

Hydrologie du Grand Etang de Miquelon : estimation des flux

Rapport annuel 2014.

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



Hydrologie du Grand étang de Miquelon

Rapport annuel 2014.

Fiche documentaire

Numéro d'identification du rapport : Diffusion : libre : <input checked="" type="checkbox"/> restreinte : <input type="checkbox"/> interdite : <input type="checkbox"/> Validé par : P. Gouletquer Adresse électronique : Phillippe.Gouletquer@ifremer.fr		date de publication : Mars 2015 nombre de pages : 29 bibliographie : illustration(s) : 32 langue du rapport : FR
Titre de l'article: Hydrologie du Grand Etang de Miquelon		
Contrats DTAM/CT-SPM/Ifremer Rapport intermédiaire <input checked="" type="checkbox"/> Rapport définitif <input type="checkbox"/>		
Auteur(s) principal(aux) : O. Le Moine, P. Geairon	Organisme / Direction / Service, laboratoire Ifremer ODE/Littoral/LERPC	
Encadrement(s) :		
Cadre de la recherche : Soutien à l'aquaculture de Saint Pierre et Miquelon		
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	
Résumé: <p>Le programme vise à évaluer les flux hydrologiques entre le Grand Etang de Miquelon et l'océan. Les levés bathymétriques et les acquisitions courantométriques réalisés du 14/08/2014 au 05/11/2014 ont permis :</p> <p>L'évaluation des surfaces (227 Ha) et volumes caractéristiques (total : $7,1 \times 10^6 \text{ m}^3$, oscillant $42,8 \times 10^6 \text{ m}^3$ (40 %) mi-marée $5,2 \times 10^6 \text{ m}^3$)</p> <p>L'estimation d'un indice de vitesse du chenal pour l'évaluation de la vitesse moyenne des courants</p> <p>L'évaluation des flux, en flot et jusant respectivement, soit :</p> <ul style="list-style-type: none"> - débits instantanés : maxima à 85,3 et 65,3 m^3/s moyens 34,2 et 26,4 m^3/s. - flux circulants par marée : maxima à 0,96 et $1 \times 10^6 \text{ m}^3$, moyens : 0,28 à 0,41 m^3 - renouvellements moyens : 10,7% par marée. <p>Le constat d'asymétrie du temps de marée: le temps de flot étant inférieur à celui de jusant (4,9 h. vs 7,4 h), qui implique des flux sortants bien supérieurs à ceux entrants par le chenal. L'hypothèse d'une alimentation secondaire par percolation est émise.</p>		
<p>Abstract: This study aims to assess the hydrological fluxes between the 'Grand Etang' of Miquelon and the oceanic part. Bathymetric surveys and Doppler currentmeter data acquisitions were carried out from August 14th, 2014 to November 5th, 2014 to allow the following estimates :</p> <p>Total area (227 Ha) and characteristics volumes (total : $7,1 \times 10^6 \text{ m}^3$; oscillating $42,8 \times 10^6 \text{ m}^3$ (40 %); half-tide $5,2 \times 10^6 \text{ m}^3$)</p> <p>Velocity Index of channel to evaluate the average current speed at cross-section channel</p> <p>Fluxes, on flood and ebb tide respectively :</p> <ul style="list-style-type: none"> Instantaneous flow : maxima at 85,3 and 65,3 m^3/s ; mean 34,2 and 26,4 m^3/s. Circulating fluxes by tide : maxima 0,96 and $1 \times 10^6 \text{ m}^3$, mean : 0,28 and 0,41 m^3 Mean renewal : 10,7% each tide. <p>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.</p>		
Mots-clés: flux hydrologiques, courantométrie, bathymétrie, Grand Etang Miquelon Words keys: hydrological fluxes, currentmeter data acquisition, bathymetry, Grand Etang Miquelon		

Préambule	11
Contexte	13
Objectifs fin 2014-début 2015	13
Conclusions du rapport préliminaire	13
Objectifs 2014.....	14
Matériels et méthodes utilisés pour l'estimation des flux hydriques.....	15
Données acquises.....	15
Levés bathymétriques.....	15
Acquisitions courantométriques de calibration	16
Acquisitions courantométriques pour l'estimation des flux	16
Pré-traitements réalisés	17
Modélisation du volume en fonction de la cote de la surface libre	17
Modélisation de la section mouillée à partir des profils transverses	19
Calibration et estimation de l'indice de vitesse (' <i>Velocity index</i> ') à l'aide des données verticales et horizontales de courant.	21
Résultats	23
Estimation de l'indice de vitesse du chenal	23
Débits et volumes instantanés.....	25
Flux hydriques par marée	26
Bilans volumétriques par marée	27
Estimation du renouvellement	28
Discussion - conclusion.....	31
Perspectives 2015.....	31
Bibliographie	32

Sommaire

Table des illustrations

Figure 1 : Levés bathymétriques réalisés par les agents DTAM en 2014.....	15
Figure 2 : 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).....	16
Figure 3 : Cote de la surface libre : données marégraphe de Saint Pierre et acquisitions du courantomètre.....	18
Figure 4 : Fenêtre d'outil d'estimation des volumes sous le logiciel ArcGis.....	18
Figure 5 : Equation d'estimation du volume d'eau du Grand Etang en fonction de la cote de la surface libre (référentiel NMM)	19
Figure 6 : 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).	20
Figure 7 : 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.	21
Figure 8 : Intensité moyenne du courant et hauteur d'eau.....	22
Figure 9 : Variabilité de l'intensité du courant sur le colonne d'eau; valeurs en flot(gauche) et jusant (droite);.....	22
Figure 10 : Intensité moyenne du courant sur la colonne d'eau et hauteur d'eau mesurée par le courantomètre vertical.....	23
Figure 11 : 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)	24
Figure 12 : Intensité des courants estimés, en revif et en déchet sur la période de calibration A) et application de la relation sur toute la période B).	25
Figure 13 : Intensité estimée du courant en fonction de la hauteur d'eau	25
Figure 14 : Débits instantanés et hauteurs d'eau (A), et volumes instantanés dans le chenal du Grand Etang pendant la période d'acquisition	26
Figure 15 : Flux estimés océan - Grand étang par marée entre le 20 août et le 04 septembre 2014	27
Figure 16 : Durée des phases de la marée en heures (le coefficient de marée / 10)	27
Figure 17 : Bilans par marée des flux échangés en bleu, volumes entrants, en rouge, volumes sortants et en vert bilan volumétrique de la marée	28
Figure 18 : Estimation des renouvellements par marée, exprimé en pourcentage du volume du Grand Etang. A) :Volumes apportés par le flot (en rouge) et volumes d'origine incertaine (bleu) et B) : détail des bilans de volume sur le cycle de marée du 9 au 30 août 2014.	29

Remerciements :

L'image de couverture a été agrégée à partir des différentes prises de vues réalisées pendant la mission. Elle présente une partie des différents acteurs, DTAM, ARDA et Ifremer ayant participé aux travaux.

Nous tenons à remercier les équipes de la DTAM de Saint Pierre et de Miquelon pour leur accueil sur Miquelon :

Jean Pierre Claireaux: pour la coordination de ce projet sur l'archipel

André AMAT pour l'organisation quotidienne et la mise à disposition des compétences nécessaires à la réalisation de cette mission.

Claude Orsiny pour la coordination terrain

Yves Detcheverry à la pelle mécanique

Yannick Poirier

Jean Marc Derouet, Yoann Busnot, Luc Thillais et Frédéric Levavasseur en qualité de plongeurs professionnels

Gilles Olaïzola, capitaine du baliseur « P'tit Saint Pierre » et son équipage

Véronique Gaspard pour ses interventions qui ont facilité notre quotidien

Pierre Poitevin de l'ARDA, pour le soutien technique et son assistance en qualité de plongeur professionnel

D'une manière générale, merci au personnel de l'antenne DTAM de Miquelon pour leur accompagnement à la bonne conduite de cette mission.

Préambule

Ce rapport reprend certaines parties du rapport préliminaire "in extenso" pour des raisons d'homogénéité et de cohérence du texte. Il ne le remplace pas, les méthodes d'acquisition de données n'étant par exemple pas reprises ici afin de limiter la taille du document.

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 Daniel 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 a sollicité l'IFREMER pour une assistance à la réalisation d'une étude en commun, destinée à acquérir des éléments de connaissance et d'aide à la décision portant sur le dimensionnement du goulet de l'Etang nécessaire à un fonctionnement approprié de cet écosystème. L'objectif actuel est le développement durable de l'activité mytilicole et la préservation de cet environnement. Le paramètre essentiel abordé dans l'étude réalisée par IFREMER est celui du renouvellement des eaux de l'étang.

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

Objectifs fin 2014-début 2015

Conclusions du rapport préliminaire

(Le Moine et al., 2014)

Le géoréférencement des photos aériennes disponibles et le géotraitement SIG appliqué ont pu permettre une première évaluation précise de la superficie du Grand Etang.

Les acquisitions de bathymétrie complétées et les traitements de krigeage autorisent les premières estimations de volumes théoriques et de section mouillée. Elles sont dorénavant disponibles pour l'implémentation d'un modèle hydrodynamique. Elles permettent également une vision 3D du goulet, qui devrait faciliter l'élaboration des divers scénarii de curage à venir.

Les matériels de mesures ont été déployés dans le goulet du Grand Etang de Miquelon et ont pu fournir une première série de mesures. Les équipes de la DTAM SPM sont complètement autonomes dans les opérations de mise à l'eau, calibration et récupération des données des courantomètres avec le soutien local de l'ARDA.

Les premières mesures ont montré :

- La variabilité thermique forte associée au cycle de marée
- La variabilité des intensités de courant sur la section transversale et la relative homogénéité de la colonne d'eau sur sa hauteur
- Le décalage entre l'heure-marée à Saint Pierre et celle à l'entrée du goulet d'environ une heure trente dans les observations.
- Les intensités de courant les plus élevées mesurées sur la période sont de l'ordre de 1,5 m/s et se situent autour de la basse mer.

Objectifs 2014

Acquisitions de données de courant dans la hauteur d'eau au moyen d'un courantomètre jusqu'à la fin de l'année.

Estimations des volumes caractéristiques en fonction des mesures de hauteurs d'eau obtenues; les premières relations avec les conditions météorologiques n'ont pu être réalisées, les données du courantomètre ayant été disponibles trop tardivement.

Traitement des données de courant du dernier trimestre; premières estimations et analyse des flux entrants et sortants du Grand Etang.

Sommaire

Matériels et méthodes utilisés pour l'estimation des flux hydriques

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 'profilier' 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.

Données acquises

Les méthodes et matériels ont été présentés de façon détaillée dans le rapport préliminaire (Le Moine, 2014); les représentations et graphes suivants ne sont là que pour mémoire.

Levés bathymétriques

Les levés ont été réalisés par les agents DTAM dans le courant de l'année 2014 (fig 1.)

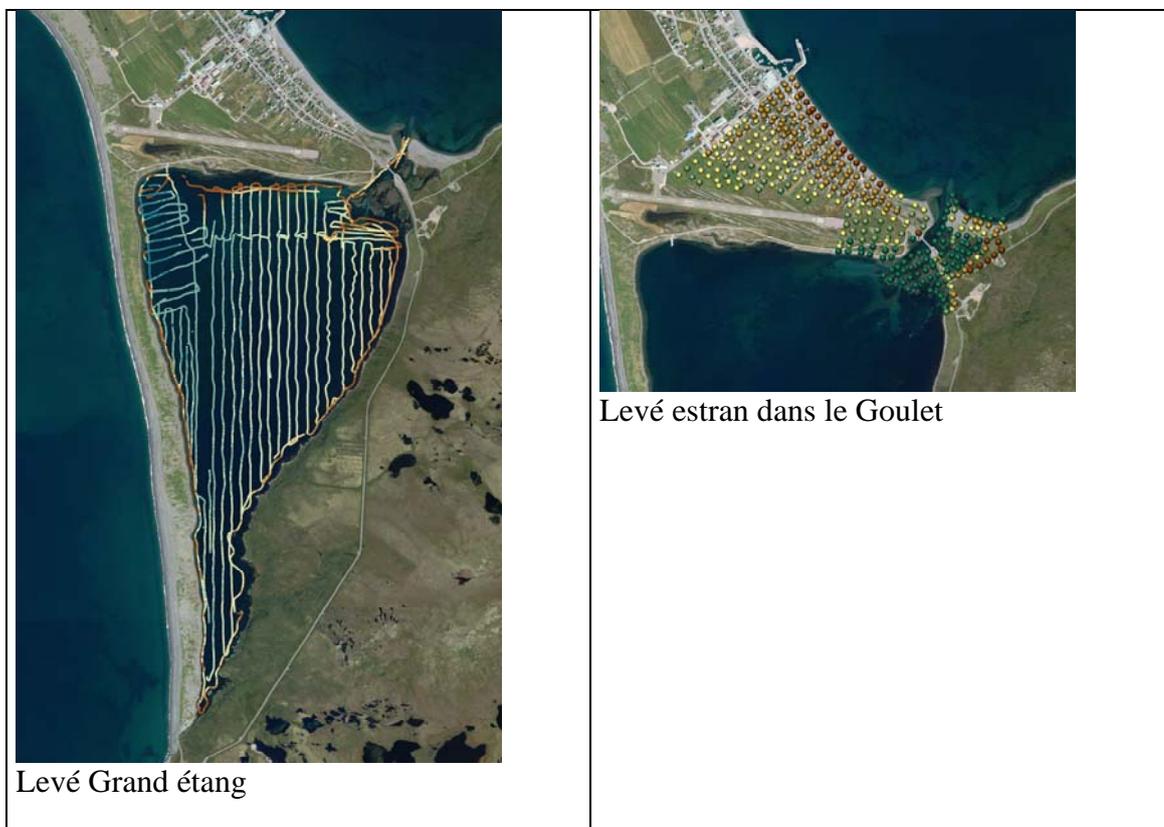


Figure 1 : Levés bathymétriques réalisés par les agents DTAM en 2014

Acquisitions courantométriques de calibration

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.2).

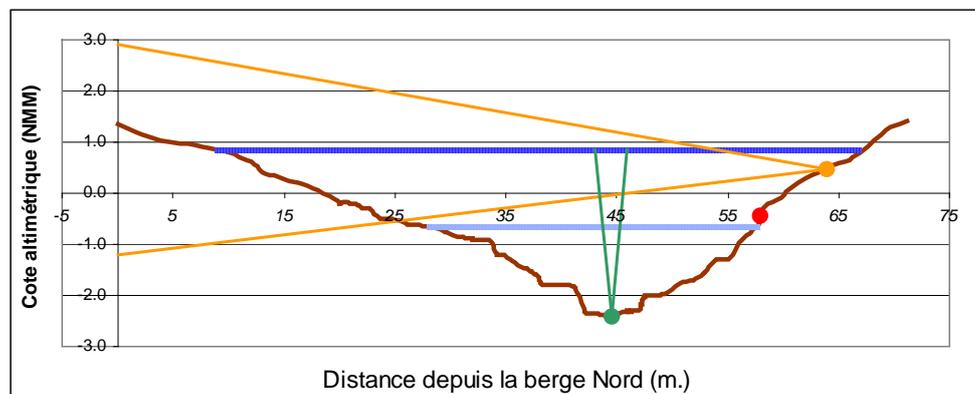


Figure 2 : Positionnement des courantomètres dans le profil du chenal; la rive Nord (à gauche) est à l'origine; les rayons de couleurs simulent les surfaces échantillonnées par les Doppler (vertical VDOP en vert et horizontal HDOP en orange).

Acquisitions courantométriques pour l'estimation des flux

L'objectif était de poursuivre les acquisitions tant que cela était possible, sans prendre de risque pour le matériel lors des périodes où l'étang risquait de geler. Les agents sur place ont repositionné l'appareil vertical et l'acquisition en continu a été reprise le 14 août pour se poursuivre jusqu'au 5 novembre 2014.

Pré-traitements réalisés

Hormis les différents traitements de "nettoyage" et filtrage des signaux de courant, ils concernent l'ensemble des données acquises et permettent d'établir les différentes relations de volumes, surfaces et vitesses de courant pour l'estimation des flux d'échanges entre l'océan et le Grand Etang.

Modélisation du volume en fonction de la cote de la surface libre

La variation de la hauteur d'eau mesurée dans le chenal du grand étang est calculée à l'aide des données acquises par le courantomètre Doppler. Pendant la période de déploiement de l'appareil, la hauteur d'eau minimale enregistrée au dessus de l'appareil a été de 1,75 m., la hauteur maximale de 3,25 m., ce qui correspond à un marnage de 1,5 m.

La position altimétrique du courantomètre en acquisition est de -2,40 m. par rapport au niveau moyen des mers. Cette information permet de transformer toutes les valeurs de hauteur acquises par le système en données altimétriques dont le référentiel est le niveau moyen des mers.

Après transformation, l'altitude minimale de la surface libre dans le chenal est de -0,65m et le maximum de 0,85m .

Basse mer : $1,75 - 2,40 = -0,65$ m

Pleine mer : $3,25 - 2,40 = +0,85$ m

Il est intéressant de superposer ces hauteurs d'eau aux mesures enregistrées par le marégraphe situé sur le port de Saint Pierre. Cela permet la vérification du bon fonctionnement de l'appareil et l'estimation du décalage d'amplitude de marée entre la mer et le chenal.

Les données du marégraphe sont téléchargées via le site « refmar ». Elles sont exprimées par rapport au zéro hydrographique. Pour pouvoir superposer la courbe de marée provenant du courantomètre à celle du marégraphe, les deux jeux de données doivent avoir impérativement le même référentiel altimétrique.

Les données du marégraphe sont donc transformées en altitude (passage du zéro des cartes au zéro niveau moyen des mers). L'écart entre les deux est connu : 1,404 m (www.sonel.org). Pour effectuer cette conversion, cet écart est enlevé à chaque donnée du marégraphe ; les deux jeux de données sont ainsi dans le même référentiel.

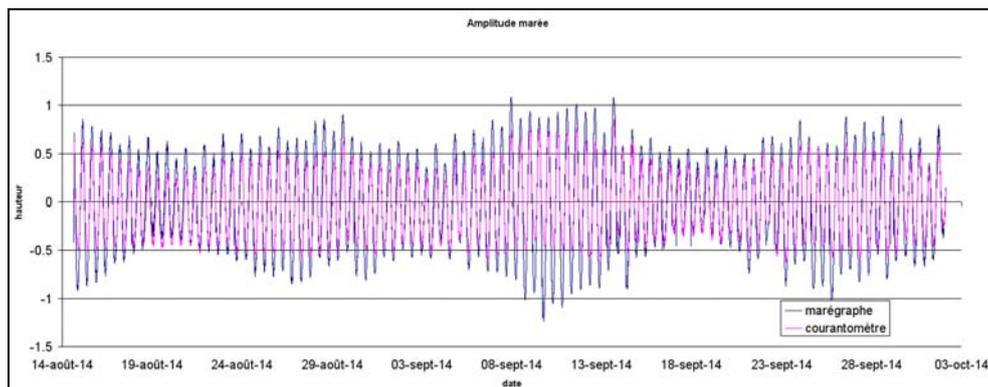


Figure 3 : Cote de la surface libre : données marégraphe de Saint Pierre et acquisitions du courantomètre

Elaboration du modèle volume/cote

Des outils spécifiques SIG permettent d'estimer les volumes d'eau du grand étang 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.

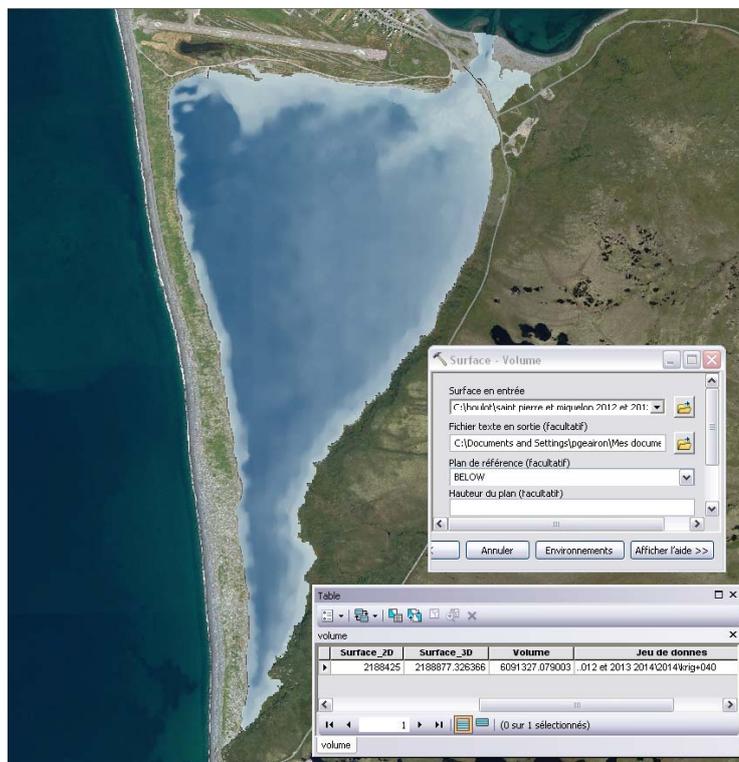


Figure 4 : Fenêtre d'outil d'estimation des volumes sous le logiciel ArcGis

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

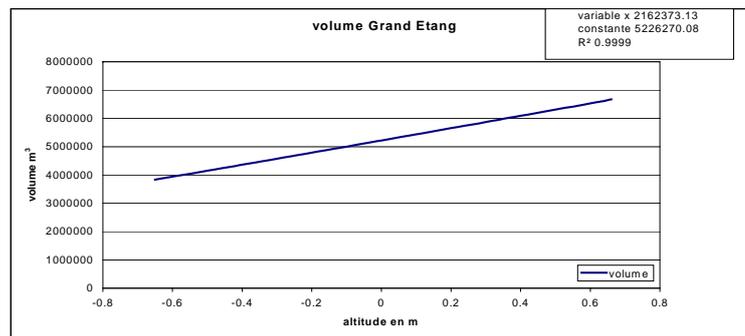


Figure 5 : Equation d'estimation du volume d'eau du Grand Etang en fonction de la cote de la surface libre (référentiel NMM)

Volumes caractéristiques

Le volume du Grand Etang à mi-marée est légèrement supérieur à 5,2 millions de mètres cubes pour un volume minimal aux plus basses mers de 3,8 millions de mètres cubes. Le volume oscillant est donc de 2,8 millions de mètres cubes, soit 73% du volume mort. Le volume maximum est de 7,106 millions de m³, le volume oscillant représente donc 40% du volume total.

Modélisation de la section mouillée à partir des profils transverses

Modélisation de la section mouillée

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. 6). Celui ci, multiplié par la vitesse des courants traversant la section mouillée, donnera les valeurs des volumes échangés à la cote altimétrique voulue.

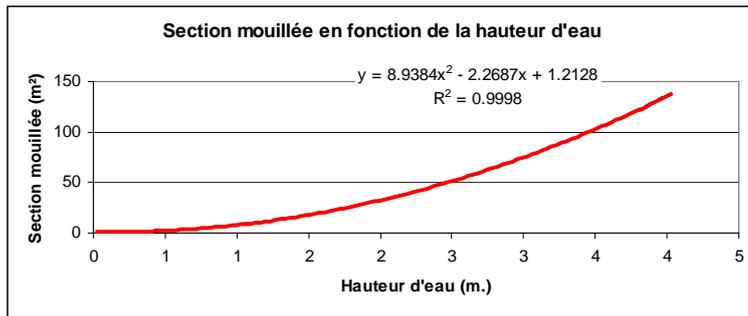


Figure 6 : Modèle d'estimation de la surface mouillée en fonction de la hauteur d'eau et équation correspondante (y = section mouillée, x = hauteur d'eau en mètres).

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 7 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. 7 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'Étang. A partir de BM+3 le courant s'inverse, puis forcé 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.

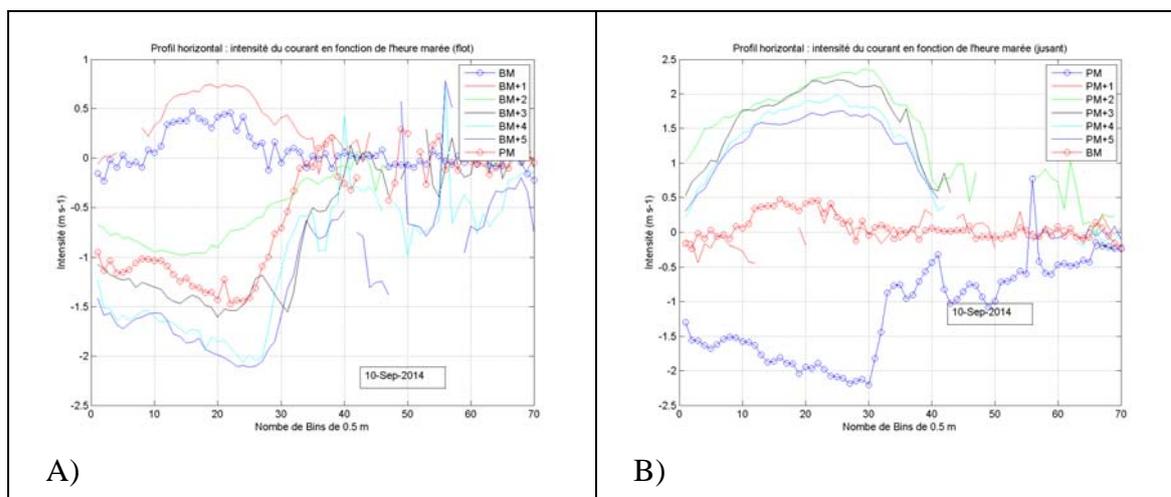


Figure 7 : Intensité du courant dans la tranche d'eau superficielle; A : de basse mer (BM) à pleine mer mesurée (flot), et B: de pleine à basse mer mesurée (jusant). Les abscisses correspondent à un nombre de cellules de mesures (Bins) depuis la berge.

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. 8). 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 augmentation).

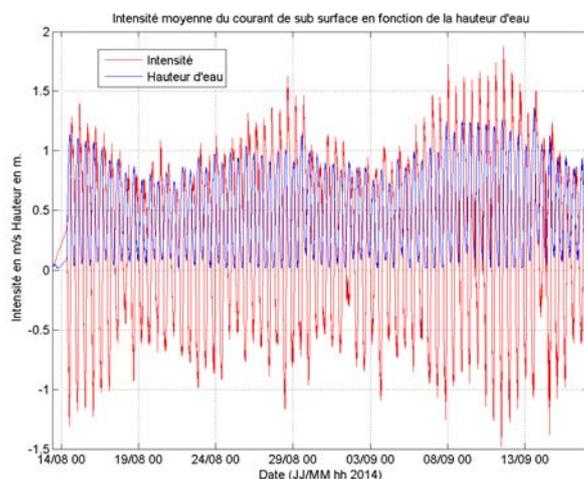


Figure 8 : Intensité moyenne du courant et hauteur d'eau.

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. 9). 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 courantmètre de surface. Dans les deux cas, les courants les plus faibles sont observés deux heures après la plus haute mer mesurée.

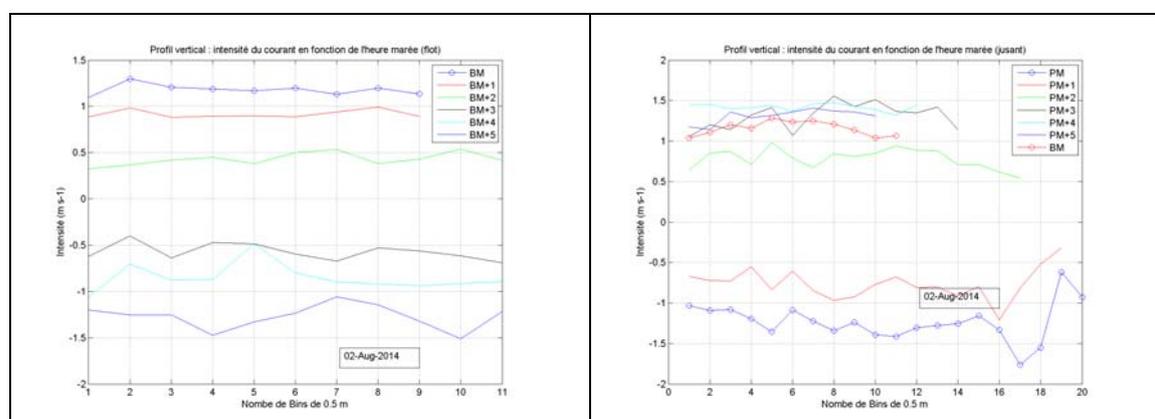


Figure 9 : Variabilité de l'intensité du courant sur la colonne d'eau; valeurs en flot(gauche) et jusant (droite);

Le détail sur une marée montre qu'il existe un décalage de hauteur d'eau entre la marée prévue (SHOM) à Saint Pierre et à l'entrée du goulet, de l'ordre d'une heure trente dans ce cas de figure (fig. 9). 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. 8 & 10).

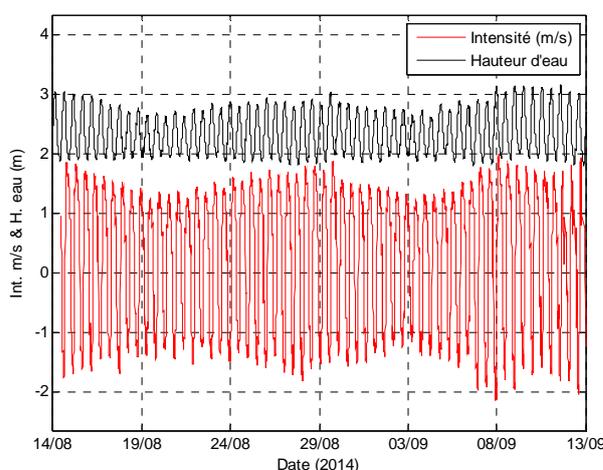


Figure 10 : Intensité moyenne du courant sur la colonne d'eau et hauteur d'eau mesurée par le courantomètre vertical.

Résultats

Estimation de l'indice de vitesse 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 jaugeage 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. 11 A & B).

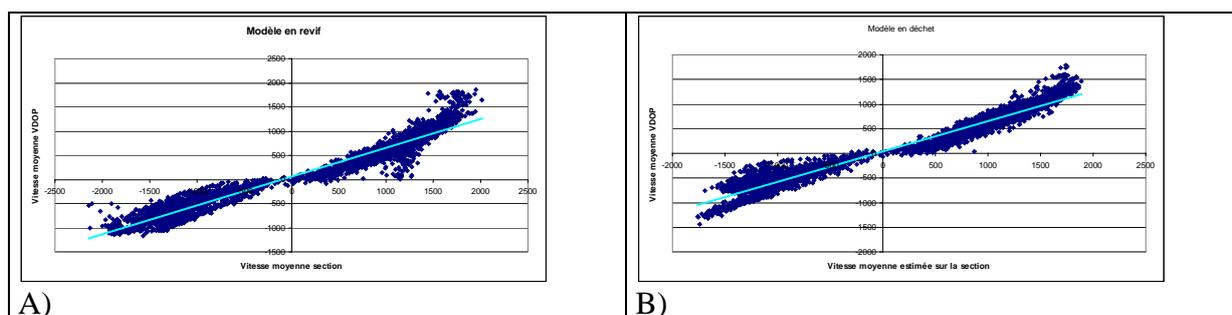


Figure 11 : Estimation de la vitesse moyenne du courant sur la section en fonction de celle mesurée par le courantomètre de fond (VDOP); modèles revif (A) et déchet (B)

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. Ceci caractérise la morphologie du chenal, très évasé, et la 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 (fig. 12, A&B).

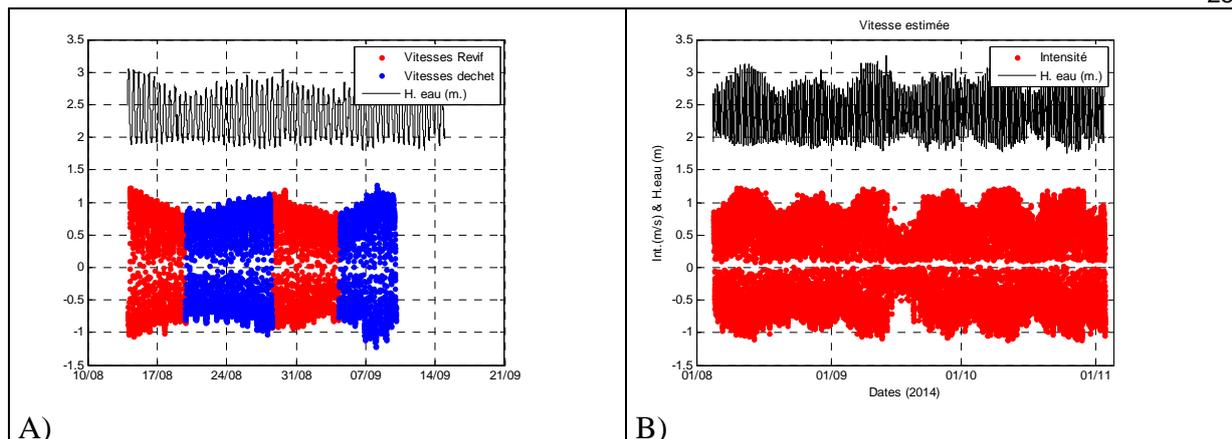


Figure 12 : Intensité des courants estimés, en revif et en déchet sur la période de calibration A) et application de la relation sur toute la période B).

La répartition des vitesses de courant sur la hauteur d'eau montre une dissymétrie entre le flot et le jusant (fig. 13). Les intensités les plus fortes en flot se situent plutôt aux plus hautes mers, alors que celles en jusant se trouvent davantage lors des basses mers. La section mouillée étant en relation directe avec la hauteur d'eau (fig. 6), les débits instantanés en flot seront donc plus élevés.

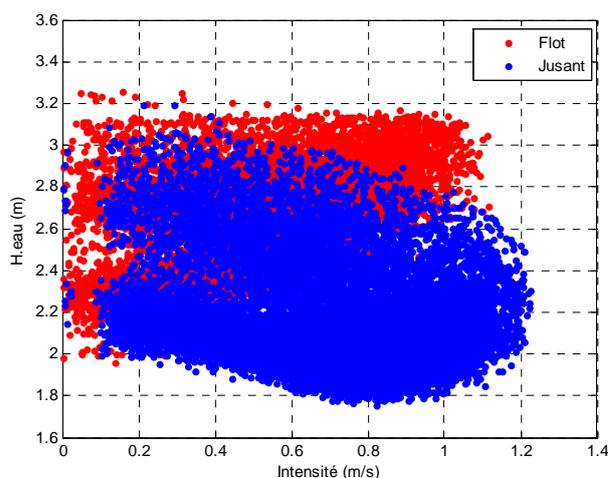


Figure 13 : Intensité estimée du courant en fonction de la hauteur d'eau

Débits et volumes instantanés

Les débits et volumes instantanés (calculés sur 5 minutes, 'pas' de temps de l'acquisition) confirment les hypothèses précédemment faites: les débits et volumes de flot sont plus importants que ceux de jusant (fig. 14,A et B). En effet, les débits instantanés évoluent pour les maxima de 85,8 m^3/s en flot à 65,3 en jusant, avec des moyennes respectivement de 34,2 et 26,4 m^3/s . Les volumes évoluent au maximum entre 25,1 et 19,6 milliers de m^3 , avec des moyennes de 7,9 et 10,4 milliers de m^3 en flot et jusant respectivement.

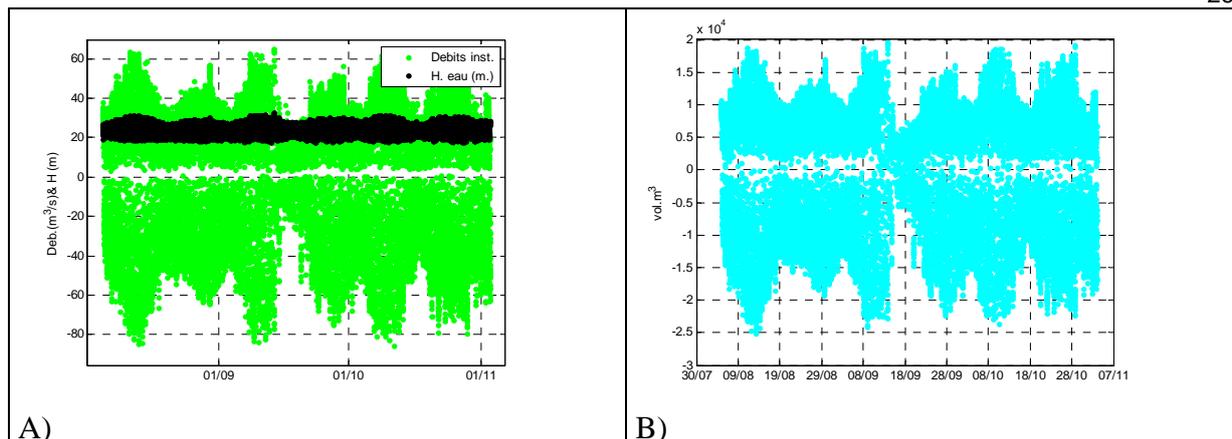


Figure 14 : Débits instantanés et hauteurs d'eau (A), et volumes instantanés dans le chenal du Grand Etang pendant la période d'acquisition

Les estimations de débits et de volumes instantanés montrent des données suspectes sur la période du 12 au 22 septembre. Elles seront éliminées dans la suite des estimations pour ne pas biaiser les estimations de flux. Cette période débute lors de coefficients de marée très élevés (115-114 les 10 et 11 septembre) et se prolonge lors des mortes eaux jusqu'à la période de vives eaux suivante. Des objets dérivants (macro algues ...), probablement détachés de leur support par les courants de vives eaux, ont pu rester piégés dans l'infrastructure environnant le courantomètre et n'être expulsés que lors de la remontée des coefficients et des vitesses de courant. Cette observation renforce la nécessité d'un suivi régulier de l'appareil en cours d'acquisition.

Flux hydriques par marée

L'estimation des flux circulants est faite par marée ; le sens du courant indiquant si la mer monte ou descend, les volumes instantanés sont cumulés jusqu'au changement de courant, ce qui autorise des calculs et les bilans volumétriques par marée (flot-jusant). Contrairement à ce que l'on pouvait attendre au vu des données de débits ou de volumes instantanés, les volumes de jusant se révèlent plus importants que ceux de flot (fig. 15). Ils oscillent entre des maxima de 0,96 à 1 million de m³ pour des valeurs moyennes de 0,28 à 0,41 million de m³ en flot et en jusant respectivement.

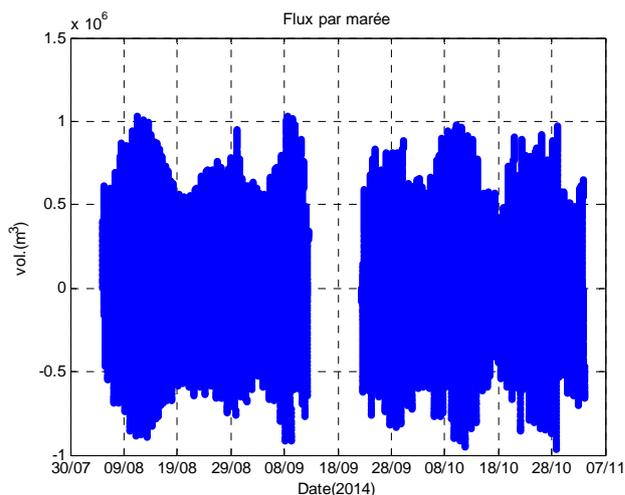


Figure 15 : Flux estimés océan - Grand étang par marée entre le 20 août et le 04 septembre 2014

Ces estimations montrent qu'il sort plus d'eau du Grand Etang en jusant qu'il n'en est entré dans le flot précédent par le goulet, ce qui est relativement inattendu. Les durées de phase de marée aident à la compréhension de ce phénomène (fig. 16). En effet, la durée moyenne estimée du flot est de 4,9 heures alors que celle du jusant est de 7,4 heures. Cet écart temporel de plusieurs heures (jusqu'à 4 heures) explique les écarts de flux entre le flot et le jusant.

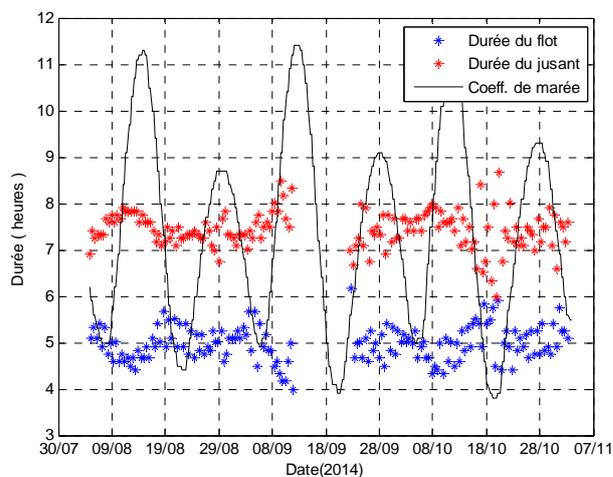


Figure 16 : Durée des phases de la marée en heures (le coefficient de marée / 10)

Bilans volumétriques par marée

Les bilans par marée (flot-jusant) donnent des volumes différentiels d'échange moyens de 72650 milliers de m^3 par marée, en faveur du jusant, le maximum étant de 469100 m^3 lors des vives eaux du 11 septembre (fig.17). Leur importance, non négligeable en terme de renouvellement du Grand Etang demande explication quant à l'origine de ces masses d'eau.

Sur les 154 jours où les données paraissent utilisables, 119 sont en volume de jusant excédentaire. Les jours présentant des bilans négatifs (stockage dans le Grand Etang) sont préférentiellement lors de la phase de rejet; hormis la période du 28 septembre, atypique à bien des égards, en plus des coefficients de marée les plus élevés de la période.

Cette asymétrie de marée est connue dans les estuaires, où l'alimentation par le fleuve en amont déséquilibre les temps de flots et de jusant ; chaque estuaire présentant ses propres caractéristiques face à ce déséquilibre en fonction des particularités locales (Le Moine, 2013; Toubanc, 2015). Il est moins attendu dans des cas lagunaires à marée comme celui du Grand Etang.

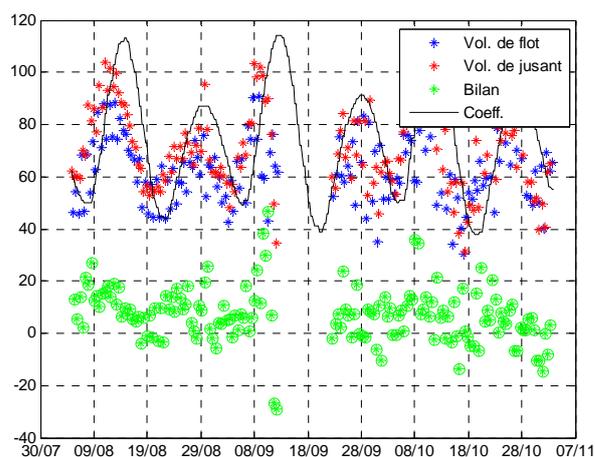


Figure 17 : Bilans par marée des flux échangés en bleu, volumes entrants, en rouge, volumes sortants et en vert bilan volumétrique de la marée

La surface du Grand Etang est de 227 hectares pour un volume moyen de 5,2 millions de m³. Les volumes excédentaires représentent donc une hauteur de l'ordre de 3,2 cm sur la superficie du Grand Etang en moyenne, avec un maximum de 20 cm.

Il est peu probable que de tels volumes trouvent leur origine dans la pluviométrie ou les eaux de ruissellement (une confirmation de cette hypothèse est possible par les mesures de salinité en cours dans le Grand Etang par le projet "espèces invasives - crabe vert"). De plus, ces bilans excédentaires paraissent corrélés aux coefficients de marée. L'hypothèse la plus vraisemblable est celle de phénomènes de percolation à travers les cordons littoraux particulièrement celui de l'ouest, voire par le fond du Grand Etang, en provenance de l'océan. Leur nature sédimentaire (sables grossiers et galets) laisse présager une forte porosité. De plus, les écarts de marée constatés entre Saint Pierre et le goulet permettent un différentiel de niveau océan - étang propice à des percolations de ce type par différentiel de pression hydrostatique.

Estimation du renouvellement

La capacité de renouvellement du Grand Etang, une fois estimés ces volumes échangés, peut être évaluée de façon différentielle grâce aux relations développées entre le volume de l'étang et la hauteur d'eau. La portion d'origine connue, mesurée par le courantomètre en flot, et l'excédent, d'origine plus incertaine, sont évalués d'après les flux. Les masses d'eaux océaniques estimées correspondent à des renouvellements de 5 à 15,7 % par marée avec une moyenne de 10,6 % (fig.19A). L'eau, non passée par le goulet en flot, représente des renouvellements allant jusqu'à 7%, avec une forte fréquence entre 0 et 5%, ce qui la rend non négligeable dans une perspective aquacole et de gestion raisonnée de l'environnement. Le zoom sur un cycle de marée montre des alternances de gain ou de perte de volume de l'étang en fonction des marées jour/nuit lors des phases de fin de revif et déchet (fig.19 B). Lors du revif, les flux sortants sont toujours plus importants que les flux entrants.

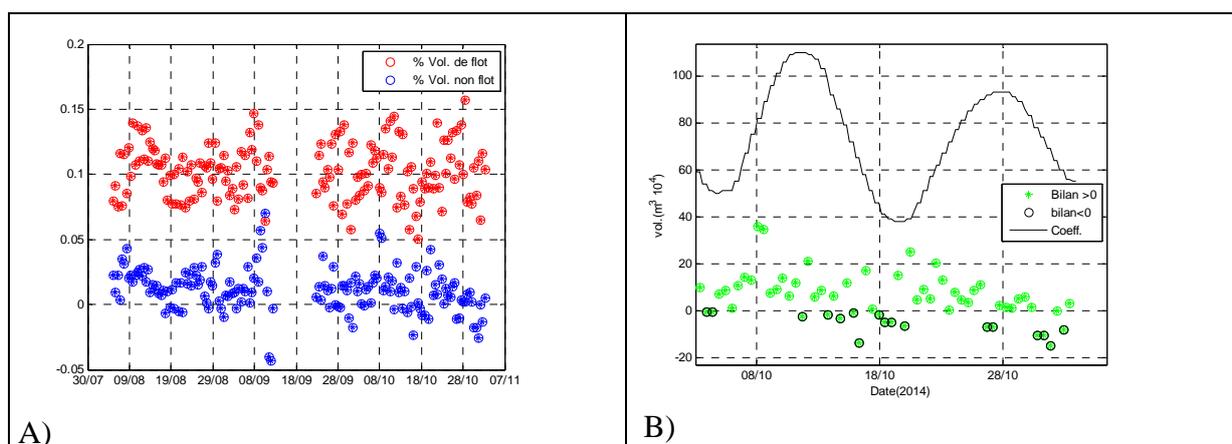


Figure 18 : Estimation des renouvellements par marée, exprimé en pourcentage du volume du Grand Etang. A) :Volumes apportés par le flot (en rouge) et volumes d'origine incertaine (bleu) et B) : détail des bilans de volume sur le cycle de marée du 9 au 30 août 2014.

Cette alternance de volumes excédentaires, puis déficitaires la marée suivante montre que les cotes altimétriques des plans d'eau sont en équilibre. Les excédents de jusant sont la preuve que sur la période de revif l'Etang reste à une cote moyenne supérieure à celle de l'océan lors du jusant.

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 seront 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 la période de mesure 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. La probabilité de phénomènes de percolation d'eaux marines depuis l'océan, en lien avec le différentiel altimétrique des plans d'eau est soulevée. L'origine de ces masses d'eau sortant du Grand Etang, même si la preuve n'est pas acquise des phénomènes de percolation, en fait un système à la dynamique de fonctionnement originale. Un suivi des volumes d'échange par celui des variations des hauteurs d'eau aurait sans doute apporté des éléments complémentaires de compréhension (Tunin-Ley, 2014).

Les taux de renouvellements estimés (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 à divers écosystèmes de marais atlantiques aquacoles exploités (Le Moine, 1990) ainsi que ceux des lagunes méditerranéennes (1 à 20 % de renouvellement par jour - Fiandrino, 2012).

Perspectives 2015

L'analyse des variables de flux et renouvellement sur la période hivernale, en lien avec les données météorologiques, devrait compléter les informations sur la dynamique de fonctionnement du Grand Etang. Hors le coefficient de marée, il est en effet probable que cette dynamique soit dépendante également de la situation météorologique. Les poids respectifs des forçages météorologiques et de marée apporteraient des informations importantes complémentaires.

Cette analyse sera faite sur l'année 2015 en incluant les résultats courantométriques de l'hiver 2014 - 2015.

Les données supplémentaires de bathymétrie attendues (e.g., profils en travers du goulet) et les données déjà acquises vont rendre possible l'implémentation d'un modèle hydrodynamique Grand Etang, tels que ceux appliqués sur les lagunes méditerranéennes (Fiandrino, 2012). Cet outil permettra l'évaluation d'indicateurs hydrodynamiques spatialisés spécifiques. L'impact d'éventuelles modifications bathymétriques sur ces indicateurs pourra alors être évalué et motiver un avis sur les éventuelles interventions à réaliser.

Ces divers travaux sont également prévus sur l'année 2015, avec le soutien des équipes de modélisateurs de l'Ifremer.

Bibliographie

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.

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, 1st International Conference on Managing Rivers in the 21 th 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 (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/>

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

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/>