

TC
Avril 2002

TRAVAUX PUBLICS ET SERVICES
GOUVERNEMENTAUX CANADA

Baie de Gaspé
Secteur du Port de Sandy Beach
Étude de courantométrie

Jean-Pierre Savard

InteRives Ltée

Avril 2002

DOSSIER.....
SGDDI..787.877.....

**TRAVAUX PUBLICS ET SERVICES
GOUVERNEMENTAUX CANADA**

**Baie de Gaspé
Secteur du Port de Sandy Beach
Étude de courantométrie**

Jean-Pierre Savard

InteRives Ltée

Avril 2002

1 Introduction

Transports Canada souhaite obtenir de l'information sur la dynamique sédimentaire dans le secteur du quai de Gaspé dans le but de connaître les phénomènes en jeu et de déterminer les interactions potentielles avec les activités portuaires actuelles et futures. Pour ce faire, Travaux publics et Services gouvernementaux Canada a retenu les services d'InteRives Ltée.

L'objectif de ce travail est de répertorier, d'évaluer et de décrire l'ensemble des données océanographiques (vitesse et direction des courants, température et salinité de l'eau, apports d'eau douce) existantes pour la zone d'étude. Cette zone d'étude comprend tout le havre de Gaspé, soit la portion de la baie de Gaspé représentée à la figure 1. Aucune mesure n'a été effectuée dans le cadre de cette étude et tous les résultats proviennent d'études existantes.

La section 2 du présent rapport décrit brièvement les principales études existantes sur le havre de Gaspé. La section 3 présente une synthèse des connaissances disponibles sur les circulations et l'océanographie physique de la zone d'étude. La section 4 propose un sommaire des sections précédentes et quelques recommandations.

2 Revue des études antérieures

La section qui suit présente une revue des principales études portant sur l'océanographie physique de la baie et du havre de Gaspé.

Boivin et Hausser (1972)

La première étude de circulation dans la baie de Gaspé a été réalisée par le Laboratoire d'Hydraulique LaSalle (Boivin et Hausser, 1972). Il s'agit d'une étude théorique basée sur des essais en modèle réduit hydraulique. L'objectif du modèle était d'évaluer la dispersion et le transport des effluents de plusieurs émissaires locaux. Aucune mesure de courant n'a été prise dans la baie de Gaspé. Le modèle réduit hydrodynamique couvre toute le havre de Gaspé et une partie de la baie de Gaspé jusqu'à l'aval de la rivière St-Jean. Le modèle s'appuie sur des données de niveau d'eau et reproduit les directions d'écoulement. Le modèle tient partiellement compte de la stratification en utilisant de l'eau froide au fond et chaude en surface.

Carrière (1973, 1978), Carrière et Pageau (1973)

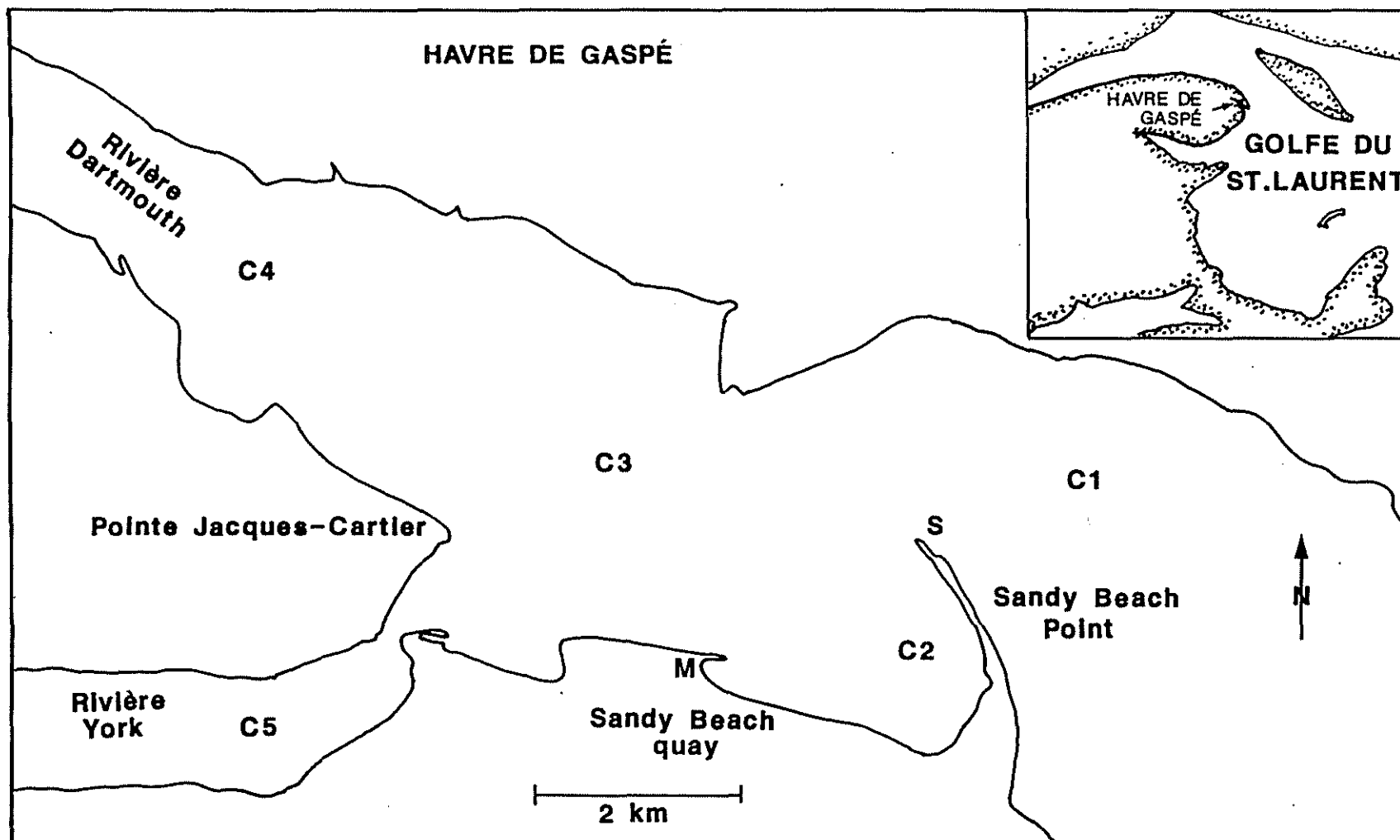
En 1972, Jean Bernard Carrière a réalisé une étude océanographique de la baie de Gaspé dans le cadre d'un programme de maîtrise à l'Université de Dalhousie, Halifax (Carrière, 1973). Cette thèse porte sur l'océanographie générale de la baie de Gaspé, principalement le bilan de transport saisonnier des masses d'eau dans la baie. Aucune mesure de courant n'est prise dans le cadre de cette étude, mais l'auteur étudie en détail la distribution de la salinité et de la température de l'eau dans le havre et la baie de Gaspé pendant toute la saison estivale (mai à octobre) de 1972. Les données de température et de salinité de l'eau sont basées sur des profils verticaux de salinité et de température de l'eau (profils STP) à 10 stations d'échantillonnage visitées une fois par mois. Deux autres études océanographiques ont été réalisées par le même auteur (Carrière et Pageau, 1973 et Carrière, 1978) dans la baie de Gaspé et autour de la péninsule de Forillon, mais ces études se basent sur les résultats de la première et n'apportent aucune donnée additionnelle sur l'hydrodynamique du havre de Gaspé.

Roche (1986)

Une étude de dispersion d'effluent municipaux a été réalisée par Roche Ltée (1986). L'étude comporte des mesures de courant à l'aide de bouées dérivantes réalisées pendant l'été 1986. Des profils verticaux de courant ont aussi été réalisés avec un courantomètre Endeco, mais les résultats ne sont pas présentés ; il semble que les courants soient trop faibles pour être correctement mesurés par cet instrument. L'étude comporte deux périodes d'essais, soit du 16 au 17 juin et du 26 au 27 juillet 1986. A chaque essai, quatre bouées dérivantes de surface ont été lâchées à des distances variant de 100 à 400 m du quai fédéral ; chaque bouée a été suivie pendant quelques heures pour diverses conditions de marée et de vent.

Pettigrew, Booth et Pigeon (1991)

En 1990, des chercheurs de Pêches et Océans ont effectué une campagne de mesures océanographiques dans la baie de Gaspé. Pour la première fois, des séries chronologiques de mesures de courant, de salinité et de température de l'eau ont été réalisées dans le havre de Gaspé. De plus, ces mesures sont accompagnées d'observations concomitantes des niveaux d'eau au quai de Gaspé et de mesures de plusieurs variables météorologiques prises sur la flèche de Sandy Beach (à 2,5 et 5 m d'altitude). A cela



6

Figure 2 Position des stations d'échantillonnage en 1990, par Pettigrew et al. (1991).

s'ajoutent des données de profilage STP (salinité, température en fonction de la profondeur) et des mesures des courants par bouées dérivantes.

Les séries chronologiques CST (courant, salinité et température) ont été réalisées à quatre stations fixes situées dans le havre de Gaspé et à une station située à l'extérieur du havre, près de la passe de Sandy Beach (figure 2). Le tableau 1 fournit les principales informations concernant les stations de mesure et les caractéristiques des mouillages. Les mesures sur stations fixes couvrent la période du 29 mai au 4

Tableau 1 Caractéristiques des stations fixes de Pettigrew *et al.* (1991).

No de station de mouillage	Type d'appareil	No d'instrument	Profondeur d'eau (m)	Hauteur de l'appareil au-dessus du fond (m)	Profondeur de l'appareil
C1	RCM-4	7700	25.6	7	18.6
C2	RCM-7	9023	20.1	16	4.1
	RCM-7	7701		5	15.1
C3	RCM-7	9101	19.2	16	3.2
	RCM-7	6010		5	14.2
C4	S-4	04020647	3.6	3	0.6
C5	S-4	04020646	5.8	5	0.8
M	WLR-7	1114			

juillet 1990 et les mouillages des stations C2 et C3, situées respectivement au sud-est et au centre du havre de Gaspé, portent des courantomètres en surface ($\approx 3,5$ m) et à 15 m de profondeur environ. Un marégraphe était mouillé au quai fédéral pendant toute la période de mesure et une station météo était en opération près de la pointe de Sandy Beach. Des profils de salinité et température de l'eau ont été prélevés les 30 et 31 mai et du 23 juin au 3 juillet 1990. Des bouées dérivantes ont aussi été lancées en divers points du havre de Gaspé et suivies pendant quelques heures les 22 et 30 juin et le 4 juillet 1990. Les données météo comportent des mesures de la vitesse et de la direction du vent, des rafales, de la pression atmosphérique, de la température de l'air et de quelques autres variables.

Les données recueillies sont en général d'excellente qualité. Le rapport de données ne fournit aucune description des circulations dans la zone d'étude, mais les données sont présentées dans un format qui facilite leur utilisation à des fins d'interprétation générale de l'océanographie et de la dynamique du havre de Gaspé. Booth (1994) a traité une partie de l'information recueillie par Pettigrew *et al.* (1991). Ce traitement porte essentiellement sur les mesures de courant prises à l'aide de bouées dérivantes, qui sont utilisées pour évaluer le temps de recyclage de l'eau dans le havre de Gaspé.

C.P.S.E.G. (1995)

Le Comité de protection de la santé et de l'environnement de Gaspé a réalisé une étude de mise en valeur et de protection de l'écosystème de la baie de Gaspé. Cette étude comprend une section portant sur les courants dans la baie et dans le havre de Gaspé. L'étude ne comporte pas d'acquisition de données nouvelles, mais elle passe brièvement en revue quelques unes des études existantes et propose une description de quelques processus responsables des circulations et des courants dans le havre de Gaspé. On y compile des informations sur les débits mensuels des rivières York et Dartmouth. Une carte générale des circulations de surface est présentée mais l'origine des données ayant servi à produire cette carte n'est pas indiquée.

Lefaiivre (1998)

En 1997, Pêches et Océans Canada a entrepris une étude de simulation du transport et de la dispersion d'une nappe de pétrole dans le havre de Gaspé. Cette étude a été réalisée pour le compte de Parc Canada, de la ville de Gaspé et d'Environnement Canada (Urgences environnementales). L'étude est réalisée principalement à l'aide du modèle 3D de Pêches et Océans qui a été développé dans l'ouest canadien et adapté pour le Saint-Laurent. Seule la couche de surface a été modélisée puisque cette couche d'eau est la seule affectée par les déversements de pétrole. Le modèle a été validé à l'aide de données de courant prises en surface à l'aide de bouées dérivantes.

Roy, Long et Crémer (2001)

En 1997, l'INRS océanologie (Roy, Long et Crémer, 2001) a installé un courantomètre S4 et une station de monitoring des sédiments (jauge nucléaire) et de la turbidité de l'eau (OBS) à 10 m de profondeur environ 500 m à l'est de la pointe de la flèche de Sandy Beach. Les données sont publiées dans le compte rendu de la conférence sur les zones côtière 2001. Un article a été soumis à une revue à jury et doit paraître d'ici quelques mois (B. Long, comm. pers.). Bien que ces données soient prises à l'extérieur du havre de Gaspé, dans la baie du même nom, elles présentent un intérêt dans le cadre d'une étude de la dynamique du havre de Gaspé parce qu'elles ajoutent des informations utiles à la compréhension des circulations dans la passe reliant Sandy Beach à Penouille.

BPR Groupe Conseil (1999a et b)

La firme BPR Groupe conseil a effectué une étude de diffusion et dispersion des eaux usées dans le havre de Gaspé à la sortie de la York et aux environs de la Pointe du musée pour le compte du MAPAQ (Ministère de l'Agriculture, des Pêcheries et de l'Alimentation du Québec), de la ville de Gaspé et de la Sodim (Société de développement de l'industrie Maricole de la Gaspésie et des Iles-de-la-Madeleine). Les résultats de l'étude sont présentés dans deux rapports présentés en janvier et octobre 1999. L'étude visait à s'assurer que la qualité d'eau demeurerait compatible avec des implantations aquicoles dans le secteur de l'embouchure des rivières York et Dartmouth. Des mesures de courant par bouées dérivantes (lâchées en fin de jusant et au début du flot), par profilage ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) et des essais de dispersion par fluorométrie ont été effectuées en 1998. Les données sont localisées à l'embouchure de la York à l'aval du pont de la route 132 et un transect ADCP traverse le havre à Pointe Gaspé en direction nord à l'embouchure de la rivière Dartmouth. La dilution des concentrations de coliformes fécaux sont calculées par un modèle numérique (modèle CORMIX) et validés à l'aide des relevés effectués dans la baie et des essais d'injection de traceurs fluorescents dans les émissaires situés près du pont de la 132 à l'embouchure de la rivière York.

Koutitonsky et al. (2001)

L'ISMER (Institut des sciences de la mer de Rimouski) a été mandaté par la SODIM pour réaliser une étude de hydro-sédimentologie dans l'ensemble de la baie de Gaspé. L'étude est réalisée à l'aide d'un modèle 3D expérimental du Danish Hydraulic Institute (version 3D de MIKE21) sous la direction de Vladimir Koutitonsky. Une partie de la modélisation porte sur le havre de Gaspé (grille à larges mailles). Des mesures de courant ont été prises aux embouchures des rivières York (sous le pont de Gaspé) et Dartmouth (même position que la station C4 de la figure 2) et dans la passe séparant Penouille de la flèche de Sandy Beach. Il s'agit de séries chronologiques de vitesse et direction des courants, de température et de salinité de l'eau. Le courantomètre installé dans la passe est un profileur à effet Doppler (ADCP) qui mesure les courants dans toute la colonne d'eau. Les mesures ont été réalisées entre le 25 septembre et le 21 novembre 2000. L'intervalle d'échantillonnage des séries chronologiques est de 20 minutes. Une station météorologique a aussi été installée sur la flèche de Sandy Beach. Des stations de profilage de la température et de la salinité de l'eau (profilage STP) ont été échantillonnées dans la baie de Gaspé entre le 28 septembre et le 15 octobre 2000. Des stations de profilage STP ont aussi été occupées dans le havre de Gaspé du 11 au 15 octobre. Des cartes de faciès granulométriques de la baie ont été produites pour la baie de Gaspé, mais pas dans le havre lui-même. L'étude de Koutitonsky et al. (2001) a surtout le mérite de présenter des analyses détaillées des données, en particulier des séries chronologiques, ce qui apporte un éclairage plus complet des circulations et des l'organisation des masses d'eau. L'ISMER a aussi réalisé une étude des houles dans la baie de Gaspé (Koutitonsky, 2001) dans le cadre du même projet. Les deux études de l'ISMER portent surtout sur la baie de Gaspé (partie extérieure au Havre de Gaspé), mais plusieurs éléments de ces études permettent de mieux comprendre les circulations dans le Havre de Gaspé.

Les prochaines sections passent en revue les données provenant des études mentionnées ci-dessus, en les regroupant en fonction de certains paramètres, comme les masses d'eau et la stratification, les courants, les marées, l'hydrologie et la dynamique des sédiments.

3 Analyse des données

La section qui suit présente une analyse sommaire des données provenant des études mentionnées à la section précédentes. Les données sont analysées en fonction des divers facteurs contrôlant la dynamique des circulations dans le havre de Gaspé.

3.1 *Commentaire général*

La circulation des masses d'eau et la dynamique du havre de Gaspé est relativement complexe. Cette complexité découle de la géométrie particulière du havre et de sa position géographique. Contrairement à la plupart des petits estuaires du Québec, le havre de Gaspé est profond (plus de 20 m) et encaissé dans une côte rocheuse dont la géométrie est irrégulière. Les petits estuaires bordant le Saint-Laurent ou les baies James et d'Hudson sont généralement peu profonds ; ils exhibent pour la plupart une géométrie simple, en forme d'entonnoir, avec une seule rivière située en tête d'estuaire et un chenal unique bordé de hauts-fonds ou de battures. Dans ces estuaires, les facteurs qui contrôlent les courants et les circulations sont multiples mais on peut généralement isoler un ou deux facteurs prépondérants qui dominent nettement tous les autres. Dans la majorité des cas, les courants sont principalement attribuables à la marée et au régime hydrologique de la rivière située à la tête de l'estuaire. Les autres facteurs (vent, pression atmosphérique, etc.) ont des effets mesurables mais de moindre importance.

Dans la baie et le havre de Gaspé, la situation est très différente. Les facteurs qui contrôlent les circulations et les courants sont nombreux sans qu'aucun ne prédomine très nettement. Les marées, par exemple, engendrent des courants de l'ordre de 25 à 40 cm/s dans le passage reliant Penouille à Sandy Beach. Mais l'intensité de ces courants de marée décroît très rapidement vers l'amont de la passe et ces courants ne dépassent guère 5 à 10 cm/s dans le centre du havre de Gaspé. Le débit fluvial sortant de la rivière Dartmouth engendre lui aussi des courants qui peuvent varier de 2 à 10 cm/s dans le havre. Le vent local, s'appliquant sur la couche de surface, peut causer des courants dont l'intensité varie de 0 à 15 cm/s en général (1 à 3 % de la vitesse du vent) et dont la direction est très variable. Les courants générés par ces trois facteurs combinés peuvent varier selon les saisons et les fluctuations de chacun de ces facteurs individuels. Selon qu'ils se conjuguent pour agir dans le même sens ou s'opposent et s'atténuent les uns les autres, ces facteurs peuvent produire des forces résultantes très variables en intensité et en direction. L'ensemble des permutations des facteurs locaux qui causent les courants dans le havre (variation des niveaux d'eau par la marée, débit fluvial et vent local) peut engendrer une variabilité spatio-temporelle considérable des vitesses et des directions de courants.

Cette complexité est accrue par une autre particularité géographique et morphologique de la zone d'étude. Le havre de Gaspé s'ouvre sur le golfe du Saint-Laurent par un passage de plus de 20 m de profondeur reliant Penouille à la pointe de Sandy Beach. Les masses d'eau situées à moins de 20 m de profondeur se comportent comme si le havre de Gaspé et le bassin côtier du Saint-Laurent étaient des vases communicants ; ces masses d'eau s'échangent librement et la stratification thermohaline présente dans le Golfe le long de la côte gaspésienne se prolonge dans le havre de Gaspé. Les facteurs qui affectent l'organisation des masses d'eau (stratification thermohaline, courants côtiers, etc.) en surface du golfe du Saint-Laurent affectent aussi les circulations dans le havre de Gaspé. Or la salinité et la température (donc la densité) de l'eau de surface de la côte gaspésienne sont modulées par le régime hydrologique du Saint-Laurent avec un déphasage de plusieurs mois. La pression atmosphérique et le vent à grande échelle génèrent des mouvements d'eau très importants le long de la côte qui peuvent affecter considérablement les échanges entre le havre de Gaspé et le Golfe. Ces processus se produisent à des

échelles spatio-temporelles très différentes de processus locaux mentionnés ci-dessus. Tous ces facteurs agissent en concomitance, ce qui augmente la variabilité et la complexité des circulations dans la zone d'étude.

Ceci dit, il est possible de décrire et d'expliquer les circulations dans le havre de Gaspé. Chaque facteur individuel causant les courants et les mouvements de masses d'eau est simple. La complexité découle du nombre de facteurs en jeu et du fait qu'aucun ne prédomine nettement. Il est donc préférable dans un premier temps d'élaborer un modèle conceptuel général des circulations. Ce modèle peut être qualitatif au départ, ou partiellement quantitatif, et doit identifier et décrire correctement les mécanismes qui contrôlent les circulations et leur importance respective. Il doit également permettre de comprendre comment les diverses permutations de ces mécanismes contrôlent l'organisation des courants dans diverses parties de la zone d'étude. La revue des données existantes présentée ci-après indique que ces données sont assez abondantes et d'assez bonne qualité pour établir un modèle de cette nature. Ce modèle peut ensuite être utilisé pour choisir les outils spécialisés nécessaires à la résolution de problématiques spécifiques et pour déterminer les besoins en données additionnelles.

3.2 *Les masses d'eau*

Carrières (1973) identifie deux masses d'eau dans le havre de Gaspé. En surface se forme une couche d'eau saumâtre résultant du mélange des eaux de surface du golfe du Saint-Laurent et de l'eau douce apportée par les rivières York et Dartmouth. Sous cette couche de surface s'étend une couche d'eau plus salée et généralement plus froide (sauf en automne) qui occupe toute la colonne d'eau jusqu'au fond. Tel que mentionné à la section précédente, cette couche inférieure possède des propriétés thermohalines très semblable à celle des eaux de surface du golfe du Saint-Laurent (jusqu'à 20 m de profondeur) dans la zone attenante à la baie de Gaspé. La présence de couches d'eau de température et de salinité différentes séparées par de forts gradients verticaux de densité est appelée la stratification thermohaline de la colonne d'eau. Les zones de forts gradients verticaux de densité sont des pycnoclines. La densité de l'eau dépend essentiellement de la température et de la salinité de l'eau. La densité augmente avec la salinité et diminue avec la température de l'eau (au-dessus de 4 °C).

La figure 3, tirée de Pettigrew *et al.* (1991) illustre la stratification thermohaline et les masses d'eau présentes dans le havre de Gaspé. Cette figure montre un profil vertical de salinité et de température de l'eau réalisé le 1 juillet 1990 à la station C2 située près de Sandy Beach à l'est du quai fédéral (voir emplacement figure 2) par 20,1 m de profondeur. En surface, sur une épaisseur d'environ 2 m, la température de l'eau est de 13 °C et la salinité est de 25 ‰. Entre 2 et 18 m de profondeur s'étire une couche d'eau homogène plus salée (27 ‰) et plus froide (9 °C) que celle de surface. Ces deux couches d'eau sont séparées par une pycnocline (fort gradient vertical de densité) bien marquée par un changement rapide de la salinité et de la température entre 2 et 2,5 m de profondeur. À 20 m de profondeur, la salinité et la température de l'eau changent à nouveau brusquement (présence d'une seconde pycnocline), passant respectivement à 2 °C et 32 ‰. La présence d'une seconde pycnocline et d'une masse d'eau salée et froide au fond est un prolongement de la stratification thermohaline qui prévaut à l'extérieur du havre de Gaspé, le long de la côte gaspésienne.

Comme le montre la figure 3, la couche de surface du Saint-Laurent est elle-même stratifiée. L'étude de Koutitonsky *et al.* (2001) et les données de Pettigrew *et al.* (1991) illustre clairement la présence de deux sources de stratification thermohaline dans le havre et la baie de Gaspé. Lorsque le débit des rivières est faible, la baie de Gaspé comporte uniquement deux couches d'eau provenant du golfe du Saint-Laurent, soit une couche saumâtre de surface d'environ 20 m d'épaisseur et une couche sous-jacente plus froide

STD 536 1 July 1990 cast 2

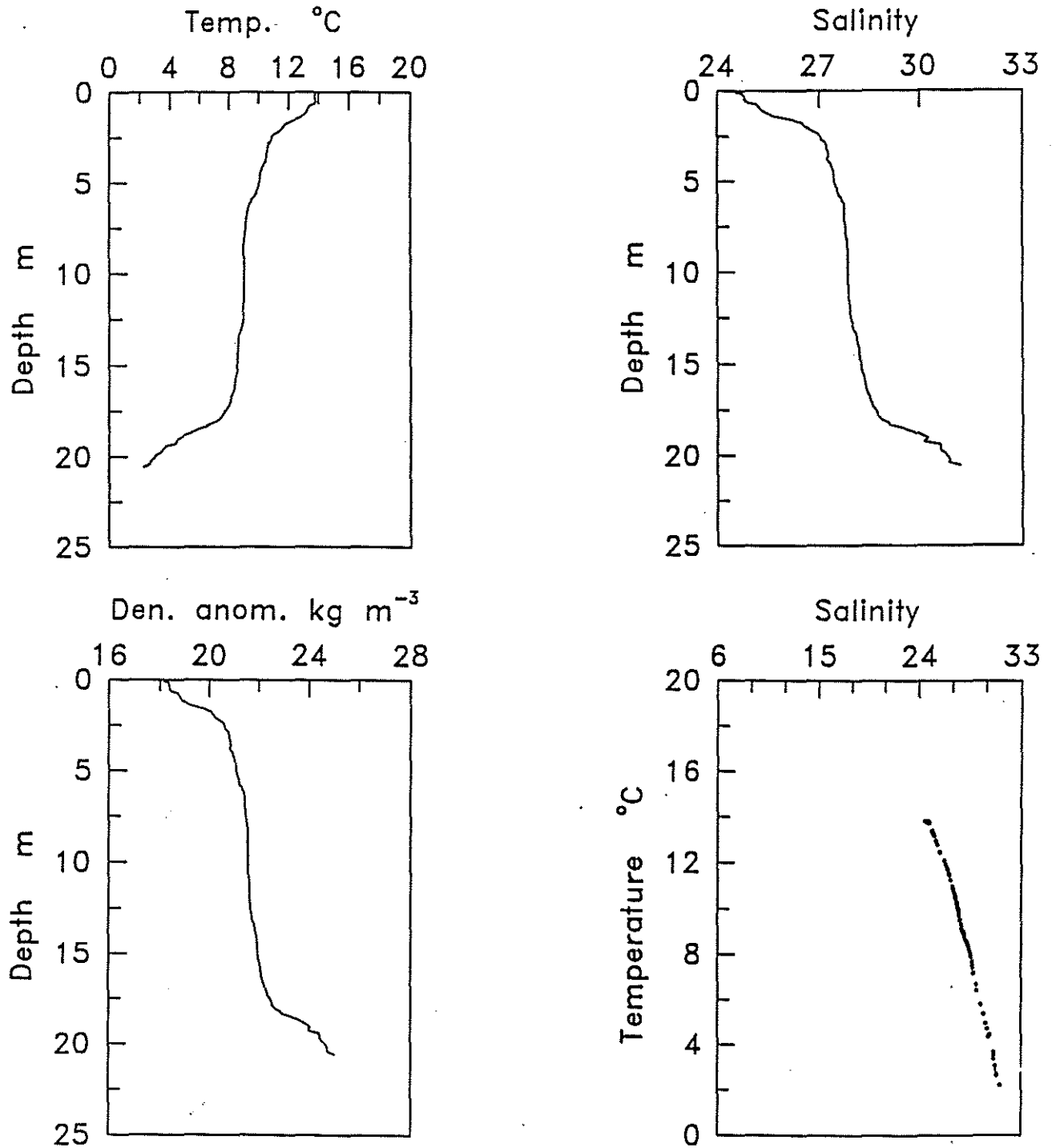


Figure 3 Profils de température, de salinité et de densité de l'eau à la station C2 en juillet 1990. (d'après Pettigrew *et al.*, 1991).

et plus salée. Lorsque le débit des rivières York, Dartmouth et Saint-Jean est fort, l'eau douce de ces rivières forme un panache de quelques mètres d'épaisseur qui s'étale en surface dans tout le havre de Gaspé et dans la majeure partie de la baie de Gaspé. Une partie de la stratification thermohaline est donc un prolongement de la stratification prévalant dans le golfe du Saint-Laurent et donne lieu à la formation d'une pycnocline profonde, à environ 20 m de profondeur.

Une autre partie de la stratification thermohaline se développe dans le havre et la baie de Gaspé en raison de l'apport d'eau douce des rivières. Lorsque le débit des rivières York et Dartmouth est fort, le panache de ces rivières forme une couche d'eau saumâtre séparée des eaux ambiantes par une pycnocline située à moins de 5 m de profondeur. On peut donc trouver deux pycnoclines superposées (figure 3), la première se formant dans le havre et la seconde dans le Saint-Laurent. Les profondeurs des deux pycnoclines peuvent varier sur une base saisonnière et sous l'action de divers processus qui font osciller ces pycnoclines.

Le long des côtes gaspésiennes, la stratification des eaux du Golfe dépend de facteurs saisonniers (ex : cycle hydrologique du Saint-Laurent) et de phénomènes qui contrôlent le mélange vertical et le transport des masses d'eau dans l'ensemble du Golfe, ce qui inclut le vent, la pression atmosphérique, les marées et d'autres processus océanographiques (ondes côtières piégées, ondes barocliniques à basses fréquences ou à fréquences tidales, circulations géostrophiques, etc.). Lorsque la stratification de la colonne d'eau varie dans le Saint-Laurent, ces variations se répercutent rapidement dans le havre de Gaspé.

L'organisation des masses d'eau joue un rôle déterminant en ce qui concerne les circulations dans le havre de Gaspé. Les forces qui génèrent les circulations sont différentes selon la couche d'eau sur laquelle elle s'applique. Par exemple, la couche de surface est exposée à l'action du vent local et elle est soumise à l'écoulement d'eau douce des rivières (écoulement isostatique). La couche inférieure est isolée du vent local, mais réagit aux vents à grande échelle qui affecte les eaux côtières gaspésiennes. Cette couche d'eau est aussi sujette à l'action des marées et aux variations de la pression atmosphérique. Aussi, tout modèle visant à expliquer les circulations se doit de tenir compte de la stratification thermohaline.

3.2.1 Les courants dans la couche de surface

Le panache des rivières York et Dartmouth, à cause de sa densité plus faible, flotte en surface du havre de Gaspé et s'écoule lentement vers le Golfe. Ce panache d'eau douce se mélange avec l'eau salée de la couche sous-jacente et forme une couche d'eau saumâtre qui recouvre tout le havre de Gaspé.

L'épaisseur de cette couche varie en fonction du débit fluvial et d'autres facteurs qui contrôlent le mélange de l'eau douce et de l'eau salée. Carrière (1973) a décrit l'évolution saisonnière de l'épaisseur et des propriétés de ce panache de surface dans le havre et la baie de Gaspé. D'après les mesures de salinité réalisées par Pettigrew *et al.* (1991), une partie importante du mélange de l'eau douce et de l'eau salée s'effectue dans la zone des embouchures des deux rivières, à l'amont du havre lui-même. La figure 4 présente une série chronologique de température et salinité de l'eau prise à 0,6 m de profondeur (sous le niveau de marée basse) à la station C5 (voir position à la figure 2) durant le mois de juin 1990. Les dates sont présentées en jours juliens (le jour 152 équivaut au 1^{er} juin et le jour 181, au 30 juin). La figure montre que la salinité de la couche de surface n'est jamais inférieure à 12 ‰ et se situe généralement entre 15 et 20 ‰ au début de juin, alors que le débit de la rivière York est encore assez élevé. Cela signifie que l'eau du panache de surface, à deux kilomètres à l'amont du pont de la 132, contient déjà entre 40 et 70 % d'eau salée provenant du mélange avec la couche inférieure à 27 ‰. Les données prises en surface dans la zone de l'embouchure de la rivière Dartmouth indiquent un taux de mélange similaire et parfois même plus élevé.

S4 646

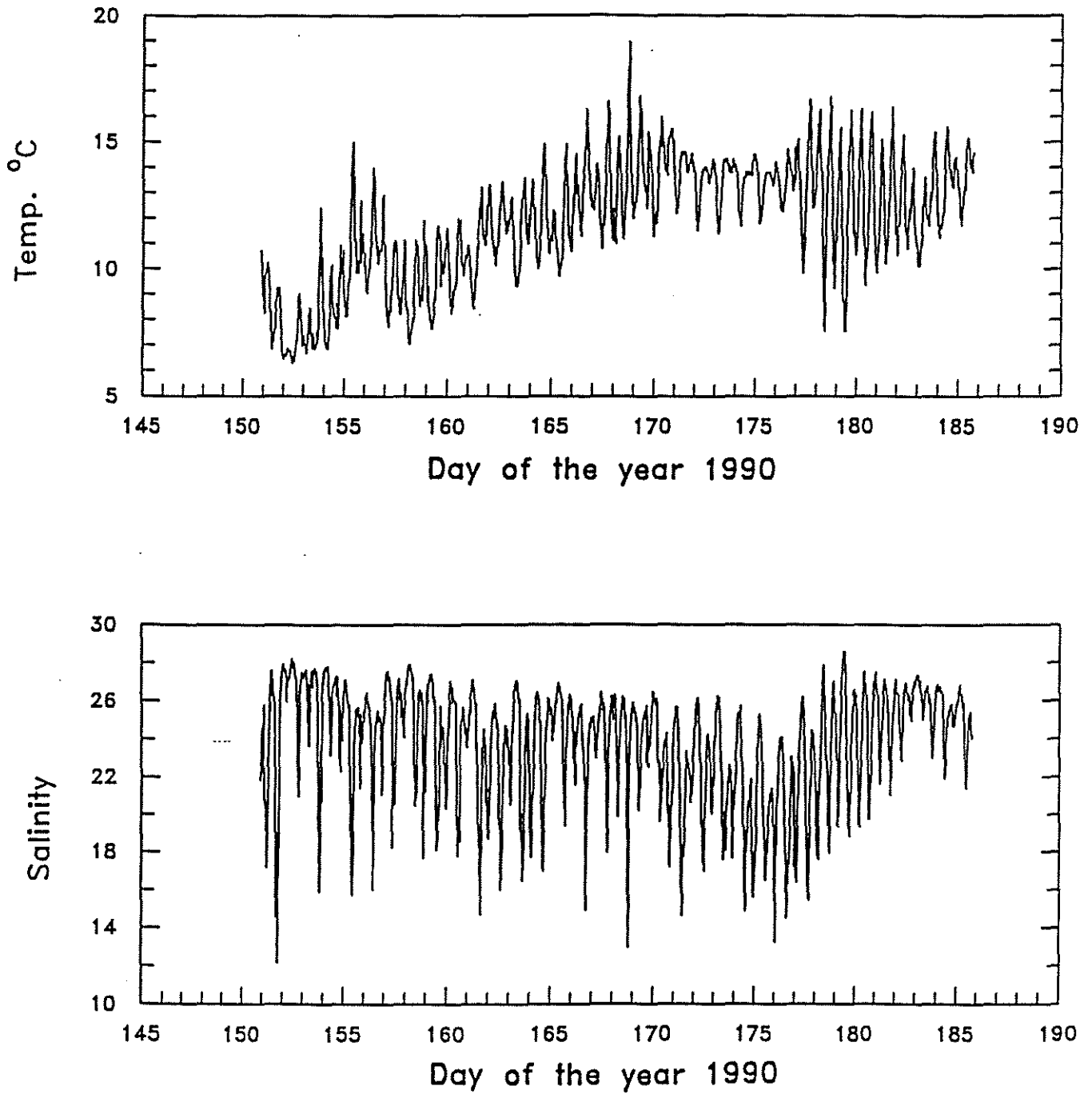


Figure 4 Séries chronologiques de température et de salinité de l'eau à la station C5, à 0,8 m de profondeur. Tiré de Pettigrew *et al.* (1991).

La salinité de la couche de surface dépend du débit des rivières locales et du taux de mélange de l'eau douce et de l'eau salée. Le débit des rivières York et Dartmouth est une information connue ; les données sur le débit des rivières sont disponibles depuis 1980 pour la rivière York et depuis 1970 pour la Dartmouth au Centre d'Expertise Hydrique du Québec. Le taux de mélange de l'eau douce et de l'eau salée, par contre, est une information beaucoup plus difficile à obtenir. Les facteurs qui contrôlent le mélange dans le havre de Gaspé n'ont pas fait l'objet d'étude systématique. Seul Carrière (1973) discute du mélange et de la stratification, sans évaluer les causes du mélange.

La salinité de la couche de surface et l'épaisseur de cette couche d'eau permettent d'évaluer la vitesse de l'écoulement isostatique en surface du havre de Gaspé. L'eau douce provenant des rivières se mélange à l'eau salée de la couche sous-jacente, entraînant vers l'aval une quantité d'eau salée proportionnelle à la salinité de surface. A la sortie du havre, dans le chenal qui sépare Penouille de Sandy Beach, la quantité d'eau salée présente dans la couche de surface est généralement 15 à 20 fois plus importante que la quantité d'eau douce. Autrement dit, l'écoulement isostatique engendré par le débit des rivières entraîne 15 à 20 fois plus d'eau salée vers l'aval que le débit total des rivières York et Dartmouth. Le courant moyen qui en résulte en surface peut être estimé au débit total (eau douce et eau salée) divisé par la section d'écoulement dans la couche de surface (largeur du chenal x épaisseur de la couche d'eau). Ce calcul implique que les courants résiduels vers l'aval, en surface, dépendent de la salinité ou du taux de mélange de l'eau douce et de l'eau salée, de l'épaisseur de la couche de surface et du débit des rivières locales. Carrière (1973) a évalué les volumes d'eau dans les diverses couche d'eau et le temps de résidence de l'eau dans le havre de Gaspé en se basant sur les équations de conservation du volume et du sel. Les données disponibles dans la havre de Gaspé permettent de déterminer les vitesses moyenne de courant causés par l'écoulement isostatique dans la couche de surface.

Lefavre (1998) a modélisé à l'aide d'un modèle numérique 3D les courants de surface causés par l'effet combiné de la marée et de l'écoulement isostatique en surface du havre de Gaspé. Dans son rapport préliminaire, l'auteur ne mentionne pas les critères qui ont été utilisés pour déterminer le taux de mélange et le transport vertical du sel dans le modèle. Il est probable que ces valeurs soient prescrites en tant qu'intrants au modèle. Les courants de surface sont calculés pour des conditions connues de débit fluvial et de marée correspondant aux valeurs observées les 15 et 16 août 1997. Il s'agit de conditions de marée moyenne et de débit estival des rivières locales (6,1 m³/s dans la rivière Dartmouth et 10,6 m³/s dans la York). Les courants de surface sont calculés à intervalle d'une heure pendant le flot et le jusant.

Les figures 5 et 6 présentent un exemple de résultats du modèle pendant le plein flot et le plein jusant. L'auteur note que les courants sont presque nuls pendant le flot (figure 5) parce que les courants résiduels vers l'aval annulent les courants de marée dirigés vers l'amont. Pendant le jusant, les courants de marée et les courants induits par l'écoulement fluvial en surface s'additionnent puisqu'ils sont tous dirigés vers l'aval (figure 6). L'ordre de grandeur des vitesses des courants de marée est de l'ordre de 2 à 5 cm/s sauf dans la passe de Sandy Beach/Penouille, où les vitesses sont de l'ordre de 10 à 15 cm/s. Dans l'ensemble, les courants reproduits dans le modèle sont grossièrement parallèles à la bathymétrie en l'absence de vent. Les courants de jusant sont plus intenses du côté sud du havre, dans le secteur du quai fédéral et de l'embouchure de la rivière York. Les courants les plus forts se produisent dans la passe de Penouille/Sandy Beach.

Les courants de surface calculés par Lefavre (1998) ne tiennent pas compte de l'effet du vent. L'auteur présente une comparaison des courants calculés par le modèle et des courants observés en surface à l'aide de bouées dérivantes (figure 7). Les écarts sont attribués à l'effet du vent local sur la couche de surface. Les résultats de la modélisation confirment d'autres observations réalisées en surface par bouées dérivantes (Roche, 1986) et par mouillages sur stations fixes (Pettigrew *et al.*, 1991). Les observations par bouées dérivantes montrent que les courants de surface, pendant le flot, sont presque toujours

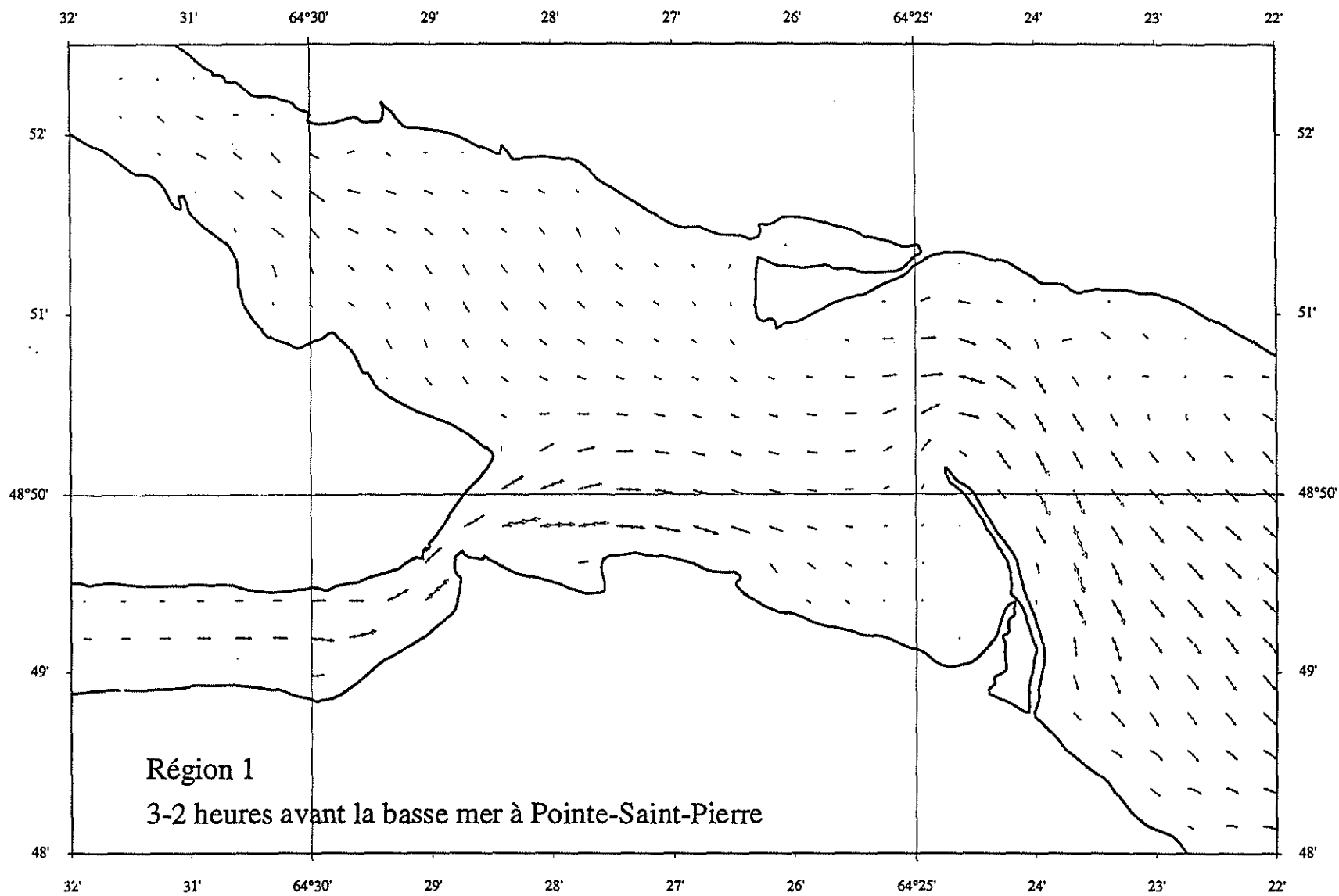


Figure 5 Courants de surface modélisés dans le havre de Gaspé pendant le plein jusant (2,5 heures avant la basse mer). D'après Lefavre (1998).

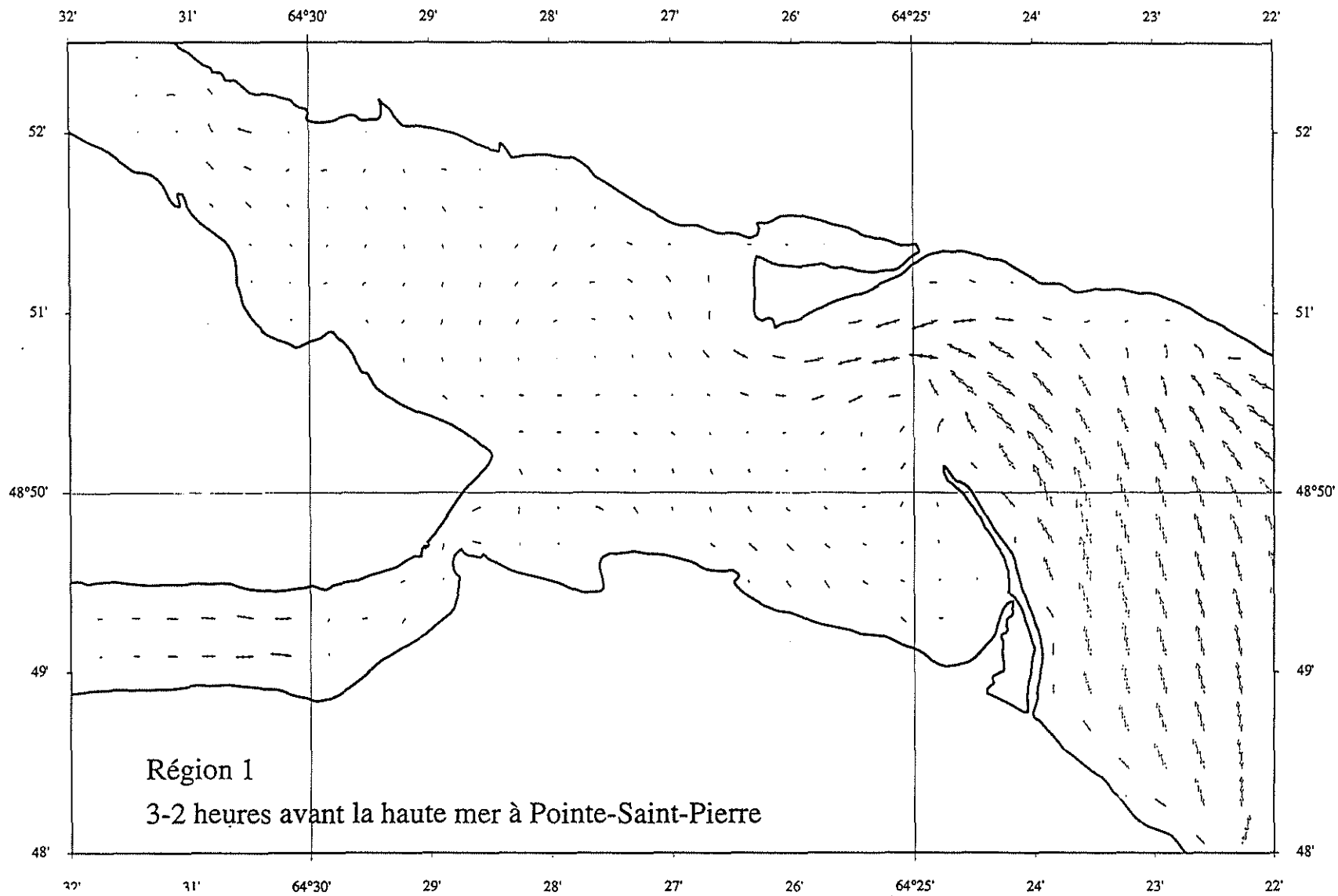


Figure 6 Courants de surface modélisés dans le havre de Gaspé pendant le plein flot (2,5 heures avant la haute mer). D'après Lefavre (1998).

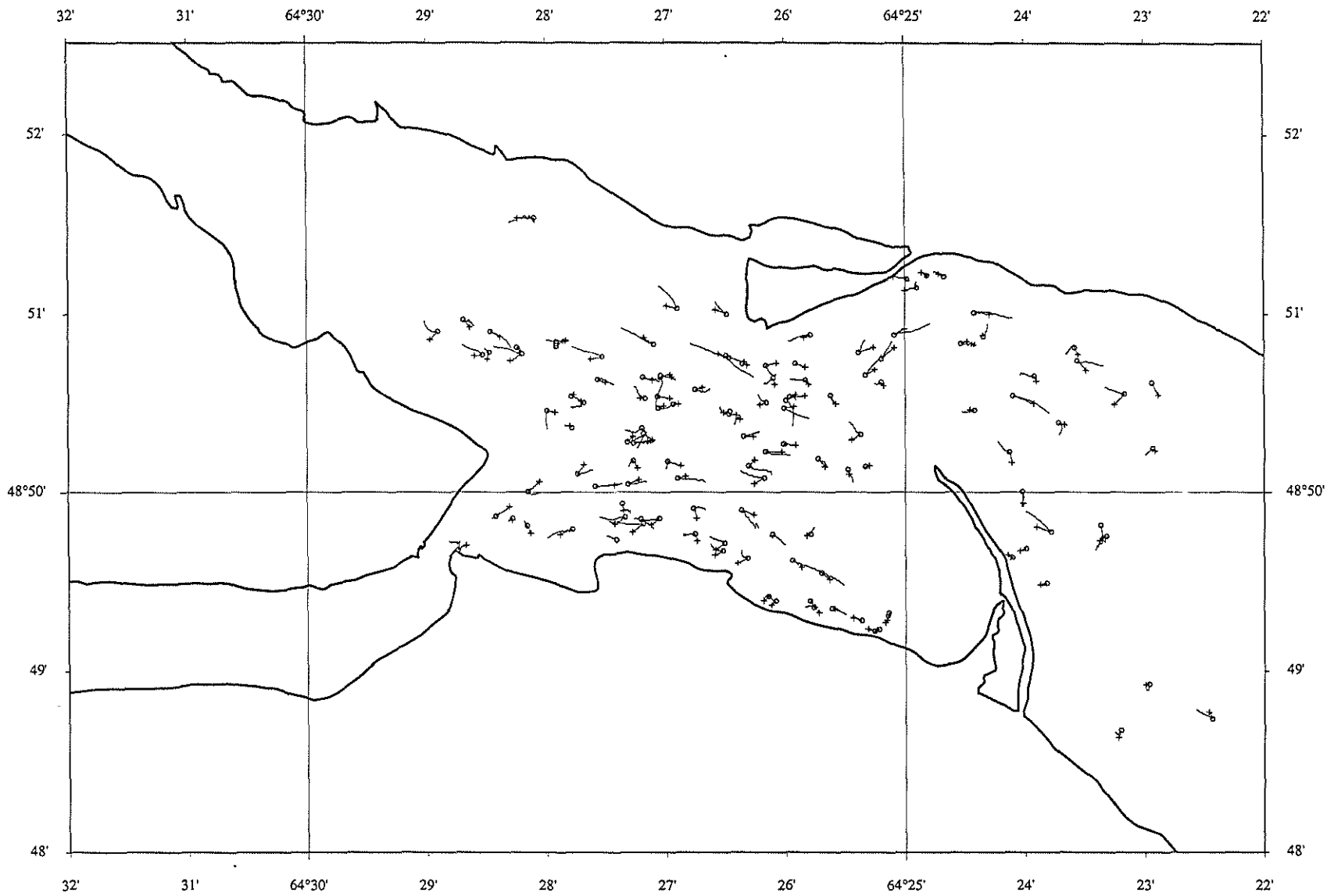


Figure 7 Comparaison des courants de surface modélisés et mesurés dans le havre de Gaspé. D'après Lefavre (1998).

dominés par le vent. La dominance du vent est due au fait que les courants de marée et les courants isostatiques ont tendance à s'annuler presque partout dans le havre pendant la marée montante. Pendant le jusant, par contre, les courants causés par la marée et de l'écoulement fluvial se conjuguent. Ces courants de jusant sont dominants lorsque le vent est faible, mais l'effet du vent devient significatif et même prépondérant dès que le vent forçit dans la zone d'étude.

Roche (1986) a réalisé deux essais avec des bouées dérivantes lâchées près du quai fédéral. Dans le premier essai, réalisé en juin 1986, le vent était de l'est et du sud-est ; la trajectoire des bouées dérivantes suggère une forte influence du vent. Les bouées, lâchées aux environs du quai fédéral, traversent le havre en direction nord puis bifurquent vers l'ouest et se dirigent vers l'embouchure de la rivière Dartmouth en traversant le havre en diagonale. La vitesse de déplacement des bouées dérivantes est de l'ordre de 4 à 10 cm/s. En juillet, le vent est de l'ouest et les bouées dérivantes se déplacent en direction est, parallèlement à la rive sud du havre de Gaspé, près du quai fédéral. Les bouées dérivantes progressent vers la flèche de Sandy Beach et sont récupérés avant de s'échouer.

Booth (1994) interprète une partie des mesures de courants de surface par bouées dérivantes de Pettigrew et al. (1991). Il souligne la présence de circulations giratoires cycloniques et de zones de forte divergence des courants dans le havre de Gaspé. L'étude de Booth confirme l'effet du vent local sur les courants de surface observés dans les études antérieures. L'auteur note que les bouées dérivantes sont très sensibles aux divergences localisées, de sorte que l'interprétation des données de courant obtenues par cette méthode est plutôt limitée dans un bassin dont la bathymétrie est accidentée.

Il serait assez difficile de tirer des conclusions fermes sur l'effet net du vent dans la baie de Gaspé uniquement sur la base des essais avec des bouées dérivantes. D'une part, ces bouées dérivantes n'ont pas été calibrées pour évaluer la traînée provoquée par le vent sur la partie émergée des bouées dérivantes. Le rapport Roche (1986) dit seulement que les bouées dérivantes sont conçues pour offrir peu de prise au vent. Mais comme les vitesses de courant sont très faibles, même une faible traînée du vent sur la partie émergée de la bouée dérivante pourrait influencer les résultats. De plus, la stratification thermohaline de la colonne d'eau n'est pas évaluée dans l'étude de Roche (1986), de sorte qu'il est impossible de savoir quelle est l'épaisseur de la couche de surface influencée par le vent lors des mesures. Enfin, la profondeur exacte des bouées dérivantes n'est pas spécifiée. Les mêmes inconnues s'appliquent à l'étude de Lefavre (1998). Cependant, on dispose d'observations indépendantes qui tendent à confirmer les observations par bouées dérivantes.

L'effet du vent local sur la couche de surface a été observé l'aide de traceurs fluorescents par BPR Groupe Conseil (1999a et b). La figure 8 montre l'étendue du panache de rhodamine injecté dans la couche de surface lors d'un essai réalisé le 26 novembre 1998. La rhodamine est injectée dans un émissaire situé à l'amont du pont de la 132, dans l'embouchure de la rivière York. Le traceur de rhodamine a été injecté à dosage constant à partir de 10h00, vers la fin de la marée baissante (jusant). L'injection s'est poursuivie en continue pendant environ 4,5 heures, se terminant pendant la marée montante (flot), vers 14h45. De 10h00 à 11h00, des vents faibles à modérés (10 km/h) soufflaient du secteur sud-ouest. Vers 11h00, le vent faiblit et tourne progressivement pour s'établir du secteur nord-est vers 12h00. A partir de 12h00 jusqu'à 15h00, les vents se maintiennent du secteur nord-est en augmentant progressivement; leur vitesse moyenne pendant cette période est de l'ordre de 15 km/h.

Les auteurs du rapport (BPR Groupe Conseil, 1999a) constatent que le panache de rhodamine progresse en direction de Penouille jusqu'à la fin du jusant, sous l'influence des vents du sud-ouest, de l'écoulement isostatique et des courants de jusant conjugués. Lorsque le vent et la marée s'inversent, le panache de

FIGURE 8

TITRE : « ESSAI DE
DIFFUSION »

* VOIR À LA FIN DU PRÉSENT
DOCUMENT. *

rhodamine se déploie vers le nord-ouest, en direction de l'Anse aux cousins (figure 8). Une simple inversion des courants de marée aurait plutôt eu tendance à ramener le panache vers l'intérieur de la rivière York. Les résultats suggèrent que les vents du nord est aient rabattu le panache le long de la côte dans l'embouchure de la rivière Dartmouth. L'étude de BPR Groupe-conseil fournit un exemple non ambigu de la dominance du vent sur l'écoulement dans la couche de surface. La rhodamine suit l'eau de surface et ne présente aucune exposition à l'air libre, contrairement aux bouées dérivantes.

Les données recueillies par BPR Groupe-conseil comprennent aussi des mesures directes des courants dans les embouchures à l'aide d'un courantomètre à effet Doppler (ADCP). Cet appareil mesure instantanément un profil vertical des courants (vitesse et direction) dans la colonne d'eau. Les courantomètres ADCP peuvent aussi mesurer les courants alors que le bateau se déplace le long d'une ligne de transect. L'appareil est équipé d'un système acoustique qui lui permet de repérer le fond marin et de corriger les distorsions causées par le déplacement relatif du bateau. Les résultats obtenus par BPR Groupe-conseil (1999b) sont présentés sous forme de tableaux de données. Étant donnée la très grande quantité d'information recueillie par cet instrument, ce format de présentation n'est pas très pratique pour l'interprétation des données. Cependant, il est probable que les données existent en format numérique et qu'une entente peut être négociée avec le consultant et ses clients (MAPAQ, SODIM et Ville de Gaspé) pour que les données numériques soient récupérées aux fins d'une interprétation ultérieure. Les profils ADCP de BPR Groupe-conseil (1999a et b) ne sont pas accompagnés d'information détaillée sur la stratification thermohaline pour la période de mesure des courants. C'est un peu dommage parce que ces données sont les seules mesures directes instantanées des courants disponibles pour l'ensemble de la colonne d'eau. Il aurait été très utile de pouvoir comparer les courants et la stratification thermohaline pour les conditions de marée, de vent et de débit fluvial prévalant durant les essais.

Les seules informations concomitantes sur les courants et les conditions de salinité et température de l'eau sont les séries chronologiques réalisées par Pêches et Océans Canada (Pettigrew *et al.*, 1991) et par l'ISMER (Koutitonsky *et al.* 2001). Ces mesures proviennent de stations fixes courantométriques dont certaines sont situées très près de la surface. La figure 9, par exemple, montre les données de courant mesurées par Pettigrew *et al.*, (1991) en juin 1990 à la station C5, située dans l'embouchure de la York, à deux kilomètres à l'amont du pont de la route 132 (voir position à la figure 2). Les courants sont présentés sous forme de composantes vectorielles U et V; l'axe U est positif vers l'est (90°) et V est positif vers le nord (0°). On peut mieux se représenter l'orientation et la grandeur des vecteurs vitesse à l'aide du diagramme de dispersion (scatter diagram) présenté à la figure 10. Cette figure montre que l'orientation des vecteurs forme une ellipse assez ouverte mais que l'axe est-ouest domine dans l'embouchure de la rivière York.

Bien que le courantomètre de la station C5 utilisé par Pettigrew *et al.* (1991) soit installé à une élévation fixe de 0,8 m sous le niveau des basses mers (3,0 m au-dessus du fond), les courants mesurés par cet appareil ne reflètent pas nécessairement les circulations dans la couche de surface. La hauteur de l'appareil est fixe par rapport au fond, mais la profondeur de l'instrument varie avec la marée par rapport à la surface de l'eau. Lors d'une marée de vive-eau normale, l'appareil est à une profondeur de 0,8 m à marée basse (voir tableau 1) et de 2,5 m à marée haute. Comme l'épaisseur du panache de la rivière York est souvent inférieure à 2 m, les déplacements verticaux du panache font passer le courantomètre de la couche de surface (marée basse) à la couche sous-jacente (marée haute). Les fluctuations tidales de la salinité et de la température de l'eau observables à la figure 4 correspondent à ces passages d'une couche à l'autre. Les courants ne sont mesurés dans la couche de surface que lorsque l'appareil baigne dans cette couche d'eau, ce qui est difficile à établir à la figure 9. Il est possible d'isoler les mesures correspondant à la couche de surface en agrandissant l'échelle horizontale des figures 4 et 9 et en comparant systématiquement les valeurs de courant et de salinité. Cependant, l'échelle de présentation des données de Pettigrew *et al.* (1991) ne permet pas de faire cette comparaison directe.

S4 646

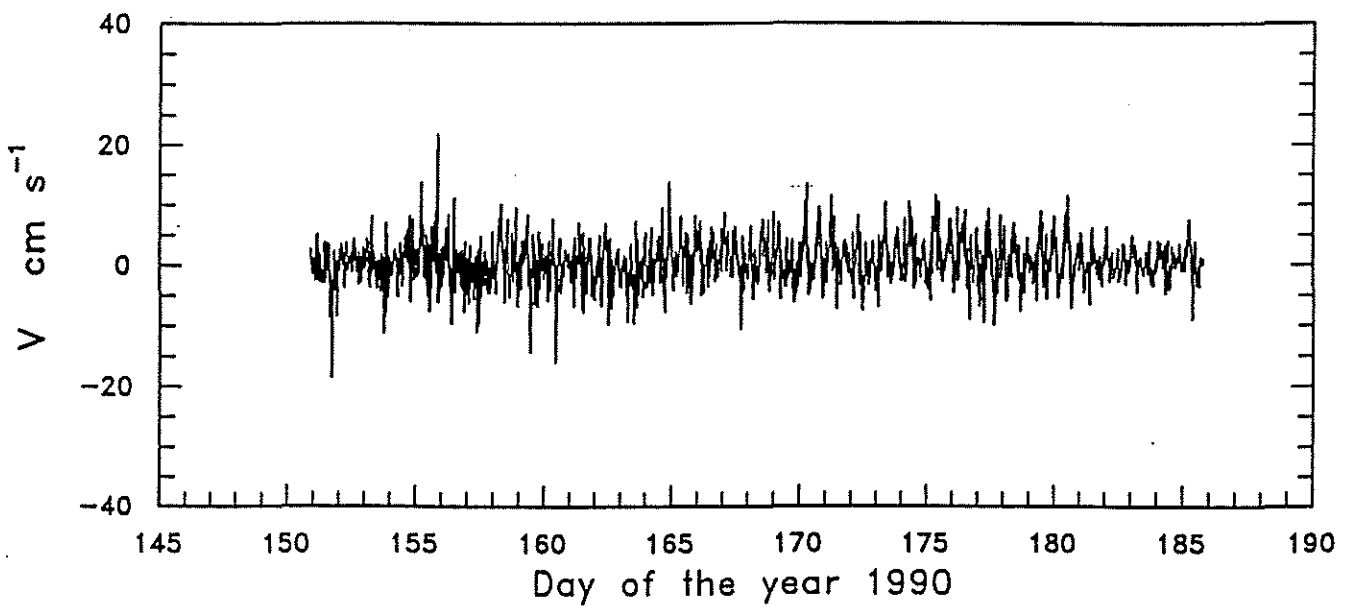
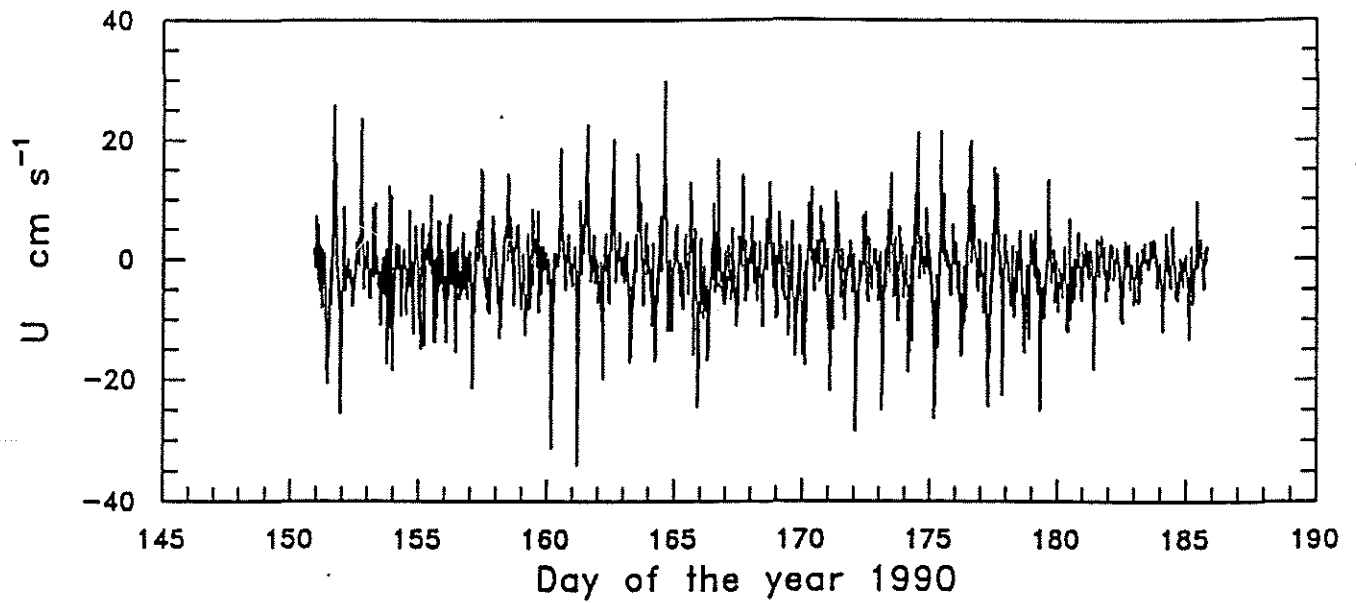
U positif vers N90E
V positif vers N00E

Figure 9 **Séries chronologiques de courants à la station C5, à 0,8 m de profondeur. Tiré de Pettigrew *et al.* (1991).**

S4 646

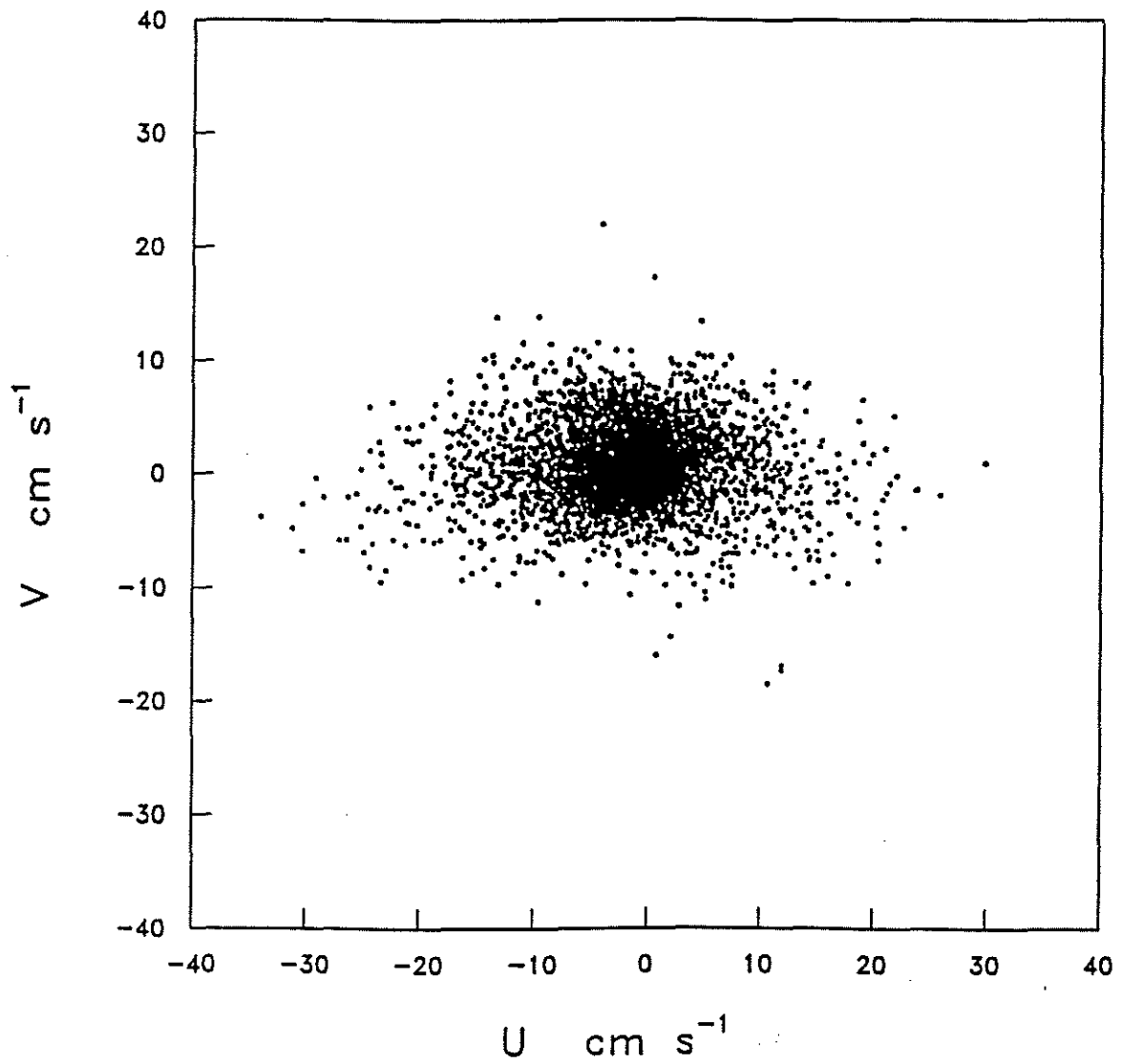


Figure 10 Diagramme de dispersion des vecteurs vitesse des courants à la station C5 en surface. Tiré de Pettigrew et al. (1991).

Les données de Pêches et Océans Canada sont généralement conservées par le Centre Canadien de données environnementales (CCDE) à Ottawa et il est possible de les obtenir en format numérique. Les seules stations fixes pour lesquelles on dispose de mesures prises dans la couche de surface sont les stations C4 et C5, de Pettigrew *et al.* (1991) ; ces stations sont situées dans les embouchures des rivières Dartmouth et York (voir positions figure 2). Des courantomètres ont aussi été installés près de la surface aux stations C2 et C3 (voir figure 2) dans le centre du havre et à l'aval du quai fédéral, mais ces appareils sont situés respectivement à 4,1 et 3,8 m sous le niveau des basses mers et baignent rarement dans la couche de surface. Les salinités mesurées à ces stations sont presque toujours supérieures à 25 ‰, ce qui reflète plutôt les conditions qui prévalent dans la couche inférieure du havre de Gaspé. De même, la seule station de surface installée par l'ISMER (Koutitonsky *et al.*, 2001) est située sous le pont de Gaspé, à une profondeur de 3,5 m sous le niveau des basses mers ; comme cette station a été opérée en octobre et novembre 2000 à très faible débit fluvial, les données sont surtout représentatives de la couche inférieure.

Les courants de surface mesurés dans les embouchures de rivières aux stations C4 et C5 se situent entre 0 et 30 cm/s et sont orientés principalement parallèlement à l'axe des embouchures, bien que les courants latéraux soient très significatifs, comme le montrent les diagrammes de dispersion (ex : figure 10). Ces diagrammes et ces données ne distinguent pas les courants engendrés par le vent de ceux produits par la marée et l'écoulement isostatique des rivières. On peut séparer les différents effets en procédant à des analyses des séries chronologiques par des méthodes appropriées (analyse harmonique, filtres, analyses spectrales ou autres) ou en comparant les forces initiatrices des courants et les mesures de courant (ex : comparaison du vent et des courants). Le rapport de Pettigrew *et al.* (1991) est un rapport de données et ne propose aucune analyse permettant d'identifier et d'évaluer l'importance relative des diverses causes des circulations. Il est possible de se procurer les données originales au Centre Canadien des Données Environnementales d'Environnement Canada.

Koutitonsky *et al.* (2001) ont procédé à des analyses détaillées des données recueillies aux trois stations fixes courantométriques installées dans le havre de Gaspé en octobre et novembre 2000. Tel que mentionné ci-dessus, aucune de ces trois stations n'est située dans la couche de surface. Toutes les données sur stations fixes sont prises dans la couche inférieure, dont nous discuterons à la prochaine section.

En résumé, les données disponibles sur les circulations dans la couche de surface du havre de Gaspé indiquent que les courants sont principalement liés à l'effet localisé de trois forces : 1) l'écoulement de l'eau douce en provenance des rivières York et Dartmouth cause un écoulement de surface vers l'aval. La vitesse des courants dépend de la quantité d'eau salée entraînée dans le panache de surface par le mélange vertical et du débit des rivières. 2) Les fluctuations du niveau de l'eau causées par la marée à l'entrée du havre génèrent des courants de marée. En simplifiant, on peut dire que ces courants sont dirigés vers l'amont pendant le flot (marée montante) et vers l'aval pendant le jusant (marée baissante) en suivant grossièrement l'orientation de la bathymétrie. 3) Le vent local soufflant au-dessus de l'eau entraîne des circulations complexes. Le cisaillement causé par le vent produit des courants de surface dirigés dans la direction où souffle le vent ; la vitesse de ces courants se situe généralement entre 1 et 3 % de celle du vent. Près des côtes, cependant, les courants sont déviés par les obstacles topographiques et tendent à s'aligner avec la topographie. La présence de hauts fonds et les irrégularités de la côte favorisent la formation de zones de cisaillement et de divergence des courants (Booth, 1994) et de courants giratoires dans le havre.

Ces facteurs locaux agissent simultanément et les courants de surface sont la résultante vectorielle de ces forces à un moment et à un lieu donnés. Il semble que le vent domine généralement les forces qui causent les courants de surface, surtout pendant le flot alors que la marée et l'écoulement isostatique des rivières

ont tendance à s'annuler mutuellement. Cependant, la dominance du vent n'est pas suffisante pour masquer l'effet des autres forces. De plus, d'autres facteurs interviennent à un moindre degré, comme les mouvements inertiels et des cisaillements engendrés par des circulations induites dans la couche inférieure. Ces facteurs sont présentés à la prochaine section. La complexité apparente des circulations de surface découle de l'absence d'une force nettement dominante par rapport aux autres.

Les études existantes sur les circulations dans la couche de surface du havre de Gaspé fournissent dans l'ensemble une bonne couverture spatiale et temporelle. Les types de mesures sont variés (bouées dérivantes, Doppler ADCP, courantométrie sur station fixe, injection de traceurs fluorescents, profils de salinité et température de l'eau) et leur distribution spatiale et temporelle permet de couvrir assez bien l'ensemble des conditions prévalant dans la zone d'étude. L'analyse des données, par contre, est assez limitée. La plupart des données sont fournies dans des rapports de données brutes (ex : Pettigrew *et al.*, 1991) ou dans des rapports d'études très ciblés sur une problématique locale. Les données ont été très peu analysées et sont pour la plupart présentées dans des formats graphiques qui ne favorisent pas leur exploitation aux fins d'une présentation synthétique des circulations dans le havre de Gaspé. La mise au point d'un modèle conceptuel des circulations de surface dans le havre de Gaspé est possible sur la base des données existantes à condition de pouvoir récupérer les données originales et d'en faire une analyse plus détaillée.

3.2.2 Les courants dans la couche inférieure

Tel que mentionné précédemment, le havre de Gaspé comprend deux couches d'eau, soit le panache de surface contenant la majeure partie de l'eau douce des rivières York et Dartmouth, et une couche sous-jacente qui occupe tout le reste du bassin jusqu'au fond. Cette couche sous-jacente ou couche inférieure possède les propriétés de la couche de surface du Saint-Laurent de 0 à 20 m de profondeur. La salinité et la température de cette couche d'eau varient sur une base saisonnière. En hiver, la salinité est de l'ordre de 32 ‰ et la température de l'eau se situe très près du point de congélation. En été, la salinité diminue suite à l'apport d'eau douce de la crue du Saint-Laurent et de ses tributaires. Carrière (1978) note un décalage d'environ 3 mois entre la crue du Saint-Laurent et la chute estivale correspondante de la salinité en face de la baie de Gaspé. La salinité estivale de la couche inférieure du havre de Gaspé décline peu à peu jusqu'à un minimum de l'ordre de 27 ‰ en août. La température de l'eau, dans cette couche, augmente pendant l'été pour atteindre un maximum de l'ordre de 9 à 10 °C.

La figure 11 montre les courants mesurés à la station C3 de Pettigrew *et al.* (1991) située au centre du havre de Gaspé. Le courantomètre utilisé est fixé à 14,2 m de profondeur (sous le niveau des basses mers). Les courants sont décomposés en vecteurs orientés dans l'axe du havre de Gaspé (positif vers l'amont, N300E) et perpendiculairement à l'axe du havre (positif vers le sud-ouest, N210E). La figure 11 permet d'abord de constater la présence d'une oscillation tidale semi-diurne des courants indicatrice d'une contribution significative des courants de marée (de l'ordre de 10 cm/s). Cependant, ces fluctuations semi-diurnes sont en partie masquées ou modulées par des fluctuations à diverses fréquences des courants ; l'intensité de ces courants non-tidaux est parfois nettement supérieure à celle des fluctuations tidales.

La figure 12 offre une représentation des courants de la station C3 sous forme d'un diagramme de dispersion. Cette présentation met en évidence la prédominance des courants orientés dans l'axe du havre (NO-SE). Ce diagramme montre aussi que les courants les plus forts (vitesse entre 25 et 40 cm/s) sont orientés vers l'ouest nord-ouest, soit en direction de l'amont du havre de Gaspé, vers la rivière Dartmouth. Il semble cependant que cette dominance des courants vers l'amont soit le fait de quelques

CM 6010

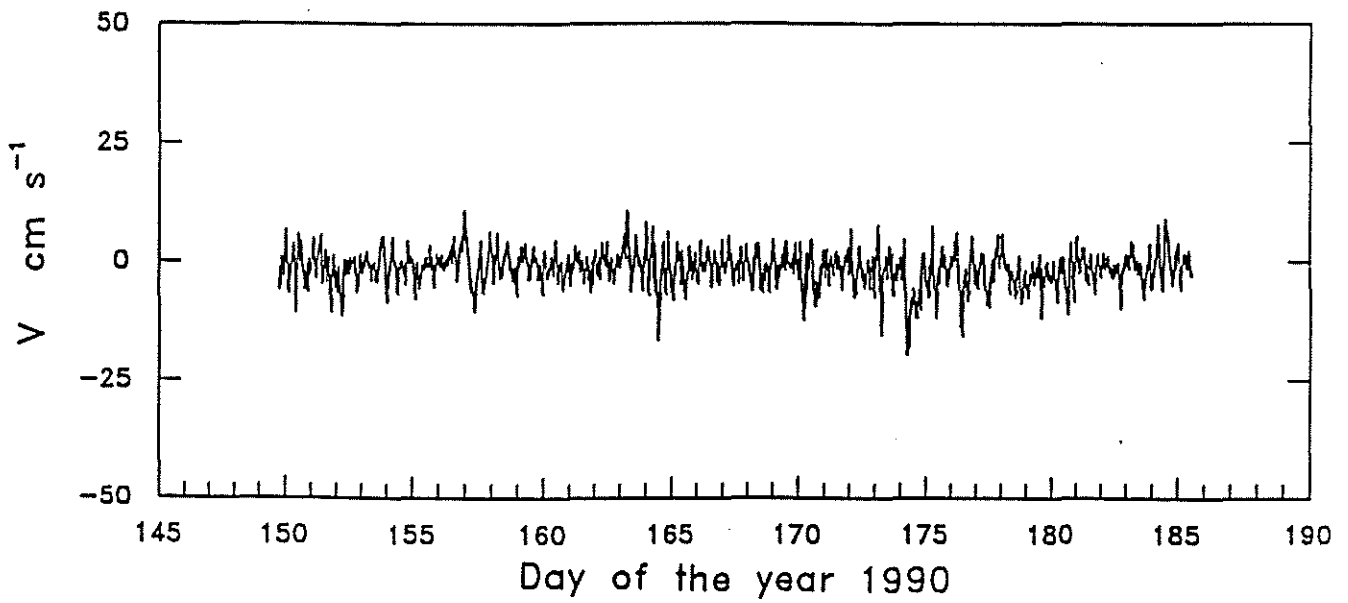
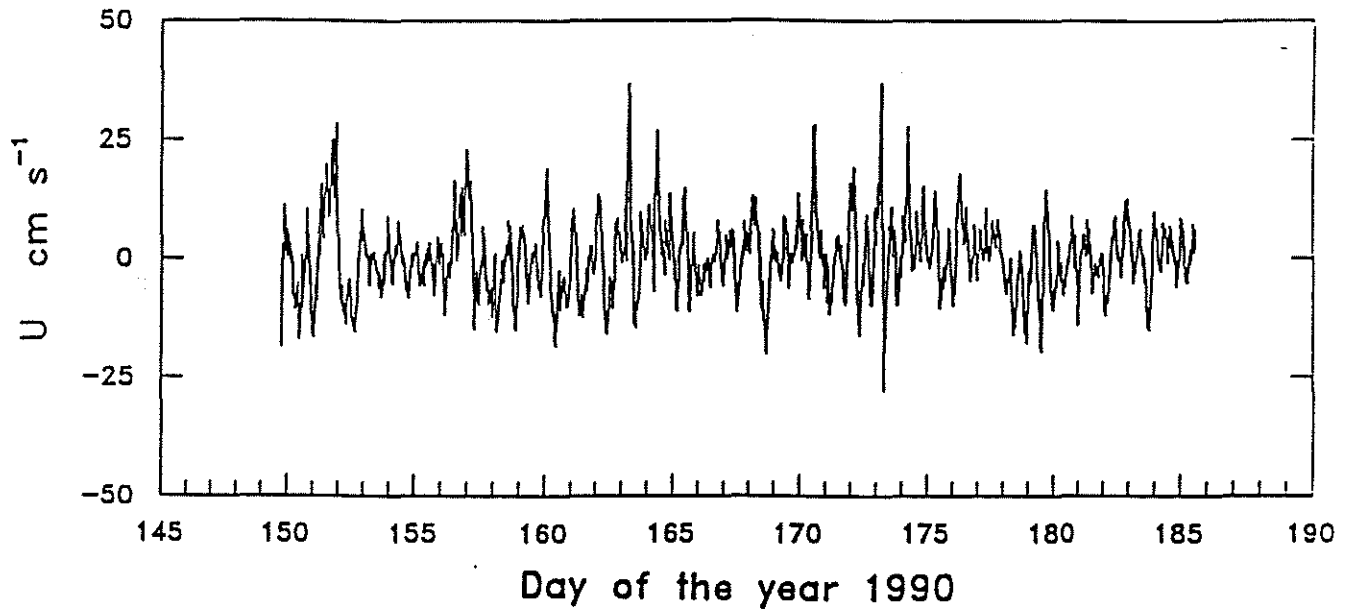
U positif vers N300E
V positif vers N210E

Figure 11 Séries chronologiques de courants à la station C3, à 14,2 m de profondeur. Tiré de Pettigrew *et al.* (1991).

CM 6010

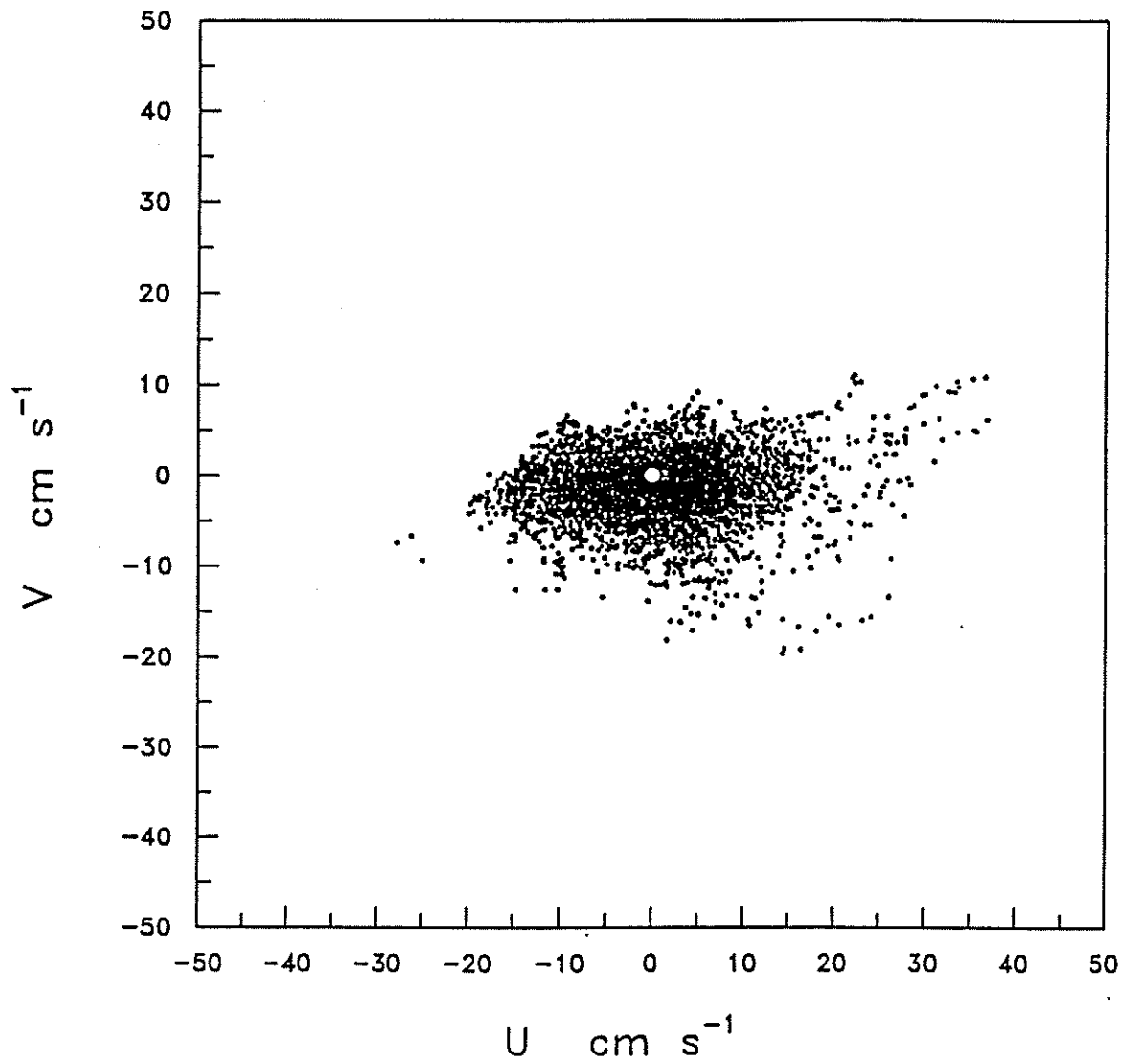


Figure 12 Diagramme de dispersion des vecteurs vitesses à la station C3 à 14,2 m de profondeur. Tiré de Pettigrew et al. (1991).

événements isolés ; le diagramme de la figure 12 ne permet pas de déceler l'orientation des circulations nette à cette profondeur de 14,2 m.

Pour interpréter les données de courant des figures 11 et 12, il est très utile d'examiner en détail des données de salinité et de température de l'eau et les données météorologiques, notamment, les données de vent. La figure 13 présente une série chronologique des données de température et de salinité prises au même endroit et couvrant la même période que celle de la figure 11. La figure 14 présente les données de vitesse et de direction du vent mesurées à 5 m au-dessus du niveau moyen de la mer à Sandy Beach pendant cette même période. Toutes ces données sont tirées de Pettigrew *et al.* (1991). La comparaison de ces données permet d'élaborer une ébauche de modèle conceptuel des circulations dans la couche inférieure du havre de Gaspé.

Ces circulations sont en partie contrôlées par les mêmes processus que ceux de la couche de surface, soit l'écoulement des rivières, les marées et le forçage météorologique. Cependant, les courants qui en résultent sont très différents des courants de surface parce que les forces génératrices des courants ne s'appliquent pas de la même manière. L'écoulement des rivières et le mélange vertical de l'eau douce et de l'eau salée entraîne de l'eau salée dans la couche de surface qui s'écoule vers l'extérieur du havre. On a mentionné plus haut que la quantité d'eau salée exportée vers le golfe dans le panache de surface représente 10 à 20 fois le débit d'eau douce. Pour que soit conservé le volume d'eau dans le havre, cela implique qu'un débit équivalent d'eau salée doit pénétrer dans le havre de Gaspé dans la couche inférieure. Mais comme la couche inférieure est beaucoup plus épaisse en général que la couche de surface, les courants nets résultants de cette circulation résiduelle à deux couches sont généralement 5 à 10 fois plus faibles dans la couche inférieure qu'en surface. L'ordre de grandeur des courants résiduels, dirigés vers l'amont est de 0,2 à 0,5 cm/s. Ces courants sont trop faibles pour être mesurés directement par la plupart des courantomètres et c'est probablement la raison pour laquelle il est impossible de déceler une tendance nette à la figure 11. On peut calculer les courants nets en solutionnant les équations de conservation du volume et de balance de masse. C'est ce que fait Carrière (1973) en calculant les débits mensuels dans cette couche d'eau et le temps de résidence de l'eau dans le havre.

Même si les courants résiduels sont très faibles dans la couche inférieure, ils sont importants parce qu'ils contribuent de façon très significative au renouvellement de l'eau dans le havre de Gaspé et aux échanges avec le golfe du Saint-Laurent. Carrière (1973) a calculé que les circulations résiduelles à deux couches peuvent remplacer toute l'eau du havre de Gaspé en moins de trois semaines selon les conditions de débit fluvial. Les courants de marée, bien que plus forts, requièrent plus de temps pour renouveler l'eau du havre, en particulier dans la partie amont du havre. Les circulations résiduelles permettent de maintenir la salinité élevée de l'eau dans la baie et sa température relativement fraîche. Ils permettent aussi de renouveler les sels nutritifs et d'évacuer hors du havre les contaminants urbains et industriels (aquaculture et mariculture).

La comparaison des figures 13 et 14 permet également d'identifier les mécanismes qui contrôlent la composition des masses d'eau et les échanges d'eau entre le havre et le golfe du Saint-Laurent. Les mesures prises entre 14,2 et 18,6 m de profondeur (station C1, C2 et C3) montrent que la salinité et la température de la couche profonde de l'estuaire du havre de Gaspé peut fluctuer considérablement sur une période de quelques jours. Par exemple, la figure 13 montre que la température et la salinité de l'eau sont respectivement de 8°C et 28 ‰ le 19 juin (jour julien 170). Le 25 juin (jour julien 176), les propriétés TS (température et salinité) de l'eau, à la même profondeur, passent à 2°C et 31,5 ‰. Quelques jours plus tard, le 1 juillet (jour julien 182) les propriétés TS à 14,2 m de profondeur sont revenues à 9°C et 27,5 ‰. Durant cette période, des variations très brusques de la salinité et de la température de l'eau sont observées partout dans la couche de fond, à diverses profondeurs. Elles vont toutes dans le même sens et comportent d'abord une chute marquée de température et une hausse de

CM 6010

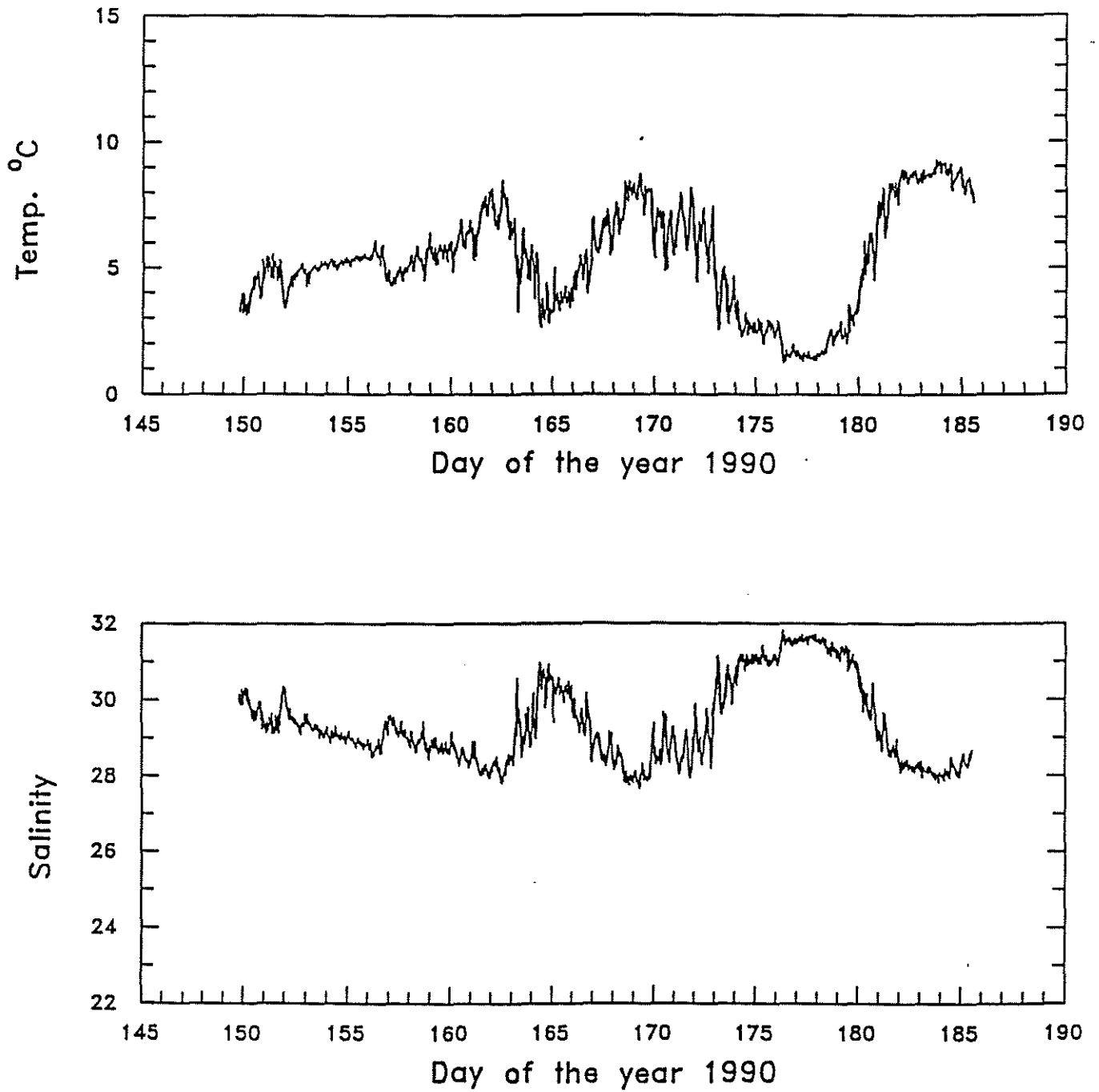


Figure 13 Séries chronologiques de température et de salinité de l'eau à la station C3, à 14,2 m de profondeur. Tiré de Pettigrew *et al.* (1991).

MET 381

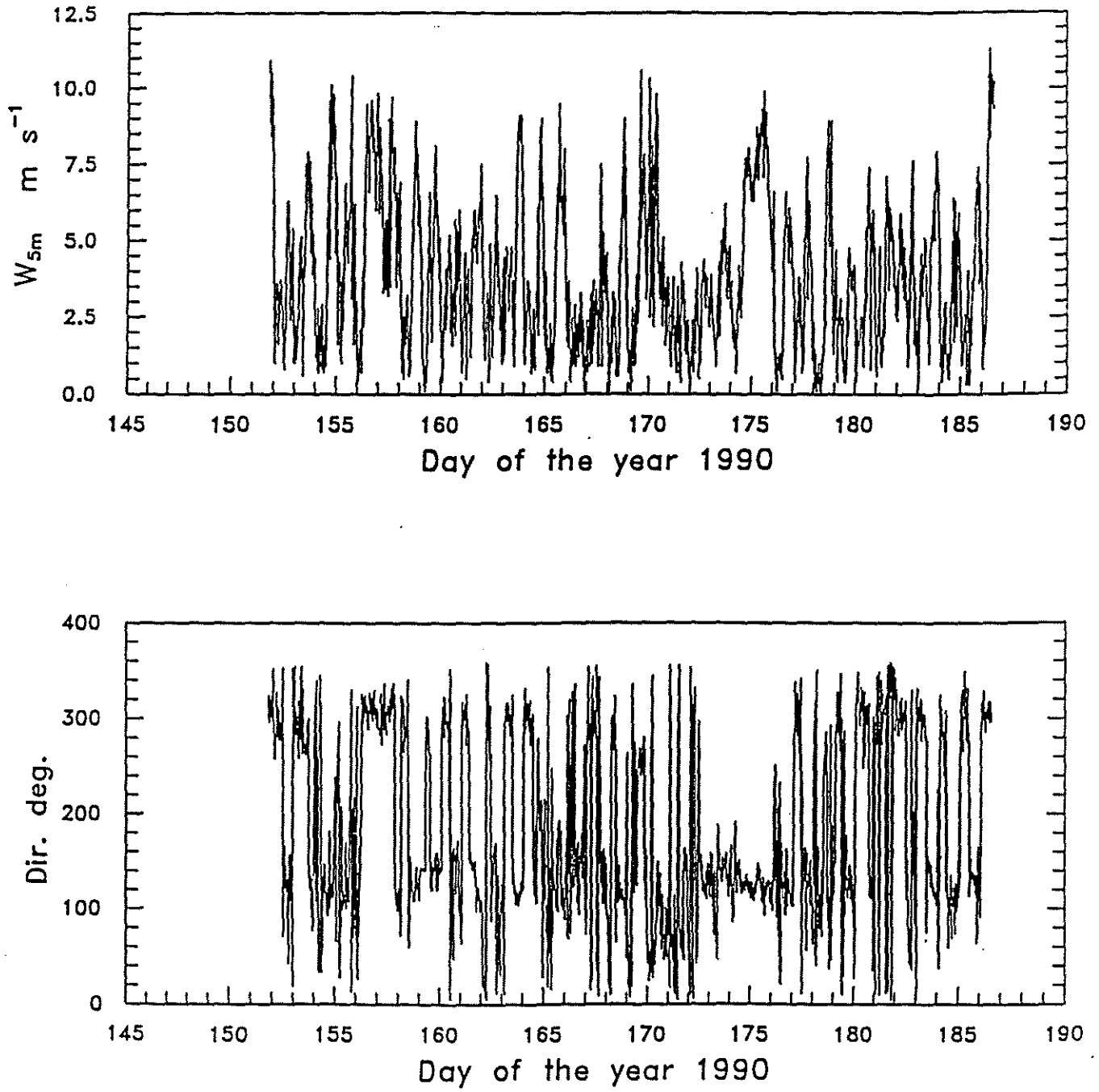


Figure 14 Séries chronologiques vitesse et de direction du vent, à Sandy Beach, altitude de +5 m, station S. Tiré de Pettigrew *et al.* (1991).

salinité suivi d'un retour à la situation prévalant avant la chute. En profondeur, le phénomène se manifeste plus tôt qu'au sommet de la colonne d'eau. Ainsi, le courantomètre de la station C3 située à 3,2 m sous la surface détecte aussi une baisse de la température de l'eau (qui passe de 11 à 4 °C) et une hausse de salinité (qui passe de 24 à 30 ‰), mais cette fluctuation des propriétés TS se manifeste seulement à partir du 24 juin, soit 5 jours après le début de la baisse observée à 14,2 m.

Ces fluctuations de la température de l'eau montrent que l'eau froide et salée qui était présente au fond du bassin, à plus de 15 m de profondeur le 19 juin se retrouve tout près de la surface, à 3 m de profondeur quatre à cinq jours plus tard. Le havre de Gaspé, dont la température de l'eau se situait entre 8 et 10 °C et dont la salinité était de 27 à 28 ‰ se retrouve quelque jours plus tard rempli d'eau nettement plus froide (2 à 4 °C) et plus salée (30 à 31,5 ‰). Il a donc fallu que toute l'eau de la couche inférieure du havre soit évacuée hors de l'estuaire et remplacé par de l'eau plus froide et plus salée provenant d'une couche d'eau plus profonde. Cette remontée d'eau profonde est connue sous le nom de up-welling. Le phénomène inverse, ou down-welling se produit à partir du 25 juin et toute l'eau froide et salée est à nouveau remplacée par de l'eau plus chaude et moins salée.

Le processus qui cause le up-welling et le down-welling dans le havre de Gaspé est probablement le vent. La figure 14 montre que pendant la période du 19 au 26 juin 1990, des vents des secteurs est et sud-est ont soufflé dans la baie de Gaspé. Or, ces vents, lorsqu'ils agissent sur l'ensemble du golfe du Saint-Laurent, ont tendance à déplacer l'eau de surface en direction de la côte nord du Saint-Laurent, ce qui provoque un contre courant vers la Gaspésie dans la couche sous-jacente. Si les vents persistent assez longtemps, ces mouvements d'eau provoquent un empilement d'eau ou épaissement de la couche de surface (10 °C et 27 ‰) près de la côte nord et un amincissement de cette couche d'eau le long de la côte gaspésienne. Le contre courant produit une remontée des eaux froides et salées sous-jacentes (2 à 4 °C et 30 à 32 ‰) en Gaspésie. Les vents d'est ont donc tendance à provoquer du up-welling (remontée d'eau profonde) près du littoral gaspésien et du down-welling le long de la côte nord. Les vents d'ouest produisent le résultat inverse. On peut trouver une description schématique de ce processus dans une étude préparée par Roche (1999) pour Travaux publics et Services gouvernementaux Canada dans la baie de Sept-Iles. Il faut un certain temps pour que les vents produisent un effet mesurable compte tenu de la dimension et de l'inertie des masses d'eau concernées. Il faut également un certain temps pour que les masses d'eau mises en mouvement s'arrêtent et reprennent leur stratification d'origine lorsque le vent tombe. Les épisodes de up-welling et de down-welling se produisent constamment, mais il est assez rare que les vents couvrent l'ensemble du Golfe et persistent assez longtemps pour qu'on puisse en mesurer clairement les effets dans les baies côtières comme le havre de Gaspé.

Pourtant, l'exemple présenté ci-dessus illustre l'importance des mouvements d'eau induits par le forçage météorologique à l'échelle du golfe du Saint-Laurent. L'épisode de up-welling du 19 au 25 juin a remplacé en quelques jours presque toute l'eau du havre de Gaspé par de l'eau plus froide et plus salée provenant du golfe du Saint-Laurent. Cet épisode de up-welling est suivi d'un retour à la normale qui se traduit par une période de down-welling d'une durée de quelques jours pendant lesquels toute l'eau du havre de Gaspé est à nouveau remplacée. À ces transports d'eau correspondent des courants dans la couche inférieure du havre. Pendant la phase de up-welling, des courants dirigés vers l'amont se sont superposés aux courants de marée et aux circulations résiduelles à deux couches. L'inverse s'est produit pendant la phase de down-welling. L'intensité de ces courants n'a pas besoin d'être très élevée pour expliquer les échanges d'eau. Il suffit de courants de l'ordre de 5 cm/s en moyenne se maintenant pendant plusieurs jours pour échanger l'eau du havre au complet.

L'exemple de up-welling/down-welling présenté ci-dessus permet d'illustrer un aspect particulier des circulations dans le havre de Gaspé. Lorsqu'un épisode de vents d'est persistants s'amorce dans le Golfe, le vent local s'appliquant sur la couche de surface tend à retenir l'eau de surface dans le havre et même à

produire une circulation dirigée vers l'amont près de la surface. Cette rétention de l'eau douce en surface se traduit au début par un épaississement de la couche de surface, suivi peu après par un contre-courant vers l'aval à la base de la couche de surface. Pendant ce temps s'amorce le processus de up-welling dans la couche inférieure avec un certain décalage dans le temps. Le up-welling se traduit au début par une entrée d'eau près du fond et une sortie d'eau au sommet de la couche inférieure, sous le panache de surface. A mesure que le processus de up-welling s'intensifie, le courant entrant dans le havre se déplace vers le haut et le courant sortant s'intensifie sous le panache de surface. Un profil vertical des courants montrerait à ce moment des circulations orientées dans des directions opposées s'inversant à différents niveaux de la colonne d'eau. Le meilleur moyen d'obtenir une bonne représentation de ce type de circulations étagées est de mesurer les courants à l'aide d'un profileur ADCP. Les seuls profils de ce type disponibles dans la baie de Gaspé ont été réalisés par BPR Groupe-conseil (1999 a et b) dans la partie amont du havre. Le profil 6, qui traverse l'embouchure de la rivière Dartmouth, atteint 15 m de profondeur. Cependant, la présentation des données dans leur forme actuelle ne permet pas de savoir si les courants se stratifient dans la colonne d'eau.

La conjugaison du forçage météorologique local et régional, de la marée et de l'écoulement résiduel peut donc produire des courants qui se concentrent dans une fraction de la colonne d'eau. C'est probablement la raison pour laquelle les séries chronologiques comme celle de la figure 13 montrent des pointes de vitesses très isolées se produisant occasionnellement. Comme les instruments sont installés à une profondeur fixe par rapport au fond, il arrive que la profondeur de l'instrument coïncide avec la profondeur d'un de ces courants se produisant à un niveau spécifique de la colonne d'eau. On observe alors une hausse soudaine du courant à cette profondeur qui ne s'applique que pendant une courte période de temps correspondant à la conjecture particulière prévalant à ce niveau et à cette profondeur. A la figure 13 (station C3, 14,2 m), la plupart de ces pointes de vitesse sont orientées vers l'amont, ce qui suggère que les pointes en question se produisent pendant le flot lors d'épisodes de up-welling. Cependant, les données de Pettigrew *et al.* (1991) sont présentées à une échelle trop générale pour qu'il soit possible de vérifier cette hypothèse sans réorganiser les données.

Koutitonsky *et al.* (2001) ont analysé les séries chronologiques concomitantes de courants, de niveau d'eau et des stations météorologiques. Les auteurs ont procédé à des analyses harmoniques qui permettent de séparer l'effet des circulations nettes, des marées et des circulations à basses fréquences causées par le forçage météorologique. Les courants à diverses fréquences sont comparés aux niveaux d'eau et aux variables météorologiques à l'aide de méthodes d'analyse spectrale croisée (cohérence et phase). Ces méthodes permettent d'étudier la corrélation des variables entre comparées pour diverses combinaisons de leur phase et de leur fréquence.

Les analyses de Koutitonsky *et al.* (2001) confirment l'ordre de grandeur des courants de marée évalués ci-dessus à partir des données de Pettigrew *et al.* (1991). Les courants de la marée semi-diurne M2 sont de l'ordre de 0,1 m/s dans le centre de la baie de Gaspé et de l'ordre de 0,2 m/s dans la passe reliant Sandy Beach à Penouille et dans les embouchures des rivières York et Dartmouth. Lorsque les constituantes diurnes (O1 et K1) sont en phase avec la marée semi-diurne, les courants de marée peuvent atteindre le double des valeurs mentionnées ci-dessus. Les circulations résiduelles ne montrent aucune circulation estuarienne à deux couches en octobre dans la baie de Gaspé, ce qui est normal compte tenu du débit fluvial très faible à cette période de l'année.

Les analyses de Koutitonsky *et al.* (2001) révèlent également la présence d'une marée interne dans la baie de Gaspé. Cette marée interne prend la forme d'une oscillation de la pycnocline située à 20 m de profondeur qui donne lieu à des courants en direction opposée dans les couches de surface et de fond. Il est probable que cette marée interne se propage jusque dans le havre de Gaspé et provoque des courants non négligeables le long de la pycnocline saisonnière située entre 15 et 20 m de profondeur. Ces courants

de marée se produisent près du fond dans la zone profonde du havre ou le long de la plate-forme côtière. L'étude de Koutitonsky *et al.* (2001) révèle aussi la présence d'oscillations à basses fréquences du niveau d'eau (périodes de 1,6 à 2 jour et de 5 à 10 jours) se produisant en réponse à des fluctuations de la pression barométriques (effet de baromètre inversé). Les courants réagissent aussi aux vents orientés dans l'axe de la baie de Gaspé à des périodes de 1,5 à 10 jours à la station située dans la passe de Penouille/Sandy Beach. Cette station est située à une profondeur de 22 m, juste sous la pycnocline saisonnière. A cette profondeur, les oscillations de la pycnocline causées par le vent produisent des courants plus importants que dans le reste de la colonne d'eau. Malheureusement, les séries chronologiques de température et de salinité pour les stations situées à la profondeur de 20 m sont les seules à ne pas être présentées, ce qui est un peu dommage.

L'étude de Koutitonsky *et al.* (2001) porte principalement sur la baie de Gaspé plutôt que sur le havre de Gaspé lui-même. Cependant, l'information contenue dans cette étude est très utile pour comprendre les processus hydrodynamiques qui se produisent à l'extérieur du havre et qui influencent les circulations dans le havre. L'étude de l'ISMER est l'une des rares études qui analyse en détail les données disponibles. La plupart des autres études se résument à des rapports de données ou sont ciblées sur des problématiques locales. Dans les deux cas, les données font l'objet de très peu d'analyse et ne sont pas rattachées aux connaissances antérieures sur la dynamique du havre de Gaspé. L'étude de l'ISMER, commandée par la SODIM, vient tout juste d'être complétée et n'a pas encore été examinée par l'ensemble de ses commanditaires. Cette étude nous a été prêtée pour les fins du présent travail à la condition que le rapport ne soit pas photocopié en tout ou en partie. Il est donc impossible de reproduire ici certaines illustrations et tableaux du rapport, ce qui rend très difficile l'intégration des données du rapport à l'ébauche d'un modèle conceptuel de circulations des eaux dans le havre de Gaspé présentée ci-dessus. Cependant, le rapport constitue une source de données intéressante aux fins d'études ultérieures.

Compte tenu des limites budgétaires et des échéanciers du présent travail, il n'est pas possible de pousser plus loin l'analyse des séries chronologiques afin de compléter l'ébauche d'un modèle conceptuel des circulations dans le havre de Gaspé. Les exemples présentés ci-dessus ne sont fournis que pour illustrer la nature générale de ces circulations et les informations qu'on peut tirer des données existantes. La prochaine section propose une brève évaluation de ces données aux fins d'études de l'océanographie physique et de la dynamique des sédiments.

3.3 Évaluation des données

La revue des données présentée ci-dessus souligne la complexité des circulations dans le havre de Gaspé. Cette complexité est attribuable à la variété des processus qui contrôlent l'intensité des courants et leur distribution spatio-temporelle. Ces processus sont l'écoulement des rivières, la marée et le forçage météorologique (vent local, vent régional et pression atmosphérique) auxquels s'ajoutent certains facteurs qui contrôlent la stratification thermohaline locale et régionale. La plupart de ces processus ont un impact mesurable sur l'intensité des courants et aucun ne domine très nettement par rapport aux autres. Comme ces processus agissent simultanément et ont un effet composé sur les circulations, leur résultante se traduit par des circulations assez complexes.

Les données existantes sur les circulations dans la baie de Gaspé permettent de comprendre les circulations et l'hydrodynamique de la baie de Gaspé. La base de données est assez complète pour permettre d'élaborer un modèle conceptuel des circulations et pour servir d'intrants à des modèles mathématiques détaillés. Les données sur la couche de surface (panache des rivières York et Dartmouth)

comprennent des mesures par bouées dérivantes, des observations par traceurs fluorescents, des mesures sur stations fixes (séries chronologiques) et des profils verticaux des courants et des propriétés TS (température et salinité) de l'eau. Les mesures dans la couche inférieure sont moins variées et comportent surtout des séries chronologiques sur stations fixes et des profils verticaux STP (salinité et température). La distribution spatiale des données est assez bonne en général sauf en ce qui concerne la zone d'amont des estuaires des rivières York et Dartmouth. Comme le mélange de l'eau douce et de l'eau salée se produit en grande partie dans les estuaires de ces deux rivières, il serait utile de connaître un peu mieux les facteurs qui contrôlent le mélange initial dans le havre de Gaspé.

La principale limitation des études présentement disponibles sur le havre de Gaspé est l'absence d'analyse des données et le peu d'efforts consacrés dans ces études à l'interprétation des circulations et de la dynamique des courants. Les données les plus complètes et les plus intéressantes sont les mesures prises par Pêches et Océans (Pettigrew et al., 1991) et par l'ISMER (Koutitonsky et al., 2001). Les premières sont présentées uniquement sous forme de rapport de données et n'ont fait l'objet d'aucune analyse. Les secondes ont fait l'objet d'analyses détaillées, mais elles portent principalement sur la partie de la baie de Gaspé extérieure au havre lui-même. La plupart des autres études portant sur le havre de Gaspé ont été réalisées dans un cadre très spécifique visant à soutenir la prise de décision de certains projets particuliers, comme le déplacement d'émissaires d'eaux usées ou la protection de sites d'aquaculture. Les données sont alors interprétées dans le cadre restreint des objectifs spécifiques et ne sont pas analysées dans le but d'expliquer l'hydro-dynamique ou de comprendre les circulations dans leur ensemble. Même le modèle réalisé par Lefavre (1998) se limite, dans sa version actuelle, à décrire les circulations de surface dans des conditions très spécifiques. La seule étude qui porte un regard synthétique sur les masses d'eau, les circulations et leur variabilité saisonnière est celle de Carrière (1973). Cependant, cette étude a été réalisée en 1972 avec des moyens limités et ne comporte que des profils verticaux de salinité et de température de l'eau, ce qui en limite la portée. L'étude de Crémer et al. (2001) comporte aussi une analyse et une interprétation des données, mais elle est très focalisée sur une région particulière située à la pointe de Sandy Beach.

Une deuxième limitation de la base de données est la rareté des données portant spécifiquement sur la zone du quai fédéral. Les données dont nous disposons sont suffisantes, si l'on procède à des analyses plus complètes, pour conceptualiser correctement les circulations dans l'ensemble du havre. Mais les données disponibles dans le secteur du quai fédéral se limitent aux mesures de surface prises à l'aide de bouées dérivantes par Roche (1986) et aux séries chronologiques fournies par les deux courantomètres mouillés à la station C2 par Pettigrew et al. (1991). Il est probable qu'il faudra ajouter un peu plus d'information directe dans cette zone si l'on désire connaître en détail les circulations dans le secteur du quai fédéral.

On peut résumer ce qui précède en soulignant que la base de données est bonne et assez complète, mais que la faiblesse actuelle de nos connaissances sur les courants et circulations du havre de Gaspé découle d'une quasi absence d'analyse et d'interprétation de ces données pour constituer un modèle conceptuel de l'hydrodynamique de la zone d'étude. Il serait utile dans la majorité des cas de reprendre les données de base en format numériques et de les regrouper afin de brosser un portrait cohérent et synthétique des circulations. L'information est là, mais encore faut-il traiter les données de manière à mettre en évidence les éléments importants permettant d'expliquer l'hydrodynamique du havre de Gaspé.

Aux fins d'études de dynamique sédimentaire, la principale limitation de la base de données actuelle est l'absence presque complète de données concomitantes sur les sédiments en suspension. On dispose d'informations sur les courants et les circulations ; il existe aussi des données sur les sédiments du lit dans le secteur du quai fédéral. L'étude de Koutitonsky et al. (2001) présente en plus une carte de faciès sédimentaire de la baie de Gaspé. Par contre, nous n'avons pas trouvé d'information sur le contenu de

matière en suspension dans l'eau, sur la composition granulométrique de cette matière en suspension, sur sa composition chimique et sur les propriétés des suspensoïdes, comme leur état de floculation, leur densité, etc. Il est possible que de telles informations existent, mais rien n'indique que ces données aient été prises en concomitance avec les mesures de courant. La seule étude qui inclut des mesures sédimentologiques est celle de Crémer *et al.* (2001), qui porte sur une zone très localisée située à l'extérieur du havre près de la pointe de Sandy Beach.

Les particules en suspension se distribuent selon un équilibre dynamique avec la densité de l'eau, les courants, les propriétés électrochimiques qui contrôlent la formation d'agrégats et la floculation et leur vitesse de sédimentation. Il est donc important de recueillir des données sur les particules en même temps que les données sur les courants et sur l'hydrodynamique. Puisqu'une étude localisée des circulations dans la zone du quai fédéral nécessiterait de toute façon l'acquisition de données additionnelles sur les circulations locales, il serait bon d'inclure à ce programme l'acquisition simultanée de données sur la matière en suspension et ses propriétés.

En terminant, il nous paraît important d'insister sur l'utilité d'un modèle conceptuel des circulations dans la zone du havre de Gaspé. Même le plus sophistiqué des modèles numériques ne peut reproduire toutes les conditions de courant qui peuvent survenir dans le havre de Gaspé. Plus un modèle est sophistiqué, plus ce modèle requiert de données sur lesquels s'appuyer et plus il coûte cher à opérer. De plus, aucun modèle ne peut prédire les circulations induites par le forçage météorologique à l'échelle du golfe du Saint-Laurent. Les conditions qui contrôlent le mélange à la tête des estuaires des rivières York et Dartmouth et dans le havre de Gaspé sont aussi très difficile à reproduire. Certaines conditions doivent donc être prescrites aux limites d'un modèle numérique du havre ou de la baie de Gaspé, ou doivent faire l'objet d'une interprétation séparée. C'est pourquoi il est fondamental de disposer d'un modèle conceptuel permettant de déterminer les lignes directrices gouvernant les circulations.

Un modèle conceptuel permet de choisir les composantes essentielles à modéliser, d'identifier les scénarios ou les combinaisons de forces susceptibles d'être importants en fonction d'un objectif particulier et les méthodes permettant de tester ou de vérifier la validité et les limites d'interprétation des modèles numériques. Un modèle conceptuel permet d'apporter des réponses initiales à des questions essentielles lorsqu'on veut encadrer une étude spécifique. Par exemple, dans le cadre d'une étude sur le transport des particules, on pourrait chercher à savoir dans quelles circonstances les courants atteignent et maintiennent de fortes valeurs près du fond en direction de l'amont dans la zone du quai fédéral ; ou encore, on pourrait chercher à déterminer dans quelles circonstances prévaudra une quasi absence de courant se prolongeant pendant plusieurs heures dans le même secteur. Le premier exemple favorise un transport maximal des particules vers le secteur amont du havre de Gaspé, tandis que le second favorise une sédimentation rapide des particules sur le fond. De telles questions permettent de choisir des scénarios de modélisation qui encadrent le spectre de variabilité des processus qu'on cherche à modéliser ou à exprimer mathématiquement. Les réponses à ces questions sont importantes pour choisir les outils de modélisation les plus appropriés, pour identifier les besoins en données additionnelles et pour déterminer l'ordre de priorité des efforts de modélisation compte tenu des budgets et des échéanciers disponibles.

Il arrive souvent que des modèles très sophistiqués sont développés avant qu'une conceptualisation adéquate soit disponible. Ces modèles peuvent donner des résultats corrects compte tenu des scénarios et des variables mises en jeu. Mais leur interprétation est souvent difficile faute d'une conceptualisation de base permettant de bien cerner les limites de ces modèles. Aux sections précédentes, nous avons décrit très brièvement quelques éléments d'un modèle conceptuel. Bien que les données soient suffisantes pour soutenir la réalisation d'un tel modèle, la forme actuelle des données et l'absence d'analyse ne permet pas d'élaborer un modèle conceptuel satisfaisant dans le cadre du présent travail.

Les données de base doivent être regroupées et traitées afin de séparer les principales forces qui contrôlent les circulations si l'on veut obtenir un modèle satisfaisant. Cette étape devrait être réalisée préalablement à toute étude de dynamique sédimentaire. Une fois complété, le modèle conceptuel pourrait être utilisé pour cibler les besoins en acquisition de données et pour choisir les outils de modélisation les plus appropriés.

4 Conclusions et recommandations

La revue présentée ci-dessus confirme l'existence d'une base de données assez complète sur l'hydrodynamique du havre de Gaspé. Les données variées et abondantes couvrent assez bien toute la zone d'étude, offrant non seulement une bonne couverture spatiale, mais aussi, une couverture assez complète de la variabilité temporelle. La principale faiblesse de nos connaissances des circulations dans le havre de Gaspé ne réside donc pas en l'absence de données, mais découle d'un manque d'analyse et d'une faible exploitation de ces données. Une partie des données est présentée à l'état brut dans des rapports de données ; une autre partie est prélevée dans le cadre d'études ciblées sur des problématiques spécifiques où très localisées.

La revue des données existantes a mis en relief le fait que les circulations, dans le havre de Gaspé, sont le résultat de l'action conjuguée de plusieurs processus océanographiques et météorologiques conjugués, incluant la marée, l'écoulement des rivières locales et des tributaires du Saint-Laurent, le vent local, la pression atmosphérique, le vent global sur l'ensemble du Golfe et la stratification thermohaline. Aucun processus ne domine nettement tous les autres, ce qui se traduit par une grande variabilité spatiale et temporelle des courants. Même si chaque processus agissant sur les circulations est simple lorsque pris isolément, les combinaisons très variables produisent un résultat assez complexe.

Il est sans doute possible de récupérer la plupart des données originales et de les analyser à nouveau afin d'en extraire les informations pertinentes pour élaborer un modèle conceptuel de circulation dans le havre de Gaspé. Un tel modèle aurait pour but de décrire les mécanismes qui causent les courants et contrôlent l'hydrodynamique des masses d'eau dans le havre. Compte tenu de la complexité des circulations dans le havre de Gaspé, il est recommandé d'élaborer un modèle conceptuel aussi complet que possible des circulations avant de faire appel à des modèles numériques sophistiqués, en particulier dans la perspective d'études de la dynamique sédimentaire de la zone d'étude.

La base de donnée, bien que passablement complète, ne permet pas d'étudier en détail les circulations dans le secteur du quai fédéral. Pour une étude plus spécifique portant notamment sur la dynamique sédimentaire de ce secteur, il serait souhaitable d'ajouter des données concomitantes sur les courants, la stratification thermohaline et le vent dans le secteur du quai et de Sandy Beach. Les données les plus utiles seraient des mesures par profilage vertical et des séries chronologiques sur stations fixes dans le secteur du quai. Il serait également important que des données sur les sédiments en suspension soient recueillies par la même occasion. L'utilisation d'un modèle conceptuel serait un outil très utile pour déterminer la position des stations de mesure, la quantité de profils requise, les périodes les plus adéquates pour procéder à l'échantillonnage et pour faciliter l'intégration et l'interprétation de ces données.

5 Références bibliographiques

Boivin R. et R. Hausser (1972). *Étude du rejet des eaux usées dans la baie de Gaspé. Programme d'assainissement des eaux.* Pour la Régie des eaux du Québec, Ministère de l'Environnement du Québec (MEQ). Rapport LHL-564.

Booth, D. (1994). *Tidal flushing off semi-enclosed bays.* In (Ed.) K. H. Beven, P.C. Chatwin and J.H. Millbank. *Mixing and Transport in the Environment.* John Wiley and Sons Ltd. p. 203-219

BPR Groupe-Conseil (1999a). *Projet de production aquicole dans la baie de Gaspé. Étude de la problématique de la contamination bactériologique en temps de pluie. Phase 2* Rapport GA-08804 pour la SODIM.

BPR Groupe-Conseil (1999b). *Essai de diffusion dans le havre de Gaspé Travaux de terrain Phase 2* Rapport d'étape GA-08804 pour la SODIM.

Carrière J.B. (1973). *Physical Oceanography study of the havre and baie de Gaspé.* Thèse de maîtrise, CEGEP de Gaspé et Université de Dalhousie (cote 551.46 C316B).

Carrière J.B. et M. Pageau (1973). *Océanographie du parc national de Forillon.* Ministère des Affaires Indiennes et du Nord Canadien. Division des Parcs Nationaux. Ottawa, Ont.

Carrière J.B. (1978). *Océanographie de la péninsule de Forillon.* Rapport à Parc Canada. (Cote 551.46 C316).

Crémer J.-F., B. Long et S. Roy (2001). *Le remaniement sédimentaire saisonnier dans la baie de Gaspé : corrélations entre les paramètres hydrodynamiques, les variations du fond et les structures sédimentaires. Application à la prévision des floraisons des algues toxiques.* Compte-rendu de la Conférence canadienne sur le littoral, 16-19 mai 2001. P. 391-405.

C.P.S.E.G. (1995). *Étude de mise en valeur et de protection de l'écosystème de la baie de Gaspé.* Rapport réalisé par le Comité de protection de la santé et de l'environnement de Gaspé inc., avec l'aide du Ministère des Pêches et des Océans. Programme Interactions communautaires de Saint-Laurent Vision 2000. Gaspé.

Koutitonsky V.G., G. Desrosier, E. Pelletier, B. Zakardhian, D. Ouellet, L. de Montety, T. Guyondet, S. Leblanc et G. Desmeules (2001). *Étude hydrodynamique, sédimentologique et benthique pour le choix de sites de mariculture d'Omble de fontaine dans la baie de Gaspé.* Rapport du Laboratoire d'Hydraulique Environnementale de l'ISMER pour la Société de développement de l'industrie maricole (SODIM) Gaspésie Iles-de-la-Madeleine. Gaspé QC. Rapport LHE 01-1, 207 p. + ann.

Koutitonsky V.G. (2000). *Étude de la réfraction et des vitesses orbitales des houles pour le choix de sites de mariculture d'Omble de fontaine dans la baie de Gaspé.* Rapport du Laboratoire d'Hydraulique Environnementale de l'ISMER pour la Société de développement de l'industrie maricole (SODIM) Gaspésie Iles-de-la-Madeleine. Gaspé QC. Rapport LHE 01-2, 99 p.

Pettigrew B., D.A. Booth et R. Pigeon (1991). *Oceanographic observations in Havre de Gaspé during the Summer 1990.* Canadian Data report of Hydrography and Ocean Sciences. Vol 100. 94 pp.

Lefavre D. (1998). *Courants de marée dans la baie de Gaspé, Golfe du Saint-Laurent.* Rapport préliminaire du Ministère des Pêches et des Océans, Division des Sciences halieutiques.

Roche (1986). *Étude de dispersion dans la baie de Gaspé. Effluent de Gaspé.* Rapport d'étude pour le MENVIQ. 32 p.+ annexes.

Roche (2000). *Suivi environnemental – Dragage 1999, Mines Wabush. Suivi des circulations et des panaches de turbidité lors du dragage de 1999.* Rapport de suivi pour l'administration portuaire de Sept-Îles.

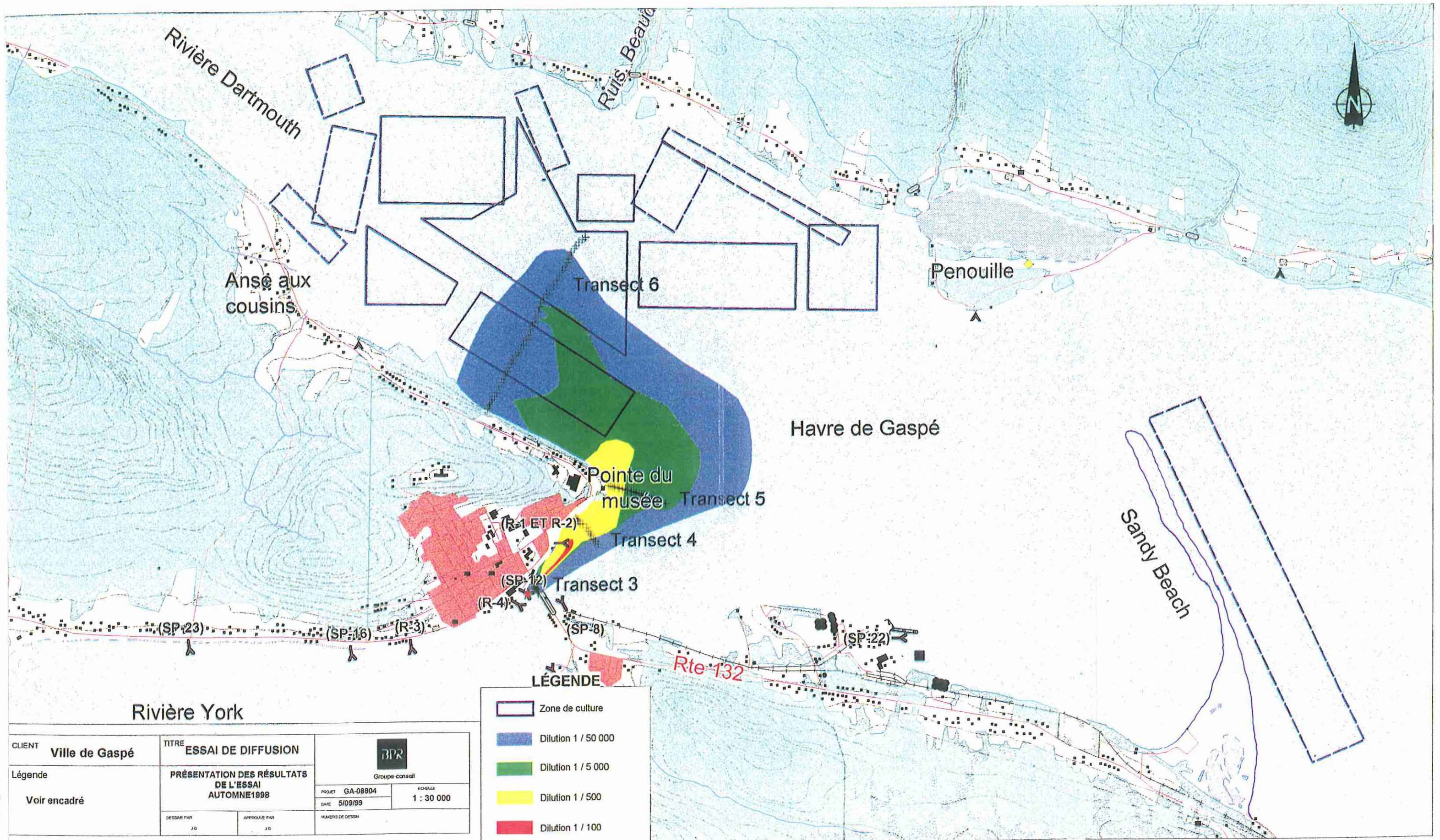


Figure 8 Panache de rhodamine après quatre heures d'injection continue le 26 novembre 1998. D'après BPR Groupe-conseil (1999a).