm above the sediment surface) was measured with three 6-MHz Acoustic Doppler Velocimeters (Vector, Nortek) in the *Spartina alterniflora* zone (ADV1 and ADV2, Fig. 1) and on the unvegetated creek border (ADV3). The ADV was programmed to collect 2048 sample bursts at 16 Hz every 20 minutes in a sampling volume of 3.5 cm³. A 2-MHz Acoustic Doppler Current Profiler (Aquadopp profiler HR, Nortek) sampled the water column in the *Spartina alterniflora* zone (PRO) from the bottom up to 0.65 m with a cell size of 2 cm. This profiler collected bursts of 180 seconds at 1 Hz every 20 minutes.



Fig. 2. Station ADV2 consists of a current-meter, an OBS, and an autosampler.

A 1-MHz Acoustic Doppler Current Profiler (AWAC-AST, Nortek) monitored waves and currents 850 m in front of the marsh in the center of Baie de l'Original at 6 m depth. Additional wave data were provided by 3 pressure sensors (TWR-2050, RBR Ltd.) recording 8.5 minute bursts at 4 Hz every 20 minutes at OBS1 on the lower marsh, PT2 at the limit of vegetation and PT3 on the sandflat (Annexe V).

Seven optical backscattering sensors for turbidity measurements were deployed in the salt marsh at 12 cm above the bed : two autonomous "OBS3A" (Campbell Scientific) at OBS1 and OBS2, three "OBS3+" (Campbell Scientific) connected to the ADV1, ADV3 and PRO instruments and two "OBS3" (D&A) connected to the ADV2 instrument (the second OBS measured at 37 cm above the bed). SSC was measured with three automatic water samplers (ISCO 6712, 24×1L configuration) deployed at ADV1, ADV2 and ADV3 on selected tides. Each autosampler collected 0.9 L samples at 12 cm above the bed close to the turbidity sensor every 20 minutes. Water samples were filtered on Whatman GF/F 47 mm filters that were then rinsed with deionized water, and SSC were measured by gravimetric method. Laboratory calibration of turbidity sensors for SSC was performed in a black 20-liter bucket using wet sediments collected during experiments mixed with a magnetic stirrer. For each sediment addition, SSC was measured with water samples filtered on Whatman GF/F 25 mm filters (Annexe II).

During another experiment not presented here (Rogé, 2010), 2 Vectors with "OBS3+" were deployed near the station ADV1 from 25 to 30 June 2010 to explore the effects of unvegetated areas on SSC.

Time-series data were processed with several Matlab routines. Pressure data were corrected for atmospheric pressure with pressure measured during low-tide. The bursts at the PRO velocity profiler were time averaged. Mean currents, mean SSC and and turbulent kinetic energy (TKE) were computed for each ADV burst.

TKE was calculated as follows:

$$TKE = \frac{1}{2}\rho(\overline{u_t^2} + \overline{v_t^2} + \overline{w_t^2}) \quad (1)$$

where ρ is the water density and u_t , v_t and w_t the turbulent velocity components in horizontal down-stream, horizontal cross-stream and vertical directions.

Before computing wave statistics, pressure data were corrected to compensate the frequency-dependent attenuation of pressure variations. Significant wave height H_{m0} and mean wave period T_{02} were computed by spectral analysis using the standard method (Tucker and Pitt, 2001).

The wave attenuation coefficient a in the intertidal zone was computed considering exponential attenuation using the following relationship:

$$a = \frac{-\ln\left(\frac{E_2}{E_1}\right)}{d} \quad (2)$$

which is equivalent to: $E_1 / E_2 = e^{-ad}$,

where E_1 and E_2 are the wave energy at stations 1 and 2 and d the distance between the stations.

The logarithmic part of the velocity profiles at station PRO was described by the *Kármán-Prandtl* equation:

$$U_z = \frac{U_* \ln(z/z_0)}{\kappa} \quad (3)$$

where z is the height above the bed, U_z the mean velocity at height z , U_* the shear velocity, z_0 the roughness length and κ the Kármán constant (0.4). The boundary layer parameters (U_* and z_0) were computed from the relevant profile points using a least square regression (Bergeron & Abrahams, 1992).

The marsh sediment budget can be computed from currents, SSC and water level time-series (Murray and Spencer, 1997). The sedimentary input and output M (kg) at the seaward marsh boundary was computed for each tide as follows:

$$M = \sum U L h SSC \Delta t \quad (4)$$

with

$$L = \frac{V}{\sum_{\Delta t} U h \Delta t} \quad (5)$$

where U is current magnitude (m/s), h water height (m), and SSC is suspended sediment concentration (kg/m^3), all measured at ADV3, for a Δt time step (1200 s). L represents the hypothetical length of the outer marsh edge assuming a rectangular vertical cross-section at the marsh outflow, V is the tidal volume computed for each tide from high tide level and a digital elevation model. SSC was obtained from calibrated OBS data that were validated with autosampler water samples.

2.2.3 Environmental context

To describe the topography, 475 random points and 380 profile points were surveyed during summer 2009 with a precision of 2 cm using a differential GPS (ProMark3, Magellan). Mapping was carried out using ArcGIS (ESRI).

Vegetation growth was monitored during 2009 at 3 sites: near the seaward vegetation limit (V3), in the middle of the *Spartina alterniflora* area (V2), and near the landward limit of *Spartina alterniflora* (V1). Canopy height, lateral obstruction, shoot density and above ground biomass were measured twice a month from May to June and once a month from July to November to quantify the vegetation. 28 plots in two rows were defined at each site. Stems were counted and vegetation was harvested in 3 circles of 16cm diameter randomly distributed on 3 plots for each survey, each plot was used only one time. Vegetation was then cut into 2.5 cm segments to measure the vertical distribution of biomass. At each site 4 lateral pictures of vegetation with a red background were taken at predefined places,

according to the method described by Neumeier (2005). A threshold operation was performed to obtain a binary image representing the presence/absence of vegetation.

The following formula converts data from binary picture analysis to lateral obstruction O (units are m^2/m^3):

$$O = -\frac{1}{a} \ln(1 - O_a) \quad (6)$$

where O_a is lateral obstruction (values between 0 and 1) for canopies of thickness a . The results of 4 pictures were averaged together at a vertical centimeter scale. Canopy height is defined as the level where the obstruction is $\leq 1\%$.

2.2.4 Sedimentation

Sedimentation rates over one tide were measured twice during each experiment at neap and spring tides with sediment traps at 36 stations (Fig. 7). Traps were deployed on 19 and 23 June, 21 and 30 August, 14 and 17 October; the highest trap were not flooded at neap tides.

Traps consist of pre-weighed Whatman glass microfiber filters 934-AH of 47 mm diameter mounted with binder clips on square plastic plates which were fixed with pins on the ground (French et al., 1995). Five traps were placed around each station within a circle of 1m diameter during one tide. After recovery, the filters were rinsed with deionized water, dried and weighed. The mineral and organic fractions were determined by loss on ignition at 450 °C during 4 hours. For each sediment trap deployment, vegetation type, canopy height and shoot density were recorded. Sedimentation rates were log transformed to normalize data for statistical analysis. Multiple linear regressions were computed to identify the dominant parameters. Trap sites were divided in four categories with similar vegetation and geomorphology conditions: "a" the upper marsh, "b" homogeneous lower marsh, "c" lower marsh stations with unvegetated area at less than 10 m distance, and "d" stations near the tidal creek

At each study site, surface sediment samples were collected for grain size analysis. Plant fragments were hand-removed, and organic matter was removed with hydrogen peroxide. The sand fraction, separated by wet-sieving at 63 μm , was analyzed by dry-sieving. The mud fraction was analyzed by laser diffraction (Beckman Coulter Multi-Wavelength LS 13320 Aqueous Liquid Module). Sample statistics were performed with the geometric method of moments using Gradistat 4.0 (Blott and Pye, 2001).

2.3 RESULTS

2.3.1 Vegetation growth

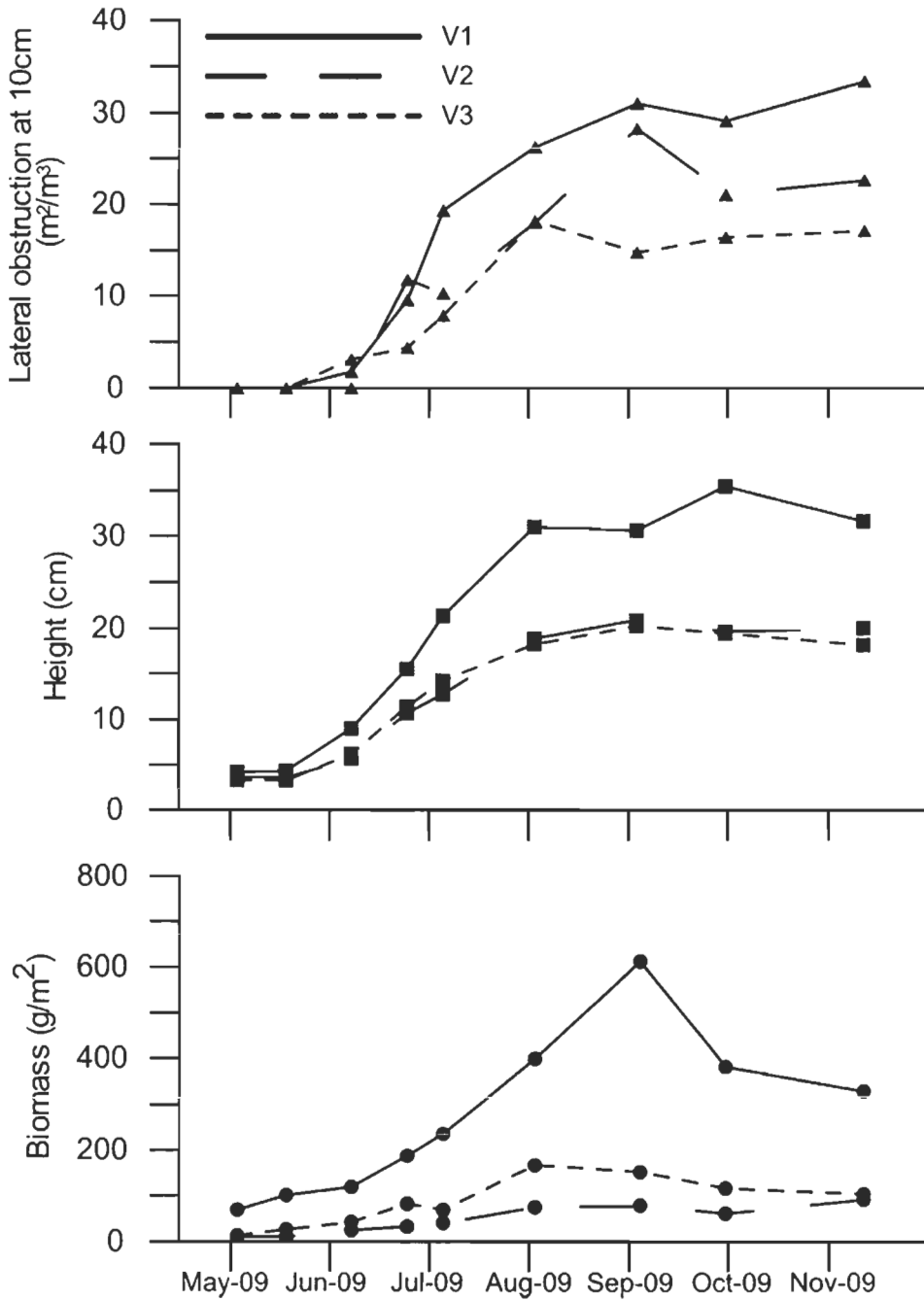


Fig. 3. Vegetation variations at V1, V2, and V3 during the sampling year: mean lateral obstruction at 10 cm above bed, vegetation height, and above ground biomass.

The vegetation of the lower marsh is composed nearly exclusively by *Spartina alterniflora*. Its evolution was monitored at 3 locations in 2009 during the ice-free period (Fig. 3, Annexe IV). Due to temperature and ice-mowing, marsh vegetation passes through strong seasonal variations. The *Spartina* canopy increased significantly in biomass and height during the study period: between May and September canopy height increased fourfold, from 5.5 to 22 cm at the lower vegetation survey sites (V2 and V3) and from 8.5 to 33 cm at the upper site V1. The same trend was observed for aboveground biomass, which increased at V1 from 69 g/m² to a maximum of 612 g/m² in September during the *Spartina* flowering. Shoot density was relatively constant; it was between 1700 and 3600 stem/m² at V1 and V3 while only between 800 and 1300 stem/m² at V2. Its minimum occurred in July as dead stems slowly broke, passing from 40% of total stems in June to zero in August. Inter-annual variability exists in addition to the seasonal evolution. For example the repeated measurements in May 2010 showed a vegetation 3 cm higher at V1 and V2 than in May 2009.

2.3.2 Velocity profiles

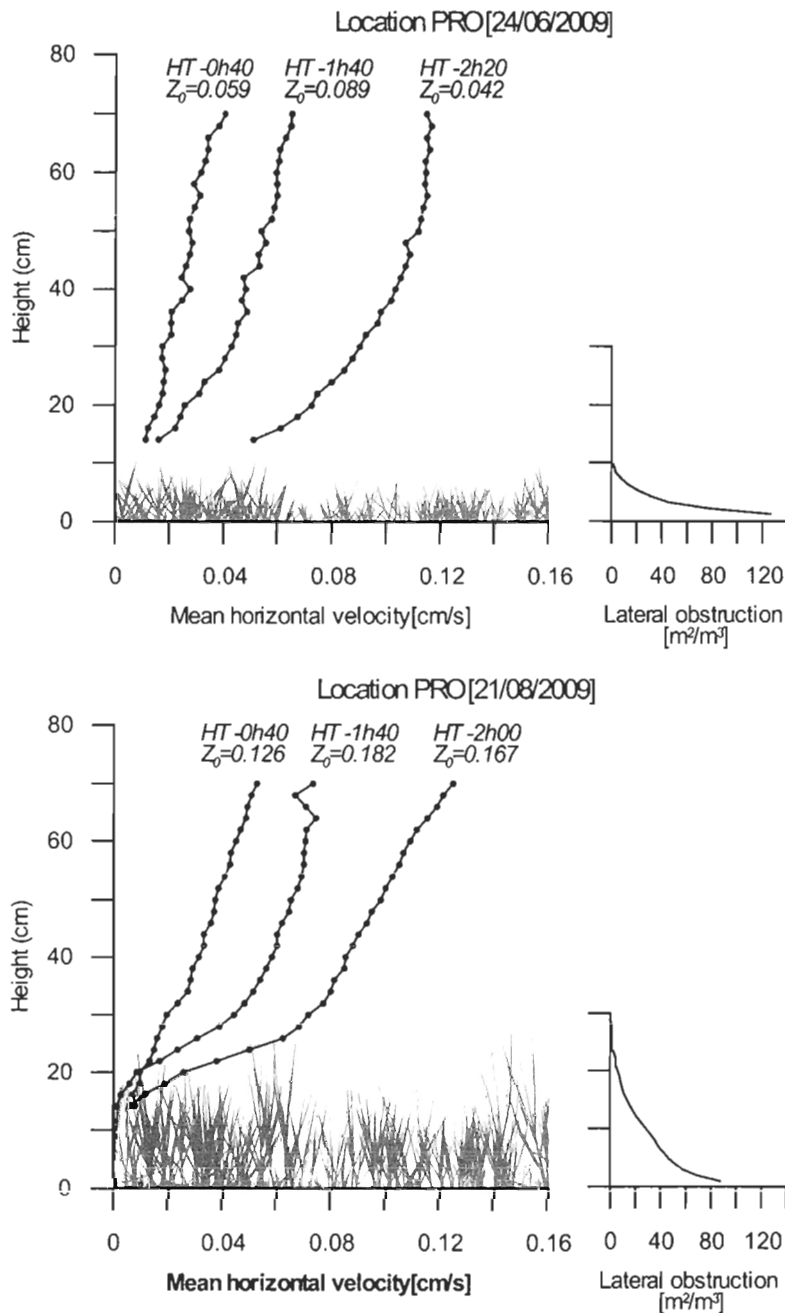


Fig. 4. Velocity profiles, measured during flood condition at the PRO station on 24 June 2009 (upper panel) and on 21 August 2009 (lower panel), with the lateral obstruction profiles of vegetation measured in the same period at the nearby station V2. Time of each velocity profile is specified relative to high tide. Z_0 (m) is computed from the logarithmic profile section above the canopy.

Velocity profiles in June followed a logarithmic shape at the beginning of the flood. As velocity decreased to high tide, the profile became more linear (Fig. 4). In August and October the denser and higher vegetation modified the velocity profile. Current speed was low within the leaves, tending to zero independently of the velocity in the upper water column. Above the canopy, velocity increased very rapidly and then followed a normal logarithmic profile.

The roughness length (z_0) was computed for profiles with water height above 40 cm from the logarithmic profile section (Fig. 3). For 60 profiles with water height above 40 cm in June, August, October, z_0 (mean \pm standard deviation) was 0.048 ± 0.021 m, 0.158 ± 0.023 m, and 0.163 ± 0.022 m, respectively. The vegetation roughness length z_0 was significantly lower in June than in August and in October ($p < 0.01$).

2.3.3 Current meter and SSC data

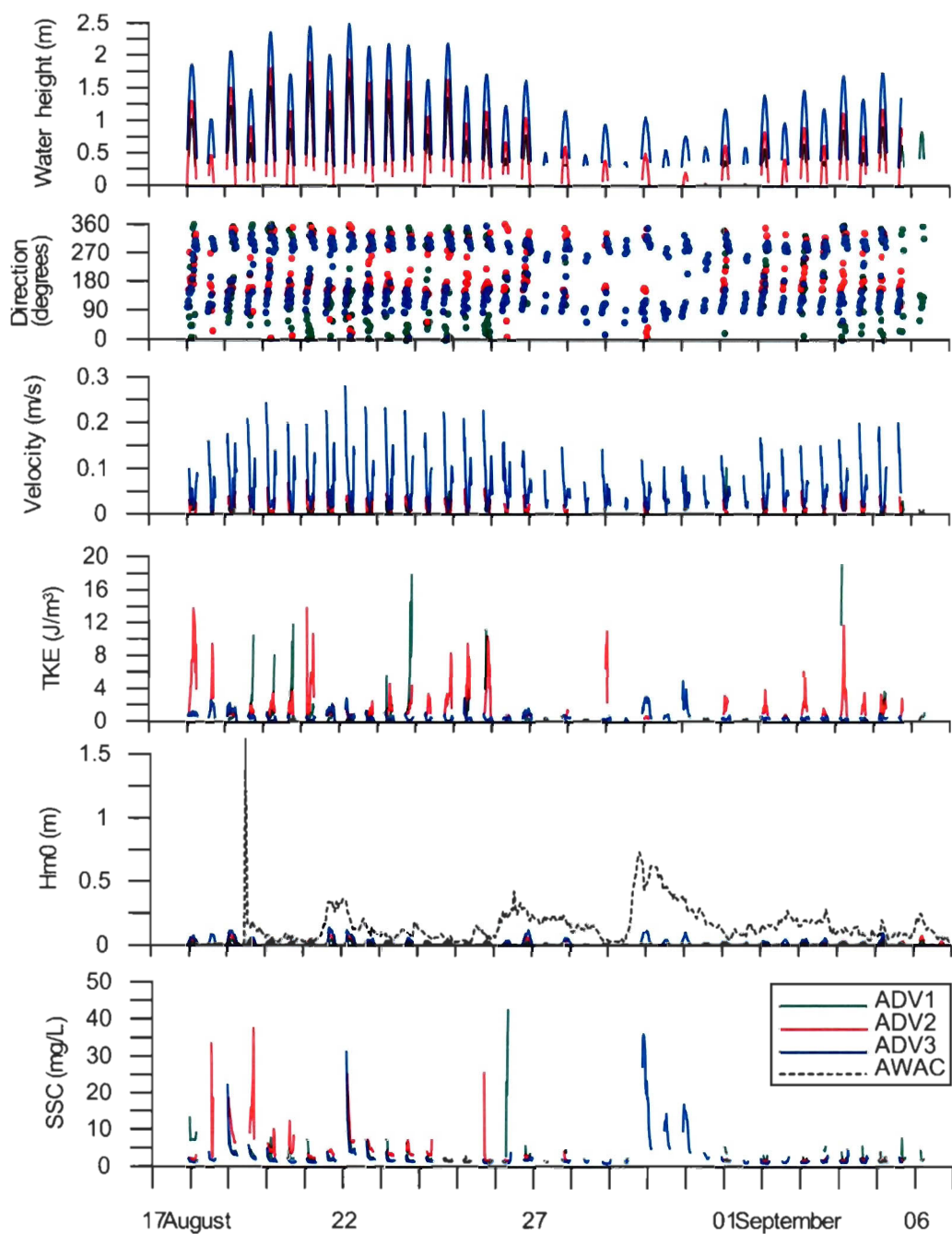


Fig. 5. Time series of water height in August, current direction and magnitude, turbulent kinetic energy (TKE), significant wave height (H_{m0}), and suspended sediment concentration (SSC) at ADV1, ADV2, and ADV3. Also, H_{m0} offshore, in the Baie de l'Original at AWAC.

Three current meters (ADV1, ADV2, and ADV3) were deployed across the lower marsh during 20 days in June, August and October. Additional data were provided by a current profiler in the middle of the lower marsh (PRO). Maximum speed at the vegetation limit (ADV3) did not exceed 0.3 m/s and was generally lower than 0.1 m/s (Fig. 4). Current speed decreased with elevation from ADV3 to ADV1: by 75% in June and 81% in August. At ADV3 on the creek bank, the initial flood followed the creek topography towards the southeast, and the velocity increased or stayed constant up to a water level of 70 cm when the flow was mainly restricted to the creek. As the water level rose above 70 cm, the over-marsh flow currents oriented toward the south. Velocity generally decreases during flood and slightly increased again at the ebb. Turbulence was generally strong at ADV3 at the start of the flood, decreased through high tide and the early ebb stage (Fig. 6). No clear turbulence patterns were observed at the upper stations of the lower marsh: several peaks occurring during flood and ebb.

The wave climate of the area is relatively low due to the protection by the coastal morphology and the offshore located islands and reefs. During the study period, maximum significant wave height (H_{m0}) in the Baie de l'Original (AWAC) was 1 m and occurred in October. Monthly means of H_{m0} at AWAC were typically around 0.2 m. H_{m0} decreased landward from AWAC to ADV1 (Fig. 5), including a strong wave height decrease across the sandflat. H_{m0} near the pioneer zone (ADV3) was on average 0.03 m and generally less than 0.05 m. H_{m0} values above 0.05 at ADV3 were less frequent in August (19.5%) than in June (33.1%) and October (41.1%).

Suspended sediment concentration was generally lower at ADV3 than at ADV1 and ADV2, although waves were higher at ADV3 (Fig. 6). SSC differences between locations were greatest at the start of the flood, SSC tending to decrease during the flood. SSC was higher in June and October than in August (Table 4).

At ADV2, SSC was lower at 12 cm than at 37 cm in August and October (Table 4, paired Student-T test with simultaneous measurements, $p < 0.01$), whereas in June the difference between the two heights was not significant except for calm conditions.

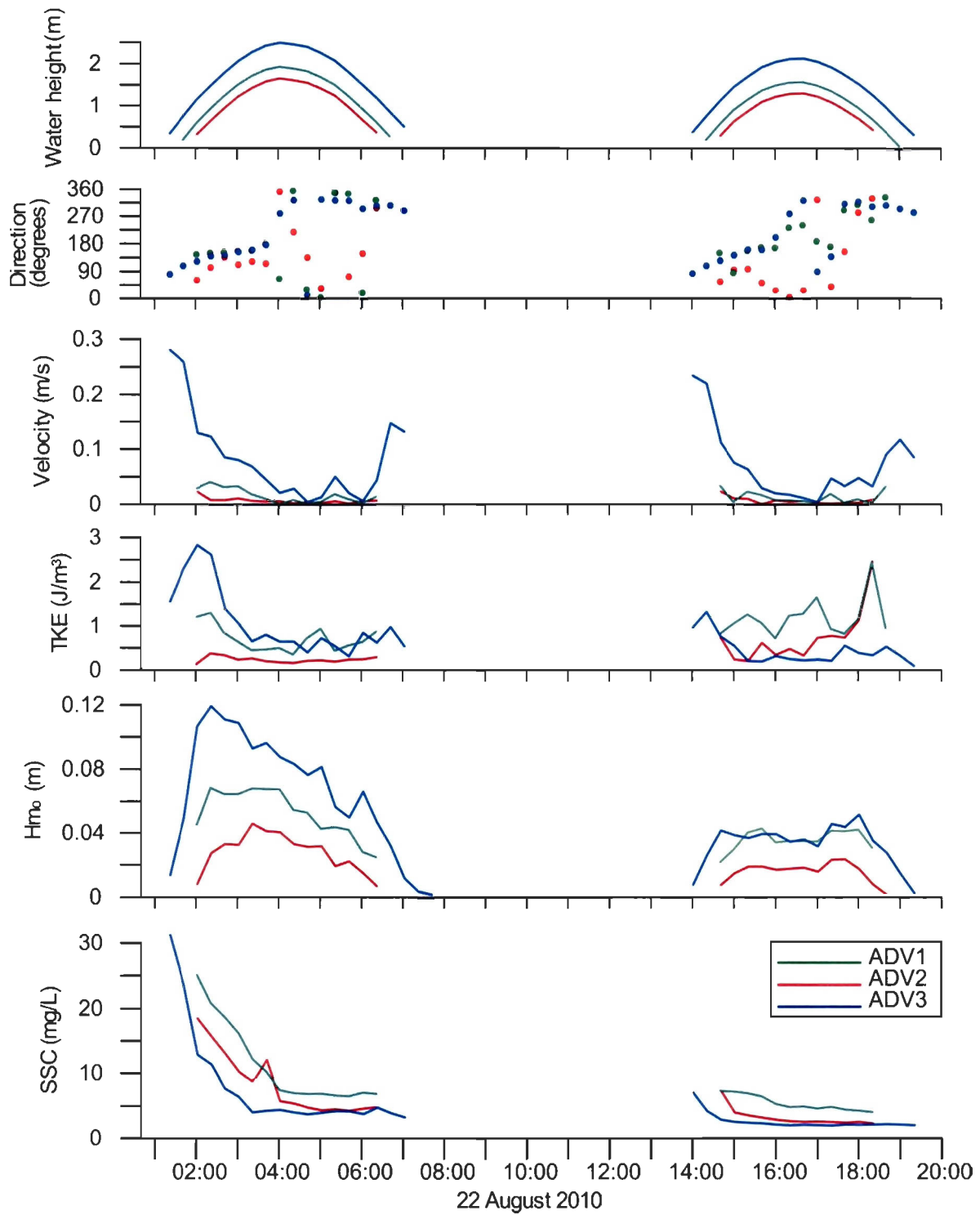


Fig. 6. Time series for 22 August showing water height, current direction and magnitude, turbulent kinetic energy (TKE), significant wave height (H_{m0}), and suspended sediment concentration (SSC).

2.3.4 Sedimentation rates

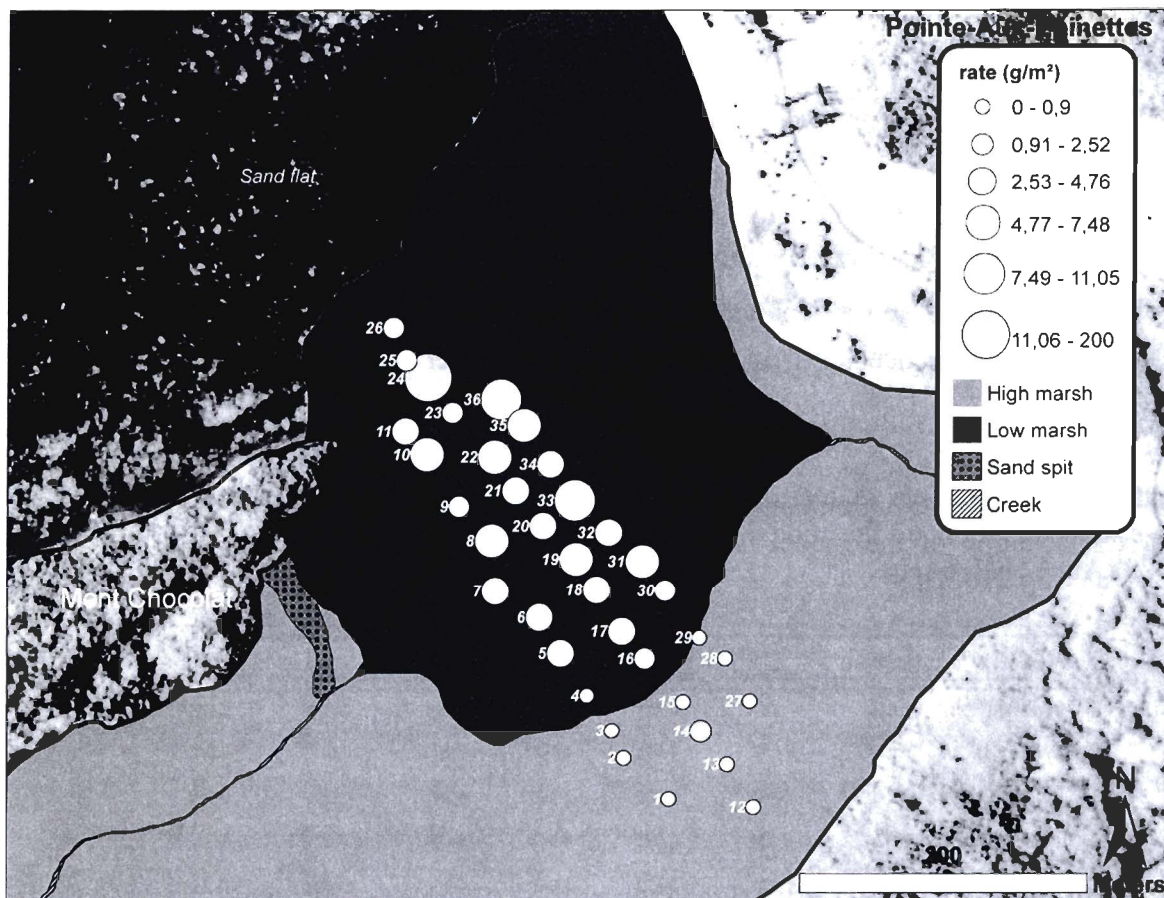


Fig. 7. Mineral sedimentation rate (g/m²) measured on 21 August 2009.

The mineral sedimentation rate (Sed_{min}) was measured during six different tides with various vegetation growths and sea conditions (Annexe III). Waves have a strong effect on the depositional pattern on the marsh. To identify the main factors that control spatial and temporal variations of mineral sedimentation and to exclude wave influence on sediment transport, the data from 21 August were analyzed in detail as waves were minimal on that day. Correlations between sedimentation rate and following parameters were tested: vegetation characteristics (canopy height H_v , shoot density, coverage percentage), altitude, slope, distance to outer marsh edge (d), distance from closest bare area, distance to creek, and water height at high tide (H_w). Significant relationships ($p < 0.05$) were found for

distance from outer marsh edge (Pearson correlation coefficient $r=-0.64$, $n=35$), altitude ($r=-0.74$), water height ($r=0.74$) and vegetation height ($r=-0.35$). Vegetation height and water height were combined as relative vegetation roughness ($RR=H_v/H_w$, $r=0.48$) because velocity profiles are influenced by the proportion of the water column occupied by the canopy (Fig. 4).

A model for Sed_{min} was computed with a multiple linear regression (Table 1). For global data analysis of the six deployments, temporal variability has been added with H_{m0} at ADV3. The significance level of the model ($Pr > Fisher's F$) is better than 0.001 with $R^2=0.57$.

Table 1. Multiple linear regression of Sed_{min} for all six deployments ($R^2=0.57$, $n=165$). The regression equation of the model is: $\log(Sed_{min} + 1) = 1.616 + 0.025 \times d - 1.040 \times RR - 5.323 \times Alt + 36.216 \times H_{m0}$

Parameter	Coefficient	Standardized coefficient	Standard deviation	Student's t	Pr > t	Lower bound 95 %	Upper bound 95 %
Intercept	1.616	n/a	0.835	1.936	0.055	-0.033	3.265
Distance (d)	0.028	2.852	0.006	4.888	< 0.0001	0.017	0.040
Relative roughness (RR)	-1.040	-0.586	0.589	-1.765	0.080	-2.204	0.124
Altitude (Alt)	-5.323	-3.174	1.083	-4.913	< 0.0001	-7.463	-3.183
Significant wave height (H_{m0})	36.216	1.174	8.672	4.176	< 0.0001	19.084	53.349

This statistical analysis highlights the significant factors influencing the variability of sedimentation rates across the marsh. The standardized coefficients for distance and altitude are of similar magnitude but opposite sign. Altitude generally increases with distance from lower marsh edge, the negative correlation suggests that local variations of topography are important for sediment deposition. Relative vegetation roughness slightly decreases Sed_{min} as a higher tide or/and less vegetation leads to more sediment deposition. In addition to these spatial controls, H_{m0} is positively correlated to sediment deposition and has high influence in the model equation (Table 1).

Table 2. Sed_{\min} (g/m^2) for each trap experiment averaged for different marsh sectors: "a" the upper marsh, "b" homogeneous lower marsh, "c" lower marsh stations with unvegetated area at less than 10 m distance, and "d" stations near the tidal creek.

	19 June	23 June	20 August	30 August	14 October	17 October
a		2.1±1.2	0.4±0.7			1.3±4.4
b	4.7±0.9	3.6±1.6	2.7±2.0	5.1±1.8	5.4±3.7	7.7±8.1
c	5.4±1.2	5.7±3.4	5.4±2.7	3.9±1.8	5.9±2.0	11.0±8.1
d	5.9±2.9	5.8±4.4	4.8±2.7	7.7±5.3	4.8±2.9	6.6±2.9

The comparison of stations of the lower marsh that have homogeneous vegetation (*b*, Table 2) with lower marsh stations within or near unvegetated areas (*c*, Table 2) shows that the latter have higher Sed_{\min} except for 30 August.

In June, before the vegetation growth, at least 30% of deposited matter on the lower marsh was organic versus 15% in August and October. The ratio of organic matter to total deposition increased landward, rising from 1-20% to 26-76%. Organic sediment deposition was independent from all measured variables. The annual mowing of vegetation produces a debris accumulation near the upper marsh. Dead stems were reworked in the marsh between May and July (up to 3600 dead stem/ m^2 were measured in June).

The grain size of surficial mineral sediments decreased landward, from sandy gravel (mean grain size up to 1900 μm) to mud (lowest mean 5 μm) (Fig. 9). Sediments were generally poorly sorted and always polymodal in the lower marsh.

The traps at the stations within 200 m of the outer marsh edge were often characterized by 1-10 crawling traces. Bioturbation is known to be significant in salt marshes (Leorri et al., 2009). However crawling traces are not representative of all the benthic activity, therefore these data can not be extrapolated as bioturbation and are not analysed further.

Long-term sediment accretion and erosion were measured in the marsh from 2006 to 2010 using 35 accretion plates, i.e. 20×20 cm aluminum plates buried about 10 cm below

the surface, the distance plate–surface being determined with pins (similar method to van Proosdij et al., 2006b). The detailed results will be presented elsewhere. The average accretions and standard deviations for the upper marsh and the lower marsh are $+2.2 \pm 2.4$ mm/year and $+1.3 \pm 6.0$ mm/year, respectively.

2.4 DISCUSSION

2.4.1 Influence of vegetation on current and waves

The one year monitoring of vegetation highlights strong seasonal variations that also influence sediment dynamics. The biomass increase during summer from $11\text{--}69$ g/m² to $90\text{--}612$ g/m² (Fig. 3) is comparable to Connor and Chmura's (2000) observations in the Bay of Fundy, a region also influenced by sea-ice. Seasonal variations of salt marsh vegetation growth were also observed in more temperate climate (Bouchard and Lefeuvre, 2000), but for most species, the variability is less and vegetation does not die back in winter. For example in England Neumeier (2005) measured an aboveground biomass greater than 500 g/m² year round in a UK salt marsh.

Marsh vegetation modifies currents and dissipates waves (Leonard et al., 2002, Neumeier and Amos, 2006a, Callaghan et al., 2010). As marsh vegetation die off in winter in the St. Lawrence Estuary, the influence of vegetation on hydrodynamics should therefore vary with the seasons. Such a strong variability has an effect on sediment transport (Troude and Sérodes, 1990; van Proosdij et al., 2006a).

The current profiler data (Fig. 4) show similar characteristic to previous studies: the vegetation reduces current velocity close to zero in the canopy and is overlain by a zone of skimming flow with a typical logarithmic profile (Neumeier and Ciavola 2004; Shi and Chen, 1996). The current speed above vegetation should not affect sedimentary processes in the canopy (Neumeier and Amos, 2006b). However, the profile is shifted upward with the vegetation growth, such that z_0 , which marks the lower limit of the skimming flow, rose significantly from June to August. At the location with two OBS (ADV2), SSC was generally higher at 37 cm above the bed than at 12 cm once the vegetation had grown, in

August and October (Table 4). This pattern could be the consequence of the vertical structure of the water column due to vegetation (Fig. 4). If the lower layer is isolated from the upper skimming flow, increased sedimentation in the lower layer due to calmer flow would deplete SSC in this layer (Pethick et al., 1990). This vertical stratification of velocity and SSC was not observed in June, which could favour sedimentation by increasing the potential opportunity of sediment deposition.

Turbulence in the canopy was highly variable (Fig. 5), and strongly influenced by waves, currents and vegetation density. A significant relationship was measured between orbital wave velocity (computed for the ADV height) and TKE at ADV3 near the marsh edge for the three deployments ($r=0.062$, $n=1673$, $p<0.05$). This relationship was not observed at ADV2 and ADV1. The landward decrease in turbulence from ADV3 to ADV1 is probably related to progressive wave and current damping due to frictional resistance of vegetation and topography. However, from June to August, mean TKE doubled at ADV2 and increased sixfold at ADV1, at the same time as vegetation growth occurred, whereas incoming waves decreased during this period. Therefore, waves probably determine the turbulence level at the marsh edge, but in the marsh interior at the canopy level TKE is probably mainly due to turbulence generation around the plants (Nepf, 1999; Neumeier and Amos, 2006b). The landward decrease in turbulence within the marsh canopy corresponds to observations by Leonard et al. (1995), and could favor sedimentation (Christiansen et al., 2000).

Wave attenuation is controlled by topography and bed roughness, which includes vegetation. Marsh accretion and erosion over one year are too low to significantly modify the topography; therefore seasonal variations in wave attenuation must be due to a shift in vegetation influence.

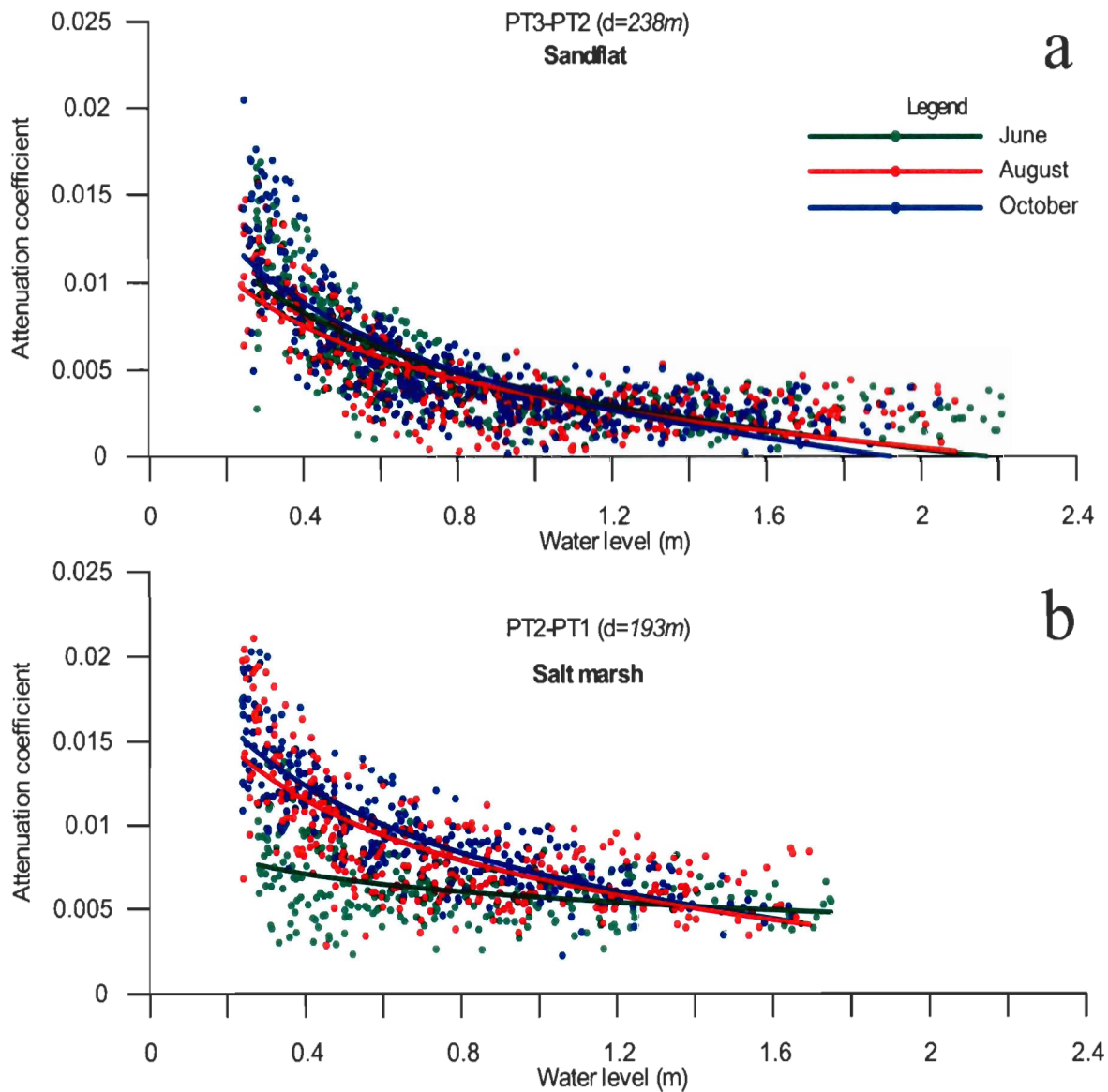


Fig. 8. Relationship between water level (at the landward transducer) and wave attenuation coefficient a for (a) the sandflat between PT3 and PT2, and (b) the lower marsh between PT2 and PT1. Individual observations (points) and exponential regression (lines).

The computation of the wave attenuation coefficient a with formula 2 leads to several observations. Figure 8 suggests that both the sandflat and salt marsh are important in reducing wave energy. The sandflat is more efficient than the marsh in June when vegetation is reduced. This differs from Möller et al. (1999) who observed much less attenuation on the sandflat. The attenuation efficiency of our sandflat is probably due to

greater bed roughness caused by the abundance of boulders and cobbles (Neumeier, in press). The most important parameter influencing attenuation was the water level (Fig. 8), with attenuation decreasing in deeper water as drag of orbital wave velocities in the canopy also decreases. In the marsh (Fig. 8b), wave attenuation for low water levels doubled between June and August, due to the vegetation growth. No attenuation differences were noticed between August and October when the vegetation structure was similar. When water level is higher than 1 m, wave attenuation in August and October is identical to those found in June. No relationship was observed between wave attenuation and wave height. The marsh attenuation coefficients in August and October are similar to the observations of Möller et al. (1999) in England, which correspond to a values between 0.005 and 0.02 for water depth less than 1 m and observations of Spratt et al. (2005) with mean a values of 0.03.

2.4.2 Spatial control on sediment dynamic

Mineral sedimentation rate (Sed_{min}) was measured to determine the factors responsible for its variations. Significant relationships were found with distance from marsh edge, relative vegetation roughness, altitude and wave height. However, a multiple linear regression using these parameters only explains 57% of the observed spatial and temporal variability (Table 1). The relative importance of each parameter varied for the different marsh sectors, in a way that could not be represented with a simple mathematical formula. One parameter could hide a trend, for example van Proosdij et al. (2006a) hypothesized that a relationship between inundation frequency and Sed_{min} could be overshadowed by wave activity. Our data corroborate this hypothesis as a relationship between altitude and Sed_{min} was most notable for the 10 upper stations (Fig. 7) where wave activity was lowest (Fig. 5).

Sed_{min} decreased with altitude and increased slightly with distance from the marsh edge (Table 1), a multiple linear regression with only these two parameters explains 48% of Sed_{min} variability. Topographic variations are therefore important for sedimentation; this is particularly true in the lower marsh where the slope is gentle.

Lower sectors of the marsh could be areas of increased deposition: e.g., the eastern transect (traps 27 to 36, Fig. 7), with generally lower elevation, has 30% more deposition for all the measurements periods. Strong sedimentation in the eastern transect could also result from the influence of the creek which may act as a local sediment source (e.g., Reed et al., 1999; Culberson et al., 2004; Wood and Hine, 2007). However, creeks in the Pointe-aux-Épinettes lower marsh are shallow and don't have the steep banks observed in other regions: they are morphologically similar to unvegetated areas. For this reason, distance from the nearest unvegetated area may be more significant than the distance from the creek.

The landward increase of organic deposition was attributed to the parallel increase of vegetation density, which is the main source of organic matter in marshes (Reed et al., 1999; Leonard et al., 2002; Culberson et al., 2004). Furthermore, at upper stations, plant-debris have a lower probability to be exported offshore and lower TKE conditions favor deposition of low density particles.

Tidal sediment budgets (Table 3 and 4) indicate a net sediment import into the marsh in June and August and no net sediment flux in October. The sediment budgets of individual trap deployments do not fit with these monthly trends because the selected tides differed from the monthly average conditions. The mean deposition calculated from these sediment budgets assuming a uniform deposition over the flooded area, but the obtained values (range -0.6 to 1.8 g/m^2) are much lower than the mean deposition from sediment traps (range 4.1 to 8.7 g/m^2 ; Table 3). Thus, net sediment import at the marsh edge is insufficient to explain the sediment dynamic of the marsh. Leonard et al. (1995) reached an opposite conclusion in a Florida marsh, where direct settling derived from SSC accounted for almost all deposition. This difference could be due to the low SSC input from the bay, the absence of a mudflat in front of the marsh or local sediment reworking.

Table 3. Sediment budgets computed with equation 4 over one tide from OBS and current meter data at ADV3 for the trap deployments (positive values = import).

	19 Jun	23 Jun	20 Aug	30-Aug	14Oct	17 Oct
Mean H_{m0} PT3 (m)	0.037	0.020	0.013	0.170	0.063	0.082
Mean SSC (mg/L)	1.37	2.57	2.70	6.26	5.29	4.48
Maximum water height at PT3 (m)	1.56	3.16	3.06	1.43	1.96	2.50
Flood area (m ²)	106825	295100	273500	117150	130925	161000
Sediment budget (kg)	0.4		67.7	209.6	-72	62.2
Deposition according to budget (g m ⁻² tide ⁻¹)	0.00		0.25	1.79	-0.55	0.39
Deposition according to trap (g m ⁻² tide ⁻¹)	6.78	5.70	4.10	7.00	6.00	8.70

Table 4. SSC (mg/L) measured in June, August, and October. Measurements were also divided between calm and agitated conditions; the limit being 0.05 m waves at ADV3. Mean sediment budgets computed over each study month with equation 4 from OBS and current meter data at ADV3.

	Distance ^a	June			August			October		
		All data	calm	agitated ^b	All data	calm	agitated ^b	All data	calm	agitated ^b
SSC at OBS2	-42	11.64	6.80	26.18	4.42	3.96	7.50	5.99	5.63	6.50
SSC at ADV3	85	8.99	4.29	18.47	3.02	2.34	5.85	5.50	5.15	5.99
SSC at PRO	144	8.16	3.12	18.52	3.39	2.83	5.86	5.70	4.64	6.67
SSC at ADV2, 12 cm ^c	185	14.43	5.93	23.73	2.90	2.14	4.81	5.00	3.52	5.81
SSC at ADV2, 12 cm ^d	185	13.87	2.32	24.53	2.53	1.98	3.92	4.46	3.44	4.91
SSC at ADV2, 37 cm	185	13.60	5.49	21.09	4.40	3.34	7.15	6.27	5.50	6.64
SSC at OBS1	225	9.19	5.40	15.54	6.54	6.17	8.48	9.61	8.53	10.23
SSC at ADV1	276	6.95	3.09	12.16	3.64	3.37	4.62	5.47	6.12	5.25
Mean SSC, all sites		10.42	4.87	19.38	4.04	3.45	6.32	6.22	5.58	6.73
Sediment budget		604.9 kg/tide			173.1 kg/tide			0.9 kg/tide		

^a Distance from outer marsh edge (m)

^b Agitated conditions (waves at ADV3 > 0.05 m) represent 33.1%, 19.5% and 41.6% of the June, August, and October experiments, respectively.

^c Mean of all valid data at ADV2 at 12 cm

^d Mean at ADV2 at 12 cm when also measured at 37 cm

No clear trend was found for SSC across the marsh (Table 4). Sérodes and Troudes (1984) observed a landward increase in SSC for a St. Lawrence salt marsh that the authors explained with local reworking. The absence of a SSC gradient in our marsh is in contradiction with the general assumption that SSC decreases landward in the marsh as the suspended sediments brought by the incoming tide progressively settle out. Several studies have observed such a trend (e.g., French et al., 1995, Wang et al., 1993). We found a landward decreasing trend only between ADV3 and PRO, particularly during periods with waves ($H_{m0} > 0.05$ m at ADV3) when suspended sediment gets higher in the breaker zone (ADV3). This could be due to sediment resuspension induced by waves.

The increase in SSC at ADV2 or OBS1 (Table 4) is probably due to the local environment. Unvegetated areas, measuring 1-10 m in size are usually numerous and could significantly increase SSC by local resuspension of the bare bed not protected by the canopy. Simultaneous measurements in nearby vegetated and unvegetated zones in 2010 have shown this effect with 40% higher SSC in the unvegetated zone. In 2009, maximum Sed_{min} values (>10 g/m²) were measured at trap sites located less than 10 m from unvegetated areas (Table 2). These high sediment depositions do not correspond to net import to the marsh but are a consequence of local reworking which is controlled by the pattern of vegetation cover. This is corroborated by the trap experiments in October, which had the highest waves the highest sediment deposition measured near unvegetated areas (Table 2). These bare areas, which result here from ice-erosion and in other St. Lawrence marshes also from geese-feeding (Dionne, 1985b; Belanger and Bédard, 1994), are therefore local sediment resuspension zones that are important for sediment transport.

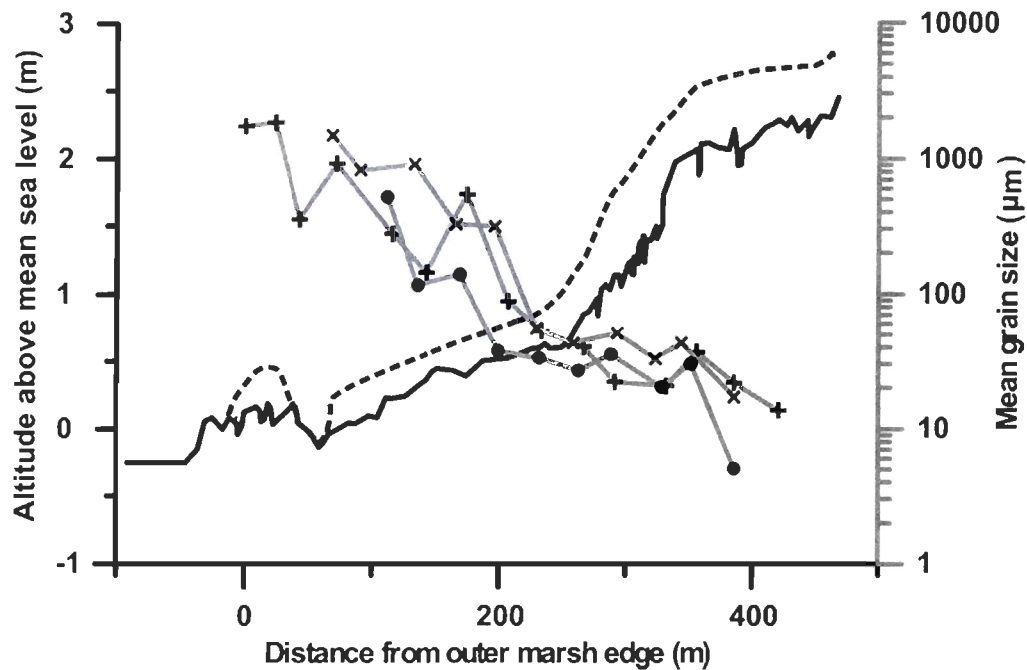


Fig. 9. Topographic marsh profile from trap 12 to 26 (black line) with vegetation height in August (dashed line). Mean grain size of surface sediments (grey lines) at traps 1 to 11 (\times), 12 to 26 ($+$), and 27 to 36 (\bullet).

The mean grain size of surface sediments decreases landwards, from 1900 μm at the outer marsh edge to 10 μm in the upper marsh (Fig. 9). Numerous authors observed a similar grain size trend (e.g., Beeftink et al., 1977; Kastler and Wilberg, 1996). Van Straaten and Kuenen (1958) described already the theoretical grain-size sorting along a landward energy gradient. In a marsh, sediment fining should be amplified by current dissipation in the vegetation (Stumpf, 1983, Yang et al., 2008). This trend is observed at the Pointe-aux-Épinettes marsh, where grain size decreases (Fig. 9) in parallel to hydrodynamics (Fig. 5).

2.4.3 Temporal trends

Sediment dynamics can be studied at different time scales. SSC varies during each tide. At the monthly scale, spring-neap cycles and variations of the wave regime significantly influence sediment transport (Roman et al., 1997, Fan et al., 2004). Seasonal changes of marsh sediment dynamics can be due to vegetation growth, storm occurrence,

sediment supply, surface bioconsolidation, water viscosity, and, in nordic marshes, ice cover (Leonard et al., 1995; Allen and Duffy, 1998).

All tides showed higher SSC during the flood tide than at high tide; and during a few tides SSC increased again at the end of the ebb tide (Fig. 6). A similar pattern was noticed by Reed et al. (1999) and Christiansen et al. (2000). Sérodes and Dubé (1983) noted a SSC decrease from 230 mg/L to 2-4 mg/L between flood and high tide in a St. Lawrence salt marsh. A U-shaped SSC time-series is due sediment resuspension by currents and especially waves in shallow water depth (Yang et al., 2007). The water arrival at flood begins to stir surface sediments into suspension by the current and wind-generated wavelets (Christie and Dyer, 1998). Wave activity and higher velocities hinder particle settling by increasing turbulence (French et al., 2000). The direct relationship between H_{m0} and SSC in the lower marsh at ADV3 ($r=0.83$) confirms the importance of waves. Wave activity is also a crucial parameter for sediment deposition as shown by the multiple linear regression of the trap data (Table 1) and by the significant correlation between II_{m0} and Sed_{min} at ADV3 ($r=0.39$; $p<0.001$). Local re-suspension is likely to contribute more than the low sediment input from offshore.. The canopy presence generates also turbulence, and the TKE increase from June to August during vegetation growth could therefore counteract sedimentation, but this was not apparent in our data.

Monthly trends were influenced by wave occurrence, but also by vegetation growth. SSC was highest in June, when vegetation was minimal (Fig. 3) even higher than in October, when the waves were more frequent (Table 4). Waves and tidal range were equivalent the 23 June and 20 August but sediment deposition was greater in June (Table 3). This confirms the importance of vegetation as bed protection against re-suspension (Neumeier and Ciavola, 2004).

Monthly mean SSC decreased considerably from June to a minimum in August all across the marsh (Table 4). The most landward ADV1 and OBS1 had less SSC decrease than the other stations. No significant relationship was observed between tide range and SSC or deposition. Sed_{min} was negatively correlated with flooded area, but it was not

statistically significant. Average sediment budget decreases from June to October (Table 4). Sea ice floes transport significant amounts of sediments which are deposited in the late winter in the intertidal zone (Dionne, 1984, 1989, Ollerhead et al., 1999). The reworking of these poorly consolidated sediments in spring could contribute to the higher sediment budget and SSC in June. The neutral sediment budget of October could be due to higher wave activity limiting the settling of suspended sediment (Green and Coco, 2007).

2.4.4 Regional comparison

Few studies on sediment transport in St. Lawrence salt marshes are available, and most of them were made in the upper estuary within the maximum turbidity zone, where the large sediment supply induces cyclic seasonal erosion and accretion of up to several centimetres (Champagne et al., 1983; Troude and Sérodes, 1990; Drapeau, 1992). In the lower estuary, conditions are more marine with important wave exposure and the tidal flats fronting the marshes are sandier. As a result, the marshes are quite different, with low suspended sediments concentrations that lead to more intra-marsh sediment transport.

Land use in the watershed has changed notably over the last century, with a decline in logging, in sawmill activities near river mouths, and in new colonization with land cleaning, in parallel with dam building on rivers. Terrigenous sediment input to the estuary has probably decreased and this could be the cause of marsh erosion in the lower estuary observed by Bernatchez and Dubois (2004). Our monthly sediment budgets give a deposition rate of $1\text{--}4\text{ g m}^{-2}\text{ tide}^{-1}$. Assuming a surface sediment dry density of 500kg/m^3 , this corresponds to $0.12\text{--}0.47\text{ mm/month}$ on summer months which is in concordance with accretion plate data of the lower marsh ($1.3\pm 6.0\text{ mm/year}$). The marsh does not suffer from lateral erosion with a marsh scarp, contrary to other marshes in the estuary (Bernatchez and Dubois, 2004). However, the low sedimentation rate in our marsh may not be sufficient to compensate for the predicted relative sea-level rise (Fitzgerald et al., 2008), and the marsh may be in danger of coastal squeezing on the long term.

2.5 CONCLUSIONS

Winter ice modifies radically sediment transport (Dionne, 1972; Dionne, 1984; Troude and Sérodes, 1988; Pejrup and Andersen, 1999). However, our study during the ice-free period showed similar processes as those measured in previous studies for temperate salt marshes. Sediment transport was of the same order of magnitude than reported for temperate marshes. The main difference was a much greater seasonal variation of the vegetation.

Vegetation of this cold climate marsh increased greatly over the studied period from June to October, and it influenced the landward damping of currents and waves. Statistical analyses highlight the importance of local topography, vegetation, water height and waves for short-term sedimentation rate. Wave height explains most of the temporal variability of sediment deposition. The SSC increase with wave height confirms the dominance of waves over tidal forcing for generating sediment resuspension, as observed by French et al. (2000). Waves on the marsh changed monthly, depending upon incoming waves and attenuation by vegetation in August and October. Wave occurrence, which is influenced by vegetation, appears therefore as the driving force of the monthly variations of sediment transport.

Sediment budgets computed from currents and SSC at the outer marsh edge predict net import that is much lower than the sedimentation rate measured in the marsh. Sediments resuspension and local sediment transport are therefore important in the marsh. This is confirmed by high rates of sediment deposition near unvegetated areas that are prone to sediment resuspension.

ACKNOWLEDGEMENTS

We thank the Bic National park for their collaboration. We thank Paul Nicot, Sylvain Leblanc, Bruno Cayouette, and Gilles Desmeules who provided valuable assistance during field work. This work was financially supported by the Natural Sciences and Engineering Research Council of Canada (NSERC).

CHAPITRE 3

CONCLUSION GÉNÉRALE

Le marais de la Pointe-aux-Épinettes subit l'influence de conditions plus marines que les marais précédemment étudiés dans le Saint-Laurent. La variété et la quantité de données récoltées permet d'avoir une vision globale des processus sédimentaires en place.

La végétation et les vagues sont deux composantes essentielles du transport sédimentaire dans le marais pendant la période libre de glace. Réduite à l'automne par les tempêtes et fauchée durant l'hiver par la glace mobile, *Spartina alterniflora*, espèce dominante du marais inférieur, met plusieurs mois à retrouver sa hauteur maximale, entre 20 et 30 cm suivant les zones du marais. L'atténuation des vagues dans le marais augmente fortement à mesure que la végétation grandit, particulièrement pour les faibles tranches d'eau. L'estran en contrebas du marais a également un rôle important, particulièrement en au printemps quand les vagues sont plus atténuées par l'estran que par le marais. Les courants sont affectés par la croissance végétale, particulièrement lorsque la végétation atteint sa hauteur maximale. Les courants sont quasi-nuls au centre de la végétation en août et octobre (Fig. 4). Les courants atténués vers la côte le sont d'autant plus que la végétation est haute. Cet effet protecteur favorise la sédimentation et/ou diminue la remise en suspension.

Le taux de sédimentation minérale mesuré est généralement compris entre 1 et 10 g/m² pour le marais inférieur et entre 1 et 3 g/m² pour le marais supérieur. La fraction organique des dépôts sédimentaires augmente vers la côte, les légers fragments végétaux étant transportés dans des courants plus faibles. Une régression linéaire multiple entre le taux de sédimentation minérale et les paramètres propres à chaque station permet de comprendre les variations spatiales et temporelles des processus sédimentaires. Le dépôt

sédimentaire est ainsi influencé par la distance depuis la limite inférieure du marais, par l'altitude, par la rugosité relative due à la végétation et par les vagues (Table 1). Pour une distance fixe depuis la limite inférieure du marais, les zones les plus basses du marais recueillent plus de sédiment : en effet ce sont des zones qui subissent une inondation plus longue. L'augmentation de la rugosité relative (rapport de la hauteur de végétation et la hauteur d'eau) diminue les dépôts sédimentaires. Ainsi, plus la végétation influence la colonne d'eau, moins les dépôts sédimentaires sont importants. Les vagues ont une influence prédominante sur le transport et le dépôt sédimentaire dans le marais et sont avec la végétation la principale cause des variations temporelles de la dynamique sédimentaire. Le mois d'août présente les plus faibles concentrations en sédiments en suspension, c'est aussi le mois le plus calme de toute la période d'étude. Tous ces paramètres n'expliquent malgré tout que 57 % de la variabilité des dépôts sédimentaires : d'autres facteurs influencent donc le transport sédimentaire et n'ont pas pu être pris en compte dans la régression linéaire multiple.

Le budget sédimentaire du marais calculé avec les courants et concentrations en sédiments en suspension à ADV3 produirait des dépôts sédimentaires nettement plus faibles que ceux mesurés et suggère donc l'existence de phénomènes locaux. Des concentrations en sédiments en suspension parfois plus élevées à la station ADV2 (milieu du marais inférieur) qu'en ADV3 (bas du marais inférieur), l'observation de remises en suspension au niveau des zones nues et de dépôts importants dans les zones adjacentes sont des preuves du transport sédimentaire local. Ainsi, la variation spatiale de la densité végétale crée des variations locales du rôle protecteur de la végétation. Ces zones non végétalisées (causées par l'arrachage de la végétation ou les zones de chenal) deviennent autant de sources potentielles de sédiments dans le marais. L'érosion locale au niveau de ces zones provoque alors des dépôts importants à proximité. L'environnement et ses variations à petite échelle conditionnent ainsi une dynamique sédimentaire locale suffisamment importante pour être remarquée. Cette redistribution de sédiments ainsi que le faible apport en sédiments estuariens dans ce secteur de l'estuaire font du marais de la Pointe-aux-Épinettes un environnement actuellement en équilibre avec lui-même.

Les marais du Saint-Laurent ne se comportent pas différemment des marais de climat tempéré durant la période libre de glace. L'action de la glace sur la végétation fait des marais du Saint-Laurent des environnements particuliers. Toutefois les processus sédimentaires observés dans cette étude avaient déjà été mis en évidence dans d'autres marais en climat tempéré. La forte variation de la végétation agit sur l'hydrodynamisme, mais ne modifie pas fondamentalement les processus sédimentaires. Cette observation confirme l'affirmation de Drapeau (1992) qui stipule que la dynamique sédimentaire des littoraux de l'estuaire du Saint-Laurent est comparable à celle des autres estuaires.

Les variations saisonnières de la végétation ont une influence importante sur les processus de sédimentation. La végétation arrachée au printemps met plusieurs mois à repousser, son action sur les courants et les vagues est ainsi variable dans le temps. On observe un minimum de transport sédimentaire en août correspondant au maximum de hauteur végétale.

Perspectives pour des études futures :

- Le faible budget sédimentaire observé pourrait être dû à la présence d'un estran sableux devant le marais. Il serait intéressant de comparer les phénomènes observés avec un marais précédé d'un estran vaseux comme celui de l'Isle-Verte.
- De l'eau douce s'écoule dans le marais via 2 ruisseaux aux extrémités est et ouest du marais supérieur. Leur rôle a été négligé, compte tenu de la petite taille des ruisseaux (<1 m de large) ainsi que de leur bassin versant (1,7 km² d'espace forestier). Il serait judicieux de quantifier leur débit et leur impact sur le transport sédimentaire et comme source potentielle de sédiments.
- Les nombreuses traces d'organismes benthiques observées sur les pièges à sédiments n'ont pas pu être prises en compte dans le cadre de cette étude, le rôle de l'activité biologique sur le transport sédimentaire dans les marais est-elle significative ?

- Vu l'importance du transport sédimentaire local (remise en suspension au niveau des zones nues d'après les mesures de 2010), il serait intéressant de procéder à des tests d'érodabilité du sédiment. Est-ce le système racinaire qui protège les sédiments ou la végétation elle-même?
- Si les zones nues sont érodées et les secteurs adjacents en accrétion, des marelles vont-elles se former? Il serait intéressant de quantifier le phénomène en termes d'épaisseur de sédiment ainsi que l'influence d'une altitude plus faible à petite échelle.
- Les blocs déplacés par les glaces dans le marais représentent une macro-rugosité importante qui mériterait d'être quantifiée.
- Un modèle de vagues adapté au marais étudié et à sa végétation pourrait permettre d'identifier les zones du marais les plus sensibles à l'érosion.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Allen, J.R.L., 2000. Morphodynamics of Holocene salt marshes: a review sketch from the Atlantic and Southern North Sea coasts of Europe. *Quaternary Science Reviews* 19, 1155-1231.

Allen, J.R.L., Duffy, M.J., 1998. Temporal and spatial depositional patterns in the Severn Estuary, southwestern Britain: intertidal studies at spring-neap and seasonal scales, 1991–1993. *Marine Geology* 146, 147-171.

Allen, J.R.L., Haslett, S.K., Rinkel, B.E., 2006. Holocene tidal palaeochannels, Severn Estuary Levels, UK: a search for granulometric and foraminiferal criteria. *Proceedings of the Geologists Association* 117, 329-344.

Armynot du Châtelet, E., Bout-Roumazeilles, V., Riboulleau, A., Trentesaux, A., 2009. Sediment (grain size and clay mineralogy) and organic matter quality control on living benthic foraminifera. *Revue de Micropaléontologie* 52, 75-84.

Beefink, W.G., Daane, M.C., van Liere, J.M., Nieuwenhuize, J., 1977. Analysis of estuarine soil gradients in salt marshes of the southwestern Netherlands with special reference to the Scheldt Estuary. *Hydrobiologia* 52, 93-106.

Bélangier, L., Bédard, J., 1994. Role of ice scouring and goose grubbing in marsh plant dynamics. *Journal of Ecology* 82, 437-445.

Bergeron, N.E., Abrahams, A.D., 1992. Estimating shear velocity and roughness length from velocity profiles. *Water Resources Research* 28, 2155-2158.

Bernatchez, P., Dubois, J.M.M., 2004. Bilan des connaissances de la dynamique de l'érosion des côtes du Québec maritime laurentien. *Géographie physique et Quaternaire* 58, 45-71.

Bertness, M.D., Gough, L., Shumway, S.W., 1992. Salt tolerances and the distribution of fugitive salt-marsh plants. *Ecology* 73, 1842-1851.

Blott, S.J., 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.

Bouchard, V., Lefeuvre, J.C., 2000. Primary production and macro-detritus dynamics in a European salt marsh: carbon and nitrogen budgets. *Aquatic Botanic* 67, 23-42.

Bourgon-Desroches, M., 2010. Évaluer le niveau d'intégrité écologique de la végétation d'un marais : le cas du marais de la pointe aux Épinettes, parc national du Bic. Mémoire de maîtrise, École supérieure d'aménagement du territoire et de développement régional, Université Laval, 55 p.

Cahoon, D.R., Lynch, J.C., Hensel, P., Boumans, R., Perez, B.C., Segura, B., Day, J.W., 2002. A device for high precision measurement of wetland sediment elevation: I. Recent improvements to the sedimentation-erosion table. *Journal of Sedimentary Research* 72, 730-733.

Callaghan, D.P., Bouma, T.J., Klaassen, P., van der Wal, D., Stive, M.J.F., Herman, P.M.J., 2010. Hydrodynamic forcing on salt-marsh development: Distinguishing the relative importance of waves and tidal flows. *Estuarine Coastal and Shelf Science* 89, 73-88.

Champagne, P., Denis, R., Lebel, C., 1983. Etablissement de modèles caractérisant l'équilibre dynamique des estrans de la rive sud du moyen estuaire du Saint-Laurent. Rapport manuscrit canadien des sciences halieutiques et aquatiques No 1711, Pêche et Océans Canada, 67 p.

Christiansen, T., Wiberg, P.L., Milligan, T.G., 2000. Flow and sediment transport on a tidal salt marsh surface. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 50, 315-331.

Christie, M.C., Dyer, K.R., 1998. Measurements of the turbid tidal edge over the Skeffling mudflats. In: Black, K.S., Paterson, D.M., Cramp, A. (Eds.) *Sedimentary Processes in the Intertidal Zone*. Geological Society (London), Special Publication 139, pp. 45-55.

Clifton, J., McDonald, P., Plater, A., Oldfield, F., 1999. Derivation of a grain-size proxy to aid the modelling and prediction of radionuclide activity in salt marshes and mud flats of the Eastern Irish Sea. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 48, 511-518.

- Connor, R., Chmura, G.L., 2000. Dynamics of above-and belowground organic matter in a high latitude macrotidal saltmarsh. *Marine Ecology Progress Series* 204, 101-110.
- Culberson, S.D., Foin, T.C., Collins, J.N., 2004. The role of sedimentation in estuarine marsh development within the San Francisco Estuary, California, USA. *Journal of Coastal Research* 20, 970-979.
- Dashtgard, S.E., Gingras, M.K., 2005. Facies architecture and ichnology of recent salt-marsh deposits: Waterside Marsh, New Brunswick, Canada. *Journal of Sedimentary Research* 75, 596-607.
- Davidson-Arnott, R.G.D., van Proosdij, D., Ollerhead, J., Schostak, L., 2002. Hydrodynamics and sedimentation in salt marshes: examples from a macrotidal marsh, Bay of Fundy. *Geomorphology* 48, 209-231.
- Dionne, J.C., 1972. Caractéristiques des schorres des régions froides, en particulier de l'estuaire du Saint-Laurent. *Zeitschrift für Geomorphologie, Suppl. Bd. 13*, 131-162.
- Dionne, J.C., 1973. La notion de pied de glace (Icefoot), en particulier dans l'estuaire du Saint-Laurent. *Cahiers de géographie du Québec* 17, 221-250.
- Dionne, J.C., 1984. An estimate of ice-drifted sediments based on the mud content of the ice cover at Montmagny, Middle St. Lawrence estuary. *Marine Geology* 57, 149-166.
- Dionne, J.C., 1985a. Formes, figures et faciès sédimentaires glaciels des estrans vaseux des régions froides. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 51, 415-451.
- Dionne, J.C., 1985b. Tidal marsh erosion by geese, St. Lawrence Estuary, Quebec. *Géographie physique et Quaternaire* 39, 99-105.
- Dionne, J.C., 1989. An estimate of shore ice action in a *Spartina* tidal marsh, St.Lawrence estuary, Quebec. *Journal of Coastal Research* 5, 281-293.
- Dionne, J.C., 1991. Nature lithologique et origine des cailloux de l'Anse Hamilton, Saint-Romuald, Québec. *Géographie physique et Quaternaire* 45, 229-240.
- Dionne, J.C., 1998. Sedimentary structures made by shore ice in muddy tidal-flat deposits, St. Lawrence estuary, Quebec. *Sedimentary Geology* 116, 261-274.

Dionne, J.C., 2000. Érosion récente du schorre supérieur à Saint-Anne-de-Beaupré, Québec. *Géographie physique et Quaternaire* 54, 69-89.

Dionne, J.C., 2003. Observation géomorphologiques sur les méga-blocs du secteur sud-est de la batture argileuse de la baie à l'Original, au parc du Bic, dans le Bas-Saint-Laurent (Québec). *Géographie physique et Quaternaire* 57, 95-101.

Dionne, J.C., 2004. Age et taux moyen d'accrétion verticale des schorres du Saint-Laurent estuarien, en particulier ceux de Montmagny et de Sainte-Anne-de-Beaupré, Québec. *Géographie physique et Quaternaire* 58, 73-108.

Donnelly, J.P., Bertness, M.D., 2001. Rapid shoreward encroachment of salt marsh cordgrass in response to accelerated sea-level rise. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 98, 14218-14223.

Drapeau, G., 1992. Dynamique sédimentaire des littoraux de l'estuaire du Saint-Laurent. *Géographie physique et Quaternaire* 46, 233-242.

Dyer, K.R., Christie, M.C., Wright, E.W., 2000. The classification of intertidal mudflats. *Continental Shelf Research* 20, 1039-1060.

Fagherazzi, S., Priestas, A.M., 2010. Sediments and water fluxes in a muddy coastline: interplay between waves and tidal channel hydrodynamics. *Earth Surface Processes and Landforms* 35, 284-293.

Fan, D.D., Li, C., Archer, A.W., Wang, P., 2002. Temporal distribution of diastems in deposits of an open-coast tidal flat with high suspended sediment concentrations. *Sedimentary Geology* 152, 173-181.

Fan, D.D., Li, C., Wang, P., 2004. Influences of storm erosion and deposition on rhythmites of the upper Wenchang formation (upper Ordovician) around Tonglu, Zhejiang province, China. *Journal of Sedimentary Research* 74, 527-536.

Fan, D.D., Guo, Y.X., Wang, P., Shi, J.Z., 2006. Cross-shore variations in morphodynamic processes of an open-coast mudflat in the Changjiang Delta, China: With an emphasis on storm impacts. *Continental Shelf Research* 26, 517-538.

FitzGerald, D.M., Fenster, M.S., Argow, B.A., Buynevich, I.V., 2008. Coastal impacts due to sea-level rise. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 36, 601-647.

Fournier, A., Allard, M., Seguin, M.K., 1987. Typologie morpho-génétique des marelles du marais littoral de la baie de Kangiqsualujjuaq, estuaire du George, Québec nordique. *Géographie physique et Quaternaire* 41, 47-64.

French, J.R., Spencer, T., Murray, A.L., Arnold, N.S., 1995. Geostatistical analysis of sediment deposition in two small tidal wetlands, Norfolk, UK. *Journal of Coastal Research* 11, 308-321.

French, C.E., French, J.R., Clifford, N.J., Watson, C.J., 2000. Sedimentation-erosion dynamics of abandoned reclamations: the role of waves and tides. *Continental Shelf Research* 20, 1711-1733.

Gauthier, B., 1982. L'étagement des plantes vasculaires en milieu Saumâtre, Estuaire du Saint-Laurent. *Le Naturaliste Canadien* 109, 189-203.

Gauthier, B., Goudreau, M., 1983. Mares glacielles et non glacielles dans le marais salé de l'Isle-Verte, estuaire du St-Laurent, Québec. *Géographie physique et Quaternaire* 37, 49-66.

Gehrels, W.R., Milne, G.A., Kirby, J.R., Patterson, R.T., Belknap, D.P., 2004. Late Holocene sea-level changes and isostatic crustal movements in Atlantic Canada. *Quaternary International* 120, 79-89.

Goodman, J.E., Wood, M.E., Gehrels, W.R., 2007. A 17-yr record of sediment accretion in the salt marshes of Maine (USA). *Marine Geology* 242, 109-121.

Green, M.O., Coco, G., 2007. Sediment transport on an estuarine intertidal flat: Measurements and conceptual model of waves, rainfall and exchanges with a tidal creek. *Estuarine Coastal and Shelf Science* 72, 553-569.

Huard, A.M., 2010. Évolution saisonnière de la biogéochimie et de la microbiologie des marais côtiers nordiques: le cas des marelles du parc national du Bic. Mémoire de maîtrise, Institut des sciences de la mer de Rimouski, Université du Québec à Rimouski, 99 p.

Kastler, J.A., Wiberg, P.L., 1996. Sedimentation and boundary changes of Virginia salt marshes. *Estuarine Coastal and Shelf Science* 42, 683-700.

Kirwan, M. L., Murray, A. B., 2008. Ecological and morphological response of brackish tidal marshland to the next century of sea level rise: Westham Island, British Columbia. *Global and Planetary Change* 60(3-4): 471-486.

Koozare, A., Vaníček, P., Santos, M., 2008. Pattern of recent vertical crustal movements in Canada. *Journal of Geodynamics* 45, 133-145.

Leonard, L.A., 1997. Controls of sediment transport and deposition in an incised mainland marsh basin, southeastern North Carolina. *Wetlands* 17, 263-274.

Leonard, L.A., Wren, P.A., Beavers, R.L., 2002. Flow dynamics and sedimentation in *Spartina alterniflora* and *Phragmites australis* marshes of the Chesapeake Bay. *Wetlands* 22, 415-424.

Leonard, L.A., Hine, A.C., Luther, M.E., 1995. Surficial sediment transport and deposition processes in a *Juncus Roemerianus* marsh, West-Central Florida. *Journal of Coastal Research* 11, 322-336.

Leonard, L., Luther, G.W., 1995. Flow hydrodynamics in tidal marsh canopies. *Limnology and Oceanography* 40, 1474-1484.

Leonard, L.A., Reed, D.J., 2002. Hydrodynamics and sediment transport through tidal marsh canopies. *Journal of Coastal Research Special Issue* 36, 459-469.

Leorri, E., Martin, R.E., Horton, B.P., 2009. Field experiments on bioturbation in salt marshes (Bombay Hook National Wildlife Refuge, Smyrna, DE, USA): implications for sea-level studies. *Journal of Quaternary Science* 24, 139-149.

Li, H., Yang, S.L., 2009. Trapping effect of tidal marsh vegetation on suspended sediment, Yangtze Delta. *Journal of Coastal Research* 25, 915-924.

Marion, C., Anthony, E.J., Trentesaux, A., 2009. Short-term (≤ 2 yrs) estuarine mudflat and saltmarsh sedimentation: High-resolution data from ultrasonic altimetry, rod surface-elevation table, and filter traps. *Estuarine Coastal and Shelf Science* 83, 475-484.

Möller, I., Spencer, T., French, J.R., Leggett, D.J., Dixon, M., 1999. Wave transformation over salt marshes: A field and numerical modelling study from north Norfolk, England. *Estuarine Coastal and Shelf Science* 49, 411-426.

Morissette, A., 2007. Évolution côtière haute résolution de la région de Longue-Rive-Forestville, côte nord de l'estuaire maritime du Saint-Laurent, Québec. Mémoire de maîtrise, Université du Québec à Rimouski, 276 p.

Murray, A.L., Spencer, T., 1997. On the wisdom of calculating annual material budgets in tidal wetlands. *Marine Ecology Progress Series* 150, 207-216.

Nepf, H.M., 1999. Drag, turbulence, and diffusion in flow through emergent vegetation. *Water Resources Research* 35, 479-489.

Neumeier, U., 2005. Quantification of vertical density variations of salt-marsh vegetation. *Estuarine Coastal and Shelf Science* 63, 489-496.

Neumeier, U., 2007. Velocity and turbulence variations at the edge of saltmarshes. *Continental Shelf Research* 27, 1046-1059.

Neumeier, U., in press. Boulder transport by ice on a St. Lawrence salt-marsh, pattern of pluriannual movements. *Proceedings Coastal Sediments '11*, ASCE Press, Reston, VA.

Neumeier, U., Amos, C.L., 2006a. Turbulence reduction by the canopy of coastal *Spartina* salt-marshes. *Journal of Coastal Research Special Issue* 39, vol. 1, 433-439.

Neumeier, U., Amos, C.L., 2006b. The influence of vegetation on turbulence and flow velocities in European salt-marshes. *Sedimentology* 53, 259-277.

Neumeier, U., Ciavola, P., 2004. Flow resistance and associated sedimentary processes in a *Spartina maritima* salt-marsh. *Journal of Coastal Research* 20, 435-447.

Ollerhead, J., van Proosdij, D., Davidson-Arnott, R.G.D., 1999. Ice as a mechanism for contributing sediments to the surface of a macro-tidal salt marsh, Bay of Fundy. *Proceedings of the 1999 Canadian Coastal Conference*, Canadian Coastal Science and Engineering Association, 345-358.

Pejrup, M., Andersen, T.J., 2000. The influence of ice on sediment transport, deposition and reworking in a temperate mudflat area, the Danish Wadden Sea. *Continental Shelf Research* 20, 1621-1634.

Perry, K., Taylor, K., 2007. Environmental sedimentology: introduction. In: Perry, K., Taylor, K. (Eds.), *Environmental sedimentology*. Blackwell Publishing Ltd, pp. 1-32.

Pethick, J., Leggett, D., Husain, L., 1990. Boundary layers under salt marsh vegetation developed in tidal currents. In: Thornes, J.B. (Ed.), *Vegetation and Erosion*. Wiley, London, pp. 113-123.

Phleger, F.B., 1977. Soils of marine marshes. In: Chapman, V.J. (Ed.), *Wet coastal ecosystems*. Elsevier, New Zealand, pp. 69-77.

Poulin, P., Pelletier, E., Koutitonski, V.G., Neumeier, U., 2009. Seasonal nutrient fluxes variability of northern salt marshes: examples from the lower St. Lawrence Estuary. *Wetlands Ecology and Management* 17, 655-673.

Poulin, P., Pelletier, E., Saint-Louis, R., 2007. Seasonal variability of denitrification efficiency in northern salt marshes: An example from the St. Lawrence Estuary. *Marine Environmental Research* 63, 490-505.

Pye, K., 1995. Controls on long-term salt-marsh accretion and erosion in the Wash, eastern England. *Journal of Coastal Research* 11, 337-356.

Pye, K., French, P.W., 1993. *Erosion and accretion processes on British salt marshes*. Vol. 1, Introduction: Saltmarsh Processes and Morphology., 432 pp.

Ranwell, D.S., 1972. *Ecology of salt marshes and sand dunes*. Chapman and Hall Ltd, London, 258 pp.

Ravens, T.M., Thomas, R.C., Roberts, K.A., Santschi, P.H., 2009. Causes of salt marsh erosion in Galveston Bay, Texas. *Journal of Coastal Research* 25, 265-272.

Reed, D.J., 1995. The response of coastal marshes to sea-level rise - Survival or submergence. *Earth Surface Processes and Landforms* 20, 39-48.

Reed, D.J., Spencer, T., Murray, A.L., French, J.R., Leonard, L., 1999. Marsh surface sediment deposition and the role of tidal creeks: Implications for created and managed coastal marshes. *Journal of Coastal Conservation* 5, 81-90.

Rogé, M., 2010. Processus hydrodynamiques et sédimentaires dans les marelles de l'estuaire du Saint-Laurent. Master thesis, Université de Bretagne Occidentale, Brest, 57 pp., unpublished.

Roman, C.T., Peck, J.A., Allen, J.R.L., King, J.W., Appleby, P.G., 1997. Accretion of a New England (U.S.A.) salt marsh in response to inlet migration, storms, and sea-level rise. *Estuarine Coastal and Shelf Science* 45, 717-727.

Sérodes, J.B., Dubé, M., 1983. Dynamique sédimentaire d'un estran à spartines (Kamouraska, Québec). *Le Naturaliste Canadien* 110, 11-26.

Sérodes, J.B., Troude, J.P., 1984. Sedimentation cycle of a freshwater tidal flat in the St.-Lawrence Estuary. *Estuaries* 7, 119-127.

Sérodes, J.B., Troude, J.P., Deschênes, J., 1983. Etude de la dynamique sédimentaire et du pouvoir de transformation des zones intertidales de l'estuaire moyen du Saint-Laurent. Cas des estrans de Kamouraska. Environnement Canada, Ottawa, 90 pp.

Shi, Z., Chen, J.Y., 1996. Morphodynamics and sediment dynamics on intertidal mudflats in China (1961-1994). *Continental Shelf Research* 16, 1909-1926.

Shroder, K., Kiehl, K., Stock, M., 2002. Directional and non-directional vegetation changes in a temperate salt marsh in relation to biotic and abiotic factors. *Applied Vegetation Science* 5, 33-44.

Silva, H., Dias, J., Cacador, I., 2009. Is the salt marsh vegetation a determining factor in the sedimentation processes? *Hydrobiologia* 621, 33-47.

Spratt, A.T., Neumeier, U., Lavender, S.J., 2005. Predictions of saltmarsh suitability as a coastal defence measure based on numerically-modelled extrapolations from a present day Digital Terrain Model. In: Teeuw, R., Whitworth, M., Laughton, K., (Eds.) *Proceedings of RSPSoc 2005: Measuring, Mapping and Managing a Hazardous World*. The Remote Sensing and Photogrammetry Society (RSPSoc), Portsmouth, UK.

Steel, T.J., Pye, K., 1997. The development of saltmarsh tidal creek networks: Evidence from the U.K. *Proceedings of the Canadian Coastal Conference*, 267-280.

Stumpf, R.P., 1983. The process of sedimentation on the surface of a salt marsh. *Estuarine Coastal and Shelf Science* 17, 495-508.

Suchrow, S., Jensen, K., 2010. Plant species responses to an elevational gradient in German North Sea salt marshes. *Wetlands* 30, 735-746.

Torres, R., Fagherazzi, S., van Proosdij, D., Hopkinson, C., 2006. Salt marsh geomorphology: Physical and ecological effects on landform. *Estuarine Coastal and Shelf Science* 69, 309-310.

Troude, J.P., Sérodes, J.B., 1988. Le rôle des glaces dans le régime morpho-sédimentologique d'un estran de l'estuaire moyen du Saint-Laurent. *Canadian Journal of Civil Engineering* 15, 348-354.

Troude, J.P., Sérodes, J.B., 1990. Caractéristiques hydrodynamiques d'un estran à forte sédimentation. *Canadian Journal of Civil Engineering* 17, 148-155.

Tucker, M.J., Pitt, E.G., 2001. *Waves in Ocean Engineering*. Elsevier Science, Oxford, 548 pp.

Uncles, R.J., Stephens, J.A., 2009. Turbidity and sediment transport in a muddy sub-estuary. *Estuarine Coastal and Shelf Science* 87, 213-224.

van Proosdij, D., Davidson-Arnott, R.G.D., Ollerhead, J., 2006a. Controls on spatial patterns of sediment deposition across a macro-tidal salt marsh surface over single tidal cycles. *Estuarine Coastal and Shelf Science* 69, 64-86.

van Proosdij, D., Ollerhead, J., Davidson-Arnott, R.G.D., 2006b. Seasonal and annual variations in the volumetric sediment balance of a macro-tidal salt marsh. *Marine Geology* 225, 103-127.

Van Rijn, L.C., 1998. *Principles of coastal morphology*, Amsterdam, The Netherlands, 715 pp.

- van Straaten, L.M.J.U., Kuenen, H., 1958. Tidal action as a cause of clay accumulation. *Journal of Sedimentary Petrology* 28, 406-413.
- Vermeer, M., Rahmstorf, S., 2009. Global sea level linked to global temperature. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 106, 21527-21532.
- Voulgaris, G., Meyers, S.T., 2004. Temporal variability of hydrodynamics, sediment concentration and sediment settling velocity in a tidal creek. *Continental Shelf Research* 24, 1659-1683.
- Wang, F.C., Lu, T., Sikora, W.B., 1993. Intertidal marsh suspended sediment transport processes, Terrebonne Bay, Louisiana, U.S.A. *Journal of Coastal Research* 9, 209-220.
- Wood, N., Hine, A.C., 2007. Spatial trends in marsh sediment deposition within a microtidal creek system, Waccasassa Bay, Florida. *Journal of Coastal Research* 23, 823-833.
- Woolnough, S.J., Allen, J.R.L., Wood, W.L., 1995. An exploratory numerical-model of sediment deposition over tidal salt marshes. *Estuarine Coastal and Shelf Science* 41, 515-543.
- Yang, S.L., Li, H., Ysebaert, T., Bouma, T.J., Zhang, W.X., Wang, Y., Li, P., Li, M., Ding, P., 2008. Spatial and temporal variations in sediment grain size in tidal wetlands, Yangtze Delta: On the role of physical and biotic controls. *Estuarine Coastal and Shelf Science* 77, 657-671.
- Yang, S.L., Li, P., Gao, A., Zhang, J., Zhang, W.X., Li, M., 2007. Cyclical variability of suspended sediment concentration over a low-energy tidal flat in Jiaozhou Bay, China: effect of shoaling on wave impact. *Geo-Marine Letters* 27, 345-353.
- Yeo, R.K., Risk, M.J., 1981. The sedimentology, stratigraphy, and preservation of intertidal deposits in the Minas Basin system, Bay of Fundy. *Journal of Sedimentary Petrology* 51, 245-260.
- Zhang, C., Wang, L., Li, G., Dong, S., Yang, J., Wang, X., 2002. Grain size effect on multi-element concentrations in sediments from the intertidal flats of Bohai Bay, China. *Applied Geochemistry* 17, 59-68

ANNEXES

ANNEXE I : Localisation du marais de la Pointe-aux-Épinettes

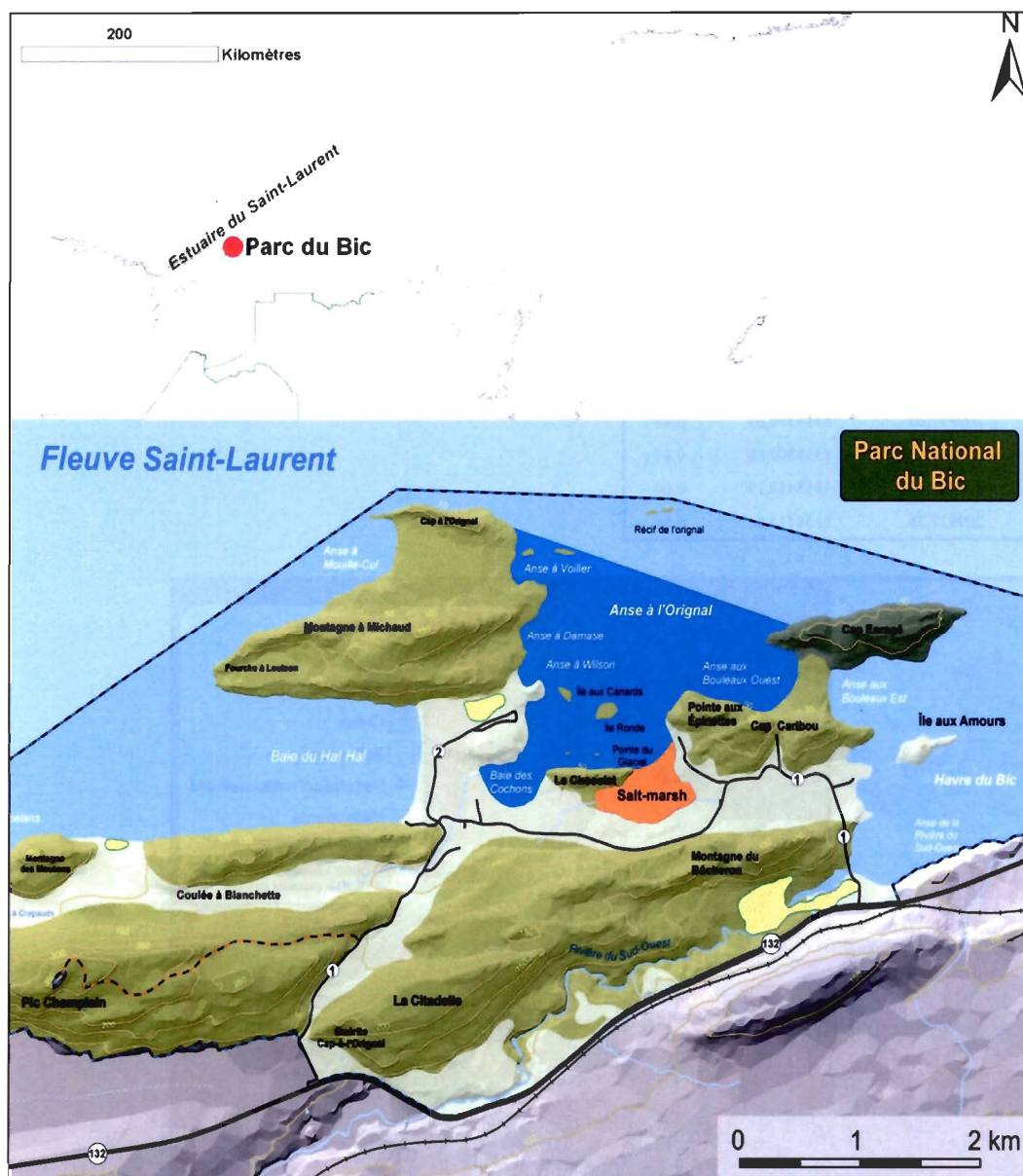


Fig. 10. Localisation du marais de la Pointe-aux-Épinettes : situé dans le secteur maritime de l'estuaire du Saint-Laurent, le parc du Bic abrite le marais de la Pointe-Aux-Épinettes (en orange sur la figure) au fond de l'Anse à l'Original (Carte modifiée d'un document du Parc National du Bic).

Table 5. Positions levées avec le GPS différentiel ProMark3 des instruments et zones de mesures de la végétation dans le marais de la Pointe-aux-Épinettes. Les positions sont exprimées selon le système de coordonnées MTM fuseau 6 (NAD 83), l'altitude est en mètres au-dessus du niveau marin moyen (NMM29).

ID	Est	Nord	Alt
ADV1	209995,49	5358244,50	0,73
ADV2	209927,47	5358302,91	0,44
ADV3	209850,38	5358366,84	-0,12
OBS1	209954,84	5358271,30	0,56
OBS2	209737,29	5358426,28	-0,44
PRO	209901,51	5358338,82	0,16
PT2	209870,58	5358445,53	0,21
PT3	209797,72	5358673,92	-0,80
V1-est	210010,68	5358259,41	0,78
V1-ouest	210008,80	5358256,92	0,78
V2-est	209937,63	5358310,69	0,44
V2-ouest	209935,10	5358308,88	0,44
V3-est	209928,88	5358418,19	0,60
V3-ouest	209927,36	5358415,51	0,58

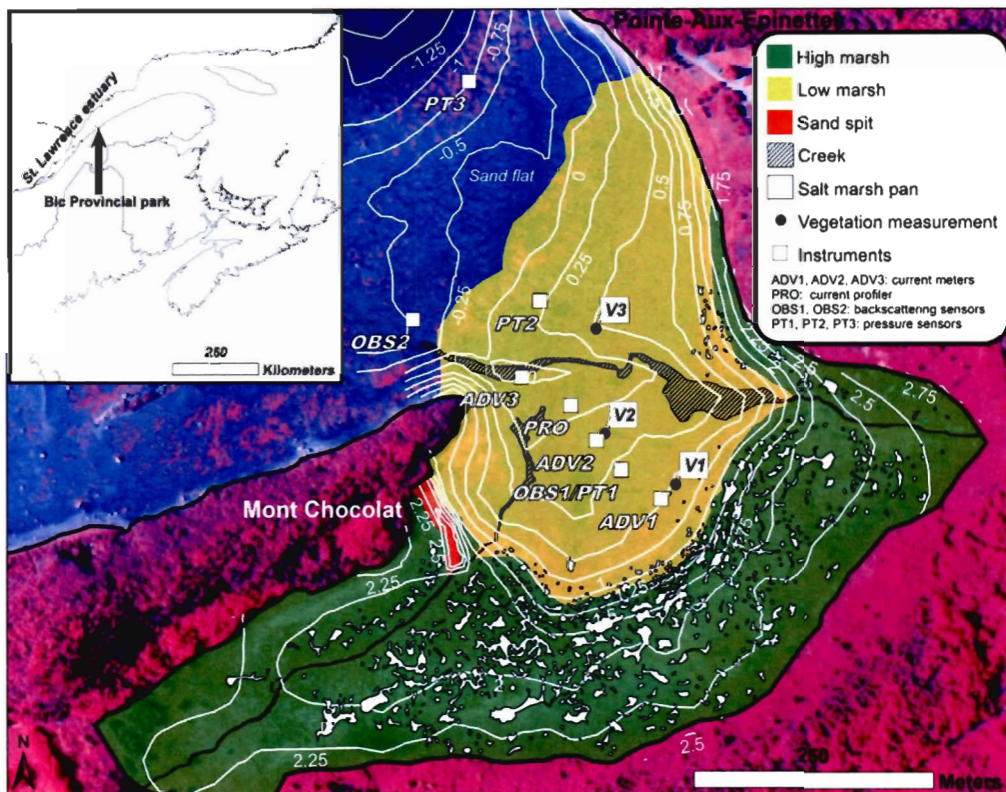


Fig. 11. Carte de zonation du marais, des instruments et zones de mesures de la végétation



Fig. 12. Panorama du marais de la Pointe-aux-Épinettes, en septembre 2008 et Janvier 2009

ANNEXE II : Calibration des turbidimètres

Pour obtenir des concentrations de sédiments en suspension (SSC) à partir des mesures des OBS déployés dans le marais, les calibrations ont été réalisées au laboratoire en janvier 2010 à partir d'échantillons sédimentaires humides récoltés à chaque station. Les sédiments de la station ADV2 ont été sélectionnés car le signal produit correspondait le mieux aux mesures de terrain. La méthode de calibration est inspirée du manuel des OBS 3+. La calibration est effectuée dans un seau en plastique noir de diamètre 30 cm avec un agitateur magnétique pour maintenir les sédiments en suspension. Des sédiments sont ajoutés progressivement dans l'eau. Suite à 10 minutes d'agitation, 1 minute d'acquisition est enregistrée et moyennée pour chaque OBS. La concentration en sédiments en suspensions pour chaque ajout de sédiment est mesurée par filtration de 60mL sur filtre Whatman GF/F (diamètre des pores 0,7 µm). L'échantillon d'eau filtré est prélevé en trois fois durant les mesures successives des différents OBS.

Table 6. Calibration des OBS à partir d'un échantillon de sédiments collecté à ADV2, signal et écart type (SD) pour chaque appareil.

OBS	ADV1		ADV3		PRO		ADV2 12cm		ADV2 37cm		OBS1		OBS2	
Serial	8458		8460		8459		2116		2157		374		375	
SSC (mg/L)	signal	SD	signal	SD	signal	SD	signal	SD	signal	SD	signal	SD	signal	SD
0,00	185,18	3,44	183,00	10,74	142,66	3,12	169,60	159,46	391,77	118,53	32609,24	11,81	32471,29	1,44
3,92	517,21	15,73	518,30	14,16	487,08	17,77	2185,77	270,48	2910,45	132,08	32704,61	3,67	32564,93	13,73
6,83	984,33	108,18	867,18	32,63	850,76	29,25	4782,86	278,25	6134,41	243,63	32774,07	6,22	32646,96	6,16
9,80	1337,28	42,99	1124,87	34,75	1119,13	32,76	6485,05	495,91	7857,59	237,40	32837,63	7,97	32723,48	9,55
12,08	1572,98	68,80	1533,39	57,01	1532,99	42,16	9474,32	358,39	11231,81	329,43	32950,64	57,14	32820,97	11,74
18,00	2399,49	91,23	2362,00	82,28	2360,02	67,08	15269,26	452,45	17663,22	834,19	33180,18	15,83	33054,54	15,19
60,00	6483,37	182,96	6367,22	166,86	6415,51	215,03	44271,46	1261,80	48537,82	1265,43	34197,15	32,02	34128,85	35,26
Formule de calibration SSC (mg/L)	(x-268)/105		(x-122)/72		(x-183)/105		(x-2325)/554				(x-32577)/31		(x-32441)/32	

ANNEXE III : Pièges à sédiments

Le premier tableau (page 64) correspond à une **caractérisation générale** des 36 sites de mesures de dépôts sédimentaires. Les informations présentées sont :

Distance : la distance de la limite estran-marais (m)

X_MTM_6 et **Y_MTM_6** : les coordonnées (MTM fuseau 6, NAD 83)

Alt : altitude par rapport au niveau moyen de la mer mesurée en mètres

Végétation #1 : végétation dominante

% de couverture : pourcentage de la zone avec une couverture végétale homogène

Pente : pente en pourcent

Mean, Sorting, Mode, %Mud : taille moyenne des sédiments, classement, mode et pourcentage de vase (<63µm)

Zone nue : la distance de la zone nue la plus proche

Zones : classement des différentes zones du marais selon le code suivant:

1 : haut marais

2 : marais inférieur autre que 3 et 4

3 : marais inférieur avec zone nue à moins de 10 m

4 : marais inférieur proche du chenal de marais

Le second tableau (pages 65 à 67) correspond à des **mesures ponctuelles** aux dates d'installation des pièges à sédiments :

Sed: dépôts sédimentaires

Sed min : masse minérale des dépôts sédimentaires

%Org : fraction organique des dépôts sédimentaires

H-veg : hauteur de la végétation (moyenne de 3 mesures autour de la station)

D veg : densité de la végétation en tiges/m² (3 mesures moyennées)

H-eau : hauteur d'eau maximale à la station durant cette marée

RR : rugosité relative=H-veg/Heau

L'absence de données correspond à une absence de mesure, une mesure nulle est indiquée par « 0 ».

Table 7. Données des stations pièges à sédiments.

General														
station	distance	X_MTM_6	Y_MTM_6	Alt	vegetation #1	% couverture	pente %	Mean (µm)	Sorting (µm)	Mode (mm)	% Mud	Zone nue (m)	zones	
1	385,5	210019,8	5358095,6	2,18	<i>S.patens</i>	100	0,70	17,1	4,6	45,8	82,1	137	1	
2	343,6	209988,3	5358124,4	1,93	<i>S.patens</i>	100	1,45	43,3	3,4	66,5	52,3	97	1	
3	323,5	209980,1	5358143,4	1,59	<i>S.patens</i>	100	3,79	32,8	3,9	73,0	60,5	76	1	
4	293,2	209962,6	5358168,2	1,12	<i>S.alterniflora</i>	50	0,95	51,1	2,9	73,0	47,3	46	2	
5	258,2	209944,0	5358197,9	0,69	<i>S.alterniflora</i>	30	1,25	43,2	2,6	60,6	62,1	13	3	
6	229,3	209929,1	5358222,8	0,48	<i>S.alterniflora</i>	100	0,36	55,5	3,9	55,2	57,3	9	3	
7	196,3	209898,1	5358241,1	0,51	<i>S.alterniflora</i>	75	0,64	313,1	8,4	55,2	23,8	6	3	
8	165,8	209895,6	5358276,9	0,39	<i>S.alterniflora</i>	90	0,23	323,4	8,0	245,5	19,0	11	3	
9	132,7	209872,5	5358301,0	0,31	<i>S.alterniflora</i>	80	0,54	918,0	7,7	245,5	7,5	42	2	
10	90,1	209849,8	5358337,2	0,20	<i>S.alterniflora</i>	65	0,46	828,8	7,8	295,9	6,1	37	4	
11	67,9	209834,7	5358353,6	0,02	<i>S.alterniflora</i>	75	0,68	1491,9	7,4	245,5	5,8	17	4	
12	420,5	210078,8	5358090,0	2,29	<i>Carex sp.</i>	90	0,21	13,7	4,0	38,0	90,4	171	1	
13	385,3	210060,5	5358120,2	2,22	<i>S.patens</i>	90	1,45	21,8	4,2	45,8	78,0	136	1	
14	355,8	210041,8	5358143,1	2,07	<i>S.patens</i>	70	0,86	36,8	3,8	60,6	57,3	106	1	
15	331,9	210029,5	5358163,7	1,83	<i>S.patens</i>	100	2,56	20,6	4,3	50,3	79,2	83	1	
16	291,4	210002,6	5358194,2	1,14	<i>S.alterniflora</i>	100	0,85	22,1	4,3	50,3	76,7	42	2	
17	266,6	209986,6	5358213,2	0,85	<i>S.alterniflora</i>	50	0,77	40,4	3,3	66,5	56,7	17	3	
18	233,1	209969,1	5358241,9	0,60	<i>S.alterniflora</i>	70	0,31	53,1	2,5	66,5	46,1	9	3	
19	207,1	209954,8	5358263,7	0,55	<i>S.alterniflora</i>	80	0,49	88,8	6,1	66,5	39,6	18	3	
20	174,2	209931,5	5358287,4	0,39	<i>S.alterniflora</i>	70	0,44	540,1	9,2	73,0	9,4	20	2	
21	142,8	209912,2	5358312,1	0,36	<i>S.alterniflora</i>	50	0,55	144,0	5,6	55,2	28,8	35	2	
22	115,2	209897,4	5358335,5	0,19	<i>S.alterniflora</i>	60	0,52	277,1	8,8	66,5	24,3	49	4	
23	71,3	209867,5	5358366,9	0,00	<i>S.alterniflora</i>	70	1,39	924,2	10,1	55,2	12,0	16	4	
24	42,2	209850,3	5358391,4	0,05	0	0	1,67	353,0	4,1	245,5	4,2	14	4	
25	23,4	209835,2	5358403,6	0,22	<i>S.alterniflora</i>	80	1,60	1855,6	8,4	245,5	4,2	31	4	
26	0,0	209826,0	5358426,0	0,12	<i>S.alterniflora</i>	45	1,48	1742,2	6,3	245,5	3,0	52	4	
27	385,5	210076,0	5358164,3	2,12	<i>S.patens</i>	50	0,96	5,0	3,6	23,8	100,0	117	1	
28	351,3	210058,8	5358194,4	1,78	<i>S.patens</i>	90	1,95	30,0	4,2	80,2	60,2	88	1	
29	328,7	210040,7	5358208,7	1,40	<i>S.alterniflora</i>	100	1,53	20,3	4,1	45,8	80,2	65	2	
30	288,2	210016,8	5358241,4	0,89	<i>S.alterniflora</i>	100	0,62	35,5	3,5	73,0	61,6	39	2	
31	262,1	210001,0	5358262,2	0,75	<i>S.alterniflora</i>	80	0,34	26,9	4,1	73,0	67,2	28	2	
32	231,3	209977,4	5358282,8	0,67	<i>S.alterniflora</i>	90	0,21	33,5	3,6	80,2	60,8	29	2	
33	198,8	209953,7	5358305,3	0,40	<i>S.alterniflora</i>	100	0,45	37,9	4,6	55,2	59,8	4	3	
34	168,5	209936,6	5358330,5	0,33	<i>S.alterniflora</i>	80	0,56	139,7	8,6	55,2	35,1	21	4	
35	135,4	209917,9	5358358,0	0,06	0	0	0,10	117,0	8,0	66,5	35,8	19	4	
36	111,0	209901,7	5358376,4	0,07	<i>S.alterniflora</i>	50	1,02	520,9	12,0	88,0	18,5	10	4	

19 juin 2009								23 juin 2009							
st	sed (g/m ²)	sed min (g/m ²)	% Org	H-veg (m)	D veg	H-eau (m)	RR	sed (g/m ²)	sed min (g/m ²)	% Org	H-veg (m)	D veg	H-eau (m)	RR	
1						0,00		4,95	2,98	40	0,25		0,28	0,89	
2						0,00		6,39	4,17	35	0,25		0,52	0,48	
3						0,00		4,81	3,22	33	0,22		0,87	0,25	
4					85	0,00		10,10	6,32	37	0,16	85	1,34	0,12	
5	7,25	6,00	17	0,09		0,12	0,73	6,46	4,70	27	0,10		1,76	0,06	
6	8,22	7,04	14	0,12	62	0,34	0,35	14,10	12,66	10	0,14	62	1,98	0,07	
7	5,87	4,41	25	0,07	30	0,31	0,23	6,41	4,28	33	0,08	30	1,95	0,04	
8	5,63	4,50	20	0,09	53	0,42	0,21	5,41	4,07	25	0,08	53	2,06	0,04	
9	5,51	4,03	27	0,10	34	0,50	0,20	3,34	2,14	36	0,11	34	2,14	0,05	
10	5,66	4,54	20	0,09	24	0,62	0,15	6,29	4,65	26	0,10	24	2,26	0,04	
11	5,33	4,02	25	0,09	38	0,80	0,11	7,91	5,56	30	0,10	38	2,44	0,04	
12						0,00		1,61	0,42	74	0,45		0,17	2,66	
13						0,00		3,49	1,55	56	0,30		0,24	1,26	
14						0,00		3,14	1,25	60	0,40		0,39	1,03	
15						0,00		3,18	1,76	45	0,30		0,63	0,48	
16						0,00		3,22	2,35	27	0,24		1,32	0,18	
17				0,16	50	0,00		3,50	2,58	26	0,16	50	1,61	0,10	
18	6,91	5,47	21	0,12		0,21	0,56	4,35	3,64	16	0,12		1,85	0,06	
19	7,87	6,51	17	0,11	33	0,27	0,41	6,47	5,07	22	0,11	33	1,91	0,06	
20	4,65	3,46	26	0,11	34	0,43	0,26	4,98	3,61	27	0,11	34	2,07	0,05	
21	6,49	5,03	22	0,07	18	0,46	0,15	5,97	4,29	28	0,07	18	2,10	0,03	
22	6,13	4,77	22	0,09	22	0,63	0,14	7,25	5,72	21	0,09	22	2,27	0,04	
23	6,93	5,46	21	0,10	29	0,82	0,12	6,36	5,18	19	0,10	29	2,46	0,04	
24	7,93	6,94	12	0,00		0,77	0,00	18,54	17,28	7	0,00		2,41	0,00	
25	3,20	2,09	35	0,09	27	0,60	0,15	3,24	2,22	31	0,09	27	2,24	0,04	
26	5,13	3,64	29	0,09	25	0,69	0,13	3,60	2,26	37	0,09	25	2,33	0,04	
27						0,00		2,93	1,25	57	0,25		0,34	0,73	
28						0,00		2,99	1,85	38	0,25		0,67	0,37	
29					70	0,00		2,59	1,39	46	0,08	70	1,06	0,08	
30					95	0,00		3,73	2,81	25	0,17	95	1,56	0,11	
31	7,19	5,06	30	0,10	55	0,06	1,56	7,29	5,94	18	0,10	55	1,70	0,06	
32	6,27	4,56	27	0,10	55	0,15	0,69	4,03	2,92	28	0,11	55	1,79	0,06	
33	5,29	4,16	21	0,12	40	0,42	0,29	9,15	7,69	16	0,12	40	2,06	0,06	
34	7,44	6,16	17	0,09	32	0,49	0,18	4,00	3,07	23	0,09	32	2,13	0,04	
35	12,77	11,54	10	0,10		0,75	0,13	8,52	7,61	11	0,10		2,39	0,04	
36	11,50	9,76	15	0,11	34	0,75	0,15	5,60	4,15	26	0,13	34	2,39	0,05	

st	20 aout 2009							30 aout 2009						
	sed (g/m ²)	sed min (g/m ²)	% Org	H-veg (m)	D veg	H-eau (m)	RR	sed (g/m ²)	sed min (g/m ²)	% Org	H-veg (m)	D veg	H-eau (m)	RR
1	0,21	0,05	76	0,25		0,20	1,24				0,25		0,00	
2	0,40	-0,10	124	0,35		0,44	0,79				0,35		0,00	
3	0,46	0,15	68	0,27		0,79	0,34				0,27		0,00	
4	1,20	0,90	25	0,30		1,26	0,24				0,30		0,00	
5	4,11	3,59	13	0,19		1,68	0,11				0,19		0,00	
6	5,49	4,76	13	0,29	52	1,90	0,15	3,14	2,67	15	0,29	52	0,39	0,75
7	3,56	3,01	16	0,14	30	1,87	0,08	2,26	1,67	26	0,14	30	0,36	0,39
8	7,25	6,35	12	0,22	38	1,98	0,11	6,21	5,65	9	0,22	38	0,47	0,46
9	2,10	1,43	32	0,20	35	2,06	0,10	4,09	3,23	21	0,20	35	0,55	0,36
10	6,13	5,16	16	0,17	18	2,18	0,08	4,08	3,30	19	0,17	18	0,67	0,25
11	4,27	3,70	13	0,23	22	2,36	0,10	4,85	4,22	13	0,23	22	0,85	0,27
12	0,14	0,02	82	0,35		0,09	3,93				0,35		0,00	
13	0,68	0,30	55	0,35		0,16	2,20				0,35		0,00	
14	9,98	2,27	77	0,40		0,31	1,30				0,40		0,00	
15	0,90	0,34	63	0,40		0,55	0,73				0,40		0,00	
16	2,14	1,45	33	0,60	35	1,24	0,48				0,60	35	0,00	
17	4,15	3,49	16	0,37	42	1,53	0,24				0,37	42	0,00	
18	6,72	3,90	42			1,77		3,46	2,60	25			0,26	
19	6,05	5,19	14	0,15	37	1,83	0,08	6,20	5,58	10	0,15	37	0,32	0,47
20	4,22	3,40	20	0,20		1,99	0,10	5,95	5,18	13	0,20		0,48	
21	4,63	4,04	13	0,14	17	2,02	0,07	7,74	6,88	11	0,14	17	0,51	0,27
22	7,76	6,86	12	0,16	25	2,19	0,07	7,60	6,99	8	0,16	25	0,68	0,23
23	2,48	1,75	29			2,38		5,04	4,23	16			0,87	
24			3	0,00	0	2,33	0,00	21,79	19,18	12	0,00	0	0,82	0,00
25	3,16	2,52	20	0,18	25	2,16	0,08	2,74	1,89	31	0,18	25	0,65	0,28
26	2,41	1,60	34			2,25		6,18	5,01	19			0,00	
27	0,21	0,15	29	0,43		0,26	1,65				0,43		0,00	
28	1,39	0,43	69	0,43		0,59	0,72				0,43		0,00	
29	0,99	0,52	48	0,18	51	0,98	0,18				0,18	51	0,00	
30	2,06	1,42	31	0,25	35	1,48	0,17				0,25	35	0,00	
31	8,21	7,23	12	0,19	28	1,62	0,12				0,19	28	0,00	
32	3,57	2,98	17	0,16	24	1,71	0,09				0,16	24	0,00	
33	12,44	11,05	11	0,32	36	1,98	0,16	5,97	5,08	15	0,32	36	0,47	0,68
34	5,30	4,57	14	0,22	40	2,05	0,11	10,57	9,51	10	0,22	40	0,54	0,41
35	8,40	7,48	11	0,25	20	2,31	0,11	13,58	12,09	11	0,25	20	0,80	0,31
36	10,52	9,54	9	0,27	35	2,31	0,12	12,12	10,79	11	0,27	35	0,80	0,34

14 octobre 2009							17 octobre 2009							
st	sed (g/m ²)	sed min (g/m ²)	% Org	H-veg (m)	D veg	H-eau (m)	RR	sed (g/m ²)	sed min (g/m ²)	% Org	H-veg (m)	D veg	H-eau (m)	RR
1						0,00							0,00	
2						0,00							0,00	
3				0,30	30	0,00		1,71	1,26	26	0,30	30	0,26	1,18
4	2,95	2,11	29	0,16	20	0,14	1,13	3,40	3,00	12	0,16	20	0,73	0,22
5	14,74	13,66	7	0,19	20	0,56	0,34	6,79	6,01	11	0,19	20	1,15	0,16
6	9,66	8,93	8	0,32	40	0,78	0,41	14,17	13,01	8	0,32	40	1,37	0,23
7	3,59	2,88	20	0,12	28	0,75	0,16	5,08	4,43	13	0,12	28	1,34	0,09
8	5,46	4,83	12	0,23	37	0,86	0,27	6,71	6,17	8	0,23	37	1,45	0,16
9	3,03	2,61	14	0,22	18	0,94	0,23	7,57	6,58	13	0,22	18	1,53	0,14
10	3,20	2,77	14	0,20	22	1,06	0,19	4,85	4,71	3	0,20	22	1,65	0,12
11	3,41	2,87	16	0,19	27	1,24	0,15	5,96	5,37	10	0,19	27	1,83	0,10
12						0,00							0,00	
13						0,00							0,00	
14						0,00							0,00	
15						0,00							0,00	
16	2,42	1,90	22	0,43	20	0,12	3,64	5,26	4,48	15	0,43	20	0,71	0,61
17	6,33	5,29	16	0,38	27	0,41	0,93	29,85	28,08	6	0,38	27	1,00	0,38
18	7,57	6,80	10	0,19	40	0,65	0,29	9,40	8,77	7	0,19	40	1,24	0,15
19	5,87	5,12	13	0,21	39	0,71	0,30	6,12	5,49	10	0,21	39	1,30	0,16
20	5,93	5,25	11	0,26	15	0,87	0,30	7,45	6,61	11	0,26	15	1,46	0,18
21	6,87	6,14	11	0,17	7	0,90	0,19	7,24	6,56	9	0,17	7	1,49	0,11
22	6,43	5,80	10	0,16	23	1,07	0,15	9,00	8,29	8	0,16	23	1,66	0,10
23	3,79	3,13	17	0,23	26	1,26	0,18	5,18	4,52	13	0,23	26	1,85	0,12
24	3,83	3,05	20	0,00	0	1,21	0,00			6	0,00	0	1,80	
25	2,73	1,92	30	0,19	27	1,04	0,18	4,56	3,97	13	0,19	27	1,63	0,12
26	3,02	2,12	30	0,12	14	1,13	0,11	3,16	2,78	12	0,12	14	1,72	0,07
27						0,00							0,00	
28						0,00							0,00	
29				0,24	35	0,00		21,60	19,17	11	0,24	35	0,45	0,54
30	4,96	4,27	14	0,27	35	0,36	0,74	8,52	7,60	11	0,27	35	0,95	0,28
31	8,69	7,83	10	0,22	32	0,50	0,44	10,36	9,39	9	0,22	32	1,09	0,20
32	5,31	4,69	12	0,18	41	0,59	0,31	8,00	7,32	9	0,18	41	1,18	0,15
33	8,51	7,50	12	0,36	24	0,86	0,42	11,82	10,75	9	0,36	24	1,45	0,25
34	8,35	7,66	8	0,22	30	0,93	0,24	9,80	9,24	6	0,22	30	1,52	0,14
35	11,09	10,36	7	0,25	23	1,19	0,21	11,12	10,43	6	0,25	23	1,78	0,14
36	8,73	8,04	8	0,29	24	1,19	0,24	11,48	10,48	9	0,29	24	1,78	0,16

ANNEXE IV : Végétation

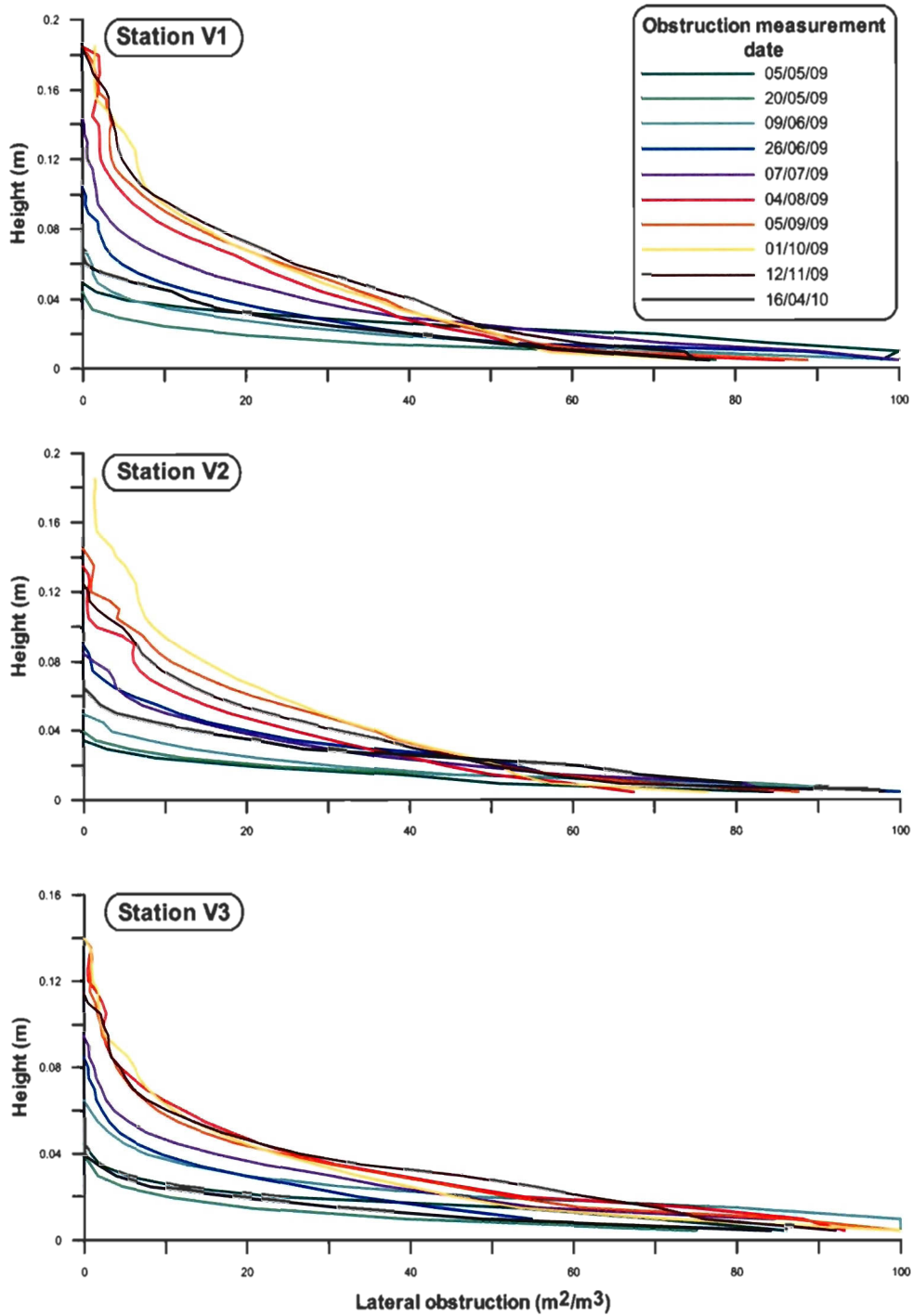


Fig. 13. Profils d'obstruction latérale depuis la surface du sédiment aux stations de suivis de la végétation durant la période d'étude.

Table. 8. Biomasse et hauteur de la végétation aux stations V1, V2 et V3.

date	Biomasse (g/m ²)			Hauteur (cm)		
	V1	V2	V3	V1	V2	V3
05-mai-09	69,41	11,12	13,77	4,2	3,7	3,3
20-mai-09	101,03	11,52	27,10	4,3	3,5	3,3
09-juin-09	118,76	25,02	42,90	9,0	5,7	6,2
26-juin-09	186,72	33,17	82,44	15,5	10,7	11,4
07-juil-09	235,62	41,22	69,40	21,4	12,7	14,2
04-août-09	398,67	75,28	166,03	31,0	18,9	18,3
05-sept-09	612,85	79,04	151,07	30,6	21,0	20,3
01-oct-09	381,43	61,86	116,00	35,5	19,6	19,4
12-nov-09	329,08	91,65	103,21	31,6	20,0	18,1

ANNEXE V : Programmation des appareils

Table 9. Programmation des courantomètres ADV (Vector), paramètres communs.

paramètres communs	ADV1, ADV2, ADV3
Sampling rate (Hz)	16
Nominal vel. range (m/s)	0,3 *
Burst interval (s)	1200
Samples per burst	2048
Sampling volume (mm)	14,9
Transmit length (mm)	4
Measurement load (%)	59
Power level	LOW+
Coordinate System	XYZ
Salinity (ppt)	30
Analog input 1	FAST
Analog input 2	FAST
Analog input power out	ENABLED
Vertical vel. range (m/s)	0,2 *
Horizon. vel. range (m/s)	0,8 *

*E1ADV3 programmé à 1, 0,2 et 0,8m/s de nominal, vertical et horizontal velocity range

Table 10. Paramètres d'installation des courantomètres ADV.

Deployment	E1			E2			E2		
Experience Start	2009-06-05 08:00:00			2009-08-17 14:00:00			2009-10-08 10:00:00		
Location	ADV1	ADV2	ADV3	ADV1	ADV2	ADV3	ADV1	ADV2	ADV3
Instrument ID	3301	1003	3329	3301	1003	3329	3301	1003	3329
Head ID	6507	6493	6503	6507	6493	6503	6507	6493	6503
Hauteur (1)	26	25	25	25	25	25	25	25	25
Hauteur Pt (2)	6,5	46,7	5	9	46,7	9	9	46,7	9
Hauteur cell (3)	11	10	10	10	10	10	10	10	10
direction (4)	85	285	28	340	305	125	278	80	318

- (1): Hauteur de la tête de mesure au-dessus du fond (cm)
 (2): Hauteur du capteur de pression au-dessus du fond (cm)
 (3): Hauteur du volume d'échantillonnage au-dessus du fond (cm)
 (4): Direction de l'axe X de l'ADV depuis le nord géographique

Table 11. Programmation du profileur de courant PRO (Aquadopp Profiler).

Instrument	PRO
Start E1	2009-06-05 08:00
Start E2	2009-08-17 14:00
Start E3	2009-10-10 13:20
Measurement interval (s)	1200
Cell size (m)	0.02
Distance to surface (m)	1.00
Pulse distance (m)	0.65
Profile range (m)	0.58
Horiz. vel. range (m/s)	0.47
Vert. vel. range (m/s)	0.20
Number of cells	29
Average interval (s)	1
Blanking distance (m)	0.05
Samples per burst	180
Sampling rate (Hz)	1
Compass upd. rate (s)	1
Coordinate System	ENU
Salinity (ppt)	30
Analog input 1	PROFILE
Analog input 2	PROFILE
Analog input power out	ENABLED
Instrument ID	AQD 5835
Head ID	ASP 3150
Firmware version	3.09

Table 12. Programmation du profileur de courant AWAC.

Instrument	AWAC
Start E1	2009-05-28 14:00
Start E2	2009-08-18 17:00
Profile interval (s)	600
Number of cells	22
Cell size (m)	0,4
Average interval (s)	120
Blanking distance (m)	0,4
Number of wave samples	2048
Wave interval (s)	3600
Wave sampling rate (Hz)	2
Wave AST SUV mode	ENABLED
Coordinate System	ENU
Salinity (ppt)	30
Analog input power out	DISABLED
Vertical vel. prec. (cm/s)	1
Horizon. vel. prec. (cm/s)	3
Instrument ID	WPR 1225
Head ID	WAV 5720
Firmware version	3,30 AST

Table 13. Programmation des capteurs de pression PT (TWR-2050).

Période de mesure	E1	Logging start	2009-06-06 12:00
		Logging end	2009-06-25 08:00
	E2	Logging start	2009-08-17 20:00
		Logging end	2009-09-05 16:00
	E3	Logging start	2009-10-07 12:00
		Logging end	2009-10-27 08:00:00
Numéro de serie	PT1		12544
	PT2		13325
	PT3		13322
programmation	Sample period		001000
	Averaging		60 seconds
	Wave sampling rate		4Hz
	Wave sampling length		2048
	Wave sampling period		002000

