



**SODIM**

Société de développement de l'industrie maricole inc.

*Caractérisation des courants et des vagues  
dans les principaux sites maricoles du  
Québec*

*Rapport final*

---

*Dossier n° 710.78*

*Rapport commandité par la SODIM*

*Juin 2008*



**CARACTÉRISATION DES COURANTS ET DES  
VAGUES DANS LES PRINCIPAUX SITES  
MARICOLES DU QUÉBEC**

**RAPPORT FINAL**

**Juin 2008**



295, chemin Sainte-Foy  
Québec (Québec)  
Canada  
G1R 1T5

Tél. : (418) 522-4945  
Télec.: (418) 522-5218  
Courriel : [info@biorex.com](mailto:info@biorex.com)  
Site WEB: [www.biorex.com](http://www.biorex.com)



**CARACTÉRISATION DES COURANTS ET DES  
VAGUES DANS LES PRINCIPAUX SITES  
MARICOLES DU QUÉBEC**



### **Référence à citer**

---

Gagnon, M. 2008. Caractérisation des courants et des vagues dans les principaux sites maricoles du Québec. Rapport de Biorex inc. à la Société de développement de l'industrie maricole (SODIM). v + 57 p.

## TABLE DES MATIÈRES

LISTE DES TABLEAUX.....	III
LISTE DES FIGURES .....	V
<b>1. INTRODUCTION.....</b>	<b>1</b>
<b>2. MÉTHODOLOGIE.....</b>	<b>1</b>
2.1. Sites maricoles retenus pour analyse .....	1
2.2. Niveau de risque et période de récurrence .....	1
2.3. Estimation du courant extrême.....	2
2.3.1. Circulation nette.....	3
2.3.2. Courants de marée.....	4
2.3.3. Courants de tempête.....	4
2.3.4. Profil vertical du courant extrême.....	5
2.3.5. Ellipse de courant extrême.....	6
2.4. Probabilités de dépassement de la vitesse du courant .....	7
2.5. Sources des données sur les courants .....	7
2.6. Caractérisation des vagues extrêmes.....	9
<b>3. BAIE DE CASCAPÉDIA.....</b>	<b>11</b>
3.1. Caractéristiques des marées.....	11
3.2. Régime des vents.....	11
3.3. Données de courant disponibles .....	11
3.4. Circulation nette .....	13
3.5. Courants de marée .....	14
3.5.1. Modélisation .....	14
3.5.2. Mesures in situ .....	17
3.6. Courants de tempête.....	22
3.7. Ellipse de courant extrême.....	23
3.7.1. Axe principal.....	23
3.7.2. Axe secondaire.....	24
3.7.3. Orientation des filières.....	24
3.8. Probabilités de dépassement.....	25
3.9. Vagues extrêmes .....	25
<b>4. HAVRE DE GASPÉ.....</b>	<b>25</b>
4.1. Caractéristiques des marées.....	25
4.2. Régime des vents.....	26
4.3. Données de courant disponibles .....	26
4.4. Circulation nette .....	27
4.4.1. Modélisation .....	27
4.4.2. Mesures in situ .....	28
4.5. Courants de marée .....	28
4.5.1. Modélisation .....	28
4.5.2. Mesures <i>in situ</i> .....	29
4.6. Courants de tempête.....	33
4.7. Ellipse de courant extrême.....	36
4.7.1. Axe secondaire.....	37

4.7.2. Orientation des filières.....	37
4.8. Probabilités de dépassement.....	37
4.9. Vagues extrêmes .....	38
<b>5. FOND DU SUD-OUEST.....</b>	<b>38</b>
5.1. Caractéristiques des marées.....	38
5.2. Régime des vents.....	39
5.3. Données de courant disponibles .....	39
5.4. Circulation nette .....	40
5.4.1. Modélisation .....	40
5.4.2. Mesures <i>in situ</i> .....	40
5.5. Courants de marée .....	42
5.5.1. Modélisation .....	42
5.5.2. Mesures <i>in situ</i> .....	44
5.6. Courants de tempête.....	44
5.7. Ellipse de courant extrême.....	45
5.7.1. Axe principal.....	45
5.7.2. Axe secondaire.....	46
5.7.3. Orientation des filières.....	46
5.8. Probabilités de dépassement.....	46
5.9. Vagues extrêmes .....	47
<b>6. LAGUNES DES ÎLES-DE-LA-MADELEINE.....</b>	<b>47</b>
6.1. Caractéristiques des marées.....	48
6.2. Régime des vents.....	48
6.3. Données de courant disponibles .....	48
6.4. Circulation nette .....	50
6.5. Courants de marée .....	50
6.5.1. Mesures <i>in situ</i> .....	50
6.6. Courants de tempête.....	50
6.7. Ellipse de courant extrême.....	51
6.7.1. Axe principal.....	51
6.7.2. Axe secondaire.....	51
6.7.3. Orientation des filières.....	52
6.8. Probabilités de dépassement.....	52
6.9. Vagues extrêmes .....	52
<b>7. DISCUSSION ET CONCLUSION GÉNÉRALE.....</b>	<b>53</b>
7.1. Blocage et canalisation du courant par les filières .....	53
7.2. Réduction de la vitesse du courant près du fond .....	55
7.3. Conclusion .....	55
<b>8. RÉFÉRENCES.....</b>	<b>56</b>

**LISTE DES TABLEAUX**

Tableau 1.	Facteurs applicables pour estimer la valeur extrême de vitesse du courant et de hauteur significative des vagues pour diverses périodes de récurrence à partir de la valeur extrême de récurrence de 50 ans.....	2
Tableau 2.	Rapport entre la vitesse du courant à une hauteur donnée par rapport au fond et la vitesse moyenne du courant pour l'ensemble de la colonne d'eau pour des sites de profondeur donnée. ....	6
Tableau 3.	Caractéristiques des marées dans la baie de Cascapédia. ....	11
Tableau 4.	Sommaire des données disponibles sur les courants dans la baie de Cascapédia. ....	13
Tableau 5.	Vitesse et direction de la circulation nette à des stations de la rive nord dans la partie amont de la baie des Chaleurs. ....	15
Tableau 6.	Vitesse et direction de la circulation nette pour les enregistrements ADCP réalisés dans le principal site maricole de la baie de Cascapédia en 2004 et 2005. ....	16
Tableau 7.	Vitesses maximales des courants pour la marée de vives-eaux moyenne à quatre stations de la baie de Cascapédia selon le logiciel WebTide.....	17
Tableau 8.	Vitesse des courants de tempête maximaux enregistrés dans la région de Bonaventure en 1990 et 1991. ....	23
Tableau 9.	Vitesse du courant qui exerce la force de traînée extrême sur les filières de la baie de Cascapédia selon son angle d'incidence sur les filières.....	24
Tableau 10.	Fréquence et durée de dépassement de la vitesse par les courants de marée (+ circulation nette) dans la baie de Cascapédia. ....	25
Tableau 11.	Caractéristiques des marées dans le havre de Gaspé.....	26
Tableau 12.	Sommaire des données disponibles sur les courants dans le havre de Gaspé.....	26
Tableau 13.	Circulation nette pour chacun des enregistrements de courant réalisés dans le havre de Gaspé. ....	29
Tableau 14.	Vitesse du courant qui exerce la force de traînée extrême sur les filières du havre de Gaspé selon son angle d'incidence sur les filières.....	37
Tableau 15.	Fréquence et durée de dépassement de la vitesse par les courants dans le havre de Gaspé. ....	38
Tableau 16.	Caractéristiques des marées dans le secteur des Îles-de-la-Madeleine. ....	39
Tableau 17.	Sommaire des données disponibles sur les courants du Plateau madelinien à proximité des Îles-de-la-Madeleine. ....	40
Tableau 18.	Valeurs de circulation nette obtenues pour des enregistrements de courantomètre sur le Plateau madelinien. ....	42
Tableau 19.	Vitesse du courant qui exerce la force de traînée extrême sur les filières dans les sites de captage du Fond du Sud-ouest selon son angle d'incidence sur les filières. ....	46



Tableau 20.	Fréquence et durée de dépassement de la vitesse par les courants de marée et la circulation nette sur le Fond du sud-ouest.....	46
Tableau 21.	Caractéristiques des marées dans des ports des Îles-de-la-Madeleine à proximité des passes des lagunes de GE et du HAM. ....	48
Tableau 22.	Sommaire des données sur les courants disponibles pour les lagunes de Grande-Entrée et du Havre-aux-Maisons.....	49
Tableau 23.	Vitesse du courant qui exerce la force de traînée extrême sur les filières des lagunes de Grande-Entrée et de Havre-aux-Maisons selon son angle d'incidence sur les filières. ....	52
Tableau 24.	Fréquence et durée de dépassement de la vitesse par les courants bruts dans la lagune de Havre-aux-Maisons .....	52
Tableau 25.	Densité des fermes mytilicoles québécoises.....	54

## LISTE DES FIGURES

Figure 1.	Localisation des stations pour lesquelles des données sur les courants sont disponibles et patron de circulation nette dans la partie amont de la baie des Chaleurs. ....	12
Figure 2.	Amplitude et direction de l'axe principal des courants de marée dans la baie de Cascapédia selon le logiciel WebTide .....	16
Figure 3.	Diagrammes U-V des courants bruts enregistrés à la Station 1 de la baie de Cascapédia à l'aide du profileur ADCP du 5 au 18 juillet 2004 .....	18
Figure 4.	Diagrammes U-V des courants bruts enregistrés à la Station 1 de la baie de Cascapédia à l'aide du profileur ADCP du 21 octobre au 30 novembre 2004 .....	20
Figure 5.	Diagrammes U-V des courants bruts enregistrés à la Station 1 de la baie de Cascapédia à l'aide du profileur ADCP du 29 juin au 7 juillet 2005 .....	21
Figure 6.	Position des stations pour lesquelles des données de courant sont disponibles dans le havre de Gaspé .....	27
Figure 7.	Diagrammes U-V des courants bruts enregistrés à la Station 2 du havre de Gaspé à l'aide du profileur ADCP du 16 au 29 juin 2004 .....	30
Figure 8.	Diagrammes U-V des courants bruts enregistrés à la Station 1 du havre de Gaspé à l'aide du profileur ADCP du 11 mai au 10 juin 2005 .....	31
Figure 9.	Diagrammes U-V des courants bruts enregistrés à la Station 2 du havre de Gaspé à l'aide du profileur ADCP du 15 au 29 juin 2005 .....	32
Figure 10.	Diagrammes U-V des courants bruts enregistrés à la Station 3 du havre de Gaspé à 3 et 14 m de profondeur du 30 mai au 4 juillet 1990.....	34
Figure 11.	Variations temporelles des composantes U et V des courants bruts enregistrés à la Station 3 du havre de Gaspé à 14 m de profondeur du 30 mai au 4 juillet 1990 .....	35
Figure 12.	Position des stations pour lesquelles on dispose de données sur les courants en milieu non-abrité autour des Îles-de-la-Madeleine.....	41
Figure 13.	Circulation nette de la couche d'eau superficielle dans le golfe du Saint-Laurent selon le modèle de Saucier <i>et al.</i> (2003).....	41
Figure 14.	Amplitude et direction des courants de marée au-dessus du Fond du Sud-ouest selon le logiciel WebTide .....	43
Figure 15.	Diagrammes U-V des courants bruts enregistrés à la Station n° 4 à 7, 12 et 20 m de profondeur, en septembre et octobre 1993 et 1994 .....	44
Figure 16.	Position des stations dans le bassin est de la lagune de Grande-Entrée pour lesquelles on dispose de données sur les courants.....	49



## 1. INTRODUCTION

Le présent rapport a été réalisé dans le cadre du projet d'acquisition de nouvelles données et modélisation des filières flottantes submergées – Phase 1 entrepris à l'automne 2004 pour le compte de la Société de développement de l'industrie maricole inc. (SODIM). Ce projet a comme objectif d'optimiser la conception des filières maricoles utilisées au Québec.

La présente étude a comme objectif de décrire le régime des courants et des vagues dans les principaux sites maricoles du Québec. Plus spécifiquement, les objectifs sont de déterminer les caractéristiques des courants et des vagues représentatives des conditions extrêmes auxquelles les filières sont susceptibles d'être soumises pendant leur vie utile ainsi que les probabilités de dépassement de la vitesse du courant. Les résultats serviront à établir les caractéristiques du courant et de la houle dans les modélisations hydrodynamiques des filières réalisées dans une étape ultérieure du projet à l'aide d'un logiciel développé par l'Institut des Technologies océaniques (ITO) du Conseil national de recherche du Canada et à évaluer les résultats de ces simulations (Bergeron *et al.*, 2008).

## 2. MÉTHODOLOGIE

### 2.1. SITES MARICOLES RETENUS POUR ANALYSE

Les sites maricoles retenus sont ceux dans lesquels on utilise des filières flottantes submergées à l'échelle commerciale et pour lesquels les données disponibles permettent d'obtenir une valeur indicatrice fiable du courant et des vagues extrêmes. Selon ces critères, les sites suivants ont été retenus :

- baie de Cascapédia;
- havre de Gaspé;
- fond du Sud-ouest;
- lagune du Havre-aux-Maisons; et
- lagune de Grande-Entrée.

Pour les autres sites maricoles, les données disponibles sont trop fragmentaires pour qu'une caractérisation des courants et des vagues extrêmes soit possible.

### 2.2. NIVEAU DE RISQUE ET PÉRIODE DE RÉCURRENCE

La vitesse extrême du courant et la hauteur extrême des vagues qu'il est possible d'observer dans un site donné dépend de la longueur de la période d'observation. Plus cette période est longue, plus la vitesse extrême du courant et la hauteur extrême des vagues seront élevées.

Dans ce rapport, les valeurs extrêmes ont été estimées pour une période de récurrence de 50 ans. Cette période de retour a été choisie parce que les données climatologiques sont plus

souvent disponibles pour cette période de retour et parce que les filières ont une durée de vie de plusieurs décennies. Une valeur dont la période de récurrence est de 50 ans signifie qu'il y a 98 chances sur 100 que la vitesse du courant ou la hauteur significative des vagues n'excédera pas cette valeur au cours d'une période de 12 mois ou encore que la probabilité que cette valeur soit dépassée au cours d'une période de 12 mois est de 0,02.

Le Tableau 1 présente, à titre indicatif seulement, les facteurs de conversion pour estimer les valeurs extrêmes de vitesse du courant et de hauteur significative des vagues pour d'autres périodes de récurrence à partir de la valeur ayant une récurrence de 50 ans. Ces facteurs de conversion sont applicables pour les eaux profondes de la Mer du Nord (courant) et du golfe du Saint-Laurent (vagues). Par exemple, la vitesse extrême du courant de récurrence de 20 ans est égale à celle de récurrence de 50 ans multipliée par 0,97. Ce tableau montre que les valeurs extrêmes de récurrence entre 20 et 100 ans se situent à moins de 10 % de la valeur de récurrence de 50 ans.

**Tableau 1. Facteurs applicables pour estimer la valeur extrême de vitesse du courant et de hauteur significative des vagues pour diverses périodes de récurrence à partir de la valeur extrême de récurrence de 50 ans (ISO, 2003; HSE, 2001; Pugh, 1982; Griffiths, 1996; Oceanweather, 2005).**

Période de récurrence	Facteur de conversion	
	Vitesse du courant	Hauteur significative des vagues
100 ans	1,02 – 1,04	1,04 – 1,06
50 ans	1,00	1,00
20 ans	0,97	0,92
10 ans	0,91 – 0,94	0,86 – 0,89
5 ans	0,87 – 0,92	0,81 – 0,85
2 ans	-	0,71
1 an	0,69 – 0,83	-

### **2.3. ESTIMATION DU COURANT EXTRÊME**

Le courant extrême pour un site donné est le courant qui génèrera la force de traînée extrême sur les filières de ce site durant leur vie utile. Ce courant est caractérisé par deux variables, soit sa vitesse et sa direction par rapport à l'axe des filières (i.e. son angle d'incidence).

Des méthodes normalisées de prédiction des courants extrêmes ont été développées pour la conception des plate-formes de forage océaniques (NORSOK, 1999; HSE, 2001; ISO, 2003). La méthode la plus précise est basée sur l'extrapolation des données provenant d'enregistrements réalisés sur le site même et qui s'étendent sur au moins un an et, préférablement, plus longtemps. Les méthodes recommandées pour déterminer le courant extrême à partir de tels enregistrements sont celles de Pugh (1982) et de Robinson et Tawn (1997).

Lorsque aucun enregistrement d'au moins un an n'est disponible, ce qui est le cas des sites maricoles du Québec, des valeurs indicatrices peuvent être obtenues avec l'approche décrite ci-dessous. Cette approche est une adaptation de celle développée pour la conception des plateformes de forage (HSE, 2001).

Le courant extrême est la somme vectorielle des trois composantes suivantes :

$$C_E = C_{N_{(max)}} + C_{M_{(ve)}} + C_{T_{(50)}} \quad (1)$$

où :

$C_E$  est le courant extrême;

$C_{N_{(max)}}$  est la circulation nette mensuelle maximale;

$C_{M_{(ve)}}$  est le courant maximal généré par la marée de vives-eaux moyenne; et

$C_{T_{(50)}}$  est le courant maximal généré par la tempête de récurrence de 50 ans.

Selon cette approche, le courant extrême se produit lorsqu'une très forte tempête coïncide avec la marée de vives-eaux moyenne et des conditions saisonnières qui renforcent le patron de circulation nette.

### **2.3.1. Circulation nette**

Lorsqu'on calcule la moyenne vectorielle des valeurs brutes de courant, on obtient une valeur de vitesse et de direction du courant qui correspond à la circulation nette pour la période de cet enregistrement. Dans la présente étude, puisque la majorité des enregistrements pour lesquels des statistiques sont disponibles ont une durée de 20 à 40 jours, on parlera de circulation nette mensuelle.

La circulation nette est générée par des phénomènes saisonniers comme la circulation estuarienne en deux couches retrouvées dans les estuaires, le courant de Gaspé et les grands tourbillons semi-permanents comme ceux observés dans la baie des Chaleurs. Dans un site maricole, l'intensité de la circulation nette peut varier considérablement en raison des variations saisonnières de l'intensité des forces en jeu. L'intensité moyenne de la circulation nette peut être prédite à l'aide de modèles hydrodynamiques. Dans la présente étude, nous avons utilisé pour l'estimation du courant extrême la valeur maximale de la circulation nette mensuelle observée ou modélisée dans ou à proximité des sites maricoles.

Sur le plan temporel, la circulation nette est une constante. Sur le plan spatial (géographique), elle est représentée par un vecteur centré à l'origine. En milieu côtier, la circulation nette est souvent parallèle à la rive et aux isobathes, donc, dans l'axe principal des courants de marée.

### **2.3.2. Courants de marée**

Les courants de marée sont générés par les marées astronomiques. Ces courants sont prédictibles parce qu'ils sont directement proportionnels aux variations du niveau de l'eau causées par la lune et le soleil. Ils peuvent être modélisés avec une bonne précision.

Sur le plan temporel, les variations de la vitesse et de la direction des courants de marée peuvent être représentées par la superposition d'un certain nombre de composantes cycliques. L'analyse harmonique des enregistrements de courant permet de déterminer l'amplitude (vitesse maximale) de chacune de ces composantes dites « harmoniques ». Dans le golfe du Saint-Laurent, les cinq principales composantes harmoniques qui expliquent la majeure partie des variations de la vitesse des courants de marée sont M2, S2 et N2, qui ont une périodicité semi-diurne, et K1 et O1, qui ont une périodicité diurne.

La superposition des composantes M2 et S2 produit des variations de l'amplitude des marées d'une périodicité de 14 jours (cycle des marées de mortes-eaux/vives-eaux). En Gaspésie et sur la Côte-Nord, l'amplitude des marées est maximale lorsque les composantes M2 et S2 sont en phase. L'amplitude de la marée de vives-eaux moyenne est la somme des amplitudes de ces deux composantes (M2 + S2). Par contre, aux Îles-de-la-Madeleine (IdIM), ce sont les composantes O1 et K1 qui sont en phase lorsque surviennent les plus grandes marées. Nous avons donc assumé que l'amplitude de la marée de vives-eaux moyenne dans le centre du golfe est la somme des amplitudes de ces deux composantes (O1 + K1).

Sur le plan spatial (géographique), les courants de la marée sont représentés par une ellipse centrée à l'origine. Le périmètre de l'ellipse réunit l'extrémité des vecteurs de courant dont l'orientation change progressivement au cours d'un cycle de marée. Le courant varie entre une vitesse maximale vers l'amont et une vitesse maximale vers l'aval en passant par des vitesses moins grandes orientées obliquement par rapport à l'axe principal de l'ellipse.

La demi-longueur de l'axe principal de l'ellipse des courants de la marée de vives-eaux moyenne correspond à la somme des amplitudes des composantes M2 et S2 (ou K1 et O1 pour les IdIM). La forme et la direction de l'ellipse varient selon le site et la profondeur. Près du rivage, l'ellipse est habituellement plus plate qu'au large et la direction de son axe principal est habituellement parallèle à la ligne de rivage et aux isobathes. En raison de la friction sur le fond, l'amplitude des courants de marée (i.e., la longueur des axes de l'ellipse) diminue avec la profondeur.

### **2.3.3. Courants de tempête**

Lorsqu'on extrait la circulation nette et les courants de marée des enregistrements de courants, on se retrouve avec des variations non-tidales des courants appelées « courants résiduels ». Ces courants sont générés par plusieurs phénomènes naturels comme les gradients de

pression, le vent, les vagues et les ondes internes. Ils incluent aussi le bruit associé aux erreurs de mesure du courantomètre.

Sur le plan temporel, les courants résiduels sont représentés par une infinité de composantes cycliques de haute, moyenne et basse fréquence. Dans la plupart des milieux côtiers, les courants résiduels les plus intenses sont associés au passage des tempêtes et ont une périodicité de 2 à 12 jours. Les courants résiduels qui ont une périodicité de deux jours et plus sont appelés des courants « subtidaux », « de basse fréquence » ou « passe-bas ». Pour les mettre en évidence, on filtre habituellement les enregistrements bruts ou résiduels pour éliminer toutes les variations de périodicité inférieure à deux jours, incluant les variations tidales diurnes et semi-diurnes.

Selon une règle du pouce reconnue, la vitesse maximale des courants de surface générés par le vent est égale à 2 à 3 % de la vitesse horaire maximale du vent à 10 m au-dessus de l'eau (NORSOK, 1999; ISO, 2003). Avec les données fragmentaires de courant disponibles, il est possible d'établir une relation similaire entre la vitesse horaire maximale du vent et la vitesse horaire maximale des courants résiduels dans certains sites maricoles lors des tempêtes, puis d'extrapoler le résultat obtenu à la vitesse maximale du vent de récurrence de 50 ans. On obtient ainsi une valeur indicatrice du courant de tempête de récurrence de 50 ans ( $C_{T(50)}$ ).

Sur le plan spatial (géographique), le courant de tempête de récurrence de 50 ans ( $C_{T(50)}$ ) peut être représenté par une ellipse centrée à l'origine. Lorsque les courants de tempête peuvent avoir n'importe quelle direction, comme au centre d'un plan d'eau, cette ellipse est circulaire (axe principal et secondaire de même longueur). Par contre, à proximité des rives, on assume habituellement que les courants résiduels ont les mêmes propriétés directionnelles que les courants de marée, soit une ellipse dont l'axe principal est orienté dans la même direction que celui des courants de marée et dont le rapport des axes principal et secondaire est le même que celui des courants de marée.

#### 2.3.4. Profil vertical du courant extrême

Les valeurs de courant obtenus dans la littérature ou à partir de modèles mathématiques sont souvent des moyennes pour l'ensemble de la colonne d'eau. Puisque la vitesse des courants diminue près du fond en raison de la friction et que les filières submergées se situent dans la partie inférieure de la colonne d'eau, il faut ajuster ces valeurs pour la profondeur des filières.

Les formules suivantes ont été utilisées pour estimer la vitesse du courant à une profondeur donnée à partir de valeurs moyennes de courant pour l'ensemble de la colonne d'eau (HSE, 2001) :

$$C_{(h)} = C (h/0,32z)^{0,143} \quad \text{pour } 0 < h \leq 0,5z \quad (2)$$

$$C_{(h)} = 1,07 C \quad \text{pour } 0,5z < h < z \quad (3)$$



où :

$C_{(h)}$  est la vitesse du courant à h m au-dessus du fond (cm/s);

h est la hauteur au-dessus du fond (m);

z est la profondeur du site (m); et

C est la vitesse moyenne du courant pour la colonne d'eau (cm/s).

Le Tableau 2 présente les facteurs de correction à utiliser pour des sites de 5 à 35 m de profondeur et la couche d'eau située entre 0 et 15 m du fond.

**Tableau 2. Rapport entre la vitesse du courant à une hauteur donnée par rapport au fond et la vitesse moyenne du courant pour l'ensemble de la colonne d'eau pour des sites de profondeur donnée.**

Hauteur au-dessus du fond (h)	Profondeur du site (z)						
	5 m	10 m	15 m	20 m	25 m	30 m	35 m
1 m	0,93	0,85	0,80	0,77	0,74	0,72	0,71
2 m	1,03	0,93	0,88	0,85	0,82	0,80	0,78
3 m	1,07	0,99	0,93	0,90	0,87	0,85	0,83
4 m	1,07	1,03	0,97	0,93	0,91	0,88	0,86
5 m	1,07	1,07	1,01	0,97	0,93	0,91	0,89
6 m	-	1,07	1,03	0,99	0,96	0,93	0,91
7 m	-	1,07	1,06	1,01	0,98	0,96	0,93
8 m	-	1,07	1,07	1,03	1,00	0,97	0,95
9 m	-	1,07	1,07	1,05	1,02	0,99	0,97
10 m	-	1,07	1,07	1,07	1,03	1,01	0,98
12,5 m	-	-	1,07	1,07	1,07	1,04	1,02
15 m	-	-	1,07	1,07	1,07	1,07	1,04

### **2.3.5. Ellipse de courant extrême**

La force de traînée exercée par un courant d'une vitesse donnée sur une filière dépend de son angle d'incidence. En effet, en raison de l'effet de sillage et d'autres facteurs, un courant perpendiculaire à une filière exerce une force de traînée plus grande qu'un courant longitudinal de même vitesse (Gagnon et Bergeron, 2008). C'est pour cette raison que les mariculteurs ont l'habitude d'orienter les filières dans l'axe principal des courants de marée. Pour déterminer quelle est la force de traînée extrême que le courant peut exercer sur une filière, il faut donc réaliser les simulations hydrodynamiques avec différents angles d'incidence du courant. À cette fin, il faut déterminer l'ellipse du courant extrême pour chaque site, soit la vitesse extrême du courant dans toutes les directions.

Le courant extrême peut être représenté par une ellipse obtenue de la superposition du vecteur de la circulation nette, de l'ellipse des courants de marée et de l'ellipse des courants de tempête. L'ellipse obtenue est décentrée par rapport à l'origine (effet de la circulation nette) et est plus arrondie (effet du courant de tempête omnidirectionnel) ou a la même forme (même grandeur relative des deux axes) que l'ellipse des courants de marée.

## **2.4. PROBABILITÉS DE DÉPASSEMENT DE LA VITESSE DU COURANT**

Une autre facteur important à considérer pour la modélisation des filières est le fait que la force de traînée exercée par le courant peut avoir pour effet de coucher la ligne maîtresse vers le fond. L'inclinaison de la filière vers le fond est importante pour deux raisons principales. Premièrement, cette inclinaison a comme effet d'augmenter la pression hydrostatique sur les bouées et, lorsque la profondeur des bouées vient à excéder leur profondeur maximale d'utilisation, cela peut entraîner leur implosion. Deuxièmement, l'inclinaison de la filière peut faire que les supports d'élevage viennent en contact avec le fond plus ou moins fréquemment et pour des périodes plus ou moins longues. Plus ce contact sera fréquent et long, moins les filières seront productives notamment en raison de l'augmentation de la prédation par les organismes benthiques.

Puisque le courant extrême tel qu'estimé avec la méthode décrite à la section 2.3 n'a en principe qu'une récurrence de 50 ans, les valeurs obtenues pour ce courant ne sont pas utiles pour évaluer les risques d'implosion des bouées et du contact des supports d'élevage avec le fond. Pour évaluer ces risques, il faut d'abord déterminer à partir des simulations hydrodynamiques quel est le courant qui entraîne un contact des supports d'élevage avec le fond. Pour pouvoir évaluer si ce courant représente une situation risquée, il faut connaître la fréquence et la durée de dépassement de cette vitesse et de cette direction dans le site maricole.

Deux approches ont été utilisées pour établir la fréquence et la durée de dépassement des vitesses modérées (10 à 30 cm/s) pour chaque site maricole. Lorsqu'un enregistrement d'une durée d'au moins un mois et représentatif des courants dans le site maricole à la hauteur des filières était disponible, cet enregistrement a été analysé afin de déterminer la fréquence et la durée de dépassement des vitesses de courant. Lorsque de tels enregistrements n'étaient pas disponibles, la fréquence et la durée de dépassement a été calculée pour les courants de marée modélisés par le logiciel WebTide (voir la Section 2.5.1.6) auxquels la circulation nette mensuelle maximale a été ajoutée.

## **2.5. SOURCES DES DONNÉES SUR LES COURANTS**

Les données sur les courants proviennent de six types de sources différents décrits sommairement ci-dessous. Les données disponibles pour chaque site maricole sont présentées dans les Sections 3 à 6.

*Dans le présent rapport, la direction du courant, du vent et des vagues est toujours indiquée par rapport au nord géographique (degrés vrais).*

### **2.5.1.1. Enregistrements réalisés dans le cadre de la présente étude**

Deux enregistrements ont été réalisés par le Centre collégial de transfert de technologie des pêches (CCTTP) dans le cadre de la présente étude à l'aide d'un profileur ADCP (« Acoustic

Doppler Current Profiler »). Le premier a été réalisé dans la baie de Cascapédia du 21 octobre au 30 novembre 2004 et le second, dans le havre de Gaspé du 11 mai au 10 juin 2005. Ces enregistrements fournissent des données brutes de vitesse et direction des courants (courants bruts).

#### **2.5.1.2. Enregistrements fournis par d'autres organismes**

Le Centre aquacole marin de Grande-Rivière (CAMGR) nous a fourni quatre enregistrements réalisés par le CCTTP dans la baie de Cascapédia et le havre de Gaspé avec le même profileur ADCP que celui utilisé dans le cadre de la présente étude.

Par ailleurs, deux bases de données du MPO ont été consultées afin d'identifier et télécharger des enregistrements de courants réalisés dans ou à proximité des sites maricoles : il s'agit du Système de gestion des données océanographiques (SGDO) de l'Observatoire du Saint-Laurent et du Ocean Data Inventory (ODI) du MPO, région des Maritimes.

Enfin, une revue exhaustive de la littérature a permis d'identifier d'autres organismes qui possèdent des enregistrements intéressants. Pour ces derniers, une demande a été faite au propriétaire afin d'obtenir une copie des données brutes. Aucune réponse positive n'a été reçue à ce jour.

#### **2.5.1.3. Diagrammes U-V**

Quelques sources fournissent des diagrammes (« scatter plots ») des composantes U et V des courants bruts. Les composantes U et V sont obtenues par la transformation des données brutes de vitesse et de direction en une composante est-ouest (U) et une composante nord-sud (V). Ces diagrammes permettent de visualiser la forme de l'ellipse des courants bruts. Ils ont aussi été produits dans le cadre de la présente étude pour les enregistrements disponibles.

#### **2.5.1.4. Séries temporelles de courants résiduels de basse fréquence**

Quelques publications et thèses présentent des séries temporelles de courants passe-bas (courants résiduels de basse fréquence) pour des stations dans ou à proximité des sites maricoles. Ces données ont été utilisées pour évaluer les courants de tempête.

#### **2.5.1.5. Statistiques sur des enregistrements de courant**

La base Ocean Data Inventory (ODI) du MPO (Gregory *et al.*, 1989; Gregory, 2004) fournit des statistiques mensuelles sur les courants pour chacun des enregistrements contenus dans cette base. Ces statistiques incluent la vitesse maximale, la vitesse et la direction de la circulation nette, la direction et la longueur des axes principal et secondaire de variabilité des données brutes et des courants passe-bas. Par ailleurs, des statistiques similaires et d'autres données utiles comme les ellipses de certaines des composantes harmoniques des courants de marée ont été retrouvées dans la littérature. Ces données ont notamment servi à déterminer la forme de l'ellipse du courant extrême.

### 2.5.1.6. Modèles mathématiques

Le logiciel de prédiction des marées et des courants de marée WebTide disponible sur l'Internet a été utilisé pour les sites maricoles couverts par ce logiciel, soit la baie de Cascapédia et le Fond du Sud-ouest. Ce modèle prédit la vitesse et la direction (moyenne pour la colonne d'eau) des courants de marée pour n'importe quelle combinaison des cinq principales harmoniques et n'importe quel site à l'intérieur du territoire couvert. Il a notamment été utilisé pour décrire le patron des courants de marée dans la baie de Cascapédia et sur le Fond du Sud-ouest.

Les résultats de simulations des courants bruts dans la lagune de Havre-aux-Maisons et dans la baie des Chaleurs lors de tempêtes ont été utilisés pour évaluer la vitesse des courants de tempête. Enfin, les résultats de certains modèles de prédiction de la circulation nette saisonnière ont été utilisés lorsque pertinent.

## 2.6. CARACTÉRISATION DES VAGUES EXTRÊMES

Trois approches ont été utilisées pour déterminer les caractéristiques des vagues de récurrence de 50 ans dans les sites maricoles. Ce sont :

- la consultation des climatologies des vagues disponibles pour la côte est du Canada;
- la consultation de modélisations des vagues réalisées à partir d'une climatologie des vents; et
- l'estimation des caractéristiques des vagues à partir du fetch et de la vitesse du vent.

Les trois climatologies des vagues disponibles pour la côte est du Canada sont WWA91 (MacLaren Plansearch, 1991), AES40 (Oceanweather, 2005) et MSC50 (Swail *et al.*, 2006). Elles fournissent la hauteur significative ( $H_s$ ) et la période de pointe ( $P$ ) des vagues en fonction de leur période de récurrence ( $R$ ). Ces climatologies ne fournissent des valeurs fiables que pour le Fond du Sud-ouest.

Une modélisation locale des vagues à partir d'une climatologie des vents régionaux est disponible pour la baie de Cascapédia (MTQ, 2001).

Une modélisation hydrodynamique des vagues en période de tempête est disponible pour les lagunes des Îles-de-la-Madeleine (Koutitonsky, 2002).

Pour les deux sites non couverts par une climatologie, la hauteur significative et la période de pointe des vagues extrêmes ont été estimées en utilisant les abaques du U.S. Army Corps of Engineers (USACE, 2002). Ces abaques fournissent les valeurs de  $H_s$  et  $P$  en fonction du fetch et de la vitesse du vent. Le fetch maximal et la vitesse moyenne des vents de tempête de récurrence de 50 ans dans la direction du fetch maximal dans les lagunes des Îles-de-la-Madeleine et le havre de Gaspé ont été estimés afin d'utiliser ces abaques.

Le fetch maximal (km) est la distance maximale d'eau libre sur laquelle le vent agit pour produire les vagues observées à un point donné.

La vitesse moyenne des vents de tempête correspond à la moyenne des vitesses horaires pour les périodes au cours desquelles la vitesse a excédé 50 km/h pendant au moins six heures consécutives.

La hauteur significative des vagues ( $H_s$ ) correspond à la hauteur moyenne (m) du tiers le plus élevé de toutes les vagues qui se produisent pendant une période de temps donnée (20 minutes à une heure). Cette hauteur sert d'indicateur de la taille caractéristique des vagues les plus hautes pour ladite période.

La période des vagues ( $P$ ) correspond au temps (secondes) entre le passage de deux crêtes successives à un point donné. La période de pointe est la période de la composante harmonique des vagues qui contiennent le plus d'énergie pendant une période de temps donnée (20 minutes à une heure).

La longueur d'onde de la vague extrême a été calculée à partir de la période de pointe à l'aide de l'équation suivante (Manson *et al.*, 2002b):

$$L = L_0 \tanh(kz) \quad (4)$$

où :

$$L_0 = \frac{g \cdot P^2}{2\pi} \quad (5)$$

$$k = \frac{2\pi}{L} \quad (6)$$

$\tanh$  est la tangente hyperbolique

$L$  est la longueur d'onde de la vague (m);

$L_0$  est la longueur d'onde de la vague en eau profonde (m);

$P$  est la période de pointe (s);

$g$  est l'accélération gravitationnelle ( $9,8 \text{ m/s}^2$ );

$k$  est le numéro d'onde; et

$z$  est la profondeur du site (m).

### 3. BAIE DE CASCAPÉDIA

Les sites maricoles de la baie de Cascapédia sont situés dans la partie amont de la baie des Chaleurs, à proximité de la rive nord (Figure 1).

#### 3.1. CARACTÉRISTIQUES DES MARÉES

Le Tableau 3 présente les caractéristiques des marées à deux stations marégraphiques de part et d'autre de la baie de Cascapédia et à une station dans le principal site maricole de la baie. Les composantes semi-diurnes dominent les marées dans cette baie. L'amplitude des marées augmente de l'est vers l'ouest.

**Tableau 3. Caractéristiques des marées dans la baie de Cascapédia.**

Station	Marnage moyen des marées de vives-eaux (m) <sup>(1)</sup>	Marnage moyen (m) <sup>(2)</sup>	Marnage des grandes marées (m) <sup>(3)</sup>
Pointe Howatson	1,42	1,74	2,50
Station 1	1,44	-	-
Carleton-Centre	1,48	1,89	2,71

(1) La somme des amplitudes des composantes M2 et S2 multipliée par 2. Source : WebTide.

(2) Source : MPO (2005).

(3) Source : MPO (2005).

#### 3.2. RÉGIME DES VENTS

Les vents dominants dans la baie des Chaleurs proviennent de l'ouest et de l'OSO. Par contre, les vents de tempête proviennent plus fréquemment du nord et du nord-est (MTQ, 2001). Dans la baie de Cascapédia, les vents dominants sont de l'ouest (Environnement Canada, 2005). Par vent du nord et du nord ouest, les vallées de la Petite rivière Cascapédia et de la rivière Cascapédia canalisent les vents et de très forts vents proviennent de l'embouchure de ces rivières.

#### 3.3. DONNÉES DE COURANT DISPONIBLES

La Figure 1 et le Tableau 4 présentent les ensembles de données disponibles sur les courants dans la baie de Cascapédia et les environs. Trois enregistrements ont été réalisés avec un profileur de courant ADCP au centre du principal site maricole de la baie en 2004 et 2005 (Station 1). Il s'agit des seules données brutes de courant disponibles pour cette baie.

Des statistiques de courant pour des enregistrements conventionnels ont été publiées pour quelques stations aux extrémités ouest et est de la baie de Cascapédia (Stations 4, 5 et 6). Certaines sources présentent des séries temporelles des courants passe-bas pour des stations situées dans le secteur de Bonaventure (Stations 8, 9 et 10).

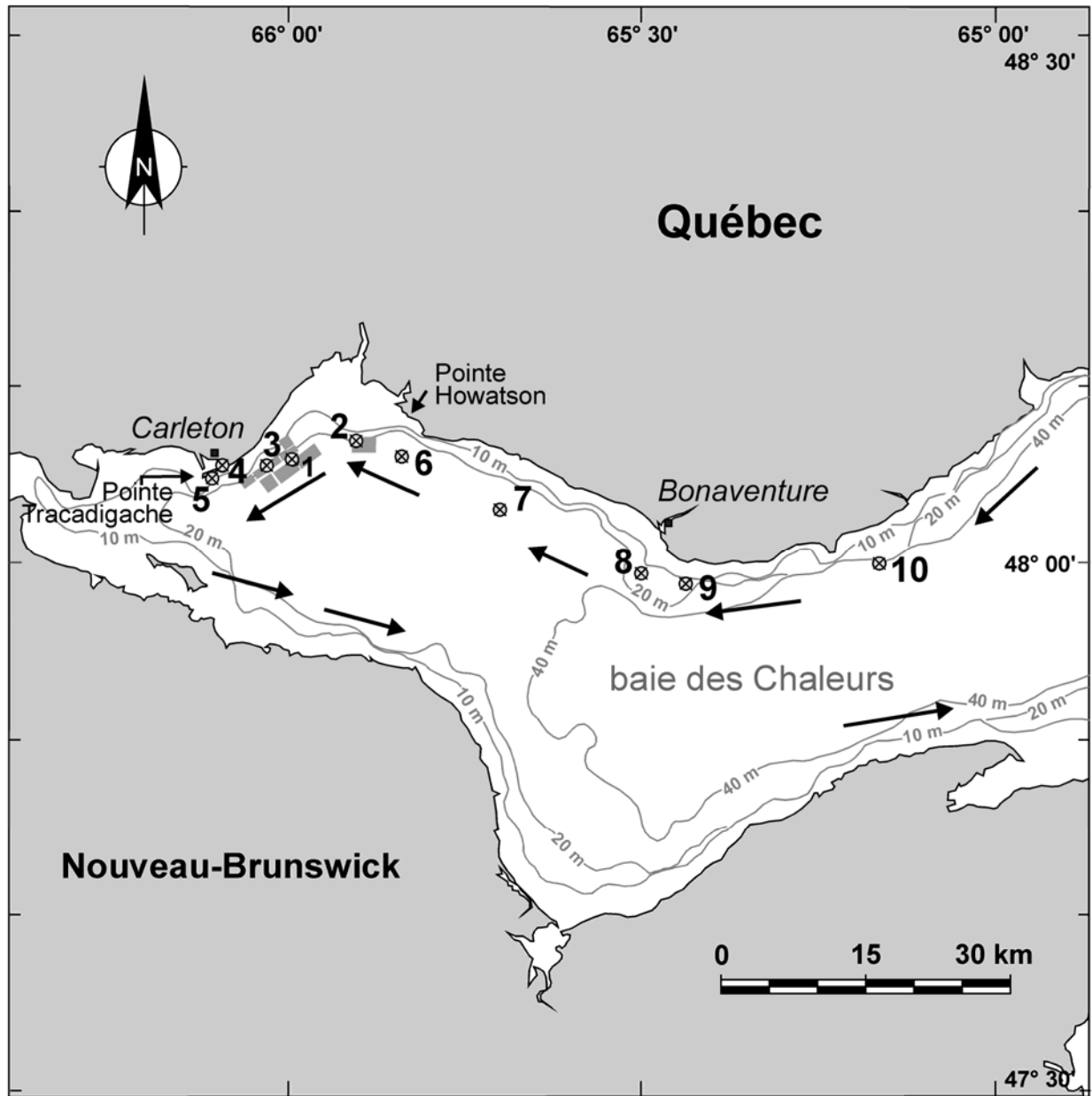


Figure 1. Localisation des stations pour lesquelles des données sur les courants sont disponibles et patron de circulation nette (←) dans la partie amont de la baie des Chaleurs.

Tableau 4. Sommaire des données disponibles sur les courants dans la baie de Cascaféria.

Type de données	Station	Prof. (m)	Dates	Référence
Enregistrement de profileur ADCP	1	n/a	05/07/2004 au 18/07/2004	CAMGR (2005)
			21/10/2004 au 30/11/2004	Présente étude
			29/06/2005 au 07/07/2005	CAMGR (2005)
Statistiques pour des enregistrements de courantomètre conventionnel	4	3	Juillet à décembre 1985, 1986 et 1987	Bonardelli <i>et al.</i> (1993)
		12		
		10	13 au 23 juin 1989	
	5	7	Juin à septembre 1991	Gan <i>et al.</i> (2004)
	6	15		
	7	5	Août 1964	Gregory (2004)
	8	13	Septembre 1990	Gan <i>et al.</i> (1995)
	9	4	Septembre 1990	
		12	Septembre 1990	
	10	7	Juin à septembre 1991	Gan <i>et al.</i> (2004)
		15	Septembre 1990	Gan <i>et al.</i> (1995)
		30	Septembre 1990	
	Variations temporelles des courants de basse fréquence (passe-bas)	8	13	12/09/1990 au 24/09/1990
10/09/1990 au 09/10/1990				Gan <i>et al.</i> (1995)
9		4	25/07/1990 au 10/08/1990	Lavoie (1997)
			12/09/1990 au 24/09/1990	
		12	25/07/1990 au 10/08/1990	
			12/09/1990 au 24/09/1990	
7		06/06/1991 au 30/09/1991	Gan <i>et al.</i> (2004)	
10		15	12/09/1990 au 24/09/1990	Lavoie (1997)
			10/09/1990 au 09/10/1990	Gan <i>et al.</i> (1995)

### 3.4. CIRCULATION NETTE

En été, le patron de circulation nette dans la partie amont de la baie des Chaleurs est dominé par un tourbillon cyclonique (dans le sens anti-horaire) (Figure 1). Selon Gan *et al.* (1995; 1996 et 2004) et Bonardelli *et al.* (1993), la force de ce tourbillon dépend de l'importance de l'intrusion du courant de Gaspé dans la baie des Chaleurs et de la force des vents locaux. Lorsque le courant de Gaspé fait intrusion dans la baie des Chaleurs, il longe la rive du Québec et supprime la dérive nette des eaux dirigée vers l'est associée aux vents locaux dominants provenant de l'ouest. Lorsque le courant de Gaspé ne fait pas intrusion dans la baie des Chaleurs, le tourbillon cyclonique est moins intense et peut même s'inverser lorsque les vents d'ouest sont plus intenses (en automne). Des vents d'est ont pour effet de renforcer le tourbillon cyclonique.



Le Tableau 5 présente les valeurs de circulation nette mensuelle (ou bi-mensuelle) à des stations de la rive nord de la baie des Chaleurs disponibles dans la littérature. On y constate que :

- la circulation nette dans cette partie de la baie est remarquablement stable en été et en automne; la circulation nette à toutes les stations, profondeurs et périodes est dirigée vers l'ouest conformément à la présence d'un tourbillon cyclonique dans la partie amont de la baie des Chaleurs;
- la circulation nette est parallèle à la rive et aux isobathes; elle est dirigée vers l'ouest dans la partie est de la baie de Cascapédia (Stations 6 et 7) et vers le sud-ouest dans la partie ouest (Stations 4 et 5);
- la circulation nette est plus intense au niveau des pointes de rivage (pointe Bonaventure et pointe Tracadigache); et
- l'intensité de la circulation nette diminue avec la profondeur.

Le Tableau 6 présente la vitesse et direction de la circulation nette pour les enregistrements réalisés à la Station 1 en 2004 et 2005 à l'aide du profileur ADCP. Ces valeurs contredisent radicalement celles du Tableau 5 et le patron de la Figure 1. En effet, selon ces données, la circulation nette à presque toutes les profondeurs et périodes est dirigée vers le nord-est ou l'est. De plus, il y a des différences importantes entre les profondeurs et les enregistrements. Comme on le verra à la Section 3.5.2, les données obtenues avec cet appareil sont anormales et, conséquemment, elles n'ont pas été utilisées pour évaluer le courant extrême.

À partir des données du Tableau 5, la circulation nette mensuelle maximale dans les sites maricoles de la baie de Cascapédia à la profondeur des filières (10-15 m) a été établie à 7 cm/s. La direction de la circulation nette dépend de l'emplacement à l'intérieur de la baie. Elle est dirigée vers l'amont (ouest, sud-ouest) et dans la même direction que l'axe principal des courants de marée (voir ci-dessous).

### **3.5. COURANTS DE MARÉE**

#### **3.5.1. Modélisation**

Selon le logiciel WebTide, les courants de marée (moyenne pour la colonne d'eau) dans la baie de Cascapédia sont presque unidirectionnels (ellipse très plate) et suivent le contour des isobathes (Figure 2). Dans la partie est de la baie, ils sont dirigés dans l'axe NO-SE alors que, dans la partie ouest de la baie, ils sont dirigés dans l'axe SO-NE. Leur vitesse est relativement élevée dans les approches est et ouest de la baie et relativement faible au centre et au fond de la baie en raison de l'élargissement à ce niveau.

Tableau 5. Vitesse et direction de la circulation nette à des stations de la rive nord dans la partie amont de la baie des Chaleurs.

Station	Prof. de la mesure (m)	Mois et année	Vitesse mensuelle moyenne (cm/s)	Direction (degrés)
4	3 <sup>(1)</sup>	Juillet 1985-1987	10,3	260
		Août 1985-1987	9,3	
		Septembre 1985-1987	8,2	
		Octobre 1985-1987	8,6	
		Novembre 1985-1987	6,3	
	12 <sup>(2)</sup>	Juillet/août 1985-1987	5,6	240
		Octobre/novembre 1985-1987	6,3	250
5	7	Juin 1991	11,6	255
		Juillet 1991	11,4	252
		Août 1991	11,4	252
		Septembre 1991	13,6	254
6	15	Juin 1991	5,4	255
		Juillet 1991	6,2	250
		Août 1991	4,3	251
		Septembre 1991	5,4	257
7	5	Août 1964	5,6	290
8	13	Septembre 1990	6,5	230
9	4	Septembre 1990	11,2	259
	7	Juin 1991	5,8	270
		Juillet 1991	2,3	273
		Août 1991	9,2	276
		Septembre 1991	0,8	349
12	Septembre 1990	7,4	270	
10	15	Septembre 1990	11,7	229
	30	Septembre 1990	6,6	256
	35	Juin 1991	7,1	260
		Juillet 1991	7,9	263
		Août 1991	7,1	265
Septembre 1991		9,0	259	

(1) Vitesse et direction approximatives tirées d'un graphique.

(2) Moyenne pour les deux mois et trois années.

Tableau 6. Vitesse et direction de la circulation nette pour les enregistrements ADCP réalisés dans le principal site maricole de la baie de Cascapédia (Station 1) en 2004 et 2005.

Mois et année	Profondeur Couche centrée à (m)	Vitesse (cm/s)	Direction (degrés)
Juillet 2004	5,3	12,2	16
	8,0	11,5	12
	10,7	9,3	12
	13,3	6,2	9
Octobre/novembre 2004	6	4,8	98
	9	5,8	104
	12	2,3	157
	15	3,7	218
Juillet 2005	6	17,9	65
	9	14,4	84
	12	8,3	100
	15	3,6	136

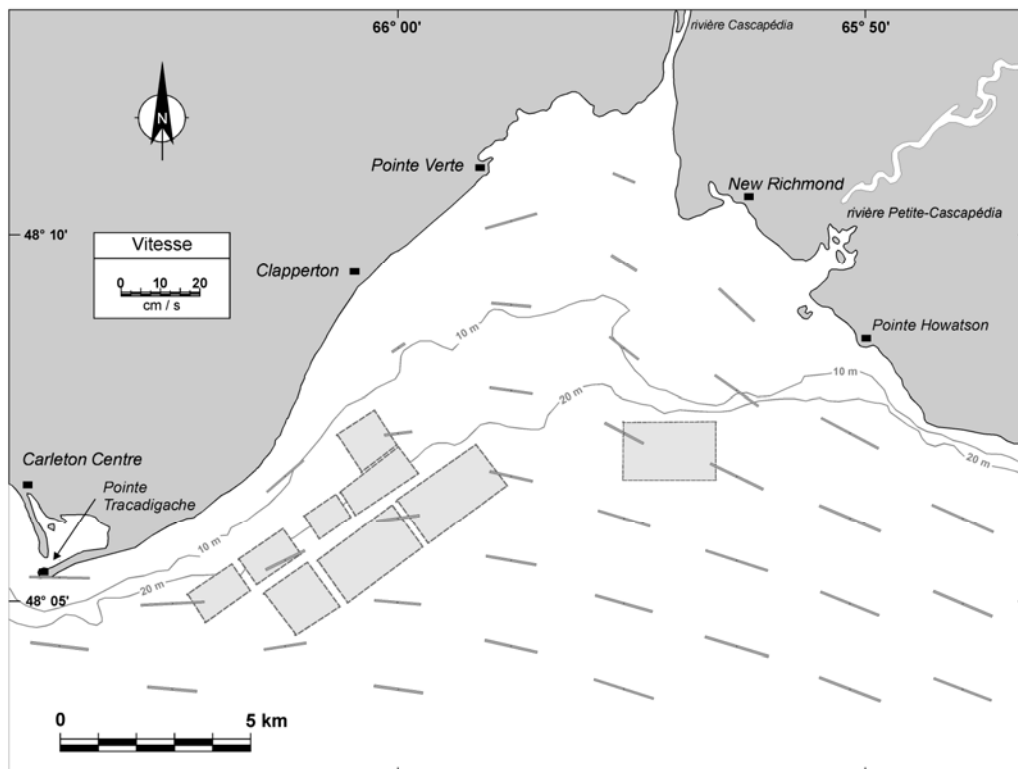


Figure 2. Amplitude et direction de l'axe principal des courants de marée dans la baie de Caspédia selon le logiciel WebTide (moyenne pour la colonne d'eau). À chaque station, le trait est orienté dans la direction de l'axe principal des courants de marée et sa longueur est proportionnelle à leur vitesse maximale ( $M2 + S2 + N2 + O1 + K1$ ). Les filières sont orientées dans l'axe SO-NE dans la partie ouest de la baie.

L'axe principal des courants de marée modélisés par WebTide est parallèle aux filières pour les sites maricoles les plus rapprochés des caps de Maria, entre Carleton et Clapperton. Plus au large dans la partie ouest de la baie, l'axe principal des courants est oblique par rapport à l'axe des filières. Enfin, dans le site maricole de la partie est de la baie, l'axe principal des courants de marée est aussi oblique par rapport à l'axe des filières (en posant qu'elles sont orientées dans l'axe est-ouest ou nord-sud).

Le Tableau 7 présente la vitesse maximale des courants de marée pour la marée de vives-eaux moyenne (M2 + S2) à quatre stations représentatives, soit la pointe Tracadigache (Station 4) et trois secteurs maricoles décrits ci-dessus. Pour les sites maricoles, cette vitesse varie entre 8,0 et 8,9 cm/s.

**Tableau 7. Vitesses maximales des courants pour la marée de vives-eaux moyenne (M2 + S2) à quatre stations de la baie de Cascapédia (moyenne pour la colonne d'eau) selon le logiciel WebTide.**

Station	Vitesse maximale	
	Vitesse maximale (cm/s)	Direction (degrés)
1	8,0	83-263
2	8,9	120-300
3	8,9	70-250
4	13,0	90-270

### 3.5.2. Mesures in situ

Les Figures 3 à 5 présentent les diagrammes U-V des trois enregistrements réalisés à la Station 1 avec le profileur ADCP. Les données brutes de ces enregistrements sont caractérisées par un niveau élevé de bruit et la présence de quelques « spikes ». Malgré le fait que les valeurs présentées dans ces figures soient des moyennes horaires, on y observe encore de nombreuses valeurs aberrantes. De plus, les ellipses de courant changent d'orientation d'un enregistrement à l'autre, ce qui est aussi une indication que ces données sont anormales. Puisqu'il est impossible de déterminer si les valeurs maximales de courant dans ces enregistrements sont réelles ou non, ces données n'ont pas été utilisées pour évaluer le courant extrême.

Bornardelli *et al.* (1993) ont obtenu pour la Station 4 les valeurs suivantes pour l'amplitude et la direction de l'axe principal de la composante M2: 13,8 cm/s (85-265°) à 3 m de profondeur et 9,4 cm/s (81-261°) à 12 m de profondeur (3 m du fond), ce qui donne comme moyenne pour la colonne d'eau environ 12 cm/s (85-265°) pour cette composante. Ce résultat est similaire à celui prédit pour la colonne d'eau par le logiciel WebTide pour la composante M2 à cette station (9,9 cm/s; 87-267°).

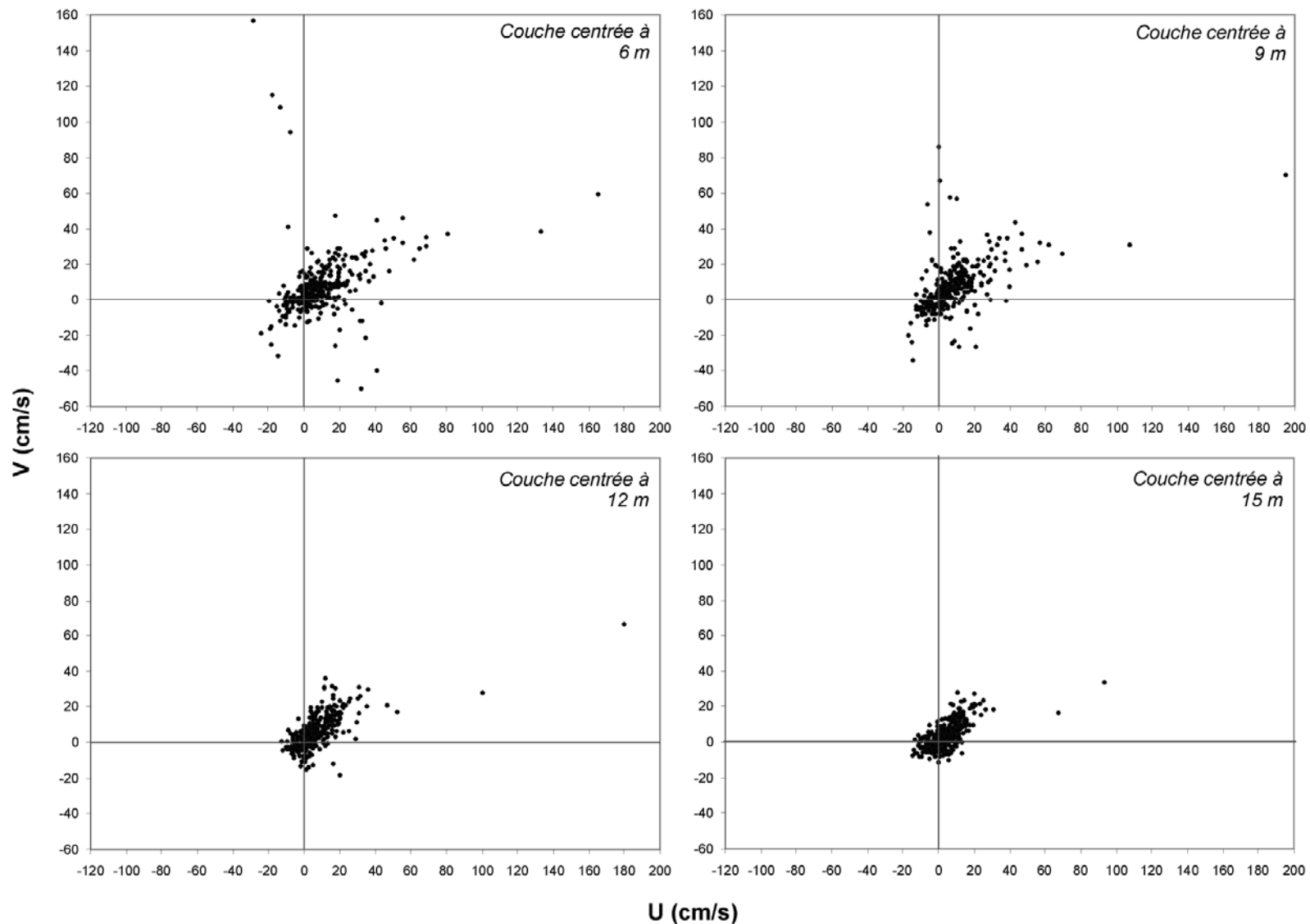
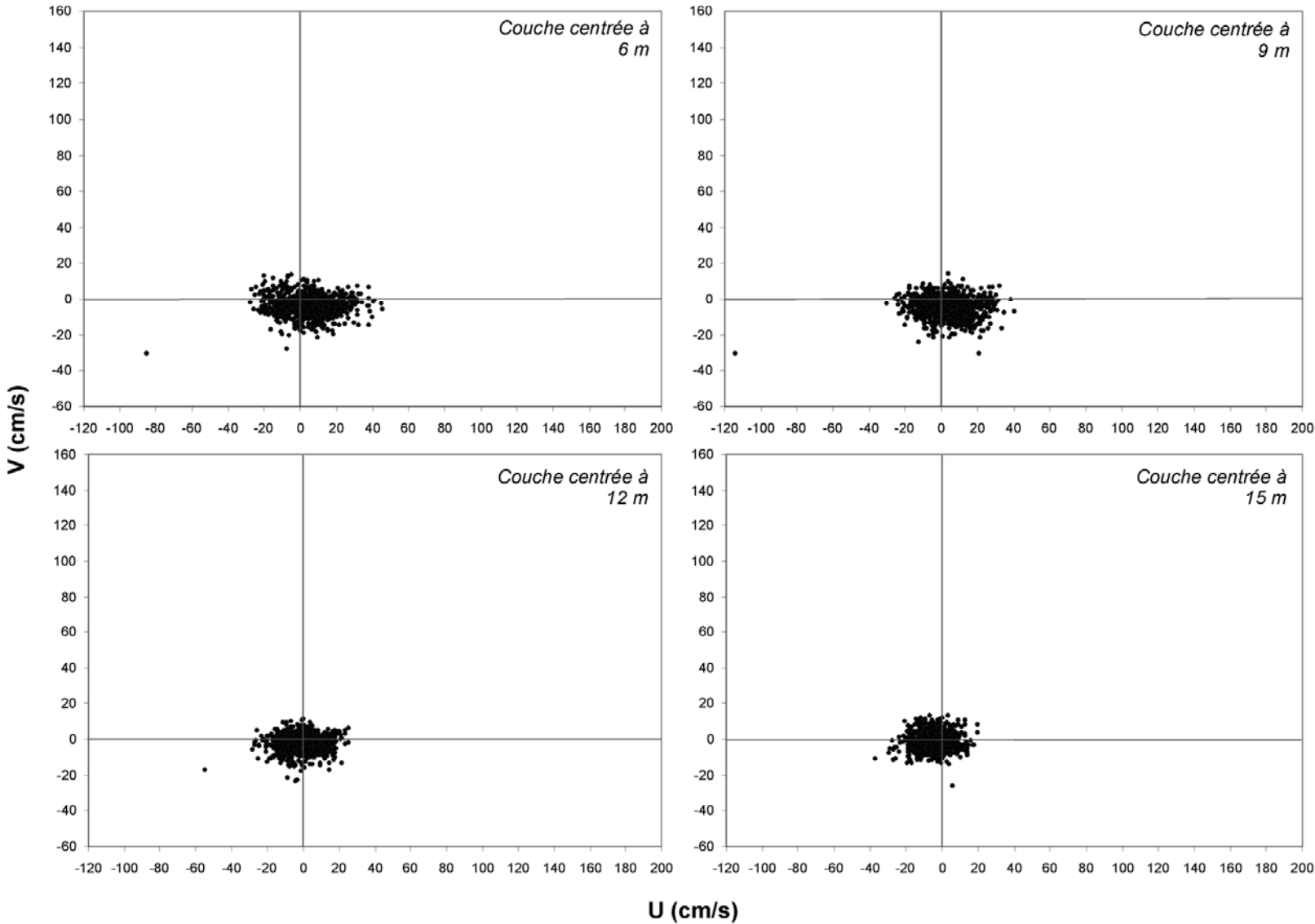


Figure 3. Diagrammes U-V des courants bruts enregistrés à la Station 1 de la baie de Cascapédia à l'aide du profileur ADCP du 5 au 18 juillet 2004. La composante U est positive lorsque orientée vers 54° et la composante V est positive lorsque dirigée vers 324°.



**Figure 4. Diagrammes U-V des courants bruts enregistrés à la Station 1 de la baie de Cascapédia à l'aide du profileur ADCP du 21 octobre au 30 novembre 2004. La composante U est positive lorsque dirigée vers 54° et la composante V est positive lorsque dirigée vers 324°.**

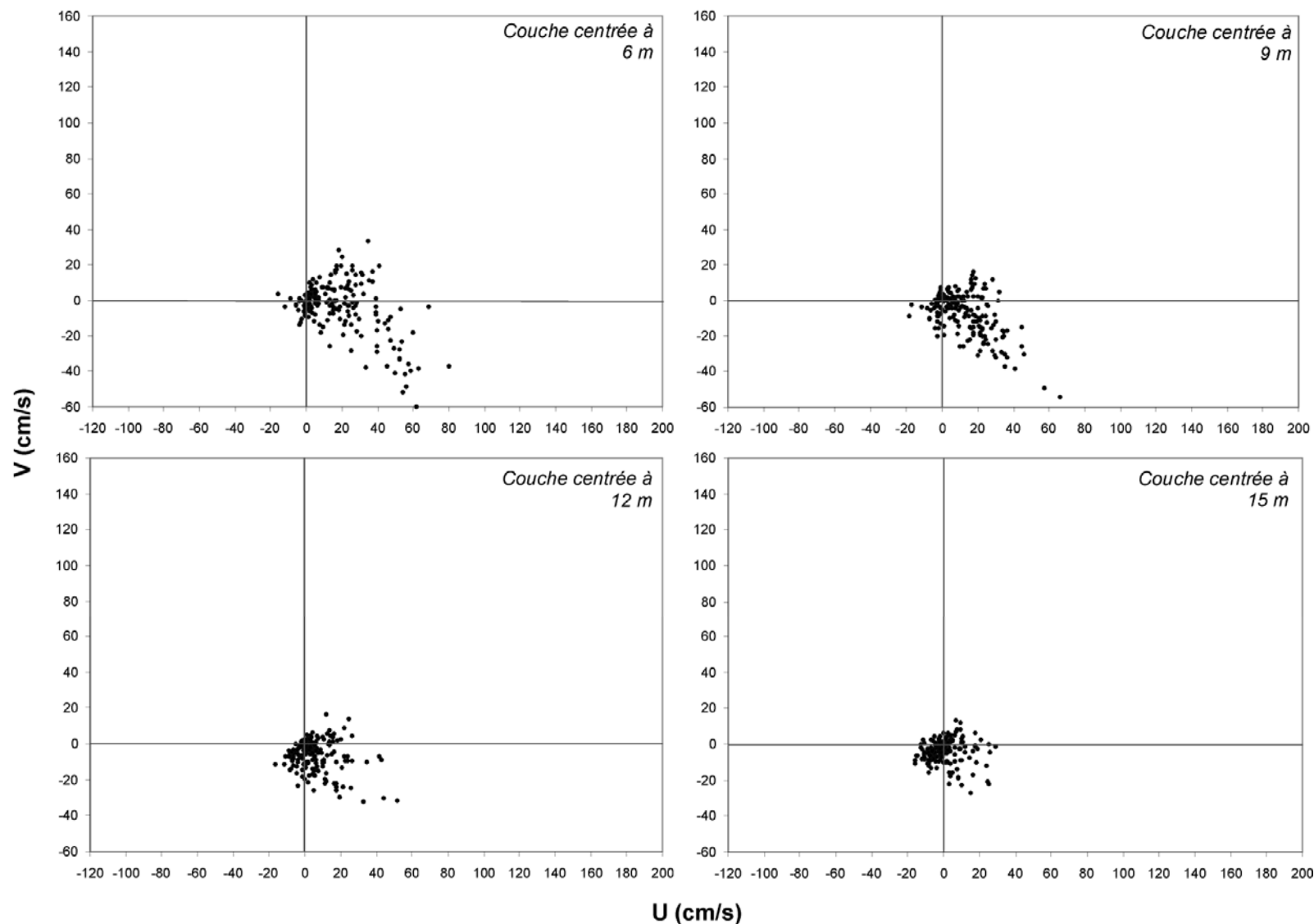


Figure 5. Diagrammes U-V des courants bruts enregistrés à la Station 1 de la baie de Cascapédia à l'aide du profileur ADCP du 29 juin au 7 juillet 2005. La composante U est positive lorsque orientée vers 54° et la composante V est positive lorsque dirigée vers 324°.



Compte tenu de ce qui précède, la vitesse maximale des courants de marée dans la colonne d'eau lors de la marée de vives-eaux moyenne pour les sites maricoles de la baie de Cascapédia a été établie à 10 cm/s. La direction de l'axe principal des courants de marée par rapport à l'axe des filières varie selon l'emplacement dans la baie.

### 3.6. COURANTS DE TEMPÊTE

L'effet du vent et de la pression atmosphérique sur la circulation dans la baie des Chaleurs a été étudié par Gan *et al.* (1995, 1996 et 2004) et par Lavoie (1997). Cette dernière a notamment étudié les effets du passage de trois tempêtes au-dessus du golfe du Saint-Laurent en août et septembre 1990 sur la circulation dans le tronçon central de la baie des Chaleurs. Une des tempêtes étudiées (cyclone Bertha; 2 au 5 août 1990) se classe au 130<sup>e</sup> rang d'intensité parmi les tempêtes qui ont frappé les Îles-de-la-Madeleine entre 1953 et 2000 (Manson *et al.*, 2002).

Lavoie (1997) et Gan *et al.* (1995 et 2004) présentent des séries d'une vingtaine de jours des courants résiduels de basse fréquence à certaines stations de la région de Bonaventure en juillet, août et septembre 1990 et pour l'été 1991. Les variations de basse fréquence ont surtout une périodicité de 10 à 12 jours, de 3 jours et de 4 à 5 jours. Dans la région de Bonaventure, des courants intenses sont générés lors des tempêtes. Ces courants sont parallèles à la côte et sont orientés vers l'aval ou l'amont selon l'orientation de la contrainte du vent et du gradient de pression atmosphérique au-dessus de la baie des Chaleurs. Ils ont parfois une composante importante dirigée vers la côte associée à des épisodes d'upwelling générés par les forts vents du sud-ouest (Lavoie, 1997; Bonardelli *et al.*, 1993).

Le Tableau 8 présente la vitesse maximale des courants résiduels de basse fréquence observés à la fin de l'été 1990 et en été 1991. Le courant de tempête maximal a été obtenu en soustrayant du courant résiduel maximal la circulation nette mensuelle. À une profondeur de 12-15 m, la vitesse maximale du courant de tempête est égale à environ 2,0 % de la vitesse horaire maximale du vent pendant la tempête (moyenne pour les stations de Charlo et Miscou). Cette valeur élevée pour la profondeur est probablement due au fait que les courants sont aussi générés par les variations de la pression atmosphérique et possiblement en raison de variations de l'intensité de l'intrusion du courant de Gaspé dans la baie des Chaleurs lors du passage des tempêtes (Lavoie, 1997).

La vitesse horaire extrême du vent pour la période libre de glaces (avril à décembre inclusivement) s'élève à 74 km/h à la station de Charlo (1966 à 2004) et 87 km/h à celle de Caplan (1947 à 2004). La vitesse des courants de tempête de récurrence de 50 ans dans la région de Bonaventure peut donc être estimée très approximativement à 40 cm/s à une profondeur de 12-15 m.

Tableau 8. Vitesse des courants de tempête maximaux enregistrés dans la région de Bonaventure en 1990 et 1991.

Station	Prof. (m)	Date	Courant de tempête maximal		Vitesse maximale du vent (moyenne pour Charlo et Miscou) (km/h)	Référence
			Vitesse (cm/s)	Rapport courant/vent (%)		
8	13	14/09/1990	11	1,4	29	Lavoie (1997)
		20/09/1990	15	1,4	38	
9	4	05/08/1990	45 <sup>(2)</sup>	5,4	27	Lavoie (1997)
		14/09/1990	41	5,1	29	
		20/09/1990	39	3,7	38	
	7	14/06/1991	-20 <sup>(1)</sup>	-	44	Gan <i>et al</i> (1995)
		21/06/1991	+14 <sup>(1)</sup>	-	36	
		04/08/1991	-16 <sup>(1)</sup>	-	30	
		07/08/1991	+13 <sup>(1)</sup>	-	31	
	12	18/09/1991	+17 <sup>(1)</sup>	-	24	Lavoie (1997)
		05/08/1990	19 <sup>(2)</sup>	2,5	27	
		15/09/1990	16	2,0	29	
10	15	20/09/1990	22	2,1	38	Lavoie (1997)
		14/09/1990	21	2,6	29	
		20/09/1990	33	3,1	38	

(1) Vitesse de la composante parallèle à la rive (positive vers l'est).

(2) En supposant une circulation nette mensuelle de 15 cm/s vers l'ouest.

L'axe principal de variabilité des courants passe-bas aux Stations 7 et 9 est orienté dans la même direction (290° - 295°) que l'axe principal de variabilité des courants non filtrés (290° - 291°) et que la direction de la circulation nette (290° - 303°) (Gregory, 2004). Ces données indiquent que les courants de tempête le long de la rive nord de la baie des Chaleurs sont orientés dans le même sens que les courants de marée.

Les séries temporelles de courant passe-bas pour les stations de la baie de Cascapédia (Stations 4, 5 et 6) ne sont pas disponibles. Nous avons assumé que le rapport entre les courants de tempête dans les sites maricoles et ceux observés aux stations du secteur de Bonaventure est le même que le rapport de l'écart type des variations de basse fréquence entre les stations de Carleton et de Bonaventure (Bonardelli *et al.*, 1993). Ce rapport s'élève à 0,6.

La vitesse des courants de tempête de récurrence de 50 ans pour les sites maricoles de la baie de Cascapédia à une profondeur de 12 à 15 m est donc estimée à environ 30 cm/s.

### 3.7. ELLIPSE DE COURANT EXTRÊME

#### 3.7.1. Axe principal

Les données disponibles suggèrent que la circulation nette, l'axe principal des courants de marée et l'axe principal des courants de tempête dans la baie de Cascapédia sont orientés dans la même direction. Le courant extrême peut donc être représenté par une ellipse

décentrée de 7 cm/s vers l'amont (circulation résiduelle) et dont la demi-longueur de l'axe principal de l'ellipse est obtenue de la somme des amplitudes des courants de marée et des courants de tempête. En appliquant le facteur du Tableau 2 au courant de marée pour un site de 20 m de profondeur et une ligne maîtresse située à 5 m au-dessus du fond lorsque sous l'effet du courant extrême, la demi-longueur de l'axe principal de l'ellipse de courant extrême est égale à environ 40 cm/s.

Selon cette ellipse, la vitesse extrême maximale est dirigée vers l'amont (orientation variable selon l'emplacement dans la baie) et s'élève à 47 cm/s. À titre de comparaison, la vitesse extrême enregistrée à 10 m de profondeur à la station 4 entre le 13 et le 23 juin 1989 est 24 cm/s.

### **3.7.2. Axe secondaire**

On ne dispose de données sur la longueur relative des axes principal et secondaire de l'ellipse des courants bruts enregistrés dans le secteur de la baie de Cascapédia que pour la station 7 à 5 m (Gregory, 2004). Le rapport de longueur des axes s'élève à 3,7. Cette valeur suggère que l'ellipse du courant extrême dans la baie de Cascapédia est plutôt plate et que la demi-longueur de l'axe secondaire de l'ellipse de courant extrême est de l'ordre de 15 cm/s.

### **3.7.3. Orientation des filières**

Dans la baie de Cascapédia, les filières sont orientées entre 0 et 45° par rapport à l'axe principal de l'ellipse selon l'emplacement dans la baie. Il y a donc des filières qui subiront le courant extrême maximal (50 cm/s) à un angle de 45° (Tableau 9). Ce sont probablement ces filières qui subissent la traînée extrême pour ce site maricole.

Le Tableau 9 présente la vitesse qui produira la force de traînée extrême sur les filières en fonction de l'angle d'incidence de ce courant sur la filière.

**Tableau 9. Vitesse du courant qui exerce la force de traînée extrême sur les filières de la baie de Cascapédia selon son angle d'incidence sur les filières.**

<b>Angle d'incidence (degrés)</b>	<b>Vitesse du courant (cm/s)</b>
0	47
22,5	47
45	47
67,5	33
90	21

### 3.8. PROBABILITÉS DE DÉPASSEMENT

La fréquence et la durée de dépassement des courants ont été déterminées en utilisant les simulations des courants de marée (S2 + M2 + N2 + K1 + O1) du logiciel WebTide pour une station typique de la baie de Cascapédia, soit une amplitude des courants de marée (M2 + S2) de 10 cm/s et une circulation nette de 7 cm/s. Les résultats sont présentés au Tableau 10.

**Tableau 10. Fréquence et durée de dépassement de la vitesse par les courants de marée (+ circulation nette) dans la baie de Cascapédia.**

Vitesse du courant (cm/s)	Fréquence de dépassement (% du temps)	Nombre mensuel de dépassements	Durée moyenne des dépassements (heures)
10	35,8	58	4,5
15	10,0	28	2,6
20	0,6	4	1,1
25	0	0	0

La vitesse des courants de marée et de la circulation nette excède 15 cm/s 10,0 % du temps. Cette vitesse est excédée lors de 28 épisodes par mois. La durée moyenne de ces 28 épisodes est de 2,6 heures.

### 3.9. VAGUES EXTRÊMES

Les données pour la baie de Cascapédia proviennent d'une modélisation des vagues à partir des vents enregistrés de 1977 à 1998 à la station de l'île Miscou (MTQ, 2001). Le fetch pour les sites maricoles varie d'un minimum d'environ 2,0 km en direction NO à un maximum de 90 km en direction ESE. Le fetch en direction des vents dominants de l'OSO est de 35 km.

Selon la modélisation, les vagues les plus hautes proviennent de l'ESE et du SE. Les vagues du OSO (non-modélisées) atteignent une hauteur comparable à celles modélisées. Les vagues extrêmes de récurrence de 50 ans ont les caractéristiques suivantes :

- Hauteur significative : 3,0 m
- Période : 8,5 s
- Longueur d'onde : 100 m
- Provenance : ESE, SE et OSO

## 4. HAVRE DE GASPÉ

### 4.1. CARACTÉRISTIQUES DES MARÉES

Les marées dans le havre de Gaspé sont semi-diurnes avec une forte inégalité des deux marées journalières. L'amplitude des marées est plus faible que dans la baie de Cascapédia (Tableau 11).

Tableau 11. Caractéristiques des marées dans le havre de Gaspé.

Station	Marnage de la marée de vives-eaux moyenne (m) <sup>(1)</sup>	Marnage moyen (m) <sup>(2)</sup>	Marnage des grandes marées (m) <sup>(3)</sup>
Pointe Saint-Pierre	-	1,10	1,68
Sandy Beach Centre	-	1,18	1,68
Gaspé	0,96	1,19	1,64

(1) Somme des amplitudes des composantes M2 et S2 multipliée par 2. Source : Carrière (1973).

(2) Moyenne sur 19 ans de la plus grande des deux marées journalières. Source : MPO (2005).

(3) Moyenne des plus grandes marées annuelles pour le cycle de 19 ans. Source : MPO (2005).

#### 4.2. RÉGIME DES VENTS

Selon les données disponibles (Pettigrew *et al.*, 1991), les vents au-dessus du havre durant la saison estivale sont la plupart du temps orientés dans l'axe longitudinal (NO-SE; 120-300°) en raison de la canalisation des vents dans la vallée de la rivière Dartmouth et la baie de Gaspé. Les vents sont presque qu'aussi souvent du nord-ouest que du sud-est. La vitesse maximale du vent enregistrée entre le 31 mai et le 5 juillet 1990 est 34 km/h.

À l'aéroport de Gaspé, les vents sont orientés dans l'axe ouest-est en raison de la canalisation du vent par la vallée de la rivière Saint-Jean. Les vents dominants sont de l'ouest mais, en été, il y a aussi une brise qui souffle fréquemment de l'est (Nav Canada, 2002). La vitesse horaire extrême atteinte en période libre de glaces pour la période 1970-2000 est 76 km/h. La vitesse moyenne pour six heures consécutives s'élevait alors à 59 km/h.

#### 4.3. DONNÉES DE COURANT DISPONIBLES

Le Tableau 12 présente les données disponibles sur les courants dans le havre de Gaspé. Trois enregistrements ont été réalisés avec un profileur de courant ADCP au centre du havre en 2004 et 2005 (Figure 6). D'autres enregistrements réalisés avec un courantomètre conventionnel sont disponibles pour deux stations du havre (Stations 3 et 4), à deux profondeurs différentes à chaque station.

Tableau 12. Sommaire des données disponibles sur les courants dans le havre de Gaspé.

Type de données	Station	Prof. (m)	Dates	Référence
Données brutes d'enregistrement de profileur ADCP	1	n/a	11/05/2005 au 10/06/2005	Présente étude
	2		16/06/2004 au 29/06/2004	
			15/06/2005 au 29/06/2005	
Données brutes d'enregistrement de courantomètre conventionnel	3	3	29/05/1990 au 04/07/1990	Pettigrew <i>et al.</i> 1991
		14		
	4	4		
		15		

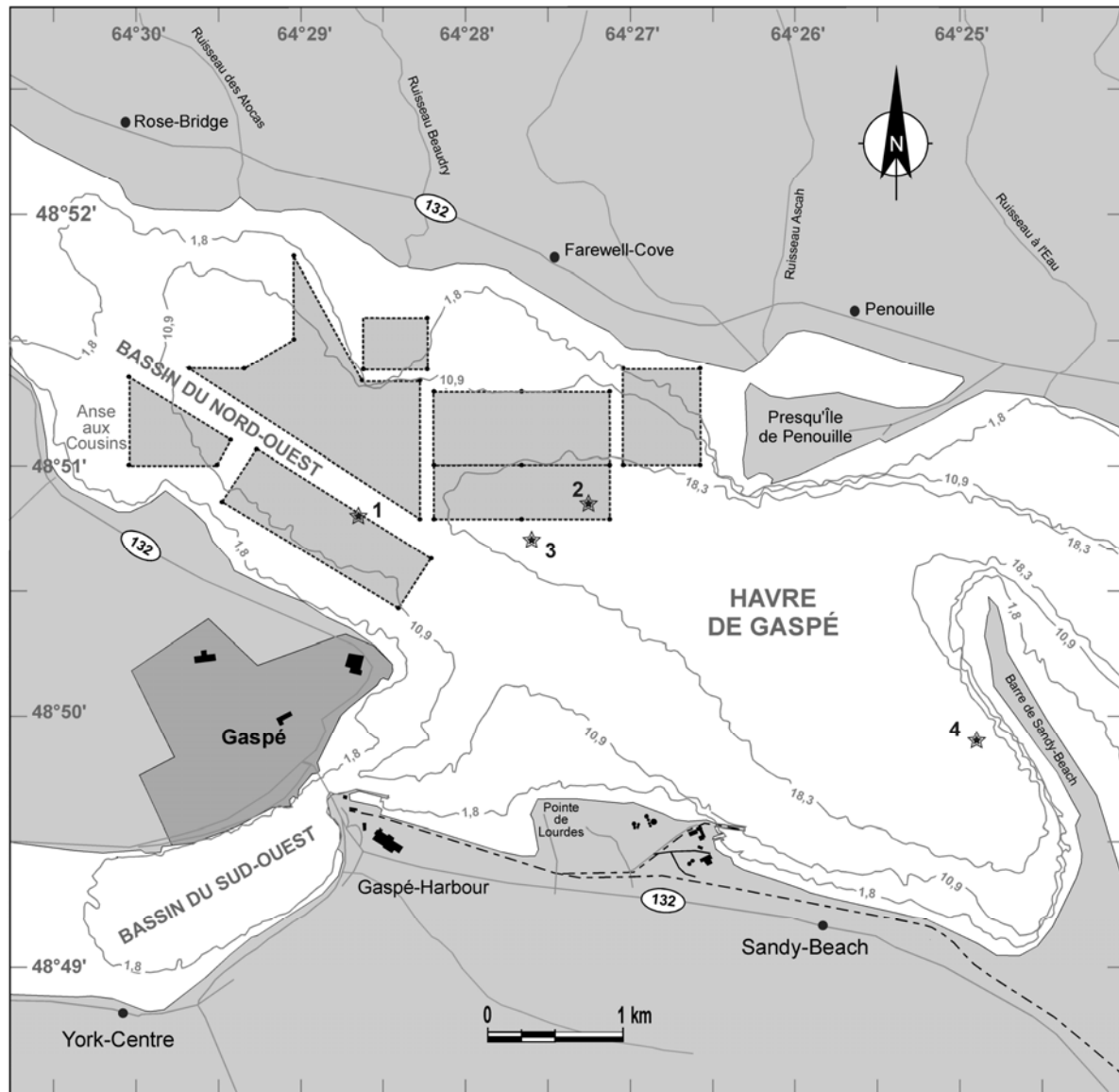


Figure 6. Position des stations pour lesquelles des données de courant sont disponibles dans le havre de Gaspé. Les majorité des filières sont orientées dans l'axe NO-SE (120-300 degrés). Les profondeurs sont en mètres.

#### 4.4. CIRCULATION NETTE

##### 4.4.1. Modélisation

Le havre de Gaspé est un estuaire large et profond. Il reçoit les eaux douces de deux rivières d'importance intermédiaire (Dartmouth et York) dont la crue maximale a généralement lieu à la mi-mai. Le bassin est sous l'influence de marées d'amplitude relativement faible (voir la Section 4.1).

Carrière (1973) a calculé les volumes d'eau impliqués dans la circulation nette à partir des variations du débit des rivières et de profils de température et de salinité dans le havre au printemps et en été. À l'échelle du havre, la circulation nette est du type estuarien (circulation en deux couches) avec une sortie des eaux douces diluées par les eaux salées dans une mince couche en surface (0 à 3 m de profondeur) et une entrée d'eau en profondeur pour compenser la sortie d'eau salée en surface.

Au plus fort de la crue printanière, l'entraînement d'eau salée dans la couche de surface est moins élevé qu'à la fin de la crue parce que la couche d'eau douce est plus épaisse et son mélange avec les eaux salées sous-jacentes par le vent et les marées est moins intense. L'entraînement d'eau salée dans la couche de surface (qui est égal au transport net vers l'amont dans la couche profonde) est maximal à la fin de la crue et est élevé les jours de vent intense.

Le transport maximal calculé par cet auteur dans la couche profonde représente une circulation nette de l'ordre de 1,0 cm/s au niveau des sites maricoles. Carrière (1973) a avancé l'hypothèse que la circulation nette dans la couche profonde peut être plus importante en automne parce que le débit des rivières est de force intermédiaire et la fréquence des tempêtes est plus élevée.

### **4.4.2. Mesures in situ**

Le Tableau 13 présente la vitesse et direction de la circulation nette pour chacun des enregistrements réalisés dans le havre de Gaspé. Les données de Pettigrew *et al.* (1991) confirment les estimations de Carrière (1973) à l'effet que la circulation nette dans la couche profonde du havre est très faible (moins de 1,5 cm/s). Par contre, les données obtenues avec le profileur ADCP sont anormales. Elles indiquent que la circulation nette dans la couche profonde du havre est très élevée et dirigée vers l'aval, ce qui est aberrant. Conséquemment, les données des enregistrements ADCP n'ont pas été utilisées pour déterminer la circulation nette mensuelle maximale dans le havre de Gaspé (voir aussi la Section 4.5.2). Selon les données fragmentaires disponibles, la circulation nette maximale dans les sites maricoles à la profondeur des filières est d'environ 3 cm/s.

## **4.5. COURANTS DE MARÉE**

### **4.5.1. Modélisation**

Le logiciel WebTide ne couvre pas le havre de Gaspé. Par ailleurs, Carrière (1973) a calculé la vitesse maximale des courants de marée dans le passage entre le Sandy Hook et la presqu'île de Penouille pour une marée moyenne. La valeur obtenue est de l'ordre de 30 cm/s.

Tableau 13. Circulation nette pour chacun des enregistrements de courant réalisés dans le havre de Gaspé.

Station	Profondeur (m)	Vitesse (cm/s)	Direction (degrés)	Source
3	3	5,4	296	Gregory (2004)
	14	1,4	379	
4	4	3,0	327	Gregory (2004)
	15	1,1	339	
1	5	65,1	163	Présente étude
	7,5	40,2	164	
	10	50,6	163	
	12	15,5	159	
2	5,5	41,2	213	
	8,0	40,0	210	
	10,5	19,0	198	
	13,5	5,5	143	
	5,5	4,5	245	
	8,0	7,1	234	
	10,5	8,0	223	
13,5	6,0	208		

Si on assume que le prisme de marée en amont de la ligne entre la pointe Jacques-Cartier et la presqu'île de Penouille est environ la moitié de celui du havre en entier et que la section transversale du havre à ce niveau est environ quatre fois plus grande qu'au niveau du Sandy Hook, la vitesse maximale des courants dans la couche d'eau profonde pour une marée moyenne à la Station 3 est de l'ordre de 5 cm/s.

#### 4.5.2. Mesures *in situ*

Les Figures 7 à 9 présentent les diagrammes U-V des enregistrements réalisés aux Stations 1 et 2 avec le profileur ADCP. Les données brutes de ces enregistrements sont caractérisées par un niveau très élevé de bruit et la présence de très nombreux « spikes ». Malgré le fait que les valeurs présentées dans les figures soient des moyennes horaires, on y observe une multitude de valeurs aberrantes (vitesse supérieure à 100 cm/s). De plus, les ellipses de courant changent de forme et d'orientation d'un enregistrement à l'autre, ce qui est aussi une autre indication que ces données sont anormales. Puisqu'il est impossible de déterminer si les valeurs maximales de courant retrouvées dans ces enregistrements sont réelles ou non, ces données n'ont pas été utilisées pour évaluer le courant extrême.

Les seuls autres enregistrements représentatifs des conditions dans les sites maricoles du havre qui sont disponibles ont été réalisés à la Station 3 par Pettigrew *et al.* (1991). Ces enregistrements n'ont pas été l'objet d'une analyse harmonique et on ne dispose donc d'aucune donnée sur l'amplitude des composantes harmoniques des courants.



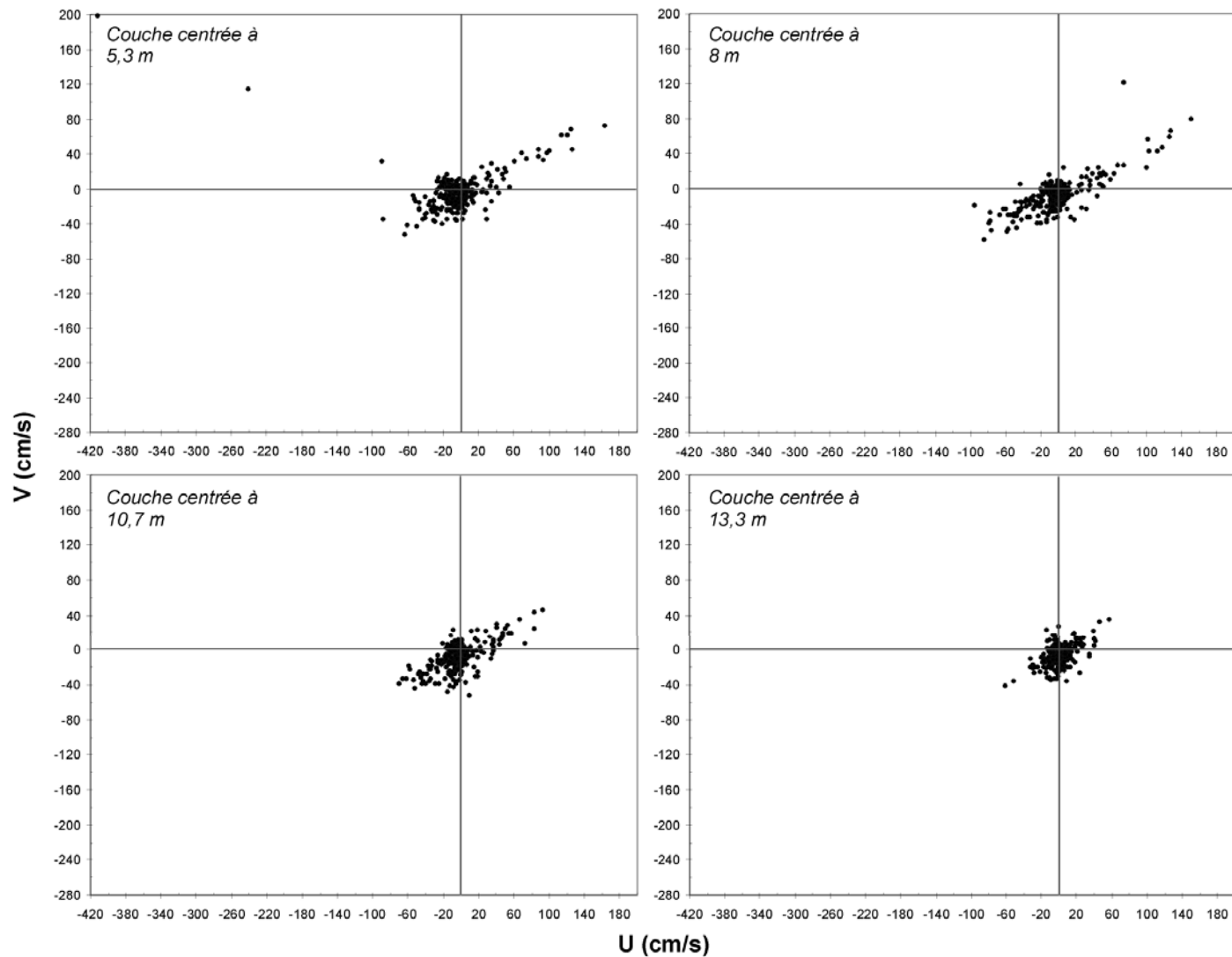


Figure 7. Diagrammes U-V des courants bruts enregistrés à la Station 2 du havre de Gaspé à l'aide du profileur ADCP du 16 au 29 juin 2004. La composante U est positive lorsque orientée vers 120° et la composante V est positive lorsque orientée vers 30° .

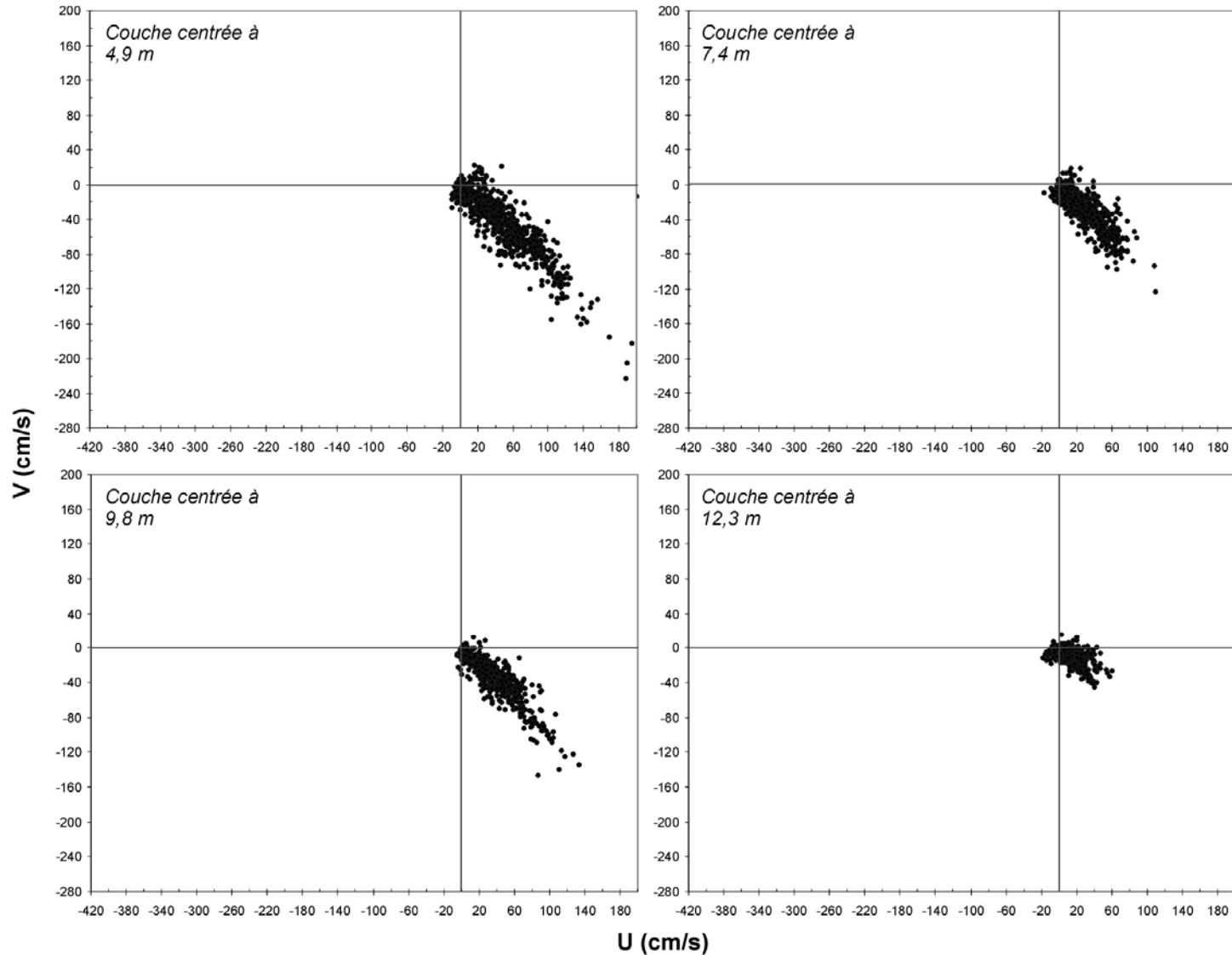


Figure 8. Diagrammes U-V des courants bruts enregistrés à la Station 1 du havre de Gaspé à l'aide du profileur ADCP du 11 mai au 10 juin 2005. La composante U est positive lorsque orientée vers 120° et la composante V est positive lorsque orientée vers 30°

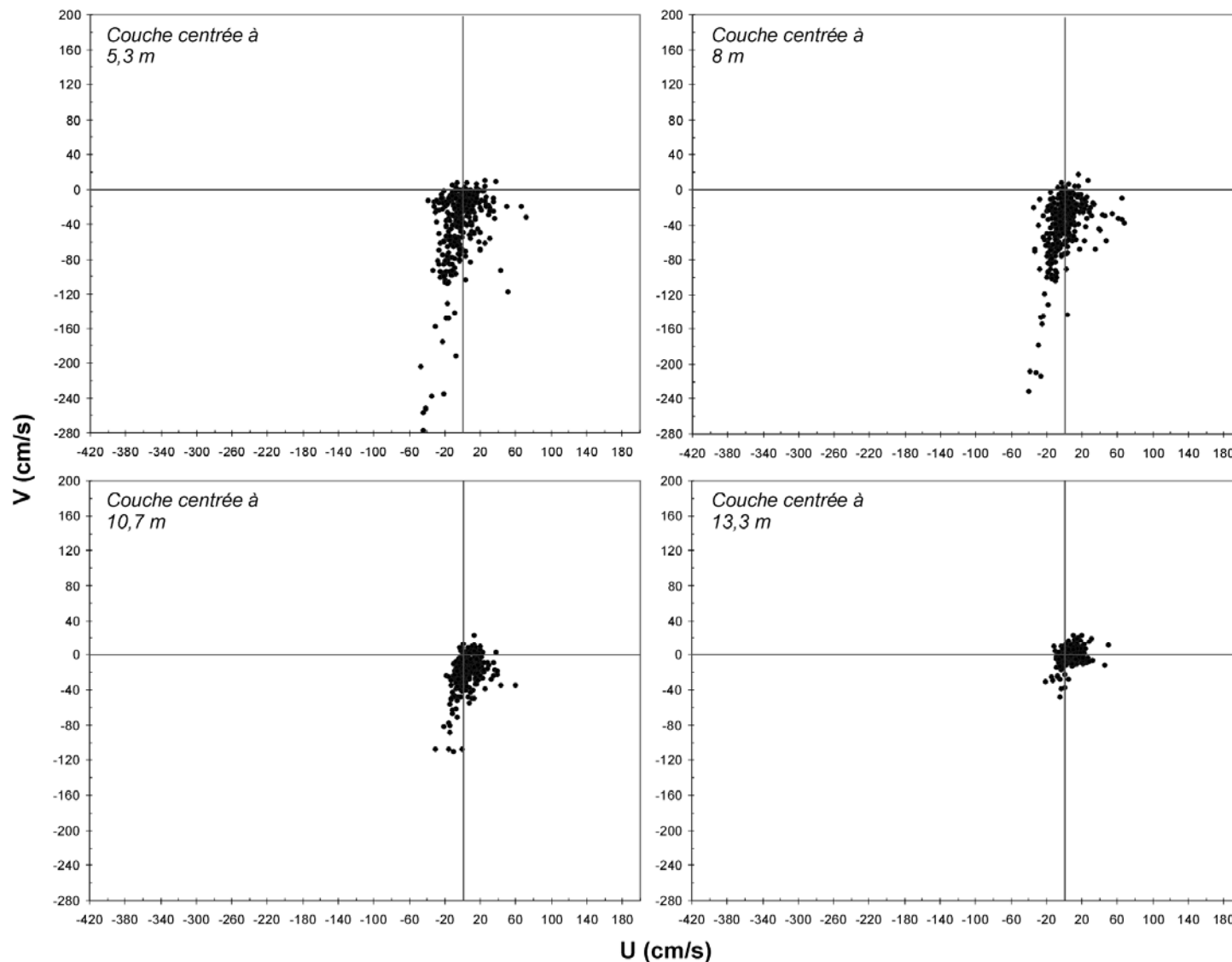


Figure 9. Diagrammes U-V des courants bruts enregistrés à la Station 2 du havre de Gaspé à l'aide du profileur ADCP du 15 au 29 juin 2005. La composante U est positive lorsque orientée vers 120° et la composante V est positive lorsque orientée vers 30°.

À 3 m de profondeur (16 m au-dessus du fond; Figure 10a), la vitesse maximale du courant enregistrée est de 49 cm/s vers l'ouest (280°). Des courants transversaux de 20 cm/s dirigés vers le sud ont été occasionnellement enregistrés.

À 14 m de profondeur (5 m au-dessus du fond; Figure 11), on remarque d'abord que la circulation nette est faible (moyenne proche de zéro). Comme à 3 m de profondeur, l'ellipse des courants bruts (Figure 10) est plutôt circulaire avec des courants transversaux de l'ordre de 20 cm/s dirigés vers le nord lors des étales de marée haute. Cette particularité est probablement attribuable au fait que la Station 3 est située à la confluence du bassin du nord-ouest (rivière Dartmouth) et du bassin du sud-ouest (rivière York). En effet, les ellipses du courant brut dans ces deux bassins et dans la sortie du havre sont beaucoup plus plates (Pettigrew *et al.*, 1991).

Par ailleurs, la relation entre la vitesse maximale des courants à la Station 3 et l'amplitude prédite des marées est faible, les vitesses élevées (plus de 15 cm/s) étant aussi bien enregistrées en marées de mortes-eaux (marnage minimal de 0,65, 0,71 et 0,66 m les 1<sup>er</sup>, 16 et 30 juin, respectivement) qu'en marées de vives-eaux (marnage maximal de 1,25 et 1,65 m les 9 et 23 juin, respectivement).

Ces particularités sont fort probablement attribuables au fait que les courants générés par le vent ont une périodicité proche de celle des composantes tidales des courants de marée et sont souvent dominants. En effet, les variations de la vitesse du vent au-dessus du havre sont essentiellement diurnes (maximum autour de midi) et leur direction change fréquemment (Pettigrew *et al.*, 1991; Environnement Canada, 2005). De plus, les variations du niveau de l'eau dans la baie de Gaspé causées par les tempêtes doivent avoir des répercussions majeures sur la circulation dans le havre.

Pour estimer la vitesse maximale des courants de la marée de vives-eaux moyenne, nous avons établi la relation entre la vitesse maximale des courants et le marnage prédit pour des périodes prolongées de vent calme (plus de 12 heures sans vent supérieur à 10 km/h). En période de vents calmes, les courants de marée à 14 m de profondeur sont orientés dans l'axe 110-290°, soit dans l'axe longitudinal du havre et des filières maricoles. Selon la relation obtenue, la vitesse maximale des courants pour la marée de vives-eaux moyenne (0,96 m) est de l'ordre de 10 cm/s à une profondeur de 14 m à la station 3.

#### **4.6. COURANTS DE TEMPÊTE**

Selon Carrière (1973), les vents du sud-ouest tendent à forcer l'eau vers l'extérieur du havre alors que des vents du nord-ouest tendent à empiler l'eau à l'intérieur du havre, derrière le Sandy Hook.

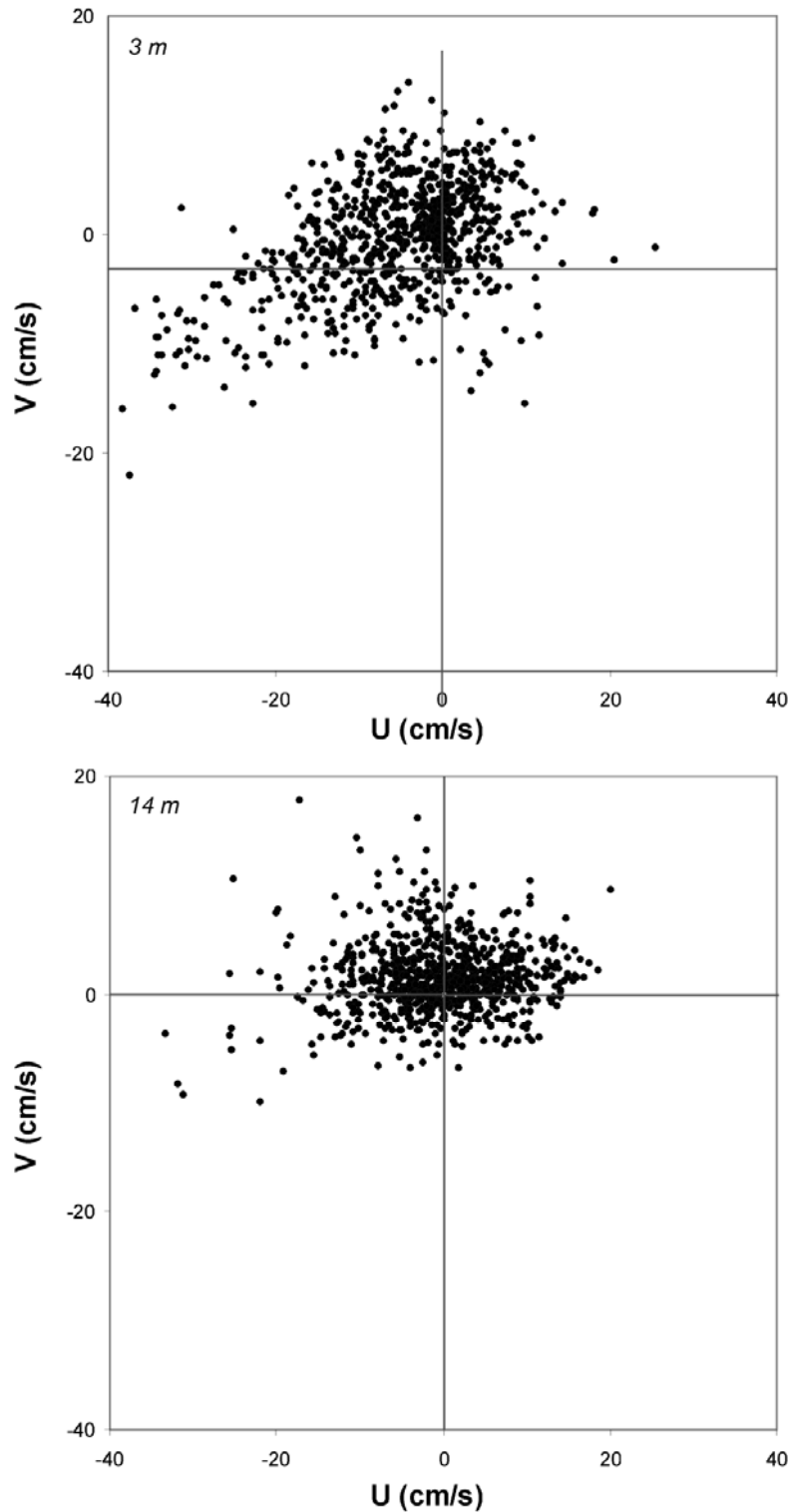
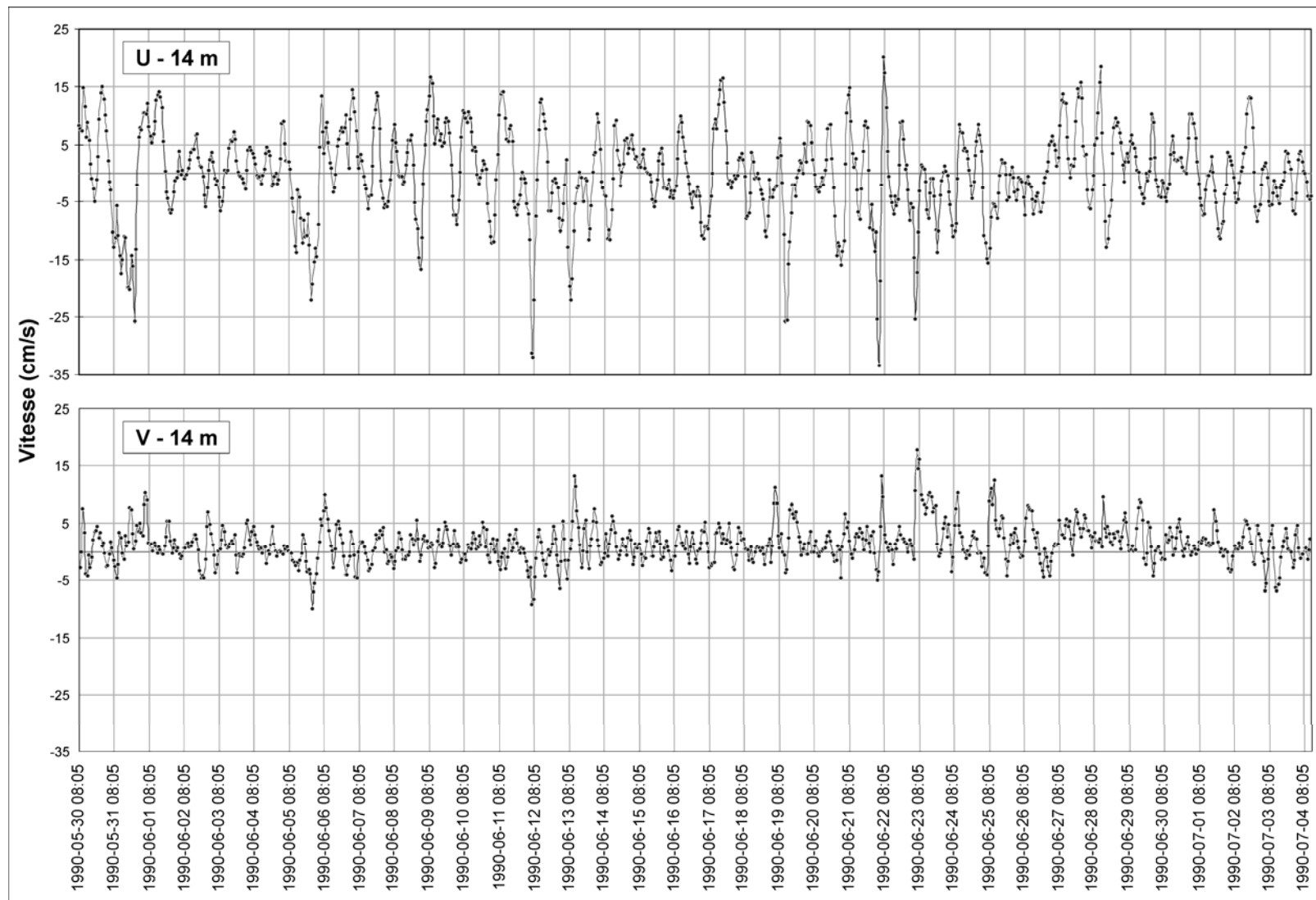


Figure 10. Diagrammes U-V des courants bruts enregistrés à la Station 3 du havre de Gaspé à 3 et 14 m de profondeur (5 m du fond) du 30 mai au 4 juillet 1990. La composante U est positive lorsque orientée vers 120° et la composante V est positive lorsque orientée vers 30°.



**Figure 11. Variations temporelles des composantes U et V des courants bruts enregistrés à la Station 3 du havre de Gaspé à 14 m de profondeur (5 m du fond) du 30 mai au 4 juillet 1990. La composante U est positive lorsque orientée vers 120° et la composante V est positive lorsque orientée vers 30°.**

On ne dispose pas de séries temporelles de courants résiduels dans le havre de Gaspé. Comme mentionné précédemment, les données présentées à la Figure 11 suggèrent que les courants résiduels de basse fréquence (périodicité supérieure à deux jours) ont une faible amplitude alors que ceux de périodicité diurne seraient importants.

L'axe principal de variabilité des courants résiduels de basse fréquence aux Stations 3 et 4 est orienté dans la même direction que l'axe principal de variabilité des courants non-filtrés (Gregory, 2004). Cela indique que les courants générés par le vent sont orientés dans la même direction que les courants de marée.

Les données de Pettigrew *et al.* (1991; Figure 11) montrent que des vents d'est de force intermédiaire (15-20 km/h) peuvent supprimer complètement la sortie d'eau du havre pendant la marée baissante. De plus, ils montrent que les courants perpendiculaires à l'axe longitudinal du havre (et des filières) peuvent atteindre des valeurs relativement élevées (Figure 10; 20 cm/s) au centre du havre lors de l'étale de marée haute. Ce phénomène pourrait être causé par un décalage des courants de marée entre l'estuaire de la rivière York et celui de la rivière Dartmouth.

En conclusion, les données disponibles ne permettent pas d'estimer l'intensité des courants de tempête dans le havre de Gaspé. Pour les besoins du présent rapport, nous assumerons que les courants de tempête de récurrence de 50 ans peuvent atteindre 30 cm/s dans l'axe longitudinal du havre.

### **4.7. ELLIPSE DE COURANT EXTRÊME**

Les données disponibles suggèrent que les vents et les variations de la pression atmosphérique peuvent générer des courants résiduels plus importants que les courants de marée à la profondeur des filières. Bien que les courants les plus forts soient orientés dans l'axe longitudinal du havre, il y a des courants transversaux relativement importants au centre du havre, face à l'estuaire de la rivière York. Des enregistrements lors de fortes tempêtes sont requis pour déterminer avec un degré de certitude acceptable l'ellipse de courant extrême à laquelle les filières maricoles sont soumises dans ce site maricole.

Pour les besoins de la modélisation des filières en conditions extrêmes dans ce havre, nous assumerons que le courant extrême est représenté par une ellipse décentrée de 3 cm/s vers l'amont (circulation résiduelle) et dont la demi-longueur de l'axe principal est obtenue de l'addition de l'amplitude des courants de marée et des courants de tempête. En appliquant le facteur du Tableau 2 au courant de marée pour un site de 20 m de profondeur et une ligne maîtresse située à 5 m au-dessus du fond lorsque sous l'effet du courant extrême, la demi-longueur de l'axe principal de l'ellipse de courant extrême est égale à environ 40 cm/s.

Selon cette ellipse, la vitesse extrême maximale est dirigée vers l'amont et s'élève à 43 cm/s. À titre de comparaison, la vitesse maximale enregistrée par Pettigrew *et al.* (1991) à 14 m à la Station 3 est 37,4 cm/s dirigée vers le nord-ouest (285°).

#### **4.7.1. Axe secondaire**

On ne dispose de données sur la longueur relative des axes principal et secondaire de l'ellipse des courants enregistrés dans le havre de Gaspé que pour les stations 3 (14 m) et 4 (15 m) (Gregory, 2004). Le rapport de longueur des axes s'élève à 2,2 et 1,8, respectivement. En assumant un rapport de 2,0, la demi-longueur de l'axe secondaire de l'ellipse de courant extrême est égale à 20 cm/s.

#### **4.7.2. Orientation des filières**

Dans le havre de Gaspé, la majorité des filières sont orientées dans l'axe principal des courants. La majorité des filières subissent donc le courant extrême maximal (50 cm/s) à un angle près de zéro degré et des courants de moins en moins intenses avec l'augmentation de l'angle d'incidence du courant.

Le Tableau 14 présente la vitesse qui produira la force de traînée extrême sur les filières en fonction de l'angle d'incidence de ce courant sur la filière.

**Tableau 14. Vitesse du courant qui exerce la force de traînée extrême sur les filières du havre de Gaspé selon son angle d'incidence sur les filières.**

Direction par rapport à l'axe des filières (degrés)	Vitesse du courant extrême (cm/s)
0	43
22,5	33
45	27
67,5	22
90	20

#### **4.8. PROBABILITÉS DE DÉPASSEMENT**

La fréquence et la durée de dépassement des courants ont été déterminées à partir de l'enregistrement obtenu à la Station 3 à 14 m de profondeur en mai et juin (Figures 10 et 11). Les résultats sont présentés au Tableau 15.

La vitesse des courants bruts a excédé 15 cm/s 4,8 % du temps. Cette vitesse a été excédée 32 fois par mois. La durée moyenne de ces 32 épisodes a été de 1,1 heure. Au cours de ces 32 épisodes, l'angle d'incidence du courant sur les filières (orientées NO-SE) a varié entre 0 et 54°.



**Tableau 15. Fréquence et durée de dépassement de la vitesse par les courants dans le havre de Gaspé.**

Vitesse du courant (cm/s)	Fréquence de dépassement (% du temps)	Nombre mensuel de dépassements	Durée moyenne des dépassements (heures)	Angle d'incidence (degrés) du courant par rapport aux filières (écart des valeurs)
10	20,6	78	2,0	0 à 88
15	4,8	32	1,1	0 à 54
20	1,9	12	1,2	2 à 27
25	1,0	8	1,0	2 à 27
30	0,3	2	1,3	3 à 18
35	0,1	2	0,4	8 à 18
40	0	0	0	-

#### **4.9. VAGUES EXTRÊMES**

Selon Koutitonsky (2001), la houle générée par les fortes tempêtes dans le golfe est en grande partie atténuée dans la baie de Gaspé et ne crée pas de vagues de plus de 1 m dans le havre. Les vagues extrêmes dans les sites maricoles sont donc générées localement par les vents.

Le fetch maximal dans la direction des vents dominants (NO; 300°) est de 7 km. La vitesse du vent du NO de récurrence de 50 ans est de l'ordre de 60 km/h. Selon les abaques de USACE (2002), les caractéristiques des vagues extrêmes dans le havre sont les suivantes :

- Hauteur significative : 0,7 m;
- Période : 2,5 s;
- Longueur d'onde : 10 m;
- Provenance : NO (300°).

### **5. FOND DU SUD-OUEST**

Cette section concerne les sites de captage de pétoncle sur le Fond du Sud-ouest. Ce secteur est situé sur le Plateau madelinien à l'est des Îles-de-la-Madeleine.

#### **5.1. CARACTÉRISTIQUES DES MARÉES**

Les marées dans le secteur des Îles-de-la-Madeleine sont dominées par les harmoniques diurnes. Lorsque les composantes K1 et O1 sont en phase, les variations du niveau de l'eau ont une amplitude maximale et sont principalement diurnes. La composante semi-diurne M2, qui demeure l'harmonique la plus importante, ne domine les variations du niveau de l'eau que lorsque les composantes K1 et O1 sont déphasées. Le Tableau 16 présente les caractéristiques des marées aux Îles-de-la-Madeleine.

Tableau 16. Caractéristiques des marées dans le secteur des Îles-de-la-Madeleine.

Station	Marnage de la marée de vives-eaux moyenne (m) <sup>(1)</sup>	Marnage moyen (m) <sup>(2)</sup>	Marnage des grandes marées (m) <sup>(3)</sup>
Cap-aux-Meules	0,55	0,64	1,04
Station 1 (figure 12)	0,54	-	-
île d'Entrée	0,52	0,70	1,13

(1) La somme des amplitudes des composantes K1 et O1 multipliée par 2. Source : WebTide.

(2) Moyenne sur 19 ans de la plus grande des deux marées journalières; Source : MPO (2005).

(3) Moyenne des plus grandes marées annuelles pour le cycle de 19 ans; Source : MPO (2005).

## 5.2. RÉGIME DES VENTS

En hiver, les vents dominants aux Îles-de-la-Madeleine sont de l'ouest et ont une vitesse 50 % plus élevée qu'en été. En été, les vents dominants sont du sud (Nav Canada, 2002). Sur le Fond du Sud-ouest, les vents dominants sont du NO, de l'ouest et du SO (Environnement Canada, 2005).

Selon Manson *et al.* (2002b), 464 événements de vent qui a excédé 50 km/h pendant une période d'au moins six heures consécutives ont été enregistrés aux Îles-de-la-Madeleine entre 1953 et 2000. Ces vents de tempête proviennent principalement du nord-ouest et de l'ouest. La vitesse moyenne pour la tempête la plus intense a été 75 km/h.

Selon l'analyse des extrêmes AES40 (Oceanweather, 2005), la vitesse maximale du vent de récurrence de 50 ans à un point situé à environ 50 km au nord-est du Fond du Sud-ouest est 91 km/h. Selon la climatologie MSC50, la vitesse des vents de récurrence de 100 ans autour des Îles-de-la-Madeleine est d'environ 110 km/h ce qui donne une vitesse d'environ 100 km/h pour une récurrence de 50 ans.

## 5.3. DONNÉES DE COURANT DISPONIBLES

Aucun enregistrement de courant (données brutes) n'est disponible pour les sites de captage de pétoncle sur le Fond du Sud-ouest. Par contre, la revue de littérature a fourni des diagrammes U/V pour des enregistrements bruts et des statistiques pour quelques enregistrements réalisés sur le Fond du Sud-ouest et à des stations situées autour des Îles-de-la-Madeleine dans des environnements similaires à celui des sites de captage (Tableau 17; Figure 12).

Par ailleurs, une publication présente une analyse des courants résiduels dans la région en automne (Blackford, 1978). On dispose aussi de trajectoires de bouées dérivantes relâchées au-dessus du Fond du Sud-ouest de 1994 à 1997 (Giguère *et al.*, 1995; Cliche et Giguère, 1997 et 1998). D'autres publications présentent des résultats de modélisation de la circulation nette à l'échelle du golfe du Saint-Laurent.

Tableau 17. Sommaire des données disponibles sur les courants du Plateau madelinien à proximité des Îles-de-la-Madeleine.

Type de données	Station	Prof. (m)	Dates	Référence
Statistiques pour un enregistrement conventionnel	3	?	Début 09/1990 à fin 10/1990 Début 09/1991 à fin 10/1991	Cliche et Giguère (1997)
	6	49	22/10/1970 au 18/11/1970	Blackford (1978)
	7	17		
	8	19	21/10/1970 au 16/11/1970	Blackford (1978) Gregory (2004)
		29		
		54		
	9	13	14/06/1967 au 25/07/1967	Gregory (2004)
Baie de plaisance	18	17/07/2002 au 7/10/2002	Tita <i>et al.</i> (2004)	
Diagramme U-V d'enregistrement conventionnel non-filtré	4	7	septembre et octobre 1993	Giguère <i>et al.</i> (1995)
		12		
		20	septembre et octobre 1994	
	5	18	septembre et octobre 1993	
		12	septembre et octobre 1994	
25				
Série temporelle des courants résiduels	3	20	04/07/1992 au 23/08/1992	Cliche <i>et al.</i> (1994)
Trajectoire de bouées dérivantes à partir du Fond du Sud-ouest	N/a	N/a	septembre et octobre 1994, 1995 et 1997	Giguère <i>et al.</i> (1995) Cliche et Giguère (1997 et 1998)

## 5.4. CIRCULATION NETTE

### 5.4.1. Modélisation

Il existe plusieurs modélisations de la circulation nette dans le golfe du Saint-Laurent. Le modèle qui fournit la meilleure résolution spatiale et qui est probablement le plus précis est celui développé par Saucier *et al.* (2003). La Figure 13 reproduit les résultats de ce modèle pour les quatre trimestres de 1997. Selon ce modèle, la circulation nette de la partie supérieure de la colonne d'eau (0-30 m) au niveau des sites de captage est moins importante que dans les secteurs environnants au nord, au sud et à l'est des îles. Sur le Fond du Sud-ouest, la circulation nette se situe entre 3 et 6 cm/s et est dirigée vers le sud-ouest (205 à 250°) à toutes les saisons.

### 5.4.2. Mesures *in situ*

Le Tableau 18 présente les données sur la circulation nette mensuelle provenant d'enregistrements de courant. Ces données montrent que la circulation nette sur le Plateau madelinien peut être importante (plus de 10 cm/s) même à plus de 20 m de profondeur. Ces données sont conformes au patron de circulation de la Figure 13.

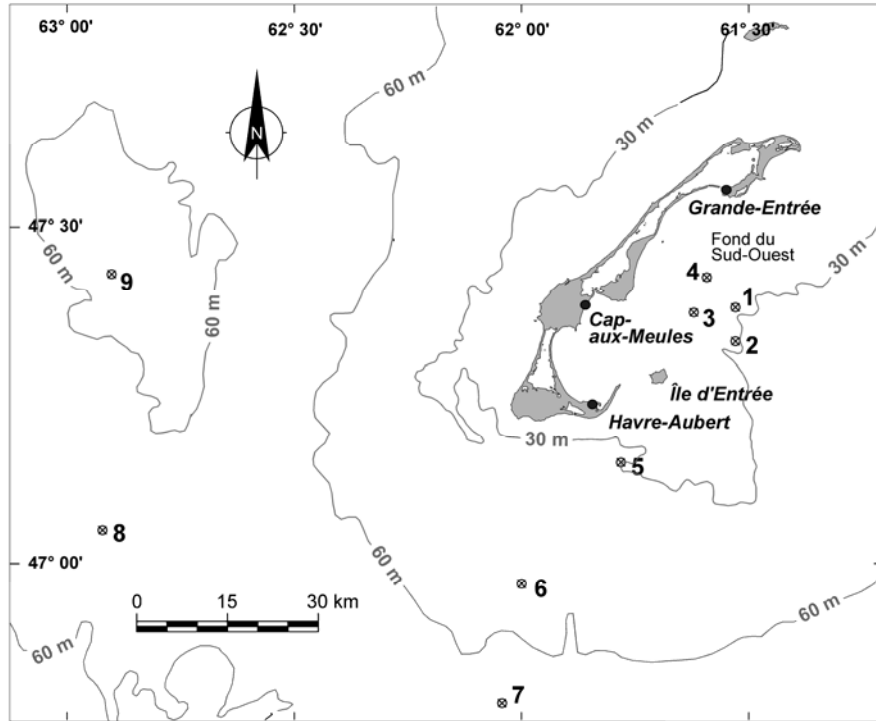


Figure 12. Position des stations pour lesquelles on dispose de données sur les courants en milieu non-abrité autour des Îles-de-la-Madeleine.

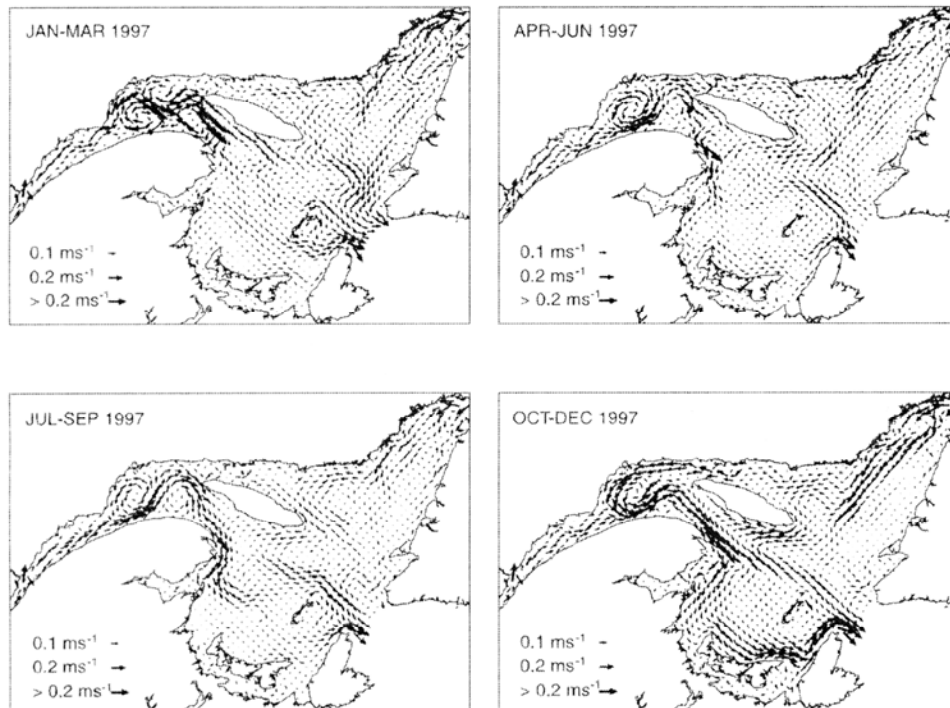


Figure 13. Circulation nette de la couche d'eau superficielle (0-30 m) dans le golfe du Saint-Laurent selon le modèle de Saucier *et al.* (2003).

Tableau 18. Valeurs de circulation nette obtenues pour des enregistrements de courantomètre sur le Plateau madelinien. Sources : Blackford (1978); Cliche *et al.* (1994); Gregory (2004).

Station	Profondeur (m)	Mois	Circulation nette	
			Vitesse (cm/s)	Direction (degrés vrais)
6	49	octobre	1,7	133
		novembre	0,3	113
7	17	octobre	15,8	93
		novembre	18,9	99
8	19	octobre	5,8	105
		novembre	13,5	169
	29	octobre	9,2	103
		novembre	14,0	166
	54	octobre	1,4	142
		novembre	4,5	137
9	13	juin	4,0	319
		juillet	7,0	357
3	?	juillet/août 1992	0,5	280
		septembre 1990	0,6	300
		octobre 1990	0,3	350
		novembre 1990	1,8	360
		septembre 1991	1,3	60
		octobre 1991	0,8	290
		novembre 1991	1,7	300

Les données disponibles pour les bouées dérivantes relâchées sur le Fond du Sud-ouest indiquent que la circulation nette dans la partie supérieure de la colonne d'eau (0 à 15-20 m de profondeur) en automne est la plupart du temps dirigée vers le sud-ouest conformément aux résultats du modèle de Saucier *et al.* (2003). Par contre, des enregistrements de courant montrent que la circulation nette sur le Fond du Sud-ouest près du fond en 1990, 1991 et 1992 était faible (moins de 2 cm/s) et orientée vers le nord-ouest ou le nord-est.

Compte tenu de ce qui précède, la circulation nette mensuelle maximale sur le Fond du Sud-ouest entre 4 et 10 m au-dessus du fond a été établie à 5 cm/s.

## 5.5. COURANTS DE MARÉE

### 5.5.1. Modélisation

La Figure 14 présente le patron des courants de marée (moyenne pour la colonne d'eau) au-dessus du Fond du Sud-ouest obtenu avec le logiciel WebTide. Dans l'ensemble, l'axe principal de ces courants est dirigé vers le sud-ouest et a tendance à s'orienter vers le sud en s'approchant des îles. La vitesse des courants est minimale du côté nord-ouest de la zone et augmente vers le sud et vers l'est. L'amplitude des courants de marée sur le Fond du Sud-ouest est moins grande que plus au nord, au sud et à l'est des îles. La vitesse maximale des courants pour la marée de vive-eaux moyenne (K1 + O1) est égale à 10,4 cm/s (45-135°) et

10,0 cm/s (45-135°) pour deux stations (stations 1 et 2) représentatives des secteurs nord et sud des sites de captage, respectivement.

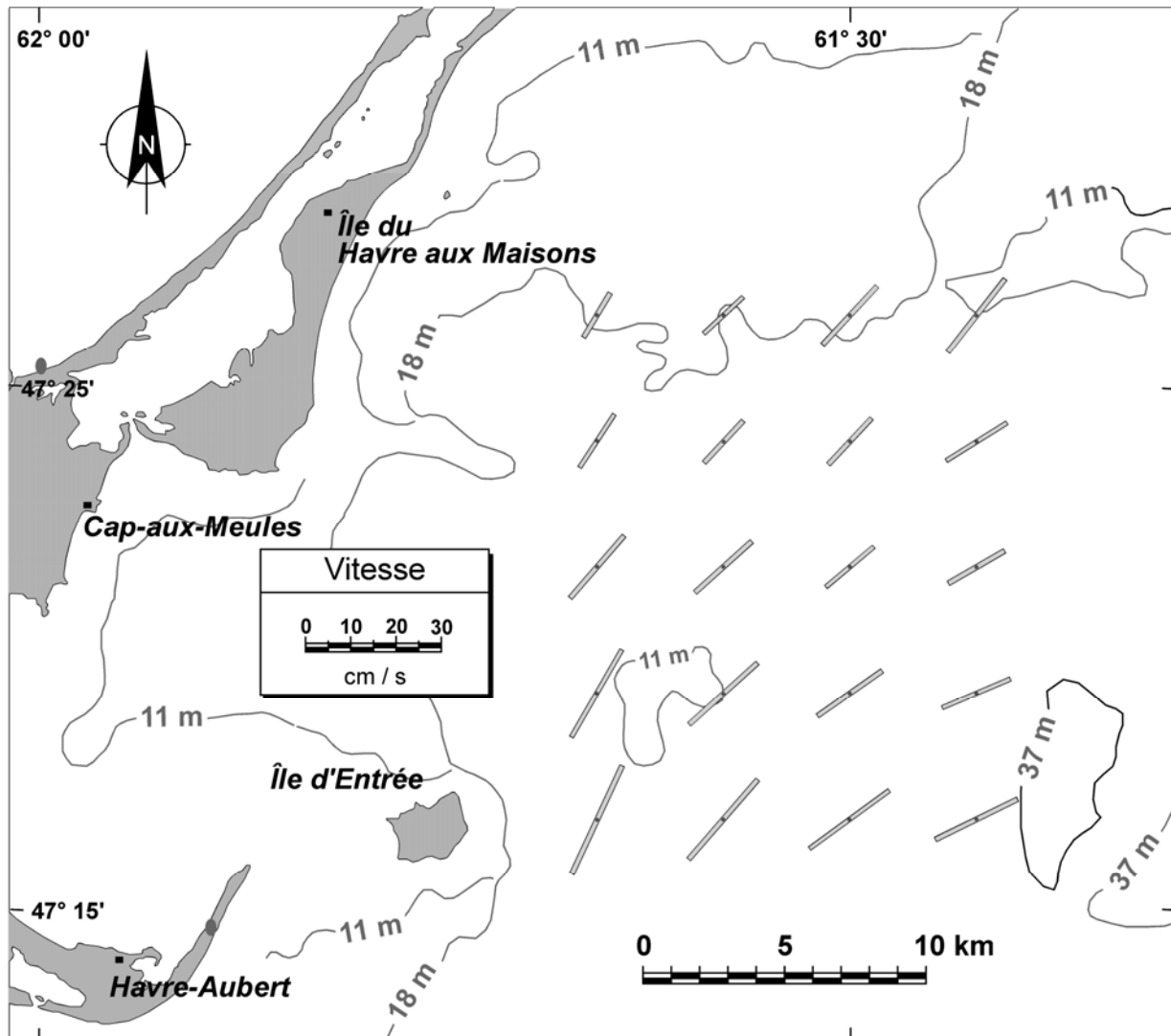


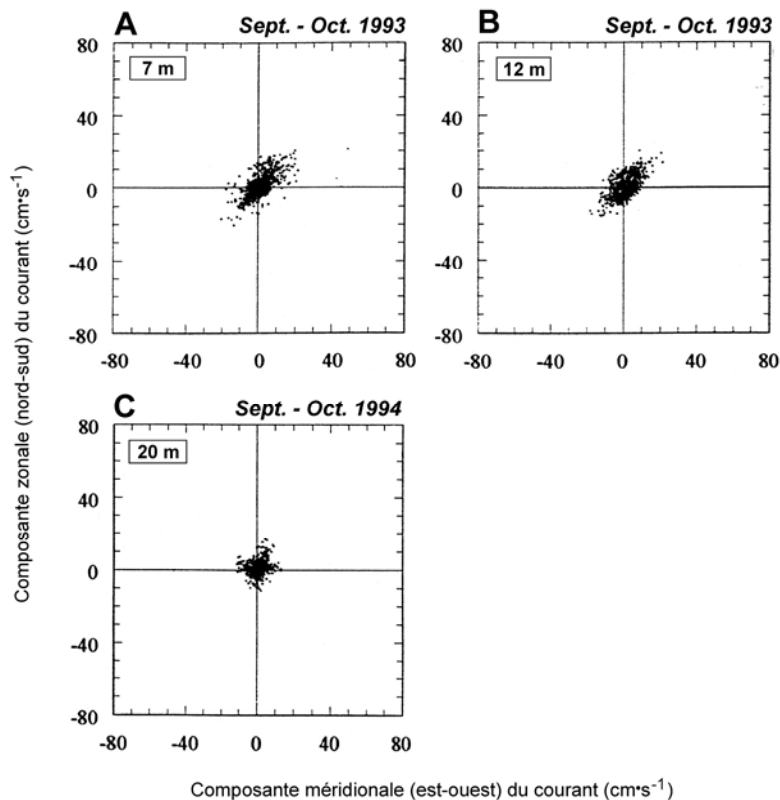
Figure 14. Amplitude et direction des courants de marée au-dessus du Fond du Sud-ouest selon le logiciel WebTide (moyenne pour la colonne d'eau). À chaque station, le trait est orienté dans la direction de l'axe principal des courants et sa longueur est proportionnelle à leur vitesse maximale ( $M2 + S2 + N2 + O1 + K1$ ) multipliée par deux. La majorité des filières sont orientées dans l'axe Nord-Sud.

Les ellipses des courants de marée pour les Stations 1 et 2 et pour une marée d'amplitude maximale (donc diurne) ont une axe principal orienté S0-NE. Les courants de marée ne sont pas unidirectionnels : l'axe secondaire de l'ellipse est beaucoup plus grand que dans la baie de Caspédia et correspond à environ 30 % de la longueur de l'axe principal.

### 5.5.2. Mesures *in situ*

On ne dispose d'aucune donnée sur les harmoniques des courants de marée dans ou à proximité des sites de captage.

La Figure 15 reproduit les diagrammes U-V obtenus en septembre/octobre 1993 et 1994 sur le Fond du Sud-ouest. À 9 et 14 m du fond, les ellipses de courant sont conformes aux prédictions du logiciel WebTide pour l'ensemble de la colonne d'eau avec un axe principal orienté dans le sens NE-SO (42-222°). Les ellipses à ces deux profondeurs sont presque identiques, les courants étant un peu plus élevés à 14 m qu'à 9 m du fond. Par contre, à 1,0 m du fond, les courants sont beaucoup plus faibles et n'ont pas de direction prédominante (ellipse circulaire). L'axe principal des ellipses sur le Fond du Sud-ouest est environ deux fois plus petit que celui des ellipses obtenues à la Station 5 (Giguère *et al.*, 1995).



**Figure 15. Diagrammes U-V des courants bruts enregistrés à la Station n° 4 à 7, 12 et 20 m de profondeur (1 m du fond), en septembre et octobre 1993 et 1994 (Giguère *et al.*, 1995).**

Selon les données disponibles, la vitesse maximale des courants pour la marée de vives-eaux moyenne sur le Fond du Sud-ouest est de l'ordre de 10 cm/s (moyenne pour la colonne d'eau).

### 5.6. COURANTS DE TEMPÊTE

On ne dispose d'aucune série temporelle de courants résiduels pour le Fond du Sud-ouest.

Blackford (1978) a étudié l'effet du vent sur les courants résiduels du Plateau madelinien en automne (octobre/novembre). Il a observé des courants relativement intenses (de l'ordre de 10 cm/s) dans la partie supérieure de la colonne d'eau (0 à 40 m) d'une périodicité d'environ 16 heures, soit la fréquence des courants inertiels. Ces courants anticycloniques (sens horaire) sont causés par des « pulses » de vent intense (plus de 50 km/h) d'une durée de 1 à 2 jours.

Par ailleurs, ce même chercheur a enregistré une vitesse résiduelle maximale de 42 cm/s à une station au centre du Plateau madelinien à 25 m de profondeur. Un vent de 67 km/h soufflait alors de l'ouest. Si on soustrait de cette valeur la circulation nette d'environ 10,0 cm/s, on obtient un courant de tempête de 32 cm/s, soit 1,7 % de la vitesse du vent. Durant cette tempête, la moyenne de la vitesse maximale des courants observés à huit stations du Plateau madelinien dans la couche d'eau de surface (0 à 40 m) s'élevait à environ 20 cm/s pour un vent maximal moyen de 52 km/h, soit un rapport entre la vitesse du courant et celle du vent d'environ 1,4 %.

Si on assume que la vitesse du vent de récurrence de 50 ans sur le Fond du Sud-ouest est 70 km/h et que le rapport entre la vitesse des courants de tempête dans la couche d'eau de 10 à 40 m et celle du vent est de 1,4 %, on obtient une vitesse du courant de tempête de récurrence de 50 ans d'environ 30 cm/s pour la colonne d'eau du Fond du Sud-ouest

## **5.7. ELLIPSE DE COURANT EXTRÊME**

### **5.7.1. Axe principal**

Les données disponibles permettent d'établir des valeurs indicatrices pour le courant extrême sur le Fond du Sud-ouest. Selon les facteurs du Tableau 2, la demi-longueur de l'axe principal de l'ellipse de courant extrême à 3 m du fond (hauteur de la ligne maîtresse dans le courant extrême) dans un site de captage de 30 m de profondeur est 34 cm/s .

La circulation nette est dans la même direction que l'axe principal des courants de marée; la vitesse extrême maximale des courants dans ce site est donc d'environ 38 cm/s dirigée vers le sud-ouest. À titre de comparaison, la vitesse maximale enregistrée sur le Fond de l'ouest en septembre et octobre 1993 et 1994 (en excluant les « spikes »), a été de 30, 27 et 16 cm/s vers le nord-est à 14 m, 9 m et 1 m du fond, respectivement (Figure 15). Or, il n'y a eu qu'une seule forte tempête dans le secteur des Îles-de-la-Madeleine au cours de ces enregistrements (vitesse horaire des vents maximale : 67 km/h du NE) et seul l'enregistrement à 1,0 m du fond a été réalisé durant cette tempête.

Par ailleurs, dans un enregistrement réalisé à 8 km au sud-est de Cap-aux-Meules à 18 m de profondeur (1 m au-dessus du fond) entre le 17 juillet et le 7 octobre 2002, la vitesse maximale de 28 cm/s a été enregistrée (Tita *et al.*, 2004)



### 5.7.2. Axe secondaire

Le rapport entre l'axe principal et l'axe secondaire de variabilité des données non filtrées pour les Stations 4 et 5 à 17-19 m de profondeur est en moyenne de 1,5. Ce faible rapport suggère que la demi-longueur de l'axe secondaire de l'ellipse des courants extrêmes sur le Fond du Sud-ouest est d'environ 20 cm/s.

### 5.7.3. Orientation des filières

Sur le Fond du Sud-ouest, plusieurs filières ont un angle d'environ 45° par rapport à l'axe principal des courants (Figures 14 et 15). Le Tableau 19 présente la vitesse qui produira la force de traînée extrême sur les filières en fonction de l'angle d'incidence de ce courant sur la filière.

**Tableau 19. Vitesse du courant qui exerce la force de traînée extrême sur les filières dans les sites de captage du Fond du Sud-ouest selon son angle d'incidence sur les filières.**

Direction par rapport à l'axe principal des courants de marée (degrés)	Vitesse extrême du courant (cm/s)
0	38
22,5	38
45	38
67,5	32
90	27

## 5.8. PROBABILITÉS DE DÉPASSEMENT

La fréquence et la durée de dépassement des courants ont été déterminées en utilisant les simulations des courants de marée (S2 + M2 + N2 + K1 + O1) du logiciel WebTide pour une station typique du Fond du Sud-ouest, pour une amplitude des courants de marée (O1 + K1) de 10 cm/s et une circulation nette de 5 cm/s. Les résultats sont présentés au Tableau 20.

**Tableau 20. Fréquence et durée de dépassement de la vitesse par les courants de marée et la circulation nette sur le Fond du sud-ouest.**

Vitesse du courant (cm/s)	Fréquence de dépassement (% du temps)	Nombre mensuel de dépassements	Durée moyenne des dépassements (heures)	Angle d'incidence <sup>(1)</sup> (degrés)
10	20,6	22	6,8	0 à 74
15	6,7	14	3,5	24 à 61
20	0	0	0	-

(1) Par rapport à des filières orientées nord-sud.

La vitesse des courants de marée et de la circulation nette excède 15 cm/s 6,7 % du temps. Cette vitesse est excédée lors de 14 épisodes par mois. La durée moyenne de ces 14 épisodes

est de 3,5 h. Durant ces épisodes, le courant est orienté entre 24 et 61° par rapport à l'axe des filières (orientées N-S) et atteint une vitesse maximale lorsqu'il est orienté à 45° environ.

À titre de comparaison, les fréquences de dépassement suivantes ont été obtenues pour les courants bruts dans un enregistrement réalisé à 8 km au sud-est de Cap-aux-Meules à 18 m de profondeur (1 m au-dessus du fond) entre le 17 juillet et le 7 octobre 2002 (Tita *et al.*, 2004) :

- 10 cm/s : 14,5 %;
- 15 cm/s : 2,5 %;
- 20 cm/s : 0,2 %.

### **5.9. VAGUES EXTREMES**

Le fetch pour le Fond du Sud-ouest varie d'une quinzaine de kilomètres en direction ouest à plusieurs centaines de kilomètres en direction est. Les grandes houles générées dans l'Atlantique pénètrent dans le golfe et se propagent jusque dans le site maricole (Manson *et al.*, 2002a). Les tempêtes sont plus fréquentes lorsque les vents soufflent du nord-ouest pour lesquels le fetch du Fond du Sud-ouest est relativement faible (vingtaine de kilomètres). Les vents du nord-est génèrent des vagues de tempête mais ces tempêtes sont moins fréquentes que celles du nord-ouest et ont surtout lieu en hiver lorsque les glaces sont présentes. La présence de glaces réduit la génération et la propagation des vagues. Ce sont donc les tempêtes d'automne du nord-est et de l'est qui sont les principaux événements qui génèrent des vagues extrêmes sur le Fond du Sud-ouest.

Selon Manson *et al.* (2002a), 67 événements de vent de l'est et du sud (30 à 225°) qui ont excédé 50 km/h pour une période d'au moins six heures consécutives ont été enregistrés aux Îles-de-la-Madeleine en période libre de glaces entre 1953 et 2000. La vitesse moyenne du vent de récurrence de 50 ans pour ces tempêtes est d'environ 70 km/h.

Selon les climatologies WWA91, AES40 et MSC50, les vagues de récurrence de 50 ans sur le Fond du Sud-ouest ont les caractéristiques suivantes :

- Hauteur significative : 8,0 m;
- Période de pointe : 12 s;
- Longueur d'onde : 177 m;
- Provenance : est (90°).

## **6. LAGUNES DES ÎLES-DE-LA-MADELEINE**

Les principaux sites maricoles des îles-de-la-Madeleine sont situés dans le bassin central de la lagune de Havre-aux-Maisons et dans le bassin est de la lagune de Grande-Entrée.

### 6.1. CARACTÉRISTIQUES DES MARÉES

Le Tableau 21 présente les caractéristiques des marées à des stations situées à l'extérieur des lagunes. Selon Koutitonsky *et al.* (2002), les marées sont peu atténuées dans la lagune de Grande-Entrée par rapport à ce qui est observé à l'extérieur, dans le golfe. Par contre, l'amplitude de la marée est considérablement réduite dans la lagune du HAM. Ainsi, l'amplitude de la composante K1 est réduite d'environ 33 % et celle de la composante M2 est réduite d'environ 50 % dans la lagune de Havre-aux-Maisons (Koutitonsky, 2002).

**Tableau 21. Caractéristiques des marées dans des ports des Îles-de-la-Madeleine à proximité des passes des lagunes de GE et du HAM.**

Station	Marnage de la marée de vives-eaux moyenne (m) <sup>(1)</sup>	Marnage moyen (m) <sup>(2)</sup>	Marnage des grandes marées (m) <sup>(3)</sup>
Grande-Entrée	0,51	0,58	0,97
Pointe Basse	0,53	0,64	1,04

(1) Somme des amplitudes des composantes K1 et O1 multipliée par 2 (Source : WebTide).

(2) Source : MPO (2005).

(3) Source : MPO (2005).

### 6.2. RÉGIME DES VENTS

En hiver, les vents dominants aux Îles-de-la-Madeleine sont de l'ouest et ont une vitesse 50 % plus élevée qu'en été. En été, les vents dominants sont du sud et de l'ouest. Les vents d'est sont moins fréquents mais plus intenses (Nav Canada, 2002).

Selon Manson *et al.* (2002), 464 événements de vent qui a excédé 50 km/h pour une période d'au moins 6 heures consécutives ont été enregistrés aux Îles-de-la-Madeleine entre 1953 et 2000 (47 ans). Ces vents de tempête proviennent principalement du nord-ouest et de l'ouest. Les vitesses moyennes pour la tempête la plus intense ont été 75 km/h et 89 km/h.

### 6.3. DONNÉES DE COURANT DISPONIBLES

Les données sur les courants dans les lagunes proviennent surtout des passes où les courants sont considérablement amplifiés (Koutitonsky, 2002). Les données représentatives des sites maricoles sont beaucoup plus restreintes.

La lagune de Grande-Entrée a été l'objet d'une étude détaillée de la circulation en mai 1989 (Koutitonsky *et al.*, 2002). Cette étude fournit des statistiques et des séries temporelles des courants résiduels de basse fréquence pour trois stations situées dans ou à proximité des sites maricoles, dans le bassin est de la lagune (Tableau 22; Figure 16). Par ailleurs, Fréchette *et al.* (1991) ont publié les données provenant d'un enregistrement dans un des parcs mytilicoles de ce bassin (Station 1).

Tableau 22. Sommaire des données sur les courants disponibles pour les lagunes de Grande-Entrée et du Havre-aux-Maisons.

Type de données	Station	Prof. (m)	Dates	Référence
<b>Lagune de Grande-Entrée</b>				
Données brutes d'enregistrements de courantomètre conventionnel	1	2,6-2,9	18/07/1987 au 28/07/1987	Fréchette <i>et al.</i> (1991)
Statistiques pour des enregistrements de courantomètre conventionnel	1	2,6-2,9	18/07/1987 au 28/07/1987	Fréchette <i>et al.</i> (1991)
	3	?	24 heures	Chamberlain <i>et al.</i> (2006)
	2	1	6/05/1989 au 20/05/1989	Koutitonsky <i>et al.</i> (2002)
		5		
	3	1		
5				
4	5			
Variations temporelles des courants résiduels passe-bas	2	1	10/05/1987 au 17/05/1987	Koutitonsky <i>et al.</i> (2002)
		5		
	3	1		
4	5			
<b>Lagune du Havre-aux-Maisons</b>				
Données brutes d'enregistrements de courantomètre conventionnel	Baie Verte	3	19/08/1982 au 29/10/1982	Gagnon <i>et al.</i> (1984)
	Centre sud	3	29/10/1982 au 15/11/1982	

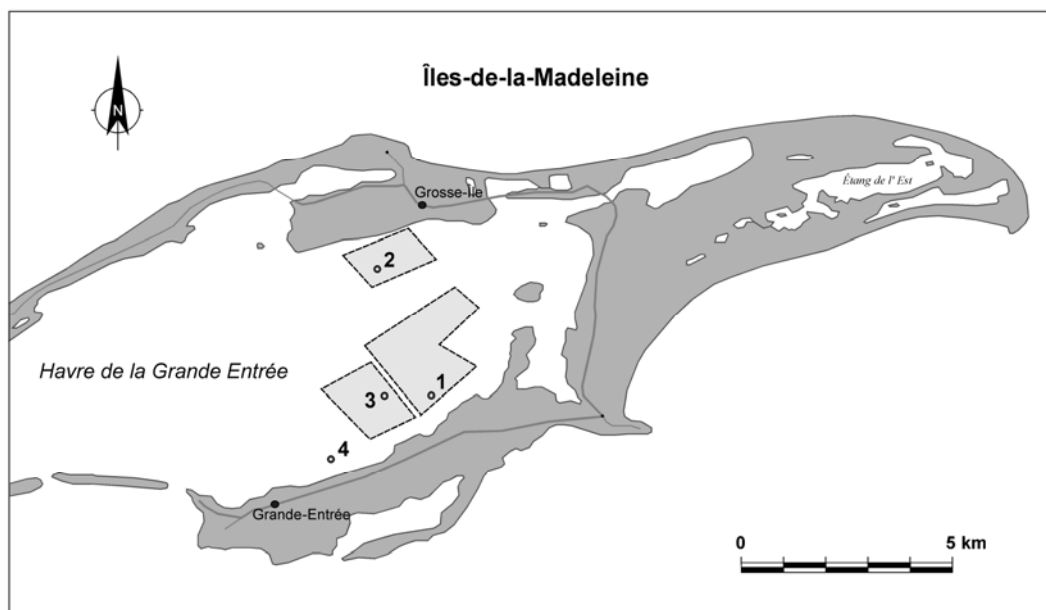


Figure 16. Position des stations dans le bassin est de la lagune de Grande-Entrée pour lesquelles on dispose de données sur les courants.

Les données disponibles pour la lagune du Havre-aux-Maisons (HAM) sont beaucoup plus fragmentaires. Les enregistrements d'une durée d'au moins 20 jours proviennent uniquement de Gagnon *et al.* (1984).

#### **6.4. CIRCULATION NETTE**

Dans le bassin est de la lagune de Grande-Entrée, la circulation nette mensuelle à 1,0 m du fond en mai 1989 a varié entre 1 et 5 cm/s (Koutitonsky *et al.*, 2002). Dans le site maricole situé près de la rive sud de la lagune, la circulation nette journalière a atteint un maximum de 7,1 cm/s dirigée vers le SW (Chamberlain *et al.*, 2006).

Dans la lagune du Havre-aux-Maisons, la circulation nette mensuelle a atteint 2,8 et 1,2 cm/s dans la baie Verte en septembre et octobre 1982, respectivement, et 5,0 cm/s en novembre 1982 au centre de la lagune (Gagnon *et al.*, 1984).

En général, les vents dominants de l'ouest et du sud ont tendance à créer une circulation nette de l'eau de la lagune de HAM vers celle de GE avec une sortie d'eau dans la passe de la lagune de GE et une entrée d'eau en provenance du Golfe dans celle de la lagune de HAM (Koutitonsky, 2002).

#### **6.5. COURANTS DE MARÉE**

##### **6.5.1. Mesures *in situ***

L'amplitude des composantes harmoniques des courants de marée près du fond dans le bassin est de la lagune de GE est très faible (Koutitonsky *et al.*, 2002). L'amplitude des composantes M2 et K1 n'excède pas 2 cm/s. Dans la lagune de HAM, l'amplitude maximale des variations cycliques des courants en 1982 (Gagnon *et al.*, 1984) a été de l'ordre de 2 cm/s.

On peut donc assumer que la vitesse des courants de la marée de vives-eaux moyenne est de l'ordre de 2 cm/s dans les sites maricoles.

#### **6.6. COURANTS DE TEMPÊTE**

Koutitonsky *et al.* (2002) ont étudié l'effet des vents sur la vitesse des courants résiduels de basse fréquence dans la lagune de GE. De façon générale, les vents d'ouest dominants ont tendance à causer une circulation d'eau de la lagune du Havre-aux-Maisons vers la lagune de Grande-Entrée. Dans les lagunes, les vents qui soufflent dans l'axe longitudinal du plan d'eau produisent un courant côtier de chaque côté de la lagune et un contre-courant au centre de la lagune ou, lorsqu'il y a un bassin central profond (sites maricoles), près du fond (Koutitonsky *et al.*, 2002).

Lors d'un événement météorologique survenu entre le 12 et 16 mai 1999 (vitesse maximale du vent de 37 km/h ENE), la vitesse résiduelle maximale enregistrée dans le bassin est de la lagune de GE a été d'environ 10 cm/s à la Station 3 (1 m du fond). Ce courant était dirigé vers

le nord-est alors que le vent était dirigé vers le sud-ouest, ce qui indique qu'il s'agissait du contre-courant qui compensait la dérive des eaux en surface. Si on assume que la circulation résiduelle est nulle, la vitesse de ce courant de tempête à 1,0 m du fond correspond à environ 1,0 % de la vitesse maximale du vent.

Par ailleurs, une vitesse maximale du courant de 18 cm/s a été enregistrée à la Station 1 pendant un épisode de vents intenses (44 km/h de l'ouest). La circulation nette s'élevait à environ 3 cm/s, la vitesse des courants de tempête à 2-3,5 m du fond correspondait à 1,2 % de la vitesse maximale du vent.

Si on assume que la vitesse du vent de récurrence de 50 ans orienté dans l'axe principal des lagunes est 65 km/h et que le rapport entre la vitesse maximale des courants résiduels à 1,0 m du fond dans le bassin est de la lagune de GE est égal à 1,1 % de la vitesse maximale du vent, la vitesse du courant de tempête de récurrence de 50 ans à 1 m du fond dans ce bassin est d'environ 22 cm/s.

## **6.7. ELLIPSE DE COURANT EXTRÊME**

### **6.7.1. Axe principal**

Les données disponibles suggèrent que l'axe principal de l'ellipse de courant extrême dans les deux lagunes est orienté SO-NE. Selon les facteurs du Tableau 2, la demi-longueur de l'axe principal des courants extrêmes à 3 m du fond (hauteur de la ligne maîtresse dans le courant extrême) dans un site de 6 m de profondeur est 29 cm/s.

La vitesse extrême du courant de récurrence de 50 ans pour les lagunes s'élève à 34 cm/s. À titre de comparaison, la vitesse maximale des courants mesurée dans les lagunes (en excluant les passes) est 32,3 cm/s (Gregory, 2004). Cette vitesse a été enregistrée dans la lagune de Havre-aux-Maisons à 2,5-3,0 m du fond pendant une forte tempête du nord-est le 2 octobre 1982.

Par ailleurs, des modélisations hydrodynamiques de la lagune de Havre-aux-Maisons lors d'une tempête de l'est (36-43 km/h; 100°) et une tempête du nord-ouest (25-32 km/h; 300°) ont produit des courants bruts qui n'ont pas excédé 20 cm/s dans les sites maricoles de cette lagune (Koutitonsky, 2002).

### **6.7.2. Axe secondaire**

Les données disponibles indiquent que l'axe secondaire de l'ellipse du courant extrême est environ la moitié de celle de l'axe principal, soit 15 cm/s.

### 6.7.3. Orientation des filières

Les filières dans les deux lagunes peuvent être orientées dans l'axe SO-NE, NO-SE, est-ouest ou nord-sud (Bergeron et Gagnon, 2003). Le courant extrême dans l'axe SO-NE peut donc avoir un angle d'incidence de 0 à 90° sur ces filières.

Le Tableau 23 présente la vitesse qui produira la force de traînée extrême sur les filières en fonction de l'angle d'incidence de ce courant sur la filière.

**Tableau 23. Vitesse du courant qui exerce la force de traînée extrême sur les filières des lagunes de Grande-Entrée et de Havre-aux-Maisons selon son angle d'incidence sur les filières.**

Direction par rapport à l'axe principal des courants de marée (degrés)	Vitesse extrême du courant (cm/s)
0	35
22,5	35
45	35
67,5	35
90	35

### 6.8. PROBABILITÉS DE DÉPASSEMENT

La fréquence et la durée de dépassement des courants ont été déterminées à partir des enregistrements obtenus dans la lagune de HAM d'août à novembre 1982. Les résultats sont présentés au Tableau 24.

**Tableau 24. Fréquence et durée de dépassement de la vitesse par les courants bruts dans la lagune de Havre-aux-Maisons (août à novembre).**

Vitesse du courant (cm/s)	Fréquence de dépassement (% du temps)	Nombre mensuel de dépassements	Durée moyenne des dépassements (heures)
10	36,5	72	3,7
15	18,3	57	2,4
20	5,4	38	1,0
25	1,2	8	1,1
30	0,04	1,6	0,2
35	0	0	0

La vitesse des courants bruts a excédé 20 cm/s 5,4 % du temps. Cette vitesse a été excédée 38 fois par mois. La durée moyenne de ces 38 épisodes a été d'une heure.

### 6.9. VAGUES EXTREMES

Les vagues générés dans le golfe ne se propagent pas dans les lagunes (Koutitonsky, 2002). Les vagues dans les lagunes sont générées localement et atteignent une hauteur maximale lorsque le vent souffle dans l'axe longitudinal des lagunes (SO-NE). Le fetch des sites maricoles

dans les deux lagunes varie entre quelques centaines de mètres et un maximum de 16 km en direction sud-ouest (245°) dans la lagune de Grande-Entrée. Selon Manson *et al.* (2002a), 11 événements de vent du sud-ouest (240-255°) qui excède 50 km/h pour une période d'au moins six heures consécutives ont été enregistrés aux Îles-de-la-Madeleine pendant la période libre de glaces entre 1953 et 2000. La vitesse du vent de récurrence de 50 ans pour ces tempêtes est d'environ 65 km/h.

Pour un fetch de 16 km et une vitesse du vent de 65 km/h, les vagues de récurrence de 50 ans dans les sites maricoles de la lagune de GE ont les caractéristiques suivantes selon les abaques de USACE (2002) :

- Hauteur significative : 1,1 m;
- Période de pointe : 3,5 s;
- Longueur d'onde : 18,5 m; et
- Provenance : sud-ouest (245°).

À titre de comparaison, la hauteur significative des vagues dans les lagunes n'a pas excédé 0,5 m dans une simulation avec une tempête de l'est (35-40 km/h, 100°) et des vagues de 2,5 m et 8 s de période provenant de l'est dans le Golfe (Koutitonsky *et al.*, 2002).

## **7. DISCUSSION ET CONCLUSION GÉNÉRALE**

### **7.1. BLOCAGE ET CANALISATION DU COURANT PAR LES FILIÈRES**

Les valeurs du courant extrême proposées dans les Sections 3 à 6 sont indicatrices des courants ambiants dans les sites maricoles mais pas nécessairement du courant auquel sont soumises les filières à l'intérieur de ces sites. En effet, la vitesse des courants au centre des fermes est moins élevée qu'à l'extérieur des fermes parce que les filières constituent un obstacle pour le courant. La résistance des filières fait qu'une partie du flot incident est déviée au-dessus, en-dessous ou de chaque côté des fermes. De plus, lorsque la densité de boudin sur les filières est élevée, les courants obliques peuvent être progressivement déviés par les filières et devenir parallèles à l'axe des filières.

Le blocage du courant par les fermes mytilicoles constituées de filières de surface a été documenté par Pilditch *et al.* (2001), Boyd et Heasman (1998), Gibbs *et al.* (1991), Plew (2005), Plew *et al.* (2005; 2006) et Strohmeier *et al.* (2005). En Nouvelle-Zélande, Plew *et al.* (2005 et 2006) ont observé une réduction de 36 % de la vitesse du courant à environ 400 m à l'intérieur d'une ferme par rapport au courant ambiant en amont de la ferme alors que les courants sous la ferme n'étaient réduits que de 4 %. La réduction de la vitesse du courant à l'extrémité aval de la ferme (2,5 km de l'extrémité amont) était de l'ordre de 60 %. Cette grande ferme était constituée de 230 filières arrangées en deux colonnes de 20 blocs. Chaque bloc était espacé de quelques centaines de mètres. À l'intérieur de chaque bloc, les filières étaient parallèles les unes aux



autres mais leur orientation par rapport à l'axe principal du courant ambiant changeait d'un bloc à l'autre. Les filières typiques avaient une longueur de 120 m, avaient deux lignes maîtresses séparées d'environ 1 m et supportaient chacune 4 000 m de boudin continu attaché en boucles («U») perpendiculaires aux deux lignes maîtresses. Le boudin avait en moyenne 15 cm de diamètre et les boucles avaient une hauteur moyenne de 8 m. La densité de cette ferme (en équivalents de boudins verticaux par m<sup>2</sup>) était 0,06 boudin/m<sup>2</sup>.

Par ailleurs, en Norvège, Strohmeier *et al.* (2005) ont observé une réduction de 28 %, 74 % et 81 % de la vitesse du courant à 0 m, 30 m et 70 m, respectivement, à l'intérieur d'une ferme mytilicole plus petite (200 m par 15 m) mais 20 fois plus dense que la ferme de Nouvelle-Zélande. Cette ferme était constituée de dix filières parallèles. La distance entre les filières de 200 m de longueur était 1,6 m et les boudins verticaux étaient espacés de 0,5 m sur la filière et avaient une hauteur de 5,5 m. La densité de cette ferme s'élevait à 1,3 boudin/m<sup>2</sup>.

Selon les données fournies par Bergeron et Gagnon (2003), la densité des fermes mytilicoles québécoises varie de 0,03 boudin/m<sup>2</sup> dans la baie de Cascapédia à 0,08 boudin/m<sup>2</sup> dans la lagune du Havre-aux-Maisons, soit une densité légèrement inférieure ou supérieure à celle de la ferme de Nouvelle-Zélande décrite ci-dessus (Tableau 25).

**Tableau 25. Densité des fermes mytilicoles québécoises.**

Site mytilicole	Densité des fermes (boudins/m <sup>2</sup> )
Baie de Cascapédia	0,03 – 0,04
Havre de Gaspé	0,03 – 0,05
Lagune des IDM	0,07 – 0,08

La canalisation du courant par les filières est un phénomène qui a été observé dans certaines fermes maricoles lorsque le courant ambiant a un faible angle d'incidence par rapport à l'axe des filières (Plew, 2005; Plew *et al.*, 2005). Dans de telles conditions, le courant entre les filières est progressivement dévié et devient parallèle à l'axe des filières. Ce phénomène n'a pas été observé dans les sites dominés par des courants générés par le vent parce que ces derniers ont souvent un angle d'incidence trop prononcé.

Compte tenu de ce qui précède, il ressort que seules les filières en périphérie de la ferme sont susceptibles de subir la traînée extrême exercée par le courant proposé aux Sections 3 à 6. Les filières qui seront modélisées avec les valeurs de courant extrême proposées dans ce rapport seront représentatives des premières filières rencontrées par le courant incident en périphérie des fermes. Par ailleurs, compte tenu de la densité relativement faible des fermes mytilicoles québécoises et dans le but d'ajouter un facteur de sécurité dans l'estimation de la force de traînée extrême, on assumera pour les modélisations que le courant qui exerce une traînée sur ces filières périphériques n'a subi aucun changement de vitesse et de direction par rapport au courant ambiant.

## 7.2. RÉDUCTION DE LA VITESSE DU COURANT PRÈS DU FOND

La force de traînée exercée par le courant peut avoir comme effet de coucher les amarres et la ligne maîtresse des filières vers le fond. Puisque la vitesse du courant diminue en se rapprochant du fond en raison de la friction de l'eau sur le fond, la force de traînée exercée par le courant diminue au fur et à mesure que la filière se rapproche du fond. Or, le logiciel de l'ITO ignore les variations de la vitesse du courant avec la profondeur (Bergeron *et al.*, 2008). La vitesse du courant spécifiée pour une simulation est appliquée jusqu'au fond.

Les vitesses extrêmes proposées dans les Sections 3 à 6 sont pour la colonne d'eau située à plus de 3-5 m du fond. Selon la flottabilité de réserve de la filière et la vitesse du courant, le logiciel peut donc surestimer plus ou moins la force de traînée et l'inclinaison de la filière vers le fond.

## 7.3. CONCLUSION

Les données disponibles pour les sites maricoles du Québec sont insuffisantes pour déterminer avec précision les caractéristiques des courants et des vagues de récurrence de 50 ans. Des valeurs indicatrices ont cependant pu être établies pour les quatre principaux sites maricoles à partir des données fragmentaires disponibles. La marge d'erreur de l'approche utilisée dans la plupart des cas est probablement plus grande que l'écart entre les valeurs extrêmes de récurrence de 20 ans et de 100 ans (Tableau 1).

Pour obtenir des valeurs plus fiables que celles présentées dans ce rapport, des enregistrements d'une durée d'au moins un an réalisés à la périphérie des fermes et à la profondeur des filières sont requis. Ces enregistrements devraient être l'objet d'une analyse harmonique pour séparer les courants de marée des courants résiduels, déterminer l'ellipse des courants de la marée de vives-eaux moyenne et déterminer l'ellipse des courants résiduels de récurrence de 50 ans selon la méthode de Pugh (1982) ou de Robinson et Tawn (1997). Des enregistrements moins longs ne seront pas utiles s'ils ne coïncident pas avec au moins une très forte tempête. En effet, les tempêtes génèrent probablement des courants plus intenses que les courants de marée dans tous les sites maricoles.

Les caractéristiques du courant et des vagues recommandées dans ce rapport pour la modélisation des filières en conditions extrêmes sont approximatives. De plus, les valeurs proposées pour le courant ne tiennent pas compte du fait que certaines composantes de la filière peuvent se retrouver très près du fond ou sur le fond sous l'effet du courant et que la vitesse du courant sur ces composantes est alors moins élevée que celle modélisée par le logiciel de simulation. L'interprétation des résultats obtenus devra tenir compte de cet effet et de l'imprécision des valeurs.

## 8. RÉFÉRENCES

- Bergeron, P. et M. Gagnon. 2003. Description, analyse et modélisation des filières flottantes utilisées pour l'élevage des mollusques au Québec. Rapport de Biorex inc. au Regroupement des mariculteurs du Québec. xvi + 367 p.
- Bergeron, P., M. Gagnon, W. Raman-Nair et G. Janes. 2008. Modélisation hydrodynamique des filières maricoles du Québec : description du logiciel et simulation des filières. Rapport de Biorex inc. à la Société de développement de l'industrie maricole (SODIM). vi + 194 p.
- Bergeron, P., M. Fréchette, L. Pagé, Y. Lavergne et G. Walsh. 1990. Sédimentation et dispersion des déblais de dragage en mer et effets sur la moule bleue en élevage dans la baie des Chaleurs. Rapp. tech. can. sci. halieut. aquat. 1746: 59 p.
- Blackford, B.L. 1978. Wind-driven inertial currents in the Magdalen Shallows, Gulf of St. Lawrence. J. Phys. Oceanogr. 8: 653-664.
- Bonardelli, J.C., J.H. Himmelman et K. Drinkwater. 1993. Current variability and upwelling along the north shore of Baie des Chaleurs. Atmosphere-Ocean 31: 541-565.
- Boyd, A.J. et K.G. Heasman. 1998. Shellfish mariculture in the Benguela system: water flow patterns within a mussel farm in Saldanha Bay, South Africa. J. Shellfish Res. 17:25-32.
- Carrière, B. 1973. A physical oceanographic study of Havre and Baie de Gaspé. Thèse de maîtrise, Université Dalhousie. 78 p.
- Centre aquacole marin de Grande-Rivière (CAMGR). 2005. Enregistrements obtenus en 2004 et 2005 avec le courantomètre Doppler DMC-12 mouillé dans la baie de Cascapédia et le havre de Gaspé et fournis par Benoît Thomas du CAMGR.
- Chamberlain, J., A.M. Weise, M. Dowd et J. Grant. 2006. Modelling approaches to assess the potential effects of shellfish aquaculture on the marine environment. SCCS Doc. Rech. 2006/032: 50 p.
- Cliche, G. et M. Giguère. 1997. Captage de pétoncle en milieu naturel aux Îles-de-la-Madeleine. Conférence présentée lors de la 5<sup>e</sup> Réunion de transfert technologique du programme REPERE. 6 et 7 mars 1996. Îles-de-la-Madeleine, Québec, Canada.
- Cliche, G. et M. Giguère. 1998. Captage de pétoncle en milieu naturel aux Îles-de-la-Madeleine. Conférence présentée lors de la 6<sup>e</sup> Réunion de transfert technologique du programme REPERE. 12 et 13 mars 1997. Îles-de-la-Madeleine, Québec, Canada.
- Cliche, G., M. Giguère et S. Vigneau. 1994. Dispersal and mortality of sea scallops, *Placopecten magellanicus*, seeded on the sea bottom off Îles-de-la-Madeleine. J. Shellfish Res. 13: 565-570.
- Environnement Canada. 2005. Normales et moyennes climatiques au Canada 1971-2000. [http://www.climat.meteo.ec.gc.ca/climate\\_normals/index\\_f.html](http://www.climat.meteo.ec.gc.ca/climate_normals/index_f.html)
- Environnement Canada. 2006. Atlas canadien d'énergie éolienne. <http://www.atlaseolien.ca/fr/index.php>
- Fréchette, M., D. A. Booth, B. Myrand et H. Bérard. 1991. Variability and transport of organic seston near a mussel aquaculture site. ICES Mar. Sci. Symp. 192 :24-32.
- Gagnon, M. et P. Bergeron. 2008. Caractéristiques hydrodynamiques de certaines composantes des filières maricoles utilisées au Québec. Rapport de Biorex inc. à la Société de développement de l'industrie maricole (SODIM). iii + 33 p.
- Gagnon, M., P. Fradette et P. Béland. 1984. Suivi d'une expérience d'élevage de homards (*Homarus americanus*) de taille commerciale en milieu lagunaire aux Îles-de-la-Madeleine, Québec, en 1982. Rapp. tech. can. sci. halieut. aquat. 1286:94 p.

- Gan, J., R. G. Ingram, R. J. Greatbatch et P. Chen. 1995. Upper ocean modeling in a coastal bay. *J. Geophys. Res.* 100: 15 997-15 998.
- Gan, J., R. G. Ingram et R.J. Greatbatch. 1996. Sensitivity study of an upper ocean model in a coastal bay. *J. Mar. Syst.* 7: 203-219.
- Gan, J., R. G. Ingram, R. J. Greatbatch et T. van der Baaren. 2004. Variability of circulation induced by the separation of Gaspe Current in Baie des Chaleurs Canada: observational studies. *Est. Coast. Shelf Sci.* 61(3) : 393-402.
- Gibbs, M.M., M.R. James, S.E. Pickmere, P.H. Woods, B.S. Shakespeare, R.W. Hickman et J. Illingworth. 1991. Hydrodynamic and water column properties at six stations associated with mussel farming in Pelorus Sound, 1984-1985. *N. Z. J. Mar. Freshwater Res.* 25 : 239-254.
- Giguère, M., G. Cliche et S. Brulotte. 1995. Synthèse des travaux réalisés entre 1986 et 1994 sur le captage du naissain de pétoncles aux Îles-de-la-Madeleine. *Rapp. tech. can. sci. halieut. aquat.* 2061:71 p.
- Gregory, D. N. 2004. Inventaire des données océaniques (ODI): une base de données sur les séries chronologiques de données sur les courants océaniques, la température et la salinité pour l'Atlantique Nord-Ouest. Secrétariat canadien de consultation scientifique, *Doc. Rech.* 2004/97, 12 p.
- Gregory, D. N., O.C. Nadeau et D. Lefaivre. 1989. Current statistics of the Gulf of St. Lawrence and Estuary. *Can. Data Rep. Hydrogr. Ocean Sci.* 120: 178 p.
- Griffiths, C. R. 1996. Extreme residual current speeds upon the UK continental shelf. *Health and Safety Executive. OTH 1994/437:* 45 p.
- Han, G., J. Loder et P. C. Smith. 1999. Seasonal-mean hydrography and circulation in the Gulf of St. Lawrence and on the Eastern Scotian and Southern Newfoundland Shelves. *J. Phys. Oceanogr.* 29:1279-1301.
- Health & Safety Executive (HSE). 2001. Offshore Technology Report: Environmental considerations. *OTO 2001/010:* 72 p.
- ISO. 2003. Petroleum and natural gas industries. Specific requirements for offshore structures. Part 1: Metocean design and operating considerations. *ISO TC 67/SC 7:* 178 p.
- Koutitonsky, V. G. 2001. Sélection d'un site pour la mariculture d'omble de fontaine dans la baie de Gaspé : réfraction et vitesse orbitale des houles. *ISMER, Rapp. Rech. LHE-01-2,* 84 p.
- Koutitonsky, V.G. 2002. Modélisation numérique des courants, des vagues et du transport des sédiments à l'entrée de la lagune de Havre-aux-Maisons. Rapport sectoriel déposé dans le cadre de l'étude d'impact sur l'environnement du projet de reconstruction du pont et de la route 199 reliant Havre-aux-Maisons et Fatima aux Îles-de-la-Madeleine. *ISMER,* 142 p.
- Koutitonsky, V. G., N. Navarro et D. Booth. 2002. Descriptive physical oceanography of Great-Entry Lagoon, Gulf of St. Lawrence. *Est. Coast. Shelf Sci.* 54: 833-847.
- Lavoie, D. 1997. Réponse hydrodynamique de la baie des Chaleurs au passage d'une forte tempête. Thèse de maîtrise, Université du Québec à Rimouski, 170 p.
- MacLaren Plansearch Ltd. 1991. Wind and wave climate atlas. *Transports Canada, Mars 1991.*
- Manson, G. K., D. L. Forbes et G. S. Parkes. 2002a. Coastal impacts of climate change and sea-level rise on Prince Edward Island. Supporting Document 3. Wave climatology. *Geol. Surv. Can, Open File 4261,* 34 p.

- Manson, G. K., L. A. Ketch et G. S. Parkes. 2002b. Coastal impacts of climate change and sea-level rise on Prince Edward Island. Supporting Document 3. Wind climatology. Geol. Surv. Can, Open File 4261, 108 p.
- Ministère des Pêches et des Océans du Canada (MPO). 2005. Tables des marées et courants de marée 2005. Volume 2. Golfe du Saint-Laurent. 90 p.
- Ministère des Transports du Québec (MTQ). 2001. Étude d'impact sur l'environnement : reconstruction d'un mur le long de la route 132 municipalité de Maria, baie de Caspédia. Annexe 8. Étude hydraulique. 24 p.
- Nav Canada. 2002. The weather of Atlantic Canada and Eastern Quebec. Graphic area forecast 34. Airport climatologies, 185 p.
- Norwegian Technology Standards Institution (NORSOK). 1999. NORSOK Standard: Actions and effects. Norwegian Technology Standards Institution, 81 p.
- Oceanweather inc. 2005. AES40 North Atlantic wave reanalysis. Extremal analysis. <http://www.oceanweather.net/AES40/exanalysis.html>
- Pettigrew, B., D. A. Booth et R. Pigeon. 1991. Oceanographic observations in Havre de Gaspé during the Summer 1990. Can. Data Rep. Hydrogr. Ocean Sc. 100: 94 p.
- Pilditch, C.A, J. Grant et K.R. Bryan. 2001. Seston supply to sea scallops (*Placopecten magellanicus*) in suspended culture. J. can. sci. halieut. aquat. 58: 241-253.
- Plew, D. R. 2005. The hydrodynamic effects of ling-line mussel farms. Thèse de Doctorat. Université de Canterbury, Nouvelle-Zélande, 330 p.
- Plew, D. R., G. L. Stevens, R. H. Spigel et N. D. Hartstein. 2005. Hydrodynamic implications of large offshore mussel farms. J. Oceanic Engineering 30: 95-106.
- Plew, D. R., H. Spigel, G. L. Stevens, R.I. Nokes et M.J. Davidson. 2006. Stratified flow interactions with a suspended canopy. Environ. Fluid Mech. 6: 519-539.
- Pugh, D. T. 1982. Estimating extreme currents by combining tidal and surge probabilities. Ocean Eng. 9: 361-372.
- Robinson, M.E. et J.A. Tawn. 1997. Statistics for extreme sea currents. Applied Statistics 46: 183-205.
- Saucier, F. J., F. Roy, D. Gilbert, P. Pellerin et H. Ritchie. 2003. Modeling the formation and circulation processes of water masses and sea ice in the Gulf of St. Lawrence, Canada. J. Geophys. Res. 108: 3269.
- SGDO. 2005. Système de gestion des données océanographiques de l'Observatoire du Saint-Laurent.
- Strohmeier, T., J. Aure, A. Duinker, T. Castberg, A. Svardai et Ø. Strand. 2005. Flow reduction, seston depletion, meat content and distribution of diarrhetic shellfish toxins in a long-line blue mussel (*Mytilus edulis*) farm. J. Shellfish. Res. 24: 15-23.
- Swail, V.R., V.J. Cardone, M. Ferguson, D.J. Gummer, E.L. Harris, E.A. Orelup et A.T. Cox. 2006. The MSC50 wind and wave reanalysis. 9<sup>th</sup> International Workshop on Wave Hindcasting and Forecasting, Victoria, B.C., September 24-29, 2006.
- Tita, G., J.-F. Crémer, B. Long et G. Desrosiers. 2004. Caractérisation environnementale d'un site mytilicole expérimental dans la baie de Plaisance, Îles-de-la-Madeleine (Québec). Rapp. tech. can. sci. halieut. aquat. 2559: 17 p.
- U.S. Army Corps of Engineers (USACE). 2002. Coastal engineering manual: Part 2. Pagination multiple.