



**Ifremer**

**DEPARTEMENT  
DYNAMIQUES DE L'ENVIRONNEMENT CÔTIER**  
Service DYNECO/PHYSED

P. LAZURE  
M. LUNVEN  
J. RODRIGUEZ

....  
DYNECO/PHYSED N° 2011-01

# Etude de l'hydrodynamique de la Baie de Miquelon

## Résumé

Les mesures hydrologie en 2 points fixes et lors de campagnes dédiées ont permis de décrire les principales caractéristiques des températures et salinités dans la rade de Miquelon :

- La colonne d'eau est stratifiée en température de fin mai à début novembre. La différence de température entre la surface et le fond atteint environ 12°C à la fin du mois d'août (15°C en surface et 3°C au fond en moyenne).
- Les salinités sont moins variables saisonnièrement et on note une différence assez constante d'environ 1psu entre les eaux de surface moins salées et les eaux de fond.
- Les températures de fond sont marquées par une variabilité diurne importante. La température de fond peut varier de 12°C dans la journée. La période principale de ces variations est celle de l'onde de marée O1, soit 26h.

Des mesures de courants ont été effectuées en septembre 2009 pour caractériser à la fois la situation moyenne et la variabilité à haute fréquence. Les principales conclusions sont les suivantes :

- Les courants sont très variables aussi bien dans le temps que sur la verticale. Ils ne dépassent que rarement 50 cm/s.
- Bien que les élévations de la marée soient clairement semi diurnes (2 marées hautes et basses par jour) les courants montrent une variabilité temporelle beaucoup plus complexe. Le spectre de variabilité s'étend également aux ondes diurnes (période d'environ 24h).
- On a pu mesurer un courant moyen durant le déploiement du mouillage d'environ 15 cm/s vers le Nord. Bien que ce courant soit en accord avec la littérature scientifique (très pauvre sur la région), il est impossible de conclure actuellement que ce courant est permanent et qu'il ne comporte pas de variabilité saisonnière ou associée à des événements météorologiques.
- On propose un mécanisme de génération des oscillations diurnes des températures qui nécessite pour exister, à la fois une stratification thermique continue, une composante diurne du courant cote-large et un fond en forte pente. Ce mécanisme peut expliquer une part de la variabilité des températures au fond mais n'explique pas toutes les observations. De plus amples investigations sont nécessaires.

Une modélisation numérique a été entreprise au début de l'étude pour simuler les courants autour de l'archipel de Saint-Pierre et Miquelon et estimer les taux de rétention des larves émises par les coquilles. La confrontation des simulations avec la réalité des courants mesurés a montré les limites de cette approche et impose de prendre ces résultats avec les plus grandes précautions. Néanmoins on peut en tirer plusieurs enseignements :

- La non reproduction par le modèle du courant moyen observé nous indique que ce courant résulte de processus non locaux et qu'il est sous l'influence de la circulation à l'échelle régionale qui est pour le moment mal connue.
- La variabilité spatiale des courants est fortement contrainte par la bathymétrie, bien prise en compte dans les modèles. Il est donc probable que les zones de courant plus intenses révélées par le modèle soit réalistes.

Cette étude est une première contribution à l'étude de l'hydrodynamique de l'archipel de Miquelon. Dans l'état actuel de nos connaissances, il semble illusoire de penser que la modélisation permettra à court et moyen terme de simuler de manière fiable la dispersion des larves de coquilles ; trop d'inconnues sur les conditions hydrodynamiques locales et

régionales demeurent. Il semble nécessaire de compléter les jeux de données à la lumière de ces premières conclusions. Quelques propositions de mesures nouvelles peuvent être émises :

- Faire des mesures de courant sur plusieurs mois et prioritairement en été durant la période de ponte des coquilles. Ces mesures permettront de vérifier le caractère permanent ou non du courant moyen mis au jour durant l'automne 2009.

- Elargir la zone des mesures d'hydrologie notamment en disposant des mouillages équipés de sondes de température et salinité plus au nord (au large du Cap du Nid à l'Aigle) et au sud pour évaluer le variabilité de la stratification et la propagation possible d'onde de plateau le long de la façade Est de Miquelon.

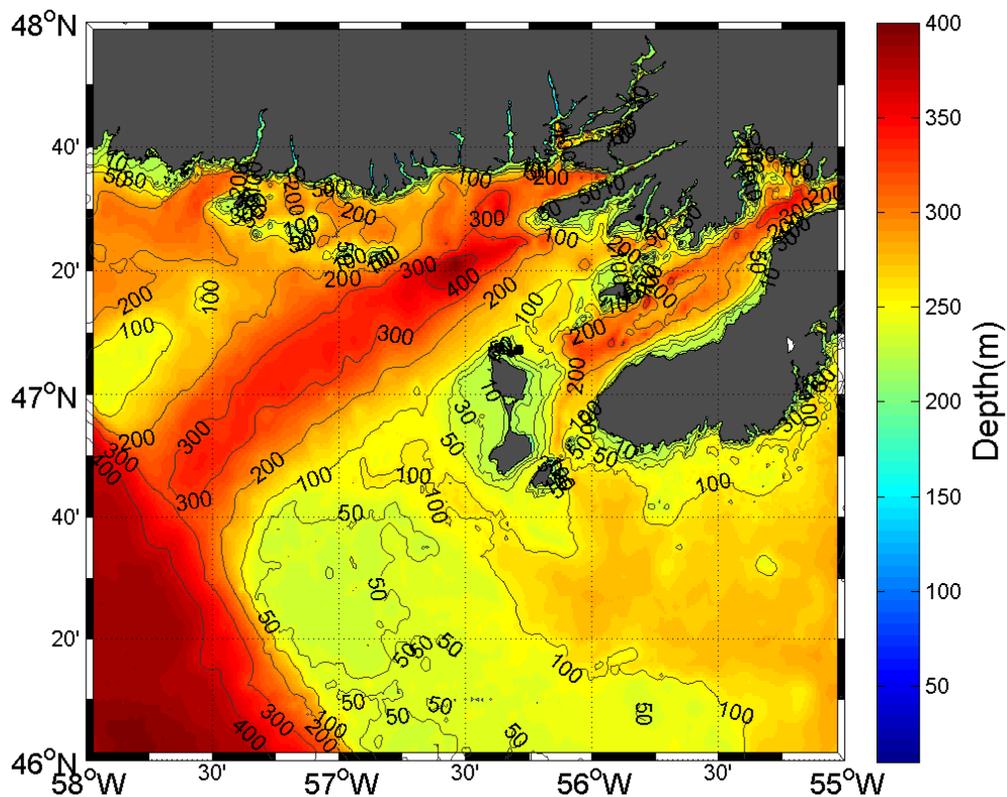
# Sommaire

<b>1. Etat des connaissances</b>	<b>5</b>
<b>1.1. La Zone</b>	<b>5</b>
<b>1.2. La bibliographie</b>	<b>6</b>
1.2.1. La marée	6
1.2.2. Les courants moyens	7
1.2.3. L'Hydrologie	8
<b>1.3. La modélisation hydrodynamique</b>	<b>9</b>
1.3.1. Résultats	9
1.3.2. Limitations de la modélisation	10
<b>2. Plan d'expérimentation</b>	<b>11</b>
<b>2.1. Mesures de l'hydrologie</b>	<b>11</b>
2.1.1. Variabilité spatiale durant l'été	11
2.1.2. Mesures au point fixe	11
2.1.3. Mesures de courant et campagne de 2009	12
<b>3. Résultats</b>	<b>14</b>
<b>3.1. Hydrologie</b>	<b>14</b>
3.1.1. Profils moyens de température et de salinité mensuels	14
3.1.2. Evolution des températures aux points fixes Pfi30 et Pfi60	15
3.1.3. Evolution des températures sur l'ensemble de la colonne d'eau	17
<b>3.2. Courantologie</b>	<b>18</b>
3.2.1. Les courants moyens sur la verticale	18
3.2.2. Courants résiduels	19
3.2.3. Variabilité des courants selon la profondeur	19
3.2.4. Analyses spectrales	20
<b>4. Discussion</b>	<b>21</b>
<b>4.1. Variabilité à haute fréquence de la température</b>	<b>21</b>
<b>4.2. Variabilité spatiale de l'hydrologie</b>	<b>23</b>
<b>4.3. Cohérence temporelle entre les différents points de mesure</b>	<b>24</b>
<b>5. Conclusions et perspectives</b>	<b>27</b>
<b>6. Bibliographie</b>	<b>29</b>

# 1. Etat des connaissances

## 1.1. La Zone

L'archipel de Saint-Pierre et Miquelon se trouve à l'extrémité Nord Ouest du grand Banc de Terre Neuve (fig. 1). Les fonds autour de l'archipel sont très variables et les profondeurs augmentent assez rapidement en s'éloignant de la côte.



**Figure 1 : Bathymétrie autour de l'archipel de Saint Pierre et Miquelon**

Les profondeurs dans la rade de Miquelon (fig. 2) s'accroissent en moyenne d'environ 30 m par km. Au nord de Miquelon, les pentes du fond sont encore fortes. Aux points de mesures fixes (Pfi30 et Pfi60) les pentes du fond sont respectivement de 2 % et 3,5 %.

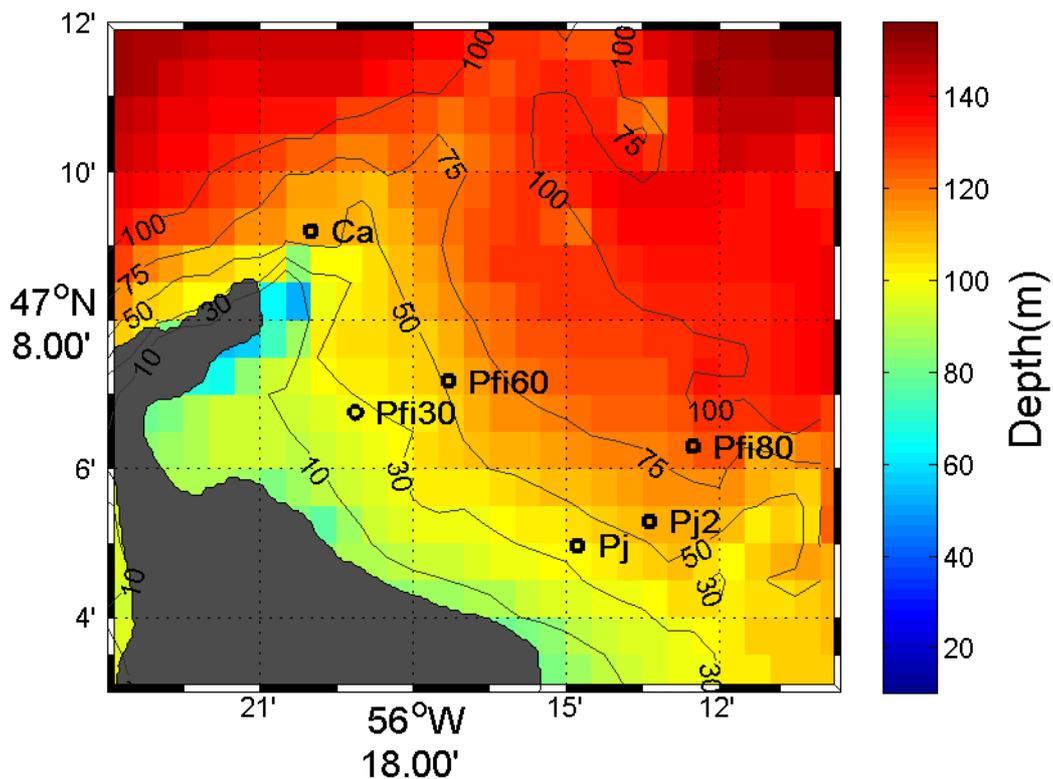


Figure 2 : Bathymétrie de la rade de Miquelon et position des points de mesure

## 1.2. La bibliographie

L'archipel de Saint-Pierre et Miquelon n'a pas encore fait l'objet d'études spécifiques de l'hydrodynamique dont les résultats auraient été publiés dans la littérature scientifique accessible. De ce fait, les informations concernant les conditions hydrodynamiques sont peu nombreuses et très parcellaires.

### 1.2.1. La marée

La marée est principalement semi diurne (2 marées hautes et basses par jour). Les constantes harmoniques fournies par le SHOM nous indiquent que l'onde principale semi diurne M2 (période 12,42 h) a une amplitude de 60 cm, ce qui fait un marnage moyen d'environ 1,2 m. Les ondes diurnes ont une amplitude relativement faible, l'amplitude de l'onde O1 est de 7,3 cm et l'onde K1 ( période 23,93 h) a une amplitude de 6,1 cm. Le rapport  $R=(A_{o1}+A_{k1})/(A_{m2}+A_{s2})$  qui définit le rapport des ondes principales diurnes sur les ondes principales semi diurnes est de 0,17, ce qui est caractéristique d'une marée semi diurne. Une étude canadienne (Dupont et al, 2002) a décrit par modèle numérique les caractéristiques des principales ondes de marée dans l'atlantique Nord Est.

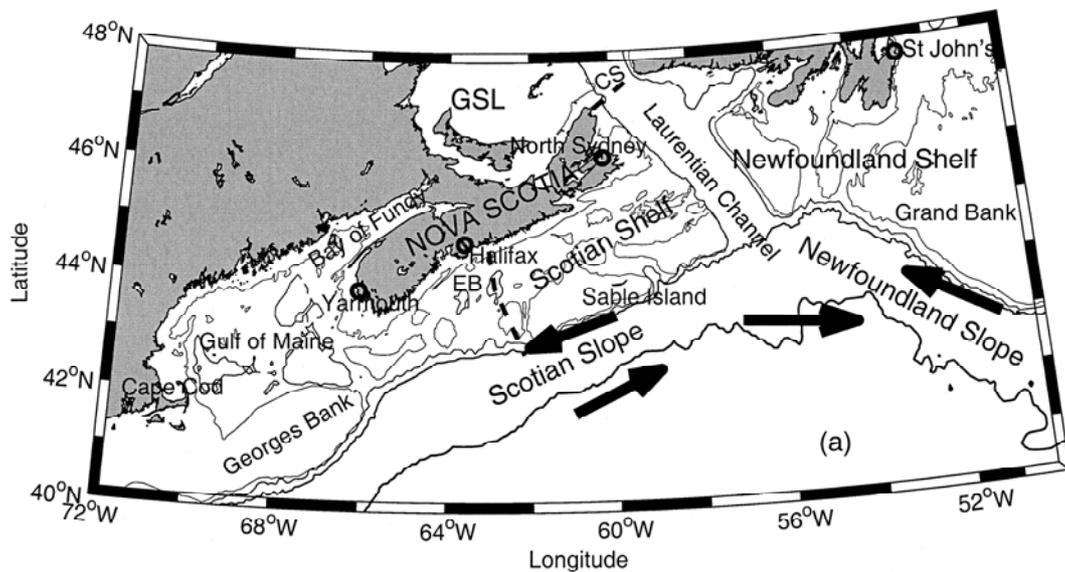
A la suite de cette étude, un logiciel dénommé Webtide (référence fournie dans la bibliographie) permettant de calculer les variations du niveau marin et les courants associés a été développé, et rendu disponible sur internet. Ce logiciel permet de calculer les courants et les niveaux autour de l'archipel pour n'importe quelle date. Il faut toutefois signaler que ce logiciel n'a pas fait l'objet d'une validation spécifique autour de l'archipel.

Quelques études théoriques (Xu et Loder, 2004, Wright et XU, 2004) se sont attachées à décrire les caractéristiques des ondes diurnes sur le grand banc de Terre Neuve. Il apparaît qu'en certain secteur du grand Banc, donc l'extrémité ouest et la région de l'archipel de Saint-Pierre, les ondes diurnes sont amplifiées et ont des caractéristiques très variables liées principalement à la forme des isobathes. Quelques mesures de courants effectuées à proximité de l'archipel montrent une amplification de la composante diurne dans la région.

### 1.2.2. Les courants moyens

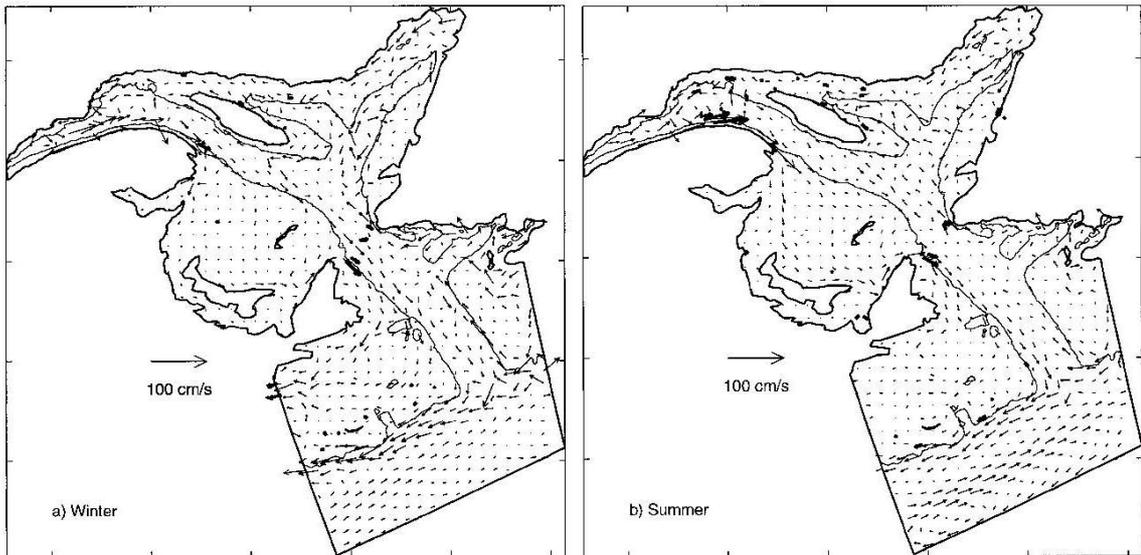
Des informations sur les courants résiduels (à des échelles de temps supérieures à la journée) et les caractéristiques des masses d'eau autour de l'archipel peuvent être trouvées dans des études régionales du Grand Banc de Terre Neuve (Han et al, 2008), de l'estuaire du Saint Laurent (Han et al, 1999) ou du plateau de Nouvelle Ecosse (Han et Loder, 2003).

La circulation générale au large de l'archipel est très inféodée au relief sous-marin. Han et al (2002, 2008) ont proposé des carte de circulation au large (fig. 3)



**Figure 3 : Circulation générale au Sud de l'archipel. Han et al (1999)**

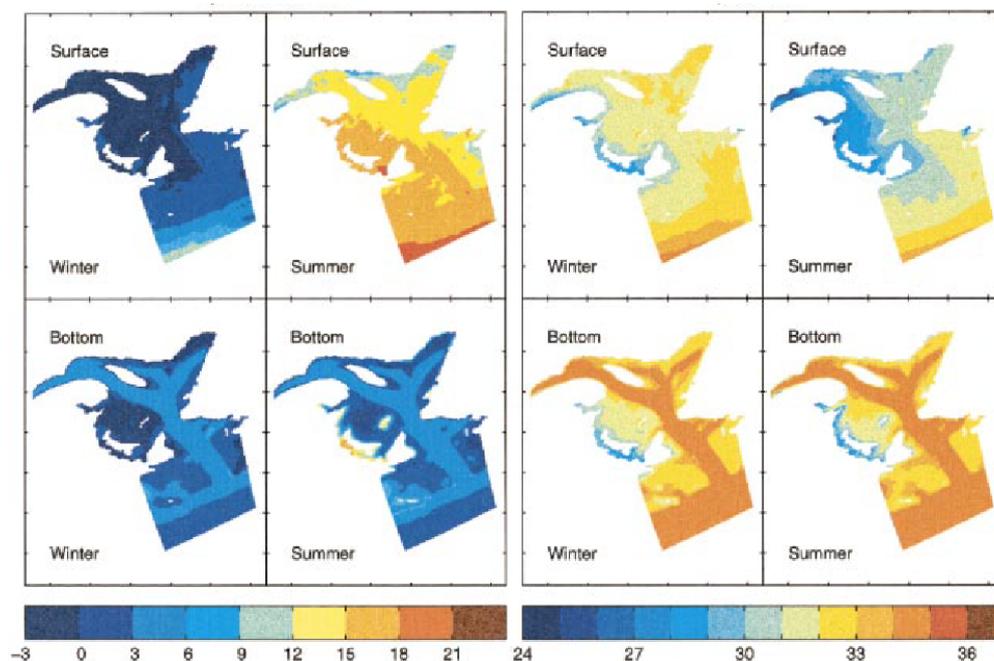
Sur la bordure du plateau du grand Banc au Nord Est jusqu'au Georges Bank à l'ouest, un courant s'écoule vers le Sud puis l'ouest. Plus au large, le courant s'inverse, il s'agit du Gulf Stream à l'ouest puis de courant nord atlantique à l'est.



**Figure 4 : Circulation saisonnière moyenne. Han et al (1999)**

A proximité des côtes de l'archipel, il n'existe que très peu d'informations. Les études de Han et al (1999) sur l'estuaire du Saint Laurent et celle de Han et al (2008) sur le grand Banc sont toutes les deux basées sur la modélisation des courants. Dans chacune d'elles, l'archipel se trouvait à proximité des limites des modèles et la validité des courants calculés peut être mise en question. Néanmoins, malgré leurs limitations, ces deux études font apparaître que les courants moyens autour de l'archipel seraient plutôt orientés vers le Nord avec des vitesses de l'ordre de la dizaine de cm/s (fig. 4). Les mesures entreprises durant 10 jours en septembre 2009 confirmeront ces tendances.

### 1.2.3. L'Hydrologie



**Figure 5 : Climatologie des températures et salinités en été et hiver en surface et au fond. Extrait de Han et al (1999)**

En hiver (fig. 5), les eaux autour de l'archipel ont des températures comprises entre 0 et 3°C en surface comme près du fond. En été, le réchauffement en surface induit des températures comprises entre 12 et 15°C en surface alors que la température de fond demeure comprise entre 0 et 3°C. La structure en salinité semble moins marquée par le cycle saisonnier et on note des salinités légèrement plus fortes au fond (32 psu) qu'en surface (31 psu) tout au long de l'année.

### **1.3. La modélisation hydrodynamique**

Une étude de la courantologie par modèle numérique à été réalisée par la société Safège en 2006, avant que l'on dispose des premières mesures. On en rappellera ici les principaux résultats et ses limitations.

Un modèle bidimensionnel horizontal a été utilisé pour étudier les évolutions spatio temporelles des courants sous les effets de la marée et du vent. Ce modèle calcule, selon des mailles régulières, les variations du niveau de la mer et les courants moyens de la surface au fond. Les données nécessaires sont la bathymétrie et les conditions aux limites ouvertes. Aux limites ouvertes du modèle, seules les variations du niveau marin liées à la marée ont été prises en compte. La circulation régionale a été négligée faute de données.

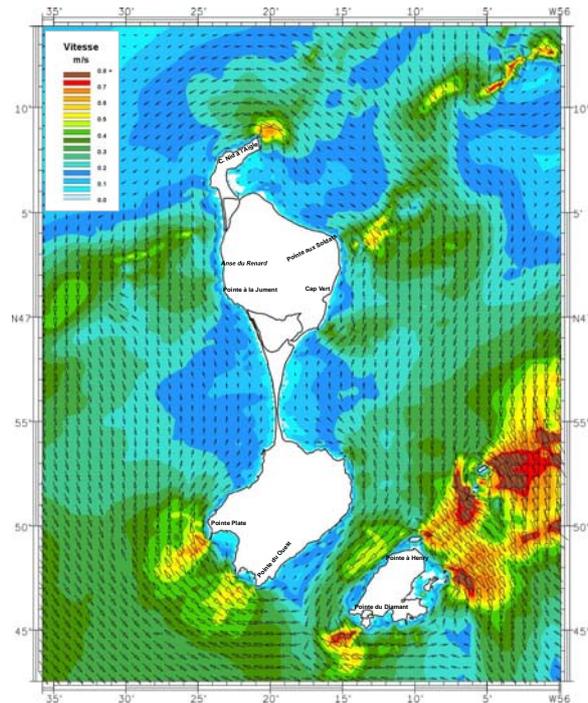
Deux modèles ont été développés : un modèle de l'ensemble de l'archipel selon une maille de 100 m et un modèle de détail de la partie Nord de Miquelon selon une maille de 30 m.

La capacité à bien reproduire la marée a été validée par la comparaison entre les niveaux prédits par l'annuaire de marée du SHOM et ceux calculés par le modèle. La bonne concordance autorise à accorder une confiance raisonnable dans les courants de marée calculés malgré l'absence de mesures.

L'influence du vent a été simulée en considérant deux situations moyennes saisonnières, un vent de SW représentatif de la situation estivale et un vent de WNW représentatif des conditions hivernales.

#### **1.3.1. Résultats**

Les courants de marée montrent une structure spatiale complexe due aux effets de caps et de bathymétrie. Les courants s'inversent toutes les 6 heures sur la majeure partie de l'archipel. La renverse se situe environ 3 heures après les pleines et basses mer. Des renverses plus précoces sont observables près de certains caps. Le modèle a montré que les courants de marée peuvent atteindre des valeurs proches de 2 nœuds en vives eaux autour de Saint-Pierre (fig. 6). Des zones de courants forts ont également été identifiées dans le SW de Langlade, au Nord de Miquelon et à l'Ouest de la pointe aux Soldats.



**Figure 6 : Vitesse maximum des courants instantanés de marée (Arda, 2006)**

La moyenne des courants pendant un cycle de marée représente les tendances à long terme induites par la marée. Ces courants, dits courants résiduels, peuvent être forts principalement dans la partie Est de l'archipel près de Saint-Pierre. On note également des courants forts dans le NW de Miquelon, indiquant un renouvellement important des masses d'eau. Les contrastes sont forts : dans la rade de Miquelon, un tourbillon indique une rétention possible des masses d'eau, une autre zone de rétention est observée au sud de la pointe des Soldats, à l'Est de Langlade.

La prise en compte du vent ne modifie pas significativement les champs de courants instantanés durant un cycle de marée. Les renverses se situent toujours à la même heure et les zones de courants forts sont identiques aux résultats des simulations sans vent. Par contre, les champs de courants résiduels sont modifiés. Alors que sans vent, la tendance générale due à la marée est un courant général dirigé vers le sud, un vent estival inversera cette tendance. Les zones de rétention, principalement contraintes par la forme de la côte et la bathymétrie, restent par contre les mêmes.

### 1.3.2. Limitations de la modélisation

Cette modélisation des courants a été effectuée avant que des données de courants soient disponibles. Elle n'a donc pu être validée dans sa première version. A la lumière des mesures de 2009, il apparaît que le modèle ne reproduit pas le courant moyen observé. Cette discordance peut s'expliquer par la non prise en compte dans la modélisation de la circulation à l'échelle régionale (banc de Terre Neuve et sortie de l'estuaire du Saint Laurent).

D'autre part, même les fortes stratifications observées et les mesures en été suggèrent que la dynamique est tridimensionnelle, qu'elle est complexe et qu'elle ne peut être examinée uniquement à l'échelle locale de la rade de Miquelon.

De ce fait, les résultats de la modélisation ne représentent qu'une partie de la réalité. Il est probable qu'ils sont beaucoup plus fiables en hiver quand les eaux sont à peu près homogènes sur la verticale. Dans ce cas, les zones de fort mélange ou à l'inverse de rétention, mises en lumière par le modèle doivent avoir une réalité.

Par contre, en été, la complexité » de la circulation mesurée ne permet pas d'accorder beaucoup de crédit aux résultats de la modélisation.

## 2. Plan d'expérimentation

### 2.1. Mesures de l'hydrologie

#### 2.1.1. Variabilité spatiale durant l'été

Des mesures de profils verticaux de température et salinité ont été effectués par J. Rodriguez dans la rade de Miquelon et ses environs (fig. 7). Ces profils ont été acquis sur plusieurs jours chaque mois les 26/5-10/6/2008, 16-24/7/2008, 22-24/9/2008.

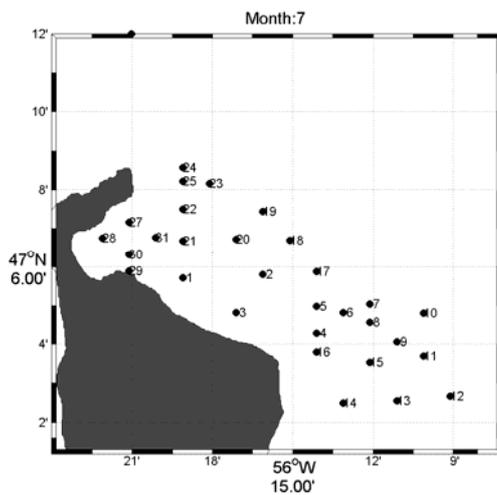


Figure 7. Positions des stations hydrologiques

#### 2.1.2. Mesures au point fixe

Deux points (voir positions sur la fig. 2) fixes ont été instrumentés par J. Rodriguez, l'un par 30 m de fond (Pfi30) et le second à 60 m (Pfi60). En chaque point, une sonde de mesure de température, salinité et pression a été disposée à 5 m au dessus du fond et une seconde à 5 m sous la surface.

Le tableau 1 résume les périodes de déploiement de ces capteurs entre 2007 et 2010.

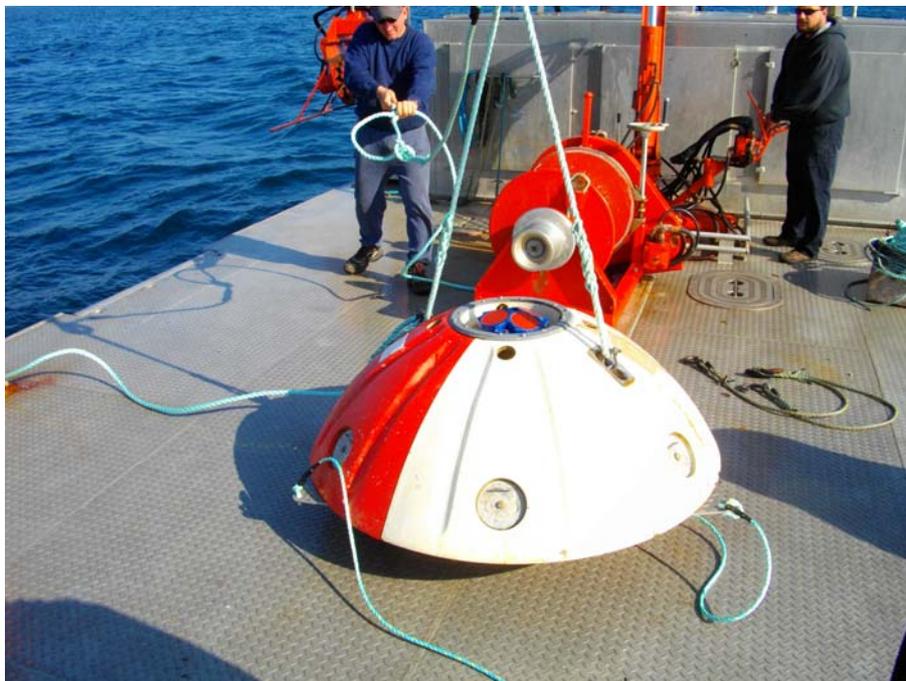
Un point situé dans le Sud Est de la rade (le point Pj et Pj2) a été instrumenté plus récemment. Le tableau 1 résume les positions et les périodes des mesures durant les 4 dernières années.

	2007	2008	2009	2010
<b>Pfi30</b>	09/07-20/08, 13/11-24/01/08	20/05-21/07 18/08-27/10		12/07-29/11
<b>Pfi60</b>		20/05-21/07 18/08-27/10	04/05-08/07	05/07-29/11
<b>ADCP+sondes</b>			4/09-16/09	
<b>Pj et Pj2</b>			4/09-16/09	31/08-6/11

**Table 1 : Date d'acquisitions des mesures d'hydrologie et courantologie**

### 2.1.3. Mesures de courant et campagne de 2009

En septembre 2009, un courantomètre à effet Doppler (ADCP) a été déployé à proximité du point Pfi30. Ce courantomètre RDI, 600khz posé sur le fond dans un dispositif adapté (fig. 8), a mesuré les courants selon des cellules verticales de 1 m à la fréquence d'acquisition de 1 minute. A proximité immédiate de l'ADCP, une ligne comportant une bouée de surface et 4 sondes disposées à 7, 13, 21, 26 m au dessus du fond a permis de décrire l'évolution de l'hydrologie associée à celle de courants. La période d'acquisition des sondes est également de 1 minute. Durant cette campagne, des mesures de sections d'hydrologie ont été réalisées avec un poisson oscillant (fig. 9) muni d'une sonde de température, salinité pression remorqué par le navire « Tommy Evan ». On a ainsi parcouru 2 radiales, l'une orientée approximativement N-S et la seconde côte-large soit une orientation E-W.



**Figure 8 : Dispositif de mouillage courantométrique avant sa mise à l'eau.**



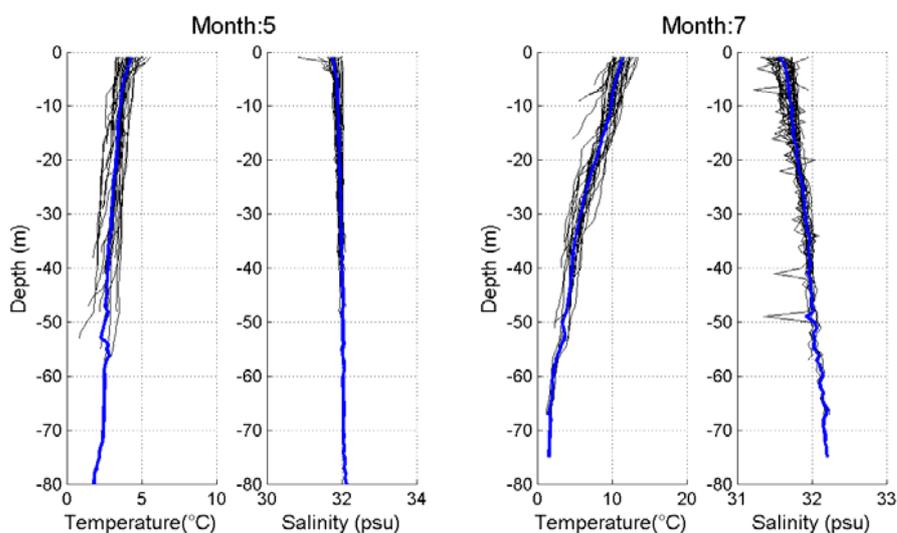
**Figure 9 : Photographie du poisson remorqué sur la plage arrière du « Tommy Evan »**

### 3. Résultats

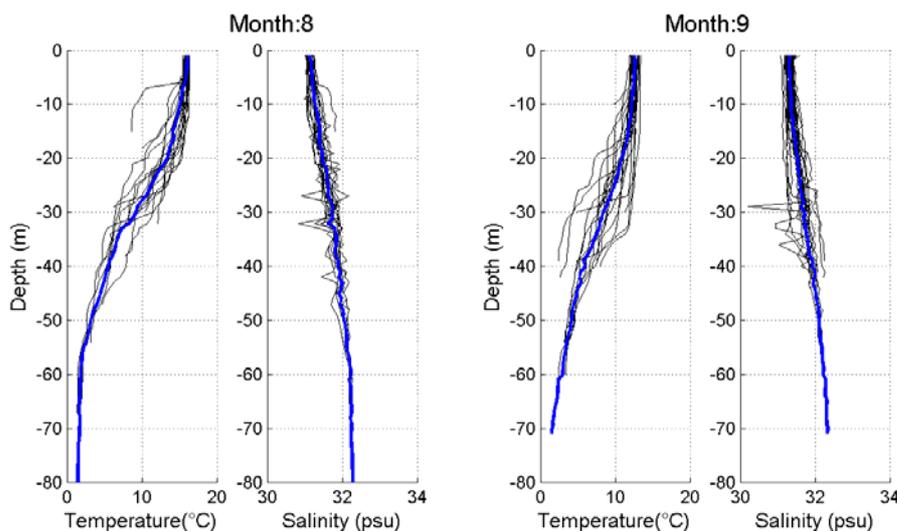
#### 3.1. Hydrologie

##### 3.1.1. Profils moyens de température et de salinité mensuels

Les mesures mensuelles couvrant l'ensemble de la zone n'ont pas permis de réaliser des cartes synoptiques des distributions de température et salinité, compte tenu de la très forte variabilité temporelle observée par ailleurs au point fixe. Néanmoins, la moyenne de l'ensemble des profils permet de fournir une description de l'évolution mensuelle des profils moyens de T et S (fig. 10 et 11).



**Figure 10 : Profils de température et salinité mesurés en mai (gauche) et juillet (droite). Profil moyen en bleu**



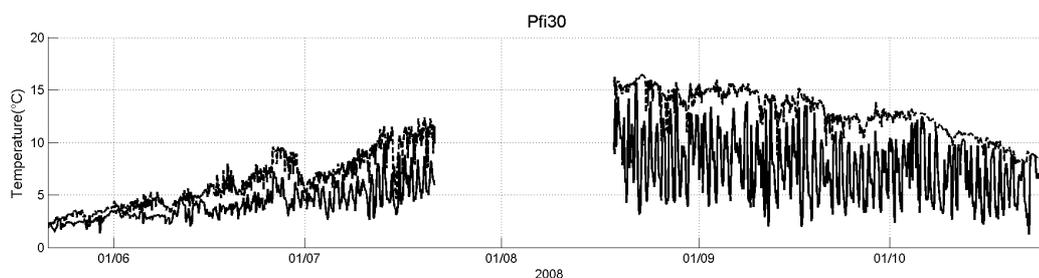
**Figure 11: Profils de température et salinité mesurés en août (gauche) et septembre (droite). Profil moyen en bleu**

Les salinités sont relativement peu variables au cours de l'été. En surface, les eaux sont légèrement moins salées (31,4 psu) qu'au fond (32,2 psu). La croissance de la salinité vers le fond s'effectue de manière linéaire.

Les températures ont un cycle saisonnier beaucoup plus marqué. En mai, la stratification thermique est encore faible et les différences surface fond de l'ordre de 1°C. En juillet, la stratification est beaucoup plus forte, les eaux de surface atteignent 12°C alors qu'elles demeurent à 2°C par 80 m de fond. Les températures maximales en surface sont atteintes au mois d'août. Elles commencent ensuite à décroître en septembre. Par 80 m de fond, la température de fond est à peu près constante du printemps à l'automne.

### 3.1.2. Evolution des températures aux points fixes Pfi30 et Pfi60

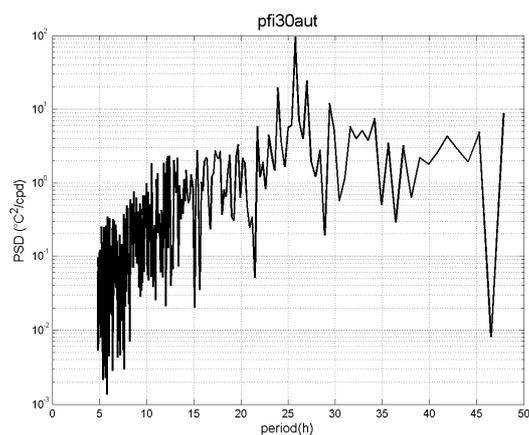
Nous étudierons l'évolution des températures en 2008, car malgré un manque de mesure de fin juillet à fin août, c'est la seule période pour laquelle nous disposons de mesures simultanées aux deux points fixes Pfi30 et Pfi60 (les positions de ces points sont indiquées sur la figure 2).



**Figure 12 : Evolution des températures 5 m sous la surface (courbe supérieure) et à 5 m au dessus du fond (courbe inférieure) au point Pfi30.**

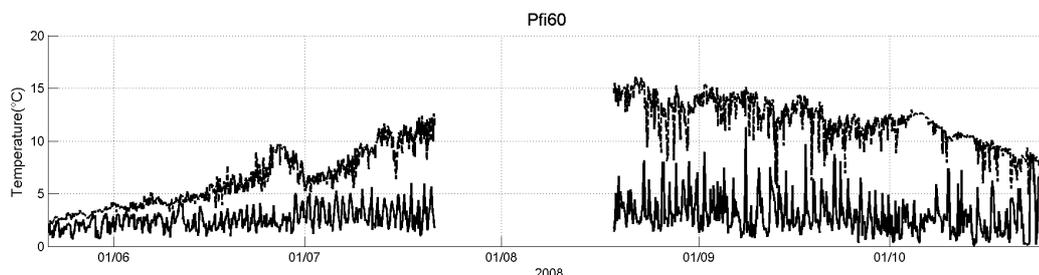
Au point Pfi30 (figure 12), les températures sont homogènes fin mai. Les eaux se réchauffent ensuite en surface pour atteindre 15°C fin août, puis commencent à décroître. Près du fond, la caractéristique principale des températures réside dans les oscillations haute fréquence qui débutent mi-juin et sont maximales entre mi-août et mi-septembre. A cette période, les températures de fond peuvent varier selon les journées de plus de 11°C. A titre d'exemple, la température de fond le 17/09/2008 à 4 h (TU) est de 2°C, elle passe à 13,5°C à 22 h (TU) et chute à nouveau à 2,5°C le 18/09 à 16h30. Les oscillations des températures de fond perdurent jusqu'à la fin de l'enregistrement.

La période principale de ces oscillations apparaît clairement dans l'analyse spectrale des températures. La figure 13 montre le spectre de température calculé pour la seconde partie de l'enregistrement (du 18/08 au 27/10). Un pic est clairement identifiable à une période proche de 26 h. Le spectre calculé pour la première partie de l'enregistrement montre des résultats tout à fait similaires, à savoir une période principale de 26 h.



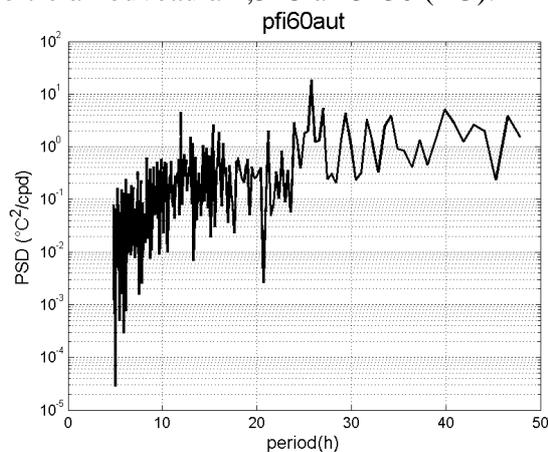
**Figure 13 : Spectre des variations de températures à 5 m au dessus du fond au point Pfi30.**

Les mesures de température au point Pfi 60 montrent des caractéristiques assez similaires (fig. 14)



**Figure 14 : Evolution des températures 5m sous la surface (courbe supérieure) et à 5m au dessus du fond (courbe inférieure) au point pfi60.**

Les oscillations des températures de fond débutent avec la mise en place de la stratification thermique et perdurent jusqu'à la fin de l'enregistrement. L'analyse spectrale (fig. 15) montre que la période principale des oscillations est également de 26 h. A la différence du Pfi30, on peut noter la présence d'un pic secondaire à 12,4 h. L'amplitude des oscillations est légèrement plus faible qu'en Pfi30, le maximum observé atteint tout de même 11°C dans la journée. Le 8/09 à 1h30 (TU) la température est de 1,2°C au fond. Elle atteint 11,2°C à 9h40 pour décroître à nouveau à 1,3°C à 13h30 (TU).

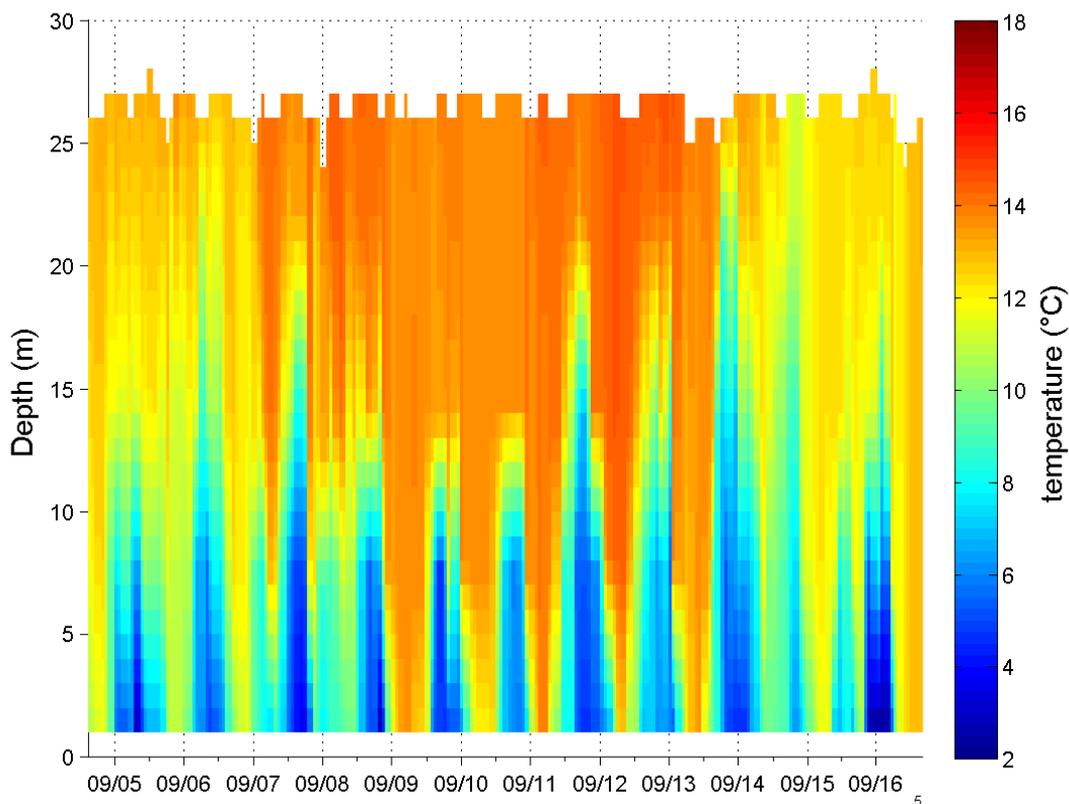


**Figure 15 : Spectre des variations de températures à 5 m au dessus du fond au point Pfi60**

Les oscillations des températures en surface aux 2 points sont beaucoup plus faibles qu'au fond. Néanmoins, quand elles apparaissent, elles sont généralement en phase avec celles du fond. Les phases froides des températures de surface correspondent aux phases froides au fond. On ne note pas par contre de corrélation sur les amplitudes de ces variations. Les très fortes oscillations au fond ne sont pas systématiquement accompagnées d'oscillations fortes en surface.

### 3.1.3. Evolution des températures sur l'ensemble de la colonne d'eau

Les données du mouillage de septembre 2009 sont présentées sur la figure 16. Les données des 4 sondes disposées dans la colonne d'eau et la mesure de la température effectuée par le capteur de température du courantomètre posé au fond ont été interpolées sur la verticale selon un pas de 1 m.



**Figure 16: Evolution temporelle des températures du 5 au 16/09/2009**

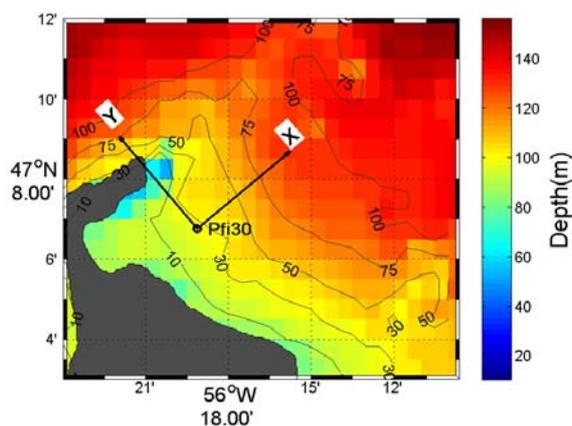
Cette représentation fournit une vision plus complète de la structure en température que les variations en surface et au fond. On peut voir que les phases froides sont en général restreintes dans les 15 mètres au dessus du fond. La période des variations est encore de l'ordre de 26 heures, soit une phase froide par jour qui se décale lentement dans le temps. Les gradients de température dans les 15 premiers mètres sous la surface sont beaucoup plus faibles.

## 3.2. Courantologie

Les courants ont été mesurés selon des couches verticales de 1 m, toutes les minutes. Le premier traitement a consisté à corriger la déclinaison magnétique de  $21^\circ$  exceptionnellement forte dans cette région du monde.

On a ensuite effectué des moyennes horaires puis une rotation du système d'axe en cherchant une rotation qui maximise les cisaillements de courant (ou la variance du courant par rapport à la moyenne surface-fond). Une rotation de  $40^\circ$  a permis d'obtenir des cisaillements de courant maximum dans la direction crossshore autrement dit dans la direction côte large.

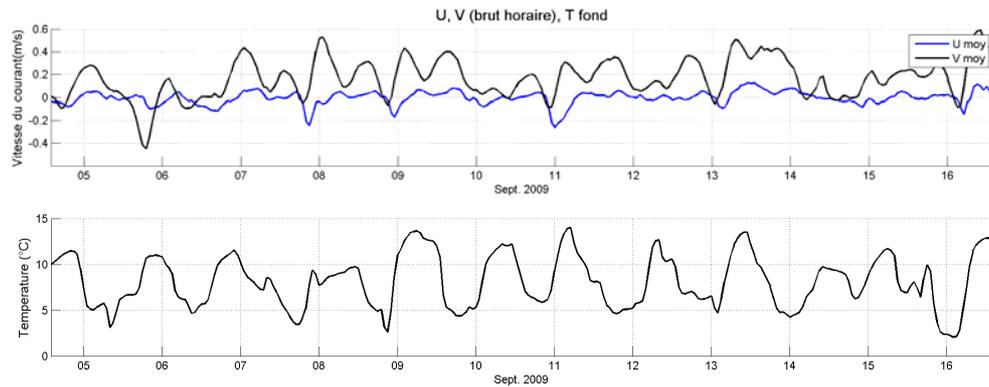
Cette rotation du système d'axe qui n'a été évaluée qu'à partir des mesures de courant s'avère cohérente avec la disposition des isobathes. L'axe X correspond à la direction « crossshore » et l'axe Y à la direction « alongshore ». La figure 17 montre le nouveau système de représentation des courants. Dans la suite du rapport on appellera donc composante U du courant, la composante selon l'axe des X (la composante U est négative quand le courant est orienté vers la côte) et V le courant selon l'axe Y (la composante V est positive quand le courant porte au Nord).



**Figure 17: Représentation du système d'axe utilisé pour l'interprétation des mesures de courants**

### 3.2.1. Les courants moyens sur la verticale

La figure 18 montre l'évolution des courants moyennés entre la surface et le fond et les températures mesurées au fond. Un premier examen nous montre que les courants ne dépassent que très rarement 1 nœud (51 cm/s). La composante V est beaucoup plus forte que la composante U, ce qui indique que les courants longitudinaux sont beaucoup plus forts que la composante côte-large. Les échelles de temps des variations de courants paraissent assez variables, on peut toutefois noter que la composante V est marquée par une variabilité semi diurne qui se traduit par 2 inversions de courants dans la journée. Les températures montrent des caractéristiques très similaires aux observations présentées au point Pfi30 en 2008, à savoir une forte variabilité diurne.



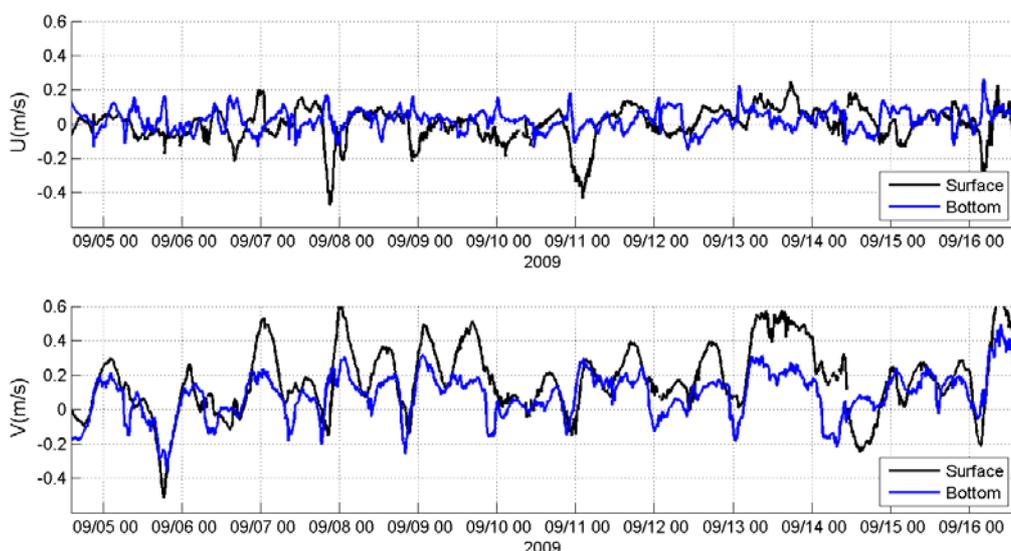
**Figure 18: Evolution des 2 composantes du courant (U en bleu, V en noir) et de la température**

### 3.2.2. Courants résiduels

Le courant V est quasiment tout le temps positif. La moyenne du courant V durant toute la période de l'enregistrement est de 16,1 cm/s. La moyenne des vitesses U est très faible de l'ordre de 0,5 cm/s. Cela indique la présence d'un courant moyen assez fort vers le Nord et de direction cohérente avec les modélisations antérieures de Han et al (1999) et Han et al (2008).

### 3.2.3. Variabilité des courants selon la profondeur

Les courants en surface et au fond sont présentés figure 19. Comme pour les courants moyens sur la verticale, la composante U est toujours plus faible de la composante transversale V. Celle-ci apparaît assez peu variable selon la profondeur et les 2 courbes sont assez proches en permanence, les courants près du fond étant plus faibles compte-tenu du frottement. La composante U se comporte par contre différemment, les courants en surface et au fond sont régulièrement inversés indiquant en cela qu'il n'est pas rare que le courant porte vers la côte en surface et vers le large au fond.



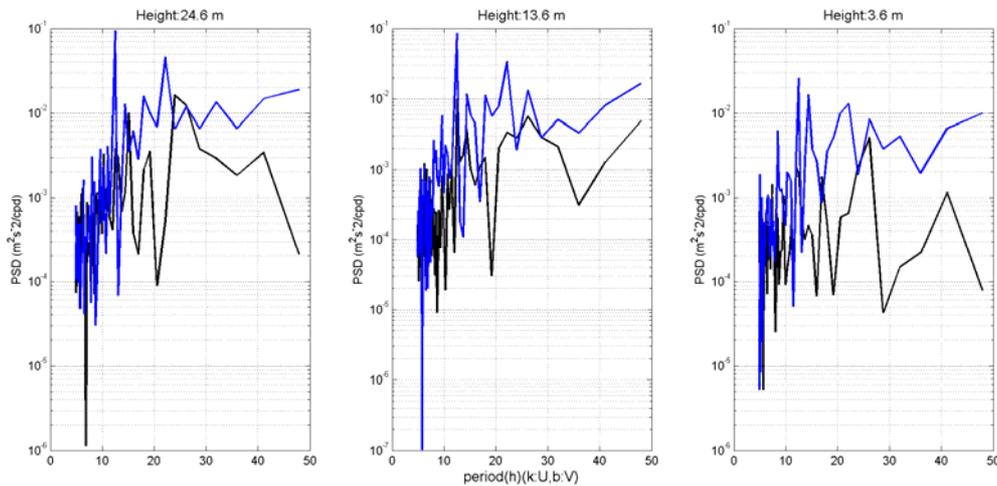
**Figure 19 : Evolution temporelle des 2 composantes du courant en surface et au fond**

### 3.2.4. Analyses spectrales

On a calculé les spectres des températures en surface à mi-profondeur et au fond (fig. 20). La composante V est marquée par un pic à 12,4 h à toutes les profondeurs. Ce pic correspond à l'onde principale de marée M2 qui imprime à cette composante un caractère semi diurne bien marqué. Par ordre d'importance, le second pic est diurne et il est de 22 h. Cette période ne correspond pas à une onde astronomique et elle est donc très difficile à interpréter. On note bien un pic à 26 h qui correspond à la période principale des oscillations de température mais ce pic n'est que le 4<sup>ème</sup> ou 5<sup>ème</sup> par ordre d'importance.

La composante U du courant montre des spectres très différents. La période principale est diurne et de l'ordre de 26 h. A mi profondeur on peut noter une amplification des courants semi diurnes qui rendent le pic à 12,4 h dominant.

En conclusion de l'analyse spectrale on peut donc retenir que la composante transverse du courant (V) est principalement semi-diurne alors que la composante perpendiculaire est principalement diurne.



**Figure 20 : Spectre des vitesses en surface (gauche), mi-profondeur (milieu) et au fond (droite) pour la composante U( noir) et V (bleu)**

## 4. Discussion

### 4.1. Variabilité à haute fréquence de la température

Afin de tenter de comprendre l'origine des variations de température, on se focalise maintenant sur une journée particulière représentative de la série, celle du 9 septembre. La figure 21 présente à la fois l'évolution des températures et celles des courants tous les mètres et toutes les heures. Les courants sont représentés dans le plan X-Y, ce qui signifie qu'une flèche dirigée vers le coin en haut et à droite de la feuille représente un courant dirigé vers le N (compte tenu de la rotation du système d'axe).

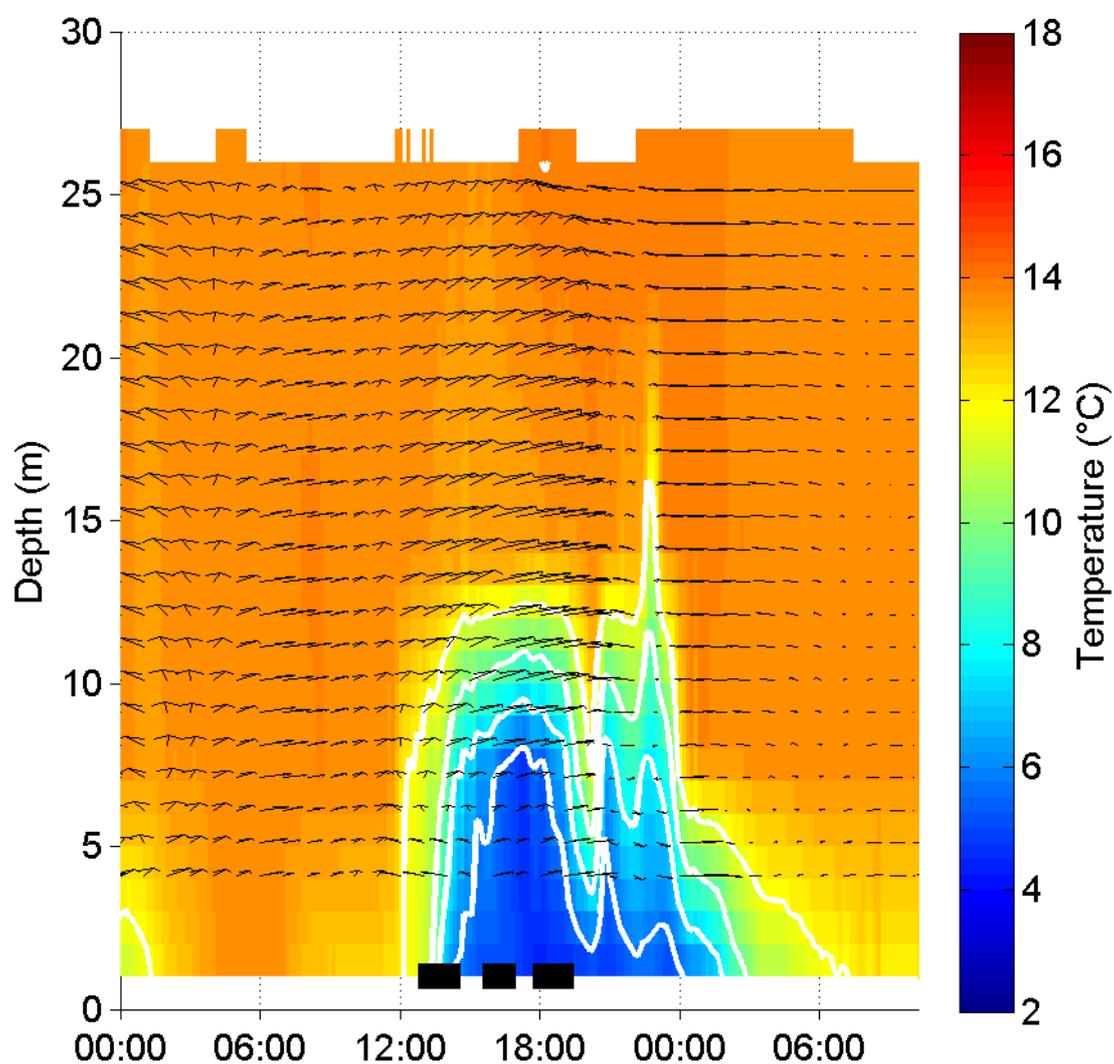
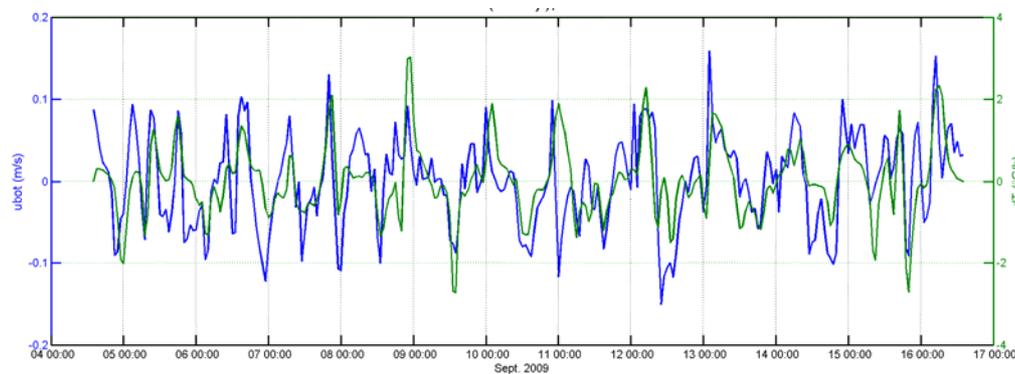


Figure 21 : Evolution des températures le 9/9/2008 et des courants tous les m et toutes les heures

En début de journée, vers 6 h, les courants à toutes les profondeurs sont dirigés vers le Nord. Peu avant 12 h, on peut assister à une renverse du courant U près du fond ; il se dirige vers la côte. Cela se traduit par une baisse de la température près du fond qui passe de 12°C à 8°C en 2 heures. Durant la phase de baisse de la température, les courants dans la moitié supérieure de la colonne d'eau sont opposés aux courants de fond et dirigés vers la large. A partir de 18 h, le courant près du fond faiblit puis s'inverse, il se dirige alors vers le large et s'accompagne d'une hausse des températures. Dans la couche supérieure, on note encore une renverse du courant qui se dirige alors vers la côte. Le courant perpendiculaire à la côte près du fond apparait donc comme le facteur principal de l'évolution des températures.

On considère (fig. 22) la composante U du courant près du fond (on rappelle que cette composante correspond à la composante du courant perpendiculaire à la côte) et que l'on trace en même temps les variations de température (en °C/heure).



**Figure 22 : Variation temporelle de la composante U du courant mesuré près du fond en bleu et la variation de température en degrés celsius/h en vert**

Il apparait une très bonne corrélation entre les deux courbes, ce qui indique que quand le courant est positif (donc dirigé vers le large), les températures croissent, et inversement, quand le courant près du fond s'inverse, les températures diminuent. La période principale de ce courant étant principalement diurne, celui-ci impose donc une variation diurne des températures à proximité du fond.

A partir de considérations théoriques très simples, on peut vérifier les ordres de grandeur de cette variabilité. Si l'on suppose que les températures varient avant tout en fonction des courants et non pas en fonction du mélange ou des échanges océan atmosphère (ce qui est tout à fait réaliste à court terme), la loi d'évolution des températures est donnée par l'équation :  $\partial T / \partial t + u \partial T / \partial x + v \partial T / \partial y + w \partial T / \partial z = 0$  où T est la température et (x,y,z,t) le système de coordonnées spatio temporel.

On peut supposer dans un premier temps que les températures ne varient que selon la profondeur ce qui suppose que les isothermes sont horizontales (ces hypothèses seront discutées dans le paragraphe suivant). L'équation se résume alors à :  $\partial T / \partial t + w \partial T / \partial z = 0$ . Près du fond, la condition cinématique impose que la composante verticale du courant s'ajuste pour que le courant suive le fond soit :  $w = -u \partial h / \partial x$  où h est la profondeur. Comme on l'a vu à la présentation des profils verticaux d'hydrologie, la température varie à peu près linéairement. On peut donc exprimer la température par  $T = \alpha z + T_{fond}$  où  $\alpha = 10^\circ C / 30m \approx 0.3^\circ C / m$

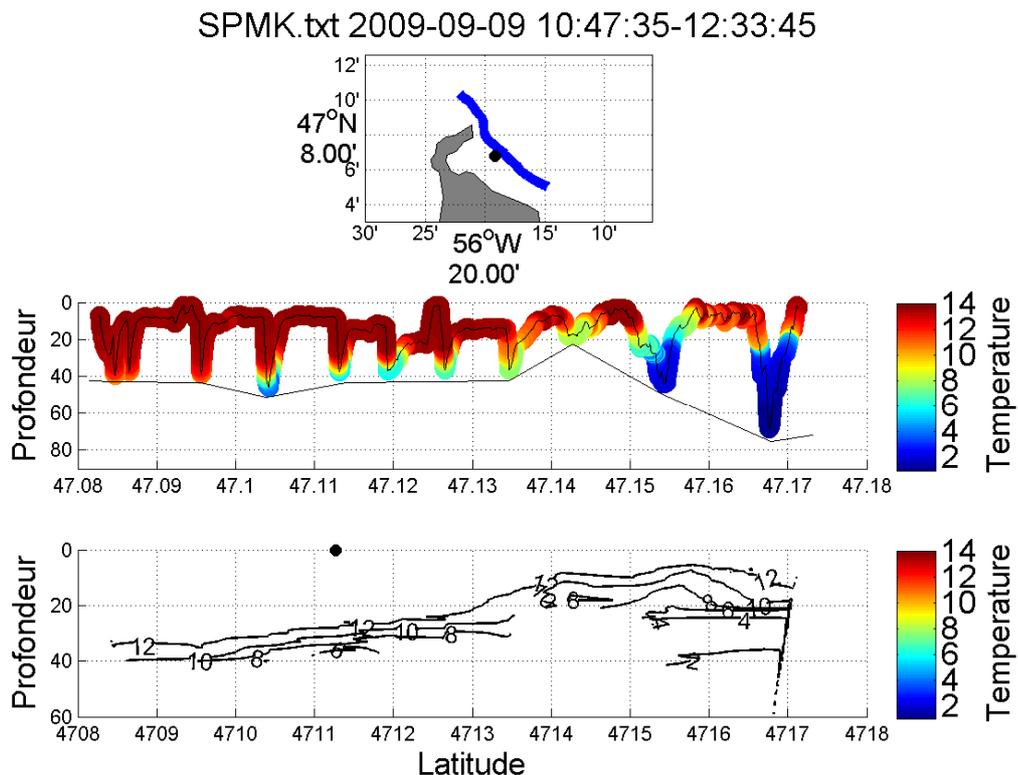
En remplaçant l'expression de  $T$  dans l'équation de l'évolution temporelle des températures et prenant la pente du fond  $\partial h/\partial x = 0,02$  et en exprimant le taux de variation en °C/heure on obtient :  $\partial T/\partial t = \alpha(\partial h/\partial x)u = 3600 * 0.3 * 0.02u = 21,6u$ . On retrouve donc les ordres de grandeur des variations de températures illustrés par la figure 22, à savoir qu'un courant positif  $U$  de 0.1 m/s induit une hausse des températures d'environ 2°C/heure.

Le mécanisme mis à jour par ce calcul montre donc simplement que la composante cote-large du courant de marée diurne, associée à une forte pente dans un milieu stratifié est capable par simple advection le long du fond de générer de fortes oscillations des températures observées.

Néanmoins, ce mécanisme ne représente qu'une vue dans la seule direction côte large ; elle ignore par construction la composante Nord-Sud et les gradients selon l'axe  $Y$ . Quelques mesures au nord et au sud du point de mouillage courantométrique (Pfi30) nous montrent que cette approximation n'est pas complètement justifiée.

## 4.2. Variabilité spatiale de l'hydrologie

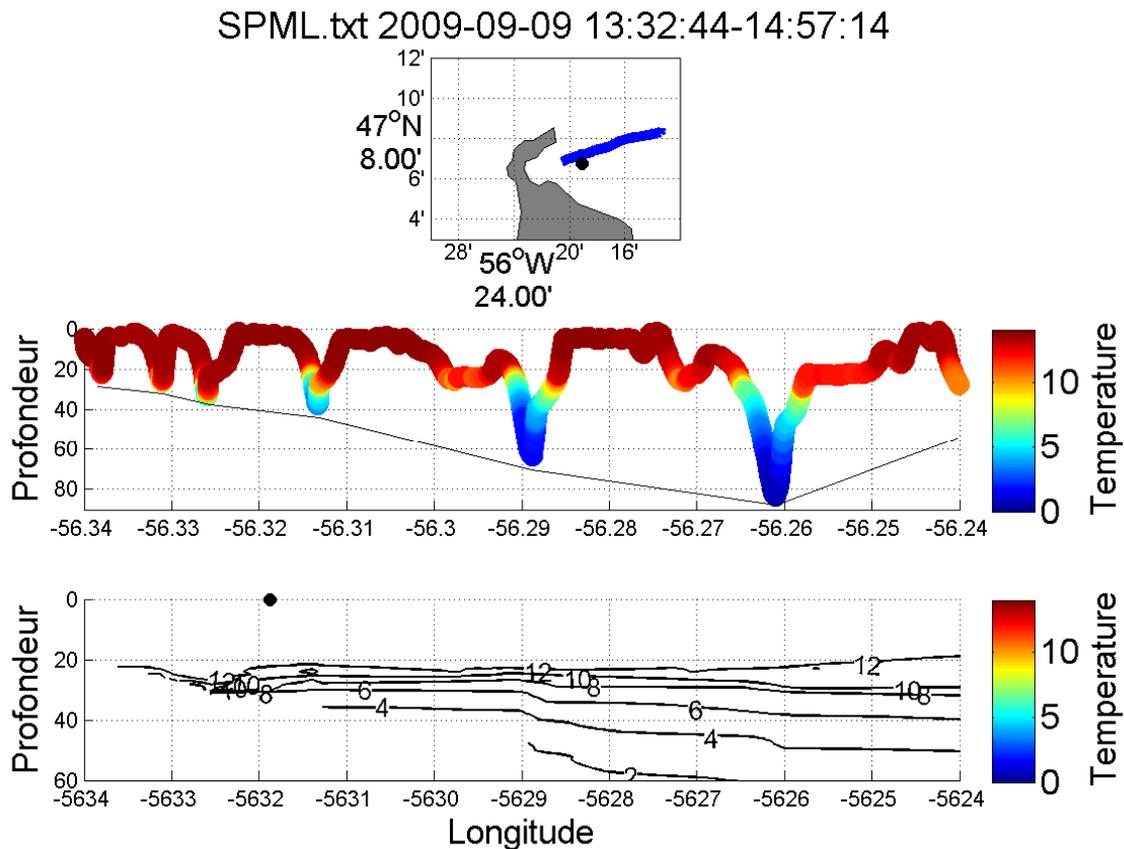
La variabilité spatiale a été évaluée par la mesure de profils de température le long de sections perpendiculaires et parallèles à la côte. La figure 23 est une section parallèle à la côte effectuée au début de la phase froide le 9/9 (les heures sont indiquées en TU-2 h)



**Figure 23 : Profil de température le long d'une radiale présentée sur la figure du haut. Au milieu, représentation de la trajectoire du poisson dans la colonne d'eau et des mesures brutes. En bas, isothermes issus de l'interpolation dans le plan vertical le long de la section. Le point noir figure la position du mouillage (Pfi30)**

Cette section montre qu'au début de la phase froide, les isothermes sont très inclinées le long de la côte. Au nord de la zone, l'isotherme 12°C se trouve à moins de 10 m de la surface alors qu'elle atteint quasiment 30 m au point Pfi30. On peut signaler qu'à l'extrémité Nord de cette radiale, des eaux très froides ( $<0^{\circ}\text{C}$ ) ont été mesurées en dessous de 50m.

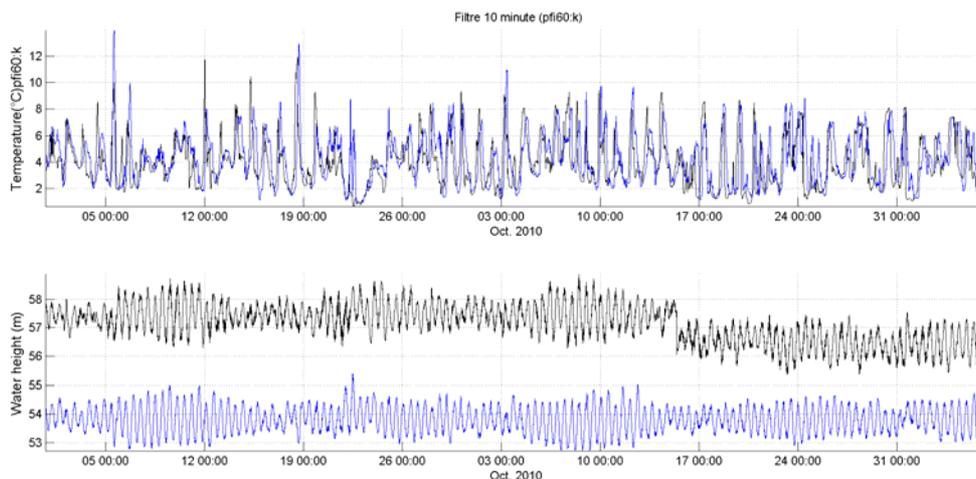
Une seconde section, perpendiculaire à la côte a été réalisée ensuite (fig. 24). Elle correspond au milieu à la phase froide du 9/9. A la différence de la section précédente, les isothermes sont beaucoup moins inclinées. On peut toutefois noter une remontée vers la côte des isothermes froids (6 et 4°C) qui remontent d'une dizaine de mètres.



**Figure 24 : Profil de température le long d'une radiale présentée sur la figure du haut. Au milieu, représentation de la trajectoire du poisson dans la colonne d'eau et des mesures brutes. En bas, isothermes issues de l'interpolation dans le plan vertical le long de la section. Le point noir figure la position du mouillage (pfi30)**

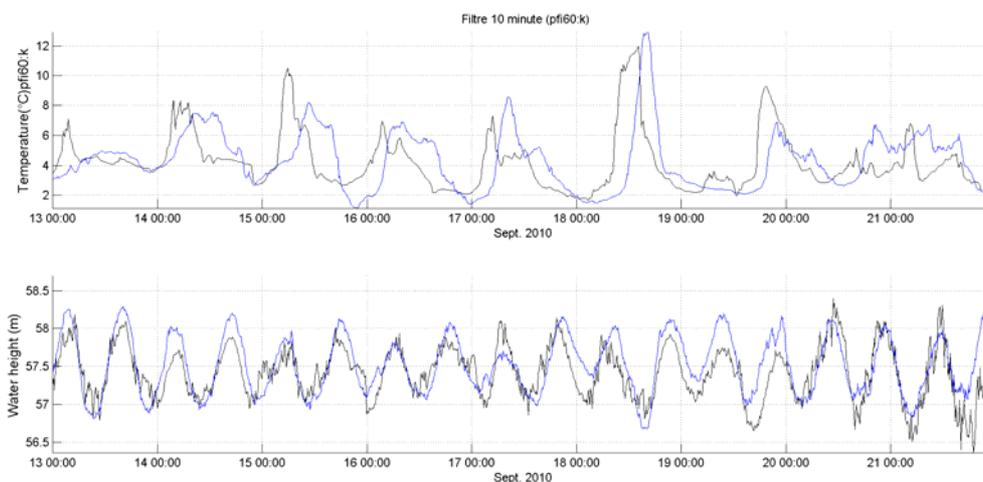
### **4.3. Cohérence temporelle entre les différents points de mesure**

Durant l'été 2010, le point PJ2 situé approximativement sur l'isobathe 55 m a été équipé de sondes à 5 m du fond et 5 m sous la surface, comme le point Pfi60 situé sur la même isobathe, 3,5 miles marins (6,5 km) plus au NW. L'analyse de l'évolution des températures en ces 2 points montre des corrélations très fortes (fig. 25).



**Figure 25 : Haut : variations des températures au fond au point pfi60 (noir) et pj2 (bleu). Bas : mesures de pression en ces 2 points**

Le décrochement dans la mesure de pression au point Pfi60 à la mi-octobre résulte d'un léger déplacement du mouillage qui a été relevé pour un nettoyage des capteurs. On peut voir que les variations des températures en ces 2 points sont parfaitement corrélées et sont quasiment superposables. La figure 26 est un zoom de cette série qui s'étend du 31 août au 6 novembre 2010.



**Figure 26 : Zoom de la figure précédente sur la période du 13 au 22 septembre 2010**

Les courbes des pressions ont été rendues superposables en ajoutant 3.7 m aux pressions mesurées en Pj2. Il apparaît que les signaux sur la pression (mesure du niveau de la mer) sont en phase. Les décalages dans les courbes sont imputables au fait que ces sondes ne sont pas posées au fond mais situées à 5 m environ au dessus du fond et que le mouillage peut s'incliner en fonction des courants et modifier ainsi la pression mesurée.

Alors que les niveaux sont en phase, les courbes des températures montrent un déphasage entre les 2 points, les variations au point Pfi60 étant en avance par rapport au point Pj2. L'analyse des corrélations sur l'ensemble de l'enregistrement a montré que la corrélation est maximale (=0.8) pour un déphasage temporel de 3,5 h.

Ce déphasage est l'indice d'une propagation d'une onde à une vitesse d'environ 1 nœud (3,5 heures pour parcourir 3,5 miles). Il pourrait s'agir alors d'une onde côtière piégée par la bathymétrie qui se propagerait du nord vers le sud. Ces enregistrements montrent donc que le scénario proposé dans le paragraphe précédent ne décrit pas complètement la dynamique dans la région et qu'il est nécessaire de prendre également en compte la dimension transversale. De nouvelles mesures devraient permettre de mieux caractériser cette propagation du signal.

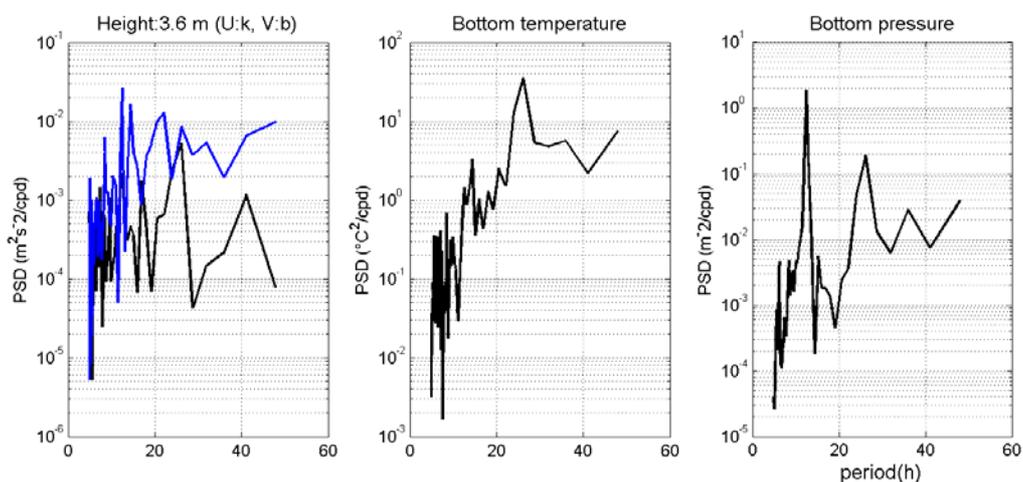
## 5. Conclusions et perspectives

L'analyse des mesures effectuées depuis 2007 a été synthétisée dans ce rapport. Les principales conclusions sont les suivantes :

Les mesures hydrologie en 2 points fixes et lors de campagnes dédiées ont permis de décrire les principales caractéristiques des températures et salinités dans la rade de Miquelon :

- La colonne d'eau est stratifiée en température de fin mai à début novembre. La différence de température entre la surface et le fond atteint environ 12°C à la fin du mois d'août (15°C en surface et 3°C au fond en moyenne).
- Les salinités sont moins variables saisonnièrement et on note une différence assez constante d'environ 1psu entre les eaux de surface moins salées et les eaux de fond.
- Les températures de fond sont marquées par une variabilité diurne importante. La température de fond peut varier de 12°C dans la journée. La période principale de ces variations est celle de l'onde de marée O1, soit 26h.

Des mesures de courants ont été effectuées en septembre 2009 pour caractériser à la fois la situation moyenne et la variabilité à haute fréquence. La figure 27 résume la complexité mais également l'intérêt scientifique que représentent ces mesures. Elle représente les spectres de variations des courants de fond, de la température et du niveau marin (pression au fond). Alors que l'on peut s'attendre à ce que les périodes dominantes des signaux soient les mêmes, elles sont ici très différentes. Les courants varient selon plusieurs périodes (de 12 à 26h), les températures sont marquées par un cycle diurne dominant (pic à 26h) alors que les niveaux varient de manière semi diurne (pic à 12,4h).



**Figure 27 : Spectres des variations des courants (gauche), températures (milieu) et niveau marin (droit)**

Les principales conclusions de l'analyse des courants sont les suivantes :

- Les courants sont très variables aussi bien dans le temps que sur la verticale. Ils ne dépassent que rarement 50 cm/s.
- Bien que les élévations de la marée soient clairement semi diurnes (2 marées hautes et basses par jour) les courants montrent une variabilité temporelle beaucoup plus complexe. Le spectre de variabilité s'étend également aux ondes diurnes (période d'environ 24h).

- On a pu mesurer un courant moyen durant le déploiement du mouillage d'environ 15 cm/s vers le Nord. Bien que ce courant soit en accord avec la littérature scientifique (très pauvre sur la région), il est impossible de conclure actuellement que ce courant est permanent et qu'il ne comporte pas de variabilité saisonnière ou associée à des événements météorologiques.
- On propose un mécanisme de génération des oscillations diurnes des températures qui nécessite pour exister, à la fois une stratification thermique continue, une composante diurne du courant cote-large et un fond en forte pente. Ce mécanisme peut expliquer une part de la variabilité des températures au fond mais n'explique pas toutes les observations. De plus amples investigations sont nécessaires.

Une modélisation numérique a été entreprise au début de l'étude pour simuler les courants autour de l'archipel de Saint-Pierre et Miquelon et estimer les taux de rétention des larves émises par les coquilles. La confrontation des simulations avec la réalité des courants mesurés a montré les limites de cette approche et impose de prendre ces résultats avec les plus grandes précautions. Néanmoins on peut en tirer plusieurs enseignements :

- La non reproduction par le modèle du courant moyen observé nous indique que ce courant résulte de processus non locaux et qu'il est sous l'influence de la circulation à l'échelle régionale qui est pour le moment mal connue.
- La variabilité spatiale des courants est fortement contrainte par la bathymétrie, bien prise en compte dans les modèles. Il est donc probable que les zones de courant plus intenses révélées par le modèle soit réalistes.

Cette étude est une première contribution à l'étude de l'hydrodynamique de l'archipel de Miquelon. Dans l'état actuel de nos connaissances, il semble illusoire de penser que la modélisation permettra à court et moyen terme de simuler de manière fiable la dispersion des larves de coquilles ; trop d'inconnues sur les conditions hydrodynamiques locales et régionales demeurent. Il semble nécessaire de compléter les jeux de données à la lumière de ces premières conclusions.

Quelques propositions de mesures nouvelles peuvent être émises :

- Faire des mesures de courant sur plusieurs mois et prioritairement en été durant la période de ponte des coquilles. Ces mesures permettront de vérifier le caractère permanent ou non du courant moyen mis au jour durant l'automne 2009.
- Elargir la zone des mesures d'hydrologie notamment en disposant des mouillages équipés de sondes de température et salinité plus au nord (au large du Cap du Nid à l'Aigle) et au sud pour évaluer la variabilité de la stratification et la propagation possible d'onde de plateau le long de la façade Est de Miquelon.

## 6. Bibliographie

Arda. 2006. Modélisation courantologique dans l'archipel de Sain-Pierre et Miquelon. Etude réalisée par Safège.

Dupont, F., C.G. Hannah, D.A. Greenberg, J.Y. Cherniawsky and C.E. Naimie. 2002. Modelling System for Tides. Can. Tech. Rep. Hydrogr. Ocean Sci. 221: vii + 72pp.

Han GH, Loder, JW, Smith P.C. 1999. Seasonal-Mean HYdrography and Circulation in the Gulf of St. Lawrence and on the Eastern Scotian and Southern Newfoundland Shelves. Journal of Phys. O., 1279-1301.

Han G.H., LU Z,Wang Z., Helbig J., Chen N., de Young B., 2008. Seasonal variability of the Labrador Current and shelf circulation off Newfoundland. JGR, 113,DOI: 10.1029/2007JC004376

Rodriguez J, 2008. Etude spatio-temporelle du captage à l'Est de Miquelon dans le cadre du programme MACAP 2008.

Safège, 2009. Etude de la dispersion des larves dans l'archipel de Saint-Pierre et Miquelon.

Webtide [http://www2.mar.dfo-mpo.gc.ca/science/ocean/coastal\\_hydrodynamics/WebTide/Install/nwatlantic\\_data\\_f.html](http://www2.mar.dfo-mpo.gc.ca/science/ocean/coastal_hydrodynamics/WebTide/Install/nwatlantic_data_f.html)

Wright DG., Xu ZG, 2004. Double Kelvin waves over the Newfoundland. Atmosphere-Ocean, 42, 102-111.

Xu, Z, Loder, J. W. 2004. Data assimilation and Horizontal Structures of Barotropic Diurnal Tides on the Newfoundland and Southern Labrador Shelves. Atmosphre-Ocean, 42, 43-60.