

Aménagement hydroélectrique Sainte-Marguerite-3

SUIVI ENVIRONNEMENTAL 1997-98

Caractéristiques physiques et chimiques de l'estuaire Partie I : État de référence



**InteRives Ltée et
Consortium Roche / Dessau**

Décembre 1998

A stylized, handwritten signature or logo in black ink, consisting of several loops and a long horizontal stroke.

Aménagement hydroélectrique Sainte-Marguerite-3

SUIVI ENVIRONNEMENTAL 1997-98

Caractéristiques physiques et chimiques de l'estuaire Partie I : État de référence

Rapport présenté à

**Sainte-Marguerite-3
Hydro-Québec**

**InteRives Ltée et
Consortium Roche / Dessau**

3075, Ch. des Quatre-Bourgeois, Sainte-Foy, Québec, Canada, G1W 4Y4
Tél.: (418) 654-9600 Fax: (418) 654-9699

Décembre 1998



AUTEURS ET TITRE (pour citation) :

Savard, J.-P. et D. Messier, 1998.

Aménagement hydroélectrique Sainte-Marguerite-3 ; suivi environnemental 1997-1998 ; caractéristiques physiques et chimiques de l'estuaire de la Sainte-Marguerite. Partie I. État de référence. InteRives Itée et Consortium Roche-Dessau. Pour Hydro-Québec. 138 p. et annexes.

Objectif : L'objectif de l'étude est d'obtenir les données nécessaires à la caractérisation physique, sédimentologique et chimique de l'estuaire de la Sainte-Marguerite avant la mise en eau et l'exploitation de la centrale de la Sainte-Marguerite-3.

Résumé : Trois campagnes de mesures océanographiques ont été menées : en juin et juillet 1997 et en février-mars 1998. Ces observations ont permis d'améliorer la compréhension de l'estuaire, étant réalisées sur une gamme étendue de débits fluviaux, soit de 30 m³/s à 425 m³/s.

Le débit fluvial exerce une influence notable et croissante, de l'embouchure à la tête, sur les niveaux d'eau et l'atténuation de la marée dans l'estuaire. Sous débit supérieur à 425 m³/s, l'estuaire est baigné d'eau douce et il se forme un panache dans la baie de Sainte-Marguerite. À l'opposé, sous 30 m³/s, l'intrusion saline (25 ‰) atteint le pied du rapide du pk 6,7. Les conditions de salinité sont très variables, puisque l'estuaire est tantôt stratifié, tantôt mélangé.

La prépondérance du courant de jusant s'établit dans l'estuaire pour des débits d'au moins 300 m³/s, quoique les courants s'inversent encore à l'embouchure durant le flot à 425 m³/s. Dans la zone stratifiée, une circulation résiduelle à deux couches se développe.

L'estuaire inférieur est très dynamique au plan sédimentaire. Les grandes écaillles sableuses qui ceignent le chenal sont très mobiles. À l'embouchure, le chenal s'est récemment uniformisé et approfondi de 0,5 m à 1 m. La flèche sableuse de l'embouchure subit de l'érosion, mais demeure à long terme assez stable. Le delta externe montre également des déplacements impliquant des volumes de sable de plusieurs milliers de m³ par année mais sur de courtes distances. Entre 1950 et 1997, il n'y a pas de tendance nette d'érosion ou de sédimentation, malgré des changements interannuels marqués. La dynamique sédimentaire de l'embouchure et de son delta externe est en grande partie contrôlée par la barre qui ceinture le delta. La hauteur de la barre et la géométrie du chenal se modifient constamment afin de maintenir les courants à l'intérieur d'une fourchette de valeurs assez étroites comprise entre 0,5 et 1,5 m/s. On discute également du rôle de la glace et des activités et interventions humaines dans l'érosion des berges.

L'eau salée est source d'orthophosphates, tandis que l'eau douce est source de carbone et d'azote particuliers, mais non d'éléments nutritifs. La biomasse chlorophyllienne est faible.

Mots clés : Sainte-Marguerite, estuaire, marée, courant, salinité, sédiment, physico-chimie de l'eau, suivi environnemental.

ÉQUIPE DE TRAVAIL

Hydro-Québec

Geneviève Corfa	Chargée de projet
Danielle Messier	Conseillère environnement-océanographe
Françoise Lebrun	Conseillère environnement

InteRives Ltée

Jean-Pierre Savard	Océanographe, chargé de projet
--------------------	--------------------------------

Groupe Conseil Roche

Claude Vézina	Coordonnateur
Renald Pelletier	Technicien de terrain
Yves Racine	Technicien dessinateur
Lise Audet	Secrétaire
Constance Marmen	Secrétaire
Julie Turgeon	Analyse statistique

Laboratoires Savoie-Dufresne

Alain Dufresne	Analyses granulométriques
----------------	---------------------------

INRS Océanologie

Suzanne Roy	Analyse physico-chimiques
Vladimir Koutitonsky	Océanographe

Normand Juneau Entreprises Inc.

Normand Juneau	Arpenteur-géomètre
----------------	--------------------

TABLE DES MATIÈRES

Table des matières	i
Liste des tableaux	iv
Liste des figures	v
Liste des Annexes	viii
1 Introduction	1
1.1 Objectif.....	1
1.2 Zone d'étude	2
1.3 Contenu du rapport	2
1.4 Rappel des études antérieures	7
1.5 Campagne 1997-1998.....	7
2 Caractérisation géomorphologique	11
2.1 Contexte géologique et faciès sédimentaires	11
2.2 Bathymétrie.....	19
2.3 Évolution récente de la morphologie	24
2.3.1 Aspect général de l'estuaire	24
2.3.2 Flèche sableuse Val-Marguerite-Gallix	24
2.3.3 Le chenal d'écoulement	33
2.3.4 Le delta externe et l'épi de Gallix	36
2.4 Modifications anthropiques	37
3 Régime hydrologique.....	41
4 Marées et niveaux d'eau	47
4.1 Relation débit niveau	47
4.2 Marée : analyse harmonique	50
4.2.1 Composante semi-diurne principale M_2	50
4.2.2 Les constituantes de frottement	51
4.3 Déformation de l'onde de marée	52
5 Caractéristiques des masses d'eau	57
5.1 Profil de salinité	58

5.1.1	Période du 6 au 8 juin 1997	61
5.1.2	Période du 20 au 24 juillet 1997	61
5.1.3	Période du 28 février au 1 ^{er} mars 1998	62
5.2	Organisation des masses d'eau	67
5.3	Intrusion saline	69
5.4	Le panache de la rivière Sainte-Marguerite	71
6	Hydrodynamique et circulations	75
6.1	Données antérieures	75
6.2	Résultats des mesures de 1997	76
6.2.1	Mesures sur station fixe	76
6.2.2	Profils courantométriques	80
6.3	Circulation des masses d'eau	87
6.3.1	Crue printanière	88
6.3.2	Étiage	90
6.3.3	Embouchure et delta externe	90
7	Dynamique Sédimentaire	95
7.1	Influence de la stratigraphie	95
7.2	Faciès sédimentaires à la tête de l'estuaire	96
7.3	Estuaire supérieur (pk 3.0 à 6.0)	99
7.4	Estuaire inférieur (pk 0.0 à 3.0)	100
7.4.1	Le chenal d'écoulement	100
7.4.2	Les battures	101
7.4.3	Les talus et les plages	102
7.5	La flèche sableuse	113
7.6	Le delta externe	118
7.6.1	Influences maritimes et estuariennes	118
7.6.2	Déplacements du chenal d'écoulement	119
7.6.3	L'épi sableux	120
7.6.4	Barre de ceinture	120
7.7	Sommaire de la dynamique sédimentaire	121
8	Qualité de l'eau	125

8.1 Échantillonnage de 1997 dans l'estuaire et son panache.....	126
8.2 Variation spatio-temporelle des variables physico-chimiques.....	127
9 Faits saillants.....	133
10 Références	137

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1	Paramètres morphologiques de l'estuaire de la Sainte-Marguerite	19
Tableau 2	Caractéristiques hydrologiques de la rivière Sainte-Marguerite.....	41
Tableau 3	Débits mensuels à la Centrale Sainte-Marguerite-2	44
Tableau 4	Niveaux moyens aux stations marégraphiques de l'estuaire de la Sainte-Marguerite	50
Tableau 5a	Composante principale semi-diurne M_2 de la marée. Estuaire de la Sainte-Marguerite 21 mai au 23 juin 1997, débit fluvial de 446 m ³ /s.....	51
Tableau 5b	Composante principale semi-diurne M_2 de la marée. Estuaire de la Sainte-Marguerite 18 juillet au 21 août 1997, débit fluvial de 148 m ³ /s.....	51
Tableau 6	Comparaison des amplitudes de la constituante M_4 de la marée dans l'estuaire Sainte-Marguerite, au printemps et à l'été 1997.....	52
Tableau 7	Informations générales sur les profils de salinité et de température de l'eau de l'estuaire de la Sainte-Marguerite.	58
Tableau 8	Moyenne, écart-type, valeur minimale et valeur maximale des concentrations d'éléments nutritifs et sestoniques de l'estuaire de la Sainte-Marguerite et son panache en juin (N = 18) et juillet (N = 18) 1997 .	126
Tableau 9	Comparaison de la qualité de l'eau à la station située en amont du barrage de SM2 en 1995 et en eau douce dans l'estuaire en 1997	127

LISTE DES FIGURES

Figure 1	Zone d'étude élargie – Estuaire de la Sainte-Marguerite et baie Sainte-Marguerite	3
Figure 2	Zone d'étude principale – Estuaire de la Sainte-Marguerite	5
Figure 3	Stratigraphie des talus	13
Figure 4	Faciès granulométriques - Estuaire de la Sainte-Marguerite	17
Figure 5	Carte bathymétrique	21
Figure 6	Évolution de la flèche littorale à l'embouchure de la Sainte-Marguerite, 1950 à 1970	25
Figure 7	Evolution de la flèche littorale à l'embouchure de la Sainte-Marguerite, 1973 à 1997	27
Figure 8	Déplacement de l'isobathe de 0 m de 1994 à 1997, à l'extrémité de la flèche sableuse	31
Figure 9	Comparaison des profils bathymétriques nos 140 et 127 mesurés en 1994 et 1997	32
Figure 10	Comparaison des profils bathymétriques nos 46 et 52 mesurés en 1994 et 1997	34
Figure 11	Comparaison des profils bathymétriques nos 60 et 64 mesurés en 1994 et 1997	35
Figure 12	Protections en enrochement avec épis rocheux à Gallix.....	39
Figure 13	Hydrogramme des débits journaliers de la rivière Sainte-Marguerite, de 1962 à 1996	43
Figure 14	Minimum, moyenne et maximum annuel des débits journaliers de la rivière Sainte-Marguerite, de 1962 à 1997	45
Figure 15	Hydrogramme des débits journaliers de la rivière Sainte-Marguerite d'octobre 1996 à mars 1998	46
Figure 16	Données de débit de niveau d'eau aux stations marégraphiques dans la rivière Sainte-Marguerite du 21 mai au 22 juin 1997.....	48
Figure 17	Données de débit de niveau d'eau aux stations marégraphiques dans la rivière Sainte-Marguerite du 21 mai au 22 juin 1997.....	49
Figure 18	Niveaux d'eau dans l'estuaire de la Sainte-Marguerite, le 21 et 22 juillet 1997	53
Figure 19	Niveau d'eau mesuré aux stations 602 et 605 de l'estuaire de la Sainte-Marguerite	54

Figure 20	Salinités en surface et au fond aux stations a1 et b2, du 6 au 8 juin 1997..	59
Figure 21	Salinités en surface et au fond aux stations a1 et b2 et c1 du 19 au 24 juillet 1997	60
Figure 22	Distribution longitudinale de la salinité, le 28 février 1998 à marée basse....	63
Figure 23	Distribution longitudinale de la salinité, le 1 ^{er} mars 1998 à marée haute	65
Figure 24	Limite supérieure de l'intrusion saline en fonction du débit de la rivière Sainte-Marguerite lors de marées de vives-eaux	70
Figure 25	Distribution de la salinité de surface dans la baie Sainte-Marguerite, le 9 juin 1997.....	72
Figure 26	Profils de salinité et température de l'eau dans la région centrale du panache de la rivière Sainte-Marguerite, stations PA 13 et PA 17, le 9 juin 1997	73
Figure 27	Vitesse du courant U, salinité et profondeur de l'eau au-dessus de l'instrument, station S1, du 5 au 6 juin 1997.....	77
Figure 28	Vitesse du courant U, salinité et profondeur de l'eau au-dessus de l'instrument, station S1, du 3 au 5 juillet 1997	79
Figure 29	Salinité de l'eau, vitesse (U) du courant en surface et au fond et niveaux d'eau dans l'estuaire de la Sainte-Marguerite, le 6-7 juin 1997, station a1 ..	81
Figure 30	Salinité de l'eau, vitesse (U) du courant en surface et au fond et niveaux d'eau dans l'estuaire de la Sainte-Marguerite, le 8 juin 1997, station b2	82
Figure 31	Salinité de l'eau, vitesse (U) du courant en surface et au fond et niveaux d'eau dans l'estuaire de la Sainte-Marguerite, le 20 juillet 1997, station a1.....	83
Figure 32	Salinité de l'eau, vitesse (U) du courant en surface et au fond et niveaux d'eau dans l'estuaire de la Sainte-Marguerite, le 21-22 juillet 1997, station b2.....	84
Figure 33	Salinité de l'eau, vitesse (U) du courant en surface et au fond et niveaux d'eau dans l'estuaire de la Sainte-Marguerite, le 24 juillet 1997, station c1.....	85
Figure 34	Vitesse du courant calculée à l'embouchure pour différentes valeurs du débit de la rivière Sainte-Marguerite	89
Figure 35	Vitesse du courant, débit total et débit de marée à l'embouchure de l'estuaire de la Sainte-Marguerite, en crue (mai) et en étiage (août) de la rivière.....	93
Figure 36	Rapide du pk 6,7 à marée (a) haute et (b) basse de vive-eau, le 28 février 1997	97

Figure 37	Dépôts glaciels sur la batture de Val-Marguerite, mars 1998	105
Figure 38	Érosion et protections de berges artisanales à Val-Marguerite, juin 1997...	109
Figure 39	Zone d'activité glacielle et chenal glacielle en rive droite, pk 1.0, 28 février 1998	111
Figure 40	Photographies de la pointe de la flèche sableuse prises en août et septembre 1997	115
Figure 41	Concentration des nutriments en fonction de la salinité	129
Figure 42	Concentration des éléments sestoniques en fonction de la salinité.....	130

LISTE DES ANNEXES

Annexe 1 Cartes des stations d'échantillonnage

- Carte 1 Position des stations. Campagne du 6 au 10 juin 1997. Profils CSTP et mouillage fixe de courantomètre (station S1).
- Carte 2 Position des stations. Campagne du 6 au 10 juin 1997. Profils CTP et physico-chimie. Baie Sainte-Marguerite.
- Carte 3 Position des stations. Campagne du 19 au 24 juillet 1997. Profils CSTP et mouillage fixe de courantomètre (station S1).
- Carte 4 Position des stations. Campagne du 26 février au 2 mars 1998. Profils CTP.
- Carte 5 Position des profils bathymétriques.
- Carte 6 Localisation des stations de carottage des sédiments.
- Carte 7 Localisation des prélèvements de sédiments à la benne.

Annexe 2 Description du modèle analytique

1 INTRODUCTION

La présente étude s'inscrit dans le cadre du suivi environnemental du projet d'aménagement hydroélectrique Sainte-Marguerite-3. Ce projet, amorcé par Hydro-Québec en avril 1994 sur la Moyenne Côte-Nord, a été autorisé à la suite de l'émission de décrets du gouvernement du Québec et de l'approbation du ministère des Transports du Canada, respectivement en février et juillet 1994.

Le suivi environnemental du projet doit vérifier l'ampleur des répercussions de ce projet et doit évaluer l'efficacité des mesures d'atténuation proposées, s'il y a lieu. Le suivi environnemental du projet Sainte-Marguerite-3 est soumis à des conditions décrétées par les gouvernements fédéral et provincial. Dans l'estuaire de la Sainte-Marguerite, la condition fédérale numéro 4 précise que *«Hydro-Québec devra inclure à son programme de suivi l'étude des caractéristiques physiques et chimiques des masses d'eau et de leur influence sur la productivité biologique de l'estuaire de la rivière Sainte-Marguerite. Cette étude, conduite avant et pendant la mise en eau, et suite à la mise en opération du réservoir SM-3, devra permettre : de déterminer l'impact de ces activités sur la productivité des habitats et la distribution et l'abondance des ressources halieutiques de l'estuaire et de la baie Sainte-Marguerite ; et, d'identifier et de mettre en œuvre des mesures d'atténuation appropriées, s'il y a lieu»*. Les conditions provinciales numéros 28 et 29 s'appliquent aux phases remplissage du réservoir et exploitation du projet et visent les populations de poissons de l'estuaire.

Afin de répondre à ces conditions, Hydro-Québec a amorcé le suivi dans l'estuaire de la Sainte-Marguerite dès 1994. Le but des études de 1997-1998 est de compléter la caractérisation physique et physico-chimique de cet estuaire avant la mise en eau des réservoirs. Trois campagnes de mesures ont été menées afin de réaliser les objectifs assignés dans le devis d'étude. Le présent rapport fournit les informations à ce sujet ainsi qu'une interprétation de ces données.

1.1 OBJECTIF

L'objectif général de l'étude est de fournir les données de base permettant de suivre l'évolution du régime de courants, de la salinité (panache et intrusion saline), de l'état de la glace, de la dynamique sédimentaire et les caractéristiques chimiques de l'estuaire de la

Sainte-Marguerite en conditions actuelles. L'accent est mis sur les éléments nutritifs et sestoniques (pigments chlorophylliens et matière en suspension) en fonction des masses d'eau en présence.

Cette caractérisation de l'état de référence permettra d'évaluer les impacts du remplissage du réservoir et de l'exploitation de la centrale de la Sainte-Marguerite-3. La caractérisation physico-chimique servira d'intrant principal à la compréhension des habitats estuariens des poissons.

1.2 ZONE D'ÉTUDE

La zone d'étude (figures 1 et 2) comprend l'estuaire de la rivière Sainte-Marguerite, de l'embouchure jusqu'aux premiers rapides, soit une distance de 6,7 km, le delta externe et la région de la baie Sainte-Marguerite correspondant au panache de la rivière. L'étude porte principalement sur la région de l'embouchure et du centre de l'estuaire de la Sainte-Marguerite (figure 2, pk 0 à 4) ; les mesures prises en dehors de cette zone centrale visent surtout à caractériser le panache et l'intrusion saline ainsi que le contexte général de la dynamique côtière.

Afin de faciliter la lecture du rapport, toutes les stations d'échantillonnage ont été localisées sur 7 cartes présentées en annexe 1 du présent document.

1.3 CONTENU DU RAPPORT

Le rapport d'étude comprend deux parties, soit un rapport de données et un rapport d'analyse. Le rapport de données (partie II) fournit toutes les informations concernant les méthodes et le matériel utilisé pour l'échantillonnage lors des trois campagnes de mesures, ainsi qu'une description des protocoles de traitement des données et des contrôles de qualité. Ce rapport de données présente aussi en annexe, sous forme de graphiques ou de tableaux, les données recueillies au cours de l'échantillonnage. Ces données ont aussi été transmises à Hydro-Québec pour archivage en format informatisé.

Le rapport d'analyse (partie I), qui fait l'objet du présent document, comporte une analyse et une interprétation des données. Ce rapport synthèse est divisé en sept volets portant

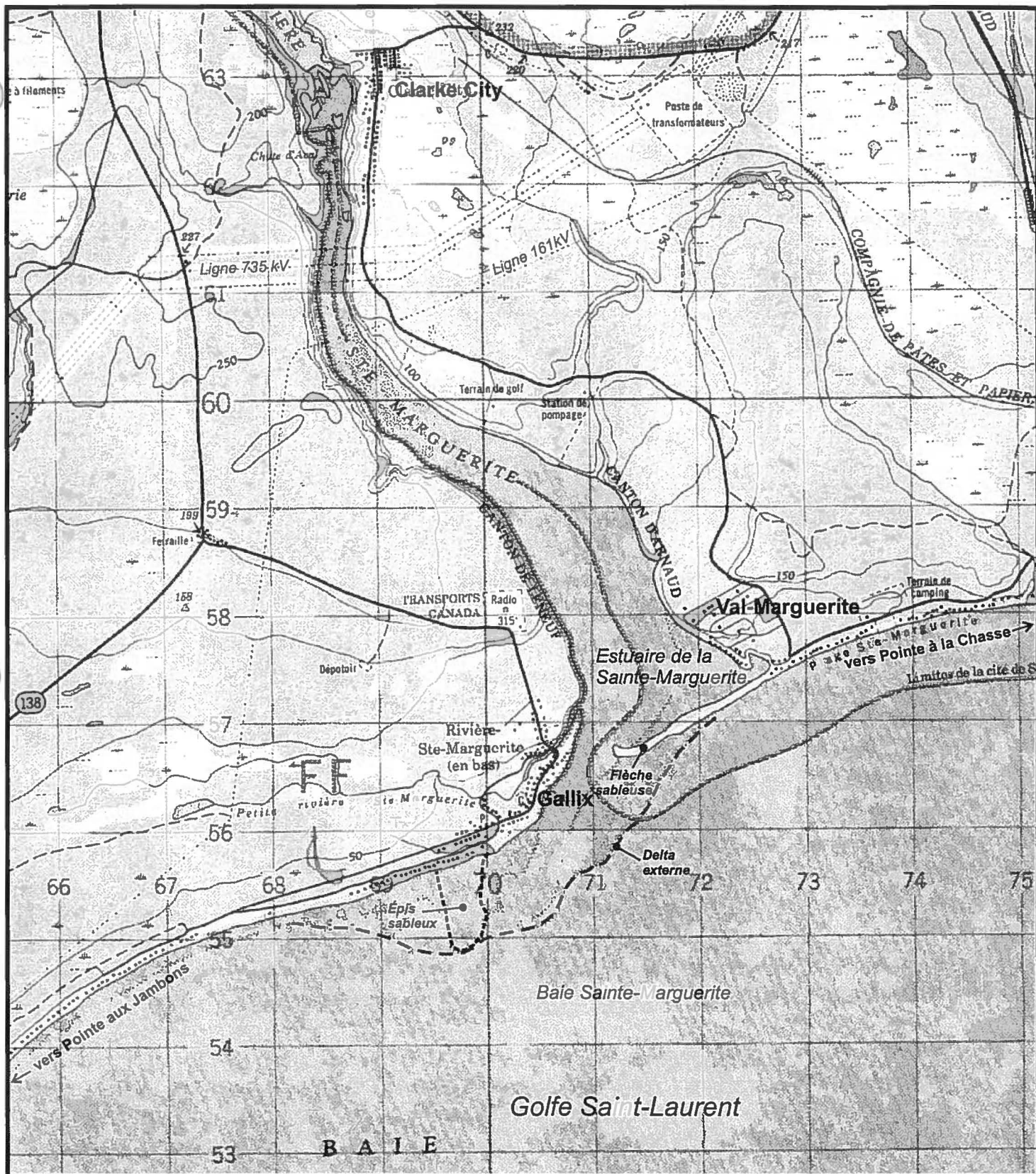


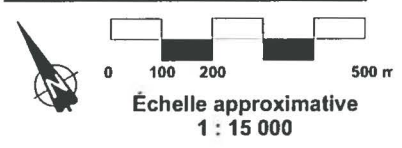
Figure 1 Zone d'étude élargie – Estuaire de la Sainte-Marguerite et baie Sainte-Marguerite



SOURCE DU FOND DE PLAN : Ministère de l'Énergie, des Mines et des Ressources, 1977, 1:50 000, 22/J/02.



Figure 2
Zone d'étude principale –
Estuaire de la Sainte-Marguerite



SOURCE DES PHOTOGRAPHIES AÉRIENNES : Hydro-Québec Géomatique, 24 juillet 1997, HQ-102-134 à 137.

respectivement sur la géomorphologie, l'hydrologie, les marées, les masses d'eau, l'hydrodynamique, la dynamique sédimentaire et la physico-chimie et de l'estuaire de la Sainte-Marguerite. Ce rapport collige les résultats de l'échantillonnage en les comparant aux données antérieures sur la zone d'étude. Les données recueillies dans le cadre de la présente étude sont compilées et comparées à des données recueillies par Hydro-Québec et d'autres organisations gouvernementales ou privées sur les niveaux d'eau dans l'estuaire, les débits de la rivière Sainte-Marguerite, les marées dans le golfe du Saint-Laurent, etc. Le rapport présente l'état de référence en conditions naturelles et propose quelques orientations pour le suivi environnemental pour les phases ultérieures de réalisation du projet Sainte-Marguerite-3.

1.4 RAPPEL DES ÉTUDES ANTÉRIEURES

Les principales sources de données sur l'estuaire de la Sainte-Marguerite sont les études de répercussions environnementales réalisées par Roche (1989) et (1990), l'étude synthèse d'Hydro-Québec (1991) et la première étape du suivi environnemental Sainte-Marguerite-3 réalisée en 1994 par CSSA Consultants (1995). Ces études ont permis de recueillir des données et des informations sur la géomorphologie, les conditions hydrodynamiques (température et salinité de l'eau, hydrologie, marées, courants, vagues) et la sédimentologie des chenaux et des berges de l'estuaire et de l'embouchure. Ces études s'appuient également sur des données hydrologiques historiques du débit de la rivière Sainte-Marguerite, des niveaux d'eau du Saint-Laurent à Sept-Îles, (Pêches et Océans Canada), des données météorologiques (Environnement Canada). À cela s'ajoutent la compilation et l'analyse de photographies aériennes (1950 à 1987) et d'image satellitaires. Ces informations ont permis de caractériser le milieu physique estuarien prévalant au moment des observations (1988-1989). Elles ont aussi permis de caractériser l'évolution récente de l'estuaire et de l'embouchure au cours des 30 à 40 dernières années pour lesquelles on dispose de données historiques (hydrologie, climat, marée et les photographies aériennes).

1.5 CAMPAGNE 1997-1998

Trois campagnes de mesures ont été menées dans la zone d'étude, dont deux en été 1997 et la troisième en hiver 1998. Les campagnes d'été ont eu lieu du 2 au 10 juin et du 19 au 24 juillet 1997. La campagne d'hiver s'est déroulée du 26 février au 2 mars 1998. Des

marégraphes ont été installés par Hydro-Québec (unité Hydraulique et Géotechnique, Direction Ingénierie, Direction principale, Projet d'équipement) à quatre stations fixes (voir position, carte 1) et sont demeurés en opération du 14 mai au 21 août 1997. Les marégraphes ont mesuré les niveaux d'eau par rapport au niveau géodésique à intervalle de 15 minutes en mode synchrone pendant toute cette période.

Des photographies aériennes à l'échelle 1 : 5000 ont été prises le 23 juillet 1997 ; ces photographies couvrent toute la zone d'étude. Des photographies au 1 :15 000 ont aussi été prises ainsi que quelques photographies basses obliques (prises par hélicoptère) montrant l'ensemble de l'estuaire. À ces documents photographiques s'ajoutent des photographies au sol de la zone d'embouchure et de l'estuaire et des photographies des berges et des conditions de glaces en février-mars 1998. Au total, environ 200 photographies de la zone d'étude ont été recueillies.

Dès le 4 juin 1997, un courantomètre a été installé à la station S1 située à l'embouchure, dans le centre du chenal d'écoulement. Ce courantomètre est demeuré en opération jusqu'au 23 juillet 1997. L'appareil a mesuré la température et la salinité de l'eau ainsi que la vitesse et la direction des courants à intervalle de 15 minutes.

Pendant la première campagne estivale (2 au 10 juillet), des profils verticaux de température et salinité de l'eau et de la vitesse et direction des courants (profils CSTP) ont été recueillis à 8 stations réparties sur deux sections transversales de l'estuaire situées respectivement au pk 0,0 et 1,9 (voir position carte 1, ligne a et b). En juillet, des profils CSTP ont été réalisés aux même sections transversales, mais le nombre de stations visitées a été augmenté à 9. Une section supplémentaire a été ajoutée au pk 2,5 (voir carte 3, ligne c). Les profils ont été répétés pendant 10 à 15 heures environ à intervalle de 20 à 60 minutes. Les mesures sont prises de la surface jusqu'au fond, à intervalle de 5 à 10 cm.

Le 9 juin 1997, des profils verticaux de la température et de la salinité de l'eau (profils CTP) ont été recueillis à 24 stations (voir position carte 3 en annexe) situées dans la région du panache de l'estuaire. Toutes ces stations ont été échantillonnées la même journée, de la surface jusqu'à un maximum de 8 m de profondeur. Les données sont prises à intervalle de 5 à 50 cm de profondeur selon le type d'instrument utilisé. Ces mesures ont été prises afin de décrire les caractéristiques du panache de la rivière.

Des échantillons d'eau ont aussi été recueillis à chacune des deux campagnes de juin et juillet 1997 afin de déterminer les caractéristiques physico-chimiques de l'eau pour différentes classes de salinité. Six stations ont été visitées dans chaque cas et quatre litres d'eau ont été recueillis à chaque station. La position des stations est indiquée sur les cartes 1 et 2, en annexe.

En février-mars 1998, des observations de l'état des glaces et de l'activité glacielle ont été réalisées par hélicoptère dans toute la zone d'étude. De profils verticaux de température et conductivité (profils CTP) de l'eau ont été réalisés partout dans l'estuaire à marée haute et basse de vive-eau.

À ces données recueillies en 1997-1998, on doit ajouter l'analyse d'environ deux cents (200) échantillons de sédiments qui avaient été recueillis par CSSA Consultants Ltée (1995) lors de la campagne de suivi Sainte-Marguerite-3 de 1994. Ces échantillons, qui avaient été conservés congelés jusqu'à maintenant, ont fait l'objet d'analyses granulométriques.

2 CARACTÉRISATION GÉOMORPHOLOGIQUE

La section qui suit présente une caractérisation géomorphologique de l'estuaire de la Sainte-Marguerite. On y décrit le contexte géologique de la mise en place des dépôts meubles et de la formation de l'estuaire et l'évolution récente de la morphologie.

2.1 CONTEXTE GÉOLOGIQUE ET FACIÈS SÉDIMENTAIRES

La mise en place des dépôts de l'estuaire de la Sainte-Marguerite commence avec le retrait de l'Inlandis Laurentien, il y a environ 10 500 ans. Les particules incorporées dans l'eau de fonte des glaciers se sont déposées dans la mer de Goldthwait à l'embouchure des rivières glaciaires. Le pro-delta de l'estuaire de la Sainte-Marguerite, constitué principalement de limons et d'argile, s'étend très loin à l'aval de l'embouchure de l'estuaire, dans le chenal Laurentien, et se fusionne aux épanchements deltaïques des autres rivières de la Côte Nord. À mesure que s'est produit le rebond isostatique du bouclier précambrien et le retrait de la mer de Goldthwait, un delta sableux s'est avancé sur l'ancien pro-delta. Ce delta sableux était à l'origine situé environ une vingtaine de km à l'amont de sa position actuelle, en bordure de l'ancienne mer de Goldthwait. Pendant la récession marine qui a suivi le retrait de la mer de Goldthwait, la rivière s'est encaissée dans ses propres dépôts deltaïques, formant les hautes terrasses qui bordent actuellement l'estuaire de la Sainte-Marguerite.

La stratigraphie actuelle de l'estuaire reflète l'origine post-glaciaire de la région. Le sommet des terrasses bordant l'estuaire comporte une couche de sol induré d'environ 1 m d'épaisseur. Cet horizon de sol est constitué principalement de sable et gravier contenant de la matière organique (tourbe ou sol forestier). Sous l'horizon de sol, on trouve généralement une couche de sable et gravier deltaïques d'épaisseur variable. Près de l'embouchure, la couche de sable occupe toute la partie émergée de la colonne stratigraphique (figure 3a) et se prolonge sous le niveau de la mer. Elle peut atteindre plus de 30 m d'épaisseur près de l'embouchure de l'estuaire. À l'amont du pk 3,0, par contre, on peut voir le contact (figure 3b) entre les dépôts sableux et les silts-argileux de la mer de Goldthwait sous-jacent. Enfin, à l'amont du pk 6,0, les berges deviennent rocheuses et le socle précambrien affleure en surface.

(a) faciès sableux au pk 1,3



(b) faciès silto-argileux au pk 3,7 surmonté d'un horizon de sable

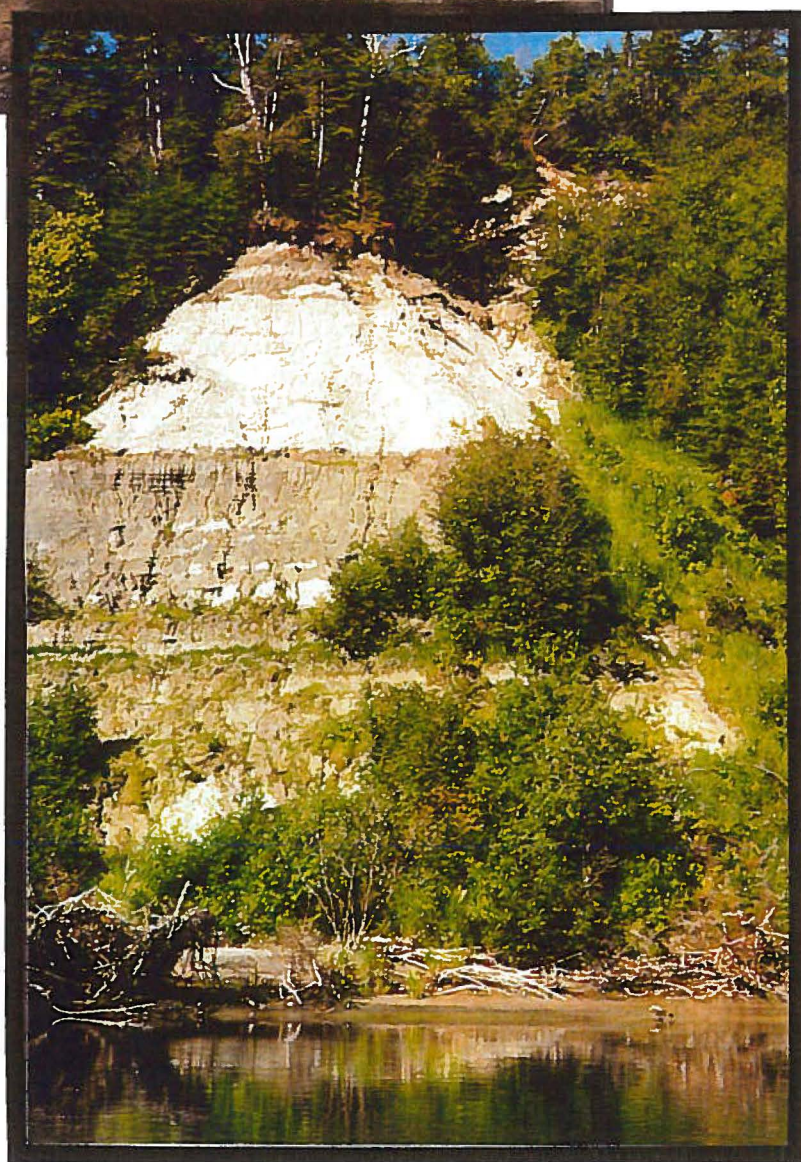


Figure 3 Stratigraphie des talus

Les fonds de l'estuaire de la Sainte-Marguerite et de la zone du delta externe attenante sont fortement dominés par les faciès sableux. Les analyses granulométriques (voir détails, partie II) montrent, qu'en moyenne, les sédiments superficiels de l'estuaire sont constitués de 88 % de sable. La fraction limon-argile ne représente que 5 % et le gravier (grains de 2 mm et plus) 7 %. Le lit de l'estuaire est donc essentiellement sableux. Cette caractéristique le distingue des estuaires situés plus à l'ouest (Outardes, Manicouagan, Betsiamite, Portneuf) qui présentent davantage de faciès silto-argileux.

La distribution des faciès sédimentaires tirée des analyses granulométriques est présentée à la figure 4 ci-dessous. La position des stations de prélèvement est indiquée aux cartes 6 et 7 en annexe 1. Les résultats des analyses granulométriques sont fournis dans le rapport de données (partie II). L'échantillonnage des sédiments a été réalisé par CSSA Consultants Ltée (1995) à l'aide d'un petit carottier portable et d'une benne.

Les sédiments constituant le lit et les berges de l'estuaire sont mobiles et très peu cohésifs. La flèche d'embouchure et les plages bordant l'estuaire sont constituées principalement de sable moyen à grossier, bien trié. La granulométrie du sable s'affine vers le haut de plage ; elle devient plus grossière vers le bas de plage. Des lentilles de gravier et galets s'étirent dans la zone de déferlement des vagues. À l'intérieur de l'estuaire, les plages de la flèche sableuse sont principalement constituées de sable moyen. Il en va de même des plages bordant les berges de l'estuaire de la Sainte-Marguerite entre les pk 0 et 2. La batture triangulaire située au niveau de Val-Marguerite est couverte de sable fin à moyen, plutôt mal trié, parsemé de lentilles de sable grossier et de gravier. Sur cette batture, les dépôts s'affinent vers le bas. La batture située à l'ouest du chenal, au niveau du pk 2,0 est couverte de dépôts de sable moyen à grossier assez bien trié en général. Les deux battures affichent une granulométrie différente qui reflète les conditions hydrodynamiques prévalant sur chacune d'elles. Dans le chenal, les dépôts sont plus grossiers, allant du sable grossier au gravier et cailloux. À certains endroits, il a été impossible de prélever des échantillons à la benne, ce qui suggère la présence d'un fond dur (rocheux ou galets). Les plages bordant le chenal à l'amont du pk 2,0 sont recouvertes de sable plus fin et moins bien trié que celles situées à l'aval. Au niveau du pk 4,0, les plages sont minces et recouvrent des dépôts silto-argileux dont certains sont des reliques de la mer de Goldthwait encore en place.



LÉGENDE

	1 Gravier
	2 Sable très grossier
	3 Sable grossier
	4 Sable moyen
	5 Sable fin
	6 Sable fin sur fond silto-argileux

Figure 4
Faciès granulométriques –
Estuaire de la Sainte-Marguerite

0 100 200 500 m

Échelle approximative
1 : 15 000

2.2 BATHYMÉTRIE

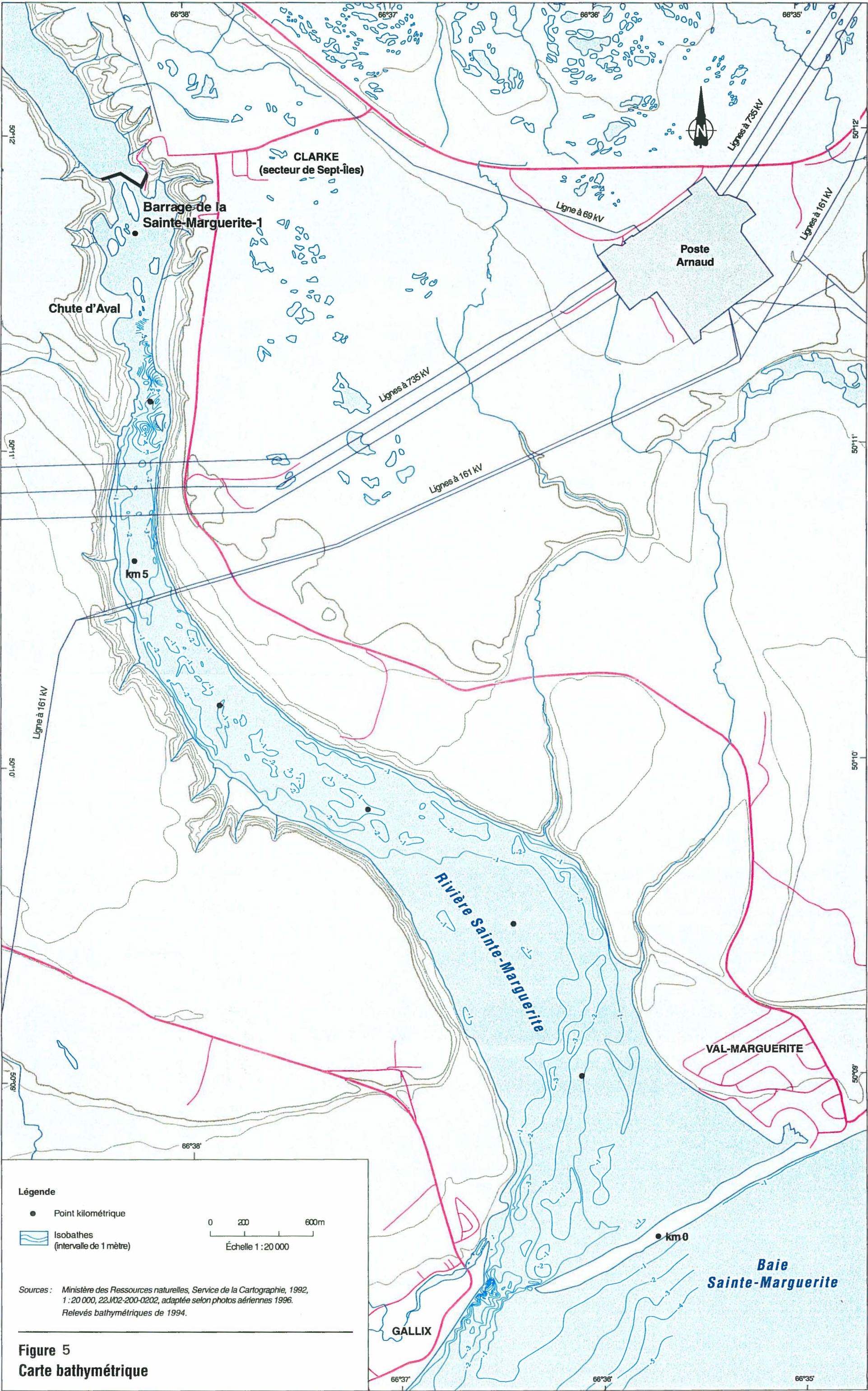
La figure 5 présente une carte bathymétrique de la zone d'étude tirée des données de CSSA Consultants Ltée (1995). Cette figure montre que l'estuaire de la Sainte-Marguerite a une forme en entonnoir (ou triangulaire), qu'il mesure environ 6,7 km de longueur et qu'il est parcouru par un seul chenal principal d'écoulement sur toute sa longueur. Le tableau 1 ci-dessous résume les caractéristiques morphologiques de l'estuaire.

Tableau 1 Paramètres morphologiques de l'estuaire de la Sainte-Marguerite

Paramètre	Description du paramètre	Valeur
l_o	Largeur de l'estuaire (m)	635
L_o	Longueur de l'estuaire (m)	6 735
H_o	Profondeur de l'estuaire (m)	1,24
A_o	Superficie de l'estuaire (m^2) ($l_o \times L_o$)	$4,27 \times 10^6$
V_o	Volume de l'estuaire (m^3) ($l_o \times L_o \times H_o$)	$5,29 \times 10^6$
l_e	Largeur de l'embouchure (m)	300
H_{max}	Profondeur moyenne du thalweg (m)	3,12
αE	Excentricité de l'estuaire (l_o / L_o)	0,094
gH	Profondeur relative (H_{max} / H_o)	2,52
β	Largeur relative de l'embouchure (L_o / l_o)	0,47
ΔA	Superficies de référence (écarts relatifs %)	0,03
σA	Superficies de référence (écarts absolus %)	1,55
ΔV	Volumes de référence (écarts relatifs %)	-4,85
σV	Volumes de référence (écarts absolus %)	4,85

Ce tableau indique que la profondeur moyenne de l'estuaire de la Sainte-Marguerite est de 1,24 m par rapport au niveau moyen de la mer. La profondeur du chenal le long du thalweg est en moyenne de 3,12 m. La superficie de l'estuaire est de 4,27 millions de m^2 alors que le volume d'eau moyen contenu dans l'estuaire est de l'ordre de $5,29 \times 10^6 m^3$ d'eau. L'excentricité de l'estuaire est une expression du rapport largeur/longueur. Ce rapport est de 0,094 dans l'estuaire de la Sainte-Marguerite, ce qui indique que cet estuaire est environ 10 fois plus long que large.

La profondeur du chenal principal varie entre un maximum de 6 m à la tête de l'estuaire à un minimum de 2,1 m au niveau du pk 4.5. Dans l'ensemble, la profondeur du chenal est assez uniforme. Une fosse de 4,5 m est présente à l'embouchure près de la constriction causée par la flèche d'embouchure. Le chenal se prolonge à l'extérieur de l'estuaire et traverse le delta externe en longeant d'abord la rive de Gallix sur une distance de 800 m



pour bifurquer ensuite vers le sud en direction du golfe du Saint-Laurent. Sur le delta externe, la profondeur du chenal diminue peu à peu, passant de 4,5 à environ 2,0 m à la couronne du delta.

Bien que la largeur de l'estuaire de la Sainte-Marguerite atteigne un maximum de 1,2 km près de l'embouchure, l'embouchure elle-même est restreinte à une largeur d'environ 225 m par une flèche sableuse qui s'étire en direction ouest entre Val-Marguerite et Gallix. Cette flèche assez rectiligne se prolonge sous l'eau parallèlement à la rive de Gallix. La partie submergée de la flèche sableuse forme un haut fond qui s'étend sur près de deux kilomètres en direction sud-ouest et se confond en partie avec le delta externe de l'estuaire. Ce delta s'étend sur environ 1 km², se déployant en forme de demi-cercle. Au centre du delta s'étire un épi sableux d'environ 600 m de longueur. Cet épi s'allonge perpendiculairement à la plage de Gallix.

L'estuaire est aussi parsemé de hauts-fonds ou battures surtout dans l'estuaire inférieur, situé entre le pk 0,0 et le pk 3,0. Ces battures émergent lors de marées basses de vives-eaux. La profondeur de l'eau sur ces battures se situe environ entre -0,5 et -1,0 m par rapport au niveau géodésique. La profondeur relative de l'estuaire, au tableau 1 exprime cette caractéristique morphologique en comparant la profondeur du thalweg et la profondeur moyenne de l'eau, qui sont respectivement de 3,12 et 1,24 m. Le rapport de ces deux valeurs est de 2,52 ce qui correspond à une morphologie d'estuaire de plaine fluviale. Cette caractéristique s'applique surtout près de l'embouchure.

L'estuaire de la Sainte-Marguerite a une forme générale en entonnoir ou triangulaire d'une profondeur assez uniforme. Cette caractéristique est quantifiée au tableau 1 en comparant la forme de l'estuaire de la Sainte-Marguerite à la forme théorique d'un estuaire parfaitement triangulaire. L'écart entre la forme théorique et la forme réelle de l'estuaire de la Sainte-Marguerite est de 1,55 % lorsqu'on compare leurs superficies et de 4,85 % pour leurs volumes. La section mouillée a généralement une forme de type plaine côtière, avec un chenal principal bordé de battures plus ou moins développées qui s'étirent dans la zone intertidale. La profondeur du thalweg est généralement assez constante dans tout l'estuaire sauf lorsque ce chenal est soumis à des constriction ou obstrué par la présence de seuils.

2.3 ÉVOLUTION RÉCENTE DE LA MORPHOLOGIE

Les informations permettant de décrire l'évolution récente de la bathymétrie et de la morphologie de l'estuaire de la Sainte-Marguerite comprennent :

1. les photographies aériennes historiques (voir figure 6 et 7 ci-dessous) ;
2. les mesures bathymétriques prises en 1994 (CSSA Consultants Ltée ; 1995) et les mesures prises en août 1997 par l'unité Hydraulique et Géotechnique d'Hydro-Québec. La carte 5 indiquent la position des profils bathymétriques de 1997. La position de ces profils correspond de très près à celle de profils réalisés en septembre 1994 par CSSA Consultants Ltée (1995) ;
3. les photographies au sol ou les photographies basses obliques accumulées au cours des années par différents intervenants.

En comparant et en recoupant ces informations, il est possible de caractériser les principales transformations morphologiques survenues au cours des dernières décennies. Les points saillants sont les suivants :

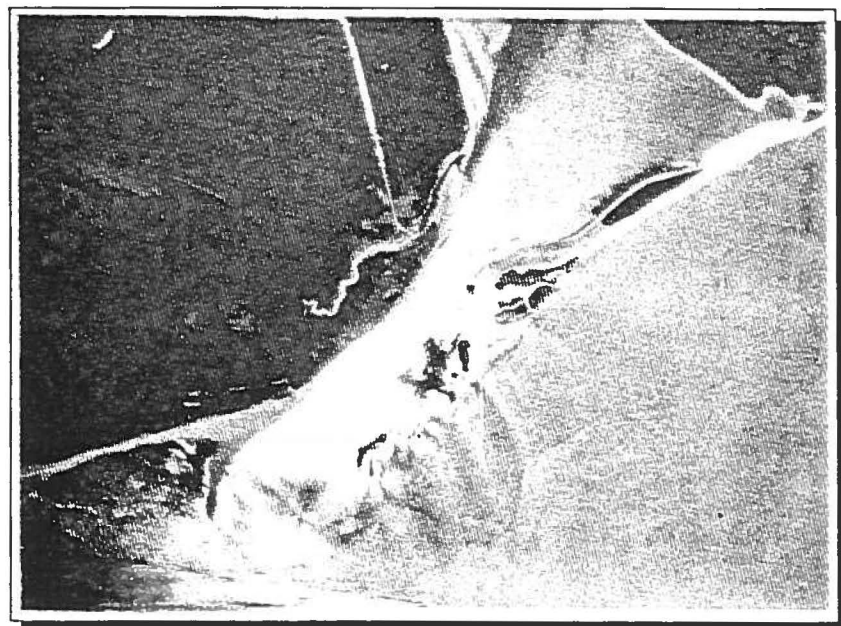
2.3.1 Aspect général de l'estuaire

Dans l'ensemble, la morphologie globale de l'estuaire de la Sainte-Marguerite n'a pas beaucoup changé depuis 1950. L'estuaire ne possède qu'un seul chenal entouré de battures peu profondes. La position et la profondeur moyenne de ce chenal sont demeurées à peu près les mêmes à l'amont du pk 0. Les hauts-fonds ou les battures sont aussi demeurés assez semblables sur toutes les photographies observées.

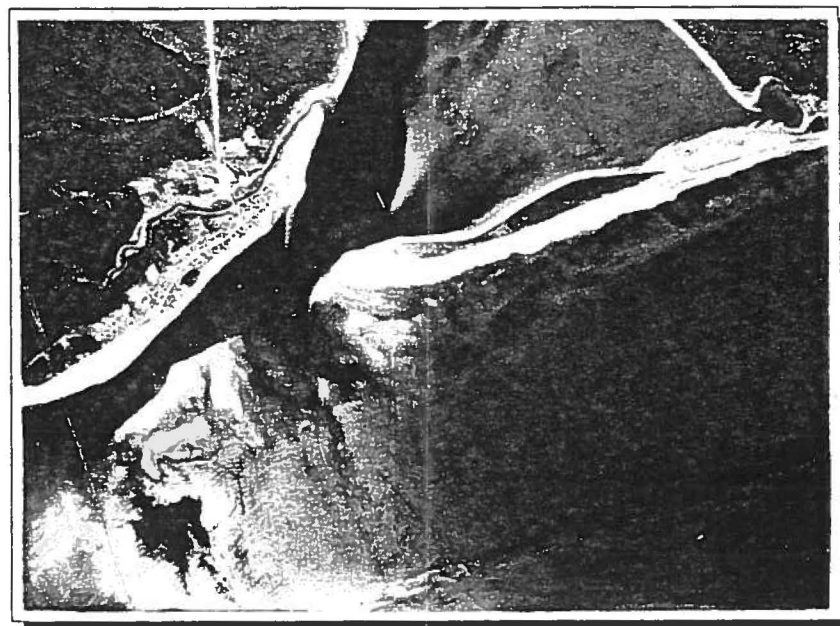
2.3.2 Flèche sableuse Val-Marguerite-Gallix

Les photographies présentées aux figures 6 et 7 montrent que la flèche peut être divisée en trois segments de longueur sensiblement égale, soit une zone centrale couverte de végétation arboricole bordée à l'est et à l'ouest par deux segments de cordons dunaires plus ou moins densément couverts de végétation herbacée.

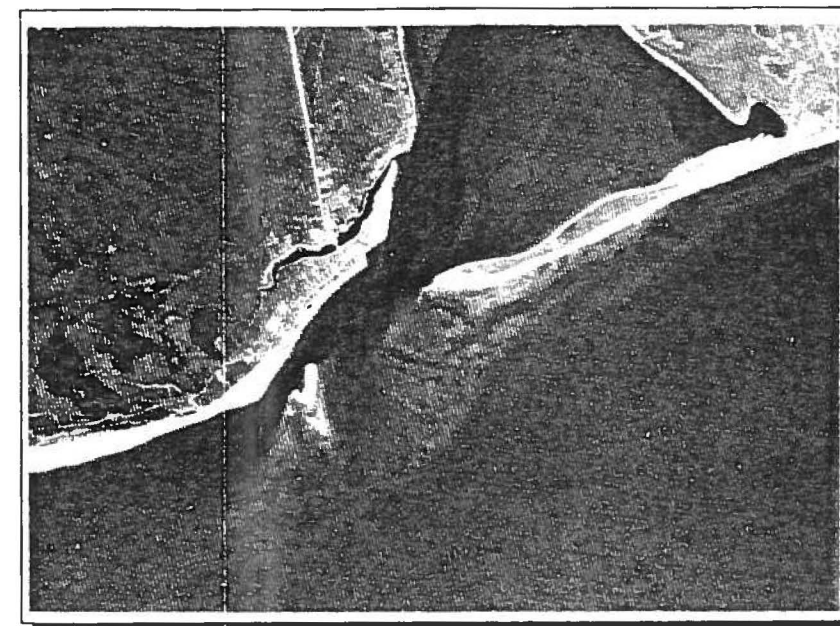
Figure 6 Évolution de la flèche littorale à l'embouchure de la Sainte-Marquerite, 1950 à 1970



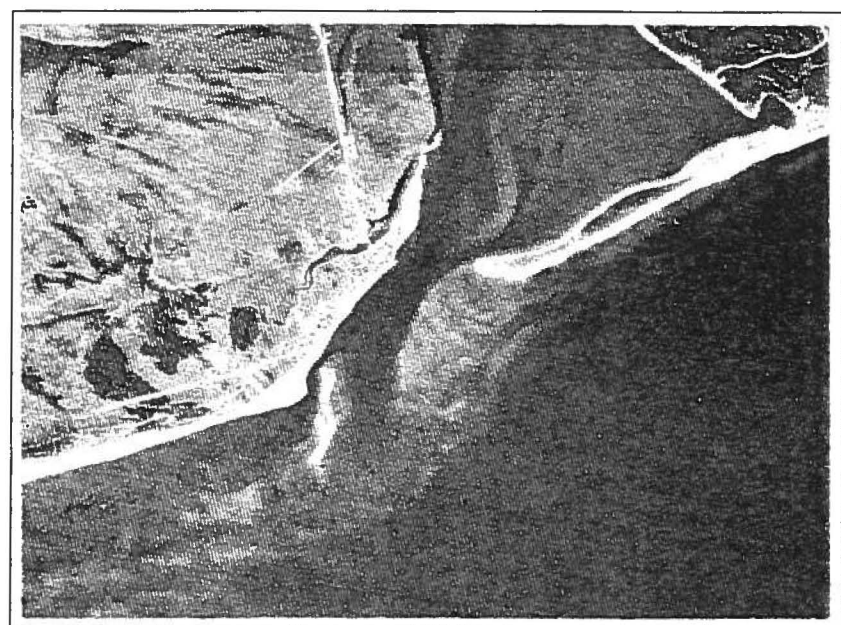
1950



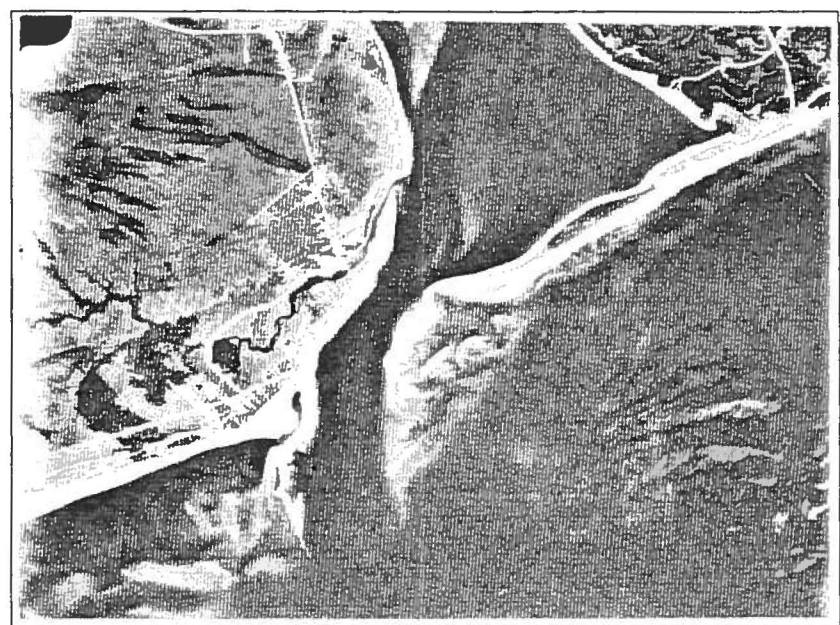
1956



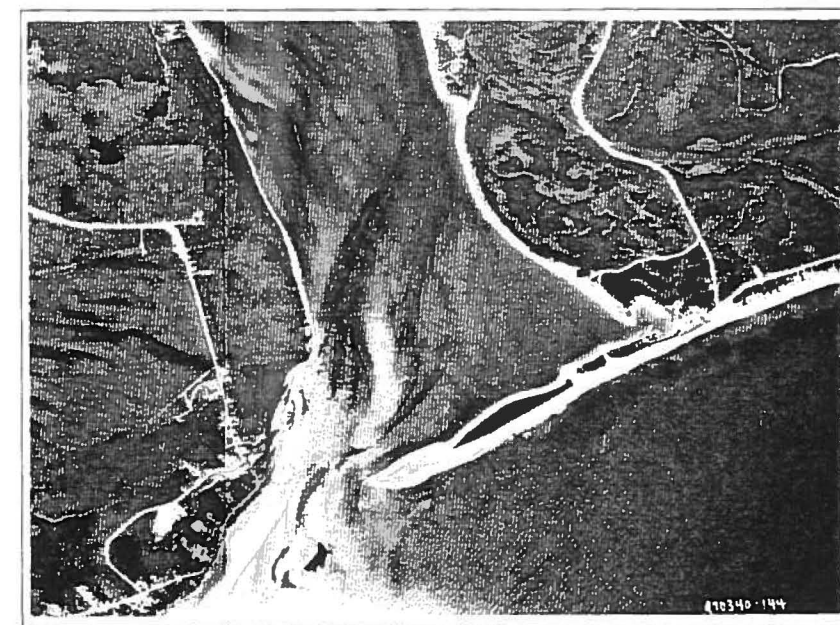
1959



1962

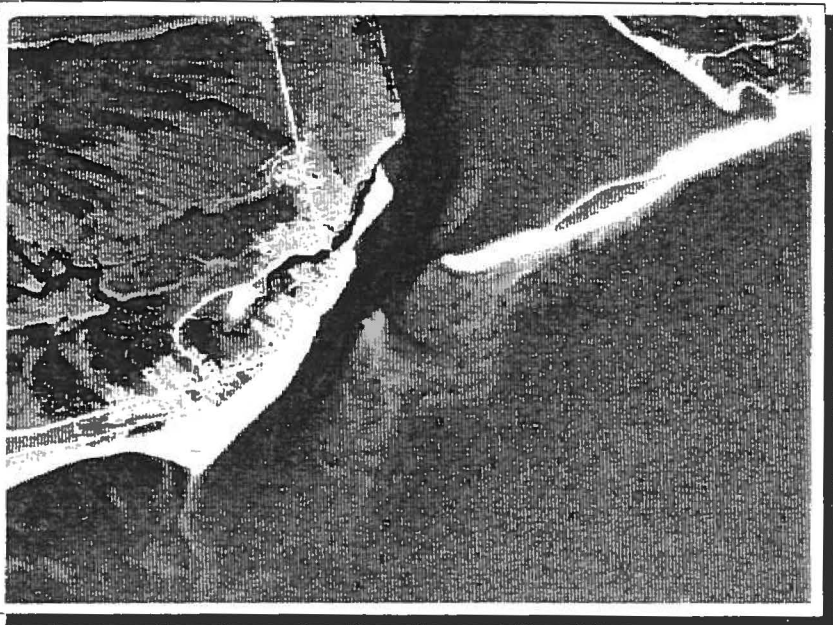


1965

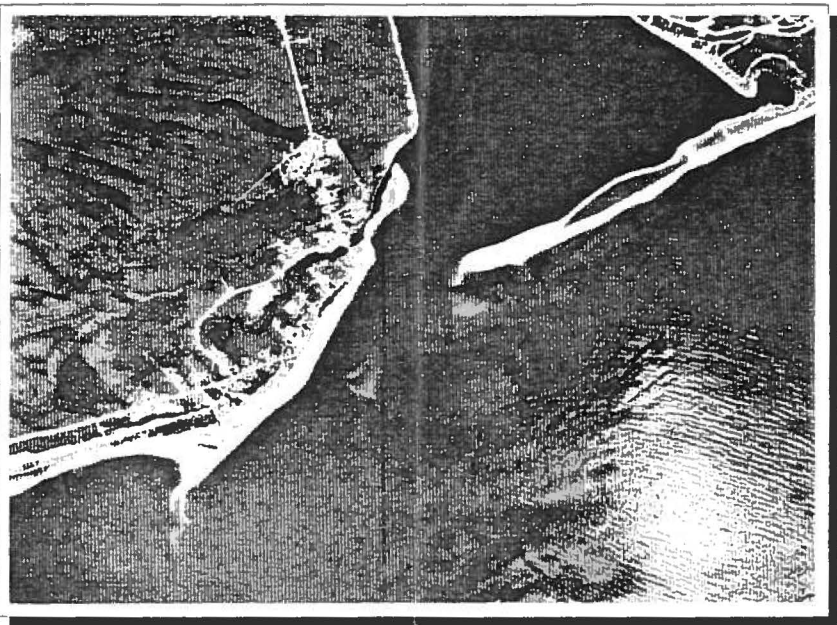


1970

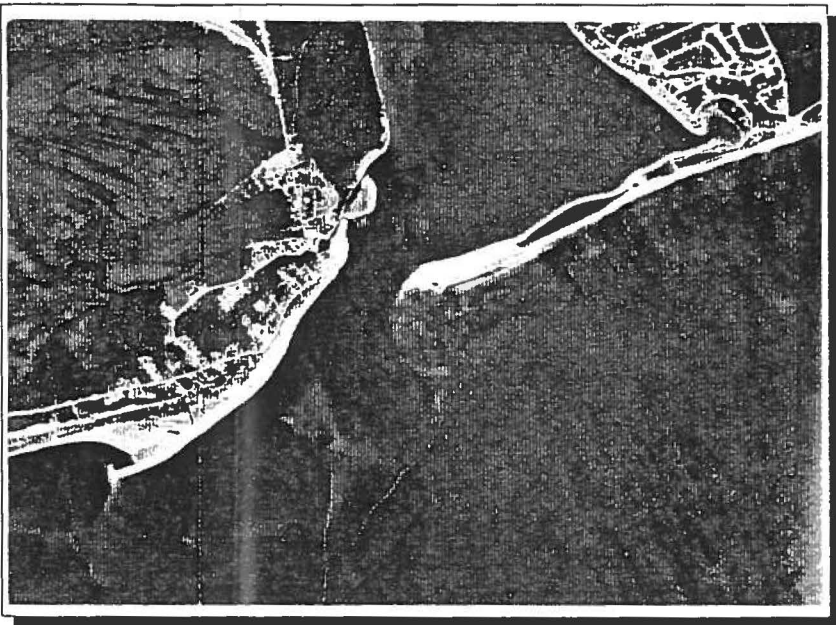
Figure 7 Évolution de la flèche littorale à l'embouchure de la Sainte-Marquerite, 1973 à 1997



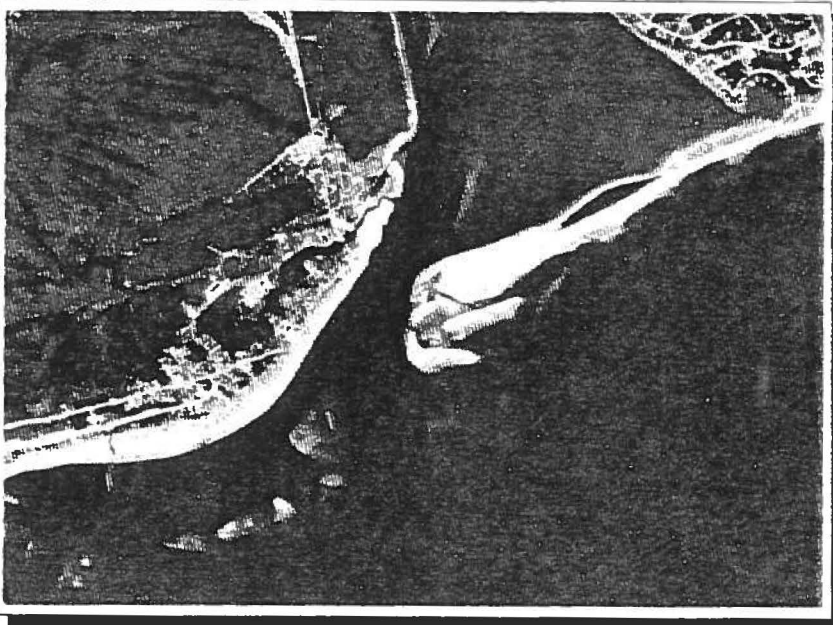
1973



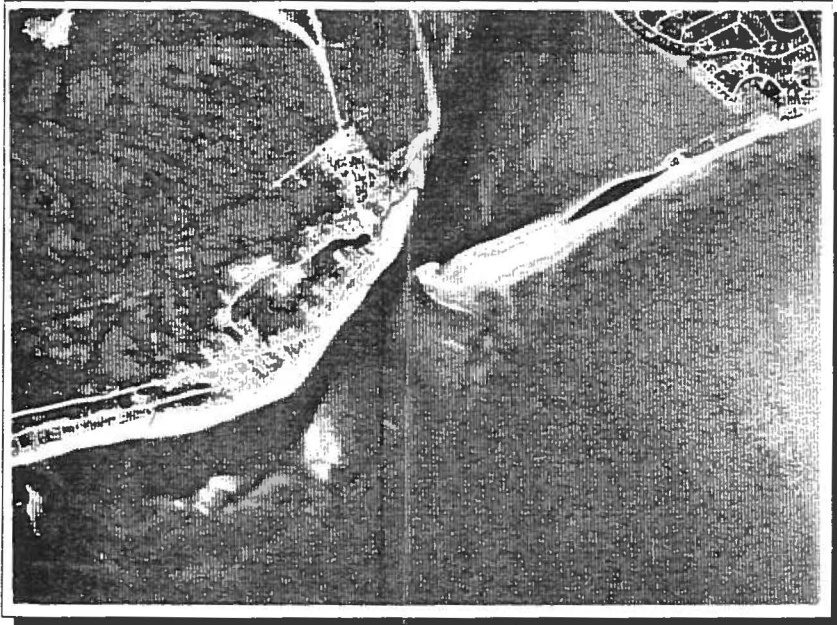
1976



1979



1982



1987



1997

La zone centrale de la flèche est la plus stable depuis 1950. Les dunes y sont élevées, couvertes d'arbres et la forme générale de cette bande de végétation est demeurée la même, soit celle d'un arc très régulier du côté de l'estuaire de la Sainte-Marguerite et d'un front dunaire rectiligne du côté maritime. On peut constater que la face maritime de cette région centrale a migré vers le nord de 1950 à 1982 et qu'elle semble plus stable depuis 1982. La largeur de la bande de végétation dans la zone centrale de la flèche a diminué depuis 1950. Ceci suggère une érosion généralisée de la flèche.

Les deux segments situés aux extrémités de la flèche ont subi beaucoup plus de changement que le segment central. Près du pédoncule, la végétation de dune est pratiquement absente ou très clairsemée en 1950. Toute la région du pédoncule constitue un vaste goulet de tempête balayé par le vent et les vagues de tempêtes. Dans cette zone, la flèche est très basse en 1950 et sa largeur augmente jusque dans les années 60 alors que les dunes se forment et que la végétation envahit cette zone. En 1970, une dune bien formée et couverte de végétation dense recouvre la région du pédoncule. De 1973 à 1987, la végétation de dunes demeure en place et s'étend, mais elle apparaît tantôt clairsemée, tantôt plus dense selon les photographies. Des goulets étroits sans végétation, correspondant à des sentiers, traversent la dune en plusieurs endroits. En 1997, la végétation de dune affiche de nombreux signes de dommages importants causés par le piétinement, les véhicules tout-terrain et d'autres facteurs. À la racine du pédoncule, près de Val-Marguerite, la largeur de la flèche n'est que de 75 m à marée basse, et un goulet de tempête peut s'ouvrir en tout temps. Dans ce secteur, la dune est très mince (à peine quelques mètres de largeur) et tout indique que les vagues peuvent recouvrir la dune lors de marées hautes extrêmes.

Le segment ouest, ou la pointe de la flèche est de toute évidence la région la plus mobile et la plus changeante de la flèche. Sur les photographies aériennes historiques, ce segment s'élargit et s'allonge, se recourbe tantôt vers l'intérieur de l'estuaire de la Sainte-Marguerite, tantôt vers le golfe du Saint-Laurent, s'arrondit ou présente des signes de troncatures. La végétation est tout aussi mouvante, se formant et se déformant d'une photographie à l'autre. Sur les photographies de 1950 à 1962, on peut observer des dunes en voie de colonisation par la végétation herbacée. Par contre, sur la photographie de 1965, la zone végétalisée est complètement érodée et se réduit à une mince bande de

quelques dizaines de mètres de largeur. De 1970 à 1979, la pointe de la flèche semble pratiquement dépourvue de végétation de dune ou couverte seulement d'une végétation herbacée très clairsemée. Les dunes sont à nouveau colonisées progressivement par la végétation herbacée à partir de 1982. En 1997, une bande de dunes herbacées basses s'étire sur environ 450 m de longueur et 50 m de largeur. Ce mince cordon dunaire est fortement endommagé, traversé en plusieurs points par des chemins de traverses devenus des goulets de tempêtes.

Les déplacements apparents de la pointe de la flèche (répertoriés par Roche, 1990 à partir des photographies aériennes historiques) peuvent atteindre 300 m ; cependant, lorsqu'on corrige les distorsions visuelles causées par la profondeur de l'eau au moment de la prise de photo, les déplacements réels de la pointe de la flèche sont plutôt de l'ordre de 50 à 100 m. Les figures 6 et 7 montrent que d'une photographie à l'autre, la flèche s'étire ou se replie. Aucune tendance nette ne se dégage au cours des 5 dernières décennies. Il semble plutôt que la longueur de la flèche oscille autour d'une valeur fixe.

Les mesures bathymétriques réalisées en 1994 et répétées en 1997 permettent d'évaluer l'importance des mouvements de la pointe de la flèche sur une courte période de trois ans. La pointe de la flèche s'est déplacée vers l'intérieur de l'estuaire de la Sainte-Marguerite sur une distance d'environ 70 m de 1994 à 1997. On a pu reconstituer ce déplacement en localisant l'isobathe de 0 m des profils 124, 46, 42, 43, 44 et 132 (voir position à la carte 5) pour ces deux années. Tous ces profils recoupent la pointe de la flèche sableuse, ce qui permet d'en reconstituer le contour assez fidèlement. La position de l'isobathe de 0 m est représentée à la figure 8. Cette comparaison met en évidence un déplacement latéral de 70 m environ de toute la pointe de la flèche sableuse qui pivote autour d'un point situé à environ 350 m à l'est de l'extrémité de la flèche. La flèche s'est recourbée vers le nord (vers l'intérieur de l'estuaire).

La comparaison des données bathymétriques recueillies le long de la flèche sableuse montre aussi que la largeur et la hauteur de la flèche ont varié de 1994 à 1997. La figure 9 compare les profils nos 127 et 140 (carte 5 en annexe 1) recueillis durant ces deux années à chaque extrémité de la flèche d'embouchure. Ces données montrent que la forme générale du profil de la dune est demeurée la même mais que des variations locales

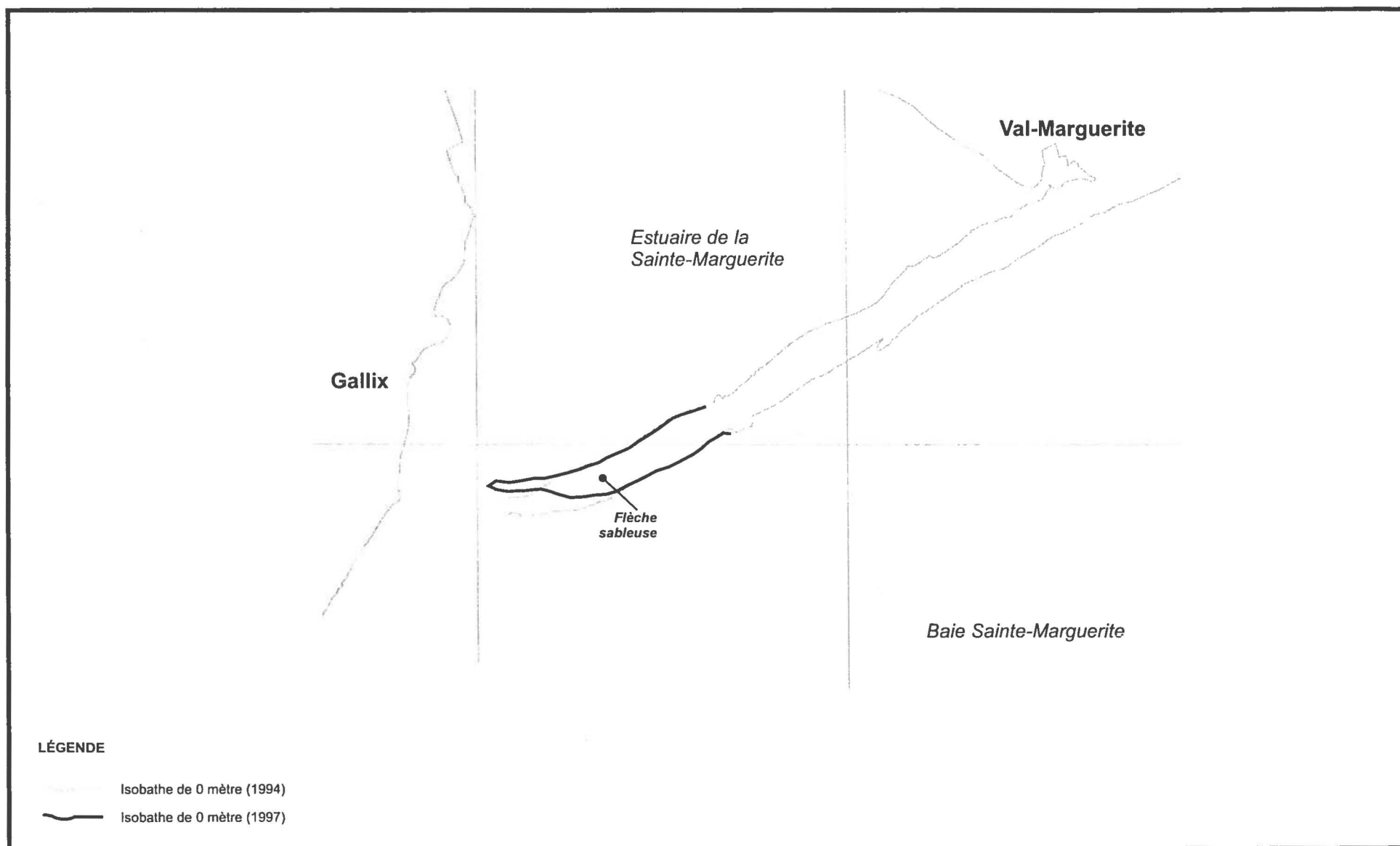


Figure 8 Déplacement de l'isobathe de 0 m de 1994 à 1997 à l'extrémité de la flèche sableuse

SOURCE DU FOND DE PLAN : Plan de localisation des sections bathymétriques; Direction ouvrages civils, Service hydraulique, Division Hydrométrie; août 1997.

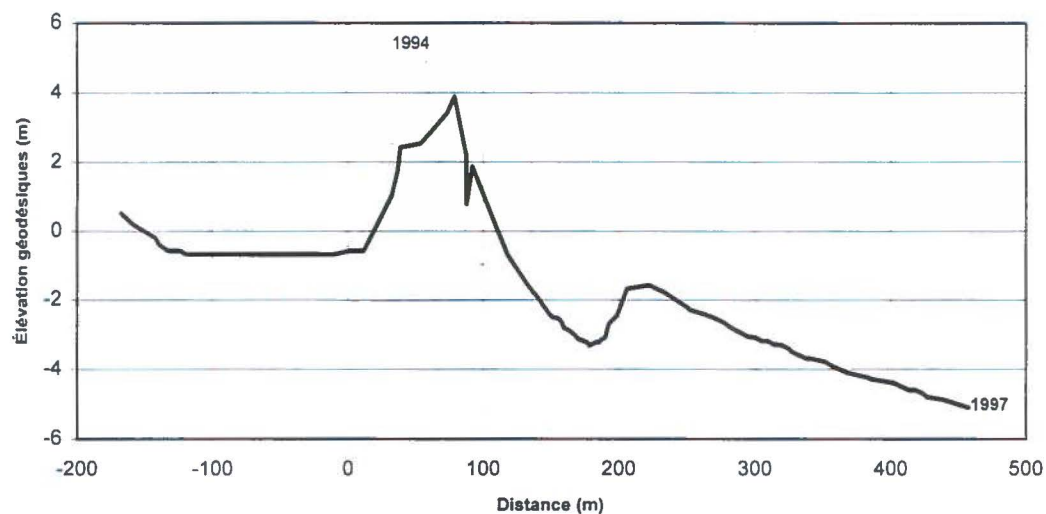


Échelle approximative 1 : 15 000

Rive droite
672 360 m. E
5 557 786 m. N

Vers la flèche de l'embouchure
672 694 m. E
5 557 257 m. N

Profil 140



Rive droite
671 389 m. E
5 557 056 m. N

Vers la flèche de l'embouchure
671 563 m. E
5 556 753 m. N

Profil 127

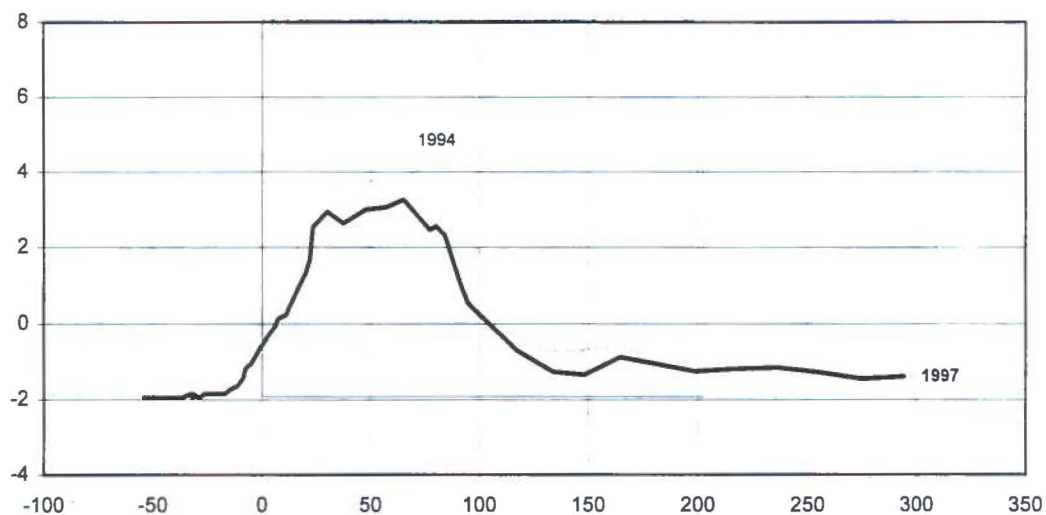


Figure 9 Comparaison des profils bathymétriques Nos 140 et 127 mesurés en 1994 et 1997

significatives de hauteur et de largeur sont mesurables. Près du pédoncule (profil 140), la plage située du côté nord de la flèche (côté intérieur de l'estuaire) s'est érodée de 0,5 m et la plage située du côté maritime ou extérieur de la flèche s'est épaissie d'environ 1,5 m. Pour bien interpréter la figure 9, il importe de tenir compte de la distorsion de l'échelle verticale par rapport à l'échelle horizontale sur les profils. L'échelle horizontale est environ 25 fois supérieure à l'échelle verticale. Près de la limite ouest de la flèche (profil 127), on note une érosion des deux plages, de part et d'autre de la flèche, de l'ordre de 35 cm à l'intérieur de l'estuaire et de 1,0 m à l'extérieur. La hauteur de la flèche diminue d'environ 70 cm en moyenne à cet endroit entre 1994 et 1997.

Les observations au sol recueillies lors des campagnes de mesure suggèrent une érosion généralisée de la dune tant du côté intérieur que sur la plage extérieure de la flèche. On peut donc observer presque au même endroit, des évidences d'un épaississement ou d'une accrétion de la plage et d'une érosion du talus.

2.3.3 Le chenal d'écoulement

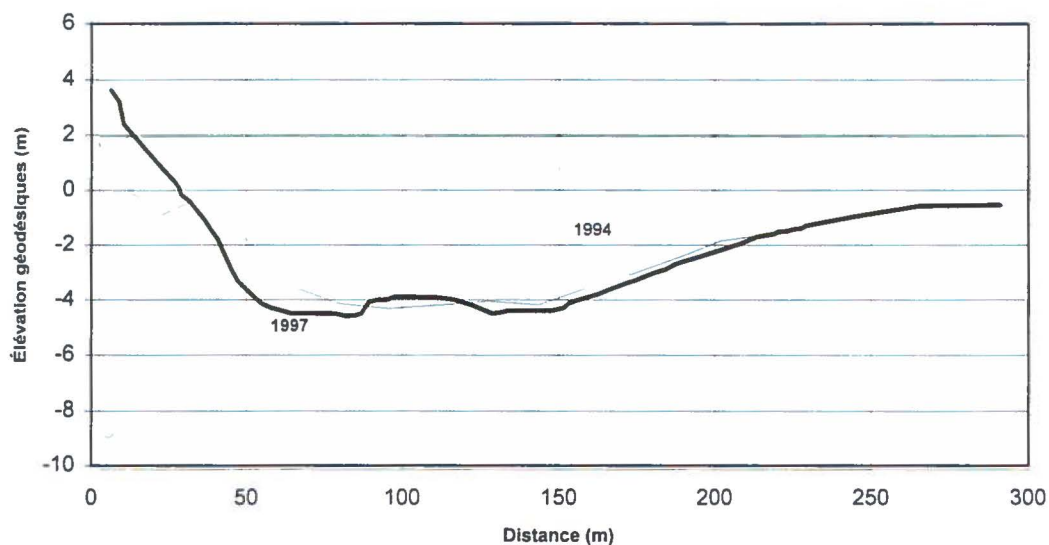
La position, la largeur et la forme du chenal d'écoulement sont demeurées assez stables dans l'estuaire de la Sainte-Marguerite depuis une cinquantaine d'année. Un seul chenal unique parcourt tout l'estuaire de la tête à l'embouchure ; ce chenal se prolonge à l'extérieur de l'estuaire et traverse tout le delta externe pour se jeter dans la baie Sainte-Marguerite à environ 800 m de la rive de Gallix. Dans l'estuaire, le chenal principal forme un grand méandre qui longe la rive gauche aux environs du pk 2,0. La largeur du chenal d'écoulement est assez constante et se situe aux environs de 200 à 300 m. La profondeur du chenal principal varie de 6,0 m à 2,2 m par rapport au niveau géodésique. Un seuil rocheux marque la tête de l'estuaire ; submergé à marée haute, ce seuil rocheux se transforme en rapide à marée basse.

Les figures 10 et 11 comparent les profils bathymétriques recueillis dans le chenal d'écoulement entre 1994 et 1997, au niveau de Gallix (voir position carte 5, annexe 1). Ces profils réalisés par CSSA Consultants Ltée (1995) en 1994 et par l'unité Hydraulique et Géotechnique d'Hydro-Québec en 1997, montrent que le chenal d'écoulement s'est élargi et uniformisé durant cette période. En 1994, la largeur du chenal et sa profondeur varient beaucoup dans la région de Gallix. En utilisant l'isobathe de -1 m pour évaluer la largeur du

Rive droite
670 662 m. E
5 556 689 m. N

Vers la flèche de l'embouchure
670 917 m. E
5 556 562 m. N

Profil 052



Rive droite
670 778 m. E
5 556 890 m. N

Vers la flèche de l'embouchure
671 188 m. E
5 556 829 m. N

Profil 046

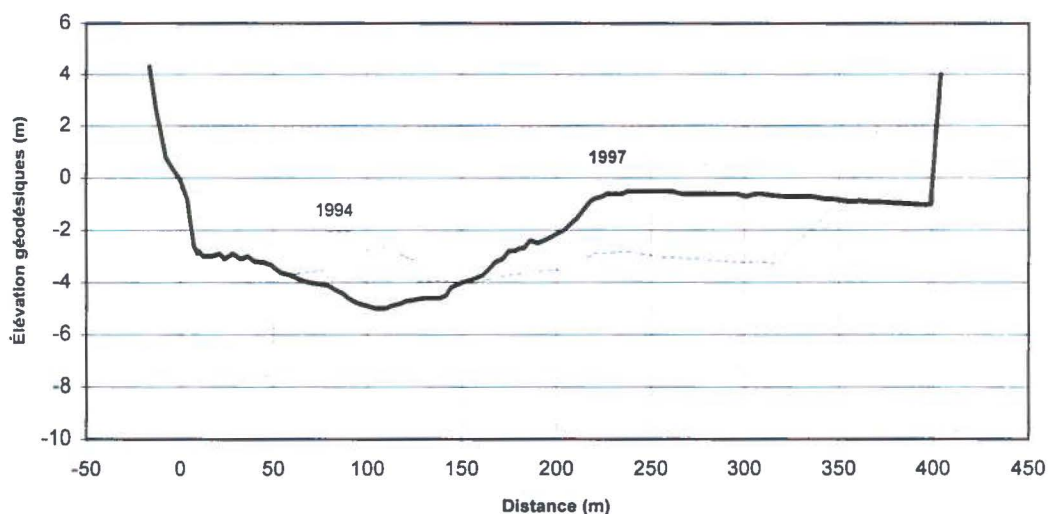
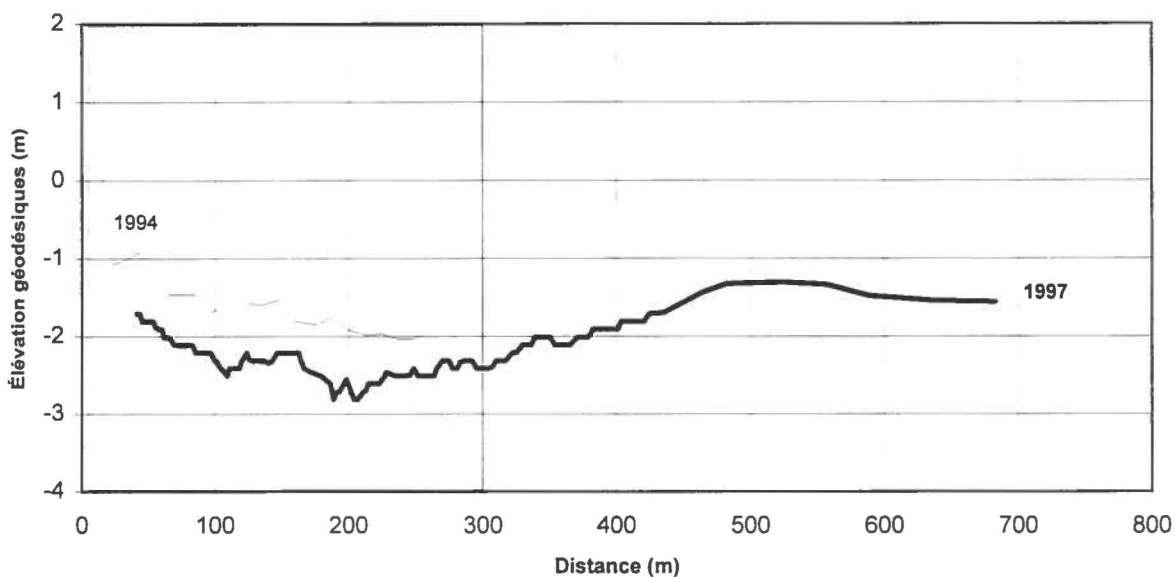


Figure 10 Comparaison des profils bathymétriques Nos 52 et 46 mesurés en 1994 et 1997

Rive droite
670 391 m. E
5 556 241 m. N

Vers la flèche de l'embouchure
670 893 m. E
5 555 842 m. N

Profil 060



Rive droite
670 156 m. E
5 556 053 m. N

Vers la flèche de l'embouchure
670 594 m. E
5 555 672 m. N

Profil 064

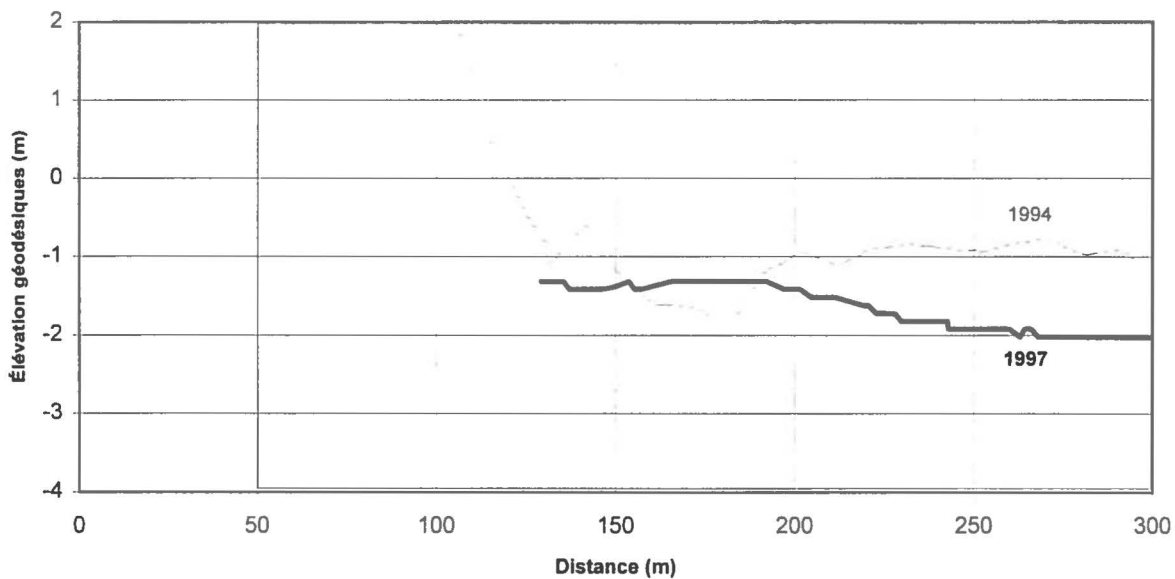


Figure 11 Comparaison des profils bathymétriques Nos 60 et 64 mesurés en 1994 et 1997

chenal, on trouve que la largeur du chenal est respectivement de 200, 210 et 190 m aux profils 46, 52 et 57 en 1994. En 1997, les trois profils affichent une largeur uniforme de 225 m.

Ces données montrent que le chenal d'écoulement est en moyenne de 25 m plus large en 1997 qu'en 1994. Le changement de profondeur est encore plus marqué. En 1994, on peut distinguer une fosse de près de 10 m de profondeur en face de Gallix (profils 46, 47 et 48 dans CSSA Consultants Ltée ; 1995). En 1997, les profils 46, 52 et 57 ne montrent aucune trace de cette fosse. Des sondages additionnels dans la région de la fosse réalisés par l'équipe de terrain du groupe Roche en juillet 1997 ne montrent aucune profondeur d'eau supérieure à 5,0 m sous le niveau géodésique. La fosse a donc été comblée. La profondeur du chenal en 1997 est beaucoup plus uniforme qu'en 1994, oscillant entre -4 et -5 m. En 1994, la profondeur du chenal variait de -10 à -3,3 m dans la zone située entre les profils 46 et 57. La largeur du chenal (mesurée au niveau de l'isobathe de -1 m) variait de 150 à 225 m (si l'on fait abstraction du transect 46). En 1997, le chenal est plus uniforme en largeur (225 m) et en profondeur (4 à 5 m).

2.3.4 Le delta externe et l'épi de Gallix

Les relevés bathymétriques de 1997 indiquent que le delta externe de l'estuaire de la Sainte-Marguerite est ceinturé par une barre dont le sommet est environ à la cote -1,0 à -1,5 m, ce qui est légèrement au-dessus du niveau des basses mers inférieures, de l'ordre de -1,5 m (-1,43 à Sept-Îles). La seule trouée dans cette barre qui ceinture le delta se situe dans le prolongement du chenal principal, qui longe la rive de Gallix et bifurque vers le golfe du Saint-Laurent. À son extrémité aval, ce chenal devient très diffus et n'est plus qu'une vague dépression dont la profondeur maximale est environ 1,5 m sous le niveau du delta, soit une cote de -2,5 m. La mosaïque de 1997 de la figure 7 montre que le chenal se prolonge à travers le delta externe en s'évasant. À marée basse, la largeur du chenal à l'extrémité sud du delta externe est d'environ 600 m.

Un épi sableux de près de 300 m de longueur et de plus de 1,5 m de hauteur s'est développé dans la partie centrale du delta, perpendiculairement à la rive, à l'extrémité du chenal d'écoulement. L'axe de l'épi se situe à peu près au niveau du profil 106, à la carte 5 (voir aussi la photo mosaïque de 1997 à la figure 7). Cet épi est présent sur certaines

photographies aériennes historiques, mais il atteint en 1997 une longueur et une largeur sans précédent.

2.4 MODIFICATIONS ANTHROPIQUES

Les activités humaines influencent la dynamique de l'estuaire de la Sainte-Marguerite depuis plusieurs décennies. Près de l'embouchure, les principales activités anthropiques sont liées au développement urbain (déboisement, routes, construction résidentielle, protections de berges, pêche, véhicules tout-terrain, etc). Les protections de berges installées en 1994-95 à Gallix (figure 12) ou sur les plages bordant Val-Marguerite interfèrent avec la dynamique sédimentaire de la flèche sableuse et du chenal d'écoulement. On ne connaît pas l'importance des impacts de ces ouvrages de stabilisation sur la dynamique de la zone deltaïque.

Les plages et les berges de l'embouchure se sont beaucoup modifiées depuis quelques décennies. Certaines de ces modifications se produisent naturellement ; par contre, les constructions en berge, le piétinement des dunes, les perforations de la couche indurée, le déboisement des rives peuvent contribuer à activer l'érosion localement. Aucune évaluation des impacts du développement urbain n'a été faite, de sorte qu'il est assez difficile d'estimer l'effet cumulé des activités de ce développement.

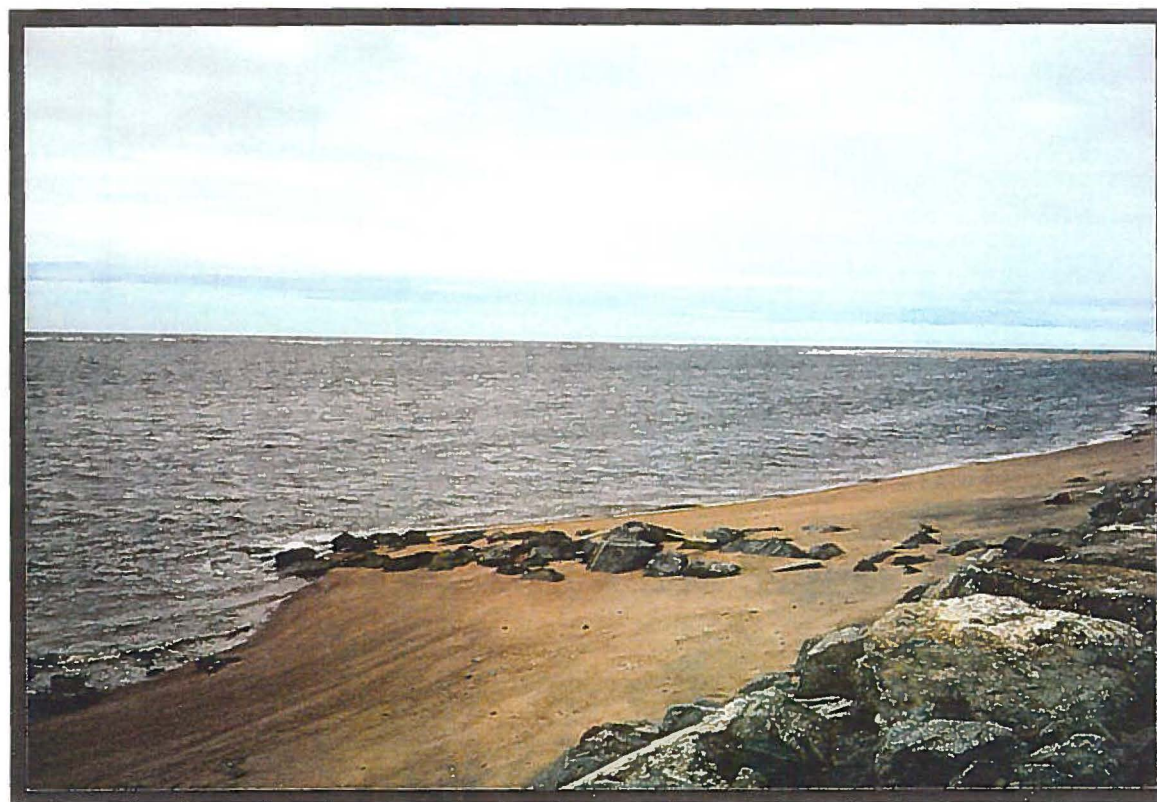


Figure 12 Protections en enrochement avec épis rocheux à Gallix

3 RÉGIME HYDROLOGIQUE

Le tableau 2 ci-dessous résume les caractéristiques hydrologiques de la rivière Sainte-Marguerite. Les statistiques hydrologiques sont basées sur les données reconstituées à partir d'une station située à l'amont de la centrale de Sainte-Marguerite-2, de janvier 1962 à mars 1998. Ces données sont représentatives du régime d'écoulement avant la mise en eau du réservoir Sainte-Marguerite-3, survenue le 1^{er} avril 1998.

Tableau 2 *Caractéristiques hydrologiques de la rivière Sainte-Marguerite*

Caractéristique	Date	Débit (m ³ /s)
Débit module interannuel		138
Module minimum	1985	102
Module maximum	1979	181
Minimum mensuel extrême	02-1998	10,2
Maximum mensuel extrême	05-1979	742
Crues printanières de récurrence		
Moyenne		929
10 ans		1310
20 ans		1480
50 ans		1690
100 ans		1850
Crues automnales de récurrence		
Moyenne		398
10 ans		592
20 ans		675
50 ans		784
100 ans		865
Percentiles de dépassement des débits classés journaliers		
10 %		327
20 %		191
50 %		79,4
90 %		25,9
100 %		7,6
Minimum journalier	28-03-1985	7,6
Maximum journalier	31-05-1966	1704

La figure 13 présente l'hydrogramme des débits journaliers versés à l'estuaire basé sur les données historiques. La courbe représente les enveloppes des valeurs minimales et maximales journalières et la valeur moyenne reconstituées de 1962 à 1996.

Une mise en garde s'impose ici : les débits présentés aux tableaux et aux figures de la présente section sont tous des débits reconstitués à partir des observations recueillies à la centrale SM-2. Cependant, les débits utilisés dans le reste du rapport sont basés sur les données de débit total passant la centrale SM-2. Ces valeurs sont légèrement différentes et peuvent paraître à l'occasion assez éloignées parce que les moyennes journalières sont calculées différemment. Ainsi, d'après les données de la SM-2, le débit de crue du 20 mai 1997 est de 828 m³/s, comparativement à 541 m³/s selon les débits reconstitués. Cette différence s'explique par le fait que les débits de la centrale SM-2 sont turbinés ou évacués selon les besoins d'opération.

Le tableau 2 et la figure 13 mettent en évidence la grande variabilité des apports d'eau douce dans l'estuaire de la Sainte-Marguerite. Au cours de la période d'observation (35 ans) le débit journalier de la rivière a varié d'un minimum de 7,6 m³/s à un maximum de 1704 m³/s. Le débit module est de 138 m³/s et 90 % du temps, le débit est inférieur à 327 m³/s.

La figure 14 montre la répartition des débits journaliers minimums, moyens et maximums annuels pour la période 1962 à 1997. Cette figure montre que les débits maximums ont diminué depuis 1982 par rapport à ceux des deux décennies précédentes. De 1982 à 1997, les débits maximums n'ont jamais dépassé 830 m³/s ; pendant la période 1962 à 1982, les débits maximums ont toujours été supérieurs à 830 m³/s sauf à deux reprises. Pendant ces deux décennies, les débits ont dépassé 1300 m³/s à 6 reprises. La réduction des pointes de crue est probablement attribuable à un adoucissement du climat hivernal au cours des 2 dernières décennies ; les redoux printaniers plus nombreux ont pour effet d'allonger la période de fonte des neiges et d'étaler les crues.

Le tableau 3 présente les caractéristiques des débits mensuels à la centrale Sainte-Marguerite-2 calculés à partir de données reconstituées de 1997 et 1998.

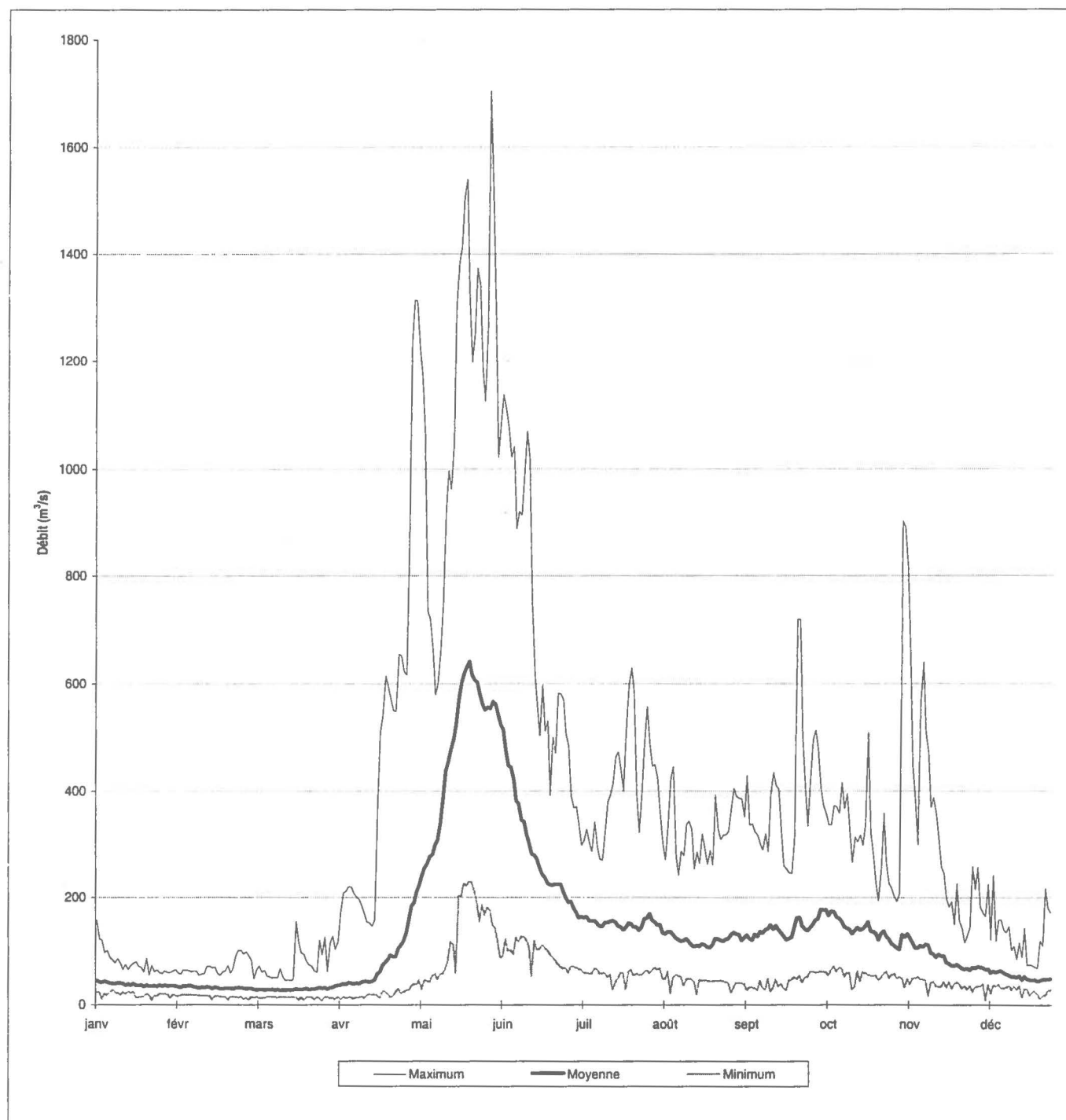


Figure 13
Hydrogrammes des débits journaliers de la rivière Sainte-Marguerite de 1962 à 1996

Tableau 3 Débits mensuels à la Centrale Sainte-Marguerite-2

Mois en 1997	Débit minimum(m ³ /s)	Débit moyen (m ³ /s)	Débit maximum (m ³ /s)
Janvier	27,7	32,1	37,9
Février	18,0	22,8	27,3
Mars	12,8	15,5	17,6
Avril	10,8	14,1	24,5
Mai	8,2	270,4	541,3
Juin	164,0	361,1	512,3
Juillet	154,7	298,8	611,4
Août	83,7	127,1	225,9
Septembre	120,6	152,7	189,5
Octobre			
Novembre			
Décembre	15,5	21,3	32,7
Mois en 1998			
Janvier	11,8	13,9	16,1
Février	8,5	10,2	11,6
Mars	9,7	16,9	23,2

Les hydrogrammes et statistiques de la période 1997-1998 présentés ci-dessus sont aussi reproduits à la figure 15. Ces données permettent de situer ces années hydrologiques par rapport aux années antérieures. Cette comparaison permet de tirer les conclusions suivantes :

Le débit module pour la période 1996-1997 est de 134 m³/s, ce qui se compare assez bien au débit module interannuel de 138 m³/s. La crue du printemps 1997, de 541 m³/s est nettement inférieure à la crue moyenne de 929 m³/s. En terme de volume d'eau apporté à l'estuaire, la crue de 1997 se compare à la moyenne, mais la pointe de débit est plus faible parce qu'elle est très étalée. Le débit journalier le plus élevé (611,4 m³/s) de l'année 1997 a été observé le 12 juillet. Les débits de janvier à mars 1998 se situent entre un minimum journalier de 8,5 m³/s et un maximum de 23,2 m³/s. Ces valeurs sont typiques pour la saison.

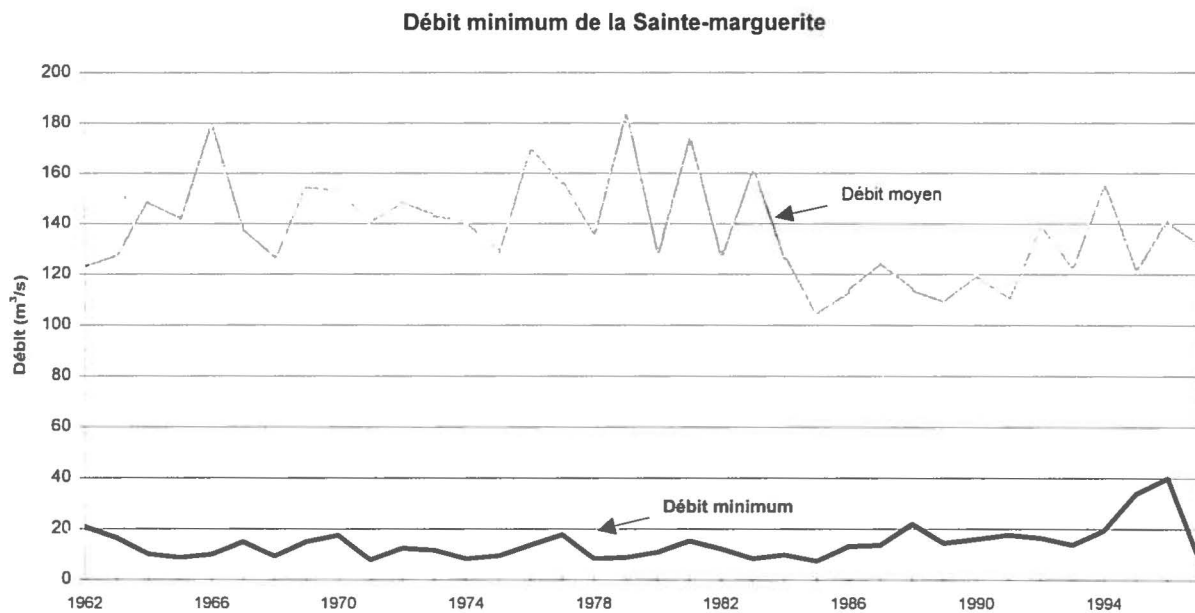
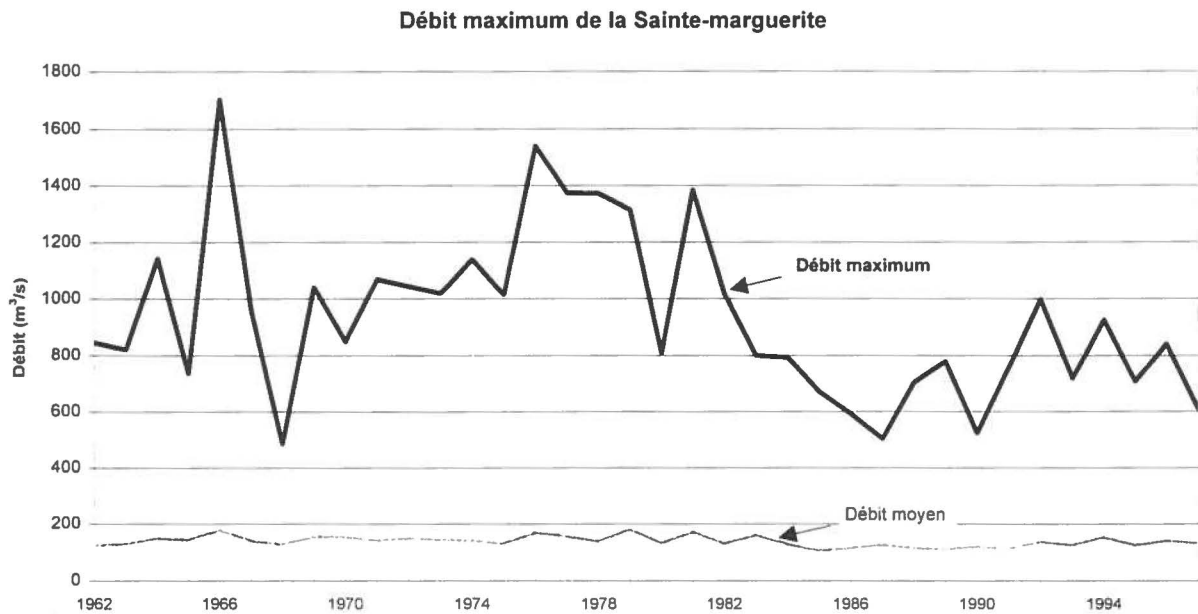


Figure 14

Minimum, moyenne et maximum annuels des débits journaliers de la rivière Sainte-Marguerite, de 1962 à 1997

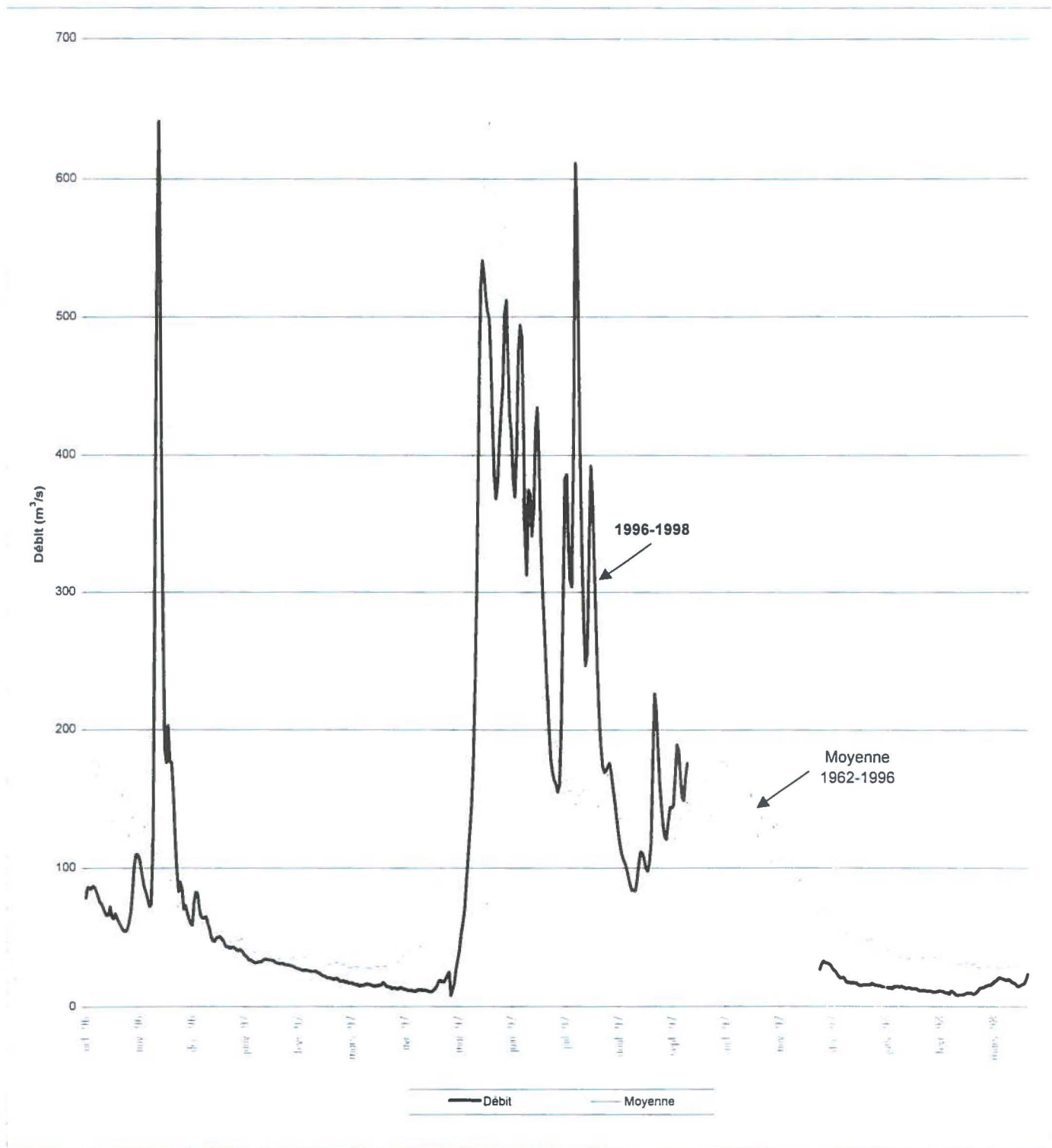


Figure 15

Hydrogrammes des débits journaliers de la rivière Sainte-Marguerite d'octobre 1996 à mars 1998

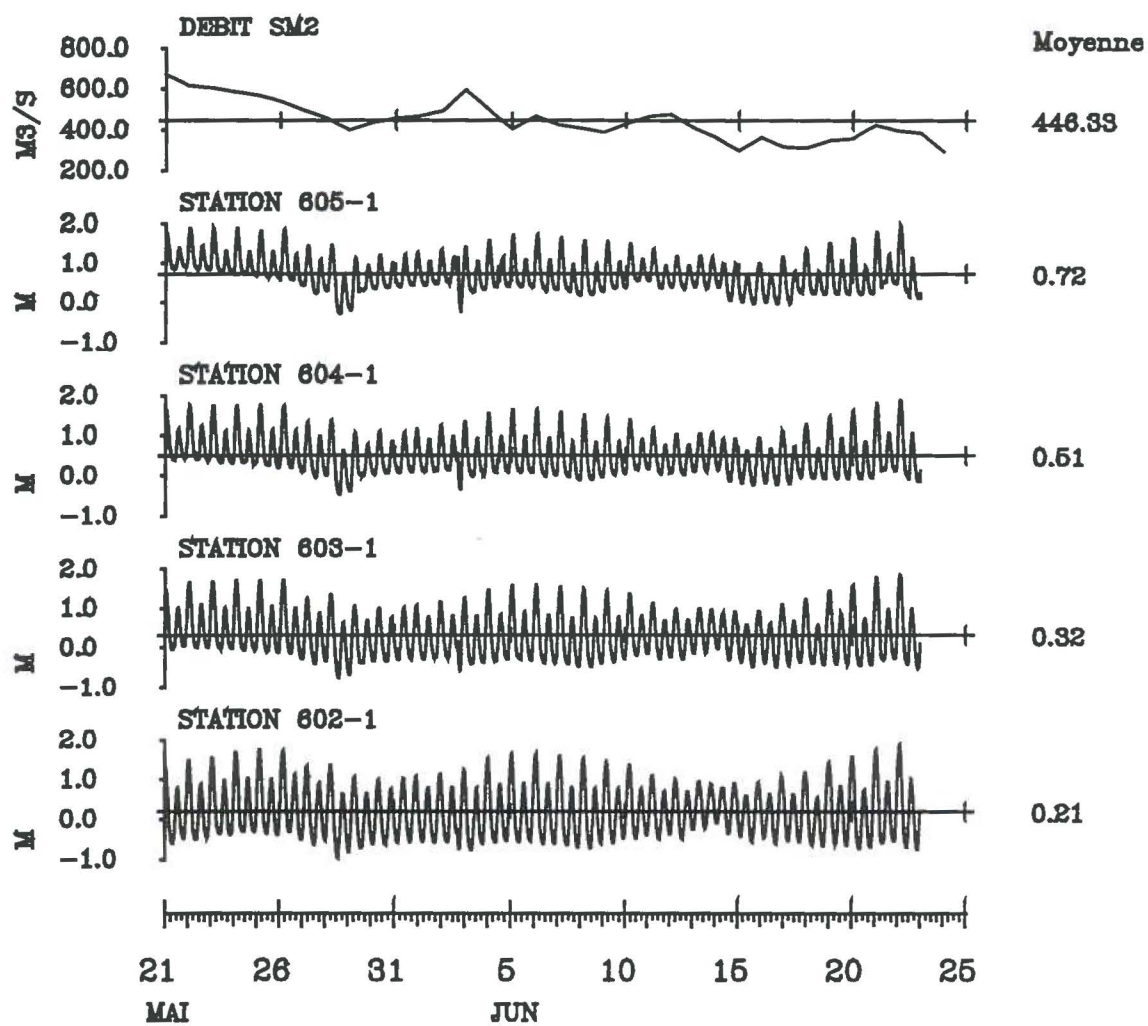
4 MARÉES ET NIVEAUX D'EAU

Les mesures de niveau d'eau, dans l'estuaire de la Sainte-Marguerite, ont été prises par l'unité Hydraulique et Géotechnique d'Hydro-Québec. Quatre marégraphes ont été installés dans l'estuaire de la Sainte-Marguerite. La position des stations marégraphiques est indiquée à la carte 1 en annexe 1. Les marégraphes ont été en opération du 20 mai au 21 août 1997. Les séries chronologiques de niveau d'eau sont synchrones et concomitantes et l'intervalle d'échantillonnage est de 15 minutes.

4.1 RELATION DÉBIT NIVEAU

Les figures 16 et 17 présentent les données de marée recueillies aux quatre stations marégraphiques de l'estuaire de la Sainte-Marguerite au printemps et à l'été 1997. Chaque série chronologique représente une période de 32 jours. Les figures 16 et 17 présentent aussi les courbes de débit journalier de la rivière Sainte-Marguerite pendant la période de mesure afin d'illustrer l'influence du débit d'eau douce sur les niveaux d'eau. En mai-juin, le débit fluvial se situe aux environs de $446 \text{ m}^3/\text{s}$. En juillet-août, le débit de la rivière se maintient aux environs de $148 \text{ m}^3/\text{s}$. Ces figures montrent que le débit de la rivière Sainte-Marguerite affecte les niveaux d'eau, qui sont plus élevés en moyenne lorsque le débit fluvial est plus fort.

La relation entre le débit et le niveau d'eau moyen dans l'estuaire est illustrée au tableau 6, de la page 42, qui présente les caractéristiques du niveau moyen pour chacune des périodes représentées au figures 16 et 17. Le niveau moyen n'a pu être calculé à la station 602 en juillet-août parce que l'appareil s'est déplacé pendant la période de mesure, ce qui introduit une erreur d'une vingtaine de centimètres sur le niveau moyen. Le tableau 4 met en évidence la présence d'un gradient isostatique dans l'estuaire (le niveau d'eau est en moyenne plus élevé à la tête qu'à l'embouchure de l'estuaire). Ce tableau montre également que le niveau de l'eau dans l'estuaire est influencé par le débit fluvial.



21 mai - 22 juin 1997

Figure 16 : Données de débit et de niveau d'eau aux stations marégraphiques dans la rivière Sainte-Marguerite du 21 mai au 22 juin 1997.

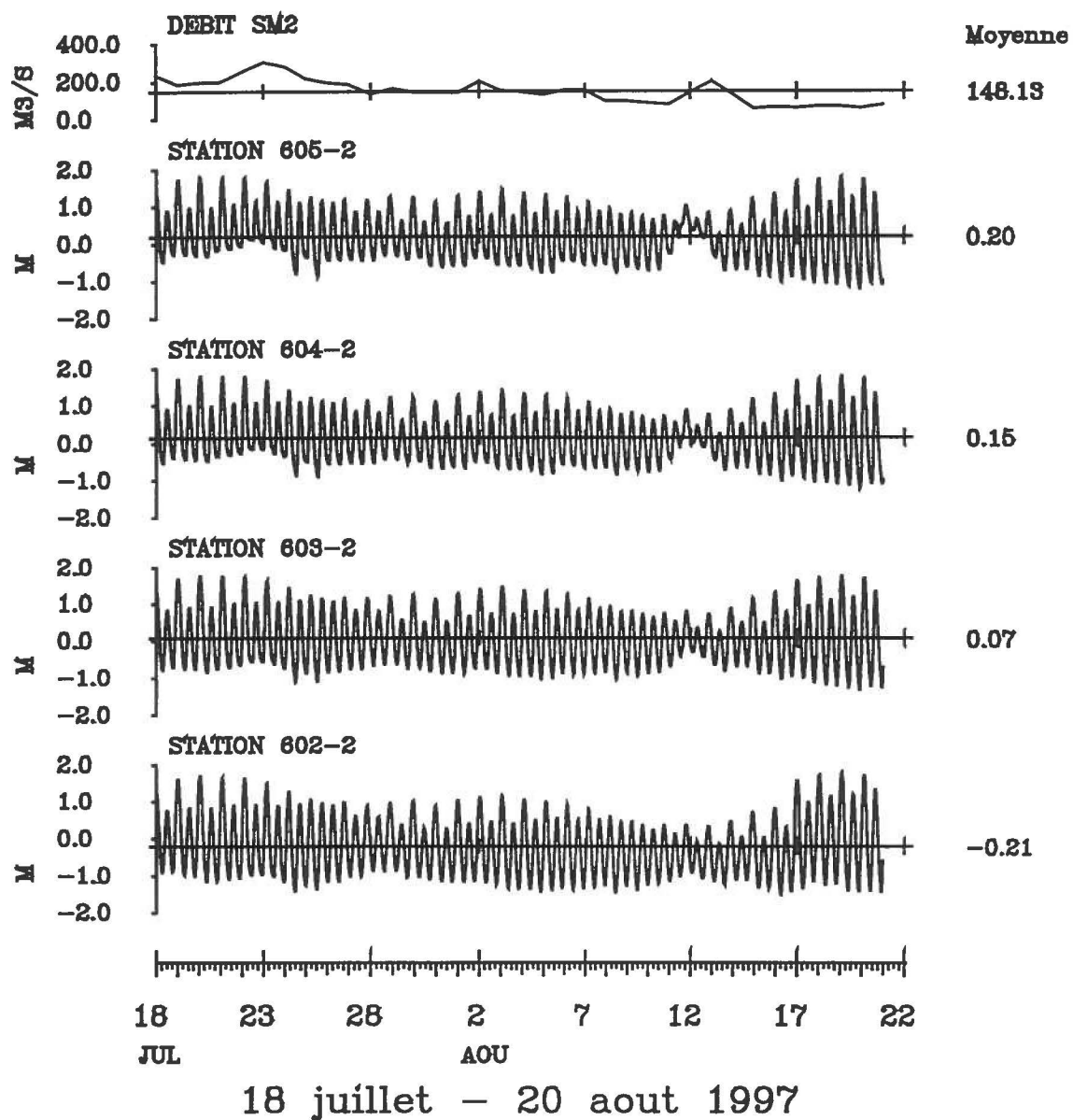


Figure 17 : Données de débit et de niveau d'eau aux stations marégraphiques dans la rivière Sainte-Marguerite du 18 juillet au 20 août 1997.

Tableau 4 Niveaux moyens aux stations marégraphiques de l'estuaire de la Sainte-Marguerite

Station	Niveau moyen (m)	
	Du 21 mai au 23 juin 1997	Du 18 juillet au 21 août 1997
602	0.21	?
603	0.32	0.07
604	0.51	0.15
605	0.72	0.20
Débit fluvial moyen (m ³ /s)	446	148

4.2 MARÉE : ANALYSE HARMONIQUE

Une analyse harmonique des données marégraphiques présentées aux figures 16 et 17 a été réalisée. Les séries chronologiques de niveau d'eau ont été décomposées en 36 constituantes harmoniques pour chaque période sélectionnée de 32 jours. Les résultats de ces analyses et une description des méthodes de traitement utilisées sont présentés dans le rapport de données, en deuxième partie du présent rapport. Les sections qui suivent présentent une brève analyse des caractéristiques des constituantes de marée.

4.2.1 Composante semi-diurne principale M_2

Les tableaux 5a et 5b présentent les caractéristiques de l'onde principale semi-diurne M_2 de la marée aux quatre stations pour les deux périodes mentionnées ci-dessus. Ces tableaux suggèrent une dépendance entre l'amplitude de M_2 et le débit de la rivière Sainte-Marguerite. À l'embouchure, la réduction du débit fluvial de 300 m³/s coïncide avec une augmentation de 17 % de l'amplitude de M_2 , qui passe de 0,73 m mai à environ 0,85 m en juillet en à l'embouchure (station 602). À la tête de l'estuaire (station 605) l'amplitude de M_2 est encore plus sensible aux variations du débit fluvial. De mai à août 1997, l'amplitude de M_2 passe de 0,405 à 0,688 m à la station 605, soit une augmentation d'environ 70 %.

Les analyses harmoniques montrent que la phase de M_2 à la station 602 (embouchure) correspond d'assez près à celle des marées du Saint-Laurent à Sept-Îles, telle que calculée par Godin 1984. Dans l'estuaire de la Sainte-Marguerite, l'onde principale M_2 traverse l'estuaire en 48 minutes en mai-juin et en 30 minutes en juillet-août de l'embouchure à la tête de l'estuaire. L'augmentation du débit fluvial a pour effet de ralentir la progression de la marée en augmentant la résistance à l'écoulement. L'amplitude de M_2 s'atténue vers l'amont de l'estuaire. En mai, l'amplitude de M_2 s'atténue de près de moitié (44 % au

tableau 5a) alors que cette atténuation n'est que de 19 % en juillet-août (tableau 5b). Cette différence est due au débit fluvial plus élevé au printemps (446 m³/s) qu'en été (158 m³/s). Un fort débit fluvial a tendance à amortir et à ralentir la marée dans l'estuaire.

Tableau 5a Composante principale semi-diurne M_2 de la marée. Estuaire de la Sainte-Marguerite 21 mai au 23 juin 1997, débit fluvial de 446 m³/s.

Station	Amplitude (m)	Phase (degrés par rapport à Greenwich)	Atténuation (% par rapport à st-602)
602	0.727	188	0
603	0.627	195	14
604	0.499	198	31
605	0.405	200	44

Tableau 5b Composante principale semi-diurne M_2 de la marée. Estuaire de la Sainte-Marguerite 18 juillet au 21 août 1997, débit fluvial de 148 m³/s.

Station	Amplitude (m)	Phase (degrés par rapport à Greenwich)	Atténuation (% par rapport à st- 602)
602	0.851	190	0
603	0.809	195	5
604	0.728	197	14
605	0.688	198	19

4.2.2 Les constituantes de frottement

Le tableau 6 ci-dessous compare la constituante de frottement la plus importante, soit M_4 aux stations marégraphiques pour les deux périodes de référence (mai-juin et juillet-août). Ce tableau montre que l'amplitude et l'importance relative de M_4 augmentent ou s'amplifient de l'aval vers l'amont de l'estuaire. Ce phénomène indique que le frottement joue un rôle important dans l'estuaire de la Sainte-Marguerite. La vitesse de propagation de l'onde de marée dans l'estuaire n'est que de 10 à 12 km/h, ce qui est très faible en comparaison de cette vitesse dans le golfe et l'estuaire maritime du Saint-Laurent, qui est de l'ordre de 120 km/h. On constate également que le débit fluvial influence les constituantes de frottement en les augmentant. Ainsi, au tableau 6, l'importance relative de la constituante M_4 par rapport à la marée semi-diurne est plus faible en juillet-août qu'en mai-juin.

Tableau 6 Comparaison des amplitudes de la constituante M_4 de la marée dans l'estuaire Sainte-Marguerite, au printemps et à l'été 1997.

Station/période	21 mai au 23 juin 1997		18 juillet au 21 août 1997	
	Amplitude (m)	Ratio (% M_2)	Amplitude (m)	Ratio (% M_2)
602	0.066	9	0.047	6
603	0.078	12	0.074	9
604	0.086	17	0.090	12
605	0.078	19	0.094	14

4.3 DÉFORMATION DE L'ONDE DE MARÉE

Les données présentées aux tableaux et aux figures précédentes montrent que la marée, dans l'estuaire de la Sainte-Marguerite est déformée et modifiée par le frottement sur le fond et le débit fluvial. Le frottement sur le fond a tendance à ralentir l'onde de marée et à la déformer à la manière d'une vague approchant d'une plage. Le ralentissement du creux de la vague (ou marée basse) est plus prononcé que celui de la crête (marée haute). La durée du flot diminue alors que celle du jusant augmente. Cette déformation de la marée de l'aval vers l'amont de l'estuaire de la Sainte-Marguerite est illustrée à la figure 18, qui présente les marées observées aux quatre stations de l'estuaire lors d'une marée de vive-eau typique, les 21 et 22 juillet 1997.

Le débit fluvial contribue aussi à déformer l'onde de marée à mesure qu'elle pénètre dans l'estuaire de la Sainte-Marguerite. Le débit fluvial, tel que mentionné aux sections précédentes, relève le niveau moyen, atténue les fréquences diurnes et semi-diurnes et amplifie les fréquences plus élevées (liées au frottement). La déformation de l'onde de marée par le débit fluvial est illustrée à la figure 19, qui compare la marée aux stations 602 (embouchure) et 605 (tête de l'estuaire). La figure 19 présente les résultats des mesures de niveau d'eau à la tête (station 605, en pointillé) et à l'embouchure (station 602, en trait continu) de l'estuaire de la Sainte-Marguerite. Ces mesures sont présentées pour quatre périodes de 5 jours de mai à août 1997. Le débit moyen de la rivière Sainte-Marguerite prévalant pendant chaque période est indiqué dans le coin droit supérieur des graphiques. Cette figure montre que la marée basse est beaucoup plus affectée par les fluctuations du débit que la marée haute. Elle montre aussi que l'influence du débit fluvial augmente de l'aval vers l'amont dans l'estuaire.

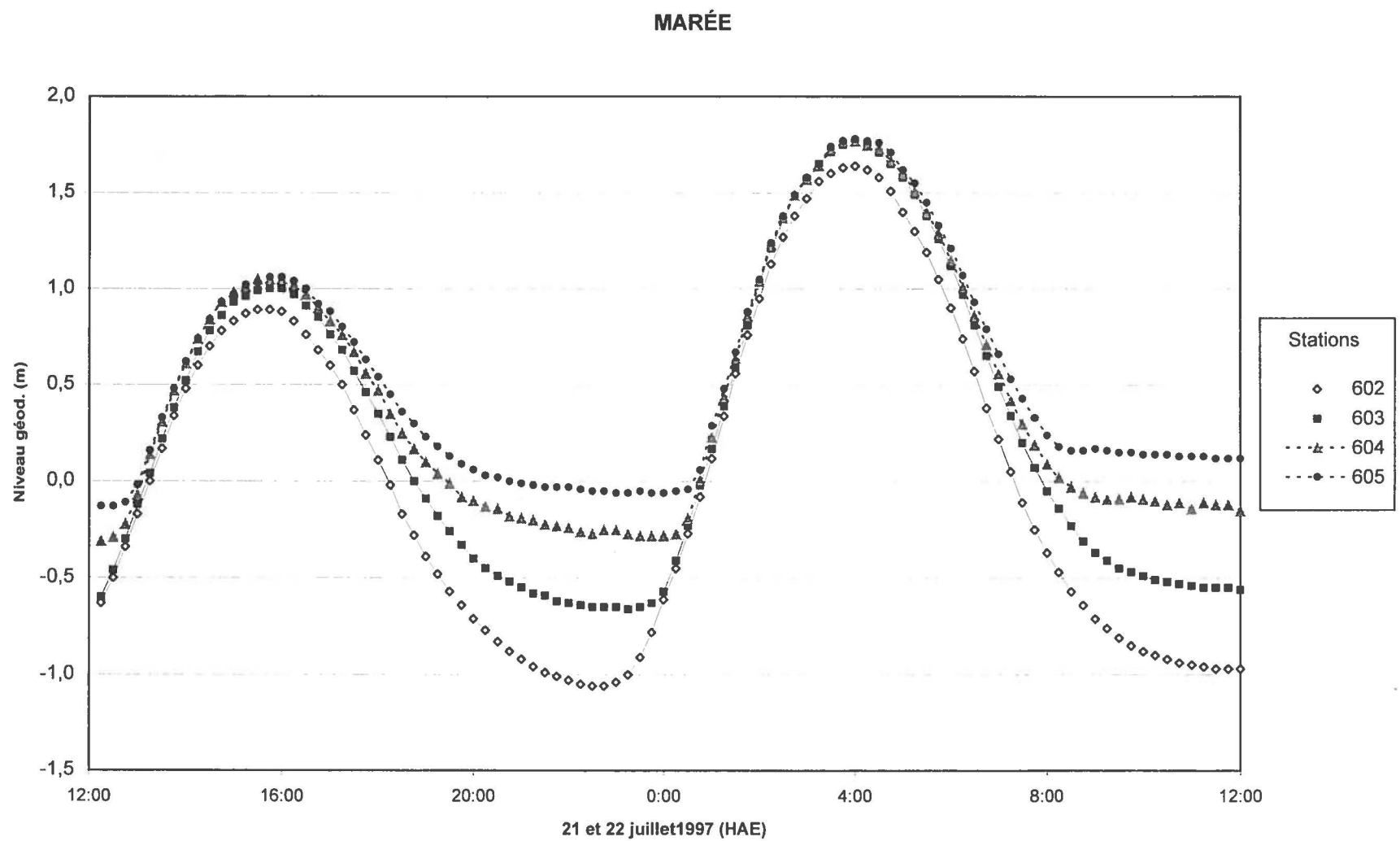


Figure 18 Niveaux d'eau dans l'estuaire de la Sainte-Marguerite, le 21-22 juillet 1997

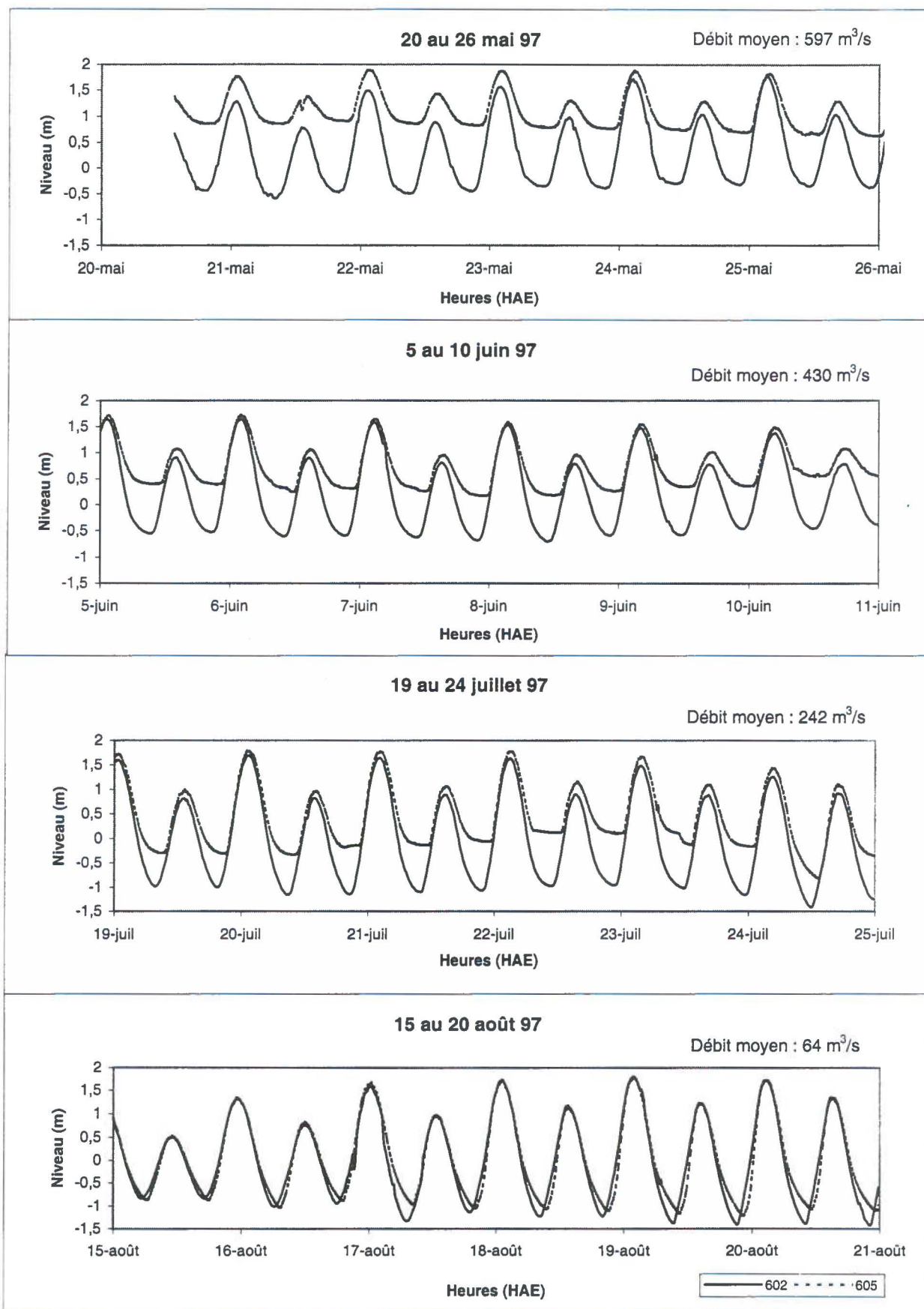


Figure 19 Niveau d'eau mesuré aux stations 602 et 605 de l'estuaire Sainte-Marguerite

À l'embouchure (station 602), le niveau des basses mers chute d'environ 0,8 m lorsque le débit passe de 597 à 64 m³/s. À la tête de l'estuaire, la même réduction du débit fluvial entraîne une chute du niveau de basses mers de près de 2,3 m. Les niveaux de basses mers sont donc beaucoup plus affectés par le débit fluvial à la tête qu'à l'embouchure de l'estuaire. Par contre, le débit fluvial n'a pas beaucoup plus d'effet sur les niveaux de hautes mers tant à la tête de l'estuaire qu'à son embouchure. La plupart du temps, le niveau de la haute mer est pratiquement le même aux deux extrémités de l'estuaire. Cependant, la figure 19 montre qu'une dénivellation de 0,5 m est présente à marée haute lorsque le débit fluvial approche 600 m³/s. De même, on peut noter que plus le débit fluvial est élevé, plus l'inclinaison du plan d'eau augmente lors de faibles hautes mers.

La déformation de l'onde de marée par le frottement ou effet de faible profondeur et par le débit fluvial joue un rôle majeur sur l'hydrodynamique et sur la dynamique sédimentaire de l'estuaire de la Sainte-Marguerite. L'interaction entre les niveaux d'eau et la dynamique des courants et des sédiments sera discutée aux sections 6 et 7.

5 CARACTÉRISTIQUES DES MASSES D'EAU

La salinité et la température de l'eau ont été mesurées lors des trois campagnes d'échantillonnage de 1997-1998 à l'aide de salinomètres profileurs dont les caractéristiques sont décrites dans le rapport de données (partie II du présent rapport). Les données ont été recueillies dans l'estuaire et dans la baie Sainte-Marguerite par profilage vertical. Une série chronologique sur station fixe a également été recueillie à la station S1. La position des stations de profilage des courants, de la salinité et de la température de l'eau (CSTP), de la température et de la salinité de l'eau (CTP) et du mouillage sur station fixe (station S1) est indiqué aux cartes 1, 2, 3 et 4 en Annexe 1. La position détaillée des stations et les informations pertinentes sur les méthodes d'échantillonnage, le traitement des données et le contrôle de qualité sont fournies en deuxième partie du présent rapport.

Les données de salinité et de température de l'eau prises en 1997-1998 ont été recueillies surtout lors de marées de vives-eaux. En juin, les débits fluviaux oscillaient entre 385 et 425 m³/s alors qu'en juillet, le débit de la rivière Sainte-Marguerite se situait aux environs de 200 à 303 m³/s. En février-mars, le débit de la rivière s'est maintenu entre 26 et 30 m³/s pendant l'échantillonnage.

Les mesures de 1997-98 complètent celles des campagnes antérieures de Roche (1989 et 1990). Lors de ces campagnes, les conditions de débit fluvial ont varié de 55 à 148 m³/s et le marnage de la marée correspond à des conditions de morte-eau à moyennes. Le tableau 7 ci-dessous fournit une description des données actuellement disponibles sur la température et la salinité de l'eau dans l'estuaire de la Sainte-Marguerite. On y indique également les conditions de marée et de débit fluvial prévalant lors de l'échantillonnage. La plupart des stations sont situées au centre du chenal d'écoulement et les profils sont répétés à intervalle approximatif d'une demi-heure. Lors des campagnes de juin et juillet 1997, les profils CSTP ont été réalisés le long de sections transversales perpendiculaires à l'axe de l'estuaire (lignes a, b et c, cartes 1 à 5). Plusieurs stations ont été visitées alternativement afin de couvrir toute la largeur de la section si possible. Les données présentées ci-dessous sont prises au centre du chenal d'écoulement.

Tableau 7 Informations générales sur les profils de salinité et de température de l'eau de l'estuaire de la Sainte-Marguerite.

Position approximative	Date	Nombre de profils	Débit fluvial (m ³ /s)	Marnage de la marée (m)	Type de profils
18 stations *	27 sept 88	32	55	2,9	CTP
pk 0 et 1,8	14 juin 89	99	148	1,11	CTP et CSTP
pk 0 et 1,8	20 juin 89	101	75	1,65	CTP et CSTP
pk 0 et 1,8	12 août 89	99	128	0,65	CTP et CSTP
pk 0 et 1,8	19 août 89	98	107	2,37	CTP et CSTP
pk 0,0	6-7 juin 97	67	415	2,15	CSTP
pk 1,7	8 juin 97	55	385	2,75 et 1,50	CSTP
pk 0,0	20 juil 97	68	201	2,9 et 2,0	CSTP
pk 1,7	21-22 juil 97	44	278	2,6	CSTP
pk 2,5	24 juillet 97	55	217	2,75 et 2,4	CSTP
40 Stations *	28 fév 98	40	24	2,8	CTP
* Stations CTP réparties le long de l'estuaire					

Au total, 758 profils de salinité et de température de l'eau ont été réalisés dans l'estuaire de la Sainte-Marguerite. Les deux tiers de ces mesures sont des profils CSTP qui comportent des mesures de vitesse et de direction des courants en plus des mesures de salinité et de température de l'eau. Les mesures couvrent une large gamme de conditions de débit fluvial allant de 22 à 425 m³/s, soit pratiquement toute la gamme des débits pour laquelle de l'eau salée est présente dans l'estuaire. Il est probable qu'au-delà d'un débit fluvial de 500 m³/s, l'estuaire de la Sainte-Marguerite ne contient que de l'eau douce de température homogène verticalement. Les données de salinité couvrent aussi une vaste gamme de conditions de marée, avec des marnages à l'embouchure variant de 0,65 à 2,9 m. Dans l'estuaire de la Sainte-Marguerite, le marnage de la marée peut varier de 0,5 m à un peu plus de 3,0 m. Comme le débit fluvial et la marée sont les deux principaux facteurs qui affectent la salinité de l'estuaire, on peut considérer que les données de 1997-1998 et les données antérieures couvrent raisonnablement la gamme des conditions possible dans l'estuaire.

5.1 PROFIL DE SALINITÉ

Les figures 20 et 21 comparent la salinité en surface et près du fond du chenal d'écoulement aux stations A1, B2 et C1 en juin et juillet 1997. Ces stations sont situées au centre du chenal d'écoulement. Des mesures CSTP ont été prises à ces stations pendant

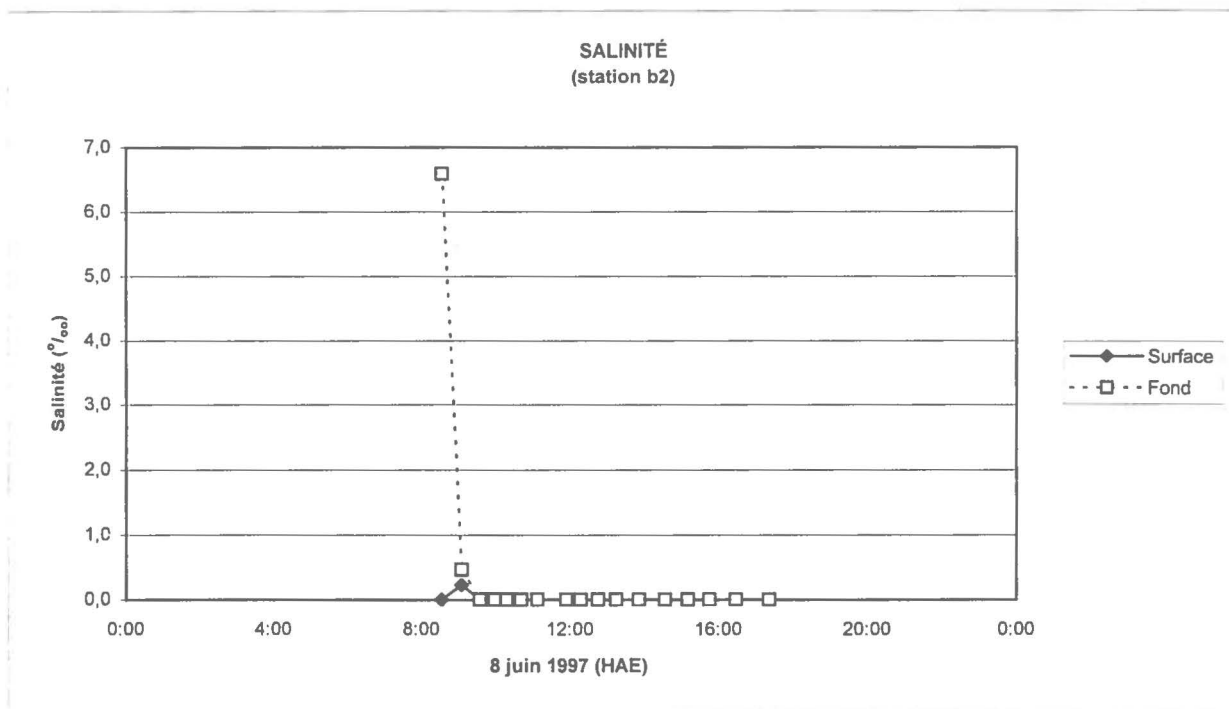
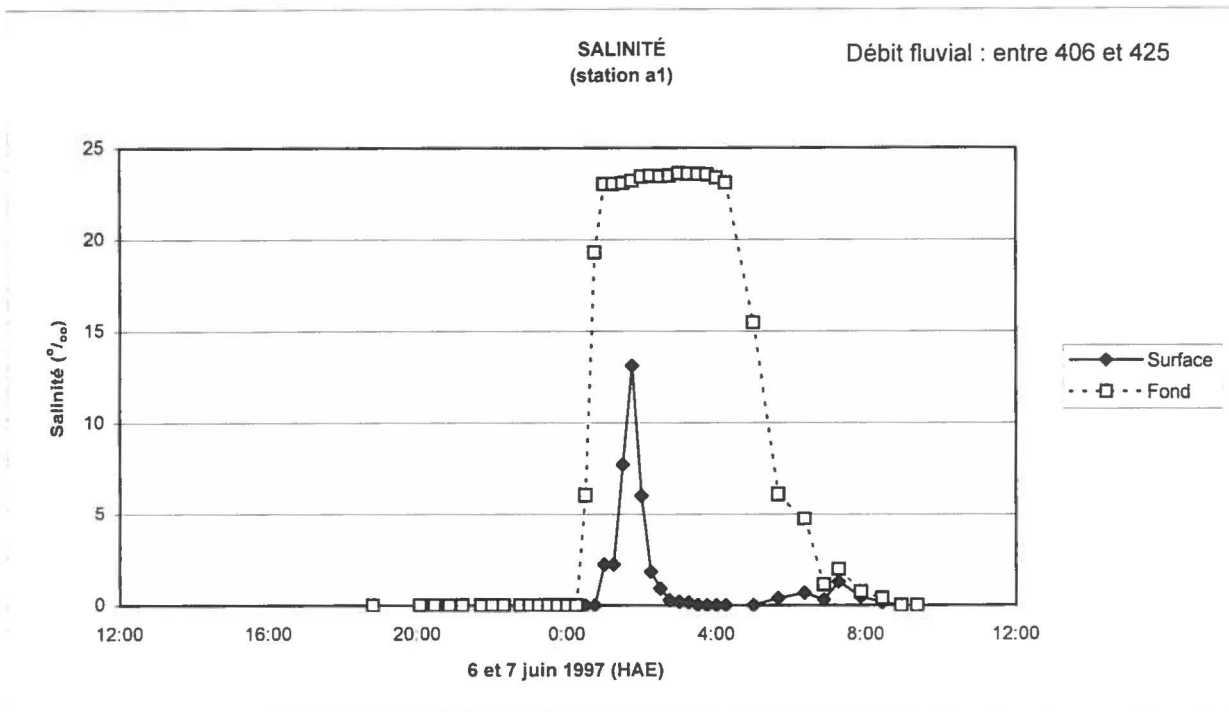


Figure 20 Salinité en surface et au fond, du 6 au 8 juin 1997, station a1 et b2

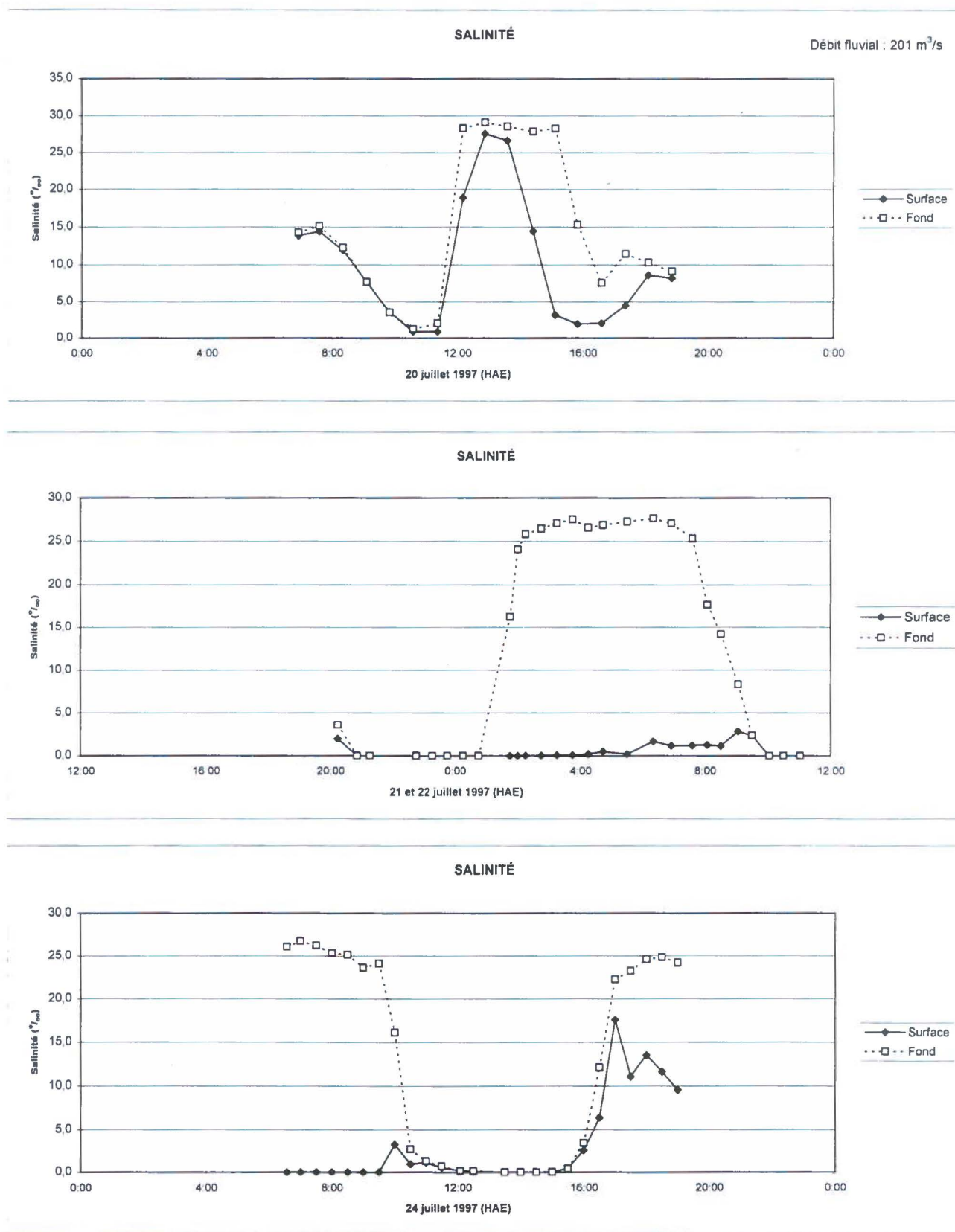


Figure 21 Salinité en surface et au fond, du 20 au 24 juillet 1997, stations a1, b2 et c2

des périodes de 10 à 15 heures selon le cas. Une brève description des résultats de ces mesures est présentée ci-dessous.

5.1.1 Période du 6 au 8 juin 1997

La figure 20 montre qu'en juin, l'eau salée pénètre dans l'estuaire en dépit des forts débits fluviaux de 425 m³/s. Des salinités de 23 à 24 ‰ sont mesurées au fond du chenal pendant une période de près de 6 heures centrée sur la marée haute. En surface, la salinité atteint 13 ‰ pendant une courte période d'environ deux heures peu avant la marée haute. L'arrivée de l'eau salée se produit très brusquement et se termine tout aussi abruptement. Le reste du temps, l'embouchure de l'estuaire de la Sainte-Marguerite est en eau douce de la surface jusqu'au fond. Pendant une période d'environ 5 heures, la colonne d'eau est fortement stratifiée.

À la station B2 (figure 20), située au pk 1,7, la durée des observations n'est pas suffisante pour couvrir complètement un cycle de marée ; de l'eau saumâtre à 7 ‰ est présente près du fond vers 9h00 (environ 4 heures après la marée haute). Seuls deux profils ont permis de détecter de l'eau saumâtre à cette station, mais deux autres profils confirment la présence de salinités mesurables aux stations voisines (B1 et B3) au même moment. Ces mesures démontrent que, malgré un débit fluvial de 385 m³/s, l'intrusion saline a pénétré jusqu'à la ligne B, située au pk 1,7. Jusqu'à ces mesures, on pensait que l'intrusion saline ne pouvait pénétrer dans l'estuaire qu'à des débits inférieurs à 300 m³/s (Hydro-Québec ; 1991).

5.1.2 Période du 20 au 24 juillet 1997

En juillet, on trouve encore de l'eau douce dans toute la colonne d'eau pendant une courte période à l'embouchure (figure 21) mais la présence d'eau saumâtre à salée domine largement, malgré des débits fluviaux de 200 m³/s. La salinité au fond atteint 29 ‰. La stratification est moins développée à l'embouchure qu'en juin et la colonne d'eau est assez homogène la plupart du temps. Par contre, on peut observer une stratification très développée à la station B2 (figure 21). La salinité de surface demeure nulle pendant presque tout le cycle de marée alors que de l'eau saumâtre à salée est présente sur le fond pendant environ 7,5 heures, soit plus de la moitié du cycle de marée. Cela se produit alors

que le débit fluvial atteint 300 m³/s. On observe également de l'eau très saumâtre (25 ‰) et une forte stratification à la station C1 le 24 juillet (débits fluviaux de 217 m³/s).

5.1.3 Période du 28 février au 1^{er} mars 1998

Des mesures de la salinité et de la température de l'eau ont été réalisées du 28 février au 1^{er} mars 1998 juste après la débâcle dans l'estuaire de la Sainte-Marguerite. Ces données ont été recueillies lors de débits de la rivière Sainte-Marguerite de l'ordre de 22 à 26 m³/s. Ces mesures de la salinité sont les premières réalisées en conditions naturelles lors de très faibles débits fluviaux d'eau libre. Les figures 22 et 23 montrent la distribution longitudinale et verticale de la salinité mesurée à marée haute et basse de vive-eau lors de cette campagne d'hiver. Comme le montrent ces figures, l'eau salée est présente partout dans l'estuaire jusqu'au pied des rapides qui marque la tête de l'estuaire au pk 6,7 ; l'intrusion saline pénètre jusqu'à la tête de l'estuaire aussi bien à marée haute qu'à marée basse. Des mesures prises dans la fosse située à l'amont du rapide du pk 6,7 ne révèlent cependant aucune trace d'eau salée.

Ces données permettent d'ajuster la perception que l'on avait auparavant de la limite de l'intrusion saline. Hydro-Québec (1991) et Roche (1990) ont estimé que l'intrusion saline ne pouvait guère remonter à l'amont du pk 5,7 (ligne de 735 kV) à des débits fluviaux de l'ordre de 30 m³/s. Cette estimation impliquait la présence d'eau douce presque en permanence dans la petite fosse située à l'aval du rapide de tête. Or, les mesures de 1998 montrent que l'eau salée envahit cette fosse en conditions naturelles lorsque le débit fluvial est faible. En fait, la figure 22 montre que l'eau est même plus salée dans cette fosse qu'à l'aval, à marée basse. Paradoxalement, la salinité au-dessus du fond, au centre de l'estuaire (pk -3,5) augmente vers l'amont et vers l'aval. Cette bizarrerie est due au fait que l'eau salée, plus dense que l'eau douce, descend par gravité dans la fosse du pk -5,0 et s'y maintient parce que les courants fluviaux ne sont pas assez forts pour l'évacuer.

Cette situation est probablement assez fréquente puisque les conditions de marée et de débit fluvial favorisant une telle remontée de l'intrusion saline se produisent assez souvent. On retrouve de telles conditions dans les semaines et les mois qui suivent la débâcle des glaces dans l'estuaire mais qui précèdent la crue printanière. Durant cette période, le débit

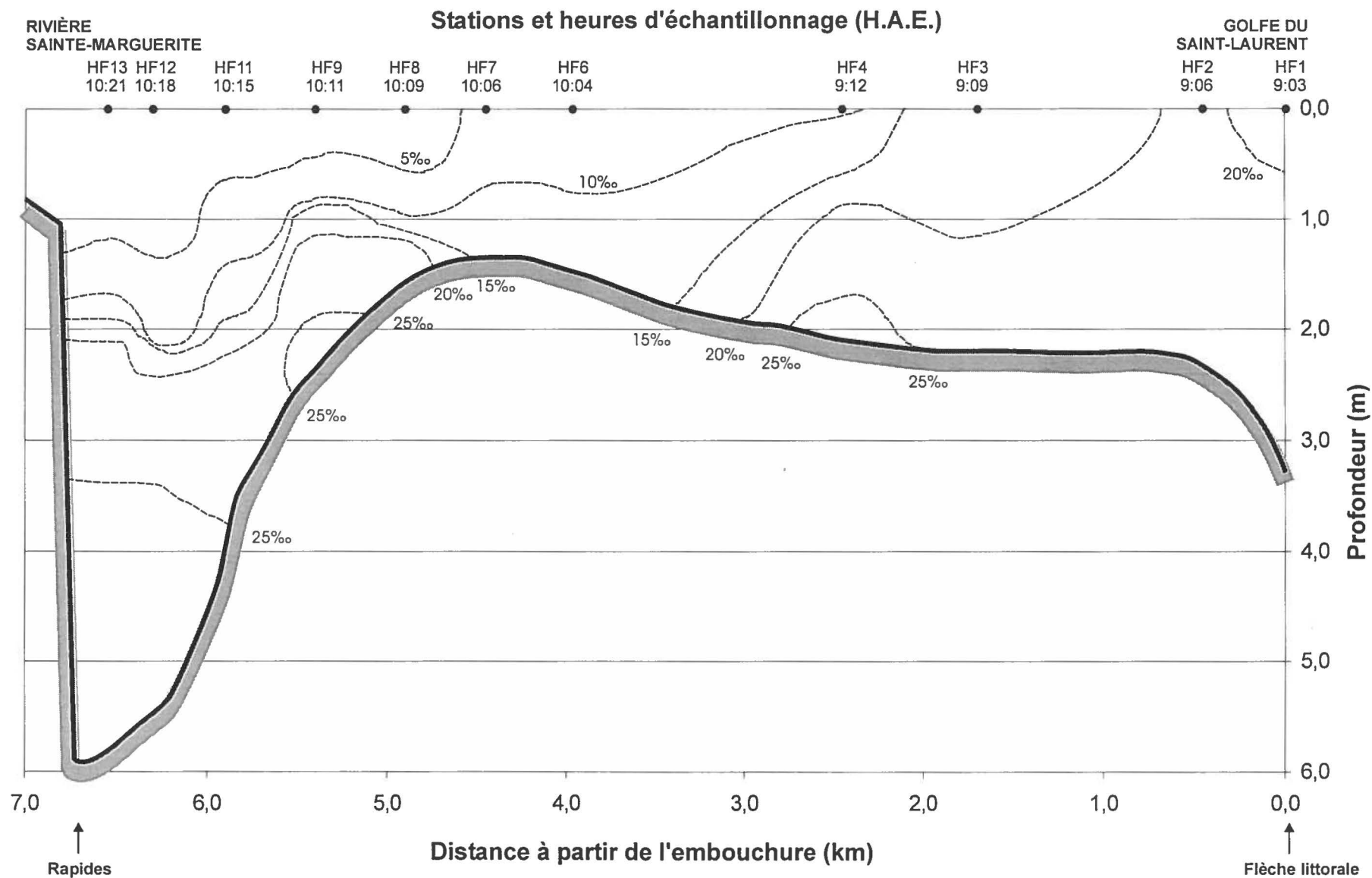


Figure 22 – Distribution longitudinale de la salinité, le 28 février 1998 à marée basse

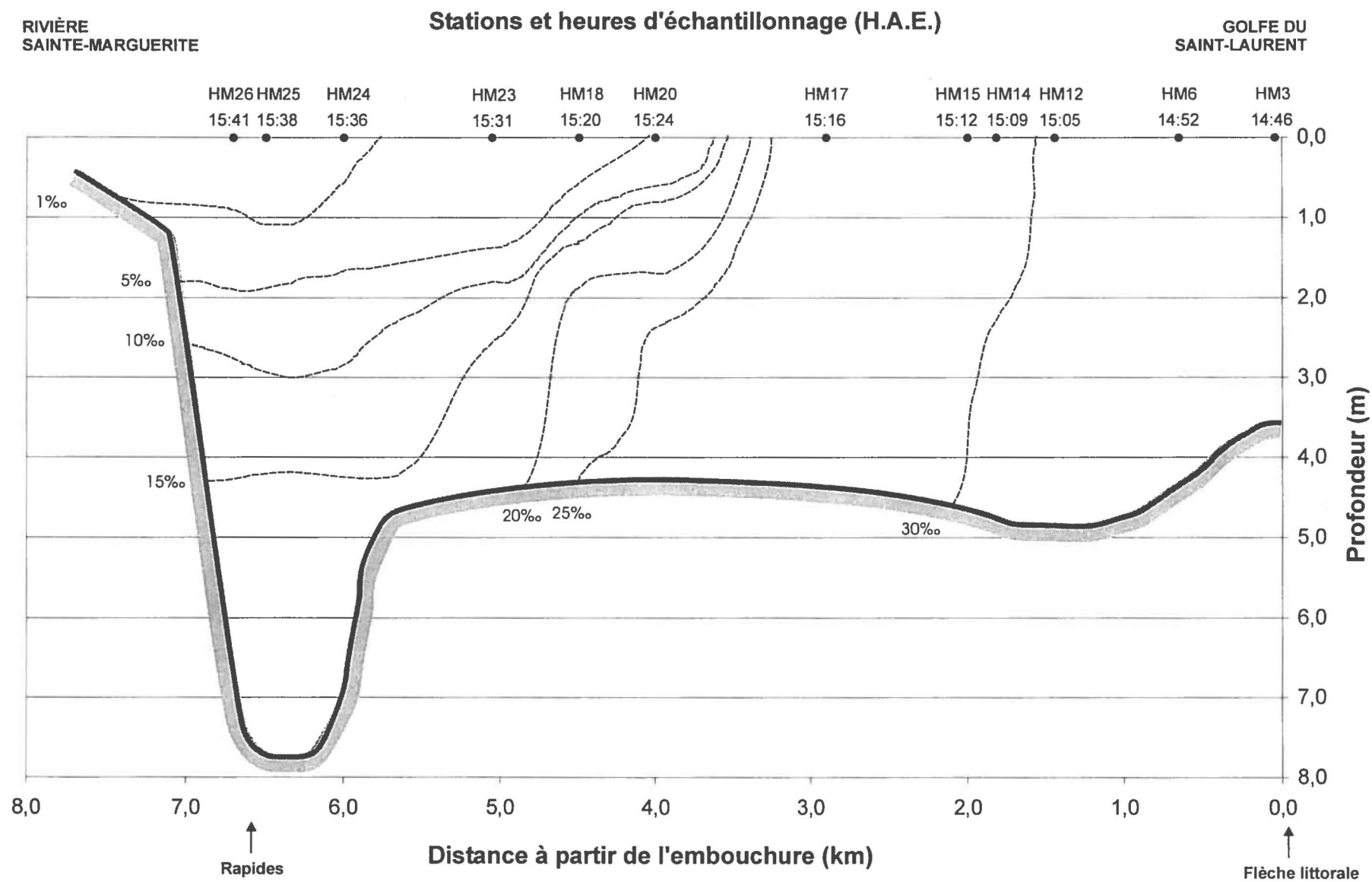


Figure 23 – Distribution longitudinale de la salinité, le 1 mars 1998 à marée haute

fluvial est fréquemment inférieur à 30 m³/s et le mélange causé par la marée et les vagues sur le delta externe et dans l'estuaire de la Sainte-Marguerite est intense.

5.2 ORGANISATION DES MASSES D'EAU

La distribution de la température et de la salinité, dans l'estuaire de la Sainte-Marguerite permet de distinguer deux masses d'eau principales, soit l'eau douce provenant de la rivière Sainte-Marguerite et l'eau saumâtre de surface du golfe du Saint-Laurent. La température de l'eau douce de la rivière Sainte-Marguerite varie d'un minimum d'environ 0 °C en hiver à un maximum de l'ordre de 20 °C mesuré le 12 août 1989 par Roche (1990).

La salinité de l'eau de surface du golfe du Saint-Laurent varie sur une base saisonnière de 25 à 32 ‰. Au début de l'été, lors de la crue du fleuve Saint-Laurent et de ses principaux tributaires, la salinité de surface diminue à environ 25 ‰. Cette salinité de surface augmente en août et septembre pour atteindre un maximum d'environ 32 ‰. L'eau du golfe du Saint-Laurent est stratifiée verticalement et la salinité augmente de la surface vers le fond. Le vent et la pression atmosphérique peuvent provoquer des mouvements verticaux des masses d'eau et modifier la salinité de surface le long de la côte de plusieurs ‰. L'eau que l'on retrouve au fond du chenal de l'estuaire de la Sainte-Marguerite provient de la couche de surface du golfe du Saint-Laurent. Les propriétés thermohalines de l'eau du chenal, près de l'embouchure, sont souvent identiques à celles de l'eau de surface du golfe du Saint-Laurent. La température de l'eau de surface du golfe du Saint-Laurent près de Sainte-Marguerite varie de -1,2 °C en mars à environ 14 °C vers la fin du mois d'août. Cette température dépend des conditions météorologiques prévalant dans le golfe du Saint-Laurent.

Il est plus facile de distinguer les deux masses d'eau sur la base de leur salinité que par leur température. Le contraste thermique entre l'eau de surface du golfe du Saint-Laurent et l'eau de la rivière Sainte-Marguerite varie beaucoup sur une base saisonnière, tandis que le contraste de salinité demeure toujours très fort. De plus, la densité de l'eau varie surtout en fonction de la salinité. C'est la raison pour laquelle nous utilisons la salinité pour représenter la distribution des masses d'eau. L'eau qu'on retrouve dans l'estuaire de la Sainte-Marguerite est le résultat d'un mélange entre les masses d'eau décrites ci-dessus. Selon

l'état du mélange et la distribution de la salinité, on dira que l'estuaire est stratifié, partiellement mélangé ou bien mélangé (Dyer ; 1973).

Le mélange des masses d'eau et leur répartition dans un estuaire est l'un des principaux critères de classification des estuaires (Hansen et Rattray, 1966). En général, un estuaire fortement stratifié se caractérise par un gradient vertical très élevé de la salinité. Les estuaires stratifiés sont le plus souvent des estuaires assez profonds dans lesquels les courants de marée sont faibles en comparaison des courants fluviaux. Les estuaires bien mélangés, au contraire, sont des estuaires peu profonds par rapport à leur dimension horizontale, dans lesquels les débits de marée sont beaucoup plus importants que les débits fluviaux (Ippen, 1966). Entre ces deux extrêmes, on retrouve des estuaires partiellement mélangés ; ceux-ci présentent des conditions intermédiaires de mélange vertical de l'eau douce et de l'eau salée.

Les estuaires des grandes rivières de la côte nord du Saint-Laurent, comme l'estuaire de la Sainte-Marguerite et les estuaires des rivières Manicouagan (Roche, 1987), aux Outardes (Cataliotti-Valdima et Long, 1984 ; CSSA Consultants Ltée, 1993) et Moisie (LGL Associés, 1994) sont caractérisés par l'extrême variabilité du mélange de l'eau douce et de l'eau salée. D'une certaine manière, ils sont inclassables sur la base du mélange de l'eau douce et de l'eau salée parce que les conditions de mélange varient constamment d'un extrême à l'autre en tout point de l'estuaire. Par exemple, la salinité, au fond du chenal de l'estuaire de la Sainte-Marguerite peut varier de 0 à 25 ‰ sur toute la longueur de l'estuaire selon les conditions de débit fluvial. En étiage sévère (débit fluvial inférieur à 30 m³/s), on trouve de l'eau à 25 ‰ au pied du rapide du pk 6,7. Lorsque le débit fluvial excède 425 m³/s, l'estuaire est entièrement rempli d'eau douce pendant presque tout le cycle de marée (figure 20). La figure 21 montre qu'au cours d'un même cycle de marée, la colonne d'eau de la station a1 (embouchure) peut contenir de l'eau douce de la surface jusqu'au fond (vers 11h00), de l'eau très saumâtre bien mélangée à toutes les profondeurs (vers 13h00) et deux couches d'eau séparées par une forte stratification (vers 15h30). Autrement dit, on trouve au même endroit un estuaire fluvial, un estuaire fortement stratifié et un estuaire bien mélangé à quelques heures d'intervalle. Ce genre de situation peut se produire partout dans l'estuaire inférieur et même à l'occasion, dans l'estuaire supérieur. On observe une situation semblable à la station c1 (pk 2,5) le 24 juillet (figure 21).

La variabilité spatio-temporelle élevée de la stratification haline est due à la forte variabilité des conditions hydrodynamiques. Dans l'estuaire de la Sainte-Marguerite, le débit fluvial peut varier par deux ordres de magnitude en quelques semaines. Par exemple, du 1 au 18 mai 1997, le débit de la rivière Sainte-Marguerite est passé de 67 à 871 m³/s soit une augmentation par un facteur de 13. Pendant cette même période, le débit de marée a fluctué de 200 à 600 m³/s à l'embouchure. L'estuaire est passé d'un régime où le débit fluvial à l'embouchure est 5 fois plus important que le débit de marée à un régime inversé où le débit de marée est presque 10 fois plus important que le débit fluvial, le tout en moins de trois semaines.

La variabilité élevée de la stratification thermo-haline est marquée par la présence de fronts très marqués séparant l'eau douce de l'eau salée, et par la présence à faible distance de ces fronts d'une stratification tout aussi marquée.

5.3 INTRUSION SALINE

La limite de l'intrusion saline est influencée par plusieurs facteurs dont le principal est le débit fluvial. La marée et le mélange vertical dû aux courants de marée sont aussi des facteurs importants auxquels s'ajoutent des facteurs comme le mélange en surface du golfe du Saint-Laurent causé par les vents, les vagues et les marées, le débit d'eau douce du fleuve Saint-Laurent et de ses autres tributaires, etc.

La figure 24 collige l'ensemble des observations de la limite de l'intrusion saline réalisées dans l'estuaire de la Sainte-Marguerite par Roche (1989 ; 1990) et lors des campagnes de 1997-1998. Cette figure présente la position de la limite supérieure de l'intrusion saline en fonction du débit fluvial de la rivière Sainte-Marguerite lors de marées de vives-eaux. Selon les paramètres de la droite de régression, l'estuaire serait entièrement en eau douce lorsque le débit fluvial excède 530 m³/s. Il faut cependant conserver une certaine prudence quant à l'interprétation de cette régression ; les mouvements de l'intrusion saline sont le résultat d'un ensemble de paramètres complexes qui ne peuvent être expliqués par une simple relation débit versus distance de pénétration dans l'estuaire (Largier et Taljaard, 1991 ; Schroeder et al., 1990).

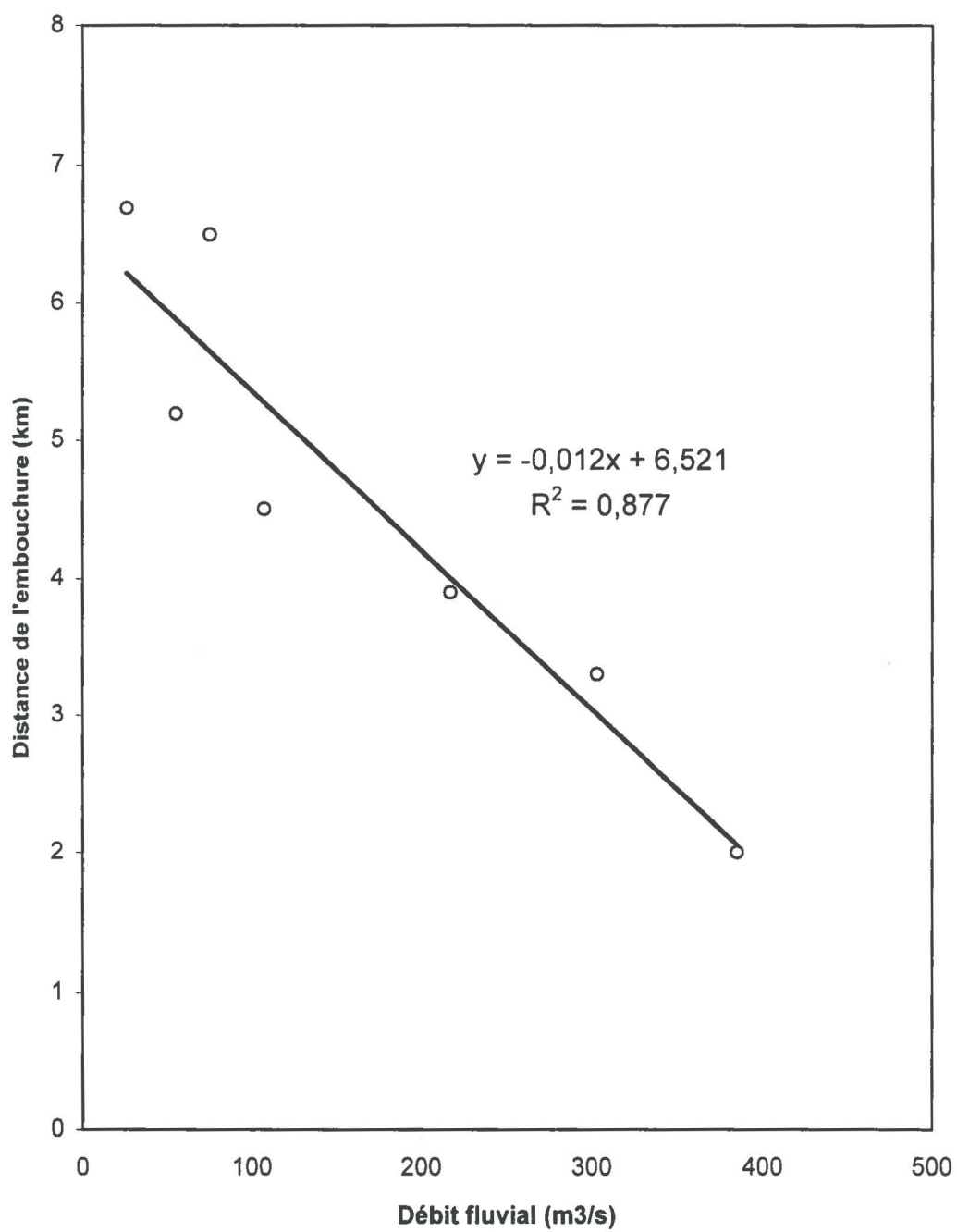


Figure 24 Limite supérieure de l'intrusion saline

Les observations réalisées en 1997-98 montrent que l'intrusion saline atteint sa position la plus en amont de l'estuaire environ 3 heures après la marée haute. L'intrusion saline commence son déplacement vers l'amont pendant le flot (marée montante) sous forme d'un front salin (Garvine et al., 1992). Le front salin se déplace rapidement pendant le plein flot puis ralentit à l'étape de marée haute. À marée haute, le front bascule lorsque l'eau douce de surface commence à descendre vers l'embouchure alors que l'eau salée continue de remonter vers la tête de l'estuaire près du fond du chenal. L'écoulement se divise alors en deux couches : une couche de surface se dirigeant vers l'aval et une couche de fond se dirigeant vers l'amont. L'intrusion saline prend alors de plus en plus la forme d'un coin salin qui s'insinue vers l'amont en longeant le fond du chenal et en se glissant sous la couche d'eau douce de surface. Ce mouvement du coin salin se poursuit pendant la moitié du jusant pour finalement s'arrêter et s'inverser. Dans certaines conditions, le mouvement effectué par le coin salin pendant le jusant est significatif. Il est donc préférable de mesurer la limite supérieure de l'intrusion saline à mi-jusant plutôt qu'à marée haute.

5.4 LE PANACHE DE LA RIVIÈRE SAINTE-MARGUERITE

La figure 25 présente la distribution des salinités de surface mesurées le 9 juin 1997 dans le panache d'eau saumâtre de la rivière Sainte-Marguerite. Le panache a moins de 1 m d'épaisseur en général, comme le montre la figure 26. Cette figure présente quelques profils de salinité et de température réalisés le 9 juin 1997 (la position des stations est indiquée sur la carte 2, en annexe). Les mesures réalisées le 9 juin ne permettent pas de définir les limites du panache de la rivière, mais elles fournissent des indications sur certaines propriétés de ce panache.

La figure 25 montre que le panache s'étire au moins jusqu'à 4 km au large de l'embouchure de la rivière Sainte-Marguerite dans la baie du même nom. Les profils montrés à la figure 26 sont très représentatifs de la structure du panache et de son épaisseur. Les mesures ont été réalisées le 9 juin 1997, entre 10h00 et 16h00. Un vent du sud-est assez soutenu de 20 à 30 km/h soufflait ce jour là. Par contre, les deux journées qui ont précédé l'échantillonnage étaient très calmes. La température de l'eau douce sortant de la rivière Sainte-Marguerite à l'embouchure était d'environ 9 °C de la surface jusqu'à une profondeur

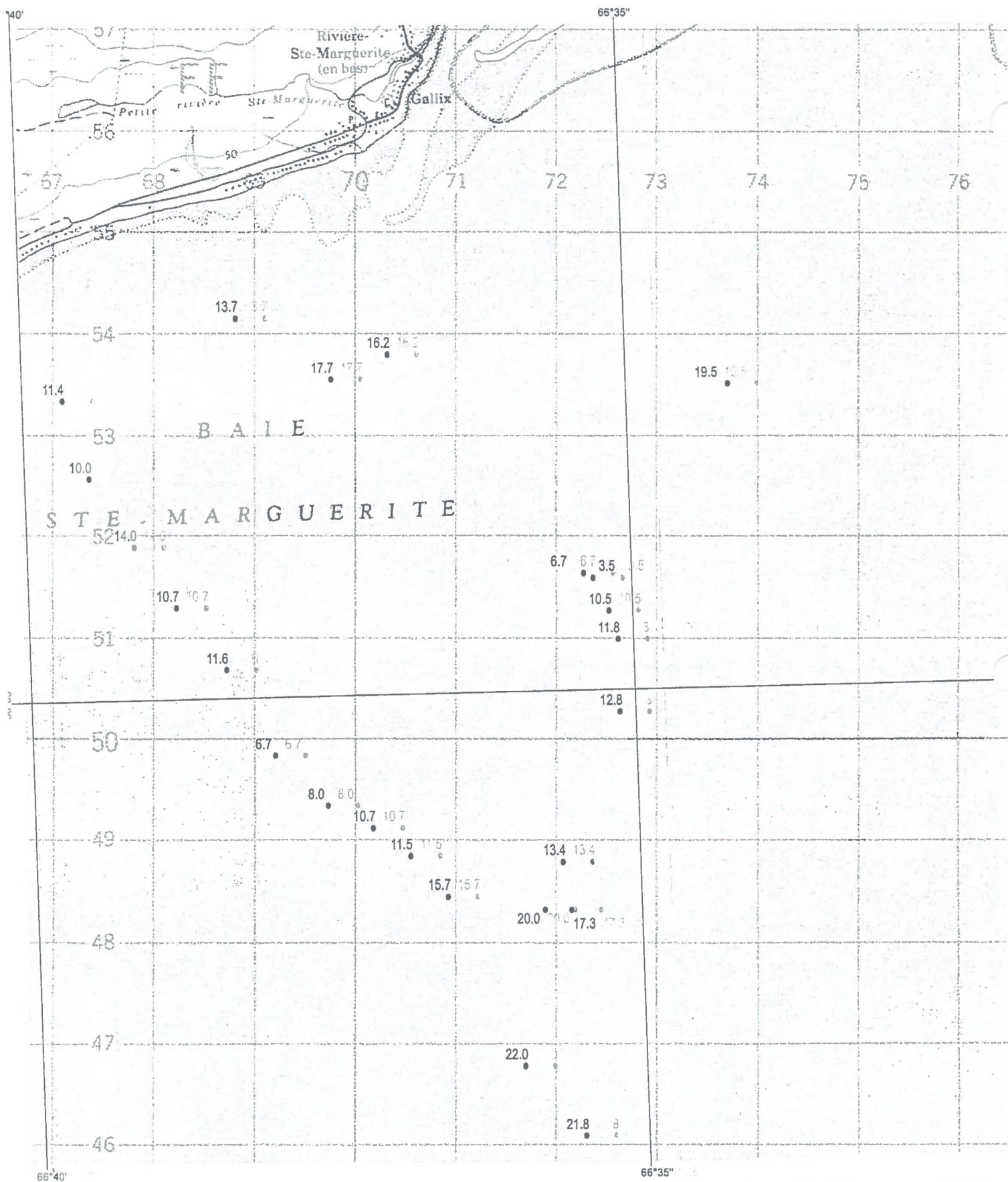
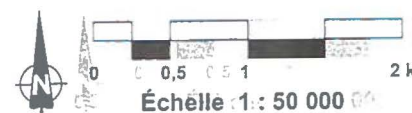
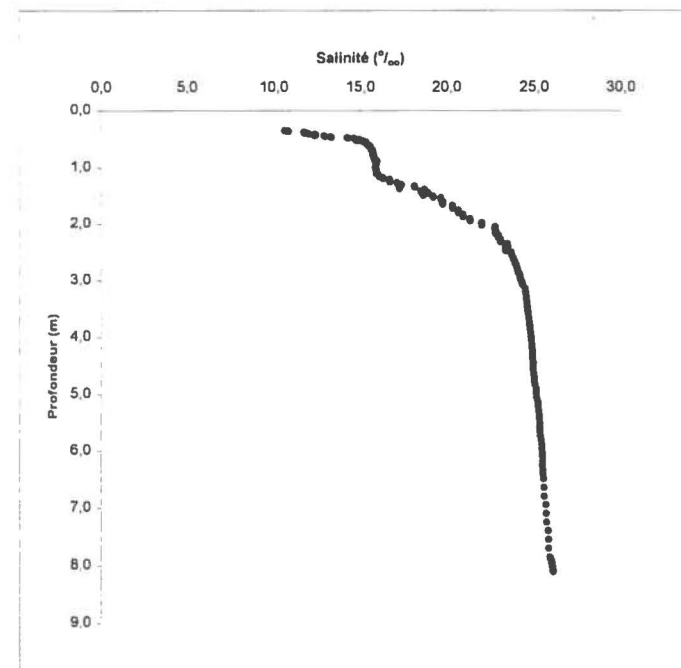
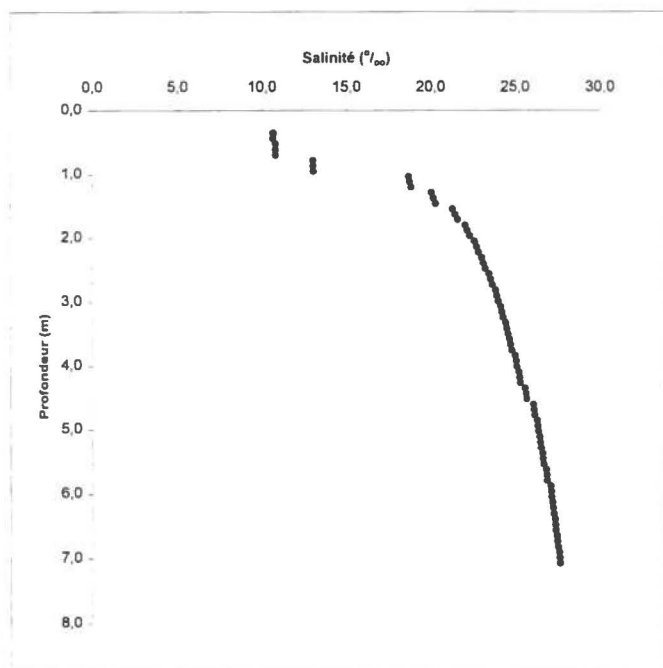
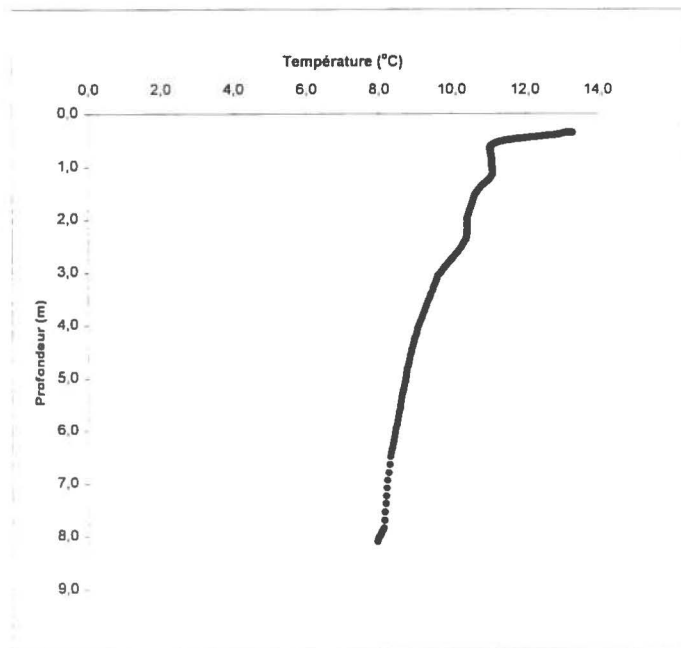
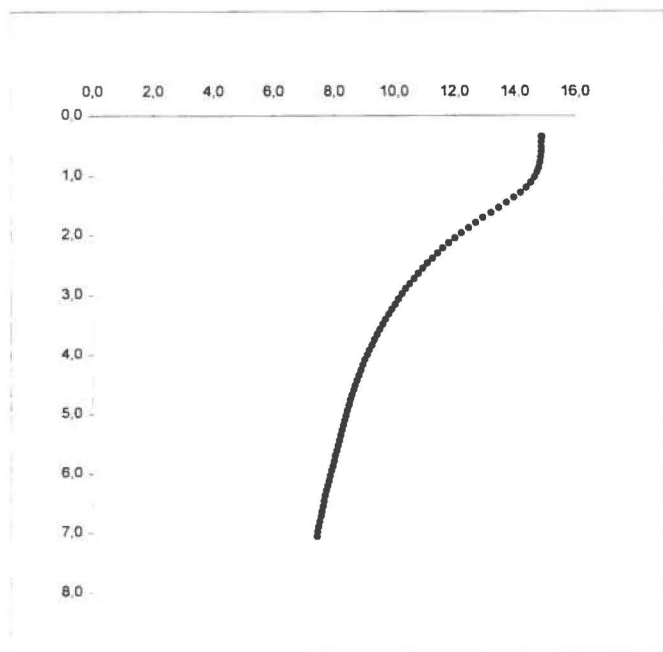


Figure 25 Distribution de la salinité de surface
dans la baie Sainte-Marguerite, le 9 juin 1997





Station PA13
Heure (HAE) : 14:26

Station PA17
Heure (HAE) : 15:00

Figure 26 Profils de salinité et de température de l'eau dans la région centrale du panache de la rivière Sainte-Marguerite, stations PA13 et PA17, le 9 juin 1997

de 4 m. Le débit de la rivière était de 430 m³/s le 9 juin et se situait entre 385 à 406 m³/s les jours précédant l'échantillonnage.

À la limite extérieure du panache la température de l'eau de surface du golfe du Saint-Laurent est inférieure à 10,3 °C. La salinité de surface à cet endroit est de l'ordre de 22 ‰, ce qui s'approche de la salinité de la couche sous-jacente du panache de 27 à 28 ‰ (voir figure 23). La température de cette couche d'eau sous le panache est d'environ 7 °C. Il est intéressant de noter que les températures les plus élevées mesurées dans le panache atteignent 15,0 °C (figure 26). Si l'on considère que l'eau du panache est un mélange d'eau douce de la rivière Sainte-Marguerite (à 9,0 °C) et d'eau salée de surface du golfe du Saint-Laurent (dont la température se situe entre 7 et 10,3 °C), cette température de 14 à 15,0 °C est assez surprenante. Il ne peut s'agir d'une erreur instrumentale puisque de telles températures ont été observées par deux appareils différents et indépendants, et ce, à plusieurs reprises. On doit en conclure que le panache s'est réchauffé plus vite que l'eau de la rivière et que l'eau de surface du golfe du Saint-Laurent.

Le fait que le panache se soit révélé un excellent accumulateur thermique en juin 1997 fournit une piste pour obtenir des informations sur le panache en conditions naturelles. L'accumulation thermique dans un panache est probablement causée par le fait que la lumière solaire est réfléchi sur la pycnocline et emprisonnée dans le panache. La quantité de chaleur requise pour élever autant la température du panache indique que celui-ci s'est probablement maintenu plus de 24 heures.

6 HYDRODYNAMIQUE ET CIRCULATIONS

L'estuaire de la Sainte-Marguerite a fait l'objet d'une caractérisation hydrodynamique dans Roche (1990) et dans Hydro-Québec (1991). Des mesures de vitesse et de direction des courants ont été recueillies en juin et juillet 1997 afin de mettre à jour et de compléter les connaissances disponibles sur la circulation des masses d'eau dans l'estuaire et dans la zone marine attenante. Les résultats des mesures de vitesse et de direction des courants réalisées en 1997 sont présentés dans le rapport de données, en partie II du présent document. On y décrit en détail les méthodes et l'équipement utilisés, le traitement et le contrôle de qualité. Les résultats sont présentés graphiquement et une copie en format informatique a été remise à Hydro-Québec.

Les courants ont été mesurés par profilage vertical (profilage CSTP) et sur station fixe. La position des stations de profilage CSTP (courants, salinité, température en fonction de la profondeur d'eau) des sections a, b et c indiquées aux cartes 1 et 3 de l'annexe 1. La carte 1 indique aussi la position de la station S1 où un mouillage fixe de courantométrie a été installé du 4 juin au 23 juillet 1997.

6.1 DONNÉES ANTÉRIEURES

Les données recueillies par Roche (1990) pendant l'été 1989 ont servi à décrire les caractéristiques hydrodynamiques générales de l'estuaire de la Sainte-Marguerite. Les auteurs de cette étude environnementale ont décrit les courants de marée et les courants fluviaux prévalant dans la zone de l'embouchure et jusqu'au pk 1,7 de l'estuaire. Des observations directes de ces courants ont été effectuées pour des débits de la rivière Sainte-Marguerite variant de 75 à 158 m³/s et pour des marnages de la marée de 0,65 à 2,37 m.

Ces observations ont montré que les courants à l'embouchure de l'estuaire sont surtout attribuables à la marée dans les conditions observées. Les courants mesurés ne dépassaient pas 1,2 m/s et les plus forts courants ont été observés alors que le débit fluvial était assez faible. Dans l'ensemble, la direction des courants était alignée avec l'axe du chenal d'écoulement.

6.2 RÉSULTATS DES MESURES DE 1997

6.2.1 Mesures sur station fixe

La figure 27 présente une courte série chronologique de mesures de courants prise à la station S1 située près de l'embouchure (position carte 1, annexe 1) en juin 1997. L'instrument de mesure, un courantomètre électromagnétique, est situé approximativement à mi-profondeur au centre du chenal d'écoulement. La vitesse du courant est représentée par la composante U du vecteur courant, orientée dans l'axe du chenal d'écoulement. Par convention, U est positif lorsque le courant est dirigé vers l'aval. Afin de faciliter l'interprétation des données de courant, la figure 27 présente aussi la salinité et la profondeur d'eau au-dessus de l'instrument. Le débit fluvial, les 5 et 6 juin, se situe entre 425 et 466 m³/s.

La figure 27 montre que les courants de jusant (U positif) sont nettement plus élevés que les courants de flot, ce qui reflète une nette dominance du courant fluvial par rapport au courant induit par la marée. Les inversions de courant à l'étal des marées hautes et basses sont inégales ; le courant s'inverse dans les 30 minutes suivant la marée haute, mais il faut entre 60 et 90 minutes pour que les courants s'inversent après la marée basse.

La figure 27 permet aussi de visualiser l'effet de la stratification haline. Pour faciliter cette visualisation, nous avons tracé une ligne qui coupe la courbe des profondeurs au niveau +3,0 m et une autre qui coupe la courbe du courant au niveau $U = +0,5$ m/s. Les points d'intersection de ces lignes horizontales et des courbes correspondent assez bien avec les brusques fluctuations de la salinité. Il semble que l'on soit en présence d'un écoulement stratifié comportant une couche d'eau douce en surface d'environ 3 m d'épaisseur surmontant une couche d'eau salée (d'environ 24 ‰). Comme l'appareil est maintenu à une hauteur fixe par rapport au fond, il passe d'une couche à l'autre au cours d'un cycle de marée. Lorsque la profondeur d'eau au-dessus de l'instrument devient inférieure à 3 m, l'appareil est situé dans la couche de surface (eau douce) et il mesure des salinités nulles et des courants dirigés vers l'aval (U positif) supérieurs à 0,5 m/s. Lorsque la profondeur d'eau augmente pendant la marée montante et devient supérieure à 3 m, le courantomètre se retrouve dans la couche saumâtre sous-jacente et il mesure des salinités fortes

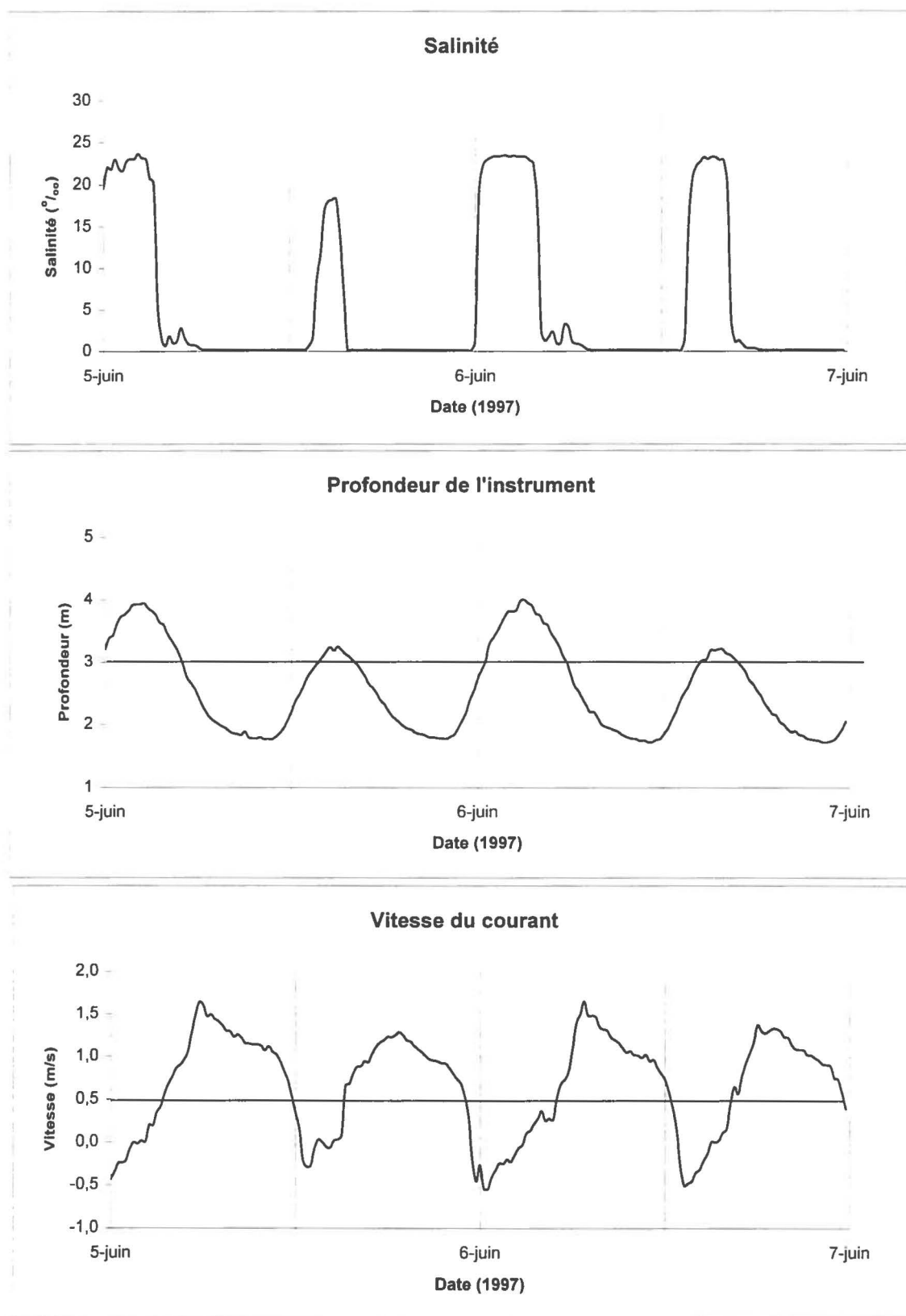


Figure 27 Vitesse du courant U, salinité et profondeur de l'eau au-dessus de l'instrument, station S1, du 5 au 6 juin 1997

(environ 24 ‰) et des courants inférieurs à 0,5 m/s, le plus souvent négatifs (courants de flot, dirigés vers l'amont).

Cette figure permet d'illustrer la difficulté de mesurer des courants à partir de stations fixes dans un écoulement stratifié. Le régime hydrodynamique n'est pas le même dans les deux couches d'eau, de sorte que l'instrument reflète uniquement les conditions prévalant dans la couche d'eau dans laquelle il se trouve.

La figure 28 permet de comparer les conditions d'écoulement à la même station (S1) du 3 au 4 juillet 97 lors d'un débit fluvial de l'ordre de 101 à 121 m³/s. La profondeur d'eau moyenne au-dessus de l'instrument est plus faible et le marnage de la marée est plus élevé qu'au début de juin. Les modifications de l'onde de marée en fonction du débit fluvial sont conformes à celles décrites précédemment à la section 4.1. La figure 28 montre aussi que les courants de flot sont plus forts et les courants de jusant plus faibles en juillet qu'en juin. La réduction des débits fluviaux favorise les courants de flot au détriment des courants de jusant. La salinité de l'eau est aussi affectée par la réduction du débit fluvial ; la salinité de la couche de surface n'est plus nulle mais se situe aux environs de 5 à 10 ‰. La salinité de la couche de fond augmente aussi, passant d'environ 24 ‰ en juin à 26 ‰ en juillet. Il semble que l'épaisseur de la couche de surface est plus variable puisqu'il n'est pas possible de relier les fluctuations de la salinité à une profondeur fixe.

Les figures 27 et 28 suggèrent qu'il existe un lien marqué entre le débit fluvial et les courants de l'estuaire. Les mesures effectuées par Roche (1990) et le modèle hydrodynamique de Ouellet (dans Roche ; 1990) montraient une nette prédominance de la marée sur l'écoulement fluvial dans la genèse des circulations à l'embouchure. Les données de Roche (1990) couvraient des conditions de débit fluvial allant de 75 à 158 m³/s. Le modèle de Ouellet extrapole les données connues jusqu'à un débit fluvial de 300 m³/s. Les résultats des mesures de 1997 montrent que le débit fluvial devient important lorsqu'il dépasse 300 m³/s. Pour des débits supérieurs à 425 m³/s, les courants fluviaux dominent les courants de marée.

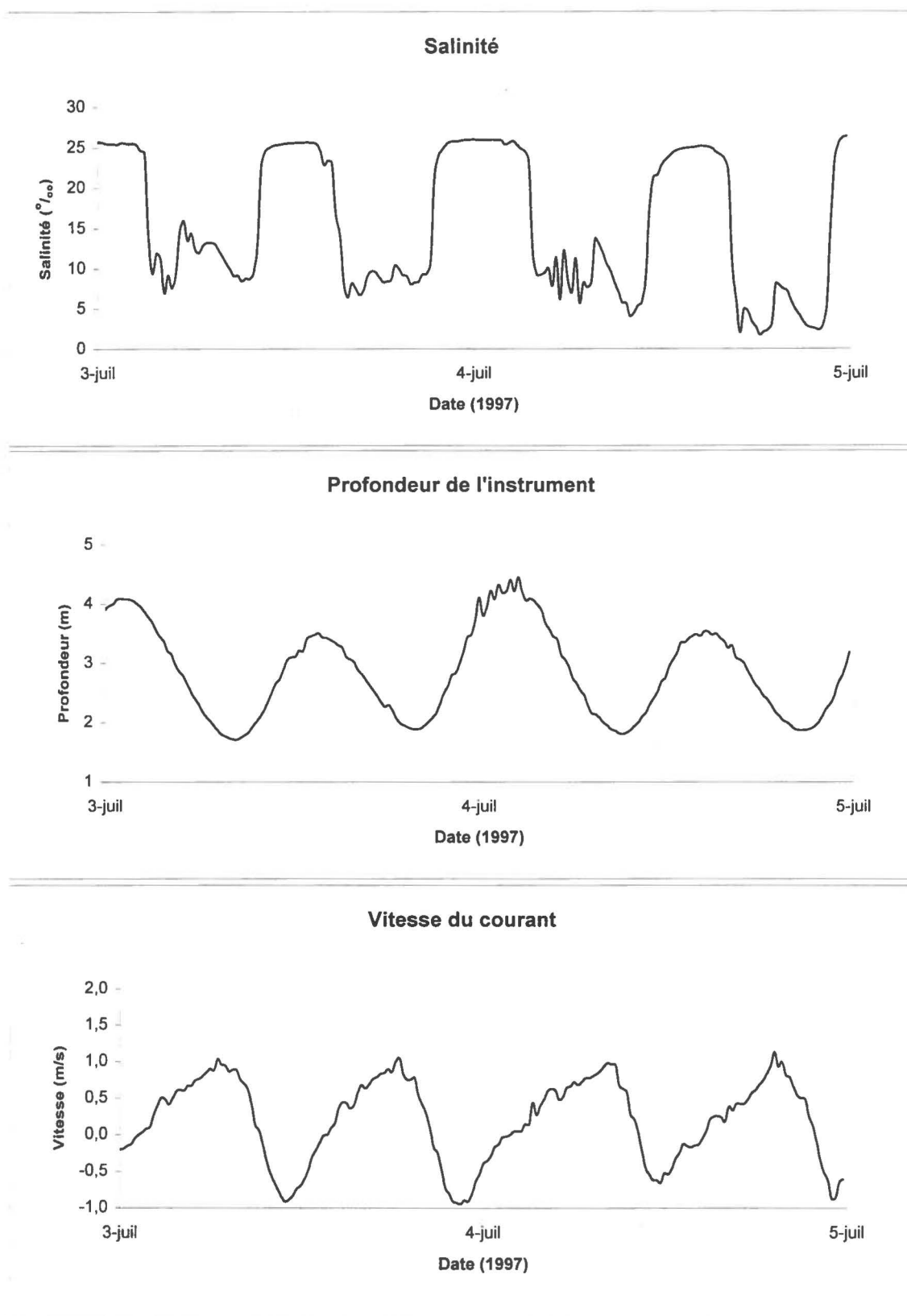


Figure 28 Vitesse du courant U, salinité et profondeur de l'eau au-dessus de l'instrument, station S1, du 3 au 4 juillet 1997

Cependant, les mesures sur station fixe ne sont pas l'outil idéal pour évaluer l'importance relative de l'écoulement fluvial par rapport à la marée sur l'hydrodynamique de l'estuaire parce que ces mesures ne reflètent qu'un point unique dans la colonne d'eau. Pour mieux comprendre les circulations globales, les profils verticaux de courant sont plus efficaces.

6.2.2 Profils courantométriques

Les figures 29 à 33 présentent de courtes séries chronologiques d'observations des niveaux d'eau, des courants et de la salinité dans l'estuaire. Le débit journalier de la rivière Sainte-Marguerite mesuré à la centrale Sainte-Marguerite-2 est indiqué dans le titre de chaque figure. Les données sont tirées des profils CSTP réalisés aux trois sections transversales a, b et c. La position des sections et des stations de profilage est indiquée aux cartes 1 et 3 de l'annexe 1. Les séries présentées aux figures 29 à 33 comportent seulement les données obtenues en surface et près du fond. Les courants sont représentés par la composante U de la vitesse exprimée sous forme vectorielle. Le signe de U est positif lorsque le courant est dirigé vers l'aval.

Période du 6 au 8 juin 97

Lors des mesures de juin (débit fluvial de 385 à 425 m³/s), les courants de jusant à l'embouchure (figure 29) se situent entre 1,3 et 1,6 m/s en surface. On peut observer une inversion des courants pendant le flot avec un maximum de 0,75 m/s en surface. Près du fond les courants maximums sont légèrement plus faibles qu'en surface. La durée des courants de jusant est beaucoup plus longue que celle des courants de flots. Les courants ne sont dirigés vers l'amont (négatifs) que pendant une période de 2 heures en surface et 3,5 heures au fond, alors que le cycle de marée dure environ 12,4 heures.

La dominance des courants de jusant est encore plus manifeste au pk 1,9 (station B2, figure 30) en juin. Les courants ne s'inversent pas du tout pendant le flot. Les valeurs maximales de U observées pendant le jusant sont de 1,0 m/s en surface et de 0,8 m/s au fond. Cependant, la période d'observation est assez courte à cette station et il n'est pas certain que les courants mesurés à 8h30 sont les plus élevés du jusant.

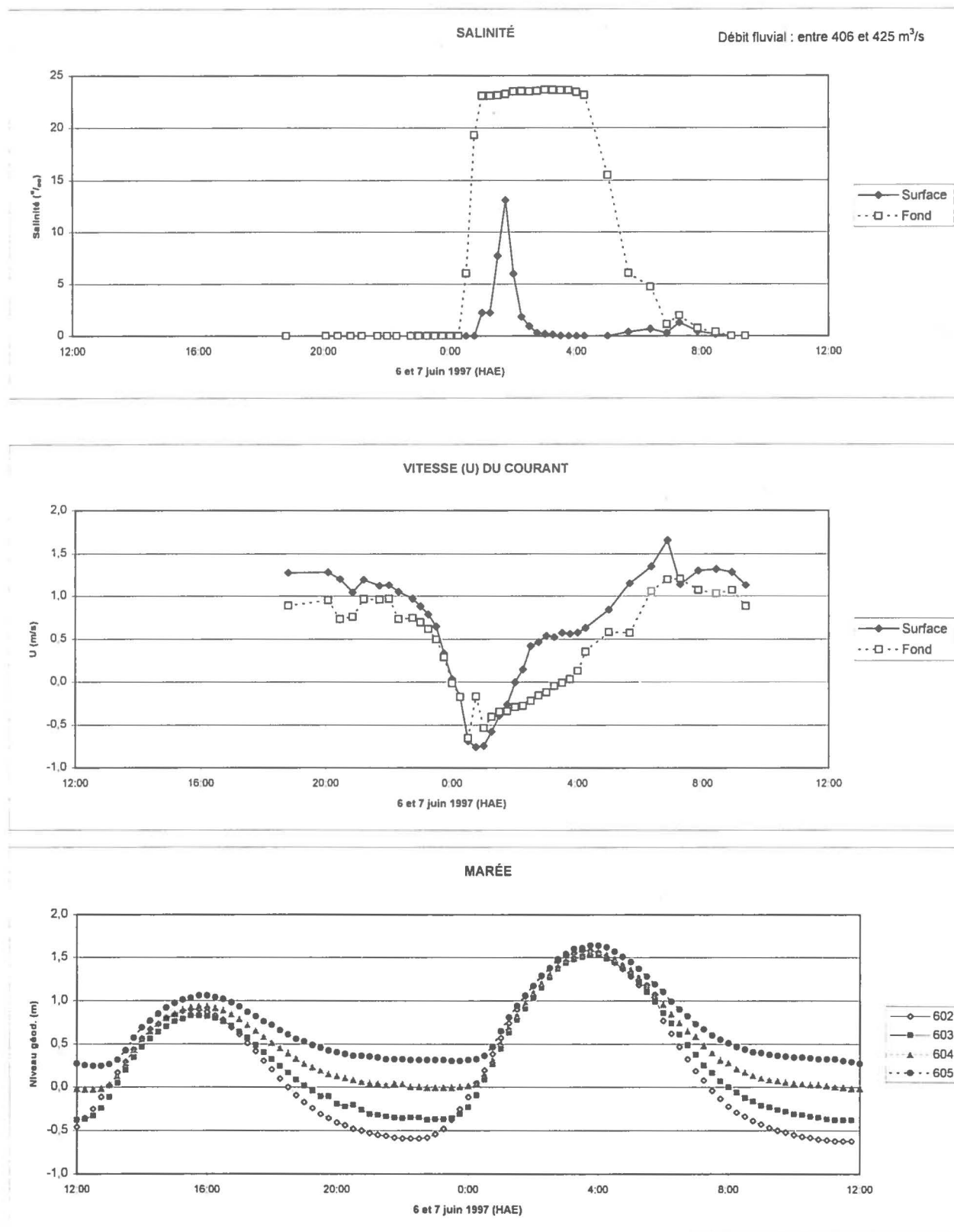


Figure 29 Salinité de l'eau, vitesse (U) du courant en surface et au fond et niveaux d'eau dans l'estuaire de la Sainte-Marguerite, le 6-7 juin 1997, station a1

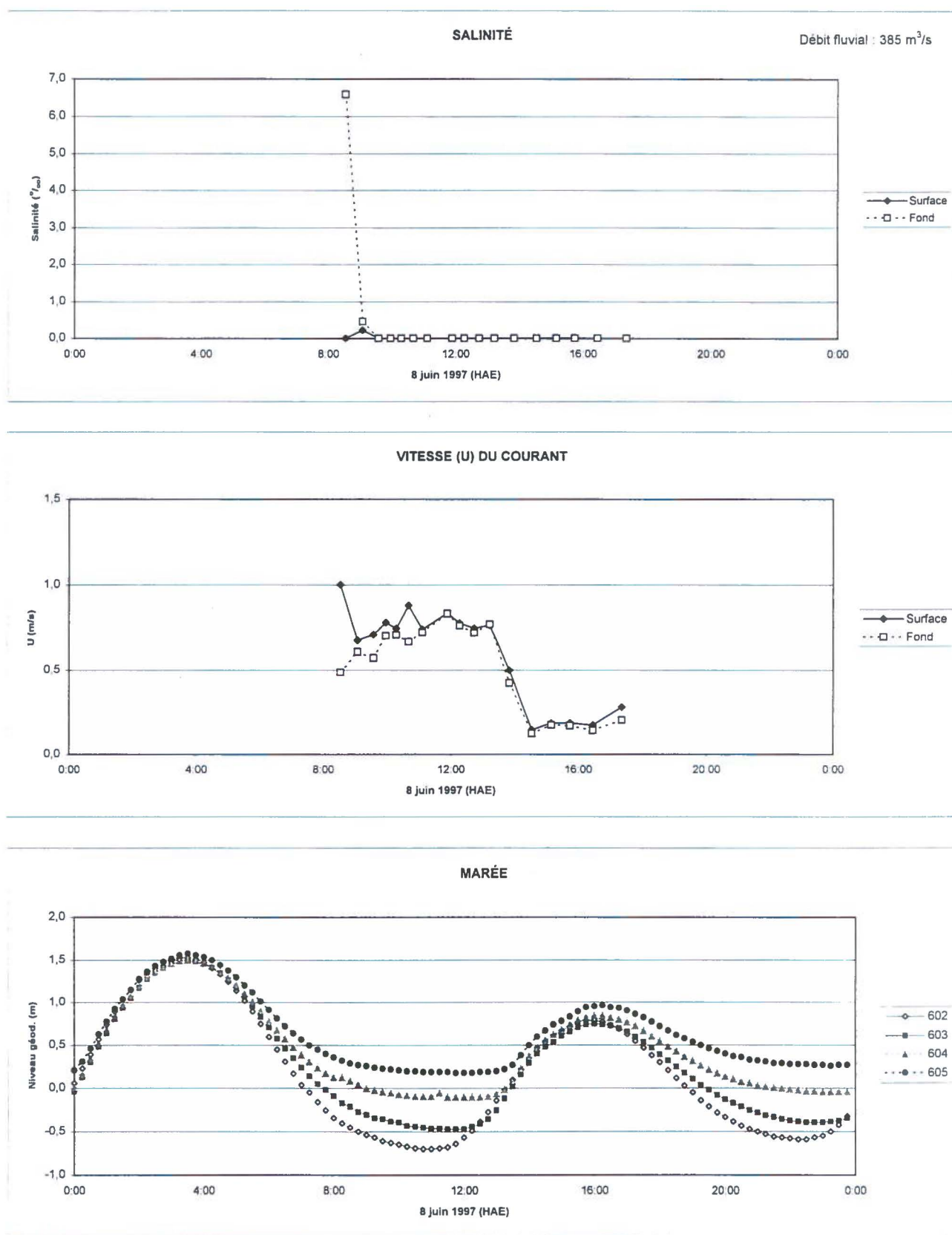


Figure 30 Salinité de l'eau, vitesse (U) du courant en surface et au fond et niveaux d'eau dans l'estuaire de la Sainte-Marguerite, le 8 juin 1997, station b2

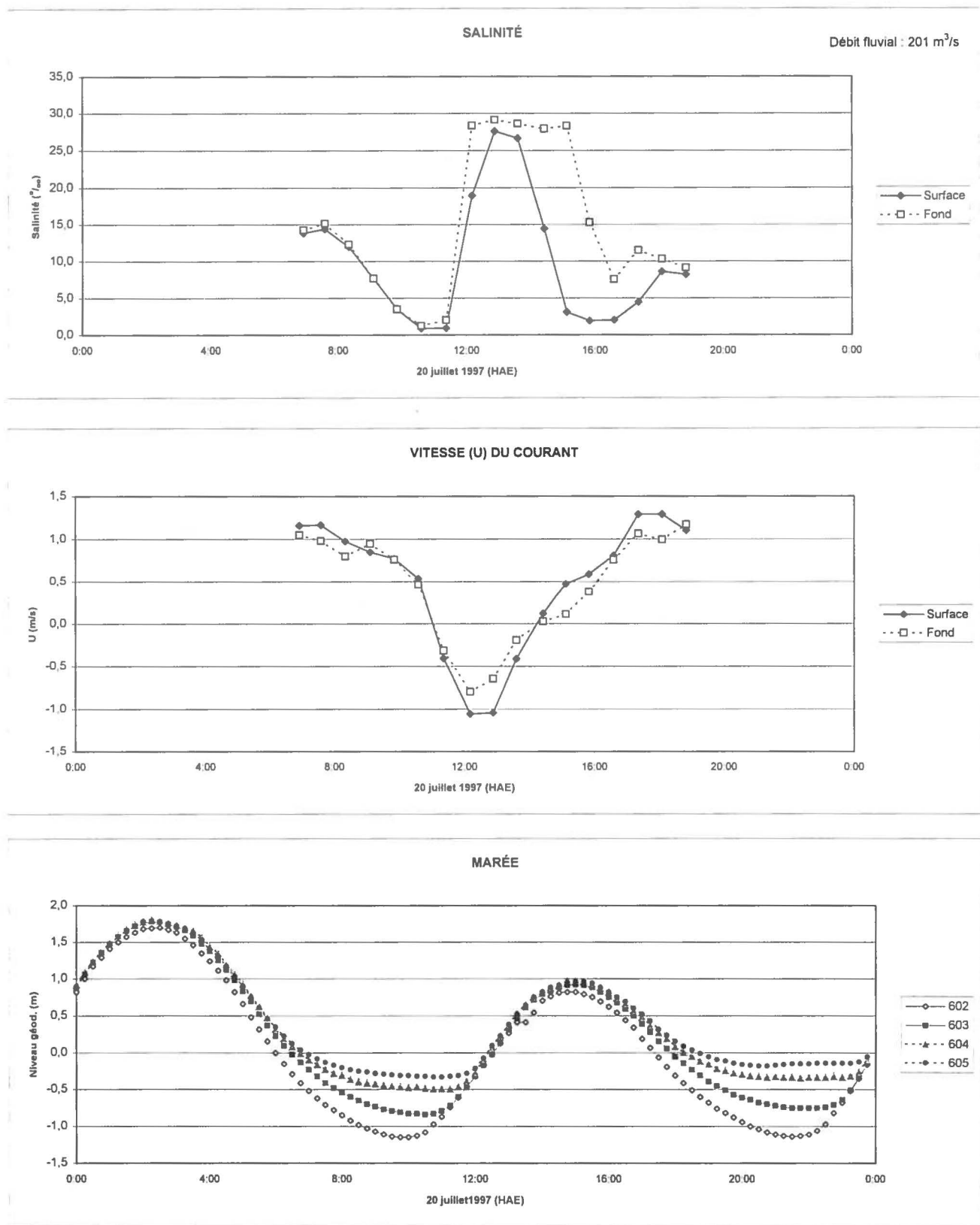


Figure 31 Salinité de l'eau, vitesse (U) du courant en surface et au fond et niveaux d'eau dans l'estuaire de la Sainte-Marguerite, le 20 juillet 1997, station a1

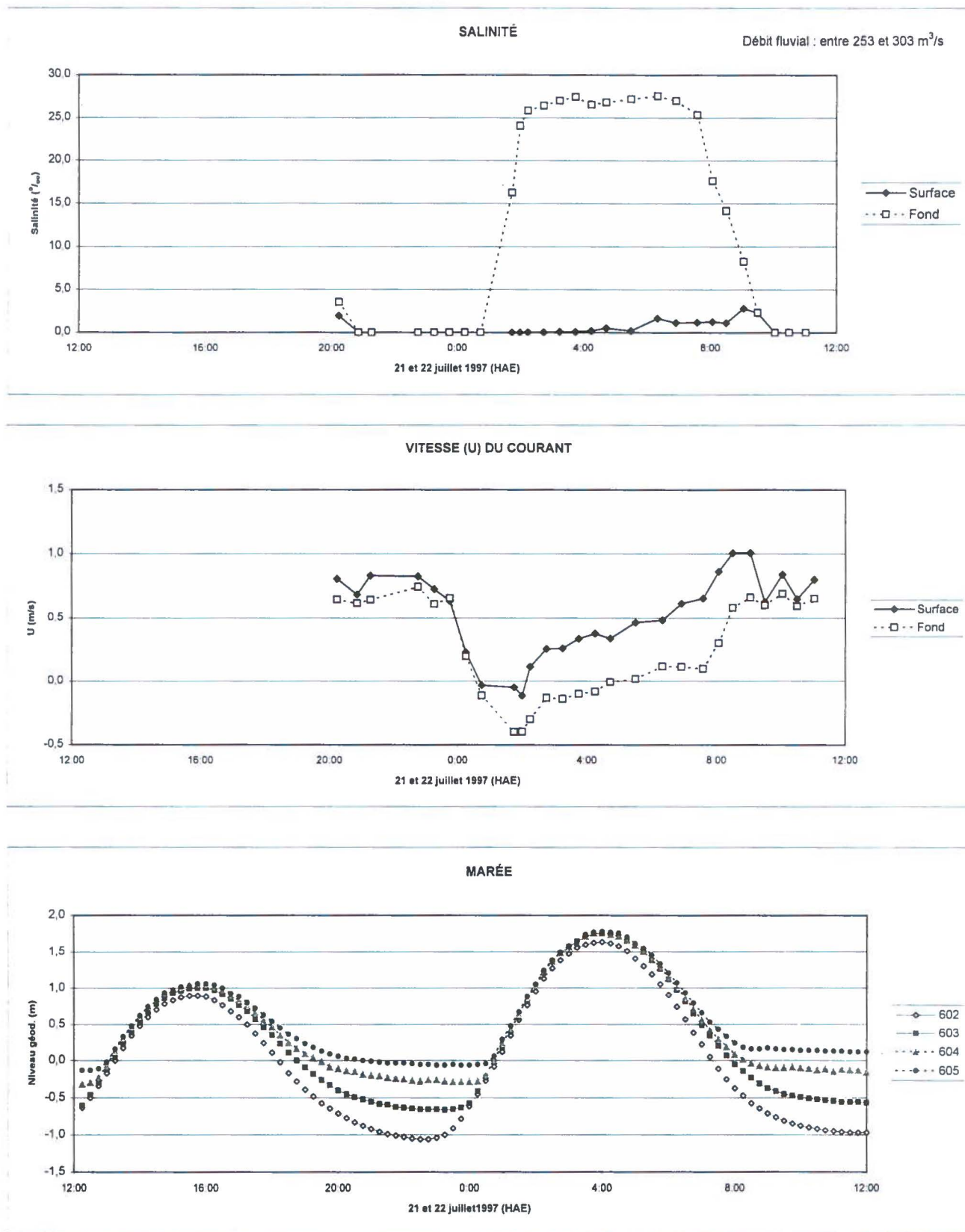


Figure 32 Salinité de l'eau, vitesse (U) du courant en surface et au fond et niveaux d'eau dans l'estuaire de la Sainte-Marguerite, le 21-22 juillet 1997, station b2

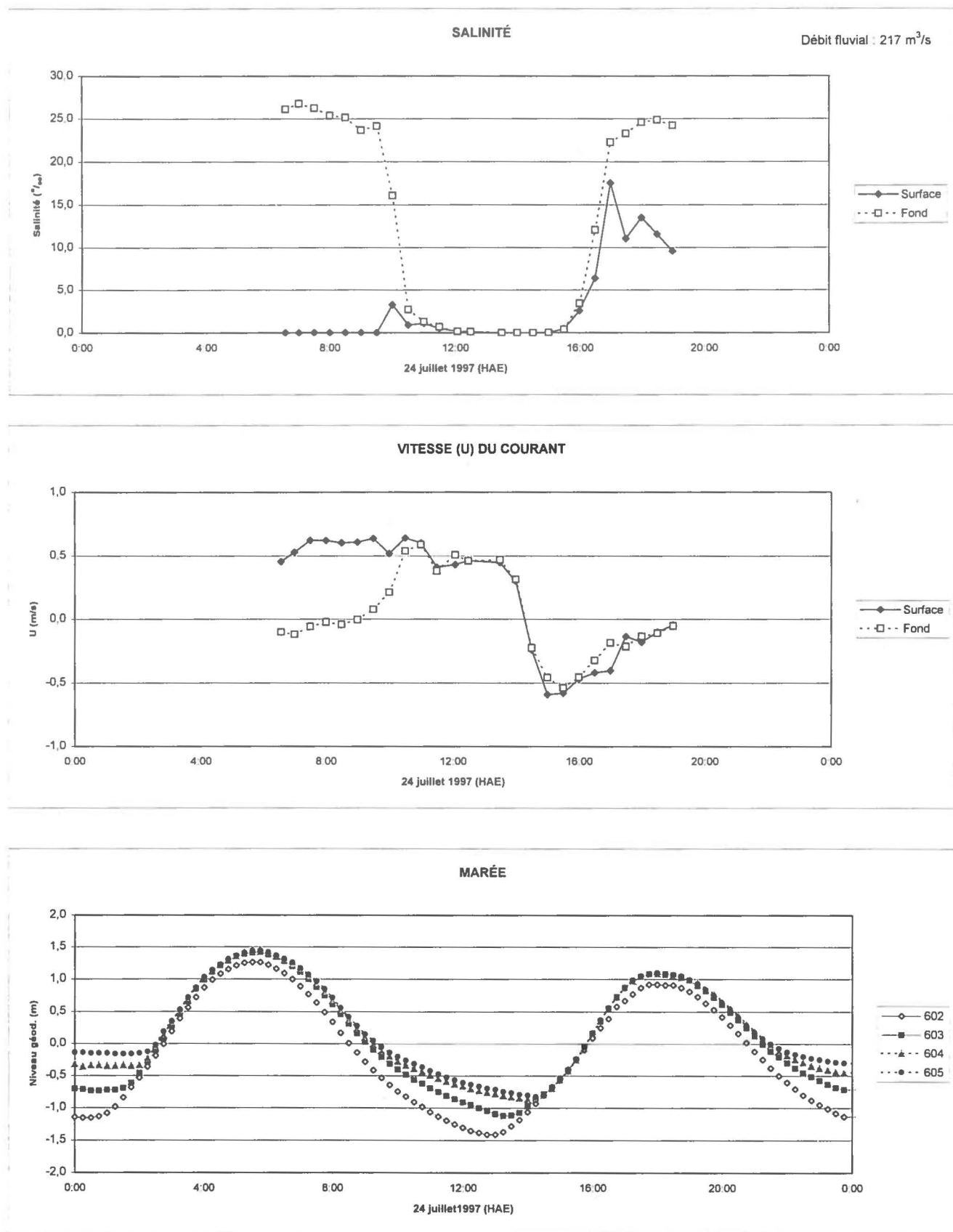


Figure 33 Salinité de l'eau, vitesse (U) du courant en surface et au fond et niveaux d'eau dans l'estuaire de la Sainte-Marguerite, le 24 juillet 1997, station c1

Période de juillet 1997

En juillet (débit fluvial de 201 à 353 m³/s), les courants de jusant à l'embouchure (figure 31), sont légèrement plus élevés que ceux du flot, avec des valeurs respectives de 1,3 et 1,0 m/s en surface et de 1,2 et 0,75 m/s au fond. L'écart entre les courants maximums de flot et de jusant est donc moins prononcé qu'en juin, parce que les courants de jusant diminuent alors que ceux du flot augmentent.

À la station B2, (figure 32), les courants de surface sont de 1,0 m/s pendant le jusant et de -0,1 m/s pendant le flot. Il n'y a donc plus d'inversion des courants en surface lorsque le débit fluvial excède environ 300 m³/s lors de marées de vives-eaux. Près du fond, cependant, le courant de flot atteint -0,45m/s et demeure négatif pendant environ 4 heures. Le débit permettant d'annuler l'inversion du courant de flot au fond se situe quelque part entre 300 et 385 m³/s lors de marées de vives-eaux.

À la ligne C (figure 33), située au pk 3,5, un peu plus à l'amont de l'estuaire, les mesures ont été réalisées le 24 juillet, alors que le débit fluvial était de 217 m³/s et lors de marées moyennes (marnage de 2,4 m à l'embouchure). Les courants de flot et de jusant sont pratiquement identiques avec respectivement 0,55 et 0,60 m/s en surface et 0,50 et 0,55 m/s au fond. La durée des courants de flot (négatifs) est de 4,5 heures en surface et de 6,5 heures au fond.

Comparaison juin-juillet

On peut résumer ce qui précède sur les courants en quelques points. D'abord, les mesures de juin et de juillet 1997 ont permis d'observer les courants dans la portion inférieure (pk 0,0 à 3,0) de l'estuaire de la Sainte-Marguerite lors de débits fluviaux variant de 200 à 425 m³/s et pour des conditions de marnages moyens à forts. Ces observations complètent les données recueillies par Roche (1990) qui couvraient des conditions de débit fluvial de 75 à 158 m³/s et des marnages faibles à moyens. Les observations de 1997 montrent que les courants de l'embouchure s'inversent encore pendant le flot même à des débits fluviaux de 425 m³/s. De forts débits fluviaux augmentent le courant de jusant au détriment du courant du flot tant en ce qui concerne la durée que l'intensité de ces courants. Par contre, les données indiquent que même des débits fluviaux de l'ordre à 200 m³/s ne suffisent pas à établir une nette dominance du courant de jusant sur le courant de flot à proximité du

fond lors de marées de vives-eaux. La prédominance du courant de jusant, dans le centre de l'estuaire et à son embouchure, commence à s'établir clairement lorsque le débit fluvial excède 300 m³/s.

Circulations résiduelles à deux couches

Les courants de surface et de fond sont parfois très différents. C'est le cas, notamment, aux figures 29, 32 et 33. Les courants près du fond sont plus « négatifs » ou moins « positifs » lorsque la colonne d'eau est stratifiée. Cet écart de près de 0,5 m/s entre les courants de surface et de fond est dû aux circulations résiduelles à deux couches (Uncles, 1982) qui se développent en milieu stratifié. Ces circulations se traduisent par un écoulement net vers l'aval dans la couche de surface et un écoulement net vers l'amont dans la couche de fond. Ces courants nets se superposent aux courants de marée et ils ont tendance à renforcer le courant de flot près du fond et le courant de jusant en surface.

6.3 CIRCULATION DES MASSES D'EAU

Les circulations qui prévalent dans l'estuaire de la Sainte-Marguerite sont principalement causées par la marée et le débit fluvial. L'importance relative du débit fluvial et de la marée sont un élément clef du suivi environnemental parce que le projet hydroélectrique Sainte-Marguerite-3 modifie le régime hydrologique de la rivière. À la section 4.1, on a démontré que le marnage de la marée, donc le débit de marée transitant dans l'estuaire, dépend aussi du débit fluvial. Plus le débit fluvial est fort, plus le marnage de la marée diminue.

Afin de caractériser plus en détail la relation entre les courants induits par la marée et ceux attribuables à l'écoulement fluvial, un modèle analytique de l'estuaire a été développé. Ce modèle unidimensionnel est basé sur la conservation du volume d'eau et de la masse. Le modèle analytique permet de calculer la vitesse moyenne des courants à chaque section bathymétrique. La vitesse $U(x,t)$ intégrée sur la section est donnée par l'équation suivante :

$$U(x,t) = \frac{1}{A(x,t)} \left[\frac{-dV(x,t)}{dt} + QF(t) \right]$$

$A(x,t)$ est la section mouillée de l'estuaire à une distance x de l'embouchure et à l'instant t , laquelle dépend du niveau d'eau. $QF(t)$ est le débit fluvial au temps t . On obtient alors une estimation de $U(x,t)$ pour chaque section bathymétrique. $U(x,t)$ est mesurable directement

en obtenant une grille de points de mesures synoptiques des vitesses et directions du courant le long d'une section transversale et en intégrant la composante normale de la vitesse à travers toute la section.

Une description détaillée du modèle et des tests de validation réalisés à partir des données de 1997 et des mesures antérieures est fournie en annexe 2. Comme il s'agit d'un modèle volumétrique purement analytique, aucune calibration n'est requise. Par contre, une comparaison des résultats du modèle et des observations de courant a permis de valider les résultats.

Le modèle utilise les données bathymétriques recueillies par CSSA Consultants Ltée (1995) à 42 sections transversales de l'estuaire pour décrire la géométrie de l'estuaire. Les niveaux d'eau mesurés par l'unité Hydraulique et Géotechnique d'Hydro-Québec sont utilisés par ce modèle pour évaluer le volume d'eau contenu dans l'estuaire à chaque intervalle de mesure de 15 minutes. Enfin, le débit fluvial à la tête de l'estuaire provient des données hydrologiques de la centrale Sainte-Marguerite-2.

La figure 34 montre les vitesses U du courant calculées à l'aide du modèle pour quatre périodes de cinq jours correspondant à divers débits fluviaux. Le débit fluvial moyen pour la période visée est indiqué en haut, à droite de chaque graphique. Les périodes de cinq jours correspondent à celles utilisées pour présenter les comparaisons de niveau d'eau et de débit fluvial à la figure 18. Durant ces quatre périodes, le débit de la rivière Sainte-Marguerite est passé de conditions de crue ($597 \text{ m}^3/\text{s}$) à des conditions d'étiage estival ($64 \text{ m}^3/\text{s}$). On ne dispose de mesures directes des courants que pour les mois de juin et juillet.

6.3.1 Crue printanière

La figure 34 montre que lors des crues printanières (mai), les courants de jusant sont plus élevés que ceux mesurés en juin. Les courants ne s'inversent pas pendant le flot mais sont réduits à presque zéro à l'embouchure, ce qui suggère que le point nul se trouve à cet endroit. Il faut se rappeler que le modèle ne reproduit pas les circulations résiduelles à deux couches et qu'il tend à sous-estimer le courant de flot au fond, et à surestimer le courant jusant au fond. À l'inverse, le modèle a tendance à surestimer le courant de flot en surface et à sous-estimer le courant de jusant. Il est donc possible, quoique peu probable, que de

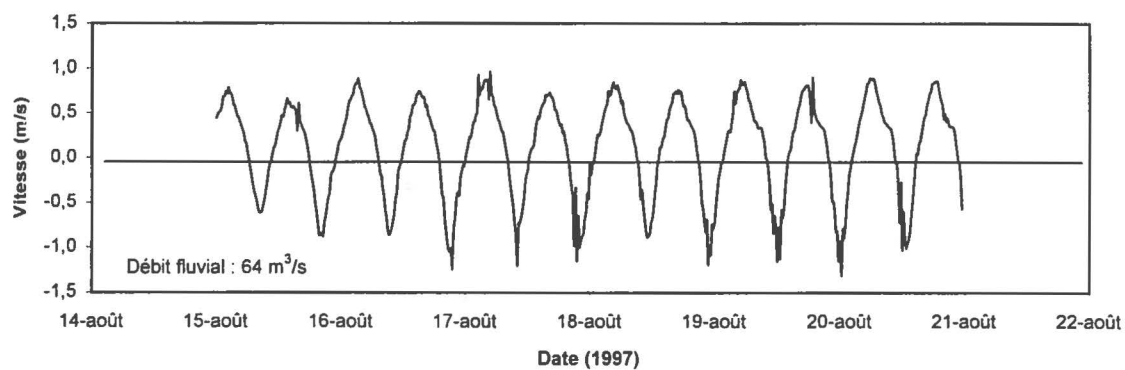
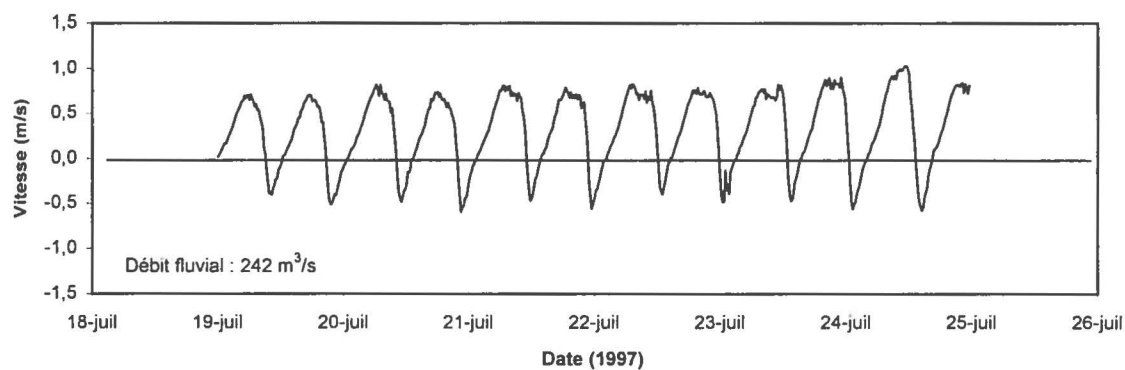
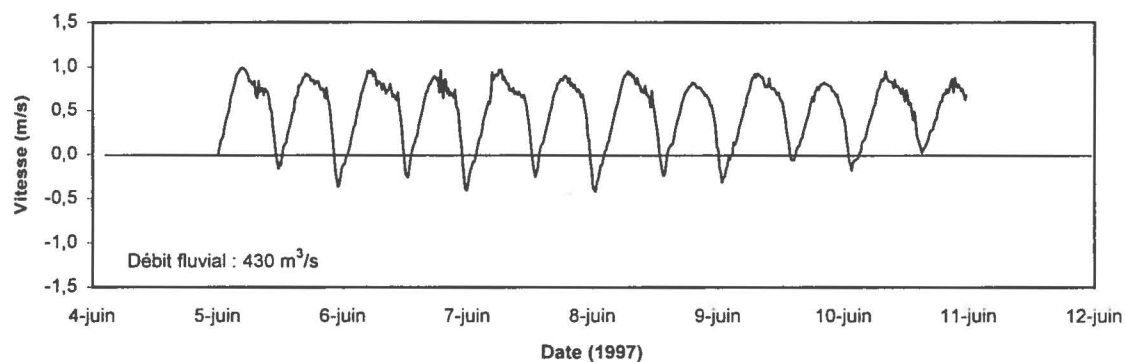
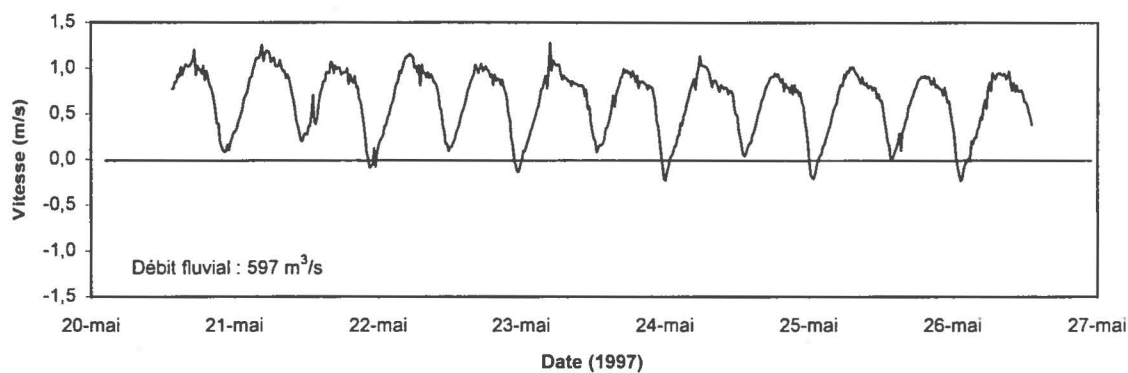


Figure 34 Vitesses du courant calculées à l'embouchure pour différentes valeurs du débit de la rivière Sainte-Marguerite

l'eau salée s'introduise dans l'estuaire en longeant le fond lors des crues de mai, en dépit de débits fluviaux de plus de $600 \text{ m}^3/\text{s}$. Cependant, les résultats du modèle montrent que des débits fluviaux de plus de $600 \text{ m}^3/\text{s}$ réussissent à neutraliser les courants de marée à l'embouchure pendant le flot. À la section 5.3, une régression linéaire calculée à partir des données de position limite de l'intrusion saline en fonction du débit fournit une valeur de $530 \text{ m}^3/\text{s}$ comme valeur limite du débit pour maintenir l'estuaire en eau douce.

6.3.2 Étiage

La figure 34 permet aussi d'évaluer les courants à l'embouchure en conditions d'étiage, lorsque le débit fluvial se situe entre 60 et $70 \text{ m}^3/\text{s}$ (août). Lors de marée de vives-eaux, les courants de flot sont supérieurs aux courants de jusant dans le chenal. Cette supériorité des courants de flot par rapport à ceux du jusant est encore plus marquée au fond, puisque les circulations résiduelles à deux couches tendent à renforcer cette tendance. L'estuaire est stratifié la plupart du temps dans la région de l'embouchure lorsque le débit fluvial est de l'ordre de $75 \text{ m}^3/\text{s}$.

Le fait que les courants de flots puissent être supérieurs aux courants de jusant en conditions d'étiage est important en ce qui concerne la dynamique sédimentaire. Ces courants de flot sont suffisamment forts pour introduire du sable dans l'estuaire et contribuer à ensabler partiellement le chenal d'écoulement lorsque les débits fluviaux sont faibles. Cette question sera discutée à la section 7.0.

6.3.3 Embouchure et delta externe

Le modèle permet jusqu'à un certain point de connaître les conditions de circulation sur le delta externe. La photographie aérienne de 1997 (figure 6) montre que le chenal de l'estuaire de la Sainte-Marguerite se prolonge sous forme d'un chenal deltaïque s'avancant dans le golfe du Saint-Laurent. La photographie prise à marée basse montre que le chenal s'évase à l'extrémité du delta externe, atteignant une largeur d'environ 600 m au niveau de la barre de ceinture. La hauteur de cette barre se situe environ à la cote $-1,0 \text{ m}$ sauf à la sortie du chenal d'écoulement où la barre s'affaisse jusqu'à $-2,5 \text{ m}$ environ. Lors des mers basses de vive-eau, le niveau d'eau dans le golfe du Saint-Laurent descend jusqu'à la cote

de $-1,5$ m. La section mouillée au niveau de l'extrémité du delta est donc inférieure à 900 m^2 .

La figure 35 présente une comparaison des débits et des vitesses intégrées sur la section de l'embouchure (P46) calculés à l'aide du modèle volumétrique décrit ci-dessus et en annexe 2. Les débits à l'embouchure sont le débit total (incluant le débit fluvial) et le débit de marée (sans débit fluvial). Les deux périodes correspondent à celles présentées au haut et au bas de la figure 34, soit la période printanière (crue) et celle de l'étiage estival du mois d'août. Le débit moyen (RMS) est estimé en utilisant la moyenne quadratique des débits de marée à l'embouchure. En mai, la valeur moyenne du débit de marée est de $255 \text{ m}^3/\text{s}$, comparativement à $390 \text{ m}^3/\text{s}$ en août. Les deux périodes de mesure correspondent à des marées de vives-eaux ; le débit de marée est plus faible en mai qu'en août parce que le marnage est réduit lorsque les débits fluviaux sont plus forts.

La figure 35 montre que les fluctuations du débit fluvial de la rivière Sainte-Marguerite influencent le débit total de jusant à l'embouchure, qui passe de $1100 \text{ m}^3/\text{s}$ en mai à environ $800 \text{ m}^3/\text{s}$ en août. Le débit de flot est encore plus affecté, passant de presque zéro à environ $1000 \text{ m}^3/\text{s}$. Les volumes d'eau échangés à l'embouchure doivent nécessairement transiter par la barre de ceinture. À marée basse et vers la fin de la marée baissante, la section mouillée à l'extrémité du chenal d'écoulement est réduite à environ 900 m^2 lors de marées de vives-eau d'étiage. Les débits d'étiage, de l'ordre de 800 à $900 \text{ m}^3/\text{s}$, doivent donc transiter par une section large et peu profonde, ce qui entraîne des courants moyens de l'ordre de 1 m/s . Pendant le flot, les courants sont encore plus forts puisque le débit atteint $1100 \text{ m}^3/\text{s}$ en direction de l'amont. Ces courants s'ajoutent à l'effet des vagues qui agissent dans la même direction et favorisent une migration de la barre vers la rive.

En conditions de crues, les débits totaux oscillent entre 1100 et $1200 \text{ m}^3/\text{s}$ pendant le jusant. Ces débits produisent de forts courants dans le chenal d'écoulement du delta externe. Au niveau de la barre de ceinture, la pente du plan d'eau est assez prononcée. Les courants dans ce secteur sont vraisemblablement du même ordre que ceux observés dans le chenal d'écoulement pendant le jusant, soit de l'ordre de $1,6 \text{ m/s}$. Par contre, les courants de flot sont presque nuls puisque le débit de flot est nul. Ces conditions favorisent une migration de la barre de ceinture vers le large et un affaissement de la barre au niveau du chenal d'écoulement. Lorsque les crues deviennent très fortes, il est probable que des

chenaux secondaires se développent à travers la partie intertidale de la flèche sableuse vers la fin du jusant. À ce moment, les courants du golfe du Saint-Laurent deviennent suffisamment forts pour dévier vers l'est l'écoulement sortant du chenal de l'estuaire de la Sainte-Marguerite.

La barre de ceinture qui entoure le delta externe agit donc comme un seuil très mobile qui contrôle les débits de marée circulant dans l'estuaire. Ce seuil prend la forme d'une section en demi-cercle, de rayon et de profondeur variables, qui s'ajuste très rapidement à l'écoulement de l'estuaire. La section mouillée au-dessus de la barre de ceinture est très large et peu profonde. À marée basse, les courants générés par la marée et l'écoulement fluvial de la rivière Sainte-Marguerite ont tendance à rehausser le seuil et le déplacer vers la rive en conditions d'étiage alors qu'ils ont tendance à abaisser le seuil et à le déplacer vers le large lors de crues assez fortes (plus de $600 \text{ m}^3/\text{s}$). Ces ajustements du seuil de contrôle que constitue la barre de ceinture limitent les volumes d'eau échangés dans l'estuaire par la marée et contrôlent les vitesses maximales du flot et du jusant dans l'estuaire. Ce contrôle au niveau de la barre de ceinture contribue à limiter les volumes de sable qui peuvent être introduits ou extraits de l'estuaire de la Sainte-Marguerite.

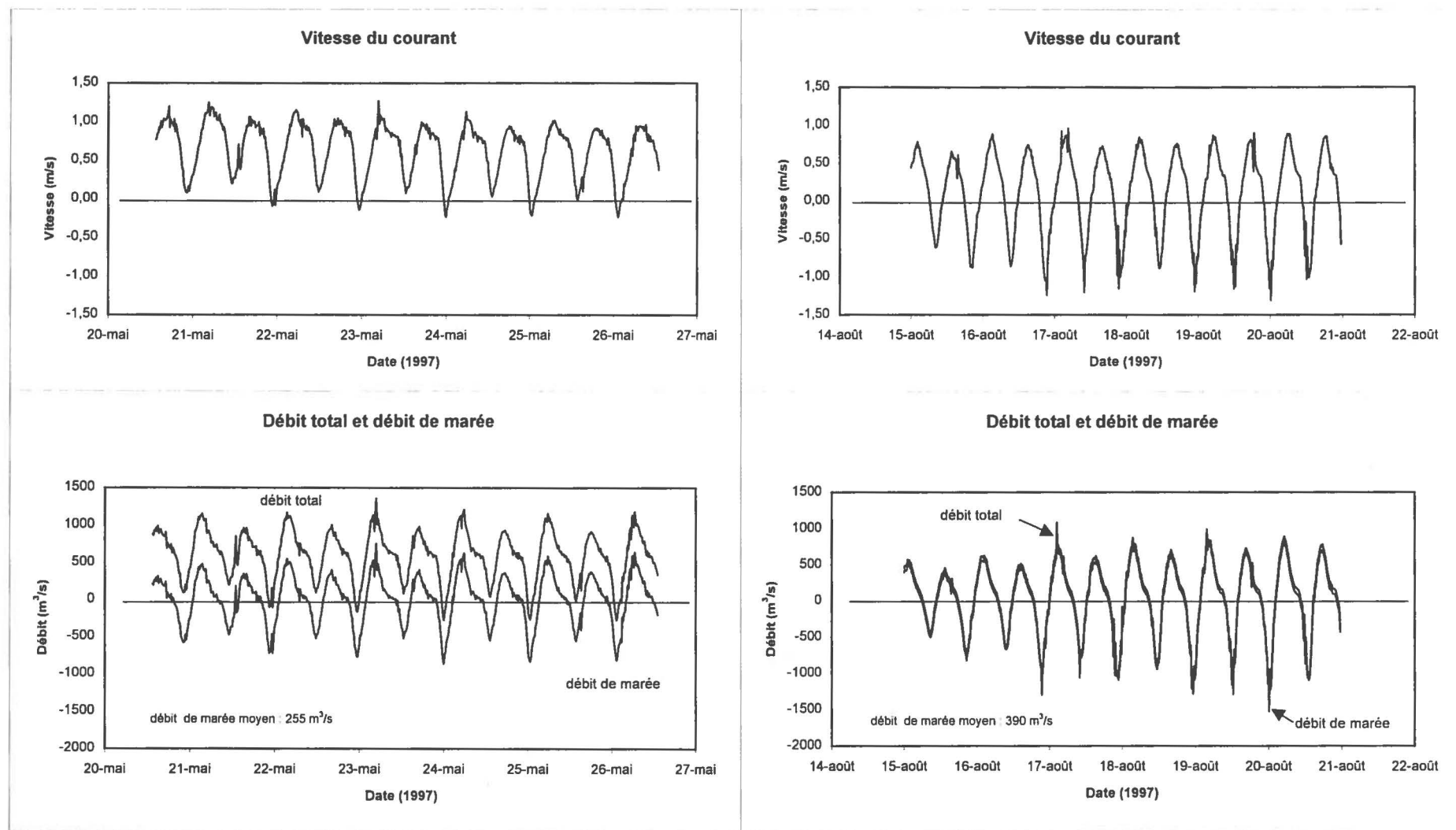


Figure 35 Vitesse du courant, débit total et débit de marée à l'embouchure de l'estuaire de la Sainte-Marguerite, en crue (mai) et en étiage (août) de la rivière

7 DYNAMIQUE SÉDIMENTAIRE

La dynamique sédimentaire de la zone d'étude comporte un ensemble d'interactions entre les dépôts meubles présents dans cette zone et les processus hydrodynamiques et météorologiques. La distribution granulométrique des sédiments de l'estuaire de la Sainte-Marguerite (figure 4) reflète l'histoire géologique postglaciaire de l'estuaire et la distribution de l'énergie des processus hydrodynamiques qui prévalent dans la zone d'étude. Dans les sections qui suivent, nous présentons une analyse des relations entre les processus géologiques et hydrodynamiques qui contrôlent la distribution des sédiments meubles de l'estuaire. Cette analyse permet de construire un modèle cohérent des processus qui contrôlent le transport et l'organisation des sédiments de l'estuaire, l'érosion des berges et la formation des dépôts du lit de l'estuaire et du delta sableux.

7.1 INFLUENCE DE LA STRATIGRAPHIE

Comme mentionné à la section 2.1, la stratigraphie de l'estuaire comporte un horizon de sol surmontant des dépôts deltaïques sableux et graveleux qui s'épaississent de l'amont vers l'aval de l'estuaire. Ces dépôts deltaïques recouvrent eux-mêmes des silts argileux de la mer de Goldthwait qui reposent en discordance sur le socle rocheux. À la tête de l'estuaire, le socle rocheux affleure sur le fond et les rives. Dans l'estuaire supérieur, entre les pk 3,0 et 6,0, les silts-argileux reliques de la mer de Goldthwait constituent la base du talus. La couche sable deltaïque est très mince et cela se reflète sur les plages situées dans cette zone. Les plages situées au nord du pk 2,0 sont constituées d'une mince couche de sable fin à moyen plus ou moins bien trié reposant en discordance sur des silts-argileux compacts. Dans la plupart des cas, les silts-argileux compacts présentent les caractéristiques des silts-argileux de Goldthwait non remaniés. Ceci indique que les plages bordant la majeure partie de l'estuaire sont très minces (moins de 30 cm d'épaisseur) et reposent sur une plate-forme d'érosion découpée directement dans la terrasse silto-argileuse.

À l'aval du pk 2,0, l'épaisseur des dépôts sableux augmente sur les plages bordant l'estuaire et la flèche sableuse. Les carottes courtes de moins (50 cm de longueur) réalisées par CSSA Consultants Ltée (1995) ne traversent pas la couche sableuse. Il est probable que les dépôts sableux reposent aussi sur des argiles de Goldthwait, mais ceux-ci sont sous

le niveau de la mer et sous le niveau du lit de l'estuaire. Les couches deltaïques formant les terrasses de l'estuaire plongent doucement vers le golfe du Saint-Laurent. Le contact entre la couche de sable deltaïque et les silt-argileux sous-jacents passe sous le niveau moyen de la mer quelque part entre les pk 2,0 et 3,0. Dans toute la zone de l'embouchure de l'estuaire, seules les terrasses sableuses affleurent en surface. Dans cette zone, les faciès sableux deviennent nettement dominants.

Cette dominance des faciès sableux se poursuit dans la région de la flèche sableuse et du delta externe de l'estuaire. Aucune des 40 carottes prises dans cette zone ne contient de silt argileux à l'exception de la carotte C-22, située sur la plage nord de la zone boisée de la flèche sableuse. À cet endroit, l'épaisseur de la couche de sable de surface n'est que de 15 cm et elle repose sur des argiles-silteux mélangés à environ 35 % de sable fin à moyen. La présence d'une proportion appréciable de sable suggère que les argiles de Goldthwait ont été remaniés à cet endroit. On ne peut statuer sur l'épaisseur ou la minceur des dépôts sableux de la zone de l'embouchure à partir d'un seul échantillon. Tous les autres échantillons prélevés dans l'estuaire inférieur, à l'aval du pk 2,0, confirment la dominance des faciès sableux sur les berges et les battures ou les bancs, et des faciès graveleux dans le chenal.

7.2 FACIÈS SÉDIMENTAIRES À LA TÊTE DE L'ESTUAIRE

La figure 36 montre des photographies de l'estuaire près du rapide du pk 6,7 à marée haute et basse. Les photographies ont été prises le 28 février et le 1^{er} mars 1998. Ces photographies montrent que le rapide s'est formé sur un seuil rocheux et sur des dépôts très grossiers. Dans cette zone, les rives de l'estuaire sont rocheuses. La végétation pousse sur un horizon de sol directement en contact avec le socle rocheux.

Le seuil du pk 6,7 est bordé par deux fosses d'environ 6 m de profondeur situées respectivement à l'amont et à l'aval du seuil. Comme le montre la figure 36, la marée haute recouvre le seuil complètement, mais le courant est dirigé vers l'aval au-dessus du seuil, même lorsque le débit fluvial est inférieur à 30 m³/s comme c'est le cas au moment de la prise de photo. Les courants de jusant sont forts et nettement dominants au-dessus du seuil. Même si la marée inonde le rapide en condition de vive-eau, les courants dirigés vers

(a)



(b)



Figure 36 Rapide du pk-6,7 a marée (a) haute et (b) basse de vive-eau, le 28 février 1998
Estuaire de la Sainte-Marguerite



Figure 12 Protections en enrochement avec épis rocheux à Gallix

l'amont ne permettent jamais à des particules de sable en provenance de l'aval de franchir le seuil. Autrement dit, quel que soit le débit de la rivière Sainte-Marguerite, incluant des conditions de débit nul, les courants de marée au-dessus du seuil ne peuvent introduire du sable à l'amont du seuil. Tous les sédiments présents dans les fosses et sur les berges situées dans le petit bassin bordé par la centrale Sainte-Marguerite-1 et le rapide du pk 6,7 proviennent de la rivière Sainte-Marguerite ou de l'érosion des berges de ce petit bassin.

Il est probable que les fosses se sont formées en conditions hivernales ou printanières sous des accumulations de frasils et de glaçons. Ce mode de formation des fosses en pied de rapide est très répandu (référence Grande-Baleine, voir Danielle) et il est difficile d'imaginer un autre mode de formation des deux fosses de l'estuaire. Cependant, il n'y a plus de trace de frasil dans l'estuaire depuis la construction des centrales Sainte-Marguerite 1 et 2. Le fait que les fosses existent toujours et n'aient pas été comblées suggère que les apports de sédiments dans ces fosses sont très faibles depuis la construction des centrales SM-1 et SM-2.

7.3 ESTUAIRE SUPÉRIEUR (PK 3.0 À 6.0)

Dans la partie supérieure de l'estuaire, le fond du chenal principal est recouvert de sable grossier et de gravier (figure 4). À l'amont et au niveau des lignes de 735 kV, (pk -5.3 à 6.0) , le fond de l'estuaire est couvert de sable moyen à grossier assez mal trié. Plus en aval, entre les pk 3 et 5,3, le fond du chenal est tapissé de gravier et de cailloux. En bordure du chenal et sur les plages, on peut observer de minces placages de sable moyen à grossier surmontant les silts-argileux de Goldthwait.

La composition granulométrique du lit du chenal de l'estuaire supérieur reflète les conditions de forts courants prévalant durant les crues printanières et la faiblesse des apports de sédiments en provenance de l'amont. Les seules zones où l'on retrouve de minces dépôts de sable correspondent à la présence de sources locales, comme la zone d'éboulis sablonneuse située près des lignes de transmissions hydroélectriques et des terrasses en érosion attenantes au terrain de golf. Dans ces zones, les apports de sable accrus sont vraisemblablement liés au déboisement du haut des talus et à la perforation de la couche indurée. Les glissements et éboulis localisés libèrent du sable qui forme de petits dépôts dans le chenal. Il est probable que ces dépôts sont évacués vers l'estuaire inférieur

lors des crues printanières. Les échantillons de sédiments de CSSA Consultants Ltée (1995) ont été recueillis en octobre 1994, suite à l'étiage estival, ce qui explique qu'on retrouve par endroit des sédiments relativement fins dans le chenal d'écoulement dans le secteur d'amont de l'estuaire.

7.4 ESTUAIRE INFÉRIEUR (PK 0.0 À 3.0)

La distribution des dépôts sableux, dans l'estuaire inférieur, est plus complexe que dans l'estuaire supérieur. Dans cette zone, comprise entre le pk 3,0 et l'embouchure, les courants fluviaux et les courants de marée peuvent être d'intensité comparable, contrairement à l'estuaire supérieur où les courants fluviaux dominent. La distribution des sédiments et les figures sédimentaires reflètent la diversité des conditions hydrodynamiques.

7.4.1 Le chenal d'écoulement

Le fond du chenal d'écoulement (figure 4) est constitué de sable grossier et de gravier dans tout l'estuaire inférieur (pk 0.0 à 3.0). On peut observer occasionnellement la présence de dunes ou de mégarides de sable moyen à grossier dans le chenal, surtout aux environs de l'embouchure.

Les courants de jusant les plus forts observés dans le chenal d'écoulement se situent aux environs de 1,6 m/s. Il est probable que des courants de jusant plus forts encore se produisent lors de crues majeures. Les courants de flot les plus élevés peuvent excéder 1,2 m/s lors de marées de vives-eaux coïncidant avec l'étiage de la rivière Sainte-Marguerite. Les forts courants de jusant peuvent évacuer les particules de la taille du sable moyen et fin hors de l'estuaire en quelques heures. C'est sans doute la raison pour laquelle le chenal est surtout couvert de sable grossier et de gravier.

En conditions moyennes d'écoulement, la colonne d'eau de l'estuaire inférieur est stratifiée et les courants de flot et de jusant, près du fond, se situent entre 0,5 et 1,2 m/s. Les courants de flot et de jusant sont du même ordre de grandeur et la dominance relative du jusant par rapport au flot dépend des conditions de débit fluvial et de la marée. Une particule déplacée par ces courants exécute un mouvement de va et vient le long du chenal, mais son déplacement net est assez faible. Comme les particules se déplacent

également dans la direction transverse au chenal, le sable présent dans le fond du chenal a tendance à migrer vers les côtés ou flancs du chenal. Des dunes et des mégarides se développent perpendiculairement au flanc du chenal dans la zone où l'écoulement ralentit. Ces figures sédimentaires migrent vers l'aval ou vers l'amont avec les courants de marée. Leur mouvement net est toutefois assez lent sauf lors de courts épisodes de très forts courants nets, lors de crues ou d'étiages très marqués.

7.4.2 Les battures

Deux grandes battures bordent le chenal de l'estuaire inférieur (pk 0.0 à 3.0). La première, située entre les pk 1.0 et 3.0, a une forme en demi-cercle se rattachant à la rive droite de l'estuaire. La seconde (pk 0.0 à 1.0) a une forme de triangle plus ou moins équilatéral bordé à l'est par le village de Val-Marguerite, au sud par la flèche sableuse et au nord-ouest, par le chenal d'écoulement. Pour faciliter la suite de cette analyse, nous appellerons la première: batture du méandre et la seconde: batture de Val-Marguerite.

Ces deux battures ont des propriétés et des comportements hydrodynamiques très différents. La batture du méandre s'est développée dans la convexité d'un méandre du chenal d'écoulement ; elle se déploie en travers de l'écoulement dans l'estuaire. Pendant le jusant, on a pu mesurer des courants de l'ordre de 1 m/s sur cette batture alors que la profondeur d'eau ne dépassait guère 1 m. Les courants sur la batture étaient pratiquement aussi forts que dans le chenal d'écoulement. Pendant le flot, cependant, les courants sur la batture sont beaucoup plus faibles que dans le chenal.

La dominance des courants de jusant sur la batture du méandre s'explique en partie par la stratification de la colonne d'eau. L'eau salée introduit par la marée pendant le flot a tendance à pénétrer dans la couche de fond alors que le débit fluvial (eau douce) a tendance à sortir de l'estuaire par la couche de surface durant le jusant. La batture est peu profonde et se trouve la plupart du temps dans la couche de surface. Par conséquent, les courants de flots agissent d'avantage sur le fond du chenal que sur la batture. À l'inverse, les courants de jusant sont prédominants sur la batture.

Il en résulte un transport net dirigé vers l'aval sur la batture. On peut y observer des figures sédimentaires (dunes, mégarides, rides etc.) orientées vers l'aval. Ces figures sédimentaires ont tendance à se regrouper pour former de grandes écailles sableuses (voir figure 2) de

plusieurs centaines de mètres de longueur. Ces écailles migrent vers l'aval et leur vitesse de migration augmente de l'aval vers l'amont. On peut voir à la figure 2 que les écailles sableuses en provenance de l'amont recouvrent en partie celles qui les précèdent à l'aval. La figure 4 montre que le sommet et la partie frontale des écailles sont surtout constitués de sable moyen alors que la base des écailles est constituée de sable un peu plus grossier. Cette distribution granulométrique reflète les conditions de courants, dont l'intensité et la durée augmentent en général avec la profondeur d'eau.

La batture de Val-Marguerite se distingue de celle du méandre située à l'amont. Comme le montre la figure 4, les sédiments sont plus fins en moyenne sur la batture de Val-Marguerite que sur celle du méandre. Cet affinement des tailles granulométriques reflète les conditions plus calmes qui prévalent sur la batture de Val-Marguerite. Celle-ci est située en dehors de l'axe d'écoulement du chenal principal et elle est bien protégée par la flèche sableuse. Nous ne possédons pas de mesures directes des courants sur cette batture, mais les observations visuelles suggèrent un milieu nettement plus calme. La proportion de particules fines sur cette batture est aussi beaucoup plus importante que pour celle située à l'amont. La seule partie de la batture qui présente des faciès plus grossiers est celle qui longe le chenal principal (figure 4).

La surface des battures est exposée aux vagues et aux glaces, ce qui n'est pas le cas pour les sédiments reposant au fond du chenal. Les vagues les plus importantes se propagent vers l'amont de l'estuaire ; sur la batture du méandre, les vagues ont tendance à former des micro-plages le long de la face d'aval des écailles sableuses, dispersant le sable latéralement. L'action des glaces est plus complexe et sera abordée à la prochaine section portant sur les plages de l'estuaire inférieur.

7.4.3 Les talus et les plages

L'estuaire inférieur est entouré de plages adossées à des talus sableux en érosion. Les observations de niveau d'eau montrent que la hauteur des plages est très proche des niveaux de marée haute de vive-eau. Les plages sont situées dans la zone intertidale, entre le niveau des battures (-1,0 à -0,5 m) et celui du pied de talus (+1,5 m). Le haut des plages est rarement exposé aux courants de marée et aux courants fluviaux. Ceux-ci sont en général très faibles à l'étale de marée haute lorsque les plages sont submergées. Le

transport du sable sur les plages de l'estuaire n'est donc pas causé par les courants de marée, mais plutôt par les vagues et les glaces.

Les plages jouent le rôle d'amortisseurs qui dissipent l'énergie des vagues et des clapotis qui se développent dans l'estuaire. La majeure partie des vagues qui frappent la côte dissipent leur énergie sur les plages et seules les vagues qui se forment lors de marées de vives-eaux peuvent atteindre les talus. Ces talus sont cependant très fragiles puisqu'ils sont constitués essentiellement de sable et de gravier très faiblement consolidés. La hauteur de la plage et l'érosion du talus sont fortement liées. On a pu observer lors de marée haute une corrélation entre la présence d'érosion et la hauteur de la plage ; plus la plage est haute, plus le talus présente de signes de stabilité (végétation bien développée, arbres matures, etc.). À l'inverse, le talus montre plus de signes d'érosion lorsque la plage est submergée à marée haute.

Le transport du sable sur les plages est causé principalement par les vagues et les glaces. Les vagues ont tendance à ajuster le profil ou l'angle de la plage. Les glaces peuvent soulever des sédiments dans la partie médiane de la plage et les entraîner loin de la plage. La figure 37 montre un exemple de ce processus d'érosion glacielle près de Val-Marguerite. La photographie a été prise le 1^{er} mars 1998 à environ 200 m de la plage de Val-Marguerite. On peut voir un glaçon soulevé par la marée qui a entraîné avec lui environ 30 cm de sable soudé à la base de la glace. La photographie du bas (figure 37) montre aussi un dépôt de sable et gravier laissé par un glaçon dérivant. On peut d'ailleurs voir plusieurs autres dépôts du même type à l'arrière plan de cette photographie.

La glace ne se fixe pas sur les battures parce que celles-ci ne sont pas exondées assez souvent et assez longtemps pour que le froid pénètre dans les sédiments et gèle le sable. En effet, les battures sont situées entre les cotes -1.0 et -0.5 m ; à ce niveau, le temps d'exposition de la batture à l'air libre est inférieur à 10 % du temps soit moins de 2 heures et demie par jour, ce qui est insuffisant pour que le sable gèle. Par contre, les parties médiane et supérieure de la plage sont exposées à l'air libre plus de 50 % du temps, ce qui permet au froid de pénétrer dans le sable. La marée haute dépose sur la plage la glace flottante qui s'accumule par couche successive et s'épaissit au cours de l'hiver. Cette glace est aussi exposée à l'air très froid, durant l'hiver, de sorte qu'elle se soude à la



Figure 37 Dépôts glaciels sur la batture de Val Marguerite, mars 1998
Estuaire de la Sainte-Marguerite

couche de sable gelée sous-jacente. Lorsque cette couche de glace devient assez épaisse, elle est soulevée par les marées de vives-eaux et elle entraîne avec elle la couche de sable gelée sous-jacente. Lors de la débâcle, les glaçons dérivent lentement vers les battures et le chenal, emportant le sable de la plage loin de celle-ci.

La glace n'érode pas directement le talus ou le haut de plage, mais plutôt la partie médiane de la plage. Les glaces contribuent plutôt à protéger le talus de l'érosion durant l'hiver en formant une armature et en atténuant les vagues. Au printemps, les glaces présentes sur le talus et le haut de plage fondent en place, de sorte qu'elles n'emportent par le sable du talus. Seule la partie médiane de la plage est sujette à l'érosion glacielle. Cette érosion est cependant assez forte et contribue à retirer des quantités importantes de sable de la rive. Durant la saison d'eau libre, les vagues reforment le profil de la plage en prélevant le sable dans les talus, ce qui cause localement un recul parfois important du talus.

La figure 38 montre un exemple de l'érosion du talus à Val-Marguerite, en rive gauche de l'estuaire. En dépit de diverses tentatives pour protéger la berge, l'érosion se poursuit. On a ici un bon exemple d'interaction anthropique : les protections de berges peuvent bloquer localement l'action des houles sur le talus, mais n'empêchent aucunement l'activité glacielle d'emporter le sable de la plage. Comme la seule source de sable de remplacement est l'érosion des talus, les vagues ont tendance à prélever le sable des talus voisins non protégés et à le redistribuer sur les plages des zones protégées. Les protections de berges ont donc pour effet d'accentuer l'érosion des talus avoisinants non protégés.

L'action des glaces sur les plages contribue aussi à façonner les chenaux en bordure des plages et des battures. La figure 39 montre un chenal qui longe la batture du méandre du pk 2,0. Ce petit chenal est vraisemblablement maintenu par l'action des glaces qui se forment sur la batture. Comme le montre la photographie du haut, à la figure 39, le cisaillement des glaces au contact de la rive forme des empilements de glaçons enchevêtrés qui arrachent une partie des sédiments. De plus, le poids de ces accumulations de glace provoque un affaissement des sédiments et un déplacement latéral. Par la suite, ces embryons de chenaux sont souvent élargis et approfondis par la vidange et le

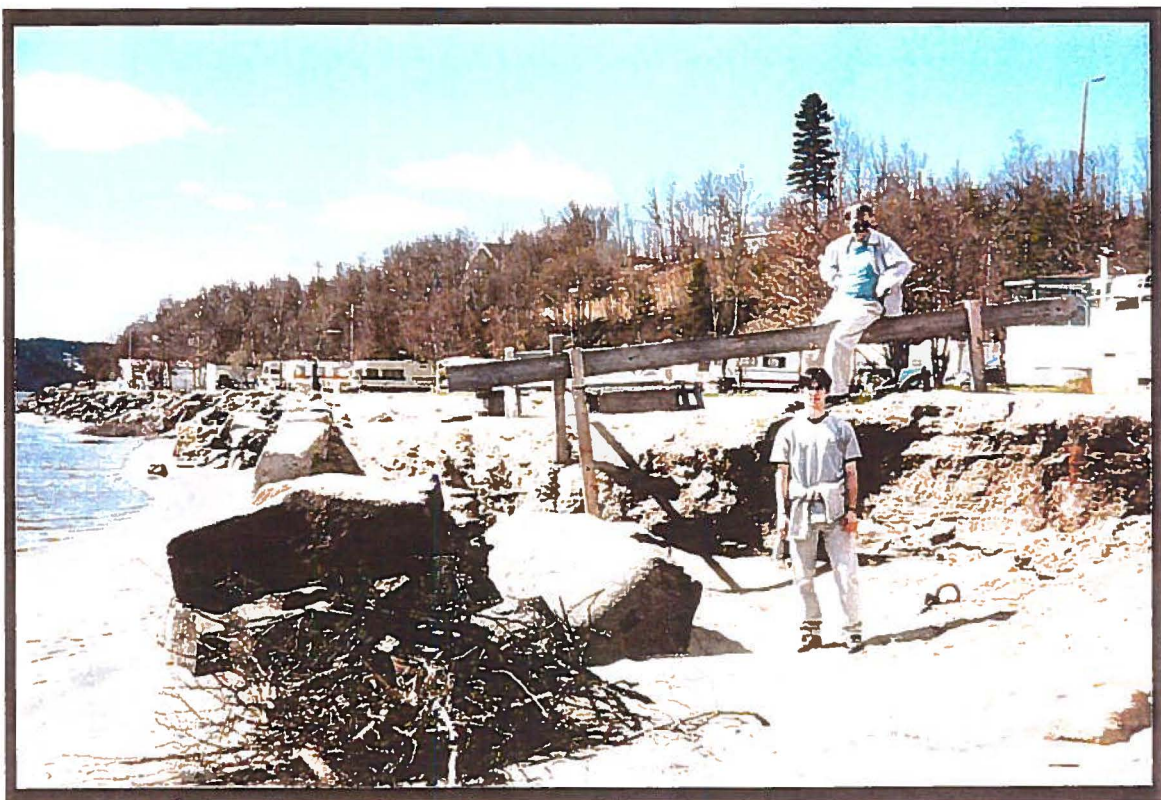


Figure 38 Érosion et protections de berge artisanales à Val-Marguerite, juin 1997



Figure 39 Zone d'activité glacielle et chenal glacial en rive droite, pk.1,0, 28 février 1998

remplissage des battures par la marée. Un chenal de ce type s'est formé près de la pointe ouest de la flèche sableuse à l'intérieur de l'estuaire, le long du contact entre la flèche et la batture de Val-Marguerite.

7.5 LA FLÈCHE SABLEUSE

La dynamique de la flèche sableuse, qui s'étire en direction ouest à partir de Val-Marguerite, est plus complexe que celle qui prévaut dans l'estuaire. Comme on l'a vu aux sections précédentes, il existe un étagement des processus hydrodynamiques qui contrôlent le transport et la nature des sédiments dans la zone d'étude. Les processus sont différents selon la profondeur ou l'élévation des dépôts. Sur le fond du chenal, les courants de marée et les courants fluviaux contrôlent la dynamique des sédiments. Sur les battures, les courants fluviaux-tidaux jouent un rôle important, mais les vagues et les glaces contribuent également aux mouvements des particules. Sur les plages et les talus, le rôle des courants fluviaux et tidaux devient plus faible; le contrôle par les glaces et les vagues devient prédominant.

La figure 40 montre que cet étagement des processus hydrodynamiques se produit aussi au niveau de la flèche sableuse. Cette figure montre deux photographies de la flèche prises à quelques semaines d'intervalle. Sur la photographie du haut, prise à marée haute le 14 septembre 1997, la pointe de la flèche apparaît recourbée vers l'intérieur de l'estuaire de la Sainte-Marguerite. Sur la photographie du bas, prise à marée basse le 24 juillet 1997, la pointe de la flèche forme plutôt un crochet recourbé vers l'extérieur de l'estuaire. En apparence, la forme de la flèche semble avoir beaucoup changée en quelques semaines.

Lorsqu'on y regarde de plus près, on peut voir que le crochet recourbé vers l'extérieur est aussi visible sur la photographie du 14 septembre (figure 40 en haut) par transparence sous l'eau. On voit que le crochet recourbé vers l'extérieur se trouve dans la partie intertidale ou submergée de la flèche. Le transport des sédiments, sur le haut de la plage est contrôlé par les vagues et la dérive littorale, laquelle favorise un transport net vers l'ouest et vers l'intérieur de l'estuaire à ce niveau. Le transport dans la partie intertidale de la flèche est similaire à celui que l'on observe en bordure des battures et il est contrôlé par l'écoulement



SOURCE DE LA PHOTOGRAPHIE : Hydro-Québec, Géomatique, 14 septembre 1997, HQ-102-156



SOURCE DE LA PHOTOGRAPHIE AÉRIENNE : Hydro-Québec, Géomatique, 24 juillet 1997, HQ-102-137.

Figure 40
Photographies de la pointe
de la flèche sableuse prises
en août et septembre 1997

fluvio-tidal à dominance vers l'aval. Ce sont donc les courants de marée et les courants fluviaux qui forment le crochet vers l'aval.

Dans la région de la flèche sableuse, cet étagement des processus hydrodynamiques agissant sur le transport des sédiments devient encore plus complexe que dans l'estuaire parce que ces processus sont plus variés et plus intenses. Les courants de marée et les courants fluviaux de la rivière Sainte-Marguerite agissent sur la pointe de la flèche et la plage intérieure ; les courants de marée du golfe du Saint-Laurent et les vagues qui se développent dans le golfe du Saint-Laurent agissent sur côté sud (ou extérieur) de la flèche ; les glaces jouent un rôle similaire à celui décrit ci-dessus à l'intérieur de l'estuaire de la Sainte-Marguerite. Le vent et le transport éolien contribuent à la formation des dunes qui parcourent la flèche et au transport du sable transversalement à la flèche dans les goulets de tempête. Enfin, il faut aussi tenir compte des composantes biologiques et humaines de la dynamique sédimentaire. La végétation de plage et des dunes joue un rôle majeur pour le maintien de l'écosystème de dunes éoliennes en trappant le sable transporté par le vent ; les activités humaines qui endommagent cette végétation (piétinement, circulation de véhicules tout-terrain) peuvent contribuer à l'érosion de la flèche.

La carte de faciès sédimentaire de la figure 4 montre que les plages entourant la flèche sont constituées de sable moyen à grossier. Le sable est plus grossier sur la plage intérieure que sur la plage extérieure. La taille des particules de sable diminue lorsqu'on se déplace du sommet de la plage vers la baie de Sainte-Marguerite et que la profondeur d'eau augmente. Du sable grossier et du gravier ont été prélevés en quelques points de la plage extérieure (côté sud) de la flèche ; ces zones de sable grossier et de gravier coïncident avec la présence de goulets de tempêtes ou de zones de forte érosion de la dune.

À son extrémité ouest, la flèche sableuse se prolonge vers le sud-ouest dans la zone intertidale, sous forme d'une flèche submergée de près de 1 km de longueur. Cette partie submergée de la flèche est surtout constituée de sable grossier. En bordure du chenal d'écoulement de l'estuaire de la Sainte-Marguerite, des écailles sableuses se développent. Ces écailles sont orientées dans la direction des courants fluviaux et elles se forment de la même manière que celles décrites ci-dessus dans l'estuaire. La partie submergée de la flèche se fusionne au delta externe de l'estuaire.

7.6 LE DELTA EXTERNE

Le delta d'embouchure ou delta externe de l'estuaire a la forme d'un demi-cercle centré sur le pédoncule de l'épi sableux situé à 1,3 km à l'ouest de l'embouchure (voir position à la figure 1 et sur la photographie aérienne de 1997, figure 7). Ce delta s'avance dans la baie Sainte-Marguerite jusqu'à environ 800 m de la rive. La position décalée vers l'ouest du delta et du chenal d'écoulement dans la zone de l'embouchure reflète la dominante vers l'ouest de la dérive littorale. La modélisation du transport littoral, par Ouellet (dans Roche 1990) montre en effet que les vagues en provenance du secteur est sont plus fortes, quoique moins fréquentes que les vagues du secteur ouest. La dérive littorale s'effectue donc vers l'ouest ce qui force le chenal d'écoulement et les bancs sableux à dévier dans cette direction.

7.6.1 Influences maritimes et estuariennes

À l'embouchure de l'estuaire de la Sainte-Marguerite, deux systèmes hydrodynamiques agissent sur les dépôts sableux. Le premier est assujetti aux influences « estuariennes » ; il est lié à l'écoulement fluvio-tidal qui s'effectue dans l'axe de l'estuaire et qui a tendance à aligner les dépôts perpendiculairement au rivage de la baie Sainte-Marguerite. Le second système est d'origine « maritime » ; il est lié à la dérive littorale causée par les vagues et les courants de marée qui prévalent dans le golfe du Saint-Laurent. Ceux-ci tendent à aligner les dépôts parallèlement à la rive de la baie Sainte-Marguerite et à donner à cette rive une forme en arc continue reliant les pointes rocheuses de Pointe aux Jambons et Pointe à la Chasse (voir figure 1).

La forme du delta externe est le résultat d'un équilibre entre ces deux systèmes hydrodynamiques « estuarien » et « maritime ». Si la baie Sainte-Marguerite n'était pas affectée par les vagues et les courants de marée du golfe du Saint-Laurent, les sédiments de la rivière Sainte-Marguerite formeraient un cône deltaïque comme on peut en trouver à l'embouchure de la plupart des rivières, soit un vaste épanchement de sable en éventail centré sur l'embouchure et traversé en son centre par un chenal principal se ramifiant en chenaux secondaires et tertiaires. À l'inverse, si l'on pouvait arrêter complètement l'écoulement fluvio-tidal de l'estuaire de la Sainte-Marguerite, le delta actuel serait progressivement remanié par les vagues et les courants de marée du golfe du Saint-

Laurent, et il disparaîtrait pour former une longue plage en arc très régulière, constituée d'une plage émergée et d'une série de barres submergées parallèles à cette plage.

7.6.2 Déplacements du chenal d'écoulement

Comme les deux systèmes hydrodynamiques agissent ensemble, le delta d'embouchure se forme, mais les vagues remplissent et effacent les chenaux secondaires et tertiaires à mesure qu'ils se développent lors des crues de la rivière. La dérive littorale dominante en direction ouest tend à remplir continuellement le chenal d'écoulement sur son flanc est (ou gauche) ce qui le force à dévier vers l'ouest et à se rabattre vers la rive de Gallix.

Lors de fortes crues de la rivière, le chenal tend à se redresser et à bifurquer vers l'est parce que le débit très élevé sortant de la rivière a tendance à se percer un chemin le plus court possible à travers le delta. En condition de crues fortes, les courants les plus élevés dans le chenal d'écoulement se produisent vers la fin du jusant, alors que le courant de marée du golfe du Saint-Laurent est dirigé vers l'est. La rencontre des deux courants, l'un sortant de l'estuaire et l'autre longeant la côte en direction est, favorise le développement très rapide de chenaux secondaires qui s'étirent en direction sud en bifurquant vers l'est et qui deviennent vite plus importants que le chenal principal. Le développement de tels chenaux secondaires lors de fortes crues de la rivière Sainte-Marguerite a vraisemblablement causé le réalignement vers le sud et vers le sud-est du chenal principal en 1956 et 1959, ainsi qu'en 1979 et 1982 (voir photographies mosaïques des figures 6 et 7).

Depuis 1987, le régime hydrologique de la rivière Sainte-Marguerite en conditions de crue est nettement moins élevé qu'auparavant, comme le montre la figure 14 de la section 3. Dans ces conditions, les processus maritimes (vagues et marée du golfe du Saint-Laurent) dominent les processus estuariens (écoulement fluvio-tidal) au niveau du delta externe. Lorsque les processus maritimes dominent le régime hydrodynamique, les chenaux secondaires ont tendance à s'estomper et à disparaître et la portion submergée de la flèche sableuse s'étire vers l'aval et se relève pour former une flèche intertidale continue et très large qui se prolonge sur près de 1,0 km en direction du sud-ouest. Lorsque les vagues traversent cette flèche intertidale, elles transportent du sable qui tombe dans le chenal d'écoulement et s'accumule sur le flanc gauche du chenal. Comme la section mouillée du

chenal tend à se maintenir à cause des circulations fluvio-tidales, l'ensablement continu du chenal sur son flanc gauche se traduit par une migration nette vers la droite (ou vers la rive de Gallix) du chenal principal. Des protections de berges comprenant un mur et des épis rocheux ont été installés à Gallix en 1994 (voir figure 12) pour contrer l'érosion de la berge causée par cette migration du chenal.

7.6.3 L'épi sableux

L'épi sableux (figure 1 et 7) situé en face de Gallix se développe lorsque les conditions maritimes sont dominantes par rapport aux conditions estuariennes. Cet épi est le résultat d'une convergence de la dérive littorale en provenance de l'ouest et du transport net vers l'aval dans le chenal d'écoulement. Lorsque le chenal longe la côte de Gallix, en conditions de dominance des processus maritimes, les vagues du secteur est sont atténuées par la présence de la flèche submergée, ce qui favorise la dérive littorale en provenance de l'ouest le long de la plage du Gallix. À mesure que le sable transporté vers l'est le long de la plage de Gallix approche de l'embouchure, il est exposé aux forts courants de jusant qui prévalent dans le chenal et qui s'opposent à cette dérive littorale vers l'est. L'épi sableux s'est développé dans la zone où les deux systèmes de transport (courant fluvial et dérive littorale) se neutralisent. Comme le sable ne peut aller nulle part dans cette zone, il forme une accumulation (l'épi sableux) qui s'étire perpendiculairement au rivage.

Les mosaïques de photographies aériennes présentées aux figures 6 et 7 montrent que l'épi sableux est très instable et qu'il s'est détruit et reformé à plusieurs reprises depuis 1950. La longue période de près de 12 ans sans crues majeures qui s'est écoulée depuis 1985 a favorisé le développement de l'épi sableux qui a atteint une taille considérable. L'épi était présent en 1965 et 1976 mais il est absent sur les photographies de 1956, 1970, 1979 et 1982. On peut en conclure que l'épi constitue une très importante réserve de sable qui peut être remaniée rapidement lorsque les conditions hydrodynamiques sont modifiées. Une réduction des apports fluviaux devrait normalement favoriser le maintien de cet épi sableux.

7.6.4 Barre de ceinture

Le delta externe est ceinturé par une barre submergée peu profonde (environ -1,0 à -1,5 m). L'analyse des courants et des circulations à l'embouchure et sur le delta externe (voir section 7.3.3) montre que la barre de ceinture est exposée à des courants de jusant

au moins aussi forts que ceux qui prévalent dans le chenal à l'embouchure. Ces courants sont dirigés perpendiculairement à la barre de ceinture et ils ont tendance à pousser le sable de la barre vers le large lors des crues de la rivière Sainte-Marguerite. Par contre, en conditions d'étiage de la rivière Sainte-Marguerite, les courants de flots se conjuguent avec les vagues en provenance du golfe du Saint-Laurent pour favoriser un rehaussement de la barre et sa migration vers l'embouchure. Ce rehaussement et cette migration vers l'amont de la barre ont pour effet de réduire rapidement la section mouillée au-dessus de la barre. La barre se comporte donc comme un seuil très mobile qui se modifie au besoin pour conserver l'intensité des courants dans une fourchette très limitée.

Le contrôle hydrodynamique à court terme de toute la zone deltaïque s'effectue au niveau de cette barre de ceinture. La moindre modification du régime hydrologique a pour effet de provoquer très rapidement un réajustement de la hauteur et de la longueur de cette barre. La barre agit alors comme un seuil et elle provoque une troncature de la marée basse qui conditionne la limite inférieure des niveaux d'eau dans l'estuaire. La barre de ceinture absorbe aussi l'énergie des plus fortes vagues, ce qui protège l'ensemble du delta et des plages. Enfin, la présence de la barre permet une circulation du sable dans l'axe de la plage de la baie Sainte-Marguerite. La dérive littorale qui circule au niveau de la barre de ceinture est probablement très importante, parce que cette zone est directement exposée aux plus fortes vagues provenant du golfe du Saint-Laurent.

7.7 SOMMAIRE DE LA DYNAMIQUE SÉDIMENTAIRE

Les sections précédentes ont permis de passer en revue les principaux processus hydrodynamiques qui contrôlent la distribution des faciès sédimentaires dans l'estuaire de la Sainte-Marguerite. L'analyse des données sur la dynamique sédimentaire caractérise la zone d'étude comme suit :

- 1) La répartition des tailles granulométriques des dépôts meubles de l'estuaire reflète assez fidèlement la répartition des unités stratigraphiques. Près de la tête de l'estuaire, les berges et le lit sont rocheux. Dans la partie supérieure de l'estuaire, les dépôts de surface sont constitués d'une mince couche de sable de quelques centimètres d'épaisseur reposant en discordance sur les silts-argileux, reliques de la mer de

Goldthwait, qui affleurent à cet endroit. Dans l'estuaire inférieur (pk 0.0 à 3.0), les faciès sableux et graveleux sont dominants.

- 2) Un classement vertical des dépôts de surface est présent dans l'estuaire : plus la profondeur est faible, plus les tailles des particules s'affinent dans le chenal, sur les battures et sur les plages. Ce classement vertical des particules reflète l'étagement des conditions hydrodynamiques de l'écoulement fluvio-tidal dans l'estuaire, dont l'intensité diminue avec la profondeur de l'eau.
- 3) La rivière Sainte-Marguerite n'est pas une source importante de sable et de gravier comme en témoigne la présence de deux petites fosses de 6 m situées de part et d'autre du rapide de tête et qui ont survécu à la disparition du frasil dans l'estuaire. Les dépôts dans le chenal et sur les battures sont alimentés en sable et gravier par l'érosion des berges et des plages locales.
- 4) Les dépôts les plus mobiles de l'estuaire de la Sainte-Marguerite sont situés sur le pourtour des battures qui entourent le chenal dans l'estuaire inférieur. À cet endroit se forment de grandes écailles sableuses qui migrent vers l'aval sous l'effet des courants de jusant en s'emboîtant les unes dans les autres. Ces écailles se prolongent en bordure du chenal jusqu'à l'extérieur de l'estuaire, le long de la partie intertidale de la flèche sableuse. Le transport des sédiments dans le chenal lui-même est assez limité parce que ceux-ci sont très grossiers.
- 5) L'activité glacielle est une cause importante de l'érosion des plages de l'estuaire. Les glaces soudées au sable de la partie médiane de la plage sont soulevées par les marées de vives-eaux et contribuent à répartir le sable et le gravier sur les battures et dans le chenal d'écoulement. Les vagues en conditions d'eau libre reforment le profil des plages en prélevant du sable dans les talus lors de marées hautes extrêmes. Pratiquement toutes les berges de l'estuaire sont en érosion. Le déboisement du haut des talus peut activer l'érosion localement et provoquer des glissements.
- 6) La flèche sableuse est en érosion aussi bien à l'intérieur qu'à l'extérieur de l'estuaire. Les dunes de la flèche montrent des signes de recul. Dans les zones marquées par une érosion rapide, les sédiments de la plage sont plus grossiers qu'ailleurs (sable grossier et gravier). Il est probable que l'érosion des dunes soit aggravée par certaines activités

humaines, comme le passage de véhicules tout-terrain et le piétinement de la végétation. La pointe ouest de la flèche est sa partie la plus mobile. Cette pointe se déplace rapidement sous l'effet des courants fluvio-tidaux et de la dérive littorale. Les plages de la flèche sont très sensibles à toute modification des apports de sable dans cette zone. La région du pédoncule est particulièrement sensible parce qu'elle est très étroite et très basse.

- 7) Le delta externe a subi de grandes modifications au cours des dernières décennies. Les mouvements de sable sur le delta externe sont plutôt le résultat de déplacements locaux de grands volumes de sable sur de courtes distances que de nouveaux apports. L'estuaire de la Sainte-Marguerite et la dérive littorale livrent très peu de sable dans la zone du delta externe par comparaison aux déplacements qu'on y observe. Le volume de sable libéré par l'érosion des berges de l'estuaire est vraisemblablement inférieur à 20 000 m³/an. La contribution de la rivière Sainte-Marguerite elle-même est négligeable. D'après Ouellet (dans Roche 1990), la capacité de transport du sable par la dérive littorale est inférieure à 80 000 m³/an. Les mouvements de sédiments observés sur les photographies aériennes représentent des déplacements de plusieurs centaines de milliers de mètres cubes de sédiments annuellement, et parfois de millions de mètres cubes. Ces déplacements locaux de grands volumes de sédiments semblent surtout associés aux événements extrêmes qui se produisent à l'embouchure de l'estuaire, comme des fortes tempêtes ou des crues exceptionnelles.
- 8) L'hydrodynamique de l'estuaire et du delta externe est en partie contrôlée par la barre sableuse qui ceinture le delta en longeant la flèche sableuse sur toute sa partie intertidale et en contournant l'épi sableux. Cette barre de ceinture joue le rôle d'un seuil de contrôle qui maintient les courants de jusant sortant de l'estuaire à l'intérieur d'une fourchette de valeurs très étroite. La barre constitue un seuil très mobile dont la hauteur et la longueur dépendent de l'équilibre entre les courants de jusant d'une part, et les courants de flots combinés aux vagues provenant du golfe du Saint-Laurent d'autre part. Selon la dominance des uns par rapport aux autres, ces processus hydrodynamiques modifient très rapidement les caractéristiques de la barre (hauteur, forme, longueur), ce qui en retour ajuste la section d'écoulement à l'entrée du delta et détermine les volumes d'eau échangés par la marée dans l'estuaire. Lors d'un

changement de régime hydrodynamique, la barre de ceinture s'ajuste en premier, puis le delta externe et enfin l'estuaire.

Sainte-Marguerite ; les valeurs les plus élevées dépassent 0,25 mg/m³ ou 0,25 µg/L, mais on n'en connaît pas la limite supérieure (Roche, 1989 : 44-59).

Des données de la qualité de l'eau provenant d'une station située immédiatement en amont du barrage de SM-2 ont été recueillies six fois de mars à octobre 1995 (Consortium Roche / Dessau, 1996). Les eaux arrivant à la tête de l'estuaire sont peu chargées en éléments nutritifs ; la biomasse chlorophyllienne dans le réservoir SM-2 atteint 0,5 µg/L en été. La variabilité saisonnière est peu marquée en dehors de la crue printanière ; la crue a pour effet de diluer les ions majeurs et d'augmenter la charge organique.

8.1 ÉCHANTILLONNAGE DE 1997 DANS L'ESTUAIRE ET SON PANACHE

On trouvera les détails méthodologiques du protocole d'échantillonnage, de préparation et d'analyse des échantillons à la section 2.4 de la partie II de la présente étude, ainsi que les résultats du traitement statistique. Pour faciliter la compréhension des résultats, un bref rappel de l'échantillonnage est nécessaire. En 1997, l'échantillonnage de juin a été à l'embouchure et dans la zone du panache de l'estuaire, en direction sud à partir d'une distance de 3,5 km jusqu'à 8 km de l'embouchure (carte 2). Par contre tous les échantillons de juillet 1997 ont été prélevés à l'intérieur de l'estuaire. À chaque campagne, trois échantillons représentatifs de 6 classes de salinité ont été recueillis en surface. Un tableau synthèse des moyennes, écarts-types et écarts totaux est cependant reproduit plus bas (tableau 8).

Tableau 8 *Moyenne, écart-type, valeur minimale et valeur maximale des concentrations d'éléments nutritifs et sestoniques de l'estuaire de la Sainte-Marguerite et son panache en juin (N = 18) et juillet (N = 18) 1997*

	Salinité	SiO ₄	PO ₄	NO ₃	NH _{3,4}	COP	NOP	MPS	Chlor.	Phéo.
	‰	µmol./L	µmol./L	µmol./L	µmol./L	µg/L	µg/L	mg/L	µg/L	µg/L
Juin										
Moyenne	10,89	14,59	0,09	0,26	0,70	478,29	49,13	5,11	1,04	0,09
Écart-type	7,97	7,69	0,03	0,13	0,23	115,94	7,77	0,65	0,47	0,22
Minimum	0,04	0,00	0,04	0,10	0,47	287,60	34,00	3,95	0,28	-0,28
Maximum	23,07	23,27	0,14	0,64	1,33	652,70	64,30	6,14	1,85	0,61
Juillet										
Moyenne	9,71	16,37	0,10	0,59	0,62	491,14	53,91	6,27	0,54	0,38
Écart-type	7,37	9,68	0,06	0,16	0,13	94,51	10,69	1,50	0,41	0,12
Minimum	0,02	1,63	0,03	0,32	0,32	306,00	34,50	4,39	0,16	0,24
Maximum	22,06	32,45	0,27	0,93	0,95	733,00	78,30	10,63	1,87	0,64

Les valeurs moyennes des trois échantillons d'eau douce récoltés à la surface en estuaire en 1997 sont comparées à celles provenant d'un prélèvement intégré (0-10 m) de la station 069 située en réservoir à l'amont du barrage de SM-2 en mai et juillet 1995 (tableau 9). Les unités de tous les paramètres sauf la matière en suspension et la chlorophylle ont dû être transformées pour être comparées.

Sauf pour la conductivité et la silice, les paramètres sont généralement du même ordre de grandeur. Les différences notées pour la conductivité proviennent principalement des seuils de détection des appareils de mesure utilisés lors de ces deux campagnes. Les concentrations en silice mesurées en 1997 sont extrêmement basses et les écarts par rapport aux valeurs de 1995 sont inexplicables. Les concentrations en éléments nutritifs et en chlorophylle sont faibles dans les deux milieux. On note une légère augmentation des éléments sestoniques (COP et MPS) dans l'estuaire par rapport au réservoir SM-2 ; il faut se rappeler qu'un réservoir est un milieu favorisant la sédimentation des particules organiques et inorganiques.

Tableau 9 *Comparaison de la qualité de l'eau à la station située en amont du barrage de SM2 en 1995 et en eau douce dans l'estuaire en 1997*

Site et Date	Conduct (µS/cm)	Silice (mgSiO ₂ /L)	PO ₄ (mgP/L)	NO ₃ (mg N/L)	NH _{3,4} (mg N/L)	COP (mg C/L)	MPS (mg/L)	Chloro. (µg/L)
SM2								
25-05-95	10,2	3,87		<0,02	<0,02	0,4	1,9	0,4
12-07-95	10,0	2,92	<0,002	<0,02	<0,02		2,3	0,5
Estuaire								
09-06-97	45,0	0	0,003	0,03	0,01	0,55	4,2	0,30
19-07-97	18,7	0,11	0,002	0,05	0,01	0,60	4,9	0,28

8.2 VARIATION SPATIO-TEMPORELLE DES VARIABLES PHYSICO-CHIMIQUES

Les deux séries de relevés ont été réalisées dans des conditions hydrodynamiques fort différentes. En juin, ce sont les eaux du panache externe qui ont été échantillonnées pendant la fin du jusant et le début du flot sous un débit fluvial de 430 m³/s. En juillet, l'eau salée pénètre dans l'estuaire sous débit de l'ordre de 200 m³/s. Il convient alors de vérifier s'il existe, au point de vue temporel, des différences entre les deux séries, puis de vérifier

le lien entre chacune des variables et la salinité. Le détail du traitement statistique apparaît à la section 2.4 de la partie II de la présente étude.

Les valeurs moyennes des variables physico-chimiques ne sont pas significativement (voir tableau 8) différentes entre les deux séries d'échantillonnage, à l'exception des nitrates ($0,26 \mu\text{mol./L}$ et $0,59 \mu\text{mol./L}$), des matières en suspension ($5,11 \text{ mg/L}$ et $6,27 \text{ mg/L}$) et de la chlorophylle ($1,04 \mu\text{g/L}$ et $0,54 \mu\text{g/L}$).

Pour la grande majorité des variables, les valeurs observées sont significativement différentes entre les différentes classes de salinité. Seules les valeurs de nitrates de la série de juin et les valeurs combinées d'azote ammoniacal et de NOP ne présentent pas de différences significatives.

Parmi les nutriments (figure 41), les orthophosphates et les nitrates varient de façon linéaire avec la salinité : les orthophosphates augmentent de façon significative avec la salinité, alors que les nitrates diminuent de façon significative pour la série de juillet et semblent invariables dans la série de juin. Les teneurs en azote ammoniacal sont stables quelle que soit la salinité. Quant aux silicates, ils varient de la même façon dans les deux séries, et bien qu'une corrélation significative soit révélée, le patron de variation reste intrigant et suggère que les eaux saumâtres (entre 5 ‰ et 15 ‰) sont plus chargées en silicates.

En ce qui concerne les éléments sestoniques (figure 42), le carbone et l'azote organiques diminuent en fonction de la salinité, cette tendance étant plus marquée pour le carbone organique. La chlorophylle et les matières en suspension augmentent de façon très significative avec la salinité dans la série de juillet alors que les augmentations révélées par les corrélations positives sont peu ou pas significatives dans la série de juin, (respectivement).

À la lumière de ces résultats statistiques, l'eau douce contiendrait plus de nitrates, plus de carbones et d'azote organiques particuliers que l'eau salée. Les eaux marines pourraient être une source d'orthophosphates et le siège d'une plus grande biomasse chlorophyllienne et de plus de matières en suspension. Toutefois, seuls les orthophosphates, le carbone et l'azote organiques particuliers conservent un lien avec la salinité durant les deux séries d'échantillonnage. Pour les nitrates, la matière en suspension et la chlorophylle, le lien n'est

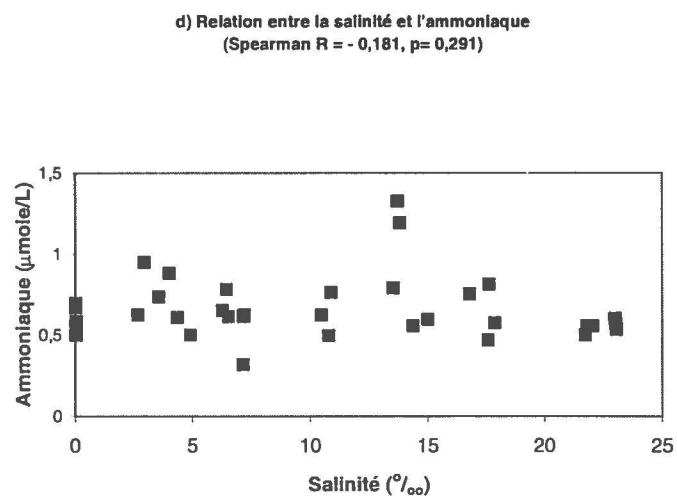
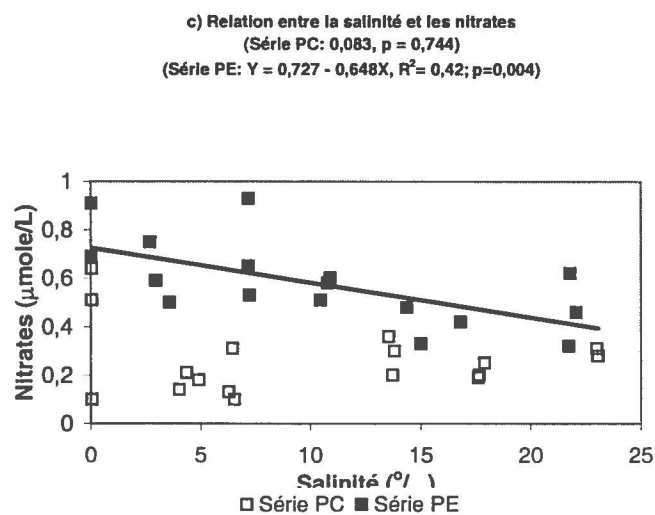
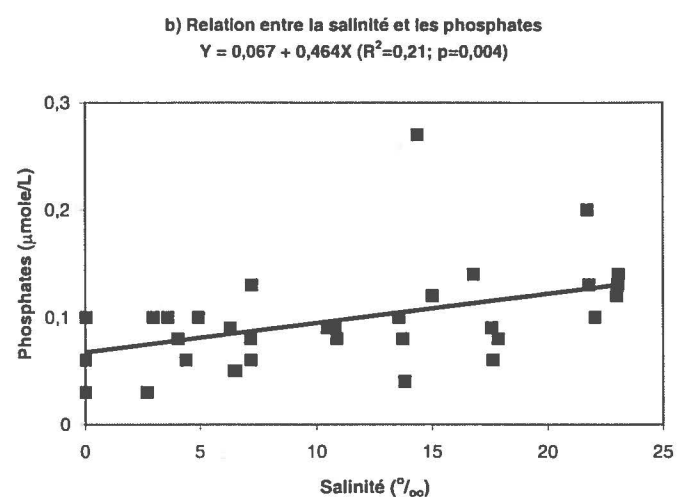
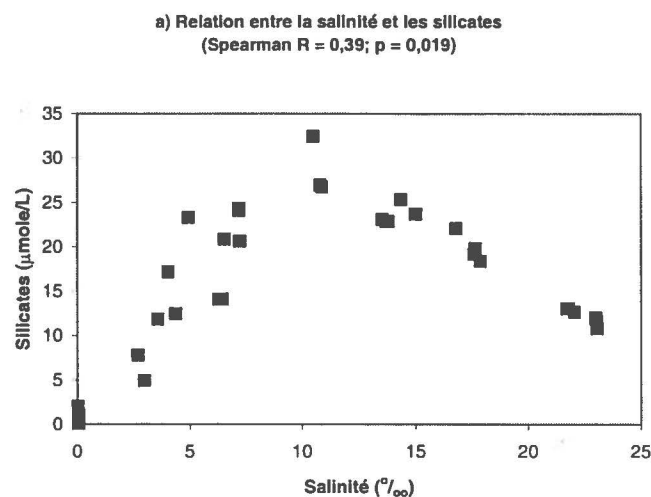


Figure 41
Concentration des nutriments en fonction de la salinité

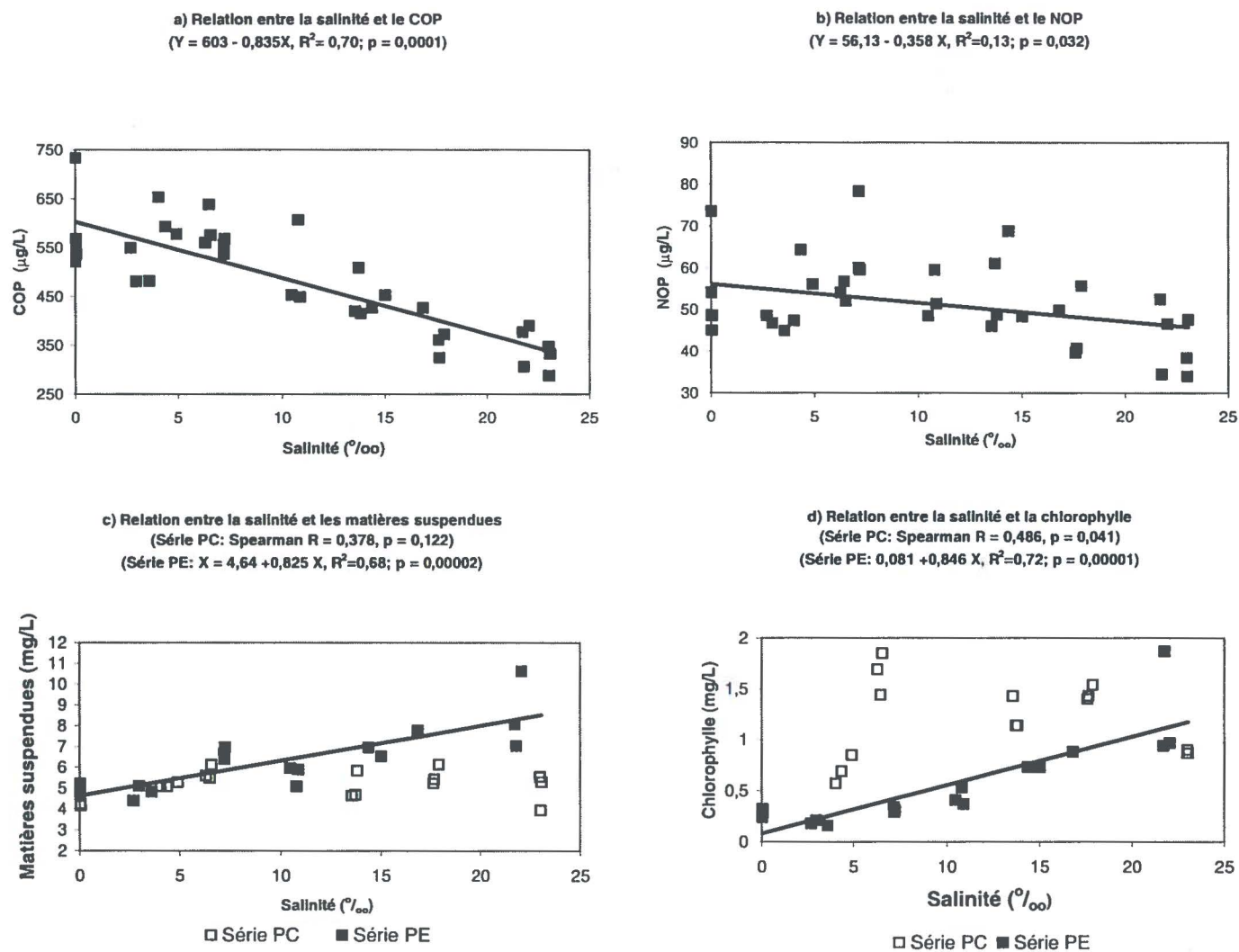


Figure 42

Concentration des éléments sestoniques en fonction de la salinité

pas établi dans les eaux du panache en juin ; ce qui signifie que d'autres facteurs que la dilution influencent leur concentration dans l'estuaire, notamment le temps de résidence des eaux.

Les données de température de 1997 suggèrent fortement que le temps de résidence du panache dépasse une journée. C'est dans les eaux à salinité intermédiaire du panache que les valeurs de chlorophylle peuvent atteindre 1,5 à 2 $\mu\text{g/L}$; en estuaire, que ce soit en juin ou juillet, elles sont inférieures à 1 $\mu\text{g/L}$ sauf pour 1 des 3 échantillons prélevés à l'embouchure (figure 42). Il semble y avoir un lien entre le temps de résidence de l'eau et la biomasse chlorophyllienne. Bien qu'un courant net se développe vers l'aval en surface, il se superpose aux courants de marée en renforçant le courant de jusant. Ainsi, le courant de surface passe de 0 m/s au début du flot à 1 m/s au plein jusant à la station B2 (figure 32), alors qu'il s'oriente vers l'amont à l'embouchure à une vitesse de 1 m/s au début du flot et vers l'aval à 1,2 m/s au plein jusant (figure 31). Le temps de résidence des eaux est assez court sous ces forts courants, ce qui ne favorise pas une forte production chlorophyllienne.

Les valeurs de biomasse chlorophyllienne obtenues à la surface dans l'estuaire de la Sainte-Marguerite (moins de 1 $\mu\text{g/L}$) et son panache (jusqu'à 1,5 $\mu\text{g/L}$) sont faibles comparées aux valeurs de 3 mg/m^3 de Therriault et Levasseur (1985) dans l'estuaire maritime du Saint-Laurent, mais de l'ordre de grandeur de la région du nord-ouest du golfe qui sont de $0,69 \pm 0,36 \text{ mg/m}^3$ à 1 m sous la surface (Gilbert et al., 1997).

En somme, l'eau salée est source d'orthophosphates, tandis que l'eau douce est source de carbone et d'azote organiques particuliers. Ce constat est consistant avec les résultats des études sur la contribution des eaux douces des rivières des baies James et d'Hudson (SEBJ, 1990 ; Hudon et al., 1996). Les grandes rivières nordiques n'apportent pas les éléments nutritifs qui pourraient être déficients dans les eaux marines.

Les effets de la réduction du débit fluvial sur la production chlorophyllienne ont été suivis dans l'estuaire de l'Eastmain, tributaire de la côte est de la baie James. La forte poussée de phytoplancton en août 1980 (Ingram et al., 1985), dans la portion maritime de l'estuaire de l'Eastmain après la réduction de 90 % de son débit fluvial, était due principalement à une diatomée associée aux plantes aquatiques (*Cylindrotheca fusiformis*) et non à une floraison des espèces planctoniques. De plus, dans le cas de l'Eastmain, une augmentation des

éléments nutritifs était notée dans les eaux douces (Roy et Messier, 1989). Quatre ans après la réduction du débit, les concentrations en nutriments en eau douce et en eau saumâtre étaient relativement élevées, mais la biomasse chlorophyllienne la plus élevée était mesurée en eau douce et non en eau saumâtre (Messier, 1985). Le cas de la Sainte-Marguerite pourrait être différent car on ne prévoit pas d'augmentation marquée en éléments nutritifs lors du remplissage du réservoir Sainte-Marguerite-3 (Consortium Roche/Dessau, 1996).

9 FAITS SAILLANTS

Les mesures effectuées en 1997-1998 ont servi à compléter l'état de référence du milieu physique et des caractéristiques physico-chimiques de l'estuaire de la Sainte-Marguerite.

Les principaux faits saillants sont les suivants :

- 1) Les fonds de l'estuaire et de la zone deltaïque externe sont fortement dominés par les sables qui représentent en moyenne 88 % des dépôts de surface. Les sables sont mobiles et très peu cohésifs. L'estuaire s'est encaissé dans ses anciens dépôts deltaïques ; la distribution des dépôts mobiles du lit de l'estuaire reflète la stratigraphie et la composition des terrasses deltaïques environnantes.
- 2) L'estuaire, d'une forme triangulaire, a une longueur de 6,7 km et est parcouru par un seul chenal principal. La profondeur du chenal varie de 6 m à la tête à un minimum de 2,1 m au point kilométrique (pk) 4,5. L'estuaire est parsemé de hauts-fonds émergeant lors des marées basses de vives-eaux.
- 3) Les comparaisons des photographies aériennes de 1950 à 1997 et des profils bathymétriques de 1994 et 1997 mettent en relief la variabilité inter-annuelle des mouvements de sable dans la région de l'embouchure, comprenant la flèche, le chenal et le delta externe ; on constate aussi l'influence grandissante des activités humaines, tels les ouvrages de protection et le passage de véhicules tout-terrain, sur l'évolution des berges et des cordons dunaires.
- 4) Le débit moyen de l'année 1996-1997 ($134 \text{ m}^3/\text{s}$) est comparable au débit module à long terme de la rivière Sainte-Marguerite ($138 \text{ m}^3/\text{s}$). La crue printanière de 1997 est faible en termes de débit de pointe, mais moyenne en termes de volume d'eau. Les observations de 1997-1998 ont été réalisées sur une gamme plus étendue de débits fluviaux, permettant ainsi d'améliorer la compréhension de la dynamique des courants, des masses d'eau et des sédiments de l'estuaire.
- 5) Un débit fluvial très élevé amortit et ralentit la marée dans l'estuaire. Pour un écart de l'ordre de $300 \text{ m}^3/\text{s}$, on note une différence d'amplitude de 0,12 m à l'embouchure et de 0,28 m à la tête de l'estuaire. L'onde principale (M_2) traverse l'estuaire en 48 min

sous 446 m³/s et en 30 min sous 148 m³/s. La faible profondeur de l'estuaire cause également une déformation de l'onde de marée par frottement : la durée du jusant est plus longue que la durée du flot et cette déformation s'accroît vers l'amont et sous l'influence d'un débit fluvial élevé.

- 6) On rencontre deux masses d'eau dans l'estuaire : l'eau douce provenant de la rivière et l'eau de surface du golfe du Saint-Laurent dont la salinité varie de 25 ‰ en mai à 32 ‰ à la fin août. Lorsque le débit dépasse 425 m³/s, l'estuaire est entièrement rempli d'eau douce ; il se forme alors un panache d'eau saumâtre d'une superficie d'au moins 70 km² dans la baie Sainte-Marguerite. Sous débit fluvial de 30 m³/s, de l'eau à 25 ‰ atteint le pied du rapide situé à 6,7 km de l'embouchure entre ces événements extrêmes ; l'estuaire est tantôt stratifié en deux couches superposées, tantôt assez bien mélangé, selon l'état de la marée et les conditions de débit fluvial. Les conditions de salinité sont donc extrêmement variables dans le temps et l'espace.
- 7) La prédominance du courant de jusant, dans le centre de l'estuaire et à son embouchure, commence à s'établir lorsque le débit fluvial excède 300 m³/s. Cependant, les courants s'inversent encore à l'embouchure durant le flot à des débits supérieurs à 425 m³/s. Lorsque la colonne d'eau est stratifiée, une circulation à deux couches s'établit. On note alors un écoulement résultant net vers l'aval dans la couche de surface et un écoulement net vers l'amont dans la couche de fond durant un cycle de marée ; ces courants se superposent aux courants de marée.
- 8) La rivière Sainte-Marguerite n'est pas une source importante de sable et de gravier à l'estuaire. Les grandes écailles sableuses qui bordent le chenal de l'estuaire inférieur constituent les dépôts sableux les plus mobiles. La flèche sableuse est en érosion, aussi bien du côté de l'estuaire que sur la façade maritime ; la pointe ouest de la flèche se déplace rapidement sous l'effet des courants fluviaux-tidaux et de la dérive littorale. Le delta externe montre de grands déplacements de sable entre 1950 et 1997. Ces déplacements locaux de centaines de milliers de mètres cubes de sédiments annuellement sont très importants comparativement aux apports nets annuels provenant de l'érosion des berges de l'estuaire et du littoral marin, dont la contribution totale est très inférieure à 100 000 m³/an.

- 9) La barre de ceinture du delta externe joue le rôle d'un seuil de contrôle qui maintient les courants de jusant sortant de l'estuaire à l'intérieur d'une fourchette de valeurs très étroite. La hauteur et la longueur de ce seuil dépendent de l'équilibre entre les courants de jusant d'une part, et les courants de flots et les vagues du golfe du Saint-Laurent d'autre part. Lors d'un changement de débit fluvial, la barre de ceinture s'ajuste en premier, puis le delta externe et enfin l'estuaire.
- 10) L'eau douce est source de carbone et d'azote organiques particuliers dans l'estuaire de la Sainte-Marguerite, mais elle n'est pas une source importante d'éléments nutritifs. La biomasse chlorophyllienne est très faible en estuaire (moins de $1 \mu\text{g/L}$) mais est légèrement plus élevée dans les eaux relativement plus chaudes du panache en juin (jusqu'à $1,5 \mu\text{g/L}$).

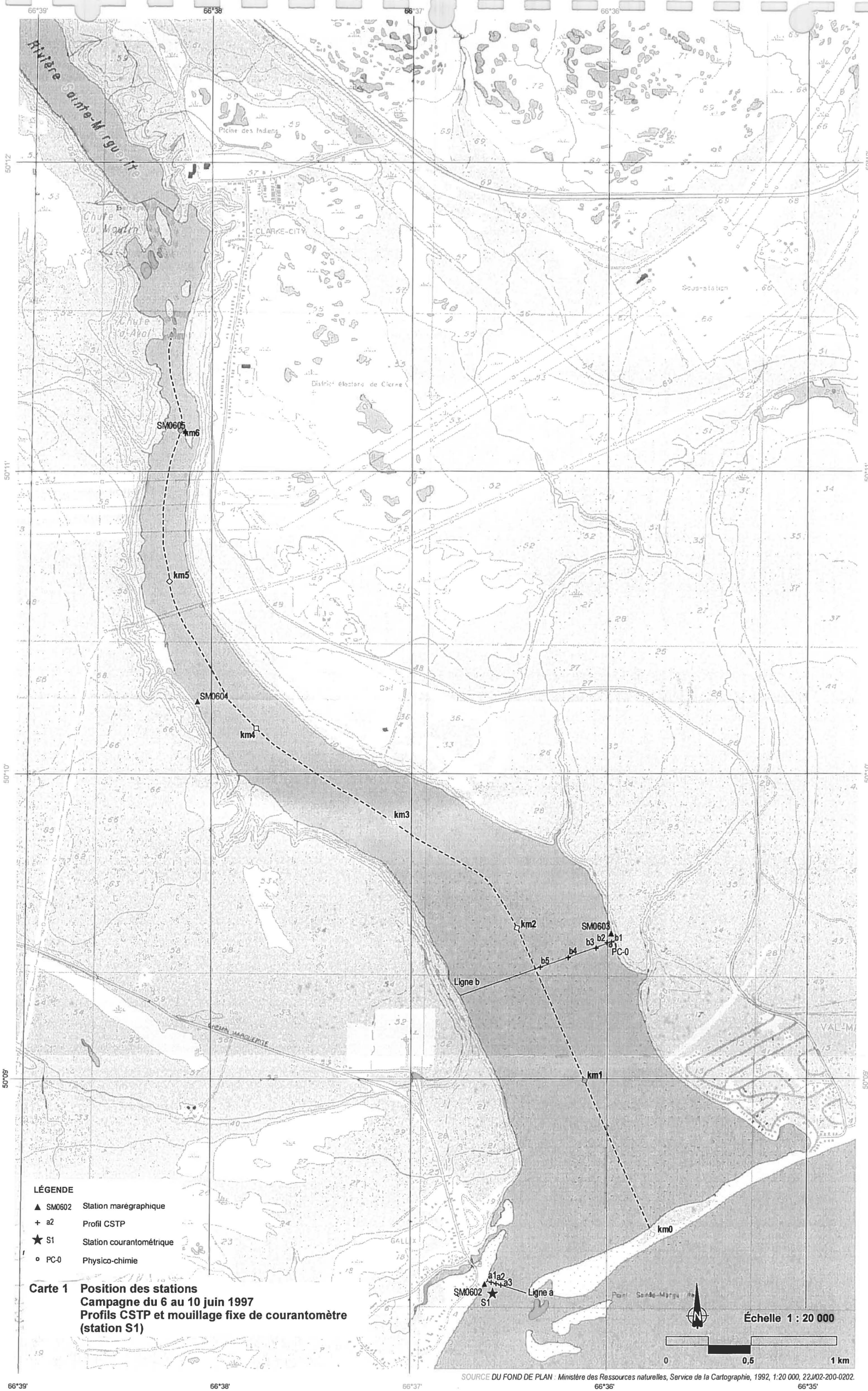
10 RÉFÉRENCES

- Cataliotti-Valdina, D. et B.F. Long (1984). *Évolution estuarienne d'une rivière régularisée en climat sub-boréal: la rivière aux Outardes (côte nord du golfe du Saint-Laurent)*. Canadian Journal of Earth Sciences, 21: 25-34.
- Consortium Roche / Dessau (1996). *Aménagement hydroélectrique Sainte-Marguerite-3 ; suivi environnemental 1995 ; qualité de l'eau ; état de référence*. Pour Hydro-Québec. 77 p. et annexes.
- CSSA Consultants Itée (1993). *Suréquipement des aménagements du complexe Outardes ; avant-projet phase I ; analyse des répercussions relatives aux milieux physique et biologique de l'estuaire de la rivière aux Outardes*. Pour Hydro-Québec. 106 p. et annexes.
- CSSA Consultants Itée (1995). *Aménagement hydroélectrique Sainte-Marguerite-3 ; suivi environnemental 1994 ; morphosédimentologie de l'estuaire Sainte-Marguerite*. Pour Hydro-Québec. 18 p. et annexes.
- Dyer, K.R. (1973). *Estuaries: a physical introduction*. John Wiley, Chichester, Sussex. 140 p.
- Garvine, R.W., R.K. McCarthy et K.C. Wong (1992). *The axial salinity distribution in the Delaware Estuary and its weak response to river discharge*. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 35: 157-165.
- Gilbert, D. et al. (1997). *État du golfe du Saint-Laurent ; conditions océanographiques en 1995*. Rapport technique canadien sur l'hydrographie et les sciences océaniques, 191. 113 p.
- Godin, G. (1979). *La marée dans le golfe et l'estuaire du Saint-Laurent*. Le Naturaliste canadien, 106: 105-121.
- Hansen, D.V. et M. Rattray Jr. (1966). *New dimension in estuary classification*. Limnology and Oceanography, 11: 319-326.
- Hudon, C., R. Morin, J. Bunch et R. Harland (1996). *Carbon and nutrient output from the Great Whale River (Hudson Bay) and a comparison with other rivers around Quebec*. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 53 : 1513-1525.
- Hydro-Québec (1991). *Aménagement hydroélectrique Sainte-Marguerite-3 ; rapport d'avant-projet*. Hydro-Québec, Montréal. Rapport en 12 parties regroupées en 8 volumes.
- Ingram, R.G., L. Legendre, Y. Simard et S. Lepage (1985). *Phytoplankton response to freshwater runoff: the diversion of the Eastmain River, James Bay*. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, 42 : 1216-1221.

- Ippen, A.T. (eds.) (1966).** *Estuary and coastal hydrodynamics*. Engineering Societies Monographs, McGraw-Hill Book Co.
- LGL (1994).** *Étude sur l'état de référence du milieu physique de la rivière Moisie ; volume 7, Mise en forme et analyse des données sur le régime estuarien*. Lalonde, Girouard, Letendre et associés. Pour Hydro-Québec. 26 p. et annexes.
- Largier, J.L. et S. Taljaard (1991).** *The dynamics of tidal intrusion, retention, and removal of seawater in a bar-built estuary*. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 33: 325-338.
- Messier, D. (1985).** *Étude des conséquences du détournement des rivières Eastmain et Opinaca sur l'écosystème estuarien*. Société d'énergie de la Baie James, Montréal. 90 p.
- Roche (1987).** *Suréquipement des centrales de Manic-1, de Manic-2 et de Manic-3 ; avant-projet phase 1 ; études environnementales ; rapport sectoriel n° 2 ; caractéristiques hydrodynamiques de l'estuaire*. Pour Hydro-Québec.
- Roche (1989).** *Étude environnementale ; projet rivière Sainte-Marguerite ; avant-projet phase I ; relevés additionnels*. Pour Hydro-Québec. 31 p., dossier photographique et annexes.
- Roche (1990).** *Aménagement hydroélectrique de la rivière Sainte-Marguerite ; avant-projet, phase II ; étude de l'estuaire ; relevés biophysiques (1989)*. Pour Hydro-Québec. 125 p., dossier photographique et annexes.
- Roy, D. et D. Messier (1989).** *A review of the effects of water transfers in the La Grande hydroelectric Complex (Québec, Canada)*. Regulated Rivers: Research & Management, 4: 299-316.
- Schroeder, W.W., S.P. Dinnel et W.J. Wiseman Jr. (1990).** *Salinity stratification in a river dominated estuary*. Estuaries, 13: 145-154.
- Savard, J.-P. (1996).** *Suivi environnemental des projets de La Grande-2-A et La Grande-1 ; dynamique des bancs de sable et des chenaux d'écoulement à l'embouchure de La Grande Rivière*. Pour Société d'énergie de la Baie James. 143 p. et annexes.
- SEBJ (1990).** *Suivi environnemental du projet de La Grande 2A. Volume 1. Synthèse des études préalables à la mise en service de La Grande 2A*. Société d'énergie de la Baie James, Montréal. 243 p.
- Therriault, J.-C. et M. Levasseur (1985).** *Control of phytoplankton production in the lower St. Lawrence Estuary : light and freshwater runoff*. Le Naturaliste canadien, 112: 77-96.
- Uncles, R.J. (1982).** *Residual currents in the Severn Estuary and the effects on dispersion*. Oceanologica Acta, 5 : 403-410.

Annexe 1

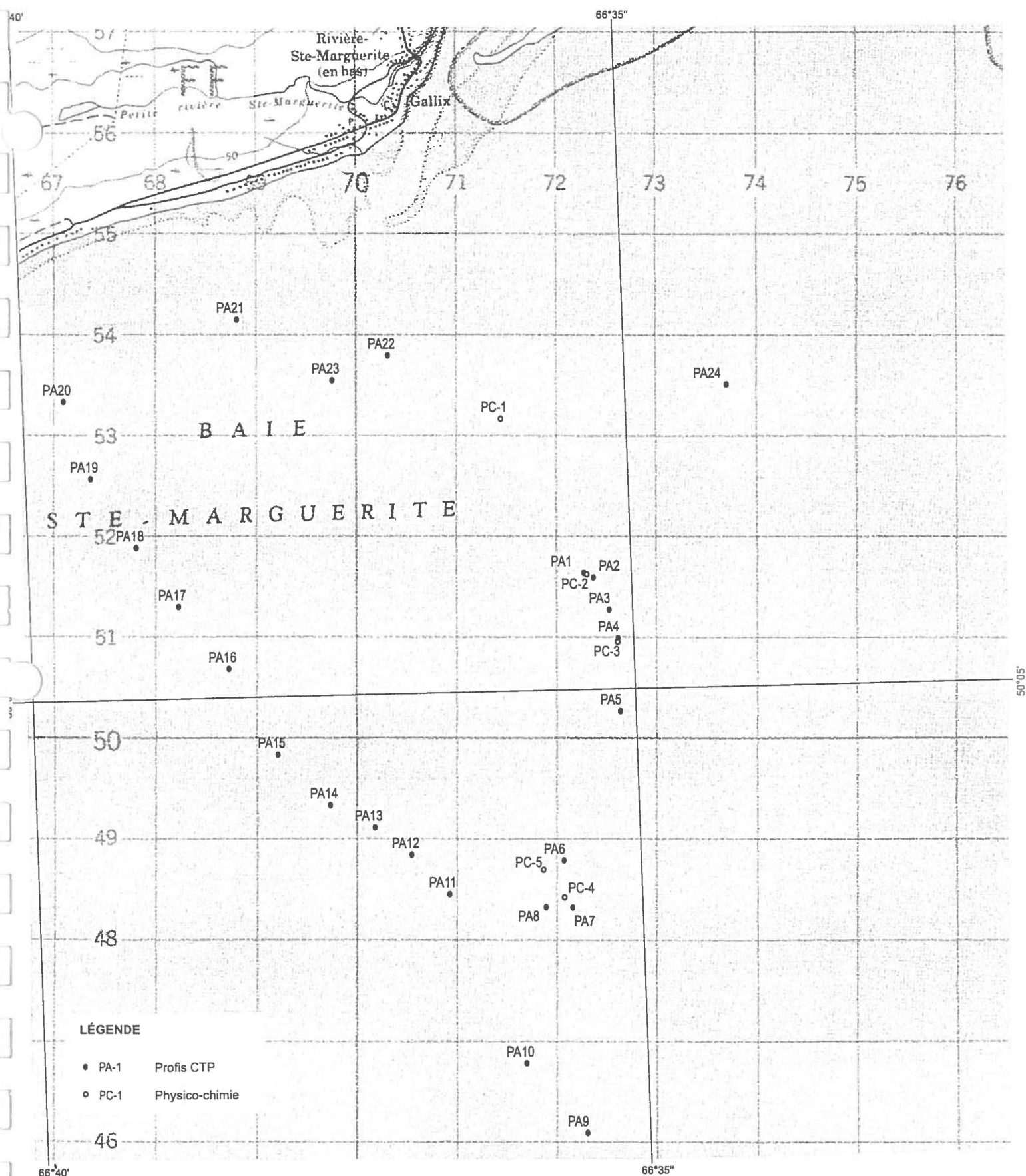
Cartes des stations d'échantillonnage



LÉGENDE

- ▲ SM0602 Station maregraphique
- + a2 Profil CSTP
- ★ S1 Station courantométrique
- PC-0 Physico-chimie

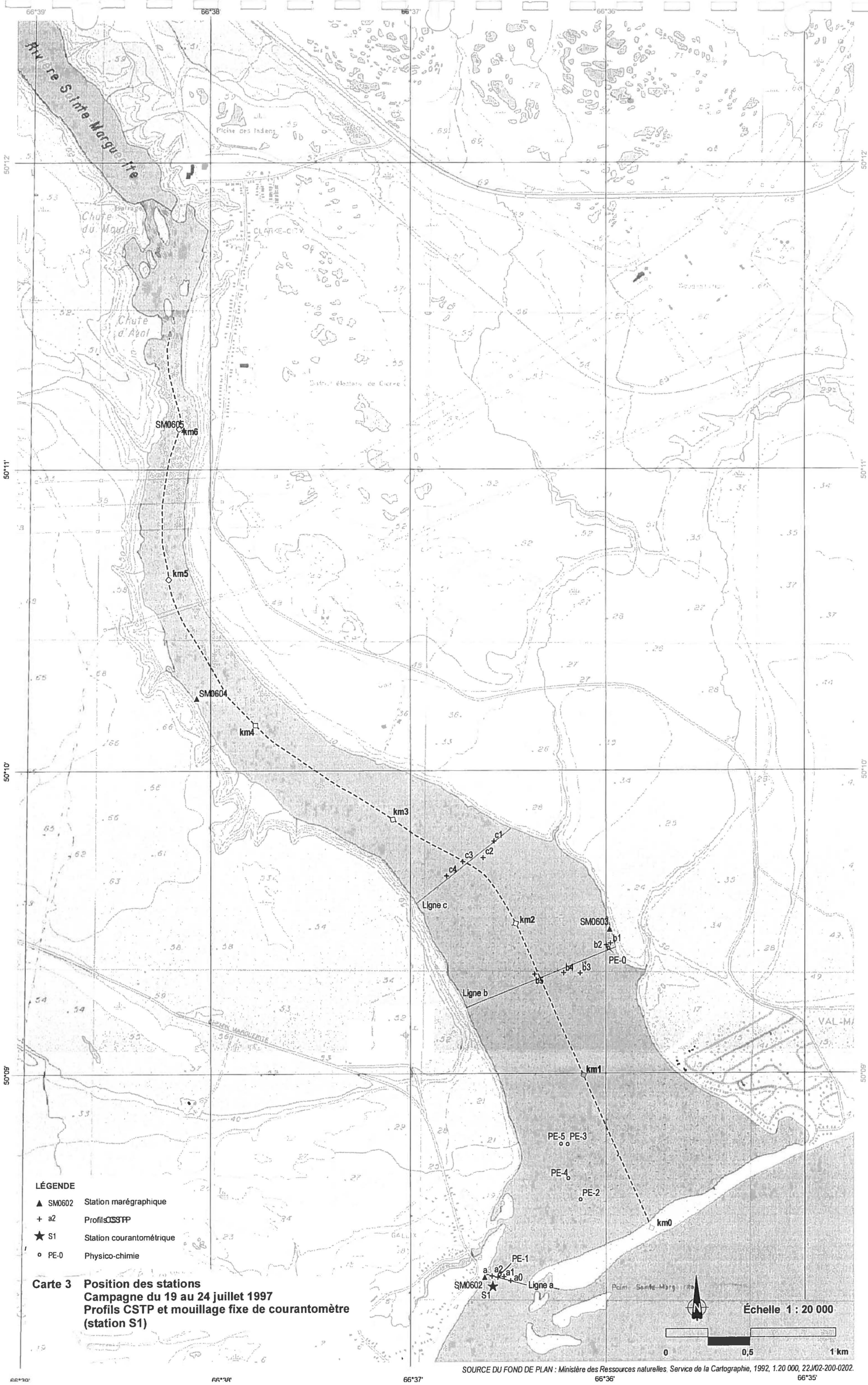
Carte 1 Position des stations
Campagne du 6 au 10 juin 1997
Profils CSTP et mouillage fixe de courantomètre
(station S1)

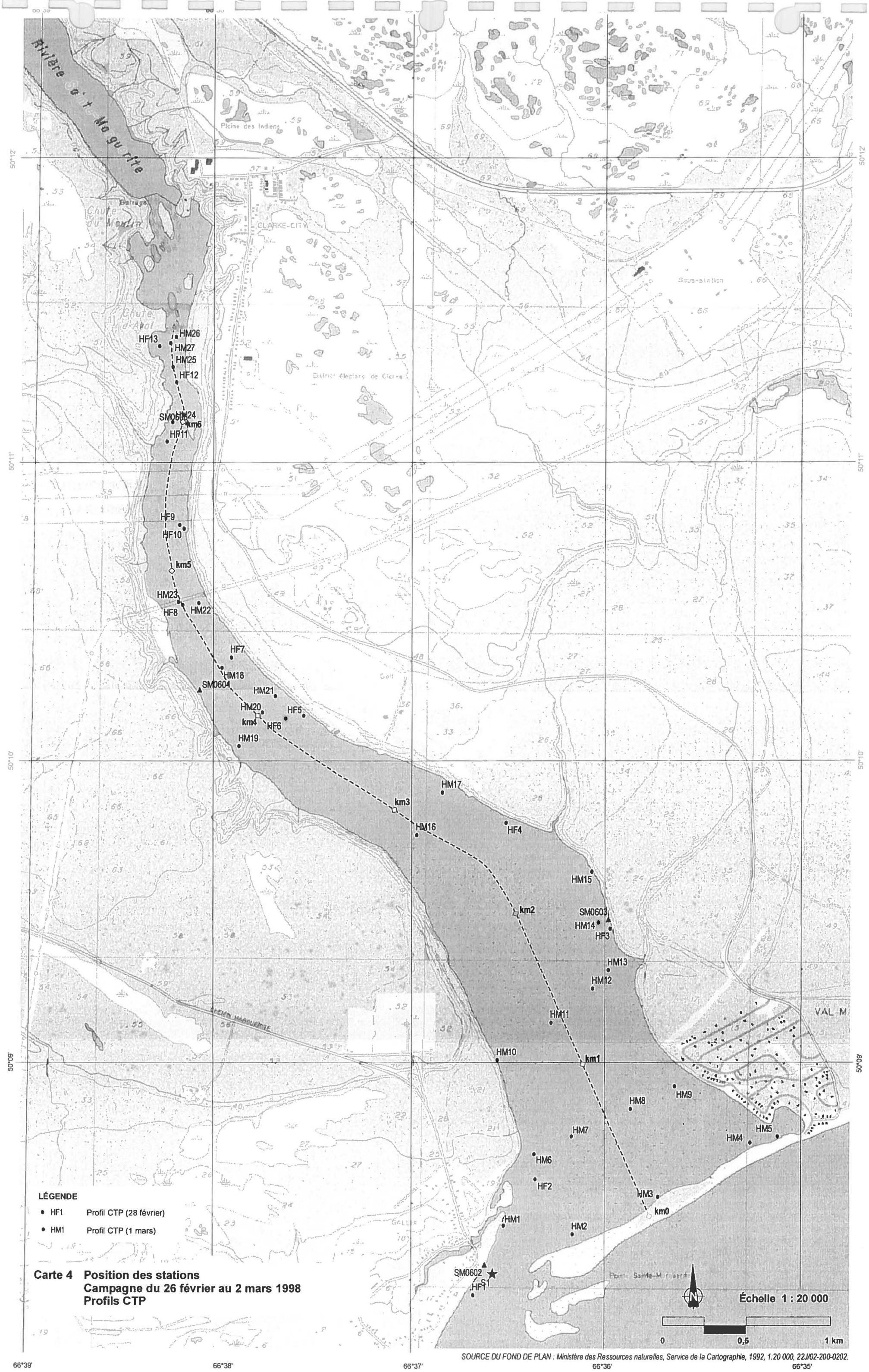


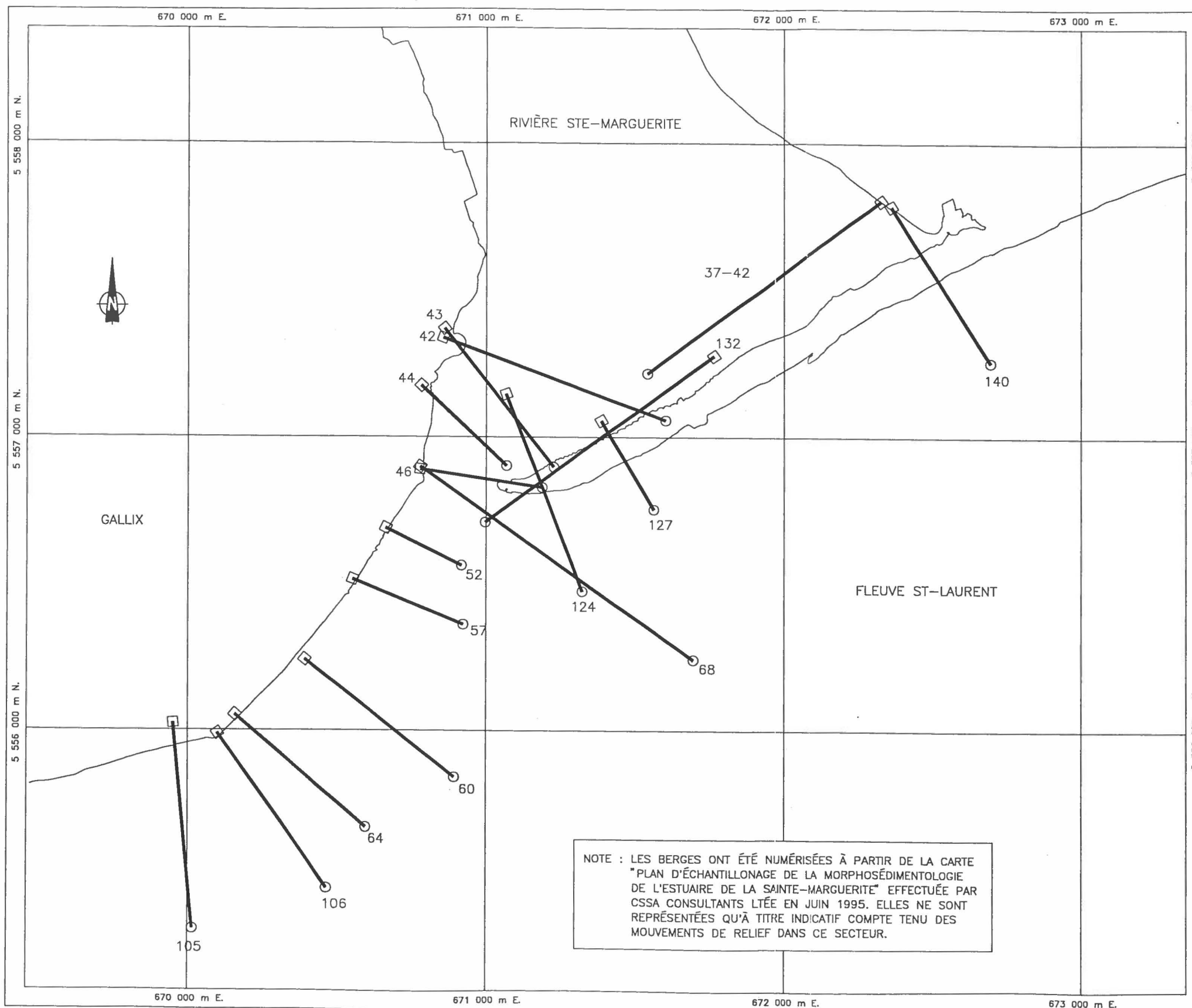
Carte 2 Position des stations
Campagne du 6 au 10 juin 1997
Profils CTP et physico-chimie
Baie Sainte-Marguerite



SOURCE DU FOND DE PLAN : Ministère de l'Énergie, des Mines et des Ressources, 1977, 1:50 000, 22/J/02.







COORDONNÉES DES SECTIONS BATHYMÉTRIQUES
UTM NAD-83

SECTIONS	□ P-1		○ P-2	
	EST	NORD	EST	NORD
042	670855	5557338	671604	5557058
043	670860	5557370	671228	5556898
044	670782	5557175	671069	5556902
046	670778	5556890	671188	5556829
052	670662	5556689	670917	5556562
057	670550	5556514	670923	5556361
060	670391	5556241	670893	5555842
064	670156	5556053	670594	5555672
068	670778	5556899	671697	5556242
105	669950	5556025	670015	5555327
106	670098	5555989	670465	5555467
124-A	671099	5557039	671154	5556882
124-B	671067	5557147	671326	5556474
127	671389	5557056	671563	5556753
132	671766	5557277	670997	5556709
140	672360	5557786	672694	5557257
37-42	672327	5557806	671542	5557217



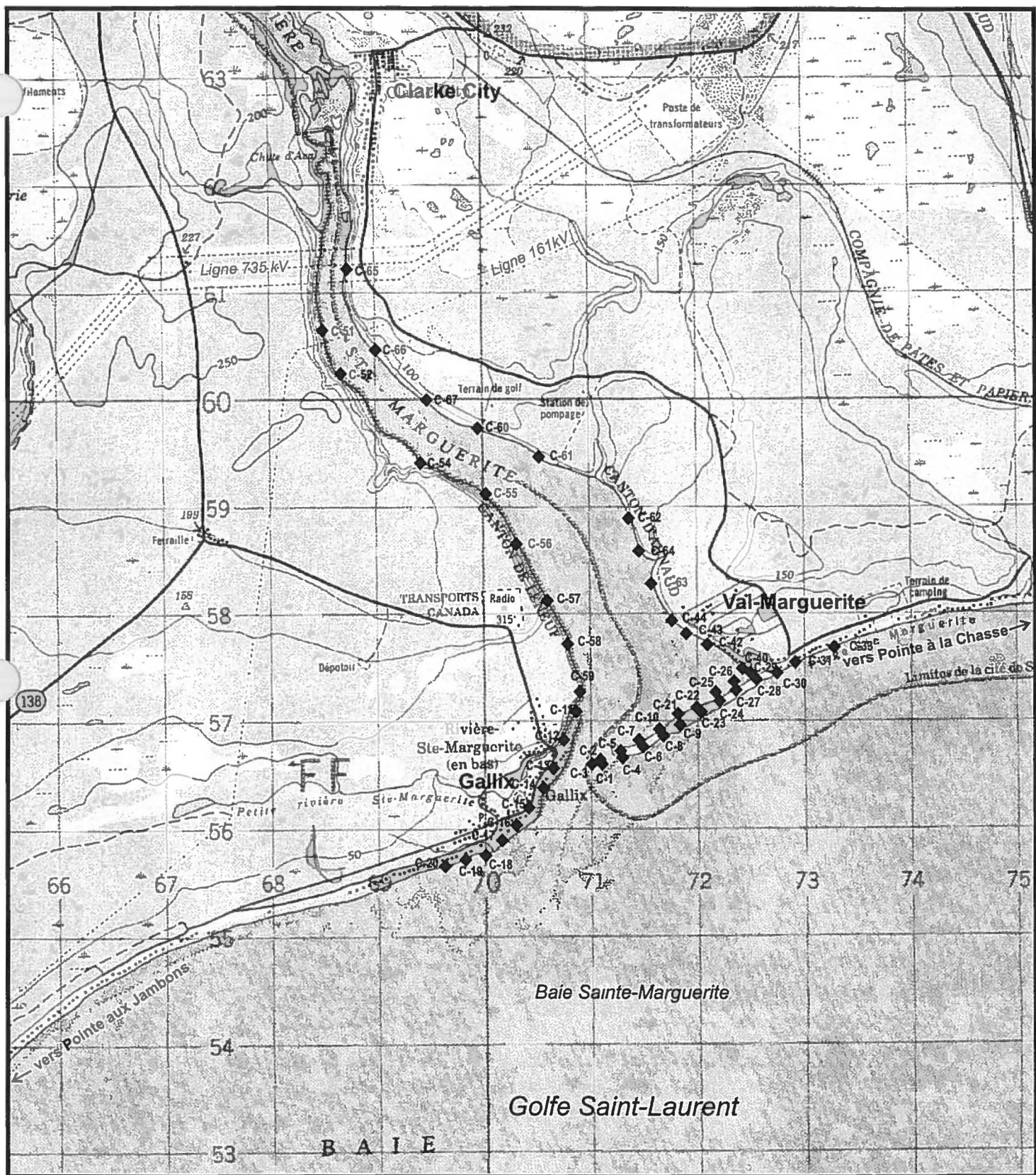
DIRECTION OUVRAGES CIVILS
SERVICE HYDRAULIQUE
DIVISION HYDROMÉTRIE

ESTUAIRE DE LA RIVIÈRE STE-MARGUERITE

Position des profils bathymétriques
(août 1997)

1997-11-28

Carte 5

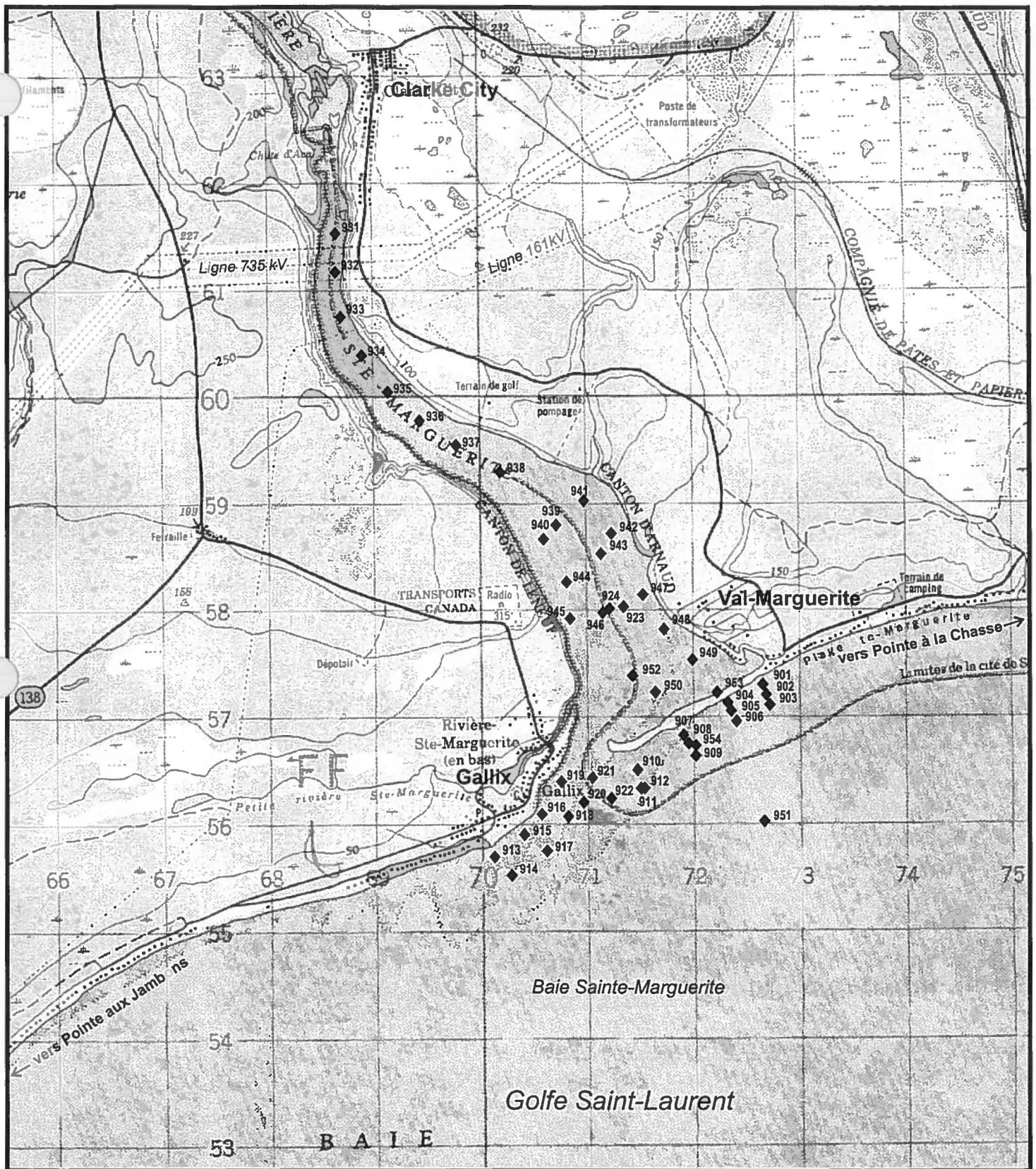


Carte 6 Localisation des stations de carottage des sédiments
Estuaire de la Sainte-Marguerite et Baie Sainte-Marguerite

SOURCE : CSSA Consultants Ltée (1995)



Échelle 1 : 50 000



Carte 7 Localisation des prélèvements de sédiments à la benne
Estuaire de la Sainte-Marguerite et Baie Sainte-Marguerite

SOURCE : CSSA Consultants Ltée (1995)



Annexe 2

Description du modèle analytique

ANNEXE 2

DESCRIPTION DU MODÈLE ANALYTIQUE

Description du modèle analytique

Le modèle analytique est basé sur des hypothèses et des calculs très simples, ce qui présente l'avantage d'une grande flexibilité d'utilisation et de contrôle des intrants et extrants. Par contre, les simplifications sont majeures par rapport à la complexité du milieu naturel. Les hypothèses de travail sont les suivantes : la masse et le volume d'eau sont conservés, la seule source d'eau douce significative est la rivière Sainte-Marguerite (on considère négligeable l'effet sur les circulations des petits tributaires locaux, des eaux souterraines, des précipitations locales, de l'évaporation, etc.), la géométrie du bassin est considérée comme invariable, les circulations représentées sont strictement barotropiques (on ne calcule pas les circulations résiduelles à deux couches ou autres circulations internes), les propriétés physiques de l'eau sont homogènes et uniformes latéralement et toutes les interpolations sont linéaires.

L'estuaire est traité comme un bassin dont on connaît la géométrie de la tête du bassin (limite de propagation des marées et de la salinité) jusqu'à des sections transversales de références distribuées uniformément le long de l'estuaire jusqu'à son embouchure. Tous les apports d'eau douce proviennent de la tête de l'estuaire et sont connus (débit de la rivière à la centrale Sainte-Marguerite-2). Le modèle calcule le volume d'eau contenu dans l'estuaire à l'amont de chaque section transversale. Ce calcul est répété à intervalle de temps régulier (dans ce cas particulier, l'intervalle est de 15 minutes).

On peut donc par simple soustraction déterminer le changement de volume qui se produit durant chaque intervalle de temps, ce qui permet de connaître la quantité d'eau accumulée ou retirée du bassin pendant cet intervalle. Comme on connaît aussi la quantité d'eau introduite par la rivière pendant l'intervalle, on peut obtenir le changement de volume net introduit ou retiré de l'estuaire via la section de références (si les hypothèses de travail sont correctes). On peut ainsi déterminer le débit de cette section pendant l'intervalle de temps et, puisqu'on connaît la section mouillée, on peut aussi calculer la vitesse moyenne du

courant à cette section de références pendant l'intervalle de temps. On peut exprimer mathématiquement ce calcul de la vitesse du courant à l'aide de l'équation ci-dessous:

$$U(x,t) = \frac{1}{A(x,t)} \left[\frac{-dV(x,t)}{dt} + QF(t) \right]$$

$A(x,t)$ est la section mouillée de l'estuaire à une distance x de l'embouchure et à l'instant t , laquelle dépend du niveau d'eau. $QF(t)$ est le débit fluvial au temps t . On obtient alors une estimation de $U(x,t)$ pour chaque section bathymétrique. $U(x,t)$ est mesurable directement en obtenant une grille de points de mesures synoptiques des vitesses et directions du courant le long d'une section transversale et en intégrant la composante normale de la vitesse à travers toute la section.

Le modèle permet donc d'évaluer les vitesses U du courant normal à chacune des sections bathymétriques. Il peut aussi être utilisé pour évaluer le débit de marée et le débit total à chacune des sections. Ces calculs ont été effectués en utilisant les données bathymétriques de CSSA Consultants Ltée (1995) et de la section mise à jour par Hydro-Québec.

Validation des calculs

Un modèle analytique comme celui dont il est question ici ne comporte aucun coefficient de frottement ou autres facteurs qu'il faut calibrer. Cependant, même si le modèle n'a pas besoin de calibration, il est essentiel de valider les résultats du modèle, ne serait ce que pour s'assurer que les hypothèses de travail sont valides, que les intrants sont fiables et que les calculs sont corrects. Le meilleur moyen de valider le modèle est de comparer les résultats de ce modèle à des valeurs mesurées dans l'estuaire.

Le modèle calcule le courant moyen (U) à diverses sections mouillées. On peut mesurer les courants (vitesse et direction) et estimer (U) en intégrant des mesures synoptiques du courant réparties uniformément le long de la section mouillée. Cette estimation de U requiert en principe beaucoup de mesures simultanées de la vitesse et de la direction des courants à chaque section de contrôle à toutes les profondeurs et sur toute la largeur de la section. Les profils verticaux de courant réalisés aux sections transversales ont été utilisés à cette fin.

Toutes les valeurs de U mesurées par profilage CSTP ont été intégrées verticalement afin de déterminer la valeur moyenne de U sur la colonne d'eau à chaque profil. Les figures 1 et 2 présentent les résultats de ces calculs de U calculés pour l'ensemble de la ligne A (embouchure) les 6 et 7 juin et le 20 juillet 1997. Chaque point représente une valeur intégrée de U verticalement. Nous avons choisi de ne pas intégrer U dans l'axe transversal parce qu'il faudrait alors choisir arbitrairement le poids à accorder à chaque station de mesures pour l'intégration horizontale, ce qui introduirait un élément subjectif.

Les figures 1 et 2 montrent aussi les résultats du modèle à la section bathymétrique P46 (voir figure 3 et carte 5 de l'annexe 1), qui correspond à la ligne A (carte 1 de l'annexe 1). Les vitesses calculées par le modèle sont assez cohérentes lorsqu'on les compare aux vitesses mesurées. Les valeurs obtenues par le modèle se situent dans la fourchette des valeurs mesurées. On peut raisonnablement espérer qu'une moyenne pondérée des vitesses mesurées pourrait coïncider assez bien avec les résultats du modèle. Les courbes mesurées et calculées sont en phase (les maxima et les valeurs nulles du courant se produisent aux mêmes heures). Le modèle calcule correctement les valeurs maximales du courant, ce qui indique que le modèle estime correctement les volumes d'eau contenus à l'amont de l'embouchure et les débits qui transitent à cette section.

Cependant, cet exercice de validation ne couvre que deux cycles de marée. Pour allonger la période de comparaison, on peut utiliser les résultats d'un courantomètre S4 placé au centre du chenal, à mi-profondeur, à environ 50 m de la section de profilage A. Cet appareil a été mouillé à cette station (S1) du 4 juin au 23 juillet 1997. La figure 3 compare les résultats du modèle et les valeurs de U calculées à partir des résultats du courantomètre pour deux périodes de 5 jours consécutifs (10 cycles de marée) en juin et juillet 1997). Ces deux périodes correspondent avec les deux campagnes de mesures, ce qui permet de comparer les résultats du modèle à l'ensemble des mesures. La corrélation (R^2) est respectivement de 0,75 et 0,82 ($r=0,87$ et $0,91$), ce qui est très acceptable compte tenu des simplifications du modèle.

Il est prévisible d'obtenir une certaine corrélation entre les vitesses U mesurées au centre de la section mouillée et la valeur moyenne de U (intégrée sur la section). Il est aussi normal que la vitesse mesurée à mi-profondeur au milieu du chenal soit plus élevée que la

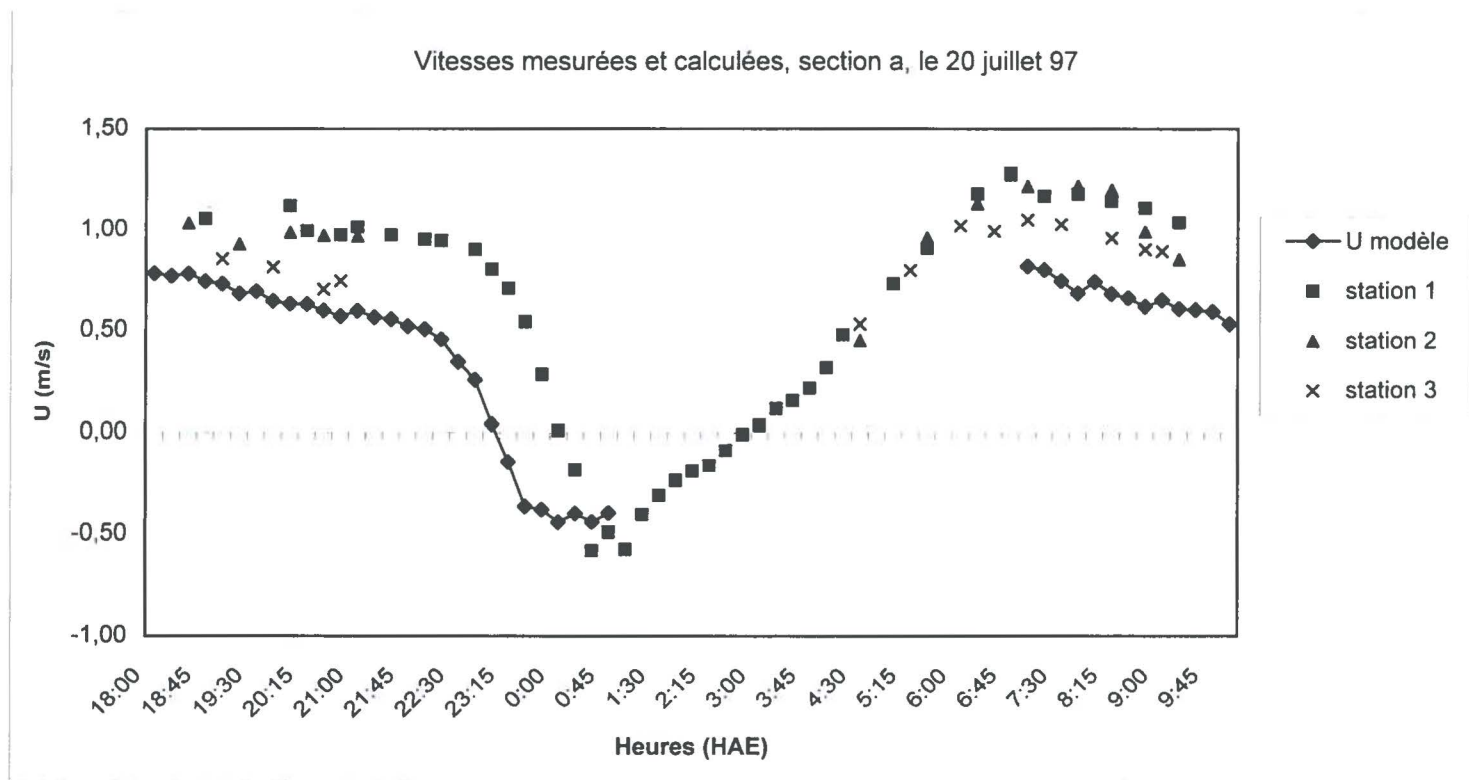


Figure 1 Comparaison des vitesses U mesurées à la section P46 (embouchure) et calculées par le modèle analytique, 6-7 juin 1998

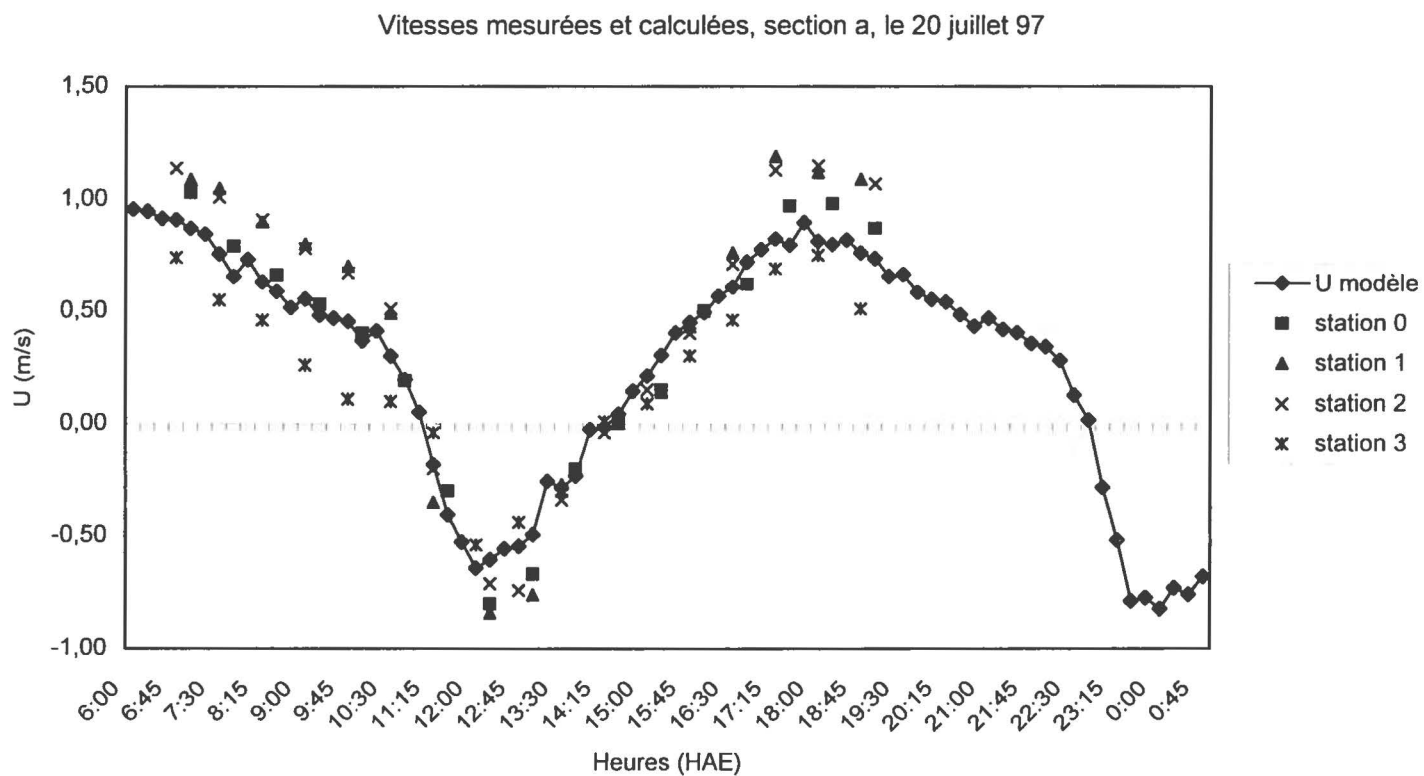


Figure 2 Comparaison des vitesses U mesurées à la section P46 (embouchure) et calculées par le modèle analytique, le 20 juillet 1998

vitesse moyenne. La relation linéaire entre les vitesses mesurées et calculées peut-être utilisées pour mieux visualiser la comparaison. À la figure 4, la constante de proportionnalité (pente de la régression linéaire forcée à zéro) est utilisée pour ramener les deux séries chronologiques à une échelle commune. Ceci permet de comparer directement U calculé par le modèle et mesuré par le courantomètre S4. Cette comparaison montre que le modèle reproduit assez correctement les valeurs maximales et la forme générale des courants à l'embouchure. On note un léger déphasage entre les deux courbes en juillet. Il pourrait s'agir d'un problème de phase entre les séries chronologiques de courants et les données de niveau d'eau. Certaines anomalies ont en effet été constatées dans la série chronologique de données courantométriques de la station S1 (voir le rapport de données, partie II, section 2). Nous avons aussi détecté plusieurs anomalies dans les séries chronologiques de niveau d'eau qui pourraient être la cause du décalage de phase. Le déphasage est d'environ 30 à 45 minutes en moyenne et il affecte surtout les données de juillet. Cependant, le modèle reproduit correctement l'intensité des courants et la forme générale de la courbe de vitesse. Les écarts entre le modèle et les mesures de terrain peuvent en bonne partie s'expliquer par le fait qu'on ne possède que les débits journaliers de la rivière Sainte-Marguerite (une seule valeur par jour), alors que le débit de la rivière, géré en partie par la centrale SM-2, varie au cours d'une même journée.

Compte tenu de ces limitations, les résultats du modèle sont satisfaisants. D'autres tests de validation ont aussi été effectués en comparant les résultats du modèle analytique aux données de courant recueillies par Roche (1990) et aux résultats du modèle numérique de Ouellet (dans Roche ; 1990). Tous ces tests de validation concordent avec les résultats présentés ci-dessus.

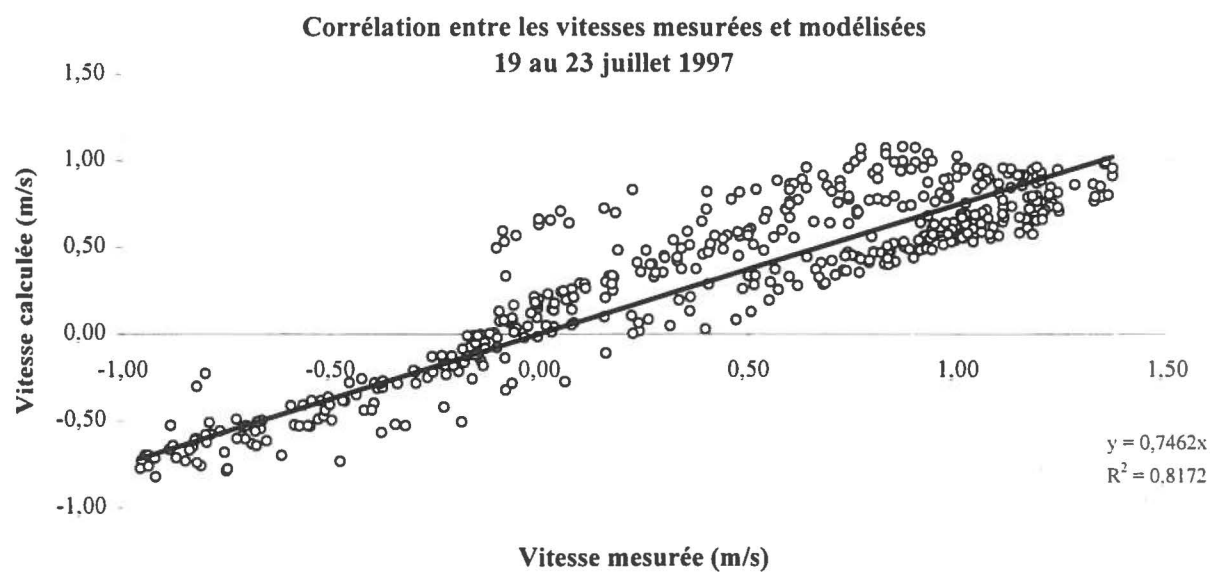
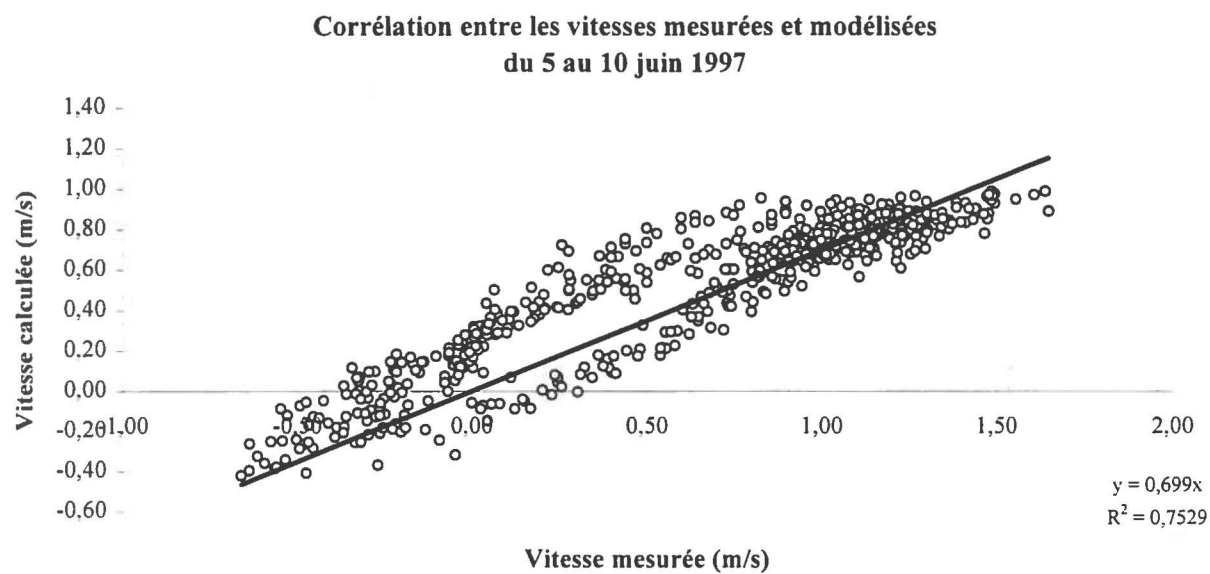


Figure 3 Corrélation entre les vitesses U mesurées et calculées par le modèle analytique à l'embouchure, en juin et juillet 1997

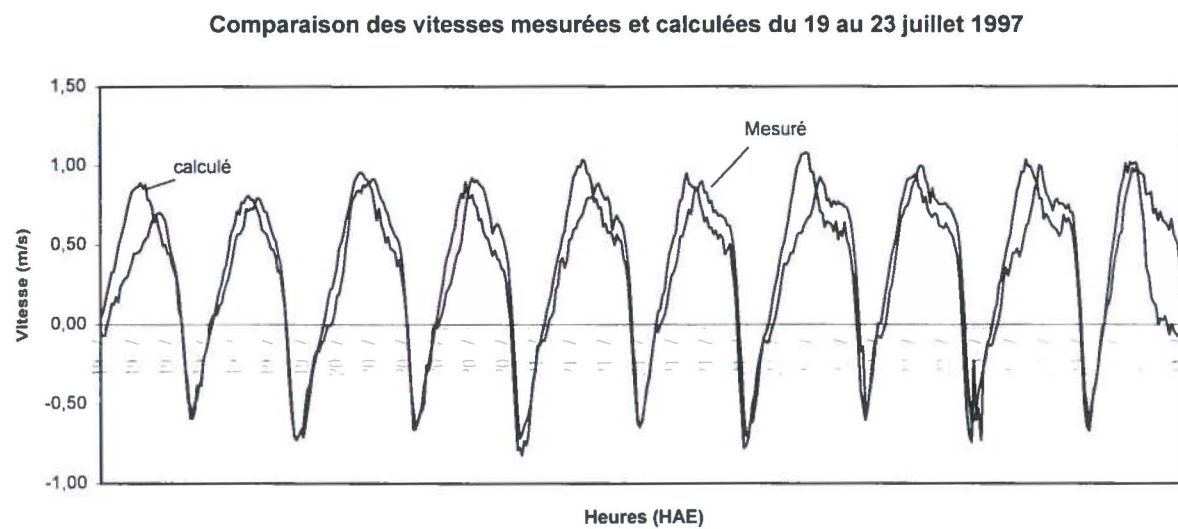
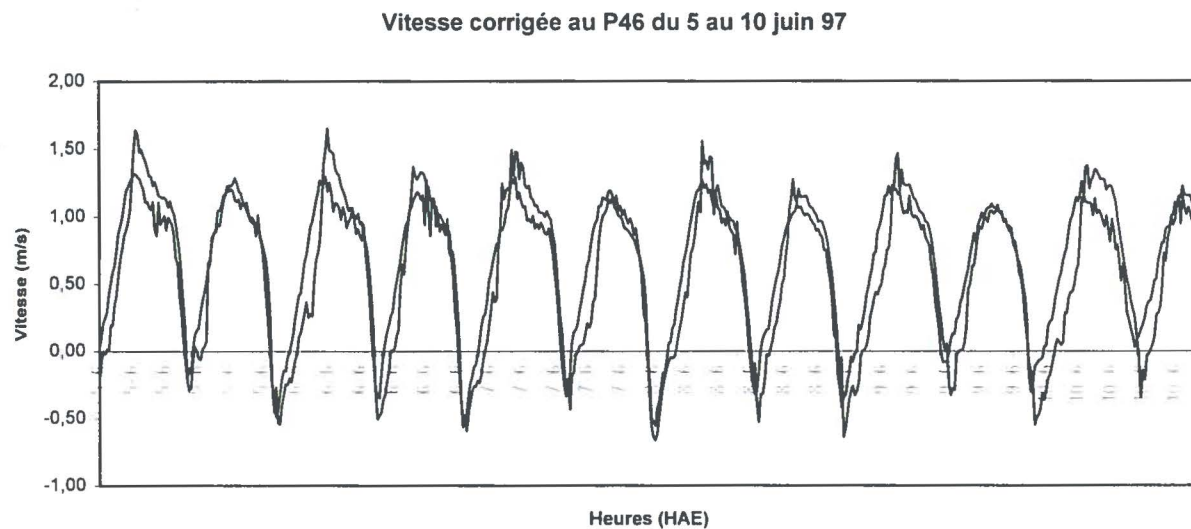


Figure 4 Comparaison des vitesses U mesurées à la station S1 et calculées par le modèle analytique en juin et en juillet 1997