

## Hydrologie du Grand Etang de Miquelon

### Rapport final

Contrat 13/121210661/NF DTAM-Ifremer  
Contrat 14/2214140/F DTAM-Ifremer  
Contrat 14/2214 179/F Collectivité Territoriale Saint Pierre et Miquelon/Ifremer

### Estimation des flux et renouvellements



Direction des Territoires,  
de l'Alimentation et  
de la Mer





# **Hydrologie du Grand Etang de Miquelon**

## **Estimation des flux et renouvellements**

### **Rapport final**



## Fiche documentaire

<b>Numéro d'identification du rapport :</b> <b>Diffusion :</b> libre : <input checked="" type="checkbox"/> restreinte : <input type="checkbox"/> interdite : <input type="checkbox"/> <b>Validé par :</b> P. Gouletquer <b>Adresse électronique :</b> Phillippe.Gouletquer@ifremer.fr		<b>date de publication :</b> Mars 2016 <b>nombre de pages :</b> <b>bibliographie :</b> <b>illustration(s) :</b> <b>langue du rapport :</b>
<b>Titre de l'article</b>		
Contrat n°                      Rapport intermédiaire <input type="checkbox"/> Rapport définitif <input checked="" type="checkbox"/>		
<b>Auteur(s) principal(aux) :</b> Olivier Le Moine, Philippe Geairon, Stéphane Robert, Sylvain Coudray, Annie Fiandrino, Herlé Goraguer, Philippe Gouletquer.		<b>Organisme / Direction / Service, laboratoire</b> Ifremer ODE/Littoral/LERPC
<b>Cadre de la recherche : Soutien à l'aquaculture de Saint Pierre et Miquelon</b>		
Destinataires : Contrat 13/121210661/NF DTAM-Ifremer Contrat 14/2214140/F DTAM-Ifremer		Contrat 14/2214 179/F Collectivité Territoriale Saint Pierre et Miquelon/ifremer
<p><b>Résumé:</b> Le programme vise à évaluer les flux hydrologiques entre le Grand Etang de Miquelon et l'océan, en soutien à la décision de politique publique. Il a débuté fin 2013 et se termine début 2016. Au niveau opérationnel, des levés bathymétriques (DTAM 2013 &amp; 2014), des campagnes de courantométrie (2014 &amp; 2015) et leurs traitements ont permis d'implémenter un modèle hydrodynamique. Les principaux résultats obtenus sur les trois années sont les suivants :</p> <p><b>L'évaluation des surfaces (227 Ha) et volumes</b> caractéristiques (total : <math>6,74 \cdot 10^6 \text{ m}^3</math>, oscillant <math>2,9 \cdot 10^6 \text{ m}^3</math> (43 %) mi-marée <math>5,2 \cdot 10^6 \text{ m}^3</math>)</p> <p><b>L'estimation d'un indice de vélocité</b> du chenal pour l'évaluation de la vitesse moyenne des courants</p> <p><b>L'évaluation des flux</b>, en flot et jusant respectivement, soit :</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- débits instantanés : maxima à 94,2 et <math>65 \text{ m}^3/\text{s}</math> moyens 37,2 et <math>24,5 \text{ m}^3/\text{s}</math>. en 2014 et 85,03 et <math>73,62 \text{ m}^3/\text{s}</math> et des moyennes de 26,22 et <math>28,20 \text{ m}^3/\text{s}</math> en 2015.</li> <li>- flux circulants par marée : maxima à <math>1,06</math> et <math>1,09 \cdot 10^6 \text{ m}^3</math>, moyens 0,66 et <math>0,71 \cdot 10^6 \text{ m}^3</math> en 2014 maxima de 0,93 et <math>1,13 \cdot 10^6 \text{ m}^3</math>, moyens 0,44 à <math>0,75 \cdot 10^6 \text{ m}^3</math> en 2015</li> </ul> <p><b>Les renouvellements</b> sont en évolution. En effet, le goulet d'alimentation amenant de moins en moins d'eau de l'océan (de 13 à 8%), est probablement compensé par une source de percolation sous le cordon dunaire en augmentation (de 1 à 22%). Ils restent compatibles avec une exploitation aquacole raisonnée.</p> <p><b>La météorologie</b> exerce un effet sur ces volumes du fait de la pression atmosphérique (corrélée négativement aux flux de flot), de la force et direction du vent (corrélées négativement en 2014, et de moindre façon en 2015, et surtout aux flux de jusant). Les deux saisons analysées étant relativement similaires du point de vue des vents, les effets sont plus délicats à faire ressortir.</p> <p><b>Le constat d'asymétrie du temps de marée :</b> le temps de flot est inférieur à celui de jusant (4,9 h. vs 7,4 h), avec des temps de flux sortants bien supérieurs à ceux entrants par le chenal.</p> <p><b>Le goulet semble en phase de comblement.</b> Son alimentation paraît de plus en plus assurée par des eaux de percolation (donc filtrée), dont la qualité est moins favorable aux animaux filtreurs.</p> <p><b>La modélisation</b> permet l'évaluation d'indices hydrodynamiques de temps de renouvellement (de l'ordre de la journée) et de temps de résidence (de 1 à 7 jours du Nord au Sud).</p>		

**Abstract :** This study aims to assess the hydrological fluxes between the ‘Grand Etang’ of Miquelon and the oceanic part. Bathymetric surveys and Doppler current meter data acquisitions were carried out from August 14th, to November 5th, 2014 and from April 1st, to end of July 2015 to allow the following estimates :

**Total area** (227 Ha) **and characteristics volumes** (total :  $6,7 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ ; oscillating  $2,8 \cdot 10^6 \text{ m}^3$  (40 %); half-tide  $5,2 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ )

**Velocity Index** of channel to evaluate the average current speed at cross-section channel

**Fluxes**, on flood and ebb tide respectively :

Instantaneous flow: maxima at 94,2 et 65  $\text{m}^3/\text{s}$  mean 37.2 et 24.5  $\text{m}^3/\text{s}$ . in 2014 and maxima 85,03 et 73,62  $\text{m}^3/\text{s}$  mean 26,22 et 28,20  $\text{m}^3/\text{s}$  in 2015.

Circulating fluxes by tide : maxima 1,06 and 1,09  $10^6 \text{ m}^3$ , mean 0,66 and 0,71  $10^6 \text{ m}^3$  in 2014 maxima 0,93 and 1,13  $10^6 \text{ m}^3$ , mean 0,44 à 0,75  $10^6 \text{ m}^3$  in 2015

**Renewal** rate per tide is decreasing: the main channel providing less inputs from ocean waters (from 13 to 8%). This is balanced by water inputs probably dripping under the sandbank (from 1 to 22%). They seemed to be compatible with a sustainable aquaculture activity.

**Meteorology** has an effect by the way of atmospheric pressure (negatively correlated to flood fluxes) and by wind effect (negatively correlated in 2014, and less in 2015, more on ebb fluxes).

**Tidal asymetry duration was reported:** flood time was lower than the ebb one (4,9 h. vs 7,4 h.), which results in outflow fluxes significantly greater than inflow through the channel. Hypothesis of secondary inflow by percolation from ocean is formulated.

**The coastal channel seems to be in a filling phase.** Grand Etang’s renewal is more and more carried out by another origin, maybe with a filtration effect, not favorable to filter feeders.

**Hydrodynamic modelling** has been carried out, facilitating the renewal time estimates (about one day) and flushing time from 1 to 7 days.

**Mots-clés:** flux hydrologiques, courantométrie, bathymétrie, Grand Etang Miquelon, modélisation

**Keywords:** hydrological fluxes, current meter data acquisition, bathymetry, Grand Etang Miquelon, modelling

# sommaire

## Table des matières

<b>Hydrologie du Grand Etang de Miquelon.....</b>	<b>3</b>
Estimation des flux et renouvellements .....	3
<b>Fiche documentaire .....</b>	<b>5</b>
<b>Préambule .....</b>	<b>9</b>
<b>Contexte .....</b>	<b>11</b>
Objectifs et chronologie.....	13
<b>Résultats.....</b>	<b>14</b>
Evolution et caractéristiques géomorphologiques actuelles du Grand Etang .....	14
<i>Données géomorphologiques</i> .....	14
Evaluation des flux et renouvellements .....	15
Hauteurs d'eau mesurées.....	15
Intensité des courants.....	16
Débits et volumes instantanés.....	17
Flux cumulés par marée .....	18
Phases de marée.....	18
Bilans quantitatifs.....	19
Renouvellements .....	20
Influence de la météorologie .....	21
Modélisation .....	24
Objectifs et stratégie .....	24
Indicateurs hydrodynamiques.....	32
Discussion - conclusion.....	36
Bibliographie .....	39



## Préambule

Ce rapport final reprend certaines parties des rapports précédents "in extenso" pour des raisons d'homogénéité et de cohérence du texte. Il ne les remplace pas dans la mesure où les méthodologies d'acquisition de données et les résultats intermédiaires ne sont pas repris dans le corps du rapport, mais présentés en annexe pour plus de clarté des résultats finaux.



## Contexte

Le Grand Etang de Miquelon est identifié comme un des sites de développement aquacole à Saint Pierre et Miquelon. Par le passé, il a déjà servi à l'élevage des truites et saumons (1979 cf D. Masson), des ombles et a permis les premiers essais d'élevage de pétoncle géant (1985 et 1999-2000). La gestion durable de ce milieu est essentielle pour la sécurisation de nouvelles activités aquacoles qui se développent dans ce secteur (e.g., mytiliculture). Dans ce cadre, la DTAM de Saint Pierre et Miquelon et la Collectivité Territoriale de Saint Pierre et Miquelon ont sollicité l'IFREMER pour une assistance à la réalisation d'une étude en commun. Cette étude est destinée à acquérir des éléments de connaissance et d'aide à la gestion nécessaire à un fonctionnement approprié de cet écosystème. Le questionnement porte principalement sur le dimensionnement du goulet de l'Etang et de son entretien. L'objectif actuel est le développement durable de l'activité mytilicole et la préservation de cet environnement afin d'atteindre l'équilibre de fonctionnement de cette activité. Le premier paramètre abordé dans l'étude réalisée par IFREMER est en conséquence celui du renouvellement des eaux de l'étang.

Dans cette première étape, l'amélioration de la compréhension du mode de fonctionnement hydrodynamique du Grand Etang était nécessaire afin de pouvoir envisager la faisabilité d'une modélisation permettant le test éventuel de différents scénarii de profilage du goulet d'alimentation.



## Objectifs et chronologie

Les objectifs ont été fixés annuellement, en fonction des acquis et besoins de l'étude.

- Evaluation de l'évolution à long terme des berges et du goulet du Grand Etang : Un premier travail a consisté à géoréférencer les photos aériennes disponibles afin d'apprécier cette évolution.
- Estimation flux et renouvellements :
  - La première année a également été consacrée à l'acquisition de la bathymétrie par la DTAM et à son traitement par krigeage par l'Ifremer ; les estimations des indicateurs géomorphologiques (surfaces, volumes, etc.) ont ensuite pu être réalisées.
  - Les données complémentaires à l'évaluation des taux de renouvellements et flux sont les mesures de débits transitant dans le goulet. Pour cela, des mesures de vitesses de courant sont nécessaires ; les appareils nécessaires ont été mis en place et la calibration réalisée lors de la mission Ifremer (juillet – août 2014). Deux campagnes de mesure de longue durée ont été réalisées à l'automne 2014 et au printemps - été 2015.
- Evaluation spatialisée de la dynamique de renouvellement et de l'impact d'un reprofilage du goulet d'alimentation. Phase réalisée par simulation hydrodynamique, avant et après curage, permettant d'évaluer son effet sur la dynamique de renouvellement du Grand Etang. Les étapes précédentes réalisées, l'implémentation du modèle hydrodynamique permettant ces estimations, a pu être faite fin 2015 - début 2016.

## Résultats

### Evolution et caractéristiques géomorphologiques actuelles du Grand Etang

#### *Données géomorphologiques*

##### *Evolution à long terme (cf annexes 1.1.)*

Les orthophotographies de 1952, 1990 et 2005 ont été géoréférencées. Elles illustrent l'évolution géomorphologique du goulet du grand étang de Miquelon. Elles montrent que le goulet évolue globalement en largeur et semble se combler entre 1952 et 1990, puis se rouvrir légèrement entre 1990 et 2005. La même observation avait été faite lors d'une étude en 2000 (Sogreah, 2000). Elle mentionnait déjà le comblement du delta de flot dans l'Etang et le rétrécissement du chenal.

Au cours du temps, la section hydraulique sous le pont a beaucoup diminué puisqu'à la vue des photos, le passage sous le pont est passé d'environ 200 m de large en 1952 à 155m dans les années 1970 (Etcheberry, 2006) et à moins d'une centaine en 2005.

De même, la passe littorale a diminué de moitié depuis 1952, évoluant d'une largeur de 70-80m (toujours d'après photo) à une quarantaine de mètres en 1990 et 2000.

##### *Surface, volumes et sections (cf annexes 1.1.2)*

Au zéro niveau moyen des mers (NMM), le volume est de 5,23 millions m<sup>3</sup>; au zéro hydrographique théorique d'après le référentiel SHOM, le volume estimé est de 3,7 millions m<sup>3</sup> (cote des plus basses mers, NMM - 0.70 m, www.sonel.org). Cette valeur correspond au volume "mort" (i.e., non soumis au balancement des marées) du Grand Etang. Le volume total aux plus hautes mers théoriques (+ 0,70 m.) est de 6,74 millions de m<sup>3</sup>.

Le volume oscillant total (cotes  $\pm 0,7$  m.) est de l'ordre de 3 millions m<sup>3</sup>, soit une capacité de renouvellement de 45 % du volume maximal.

**Cette donnée reste très théorique et probablement surévaluée** pour au moins deux raisons :

1. L'hydrodynamisme particulier ne permet sans doute pas cet échange "idéal" ; les masses d'eaux entrantes et sortantes étant contraintes par la marée et les conditions météorologiques.
2. Nous ne disposons pas de mesures de marnage dans l'étang dans les conditions de nos campagnes. L'étude Sogreah, sur la base de deux mesures l'évaluait à 40 cm, mais celui-ci peut varier dans de fortes proportions en fonction des marées bien sûr, de la section hydraulique du chenal d'alimentation et de la météorologie.

Une analyse plus fine des données de courants et hauteurs d'eau mesurées permet l'estimation des volumes réellement échangés.

Les sections mouillées du chenal, dont dépendent directement les débits transitant, ont été estimées d'après les levés DTAM. Elles sont de 77 et 165 m<sup>2</sup> à basse mer et pleine mer respectivement (-0,65 + 0,85 m NMM d'après nos mesures) au niveau du pont. La précédente étude annonçait 56 et 89 m<sup>2</sup> pour des hauteurs d'eau de 0,05 à 0,5 m (Sogreah, 2000). Elles sont donc légèrement différentes et inférieures à celles obtenues d'après les mesures 2015. Cela peut s'expliquer par un approfondissement sous le pont sous la force des courants, ou des méthodes de mesure ou positionnement différents.

Les conclusions de la précédente étude étaient néanmoins similaires, à savoir que la section hydraulique sous le pont n'est pas limitante, par rapport à la passe littorale et au chenal entre le pont et l'océan dont les sections sont plus réduites. La section minimale mesurée en 2014 est de 24 et 94 m<sup>2</sup> entre basse et pleine mer et se situe à environ 200m entre à l'est du pont.

## Evaluation des flux et renouvellements

La méthodologie générale, les données et résultats de calibration se trouvent en annexe 1.2.

L'objectif initial était de poursuivre les acquisitions tant que cela était possible sans prendre de risque pour le matériel lors des périodes de gel de l'étang. Les campagnes d'acquisition de longue durée des courants en continu ont été réalisées du 4 août au 5 novembre 2014, puis du 1 avril au 6 août 2015.

## Hauteurs d'eau mesurées

Les hauteurs d'eau mesurées dans le Goulet oscillent entre 1,75 et 3,25 m au-dessus du courantomètre dans la campagne 2014 (fig. 1). Le détail sur une marée montre que l'on peut observer un décalage de l'ordre d'une heure trente entre l'atteinte de la cote maximale mesurée de la surface libre et la marée prévue (calendrier des marées SHOM) à Saint Pierre.

Le profil de la campagne 2015 est plus hétérogène, un tassement de l'oscillation de la marée se faisant sentir assez rapidement après le début de la campagne, vers le 24-25 avril (fig. 2). Cela se passe durant une période de mortes eaux (coefficients de 68 à 49, en phase de déchet). La force des vents sur cette période était entre 5 et 10 m/s (18 à 36 km/h). La marée et la météo ne semblent probablement pas à mettre en cause dans cette observation. Plusieurs hypothèses pourraient expliquer cela :

1. Le capteur pression du courantomètre n'a pas été vérifié à la sortie de l'eau du courantomètre et aurait pu être partiellement bouché ;

2. Une modification du chenal littoral, entre l'appareil et la côte, vraisemblablement un éboulement aurait pu se produire avec pour effet de limiter l'arrivée d'eau en provenance de l'océan, et donc une diminution de la hauteur d'eau en flot.
3. Les conditions météorologiques de l'automne 2014 et du printemps 2015 seraient très différentes.

Nous n'avons pu avoir de confirmation sur place d'un événement particulier et seul le signal examiné peut nous orienter vers une réponse. Nous ne pouvons donc confirmer avec certitude l'une ou l'autre de ces hypothèses.

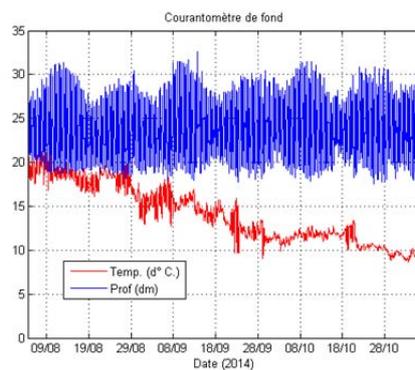


Figure 1 hauteur d'eau et température 2014

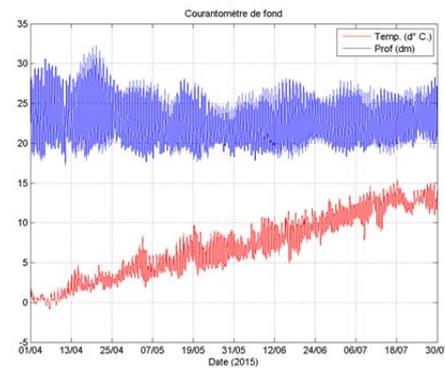


Figure 2 hauteur d'eau et température 2015

## Intensité des courants

La variabilité de l'intensité du courant est très faible dans la colonne d'eau. En flot comme en jusant, elle varie au fond de la même façon qu'en surface (annexe 1.2.2).

Sur l'ensemble de la campagne 2014, l'intensité moyenne sur la section évolue entre 1,22 m/s en flot à 1,34 m/s en jusant, avec une moyenne de 0,597 m/s en flot et de 0,694 en jusant (fig. 3). Les courants de jusant sont plus intenses que ceux de flot sur l'ensemble de la période, de mi-août à début septembre.

Lors de la campagne 2015 l'intensité moyenne varie de 1,08 m/s en flot à 1,42 m/s en jusant, avec une moyenne de 0,542 m/s en flot et de 0,724 m/s en jusant (fig.4).

L'intensité estimée a donc peu évolué, les courants de flot ayant faiblement diminué (de 0,597 à 0,542 m/s), et ceux de jusant augmenté (de 0,694 à 0,724 m/s). Cette observation va dans le sens d'une évolution du chenal littoral ayant diminué les intensités de flot et curieusement pas celles de jusant.

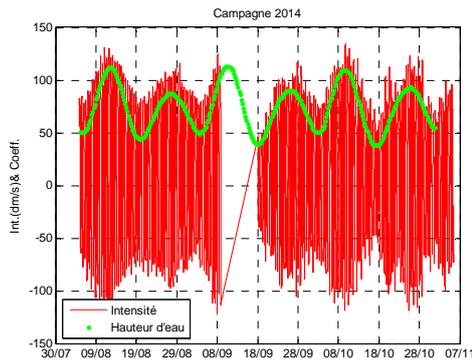


Figure 3 : campagne 2014 intensité mesurée

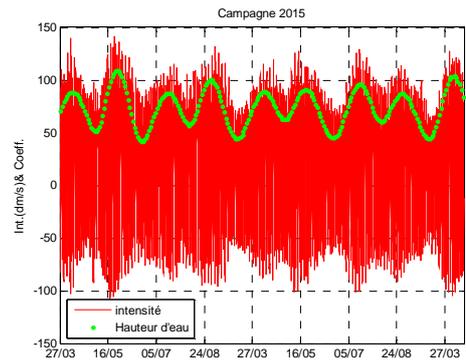


Figure 4 : campagne 2015 intensité mesurée

## Débits et volumes instantanés

Les débits instantanés des deux campagnes présentent des profils différents, principalement liés aux variations de hauteurs d'eau mesurées.

La campagne 2014 présente des débits maximums de 94,22 m<sup>3</sup>/s en flot et 64,98 m<sup>3</sup>/s en jusant, avec des moyennes de 37,16 et 24,48 m<sup>3</sup>/s respectivement (fig. 5). En 2014, les débits de flot sont donc supérieurs, en pic et en moyenne à ceux de jusant.

Les données 2015 sont légèrement différentes, avec des maximums de 85,03 et 73,62 m<sup>3</sup>/s et des moyennes de 26,22 et 28,20 m<sup>3</sup>/s en flot et jusant respectivement (fig. 6).

On note une évolution des débits instantanés, les pics de flot ayant diminué (de 94,22 à 85,03 m<sup>3</sup>/s), alors que ceux de jusant ont au contraire augmenté (de 64,98 à 73,62 m<sup>3</sup>/s) ; les données moyennes évoluent de façon similaire. Les intrants mesurés sont donc en diminution alors que les débits d'évacuation semblent en augmentation.

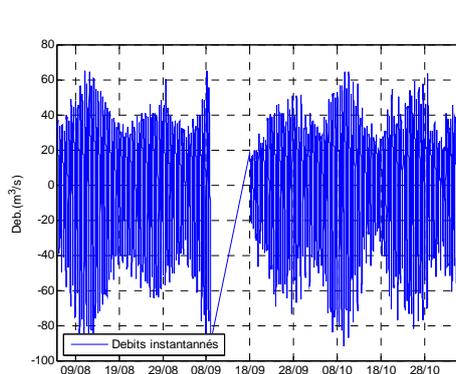


Figure 5 : campagne 2014 débits instantanés

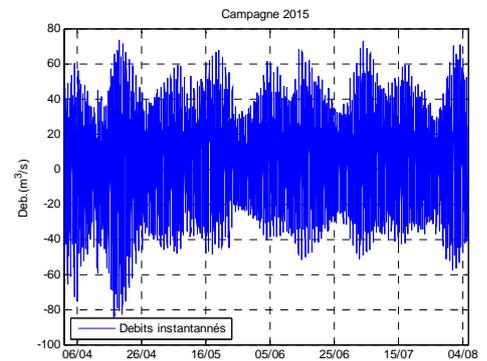


Figure 6 : campagne 2015 débits instantanés

## Flux cumulés par marée

Les flux cumulés par marée présentent évidemment les mêmes tendances d'évolution que les débits instantanés (tab. 1). Comme déjà noté dans le rapport annuel en 2014, ils montrent qu'il sort plus d'eau du Grand Etang qu'il n'en rentre par le goulet (Le Moine & al, 2014). Les flux de flot sont en diminution entre les deux campagnes et les flux de jusant en légère augmentation.

Tableau 1 : flux dans le goulet estimés d'après les mesures

Flux/campagne	Flux en flot ( $10^6 \text{m}^3$ )	Flux en jusant ( $10^6 \text{m}^3$ )
Max. 2014	1.06	1.09
Moy. 2014	0.66	0.71
Max. 2015	0.93	1.13
Moy. 2015	0.44	0.75

En 2014 (fig.7) les écoulements sont bien corrélés aux coefficients de marée, les volumes de jusants étant légèrement supérieurs à ceux de flot.

En 2015, environ trois semaines après le début de ma campagne, le flux entrant diminue de façon drastique n'atteignant plus que rarement les  $600\,000 \text{ m}^3$  (fig. 8.). Toutefois, il les dépasse dès que les coefficients de marée sont supérieurs à 60 en 2014 et au début de la campagne 2015 en avril.

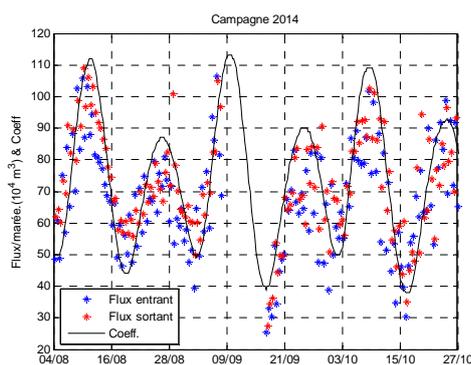


Figure 7 : Campagne 2014 flux cumulés ( $10^4 \text{ m}^3$ ) et coefficients de marée

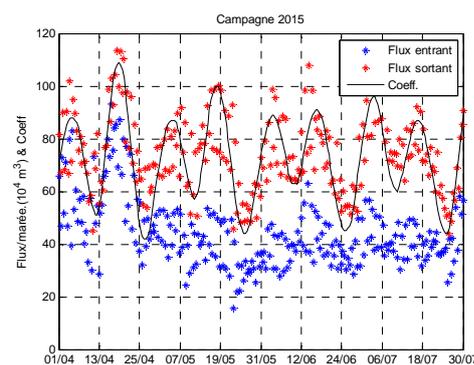


Figure 8 : Campagne 2015 flux cumulés ( $10^4 \text{ m}^3$ ) et coefficient de marée

## Phases de marée

Les phases de la marée (flot et jusant) sont en principe équilibrées en durée dans les milieux ouverts. Dans les zones à géomorphologie contrainte, cette symétrie a tendance à se rompre (Toublanc et al., 2015). Dans le cas du Grand Etang, le jusant semble prendre le pas sur le flot. En 2014, la durée moyenne du flot est de 4 h 52 mn et le jusant de 7 h 22 mn avec un ratio flot/jusant de 0,66 (fig. 9).

En 2015, les durées moyennes sur l'ensemble de la période étaient de 4 h 34 mn pour le flot et 7 h 20 mn pour le jusant avec un ratio flot/jusant de 0,62 (fig. 10).

En parallèle de l'évolution des débits instantanés, les durées moyennes des phases de marée ont changé. La durée du flot et du jusant a diminué d'environ 20 minutes pour le flot et de 2 minutes pour le jusant. La durée du cycle de marée complet est passée de 12 h 14 minutes à 11 h 54 minutes.

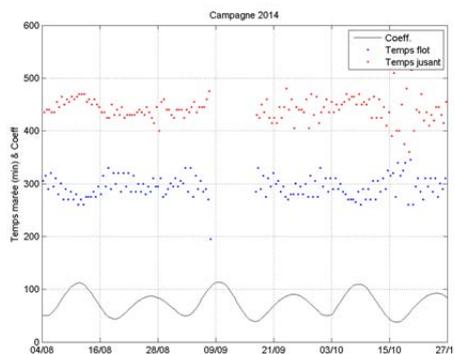


Figure 9 : Campagne 2014 durée des phases de la marée

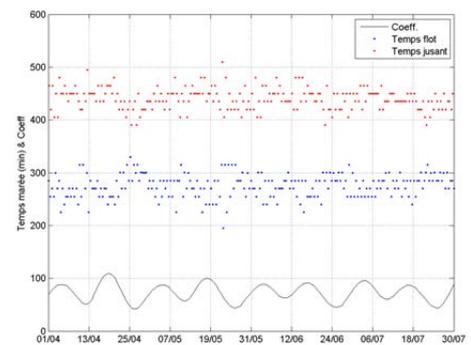


Figure 10 Campagne 2015 : durée des phases de la marée

## Bilans quantitatifs

L'évolution des débits et des flux par marée constatée en 2015 engendre évidemment des modifications des volumes échangés et du renouvellement. En 2014, 65 marées sur les 150 analysées, présentent un apport en flot supérieur à celui du jusant suivant et 95 un apport inférieur (fig. 11). Ces valeurs passent en 2015 à 9 marées excédentaires en flot et 234 pour le jusant (fig 12) ; on passe donc de 40% de marées à flot excédentaires à 9 %.

Les bilans 2015 évoluent de manière significative autour de la date 'pivot' du 25 avril 2015 : à partir de cette date, plus aucun bilan n'est négatif confirmant qu'aucun flux de flot n'est supérieur au flux de jusant. Deux phases (P1 & P2) se distinguent donc autour de cette date. Au final des enregistrements, il sort donc toujours plus d'eau du Grand Etang par le Goulet qu'il n'en rentre. Le même phénomène existait en 2014, mais de façon intermittente, préférentiellement en phase de rejet ou de très forts coefficients (Le Moine et al, 2014).

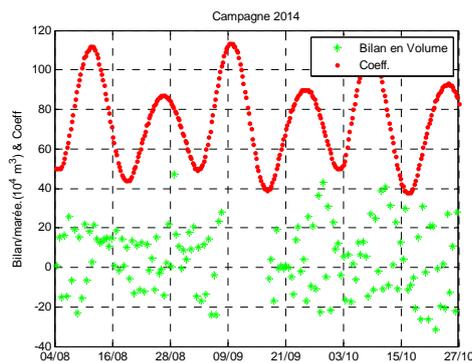


Figure 11 : Campagne 2014 bilan volumique par marée

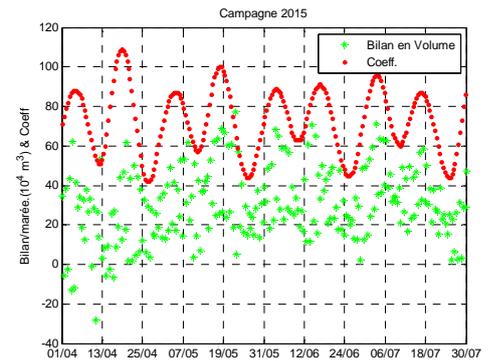


Figure 12 : Campagne 2015 bilan volumique par marée

Les données numériques de ces bilans d'échange (tab. 2) démontrent bien que ce mode de fonctionnement devient la norme au cours de la seconde période de 2015. En effet, sur cette période, aucune marée ne voit son flux de flot dépasser celui de rejet. Les différences peuvent être très importantes, atteignant jusqu'à  $770 \cdot 10^3 \text{ m}^3$  d'eau sortant par le Goulet sans y être passée lors du flot.

Tableau 2 : Bilans par marée, résultat de la différence flux entrant (en flot) – flux sortant (en jusant); le bilan de flot est donc  $>0$  quand le flux de flot est supérieur au flux de jusant, et vice versa.

Bilans des Flux par marée	2014 ( $10^3 \text{ m}^3$ ) n=161	2015 P1 ( $10^3 \text{ m}^3$ ) n=45	2015 P2 ( $10^3 \text{ m}^3$ ) n=198
Flot $>0$ mini.	3	10,4	0
Flot $>0$ maxi.	313	281	0
Flot $>0$ moyen	45,2	85	0
Jusant $>0$ mini	1,3	17	23
Jusant $>0$ maxi.	520	624	770
Jusant $>0$ moyen	156	279	332

## Renouvellements

La capacité de renouvellement du Grand Etang est estimée par les volumes échangés, par rapport au volume de l'étang au NMM. La portion d'origine connue est mesurée par le courantomètre en flot en provenance de l'océan (eau « neuve »), et l'excédent, d'origine plus incertaine, évalué d'après les flux excédentaires en jusant. Les masses d'eaux océaniques estimées correspondent à des renouvellements moyens de 3 à 20 % par marée selon les campagnes, avec une moyenne allant de 8 à 13 % (Tab.3). L'eau non passée par le goulet en flot, représente des renouvellements allant de 0 à 39 %, avec une forte fréquence entre 0 et 5% en 2014, et entre 15 et 30 % en 2015. Cette source inconnue est très significative dans une perspective aquacole et de gestion raisonnée de l'environnement. Au cours du cycle de marée en 2014, on observe des alternances de gain ou de pertes de volume de l'étang en fonction des marées jour/nuit lors des phases

de fin de revif et déchet. Lors du revif, les flux sortants étaient toujours plus importants que les flux entrants. Ces phénomènes s'estompent lors des campagnes 2015.

On observe une évolution significative des renouvellements sur l'ensemble des campagnes de mesure, allant toutes dans le sens de sa diminution.

Le renouvellement moyen en eau « neuve » apportée par le Goulet passe de 13 à 11, puis 8 %, pendant que les apports d'eau d'autre origine (très probablement par percolation sous le cordon dunaire) passe de 1 à 27, puis finalement 22 %. Le renouvellement moyen par marée évolue donc vers la diminution d'alimentation par le Goulet et l'augmentation par la probable percolation sous le cordon littoral ouest.

Tableau 3 : Renouvellements (en % du volume total du Grand Etang au NMM) en fonction de la période considérée

Renouvellement ( en % du volume total et en fonction de la provenance)	2014	2015 P1	2015 P2
Goulet Maxi.	20 %	18 %	12 %
Goulet Mini.	5 %	5 %	3 %
Goulet Moyen	13 %	11 %	8 %
Inconnue Maxi	6 %	39 %	33 %
Inconnue Mini.	0 %	14 %	12 %
Inconnue Moyen	1 %	27 %	22 %

## Influence de la météorologie

L'analyse des variables de flux et renouvellement sur la période hivernale en lien avec les données météorologiques, prévue en 2015, devait compléter les informations sur la dynamique de fonctionnement du Grand Etang. Hormis le coefficient de marée, il était en effet probable que cette dynamique soit également fortement dépendante de la situation météorologique. Les poids respectifs des forçages météorologiques et de marée auraient pu apporter des informations importantes complémentaires si l'acquisition hivernale des données avait pu être réalisée. L'analyse est donc réalisée en comparant les résultats de l'automne 2014 au printemps 2015, sur des périodes à priori moins perturbées et thermiquement très différentes.

L' hodographe mensuel est un mode de représentation qui intègre la force et la direction du vent et à ce titre caractérise les différentes périodes (Fig 13 & 14). Ceux des campagnes réalisées montrent pour 2014 des mois de juillet, septembre et novembre des vents un peu différents des autres, principalement dirigés vers le Nord Est et assez forts. Les courbes des autres mois sont plus ramassées autour de l'origine et montrent des vents plus faibles et moins stables en direction avec une faible prédominance de direction vers l'Ouest. En 2015, trois mois semblent marqués par des vents se dirigeant

vers l'Ouest (mars, avril et mai) ; les mois de juillet et août se dirigeant plutôt vers le Nord - juin peu marqué en direction. A noter que les campagnes 2014 et 2015 débutent respectivement en août et avril, mais l'information précédant ce début paraît néanmoins intéressante.

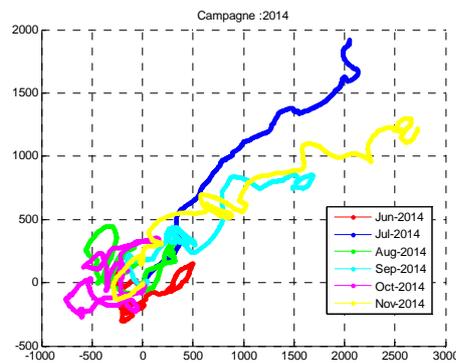


Figure 13 : hodographe mensuel (données force et direction du vent) campagne 2014

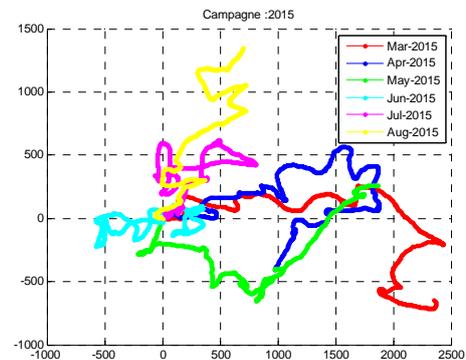


Figure 14 : hodographes mensuels campagne 2015

L'analyse des corrélations entre les différentes variables de flux, marée et météorologie fait ressortir de différences notables (tab. 3). En effet :

- Tous les flux sont (logiquement) corrélés au coefficient de marée. On note cependant une diminution de cette corrélation des flux de flot entre les deux campagnes.
- Les flux de flot sont négativement corrélés à la pression atmosphérique, et du même ordre de grandeur dans les deux campagnes ; ce qui signifie que moins la pression atmosphérique est élevée, plus le flux est important.
- La force et la direction du vent ne sont que très faiblement corrélées aux flux en 2015, et de façon plus significative et négative sur la campagne 2014.

Tableau 4 : Matrice des corrélations entre les flux de flot et de jusant, les coefficients de marée et les variables météorologiques de pression atmosphérique, force et direction du vent

	2014		2015	
	<i>Flux flot</i>	<i>Flux jusant</i>	<i>Flux flot</i>	<i>Flux jusant</i>
Coeff. marée	<b>0.7345</b>	<b>0.7752</b>	<b>0.4165</b>	<b>0.7680</b>
Press. Athm	<b>-0.1630</b>	-0.0146	<b>-0.1731</b>	-0.0265
Force vent	0.0478	<b>-0.1242</b>	0.0676	-0.0648
Direction vent	<b>-0.1106</b>	<b>-0.1914</b>	0.0314	0.0381

L'ensemble des données de vents sur les deux campagnes est synthétisée en fréquence de direction observée par les roses des vents (fig. 15). Il ressort de cette représentation que les vents dominants ont tendance à pousser les masses d'eau vers le Nord Est dans les deux cas de figure et à des fréquences très similaires. Cette direction correspond à peu près à celle de l'axe du chenal, le vent devant donc avoir tendance à amplifier le flux de jusant. Curieusement, s'agissant de deux saisons très différentes (automne et

printemps), les intensités des deux campagnes sont également très proches : moyennes 6,91 et 6,58 km/h, pour des écarts types de 3,78 et 3,46 pour 2014 et 2015 respectivement. D'un point de vue théorique, les effets du vent devraient être du même ordre (et le niveau de corrélation également) ; pourtant, on observe que les corrélations entre les flux et l'effet du vent diminuent entre les deux campagnes. L'hypothèse formulée plus haut d'une diminution de la section mouillée pourrait engendrer une évolution des résultats dans ce sens, l'influence du vent étant liée à la libre circulation de l'eau.

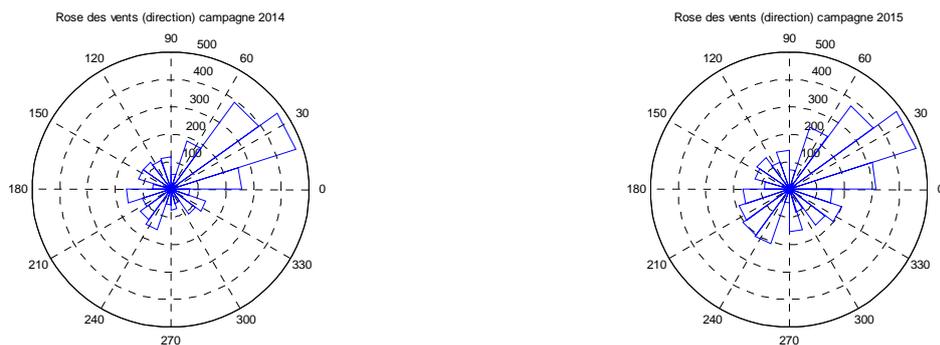


Figure 15: rose des vents des deux campagnes, 2014 et 2015 en coordonnées polaires et en direction (l'Est est au 0, et le sens est celui où va le vent)

## Modélisation

La description technique du modèle et de sa paramétrisation est consultable en annexe méthodologique.

## Objectifs et stratégie

Dans sa configuration lagunaire le modèle hydrodynamique MARS-3D est destiné à représenter de la manière la plus fidèle possible, le transport et le mélange des masses d'eau sur des échelles de temps qui, selon la nature du problème traité, peuvent varier de l'heure à l'année. Ce modèle à surface libre calcule les composantes du courant suivant les trois directions ainsi que sa composante moyenne sur la verticale, la température, la salinité et les coefficients de mélange selon une grille horizontale régulière et un nombre constant de niveaux sur la verticale. Un changement de coordonnées (coordonnées sigma) est effectué suivant cette direction pour reproduire la bathymétrie du site.

Concernant les échanges entre la lagune et la mer ouverte, le modèle est construit pour simuler de façon réaliste les débits échangés dans les passes, l'amortissement et le déphasage des hauteurs entre la lagune et la mer ouverte. En revanche, le modèle n'est pas conçu pour reproduire les profils horizontaux et verticaux des courants dans les passes.

La méthodologie, après l'implémentation physique du modèle SPMG (Saint Pierre & Miquelon, Grand Etang Miquelon) est la suivante :

- Réalisation d'une simulation de référence correspondant à la situation la plus réaliste possible en termes de données disponibles de forçage (météo, marée, apports superficiels) sachant que les apports par percolation ne pourront pas être pris en compte dans ce scénario de référence ; en l'absence de séries temporelles de hauteurs d'eau (dans l'Etang et dans l'océan à l'Est et à l'Ouest de l'Etang) il n'est en effet pas possible d'estimer ces apports secondaires.

Par la suite, l'impact de scénario de gestion est évalué comparativement aux résultats obtenus avec cette simulation de référence.

La démarche est donc la suivante :

- Simulation après modification de la bathymétrie selon les deux scénarii retenus.
- Calculs en post-traitement des différences entre les résultats et développement d'indicateurs hydrodynamiques spatialisés basés sur les débits dans les passes et sur la circulation des masses d'eau dans l'étang (Fiandrino, 2012)
- Conclusions sur les scénarii au vu des indicateurs.

L'analyse des différents cas ne peut se faire qu'en relatif en confrontant les résultats des deux scénarii à la simulation de référence. Rappelons que dans sa version lagunaire, le modèle hydrodynamique permet de tester l'impact de la modification de la bathymétrie des passes sur les débits échangés et non sur les profils horizontaux et verticaux des

courants. Par conséquent, l'impact de cet aménagement sur la morphodynamique des passes ne pourra être évalué avec l'outil dans sa version actuelle. En d'autres termes, le modèle reproduira au mieux les débits, mais pas les courants. Dans l'hypothèse où de nouveaux levés bathymétriques et de nouvelles mesures de débits seraient effectués après curage, les écarts entre débits mesurés et simulés pourraient néanmoins être évalués.

Certains préalables, incontournables et décidés avec les intervenants de la DTAM, ont été pris en compte :

- Les terrassements doivent se faire à minima pour minimiser les bouleversements écologiques de la zone ainsi que les coûts.
- On évite les affouillements trop près du pont pour ne pas déstabiliser l'ouvrage.
- Vu la faiblesse du marnage (~1,5 m. entre -0,65 et +0,85 m.), on privilégie une section mouillée développée en largeur et limitée au fond à la cote sol sous le pont.
- On vise la calibration du Goulet pour égaler (au moins) la section mouillée maximale du pont, de façon à ne pas provoquer d'accélération des courants préjudiciable à l'équilibre du système.

Au vu des données ci-dessus et dans l'optique de ne pas modifier les sols sous le pont, il apparaît que le curage dans la portion Est du chenal soit la priorité. L'objectif pourrait être de le conformer au résultat ci-dessus, soit 30 m de large à la cote -2 m, correspondant à une section mouillée d'environ 77 m<sup>2</sup> à la cote de basse mer (-0,65 m. cote NMM).

## Simulation de référence et scénarii

### *Description et résultats de la simulation de référence*

La simulation de référence utilise les données bathymétriques synthétisées en 2014 conformément au document technique SC-LERPAC-2016XX joint en annexe.

Les forçages ont été choisis sur la période du 1er mai 2015 au 06 août 2015 pour laquelle la totalité des mesures (météo, T° au goulet, marée avec hauteur d'eau toutes les 10mn) étaient disponibles, soit 3 mois quasi complets. Cette période nous paraît suffisante compte-tenu des dimensions réduites de l'étang et de la largeur relative du goulet. Le modèle est initialisé à t = 13h17 le 01/05/2015 pour coïncider avec une mer étale au zéro hydrographique qui correspond à une hauteur depuis le fond de 1.404 m (Le Moine, 2014).

Pour étudier les paramètres hydrodynamiques, deux coupes représentatives du bassin et de son goulet ont été sélectionnées ainsi qu'un point milieu M. (fig. 16). Les paramètres de la grille de calcul sont les suivants : 48 X 95 mailles, de résolution 0,0004361° en longitude et 0,000297° en latitude.

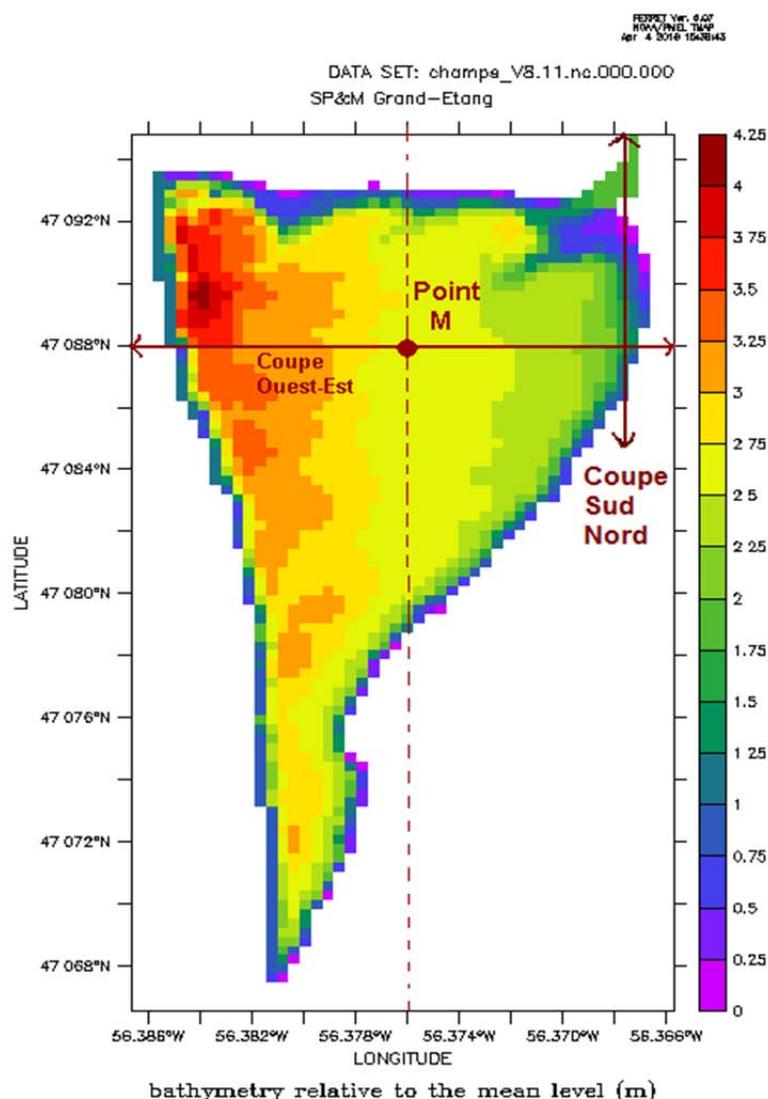


Figure 16 Bathymétrie Mars3D et choix des coupes représentatives

Les résultats obtenus après vérification de validité montrent que les hauteurs d'eau calculées sont les mêmes en tout point de l'étang. Le fluide étant considéré par approximation comme parfait (non-visqueux), dans un modèle de cette taille, l'onde de marée est propagée de manière quasi immédiate.

Les hauteurs d'eau correspondant à une marée moyenne, représentée par la journée du 01/05/2015, sont tracées sur les deux coupes Sud-Nord et Ouest-Est (fig.17 & 18). La hauteur d'eau initiale est en rouge, la hauteur minimale en vert et maximale en bleu. Elles sont comprises entre -0,40m à +0,60m

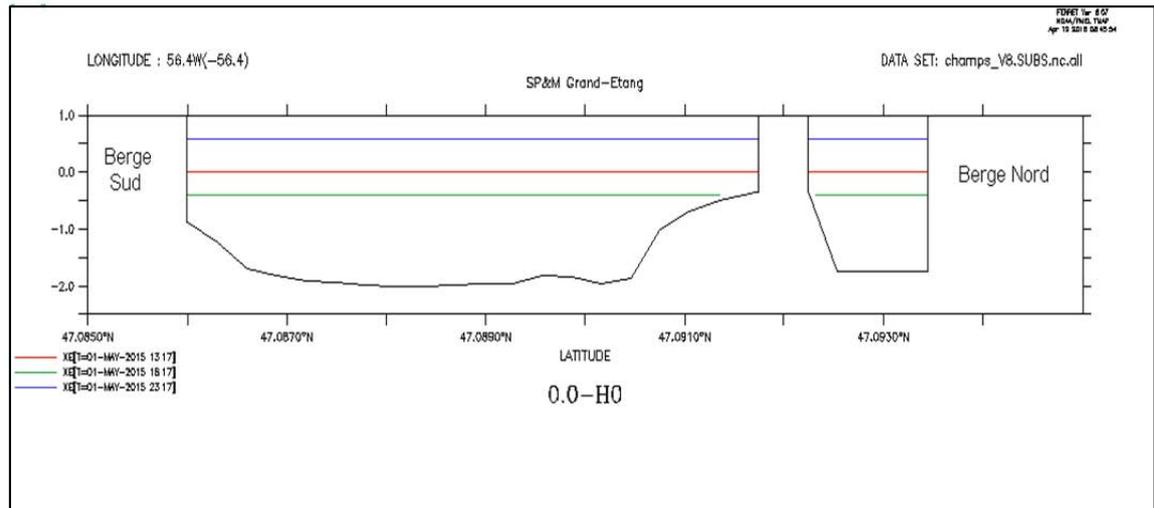


Figure 17 :Coupe Sud-Nord à longitude W 56.368° (i=43) au niveau du goulet

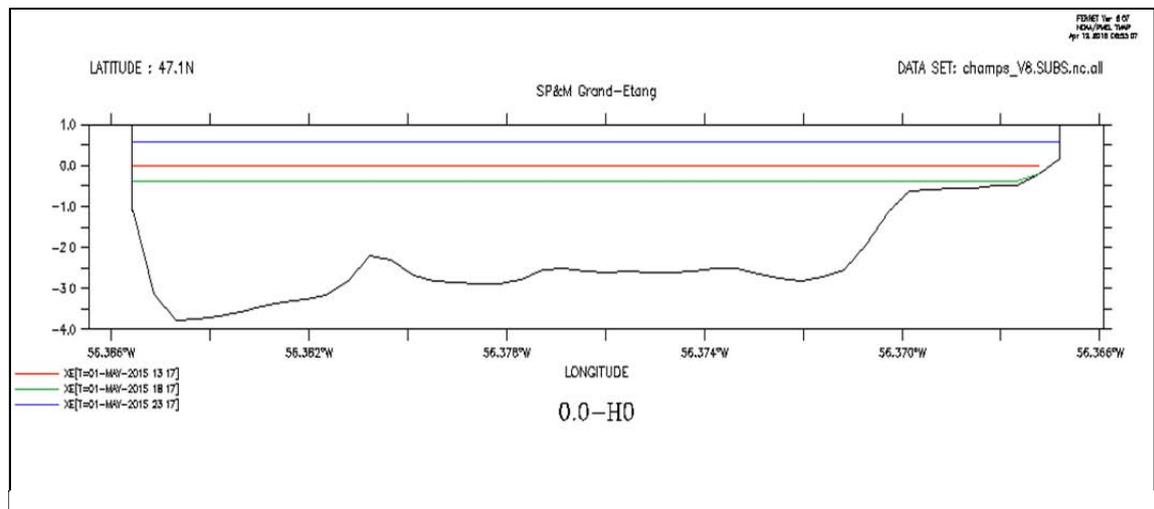


Figure 18 Ouest-Est à latitude N 47.088° (j=84) dans le 1/3 supérieur de l'étang

La hauteur d'eau maximale en vives-eaux (0.85 m) est atteinte le 20 mai, la valeur minimale (-0.55 m) le 30 mai (fig. 19).

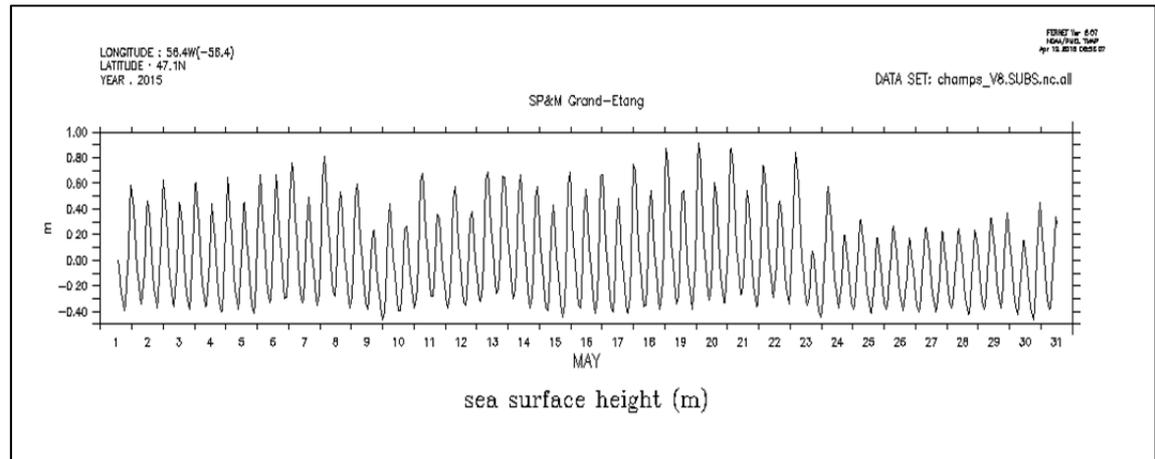


Figure 19 :Variations de la hauteur d'eau au point milieu de l'étang (i=24, j=71) sur 1 mois

Les vitesses calculées par le modèle au goulet (G) où les profils ADCP ont été mesurés en 2015 ainsi qu'au niveau du pont (P) sont cohérentes avec les mesures consignées dans les rapports précédents.

Elles montrent que la composante V (Nord-Sud) du courant en vives-eaux peut atteindre en surface environ 3,5 m/s au niveau du goulet et environ 1 m/s au niveau du pont. Les valeurs maximales au fond atteignant alors respectivement 1,9 m/s (G) et 0,5 m/s (P).

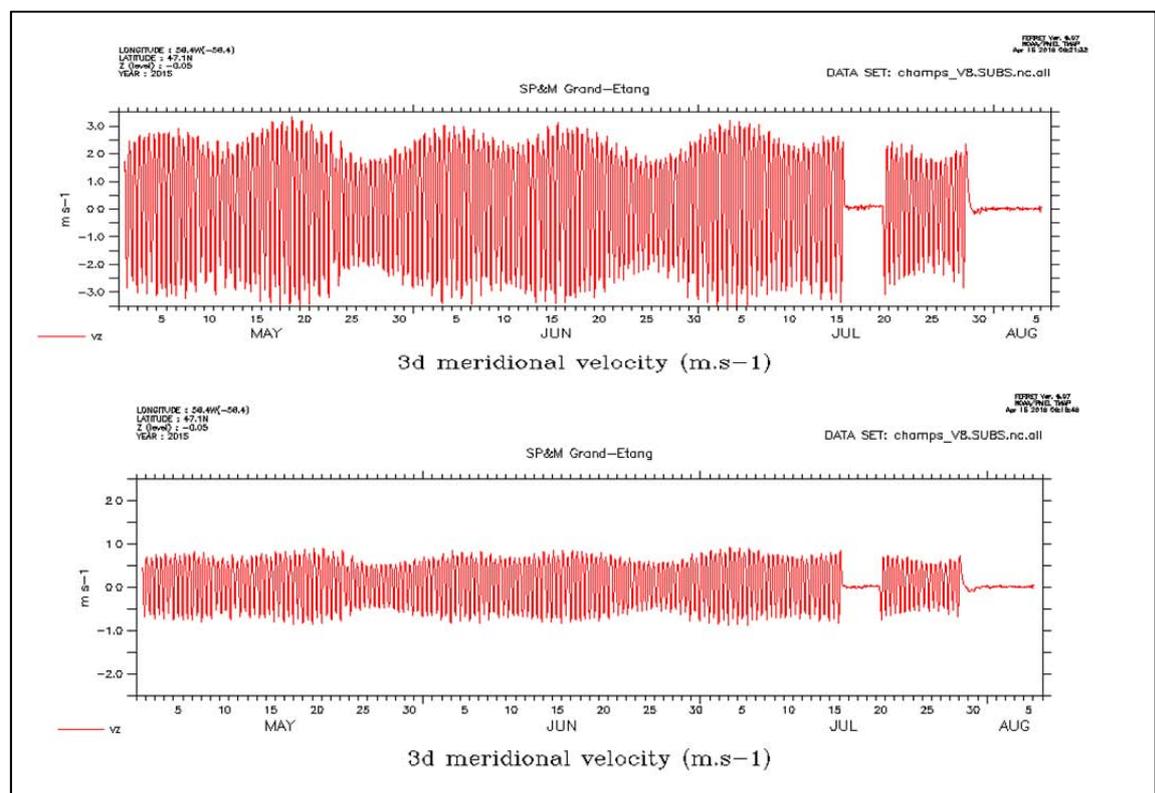


Figure 20 Variations de la composante V du courant aux points G (i=44, j=92) et P (i=42, j=89) sur 3 mois.

Les vitesses calculées au point milieu M ne dépassent pas quant à elles 25 cm/s en module pour la surface et 10 cm/s pour le fond (fig. 21).

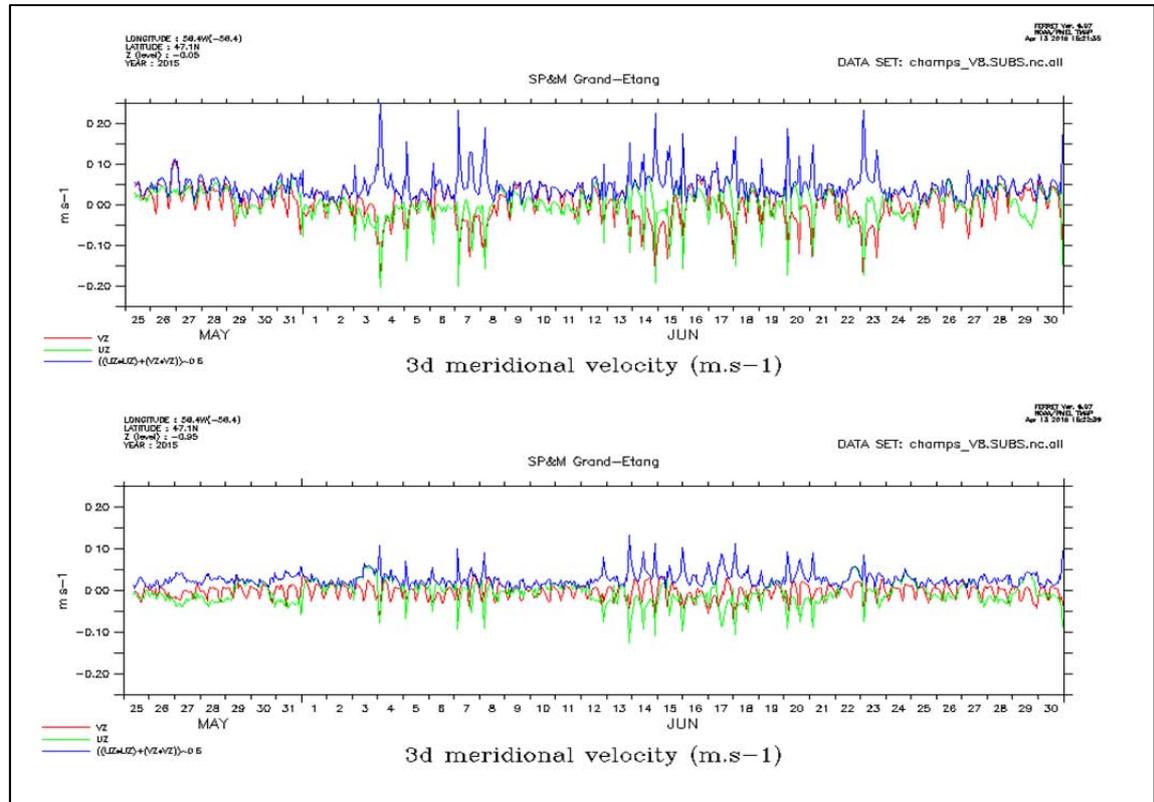


Figure 21 Variations des composantes et du module de la vitesse du courant

Les températures au milieu de l'étang évoluent en fonction des variations au goulet avec un amortissement assez important et une inertie plus marquée au fond. Certains jours des écarts d'environ 1°C apparaissent entre le fond et la surface par exemple les 6, 12 et 28 juin (fig. 22).

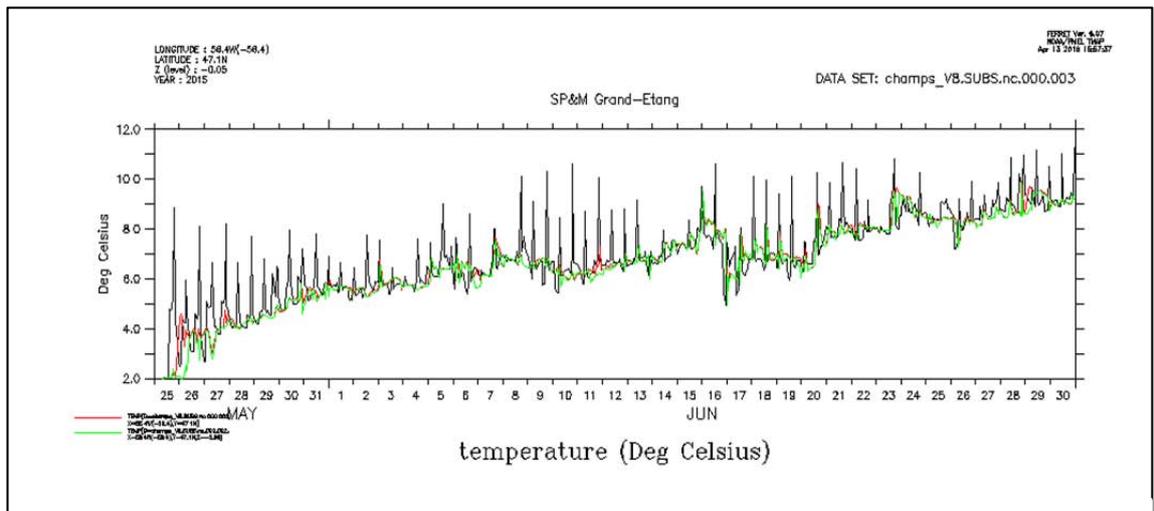


Figure 22 Variations de température au goulet (noir) ainsi qu'au point milieu en surface (rouge) et au fond (vert).

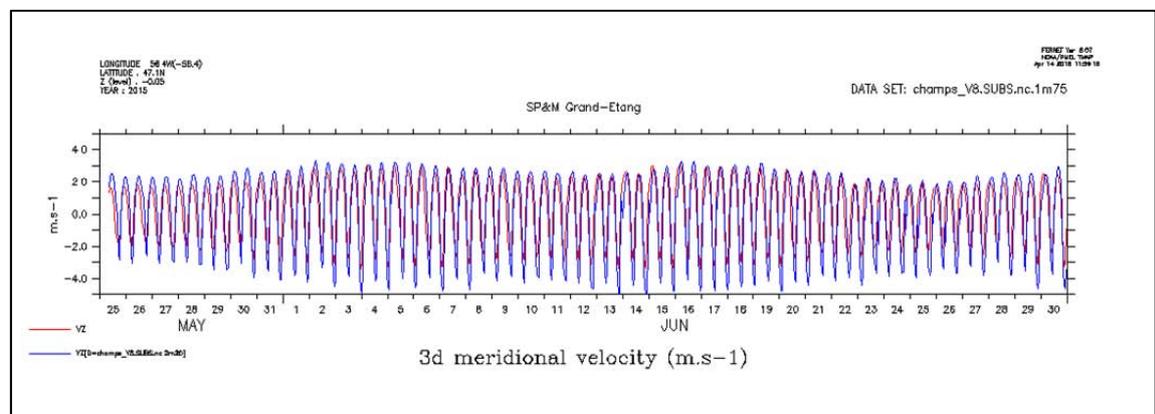
### Simulation avec goulet élargi

L'élargissement du goulet après un curage éventuel (DC) a été simulé par un chenal à profondeur 2,20 m au lieu de 1,75 m avant curage (AC), avec un étalement sur 2 mailles de 33 mètres en largeur, le long des premiers 150 mètres. Les sections mouillées ont été ré-estimées (tab. 5).

Tableau 5 Sections mouillées Avant Curage (AC) et après curage (DC)

	Goulet mesure surface mouillée	Goulet AC (pour 1,75 m)	Goulet DC (pour 2,20 m)
Basse Mer	27m <sup>2</sup>	38 m <sup>2</sup>	76 m <sup>2</sup>
Pleine Mer	94m <sup>2</sup>	88 m <sup>2</sup>	176 m <sup>2</sup>

La simulation de ce scénario « après curage », donne des vitesses de courant plus importantes: au goulet la vitesse maximale de la composante VZ (courant entrant) passe de 3 m/s à environ 4.5 m/s, avec une augmentation moyenne de 1 m/s à chaque pic de marée (fig. 23) et la vitesse maximale du courant calculé au niveau du pont est quasiment doublée (fig. 24). En revanche on observe peu de différence sur la valeur et l'orientation des courants au milieu de l'étang (fig. 25).



Au niveau du pont, l'amplitude maximale du courant sortant donnée par la composante projetée sur l'axe perpendiculaire au pont (i.e. dans la direction du goulet), passe de 1m/s à environ 1,8 m/s lors des pics de marée les plus importants.

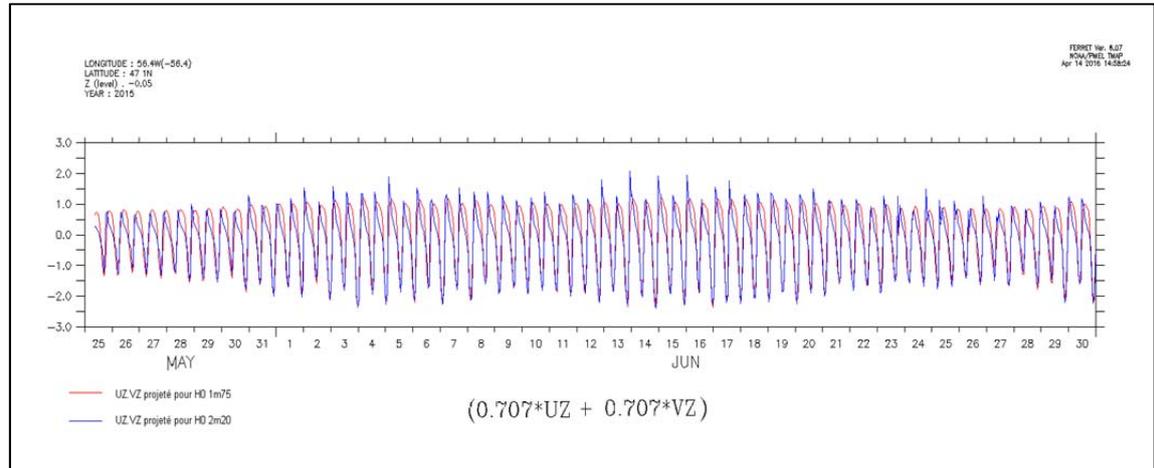


Figure 24 : Comparaison de la vitesse courant au niveau du pont projetée dans l'axe du goulet avant curage (1,75 m) en rouge, après curage (2,20 m) en bleu.

Au point milieu M, les variations d'amplitude suivent le même schéma avec des pics légèrement intensifiés qui restent cependant compris entre -20 cm/s et + 10cm/s en surface.

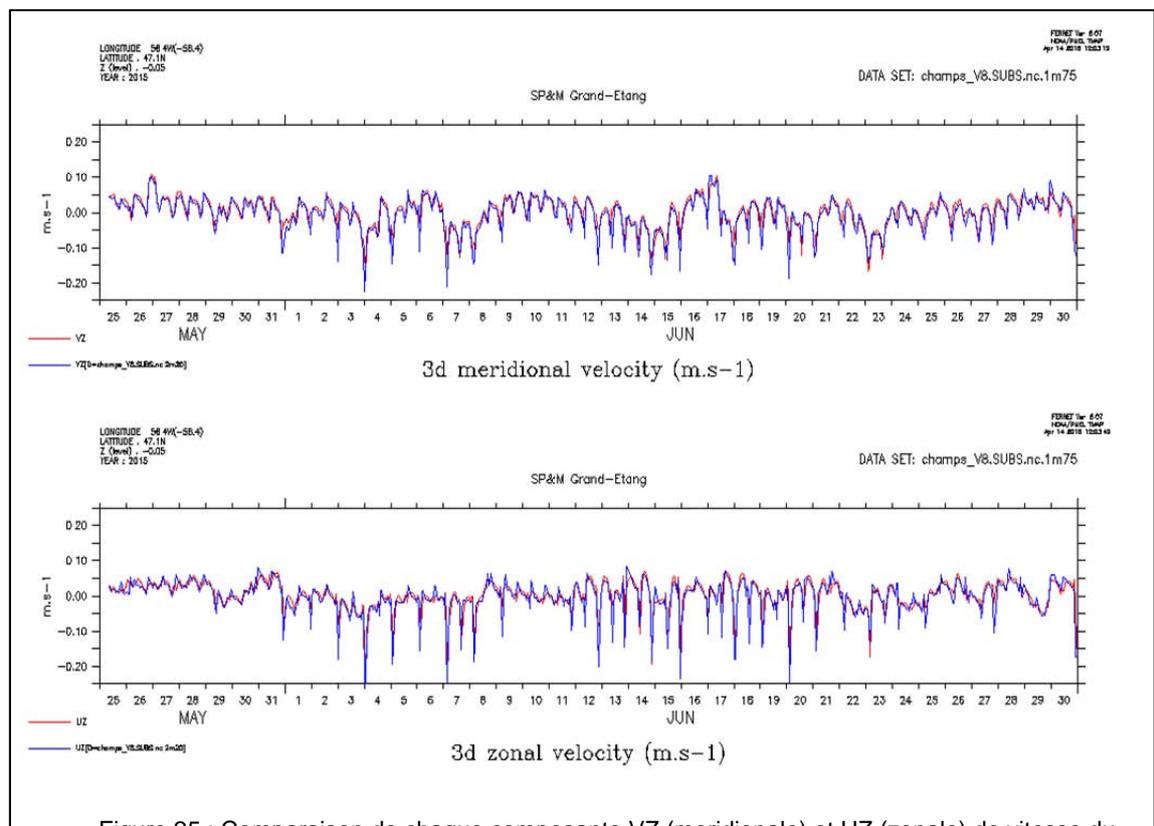


Figure 25 : Comparaison de chaque composante VZ (meridionale) et UZ (zonale) de vitesse du courant de surface au point milieu, avant curage (1m75) en rouge et après curage (2m20) en bleu.

L'impact de ce scénario de curage sur les renouvellements a été évalué comme prévu dans les objectifs, à l'aide d'indicateurs hydrodynamiques couramment utilisés.

## Indicateurs hydrodynamiques

Différents auteurs ont tenté de définir des paramètres permettant de décrire les caractéristiques générales des échanges de masse d'eau entre un système à étudier et l'extérieur ou au sein même du système. Ces « indicateurs hydrodynamiques » sont généralement proposés pour des systèmes parfaitement mélangés, c'est-à-dire des systèmes pour lesquels l'hypothèse est faite qu'une substance dissoute conservative introduite à un instant donné, en un endroit donné, est instantanément et uniformément mélangée dans la totalité du volume.

### Temps de renouvellement des eaux

Dans ce contexte de « milieux parfaitement mélangés », le temps de renouvellement est défini (Geyer et al., 2000) comme le temps nécessaire pour renouveler la totalité du volume du système en fonction des flux échangés avec l'extérieur.

L'hypothèse forte effectuée pour calculer le temps de renouvellement est que le volume ( $V_{lag}$ ) du système à renouveler reste constant durant toute l'expérimentation, c'est-à-dire qu'à chaque instant, les flux d'eau ( $F_E$ ) qui entrent dans le système à travers les frontières du domaine sont exactement compensés par des flux équivalents qui sortent ( $F_S = F_E$ ).

Le temps de renouvellement s'exprime alors comme :

$$T_R \text{ (en jours)} = V_{lag} \text{ (en } Mm^3) / F_E \text{ (en } Mm^3/j)$$

Le taux de renouvellement journalier calculé comme le rapport :

$$\tau_R \text{ (en \% / jours)} = 100 / T_R \text{ (en jours)}$$

est indépendant du volume considéré et permet de comparer les lagunes entre elles.

### Temps de résidence

Un second indicateur hydrodynamique, qui prend en compte les processus de mélange et de transport au sein de la masse d'eau, peut être défini afin d'estimer le temps moyen qu'une masse d'eau passe dans le système avant de le quitter définitivement. Le calcul du temps de résidence est basé sur l'évolution des concentrations d'une substance dissoute conservative, introduite de façon homogène dans tout le domaine en début d'expérience. Si, par la suite, aucune autre introduction de cette substance n'est faite dans le système, la quantité de matière dans le milieu diminue au cours du temps du fait de son évacuation vers l'extérieur. Le temps de résidence est le temps nécessaire pour que 64 % de la concentration initiale ait disparu du système (Monsen et al., 2002). Tel que défini, le temps de résidence représente le temps moyen que la substance dissoute

conservative (et par conséquent les masses d'eau qui la contiennent) passe dans le système.

Le temps de résidence local est une grandeur non mesurable in situ et son estimation ne peut se faire qu'à l'aide d'un modèle hydrodynamique.

Afin d'estimer le temps de résidence des eaux dans une lagune, deux variables sont introduites dans le modèle :

- une substance dissoute conservative dont la concentration est initialisée à 10 unités/l dans tout le domaine et qui n'a aucune source. Cette substance sort du domaine au gré des phases de vidange de la lagune,

Le modèle hydrodynamique MARS-3D, développé par l'Ifremer et appliqué sur la lagune de St-Pierre et Miquelon dans le cadre de la présente étude a été utilisé pour cartographier le temps de résidence sur cette lagune.

### Indicateurs hydrodynamiques sur la lagune de St-Pierre-Et-Miquelon

Malgré une connexion unique avec l'Océan Atlantique à l'extrémité nord-est de la lagune, la propagation de l'onde de marée au sein de la lagune est peu amortie. Compte tenu du faible volume de la lagune et de l'intensité des débits dans le chenal de communication, le temps de renouvellement simulé est très court, de l'ordre de la journée (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**6). Il est représentatif du temps de résidence des eaux dans la partie nord-ouest de la lagune. Le temps de résidence maximal, de l'ordre d'une semaine, est simulé à l'extrême sud de la lagune dans la partie la plus éloignée de la communication avec l'Océan. La lagune de St-Pierre-Et-Miquelon est un milieu dans lequel les échanges avec la mer et les processus de mélange à l'intérieur de la lagune, gouvernés par la marée, sont particulièrement efficaces comparativement par exemple au Bassin d'Arcachon, où le temps de résidence est de l'ordre de 19 jours (Plus et al., 2009).

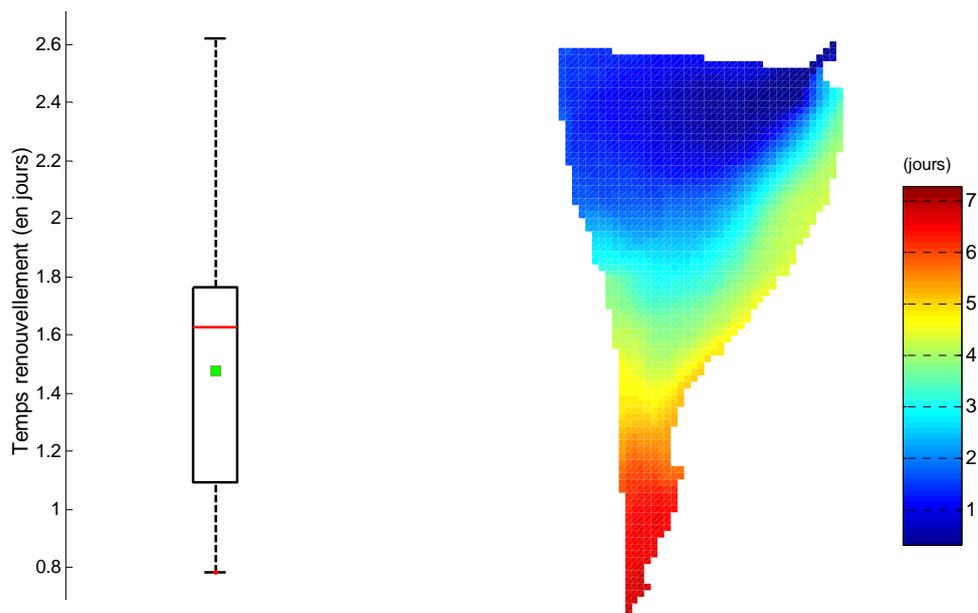


Figure 26 (A gauche) : distributions temporelles en boîte à moustache des temps de renouvellement de la lagune de St-Pierre et Miquelon calculés à partir des débits simulés avec le modèle MARS-3D sur la période du 1er mai au 6 août 2015. (A droite) : cartographie du temps de résidence simulé en période vive-eau au printemps 2015.

A titre de comparaison, les temps de résidence sur les lagunes méditerranéennes de Thau, Bages-Sigean et sur le complexe des étangs palavasiens et de l'étang de l'Or sont également présentés (Figure 7). Dans ces milieux semi-fermés, où la marée est faible (marnage en mer de l'ordre de 20 cm et dans les lagunes de l'ordre de 5 cm), la circulation des masses d'eau à l'intérieur de la lagune est gouvernée par le vent.

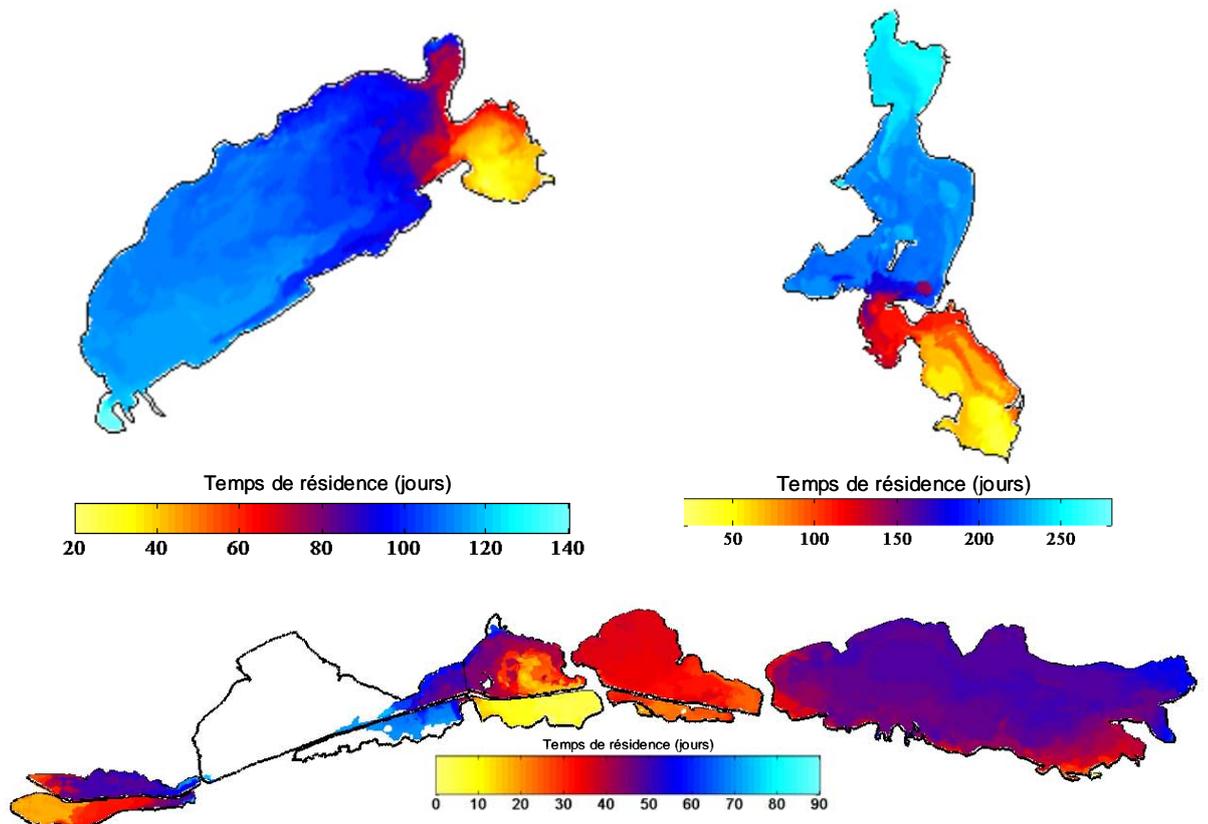


Figure 27 : Cartographie du temps de résidence simulés à l'aide du modèle MARS-3D sur les lagunes de Thau (en haut à gauche), Bages-Sigean (en haut à droite) et l'ensemble du complexe des étangs Palavasiens (en bas).

## Discussion - conclusion

Les diverses acquisitions réalisées (bathymétrie, courantométrie) ont permis l'élaboration de la "carte d'identité" du Grand Etang en terme de superficie, volumes caractéristiques, vitesses des courants, flux circulants et capacité de renouvellement. Ces données, outre l'acquisition de connaissances qu'elles représentent, étaient nécessaires à l'établissement et la validation d'un modèle hydrodynamique pouvant permettre la simulation de l'impact de diverses modifications de la bathymétrie à venir (curages) ou celles des capacités dans les configurations passées.

**Les flux estimés** sur les deux campagnes de mesures, 2014 et 2015 montrent que le Grand Etang est alimenté par une autre source que celle du Goulet, engendrant des bilans la plupart du temps positifs vers l'océan. De plus, cette circulation plus importante sur les flots de jusant est soutenue par des vents dominants de secteur Sud-Ouest qui l'amplifie. La probabilité de phénomènes de percolation d'eaux marines depuis l'océan sous le cordon dunaire ouest, en lien avec le différentiel altimétrique des plans d'eau est émise. L'origine de ces masses d'eau sortant du Grand Etang, (même si la preuve formelle n'en est pas acquise) ainsi que ces phénomènes de percolation, en font un système à la dynamique de fonctionnement originale. Un suivi des variations des hauteurs d'eau en différents points aurait sans doute apporté des éléments complémentaires de compréhension des volumes d'échange liés à cette dynamique (Tunin-Ley, 2014).

**Les taux de renouvellements** par l'eau amenée par le Goulet, estimés d'après ces mesures, sont en diminution, ils passent en moyenne de 13 à 8 % du volume au NMM par marée; ils sont « compensés », au regard de l'analyse des volumes sortants, par des augmentations de masses d'eau d'une autre origine, qui passent en moyenne de 1 à 20 % par marée. L'hypothèse de cette origine « percolant » par le cordon dunaire n'est pas démentie par les différentes corrélations avec les variables de marée ou de météorologie analysées (pression, force et direction du vent).

Les conclusions de l'étude Sogreah de 2000 étaient les mêmes, à savoir que **le goulet était en phase de comblement**. Par ailleurs, le fait que l'étang présente des épisodes de gel plus rares depuis quelques années limite son auto-entretien : les blocs de glaces libérés lors de la débâcle favorisent mécaniquement par érosion le maintien du profil du goulet. Le manque de levés de profils bathymétriques en travers du chenal en début de campagne ne permet pas de conclure sur les divers changements de section mouillée qui ont pu se produire au cours des campagnes, ni de les situer géographiquement. Cependant, les mesures de courant montrent qu'une évolution de ce type a bien eu lieu.

Les taux de renouvellements estimés par les mesures (autour de 10% par marée en moyenne, soit environ 20% par jour) se montrent compatibles avec une exploitation raisonnée et/ou un équilibre de l'écosystème. Les échanges estimés sont comparables ou supérieurs à divers écosystèmes de marais et lagunes atlantiques exploités en aquaculture (Le Moine, 1990) ainsi que ceux des lagunes méditerranéennes (1 à 20 % de renouvellement par jour - Fiandrino, 2012).

Le modèle Mars-3D Lagune a été implémenté. Les résultats de simulations montrent des accélérations des vitesses dans le goulet et sous le pont après le curage ; l'amplitude maximale

du courant passerait de 1 m/s à 1,8 m/s. Au milieu de l'étang, ces variations d'amplitude sont intensifiées également, en restant cependant comprises entre -20 cm/s et + 10cm/s en surface. L'estimation des modifications des échanges par les indices de temps de renouvellements théorique, conçus en théorisant des mélanges et s'écartant de ce fait un peu de la réalité de terrain, ne permettent pas de bien mettre en évidence cette évolution des renouvellements. En effet, les temps de renouvellements théorique sont très courts, de l'ordre de la journée, qui est l'unité d'évaluation de l'indice. Les temps de résidence vont de 1 à 7 jours, du Nord-Ouest à la pointe Sud de l'étang, et sont donc complètement compatibles avec les usages aquacoles.

Si ces volumes en jeu et les indices estimés paraissent suffisants pour soutenir une aquaculture de type extensif, le fait qu'une fraction de plus en plus importante vienne (probablement) d'une percolation sous le cordon dunaire pose un problème de qualité des eaux d'alimentation. Si cette hypothèse est confirmée, cette eau est une eau filtrée qui, si elle peut aider au maintien d'une population piscicole, est défavorable aux organismes filtreurs qui se nourrissent du phytoplancton en suspension dans l'eau. Du point de vue environnemental et de maintien de la biodiversité, on ne peut donc que se prononcer favorablement pour un entretien du goulet visant à maintenir une section mouillée définie comme adaptée au maintien de l'équilibre voulu.

Les travaux prévus en objectifs de ce contrat ont été réalisés, mais les indices utilisés ne nous permettent pas d'estimer réellement l'impact d'un curage sur la situation de 2014 modélisée. Les mesures 2015 montrant un ensablement du chenal, il nous paraît important d'apporter des éléments supplémentaires pour motiver la décision d'intervention de curage ou non. Une série de simulations complémentaires au contrat sera donc faite pour parachever le travail qui avait été prévu. Les simulations envisagées par l'Ifremer porteraient plutôt sur des simulations après ensablement, pour estimer l'impact qu'aurait un défaut d'entretien de la section mouillée. Les résultats pourraient en être présentés lors de la restitution d'ensemble prévue au début du mois de juin 2016 à Saint Pierre.



## Bibliographie

Etcheberry Roger, 2006-2010 **Compilation de textes historiques sur Miquelon.**

Fiandrino Annie, Lagarde Franck, Le Gall Patrik, Messiaen Gregory, Chiantella Claude, Roucher Benoit, Meyer Johann (2012). **Développement d'une méthode d'estimation des débits dans les graus de lagunes. Application sur la lagune de Bages-Sigean.** Agence de l'eau, Ref. RST/LER/LR 12-02, 64p.<http://archimer.ifremer.fr/doc/00060/17104/>

Fiandrino Annie, Anaïs Giraud, Sandrine Robin, Christine Pinatel (2012). **Validation d'une méthode d'estimation des volumes d'eau échangés entre la mer et les lagunes, et définition d'indicateurs hydrodynamiques associés.** Rapport de contrats Agence de l'Eau et Région Languedoc-Roussillon 75p. et annexes.

Geyer, W. R., Morris, J. T., Pahl, F. G., & Jay, D. A. (2000). Estuarine science: **A synthetic approach to research and practice.** In J. E. Hobbie (Ed.), **Interaction between physical processes and ecosystem structure ; A comparative approach** (pp. 177–206). Washington, D.C.: Island Press.

Hening Huang (2004), **Index-Velocity Rating Development for rapidly Changing Flows in an Irrigation Canal Using Broadband StreamPro ADCP and ChannelMaster H-ADCP.** Rivers'04, 1<sup>st</sup> International Conference on Managing Rivers in the 21th Century : Issues & Challenges. pp146-154.

Le Moine Olivier, Geairon Philippe, Goraguer Herle, Poitevin Pierre, Robert Stephane, Gouletquer Philippe (2014). **Dynamique de renouvellement des masses d'eaux du Grand Etang de Saint Pierre et Miquelon : rapport préliminaire.** <http://archimer.ifremer.fr/doc/00175/28581/>

Le Moine Olivier, Geairon Philippe, Robert Stephane, Goraguer Herle, Gouletquer Philippe (2015). **Hydrologie du Grand Etang de Miquelon : estimation des flux. Rapport annuel 2014.** <http://archimer.ifremer.fr/doc/00256/36692/>

Le Moine Olivier, Geairon Philippe (2013). **Estimation et caractérisation de la dynamique des flux dans l'estuaire de la Charente.** <http://archimer.ifremer.fr/doc/00120/23096/>

Le Moine Olivier, Buchet Vincent, Fouasson Robert, Palvadeau Hubert (1990). **Elevage semi-intensif de poissons en marais maritimes : Bar Dicentrarchus labrax et Daurade royale Sparus aurata - Résultat obtenus à AQUALIVE (Noirmoutier) en 1988 et 1989.** <http://archimer.ifremer.fr/doc/00080/19132/>

Monsen, N. E., Cloern, J. E., Lucas, L. V., & Monismith, S. G. (2002). **The use of flushing time, residence time, and age as transport time scales.** Limnology and Oceanography, 47(5), 1545–1553. <http://doi.org/10.4319/lo.2002.47.5.1545>

Plus, M., Dumas, F., Stanisière, J. Y., & Maurer, D. (2009). **Hydrodynamic characterization of the Arcachon Bay, using model-derived descriptors.** *Continental Shelf Research*, 29(8), 1008–1013. <http://doi.org/10.1016/j.csr.2008.12.016>

Sloat, John V., Matthew Hull. (2004) **Computing Discharge using the Velocity-Index Method.** SonTek/YSI, Inc. U.S.A.

SOGREAH, 2000 **Reconstruction du pont du Goulet à Miquelon. Etude hydraulique.** *Rapport de contrat Direction de l'Équipement de Saint Pierre et Miquelon. 25 p. et annexes*

Toublanc, F., I. Brenon, T. Coulombier, O. Le Moine (2015). **Fortnightly tidal asymmetry inversions and perspectives on sediment dynamics in a macrotidal estuary (Charente, France).** *Continental Shelf Research, Volume 94, 15 February 2015, Pages 42-5*

Tunin-Ley Alina, Malet Nathalie, Fiandrino Annie, Orsoni Valerie, Baldi Yoann (2014). **Estimation des échanges entre la mer et la lagune de Biguglia : Utilisation de la méthode d'estimation des volumes d'eau échangés entre la mer et les lagunes par différence de hauteurs d'eau.** <http://archimer.ifremer.fr/doc/00214/32525/>

# Hydrologie du grand Etang de Miquelon : Annexes méthodologiques

---



# Annexes méthodologiques

---

## Table des matières

1.1. Traitements spatialisés .....	5
1.1.1. Analyse des photos aériennes.....	5
<i>Géoréférencement</i> .....	5
<i>Vectorisation</i> .....	6
1.1.2. Bathymétrie .....	6
<i>Acquisitions et traitements Grand étang</i> .....	6
<i>Elaboration du modèle volume/cote</i> .....	9
<i>Modélisation de la section mouillée à partir des profils transverses</i> .....	9
1.2. Mesures courantométriques de calibration.....	10
1.2.1. Déploiement du matériel d'acquisition .....	11
<i>Courantomètre horizontal</i> .....	11
<i>Courantomètre vertical</i> .....	12
<i>Jaugeage du goulet</i> .....	13
1.2.2. Calibration et estimation de l'indice de vitesse (' <i>Velocity index</i> ') à l'aide des données verticales et horizontales de courant. ....	13
<i>Mesures horizontales</i> .....	14
<i>Profils verticaux</i> .....	15
<i>Estimation de l'indice de vitesse du chenal</i> .....	16
1.3. Travaux préparatoires à la modélisation .....	19
1.3.1. Bathymétrie .....	19
1.3.2. Élaboration des scénarii envisageables .....	20
<i>Préalables pris en compte</i> .....	20
<i>Estimation sur un profil connu</i> .....	21
<i>Analyse de la situation actuelle</i> .....	22
<i>Scenario envisageable</i> .....	24
<i>Simulations et analyses</i> .....	25
1.3.3. Météo : Roses des vents .....	26



## 1.1. Traitements spatialisés

### 1.1.1. Analyse des photos aériennes

#### *Géoréférencement*

Les orthophotographies de 1952, 1990 et 2005 ont été géoréférencées ; elles illustrent l'évolution géomorphologique du goulet du grand étang de Miquelon (fig. 1 ). On remarque qu'il change en largeur et semble se combler entre 1952 et 1990, puis se rouvrir légèrement entre 1990 et 2005.



Figure 1 : Orthophotographies du goulet, 1952, 1990, et 2005 en A, B, et C respectivement.

## Vectorisation

Les limites du grand étang sont numérisées sous SIG sous deux formes vectorielles (polylignes et polygones) à l'aide du logiciel ArcGIS d'Esri (fig. 2 ). Cette étape est nécessaire à plusieurs tâches. En premier lieu, elle est le passage obligé pour accéder aux calculs de superficie; dans un second temps, le résultat sert de "masque" pour l'interpolation des données de bathymétrie afin d'estimer les volumes.



Figure 2 : vectorisation de la surface du grand étang, polylignes (trait de côte, à gauche), et polygone (surfactive, à droite); état en 2005.

### 1.1.2. Bathymétrie

#### *Acquisitions et traitements Grand étang*

Les différentes campagnes de levés bathymétriques (fig. 3) ainsi que des levés altimétriques (fig. 4) réalisés à pied autour du goulet par la DTAM sont fusionnés en un seul fichier de points. Ensuite, un traitement spatial sous SIG est réalisé en utilisant les fichiers vectoriels précédemment réalisés. Cette opération va permettre la sélection et le traitement spécifique des points se trouvant sous l'emprise du grand étang et du goulet. L'étape suivante consiste à éliminer tous les points en doublon et pratiquer un sous échantillonnage spatialisé, en ne conservant qu'un maillage régulier avec une mesure tous les 0.5 m ou 1m. On obtient ainsi un fichier de points homogènes sur lesquels une interpolation fine (krigeage) est possible.

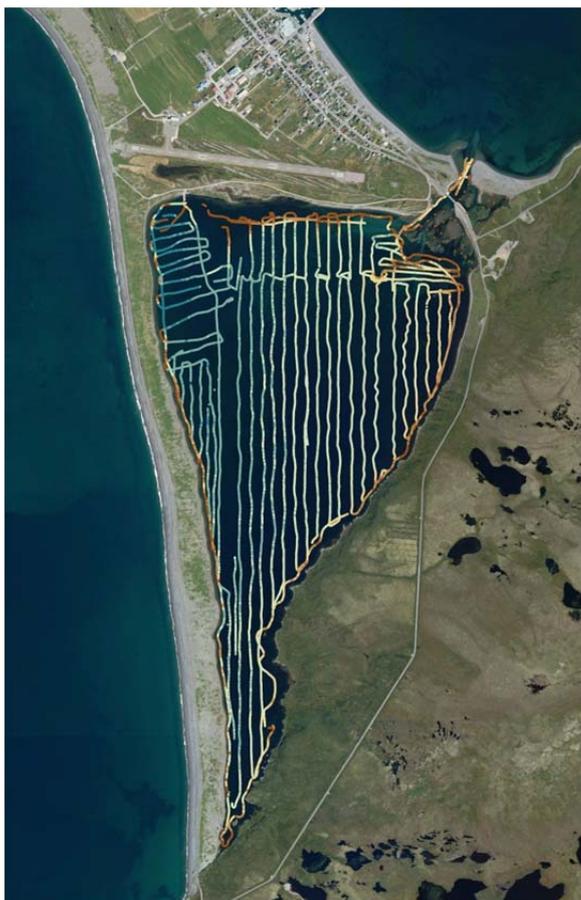


Figure 3 : Levés bathymétriques complétés par les services e la DTAM en 2014.



Figure 4 : Levés altimétriques DTAM autour du goulet

L'interpolation réalisée permet d'obtenir une bathymétrie complète au format raster (grille de données maillées régulières fig. 5 ); un traitement géostatistique est alors appliqué qui permet d'en extraire les isobathes (lignes bleues, fig. 5 ).

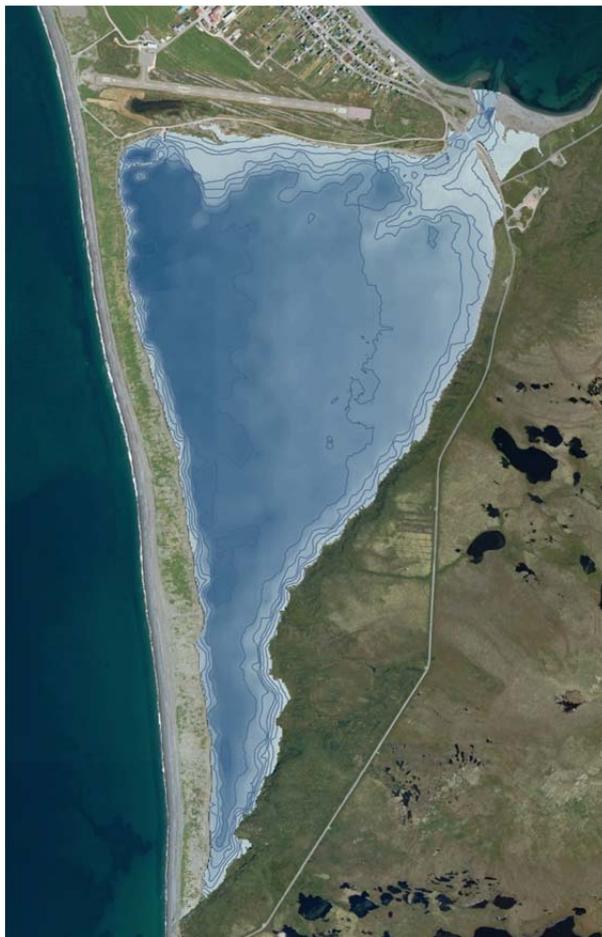


Figure 5 : Bathymétrie DTAM krigée et isobathes extraites.

Une perspective 3D permet de mieux visualiser comment se présentent les fonds du grand étang, et doivent aider à la définition de différents scénarii de curage à envisager (fig 61).



Figure 6 : Vue 3D des fonds du grand étang.

## Elaboration du modèle volume/cote

Des outils spécifiques SIG permettent d'estimer les volumes d'eau du Grand Etang pour chaque valeur d'une échelle de marée allant de l'altitude la plus basse (-0,65m) à la bathymétrie la plus haute (+0,70 m.) par intervalles de 2 cm.

L'ensemble de ces volumes calculés permet d'élaborer la relation liant le volume du Grand étang à l'altitude de la surface libre par rapport au niveau moyen des mers, nécessaire aux estimations des échanges et de renouvellement en eau .

Elle est de la forme suivante :

$$V = 5226270 + (Z * 2162376)$$

Avec  $V$  = volume du Grand Etang

$Z$  = cote de la surface libre en référentiel NMM

$$R^2 = 0.9999$$

Le coefficient  $R^2$  très levé montre une relation très robuste.

Au zéro niveau moyen des mers (NMM), le volume est de 5,23 millions m<sup>3</sup>; au zéro hydrographique théorique d'après le référentiel SHOM, le volume estimé est de : 3,7 millions m<sup>3</sup> (cote des plus basses mers, NMM - 0.70 m, www.sonel.org). Cette valeur correspond au volume "mort" (i.e non soumis au balancement des marées) du Grand Etang. Le volume total aux plus hautes mers théoriques (+ 0,70 m.) est de 67,4 millions m<sup>3</sup> .

Le volume oscillant total (cotes  $\pm 0,7$  m.) est de l'ordre de 3 millions m<sup>3</sup>. Soit une capacité de renouvellement de 45 % du volume maximal.

## Modélisation de la section mouillée à partir des profils transverses

A partir de la bathymétrie de la section transversale du chenal acquise, l'intégration sur la hauteur permet l'élaboration du modèle d'évolution de la section mouillée en fonction de la hauteur d'eau (fig. 7). Celui-ci, multiplié par la vitesse des courants traversant la section mouillée, donnera les valeurs des volumes échangés à la cote altimétrique voulue.

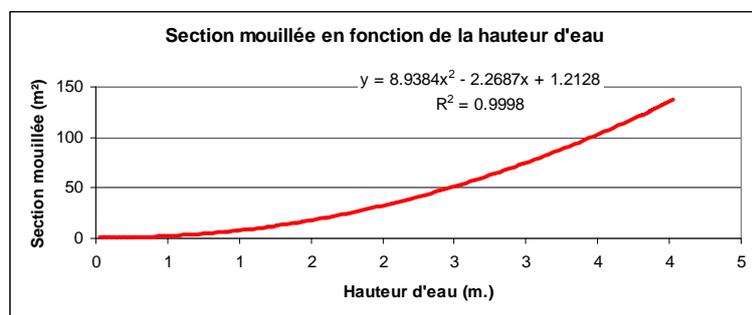


Figure 7 :Modèle d'estimation de la surface mouillée en fonction de la hauteur d'eau et équation correspondante (y= section mouillée, x= hauteur d'eau en mètres).

## 1.2. Mesures courantométriques de calibration

La méthode utilisée se déroule en plusieurs étapes. La première est le recueil et traitement des données de bathymétrie. Ensuite, il est nécessaire d'élaborer une calibration du chenal qui permet d'évaluer le plus précisément possible la vitesse moyenne sur l'ensemble de la surface mouillée, à partir du 'profiler' de courant disposé au fond. Enfin, l'acquisition de longue durée permet l'évaluation des échanges entre l'océan et le Grand Etang par les mesures réalisées au niveau du goulet et leur interprétation en relation avec les coefficients de marée et les conditions météorologiques.

Les acquisitions courantométriques de calibration ont été réalisées lors de la mission des agents Ifremer, en collaboration avec ceux de la DTAM et de l'ARDA. Elles se sont prolongées un peu après le départ des missionnaires Ifremer ; les données exploitables vont du 14 août au 15 septembre. La technique du "Velocity index" vise à estimer l'intensité moyenne du courant sur la section du chenal, à chercher la relation liant cette vitesse moyenne à celle d'un appareil restant à poste fixe qui permet les estimations sur de longues périodes (Henning Huang, 2004). L'estimation de la vitesse moyenne se fait normalement à l'aide d'un courantomètre tracté et celle de longue durée avec des appareils disposés à l'horizontale en travers ou sur le fond du chenal (Fiandrino et al., 2012).

La technique d'acquisition par courantomètre tracté dans les différentes phases de marée n'étant pas matériellement et humainement réalisable, nous avons estimé la vitesse moyenne sur la section par deux courantomètres de façon à échantillonner l'ensemble de la colonne d'eau.

Le positionnement des appareils est représenté dans la figure suivante ainsi que la section qu'ils échantillonnent respectivement. L'objectif initial prévoyait de positionner le Doppler horizontal (HDOP) au niveau des plus basses mer (point rouge, fig. 2), pour optimiser la surface échantillonnée. Lors de l'essai fait à cette position, la puissance des courants et les thalles d'algues circulantes ont renversé le dispositif contraignant son placement plus haut sur l'estran (point orange, fig. 9).

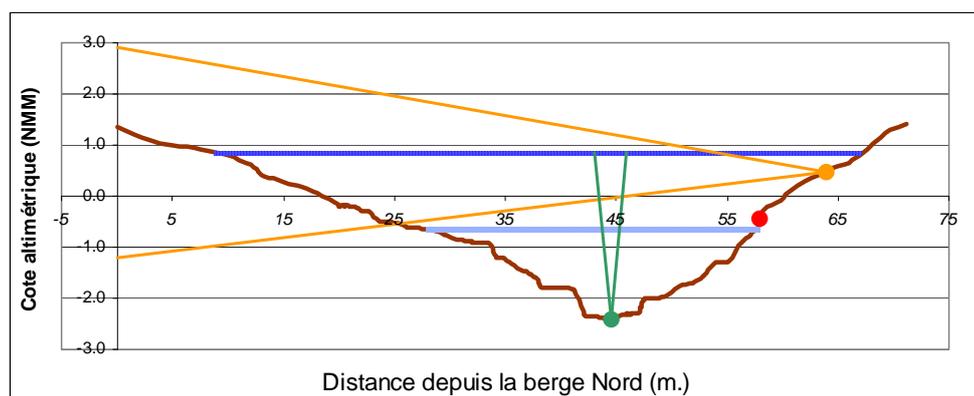


Figure 9 : Positionnement des courantomètres dans le profil du chenal; la rive Nord (à gauche) est à l'origine; les rayons de couleurs simulent les surfaces échantillonnées par les Doppler (vertical VDOP en vert et horizontal HDOP en orange).

## 1.2.1. Déploiement du matériel d'acquisition

### *Courantomètre horizontal*

Le positionnement et le déploiement des deux courantomètres Doppler ont été réalisés : le premier est positionné en surface pour des mesures horizontales, et le second au fond pour des mesures verticales. Le dispositif transversal a été posé et suivi par l'Ifremer, le vertical par la DTAM; des moyens lourds ont été mis en œuvre : tracto-pelle, plongeurs.

Le sondeur de superficie (dit horizontal, HDOP) a été monté sur un dispositif permettant de faire varier sa profondeur d'une cinquantaine de centimètres au besoin. Un socle posé sur le sol permet de le lester à l'aide de galets (fig. 10).

Le premier positionnement visait à acquérir les données les plus superficielles possibles; l'appareil était donc à sec aux basses mers. Par la suite il a été disposé plus profond, de manière à obtenir le maximum de données dans le temps.



Figure 10 : Courantomètre transversal : montage de la structure porteuse (photo du haut), dispositif en place (bas, gauche) et vue générale (bas, droite).

## Courantomètre vertical

L'appareil, disposé au fond, mesure à la verticale de sa position; il est dit vertical (VDOP). La confection d'un "sarcophage" en béton a été nécessaire pour protéger l'appareil, et pouvoir le disposer le plus près du fond possible. Cet aspect est important, car une zone "blanche", sans données existe au-dessus des capteurs, et les données les plus proches du fond, perturbées par les matières en suspension, sont souvent aberrantes.

La fabrication et la préparation du sarcophage ont été réalisées par et avec l'aide de la DTAM Miquelon, dans ses ateliers (fig. 11 a & b). La calibration, la paramétrisation et le déploiement sont ensuite effectués (fig. 11 c). Pour faciliter la pose du sarcophage, un coffre de contreplaqué a été construit dans les ateliers et par les agents DTAM. Il est destiné à être mis en place par les plongeurs sur le site de mesures; ceux-ci peuvent ensuite le vider (eg. enlever sable et galets à l'intérieur), de façon à pratiquer l'espace nécessaire et faciliter la pose du sarcophage (fig. 11 d).



Figure 11 : Préparation du dispositif d'installation du courantomètre vertical : a) sarcophage de protection b) dispositif complet avec le courantomètre et ses piles (en position inverse de l'acquisition) c) calibration de l'appareil d) système complet, courantomètre en position dans le sarcophage et coffre de protection pour mise à l'eau.

Une fois l'ensemble du matériel déployé sur la berge, un tractopelle a assisté les plongeurs (DTAM, ARDA) pour finaliser la mise à l'eau (fig. 12 ).



Figure 12 : Courantomètre vertical : finalisation de la mise à l'eau du dispositif; un tracto-pelle met le sarcophage à disposition des plongeurs qui transportent celui-ci jusqu'au coffre (qu'ils ont pré-positionné et évidé) à l'aide d'un parachute.

### *Jaugeage du goulet*

Le traitement du signal du courantomètre permet d'acquérir la mesure de la hauteur d'eau sous l'appareil, sur les points dont le DGPS mesure la position (longitude latitude) et l'altitude par rapport au référentiel géodésique (fig. 13). Une opération simple permet alors de calculer la cote altimétrique du fond dans le référentiel de référence à chaque position : c'est le profil bathymétrique en travers du chenal



Figure 13 : Acquisition conjointe DTAM/Ifremer à l'aide d'un courantomètre Doppler "Top-Bottom" et d'un DGPS pour acquisition des vitesses de courant sur la section et raffinement du profil bathymétrique du site de mesures.

1.2.2. Calibration et estimation de l'indice de vélocité ('*Velocity index*') à l'aide des données verticales et horizontales de courant.

## Mesures horizontales

### Variabilité de l'intensité moyenne des courants de sub-surface sur la largeur du goulet au cours du cycle de marée

L'intensité du courant superficiel sur la largeur du goulet est très variable. Les niveaux les plus élevés se situent dans la partie la plus profonde du chenal (les 30 premiers "bins" -cellules mesurées-, correspondant à une quinzaine de mètres de l'appareil HDOP). Au-delà de cette distance, les intensités oscillent autour de zéro dans toutes les configurations de marée. La figure 14 présente la situation au 10 septembre 2014 lors du plus fort coefficient de marée (114). Les intensités positives sont dirigées vers le Nord et sortent donc du goulet. Celles en négatif, à l'inverse, entrent dans le Grand Etang.

Les intensités atteintes dépassent 2 m/s en flot et atteignent pratiquement 2,5 m/s en jusant (fig. 14 gauche et droite respectivement), les deux périodes (flot/jusant) étant estimées en fonction de la hauteur d'eau mesurée et non du marégramme de prévision.

De façon similaire à l'observation du marégramme, plusieurs remarques sont à formuler.

- Dans la période de flot (la hauteur d'eau augmente, courbe de gauche), on constate que les courbes de basse mer (BM) et basse mer +1 heure (BM+1) sont légèrement positives. Cela signifie que, bien que la hauteur d'eau augmente, l'eau continue à sortir de l'Etang. A partir de BM+3 le courant s'inverse, puis forçit régulièrement jusqu'à BM+5. La renverse s'amorce ensuite jusqu'à la pleine mer avec la diminution de l'intensité.
- Dans la période de jusant, à pleine mer, l'eau continue à circuler vers l'étang avec de fortes intensités. A l'étale (PM+1), les intensités sont voisines de zéro. Elles augmentent ensuite très fortement (pic à 2,35 m/s à PM+2 ) pour diminuer à peu près régulièrement ensuite jusqu'à la basse mer qui dans ce cas correspond à l'étale altimétrique.

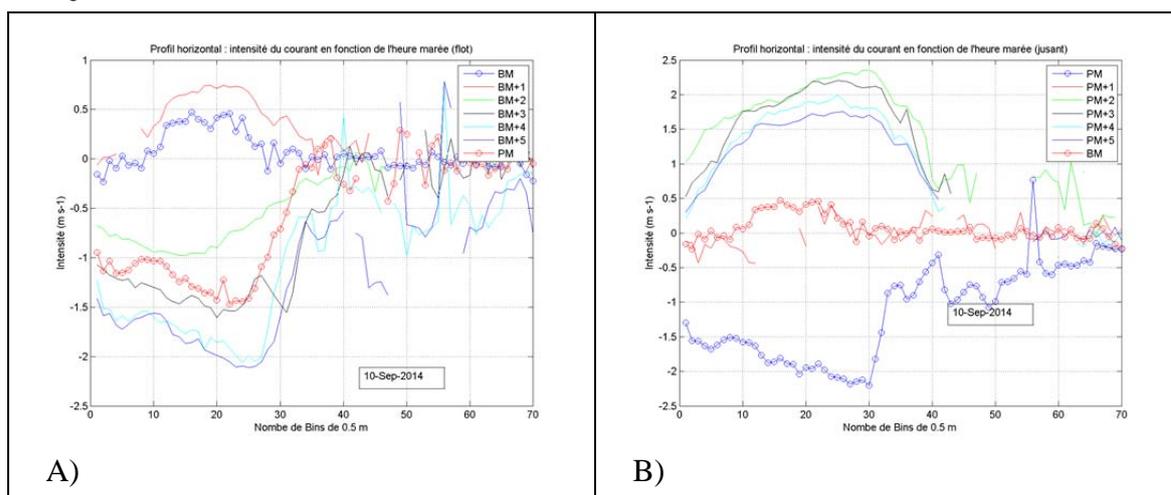


Figure 14 : Intensité du courant dans la tranche d'eau superficielle; A :de basse mer (BM) à pleine mer mesurée (flot), et B: de pleine à basse mer mesurée (jusant). Les abscisses correspondent à un nombre de cellules de mesures (Bins) depuis la berge.

## Intensité moyenne en sub-surface durant la période d'acquisition

Les courants moyens en sub-surface sur la section suivie oscillent entre -1,48 m/s en flot, phase de renouvellement du Grand Etang et + 1,87 m/s en jusant, période de vidange de l'étang (fig. 15). On notera que les plus fortes intensités sont atteintes dans tous les cas en début de phase de déchet (phase de la marée où les coefficients sont en diminution).

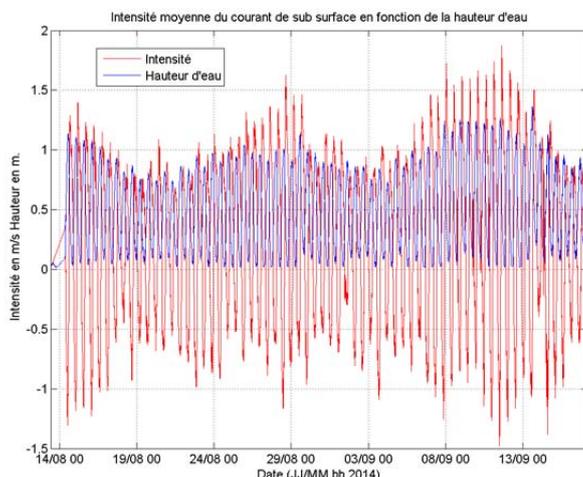


Figure 15 : Intensité moyenne du courant et hauteur d'eau.

## Profils verticaux

La campagne de mesures courantométriques 'verticales' a duré du 14 Août 2014 au 5 novembre 2014. Le période dite de "calibration", en acquisition concomitante des deux appareils s'est déroulée de mi-août à mi-septembre.

### Variabilité de l'intensité sur la colonne d'eau du goulet dans le cycle de marée

La variabilité de l'intensité du courant est très faible dans la colonne d'eau (fig. 16). En flot comme en jusant, l'intensité varie au fond de la même façon qu'en surface. On remarquera que les intensités sont les plus élevées au moment de la plus basse mer, corroborant les observations du courantomètre de surface. Dans les deux cas, les courants les plus faibles sont observés deux heures après la plus haute mer mesurée.

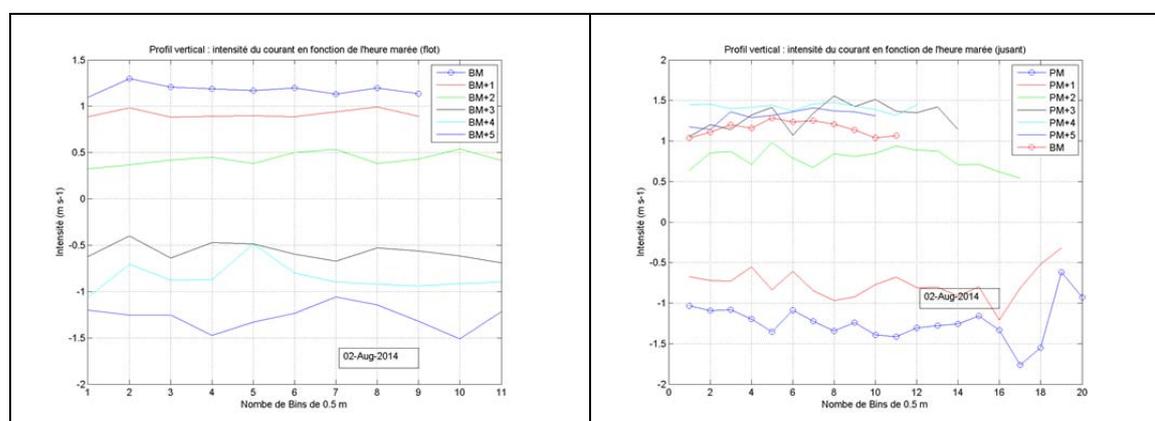


Figure 16 : Variabilité de l'intensité du courant sur la colonne d'eau; valeurs en flot (gauche) et jusant (droite);

Les mesures réalisées montrent qu'il existe un décalage de hauteur d'eau entre la marée prévue (SHOM) à Saint Pierre et à l'entrée du goulet, pouvant attendre une heure trente. Les intensités maximales de courant sont identifiées lors des pleines mers prévues, donc de l'ordre d'une heure trente avant la plus haute mer mesurée.

### Intensité moyenne dans la colonne d'eau durant la période d'acquisition

Lors de la période de mesures, l'amplitude moyenne de l'intensité des courants observée sur la colonne (VDOP) oscille de -2 à 2 mètres par seconde. L'intensité moyenne dans le chenal principal est donc supérieure à celle de sub-surface (fig. 15 & 17).

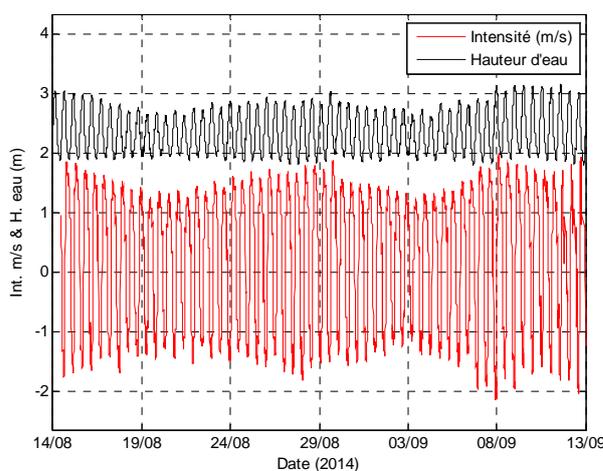


Figure 17 : Intensité moyenne du courant sur la colonne d'eau et hauteur d'eau mesurée par le courantomètre vertical.

### *Estimation de l'indice de vélocité du chenal*

Cette estimation est nécessaire car elle sert à corriger la vitesse moyenne mesurée par le courantomètre vertical de l'influence des frottements sur les bords du chenal, à l'aide des résultats du HDOP; on obtient une meilleure estimation de la vitesse moyenne sur la section. Cela correspond au jaugage du chenal.

Les divers traitements élaborés pour filtrer les données des vitesses hors gamme (dues à des mesures faites dans l'air ou des réflexions parasites sur les galets du chenal) se sont révélés plus compliqués à mettre en œuvre que prévu. Pour minimiser le poids des valeurs suspectes dans l'étape de calibration, seules les mesures faites sous 0,5 cm d'eau au moins ont été retenues pour éviter les mesures "aériennes". Les cellules excédant la ligne de fil d'eau à basse mer ont été également éliminées pour filtrer les réflexions parasites du fond de la berge opposée. La relation entre la vitesse moyenne des deux appareils (HDOP et VDOP), pondérée de la surface échantillonnée, est ensuite mise en relation avec celle du VDOP seul, pour estimer l'intensité moyenne sur l'intégralité de la section du chenal depuis cette mesure. La relation a été établie en revif et en déchet (phases d'augmentation ou de diminution des coefficients de marée) en recherchant le meilleur coefficient de corrélation.

Le résultat montre une dispersion et des plus fortes valeurs dans les périodes de jusant surtout en période de revif (fig. 11, A, partie positive, sur la droite du graphe). La relation utilisée minimise ces valeurs les plus fortes dans les périodes de jusant, celles de flot étant mieux représentées (fig. 18 A & B).

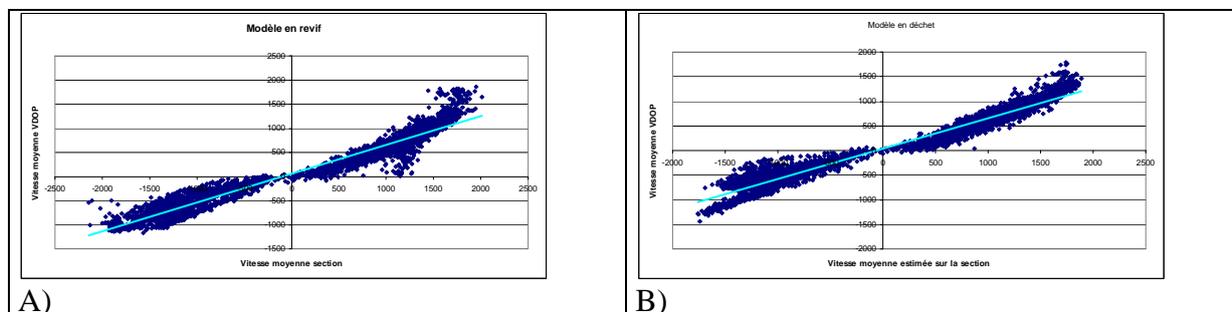


Figure 18 : Estimation de la vitesse moyenne du courant sur la section en fonction de celle mesurée par le courantomètre de fond (VDOP); modèles revif (A) et déchet (B)

La relation entre la vitesse moyenne mesurée sur la colonne d'eau et l'estimation de celle sur la section complète sont les suivantes :

En revif :  

$$I_s = (0.5967 \times I_c) + 61.154$$

$$R^2 = 0.9446$$

En déchet :  

$$I_s = 0.6158 \times I_c + 34.093$$

$$R^2 = 0.9544$$

Avec  $I_s$  = Intensité moyenne du courant sur l'ensemble de la section mouillée

$I_c$  = Intensité moyenne mesurée sur la colonne d'eau.

Les coefficients de détermination  $R^2$  obtenus, de 0,95 dénotent une relation robuste.

L'intensité estimée sur l'ensemble de la section par les relations mises au point est proche de la moitié de celle mesurée sur la seule colonne d'eau par le VDOP. Cette différence est due à la morphologie du chenal, très évasé, et à rugosité très importante du fond de galets.

Elle évolue entre 1,11 m/s en flot à 1,22 m/s en jusant, avec une moyenne de 0,69 m/s en flot et de 0,55 en jusant. Les courants de flot sont plus intenses que ceux de jusant sur l'ensemble de la période, de mi-août à début septembre.



## 1.3. Travaux préparatoires à la modélisation

Ils sont le préalable nécessaire l'opération de simulation. Ils se déroulent en plusieurs phases :

- Conversion de la bathymétrie au format et exigences du modèle Mars
- Définition des scénarii souhaités et sélection de ce qui est possible
- Calibration et paramétrisation du modèle
- Simulations
- Post traitement et analyses des résultats

### 1.3.1. Bathymétrie

Le modèle numérique de terrain réalisé en 2012 a été affiné au niveau du Goulet à l'aide des deux derniers relevés des profils au niveau du pont réalisés par la DTAM (fig.19).



Figure 19: Bathymétrie 2015 mise à jour

## 1.3.2. Élaboration des scenarii envisageables

Les scenarii élaborés le sont sur la base des seuls profils en travers disponibles, celui réalisé lors de la mission Ifremer en 2014, et les deux acquis par la DTAM depuis le pont. Le nombre de profils en travers étant trop faible pour pouvoir réaliser une interpolation précise, la réflexion n'est faite que sur ceux acquis sur le terrain.

### *Préalables pris en compte*

- Les terrassements doivent se faire *a minima* pour minimiser les bouleversements écologiques de la zone ainsi que les coûts.
- On évite les affouillements trop près du pont pour ne pas déstabiliser l'ouvrage.
- Vu la faiblesse du marnage ( $\sim 1,5$  m. entre  $-0,65$  et  $+0,85$  m.), on privilégie une section mouillée développée en largeur et limitée à la cote sol sous le pont.
- On vise la calibration du Goulet pour égaliser (au moins) la section mouillée maximale du pont, de façon à ne pas provoquer d'accélération des courants préjudiciable à l'équilibre du système.

Les profils en travers mesurés (fig.20) nous permettent d'estimer les sections mouillées sur les levés réalisés (fig 21). On note qu'elle est plus importante au niveau du pont qu'à celui du point de mesure Doppler (fig 20, courbe verte).

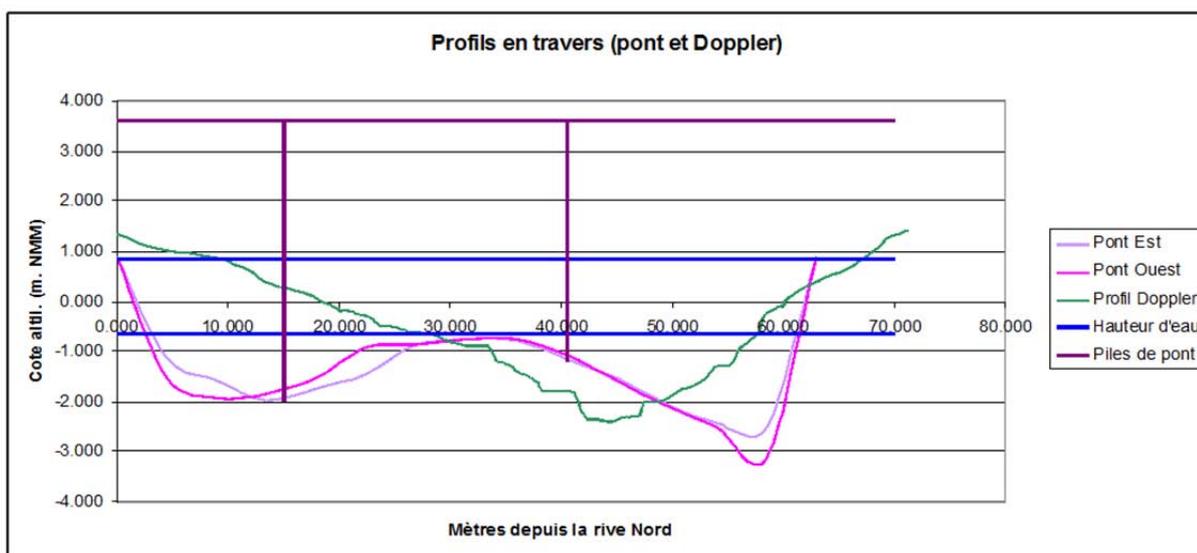


Figure 20 : Profils en travers (cotes altimétriques maxi et mini de la surface libre en bleu)

Les sections mouillées, qui sont en relation directe avec les débits transitant donnent un élément d'évaluation des calibrages à réaliser. Si on considère l'objectif d'atteinte de la section minimale au niveau du pont comme réaliste, on déduit rapidement que le profil « Doppler » (D) doit être élargi (fig.21). Les sections mouillées sous le profil Ouest (O) du pont donnent 77

et 165 m<sup>2</sup> à basse mer et pleine mer respectivement. Elles sont de 27 et 94 m<sup>2</sup> pour ce qui est du profil D.

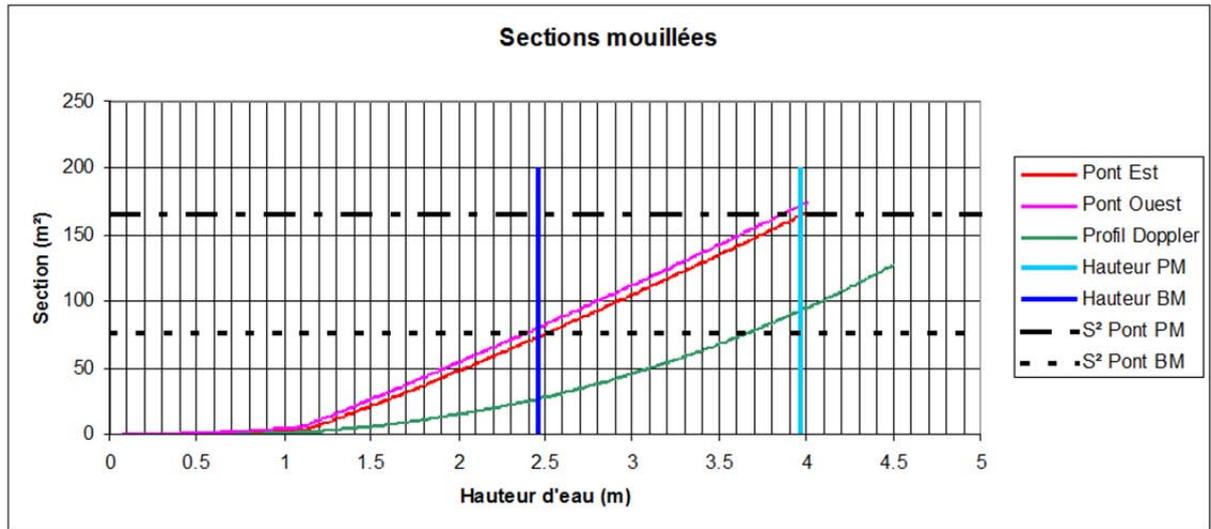


Figure 21 : Sections mouillées sur les profils levés, en regard des niveaux de basses et hautes mers (BM PM), le zéro de la hauteur d'eau sur l'axe des abscisses correspond à la profondeur maximale du profil pont-ouest (3,1 m, cf. fig.2)

### Estimation sur un profil connu

En fixant une cote (-2m dans le cas présenté) pour le fond du chenal, on peut estimer quelle est la largeur nécessaire pour atteindre la section voulue (77<sup>2</sup> à basse mer). Afin d'évaluer l'élargissement nécessaire, a méthode suivie a été de simuler l'élargissement en profils successifs du chenal (fig.4). Les pentes des berges ont été conservées, car considérées en équilibre en fonction des matériaux les consistant.

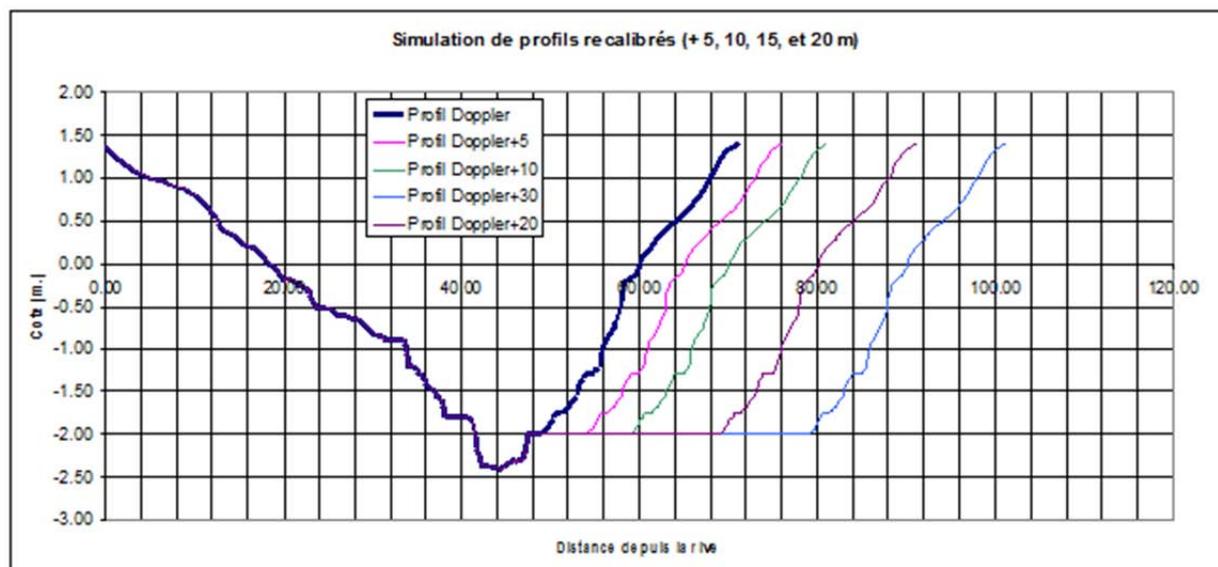


Figure 22 : profils testés pour évaluation de la largeur à atteindre

La section mouillée théorique a été estimée dans chacun des cas-profil (fig 23). On déduit de ces évaluations que pour atteindre les 77 m<sup>2</sup> de section du pont il faudrait élargir le chenal d'environ 30 m à la cote -2m au niveau du profil Doppler, pour regagner les 50 m<sup>2</sup> de section supplémentaires nécessaires (fig.5). En gardant les pentes actuelles, la section mouillée à pleine mer serait même légèrement augmentée (185 m<sup>2</sup>) par rapport à celle du pont (165 m<sup>2</sup>).

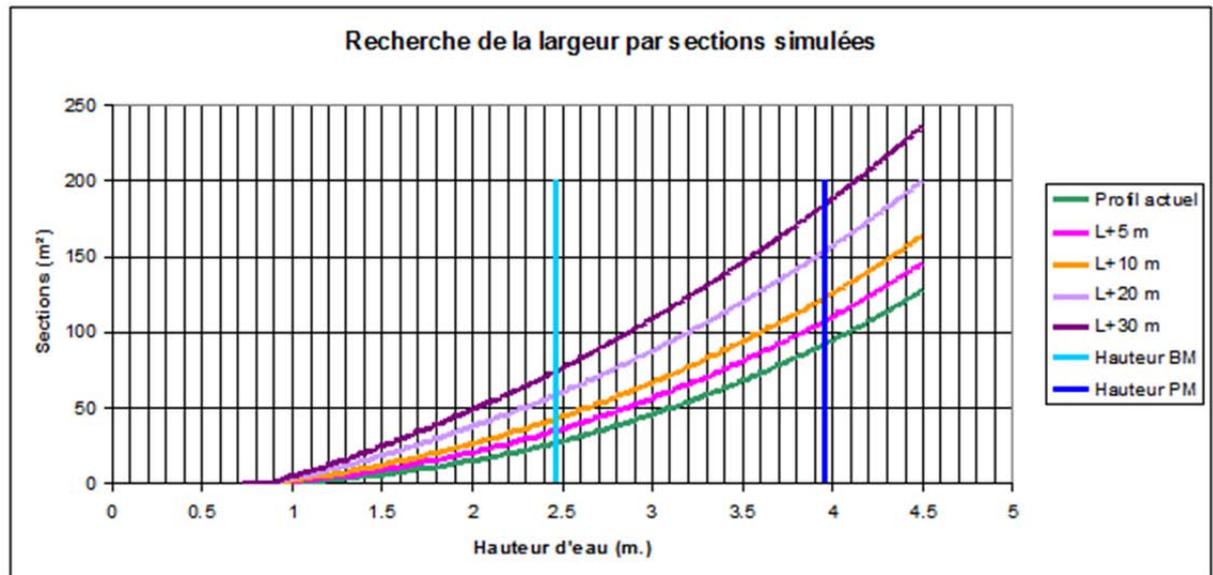


Figure 23 : estimation des sections mouillées en recherche de la largeur de chenal

### *Analyse de la situation actuelle*

En l'absence d'autres profils mesurés, nous en avons extrait de la bathymétrie disponible (Le Moine & al, 2014, fig 24 & 25). La section mouillée a ensuite été calculée sur chacun d'eux, pour la comparer avec celle de référence estimée au niveau du pont.

La résolution des acquisitions bathymétriques dans les zones les plus hautes étant plus faible que dans l'étang ou le fond du chenal, nous ne l'utilisons qu'avec prudence.



Figure 24 : transects tracés pour extraction du profil

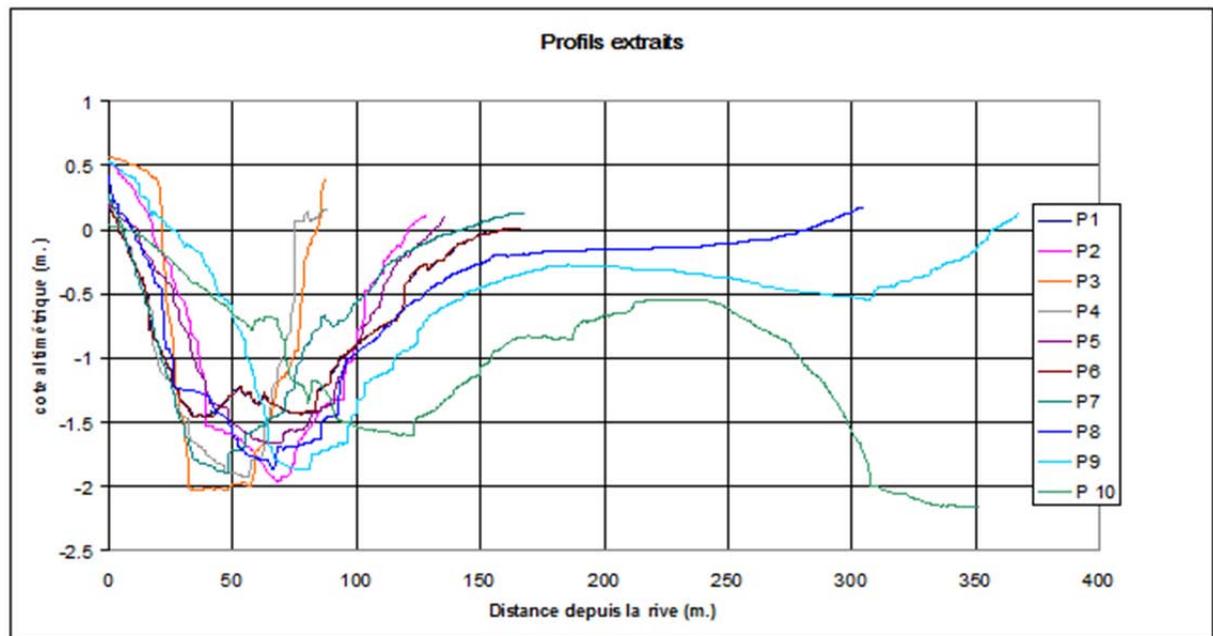


Figure 25 : Profils transverses extraits de la bathymétrie

Au regard des estimations, on s'aperçoit que tous les profils testés ou presque ont une section mouillée inférieure à celle du pont à basse mer, hormis les profils 10 et 11 (fig. 22 et 23).

A basse mer, les estimations dans la partie amont du chenal sont inférieures à la section de référence (fig. 25, P1 à P6), cependant, le curage nécessaire sera moins important que celui

estimé ci-dessus, le chenal étant déjà plus large ; ne manquent que 20 à 25 m<sup>2</sup> de section.

A haute mer, les seuls profils en aval dont la section est inférieure à celle de référence sont P7, 8 et 9, dont le déficit de section reste en-dessous d'une dizaine de m<sup>2</sup> (fig.26 & 27).

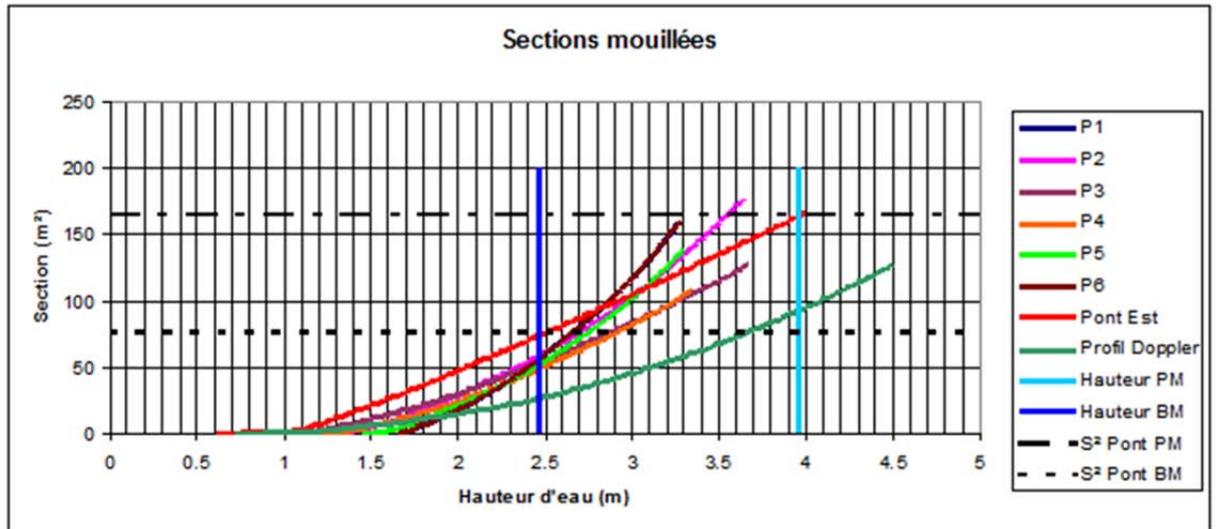


Figure 26 : Sections mouillées profils 1 à 6 (amont du pont). Profil de référence (Pont Est) en rouge  
Hauteurs de Haute et Basse Mer (HM & BM)

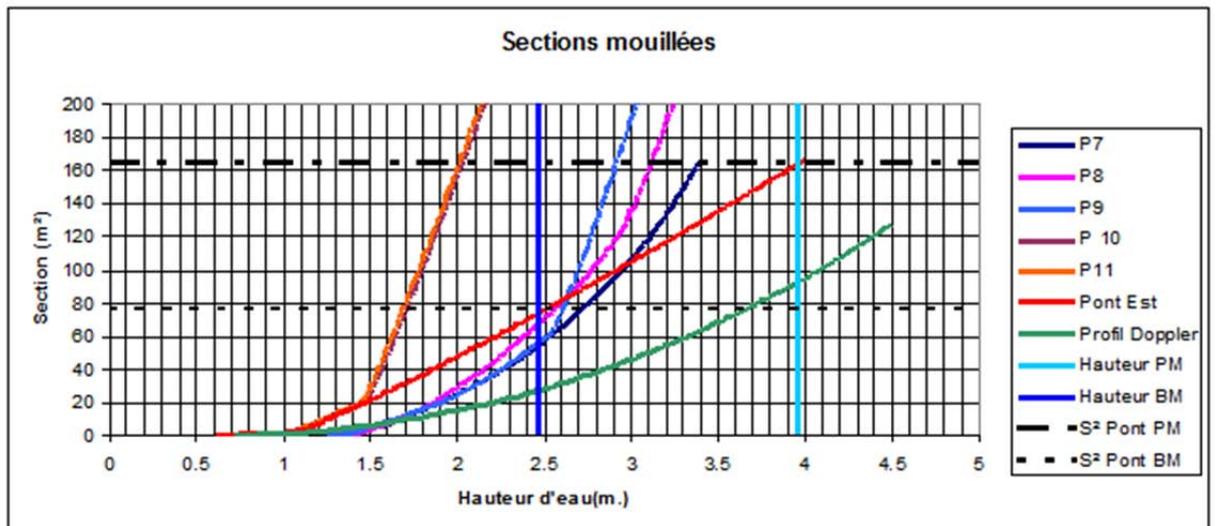


Figure 27 : Sections mouillées profils 7 à 11 (côté Etang). Profil de référence en rouge, hauteurs de  
Pleine et Basse Mer (PM & BM)

## Scenario envisageable

Au vu des résultats ci-dessus, dans l'optique de ne pas modifier les sols sous le pont, il apparaît que le curage dans la portion Est du chenal soit la priorité. L'objectif pourrait être de le conformer au résultat ci-dessus, soit 30 m de large à la cote -2 m, correspondant à une section mouillée d'environ 77 m<sup>2</sup> à la cote de basse mer (-0,65 m. cote NMM).

## *Simulations et analyses*

La stratégie est d'analyser en relatif si les modalités du curage ci-dessus apportent un bénéfice ou non. La proposition Ifremer de faire une simulation avec la bathymétrie actuelle, avec les forçages marée et météo réalistes, puis une seconde après modification de la bathymétrie reproduisant le curage proposé a été acceptée lors de la téléconférence de mise au point ifremer – DTAM du 15 octobre 2015.

L'évaluation des avantages se fera par analyse des écarts d'indices spatialisés de renouvellement entre les deux simulations retenues.

### 1.3.3. Météo : Roses des vents

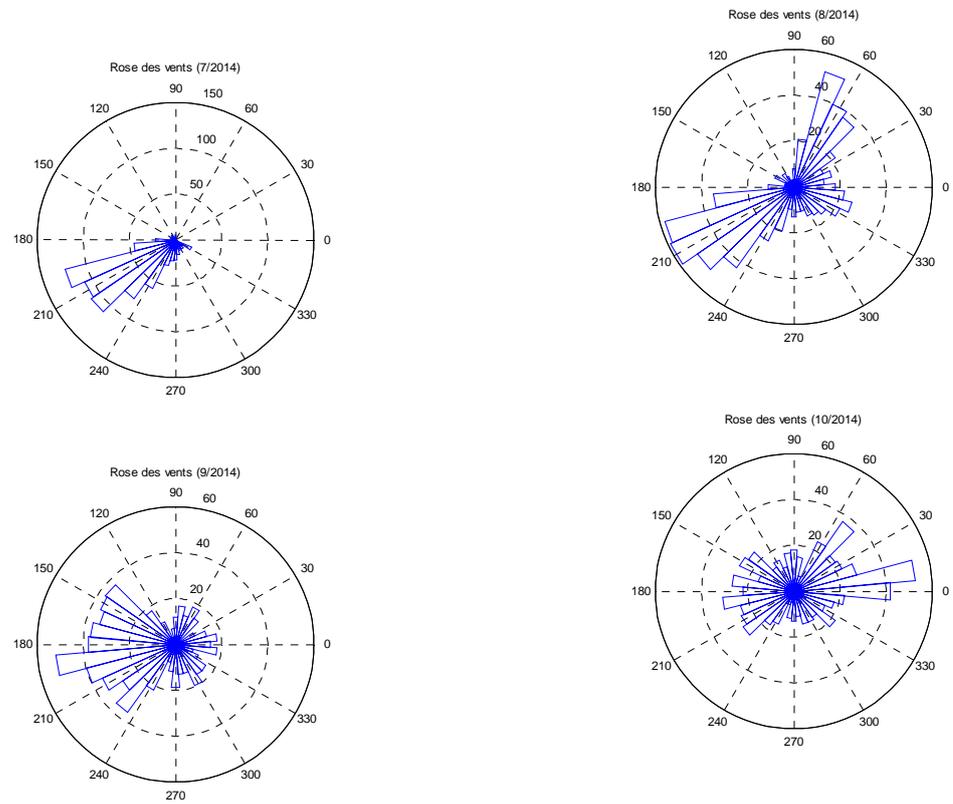


Figure 28 : roses des vents campagne 2014; de haut en bas et gauche à droite : juillet, août, septembre et octobre

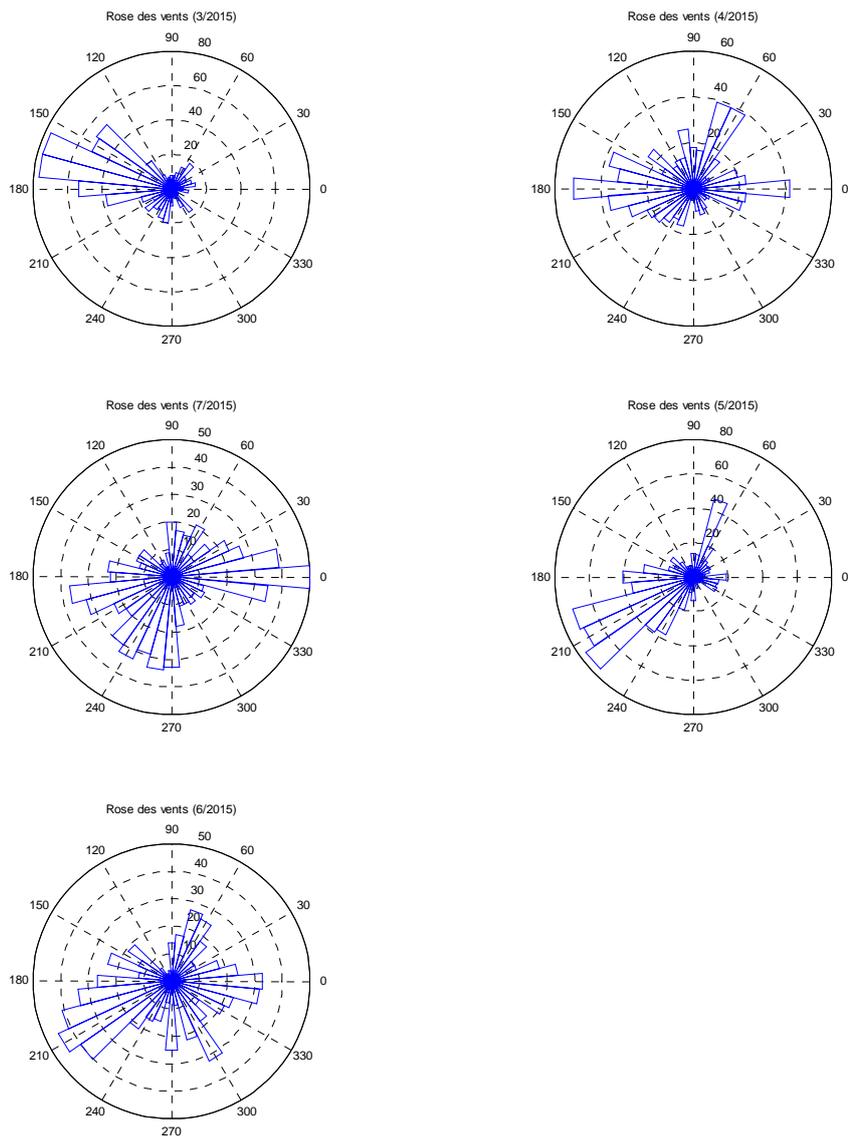


Figure 29 : roses des vents campagne 2015; de haut en bas et gauche à droite : juillet, août, septembre et octobre