

---

## 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.





# 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.



## 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> Jérôme Castaings et Annie Fiandrino Adresse électronique : Jerome.Castaings@ifremer.fr Annie.Fiandrino@ifremer.fr	<b>date de publication :</b> <b>14/10/2014</b> <b>nombre de pages :</b> 22p <b>bibliographie :</b> oui <b>illustration(s) :</b> oui <b>langue du rapport :</b> F
<b>Titre de l'article</b> 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.	
Contrat n° Rapport intermédiaire <input type="checkbox"/> Rapport définitif <input checked="" type="checkbox"/>	
<b>Auteur(s) principal(aux) :</b> Alina Tunin-Ley, Nathalie Malet, Annie Fiandrino, Valérie Orsoni, Yoann Baldi	
<b>Encadrement(s) :</b> Nathalie Malet, Valérie Orsoni, Annie Fiandrino	
<b>Résumé</b> Le projet a pour objectif premier de disposer d'un modèle hydrodynamique opérationnel (modèle MARS) sur la lagune de Biguglia et de le valider sur la base de paramètres mesurés <i>in situ</i> (hauteurs d'eau, salinité, température, débits échangés avec la mer). Cela permettra ensuite de caractériser le fonctionnement physique de la lagune à l'aide de descripteurs hydrodynamiques (influence relative des différents forçages, temps de résidences...) puis d'en dégager une typologie saisonnière.  Cette étude préliminaire a pour but d'estimer les volumes journaliers entrants et sortants à partir des données de hauteurs d'eau de part et d'autre des graus. Cette étude a été menée sur la lagune de Biguglia grâce à la méthode développée au LER-LR sur différents étangs du Languedoc-Roussillon, Le Prévost et La Palme (Fiandrino <i>et al.</i> 2012). Les données de hauteur d'eau serviront de paramètre de forçage du modèle hydrodynamique pour les conditions en mer. Les volumes journaliers d'entrée /sortie seront confrontés aux bilans journaliers simulés afin de vérifier la capacité du modèle à reproduire les échanges mer-lagune sous différentes conditions environnementales.	
<b>Mots-clés</b> Echanges mer/lagune, hauteur d'eau, grau, hydrodynamique, Biguglia (lagune Corse)	



## SOMMAIRE

### Contenu

1. INTRODUCTION.....	1
2. OBJECTIFS .....	2
3. MATERIEL ET METHODES .....	3
3.1. Estimation des volumes échangés par la méthode des hauteurs d'eau .....	3
3.1.1. Principe général.....	3
3.1.2. Caractéristiques du site d'étude .....	4
3.1.3. Mise en œuvre des mesures .....	6
4. ETUDE DES ECHANGES ENTRE LA MER ET L'ETANG DE BIGUGLIA .....	9
4.1. Analyse des harmoniques de marée .....	9
4.2. Analyse des paramètres hydrologiques enregistrés par les sondes STP .....	10
4.2.1. Evolution de la température .....	10
4.2.2. Evolution de la salinité.....	11
4.3. Estimation des échanges entre mer et lagune par la méthode des hauteurs d'eau.....	13
4.3.1. Analyse des hauteurs d'eau en mer et en lagune.....	13
4.3.2. Estimation des débits instantanés.....	16
4.3.3. Estimation des volumes journaliers échangés.....	18
5. CONCLUSIONS .....	20
6. PERSPECTIVES.....	21
7. REFERENCES.....	22

# 1. INTRODUCTION

De par leur situation à la jonction des écosystèmes terrestres, aquatiques et marins, les lagunes constituent des écosystèmes de transition particulièrement importants, dont le fonctionnement écologique est source de services d'origine écosystémique, ou SOE : réserves de biodiversité, zones de nurseries pour les poissons, refuges migratoires pour la faune avicole, zones de pêche et de production aquacole, filtre épurateur des eaux de pluies, etc. En contrepartie, ce rôle d'interface soumet ces milieux à une forte pression anthropique. Ainsi, l'augmentation des rejets au niveau des bassins versants et le développement des activités aquacoles au cours des dernières décennies entraînent une dégradation de la qualité de l'eau dans les lagunes, avec une eutrophisation croissante de ces milieux. Cette dégradation menace l'équilibre et le fonctionnement de ces écosystèmes fragiles, et par conséquent leur productivité et leur biodiversité remarquables.

Les milieux lagunaires sont souvent caractérisés par des gradients marqués et une forte variabilité des paramètres abiotiques, favorisant une productivité élevée (Basset *et al.*, 2013). En outre, les lagunes se différencient des autres zones humides par une salinité intermédiaire et des échanges plus ou moins restreints avec le milieu marin, qui vont caractériser le fonctionnement de chaque lagune et sa dominante marine ou dulçaquicole (Chapman *et al.*, 2012). La compréhension du fonctionnement des lagunes, nécessaire à la gestion de ces milieux à l'équilibre fragile, repose donc sur une bonne connaissance des échanges entre mer et lagune et de l'environnement hydrologique au cours du cycle annuel.

L'étang de Biguglia, qui constitue la plus grande zone humide de Corse, illustre bien le phénomène d'eutrophisation des lagunes. Ainsi, l'observation de dysfonctionnements d'ordre trophique (tels que les proliférations d'algues) dans cette lagune, témoignant de la dégradation de la qualité du milieu depuis les années 80, a motivé la réalisation d'une étude d'un an (1998-1999) afin de diagnostiquer l'état d'eutrophisation des lagunes corses situées dans la plaine orientale (Orsoni *et al.*, 2001). Cette étude préliminaire a permis d'acquérir des connaissances essentielles sur l'environnement hydrologique de ces lagunes, et a mis en évidence la nécessité de caractériser leur hydrodynamisme, à la fois pour mieux appréhender le fonctionnement du système mer-lagune, et pour permettre la mise en place de modèles hydrodynamiques, visant à faciliter la gestion durable et concertée de ces milieux. En effet, les échanges importants avec le milieu marin favoriseront l'export et la dilution des contaminants, des nutriments et des polluants, tandis qu'à l'opposé des échanges limités avec la mer risqueront d'entraîner une accumulation des contaminants et nutriments dans la lagune, la rendant plus vulnérable aux apports divers (Derolez *et al.*, 2012).

Dans cette optique, un projet portant sur l'étude générale du fonctionnement de la lagune de Biguglia a été initié en partenariat avec la Réserve Naturelle de l'Etang de Biguglia (RNEB) et l'Université de Corse.

Cette action repose sur deux volets, l'un dédié à l'étude du compartiment phytoplanctonique et son évolution au cours du cycle annuel, initié par l'université de Corse, l'autre volet visant à caractériser l'hydrodynamisme de la lagune et les échanges avec le milieu marin par la modélisation, initié par Ifremer.

Le deuxième volet de l'action doit fournir un modèle hydrodynamique de l'étang de Biguglia, permettant de tester l'influence des forçages environnementaux sur le fonctionnement de la lagune. Dans ce but, il est prévu de transposer le modèle MARS-lagune développé par l'Ifremer à l'étang de Biguglia. Les simulations produites par le modèle devront être validées par des observations directes de l'hydrodynamisme de la lagune. Ceci pourra se faire grâce à l'application de la méthode « échanges mer-lagune » développée au LER-LR (Ifremer), qui est l'objet de la présente étude.

## 2. OBJECTIFS

Il a été récemment démontré qu'il était possible d'obtenir une bonne estimation des volumes journaliers échangés entre la mer et une lagune à partir de la mesure des hauteurs d'eau en mer et en lagune à une fréquence élevée (Colin, 2009). Cette méthode originale a par la suite été validée sur différentes lagunes présentant des fonctionnements hydrologiques variés (Fiandrino *et al.*, 2012).

L'objectif de cette étude préliminaire est de tester cette méthode sur l'étang de Biguglia (Haute-Corse) :

- (i) en initiant une stratégie de mesures haute fréquence de la hauteur d'eau et des paramètres hydrologiques en différents points de la lagune et en mer,
- (ii) en appliquant la méthode des hauteurs d'eau pour estimer les volumes journaliers échangés entre la mer et l'étang de Biguglia

Ce travail vise à fournir un premier éclairage sur le fonctionnement hydrologique de la lagune sur une période de mesures de 4 mois.

## 3. MATERIEL ET METHODES

### 3.1. Estimation des volumes échangés par la méthode des hauteurs d'eau

Cette méthode a été développée et précédemment validée sur différents étangs du Languedoc-Roussillon, Le Prévost et La Palme (Colin, 2009 ; Fiandrino *et al.* 2012).

Le détail de la méthode d'estimation des volumes échangés entre mer et lagune est donc accessible dans le rapport suivant : « Validation d'une méthode d'estimation des volumes d'eau échangés entre la mer et les lagunes et définition d'indicateurs hydrodynamiques associés » (Fiandrino *et al.*, 2012). Seul le principe général de la méthode est repris dans le présent rapport. Les formules nécessaires à l'application de la méthode sont détaillées dans le précédent rapport cité.

#### 3.1.1. Principe général

Les échanges entre une mer et une lagune résultent de la différence de hauteur d'eau de chaque côté du canal (grau) qui les réunit. Le sens des échanges se fait généralement du niveau le plus haut vers le niveau le plus bas. Différents forçages vont influencer les hauteurs d'eau :

- **la marée** : en Méditerranée, elle est de type semi-diurne à inégalité diurne, c'est-à-dire qu'elle est caractérisée par la succession de deux pleines mers et deux basses mers d'amplitude légèrement différente par journée. La marée est la résultante de plusieurs composantes harmoniques sinusoïdales de période distincte. L'analyse de ces composantes harmoniques est essentielle pour comprendre l'évolution temporelle d'un signal de hauteur d'eau.

- **la pression atmosphérique** : elle traduit le poids de l'air sur son environnement. Sur une surface liquide, la diminution de la pression atmosphérique va donc occasionner une élévation de la hauteur d'eau, qui est aspirée vers le haut sous l'effet du vide créé. Inversement, les hautes pressions vont appuyer sur la surface liquide provoquant alors une baisse du niveau de l'eau.

- **le vent** : ce paramètre peut initier houle et vagues en mer, et provoquer du clapot à l'intérieur de la lagune, surimposant des variations de très courtes périodes aux variations induites par la marée et la pression atmosphérique. Cependant, le vent qui constitue le principal moteur de la dynamique des masses d'eau au sein de la lagune, peut entraîner un basculement du plan de l'eau autour de son niveau moyen, compensé par le phénomène de seiche (basculement inverse et oscillations) lorsque le vent cesse. De même, le vent peut également conduire à un effet de surcote en mer.

De l'effet combiné de ces différents facteurs résultent donc les différences de hauteurs d'eau entre la lagune et en mer, elles-mêmes responsables des échanges au niveau des graus. L'analyse du signal des hauteurs d'eau nécessite donc d'évaluer l'influence de ces différents forçages (Mehta and Ozsoy, 1978 ; Di Lorenzo, 1988 ; Lazure, 2000).

D'autre part, la morphométrie des graus a également un impact non négligeable sur les échanges entre mer et lagune. La longueur, la largeur, la nature des fonds au niveau des graus va plus ou moins interférer avec le passage des masses d'eau. C'est le phénomène d'amortissement, plus ou moins prononcé selon l'étréitesse du grau, qui entraîne un amortissement et un déphasage de la marée dans la lagune.

Si l'on fait l'hypothèse que la hauteur d'eau est homogène sur toute la surface d'une lagune, l'étude des variations temporelles de hauteurs d'eau entre mer et lagune permet donc d'estimer les débits instantanés au niveau du grau, connaissant les caractéristiques de celui-ci. Il est alors possible de calculer les volumes journaliers échangés, et d'évaluer l'importance des différents forçages sur ces échanges.

La méthode d'estimation des volumes échangés à partir des mesures des hauteurs d'eau se décompose en 3 étapes :

- 1) mesure des hauteurs d'eau de part et d'autre du grau sur des périodes identiques
- 2) estimation des débits instantanés : la formule de Manning-Strickler permet de calculer les séries temporelles de débits instantanés à partir des séries temporelles de hauteurs d'eau mesurées en mer et en lagune
- 3) estimation des volumes journaliers échangés : l'intégration des débits instantanés sur la journée donne ensuite accès aux volumes nets échangés chaque jour entre la mer et la lagune.

### 3.1.2. Caractéristiques du site d'étude

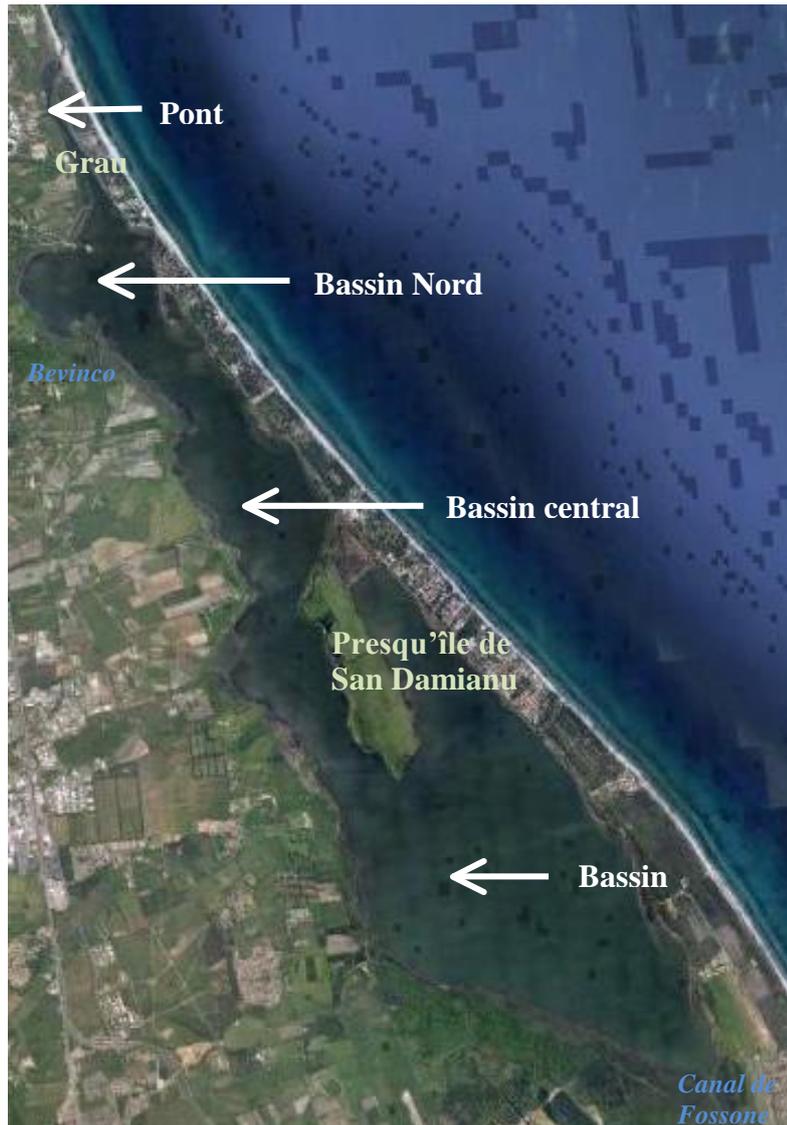
L'étang de Biguglia est situé sur la côte Est de la Corse, à 4 km au sud de Bastia, et constitue le plus grand étang de Corse. C'est un étang d'origine lagunaire, peu profond, et séparé de la mer par un cordon littoral dont la largeur est inférieure à 1 km (figure 1 et tableau 1). Allongé parallèlement à la côte selon un axe globalement Nord-Sud, il est divisé par la présence en son centre de la presqu'île de San Damiano, et est relié à la mer par un grau étroit et long au Nord. Notons qu'il existe une incertitude quant au volume de la lagune qui est estimé selon les sources entre 10,2 Mm<sup>3</sup> (Frisoni et Dutrieux, 1992) et 38 Mm<sup>3</sup> (Orsoni *et al.* 2001) et que celui mériterait d'être réestimé à partir de données bathymétriques plus récentes (Orsoni & Tomasino, en cours).

La surface du bassin versant représente 180 km<sup>2</sup> (Orsoni *et al.*, 2001).

La lagune reçoit des apports en eau douce par différentes sources :

- divers ruisseaux et petits fleuves, dont le Bevinco à caractère permanent
- le canal de Fossone à l'extrémité Sud, qui permet une communication avec le Golo
- un réseau de canaux aboutissant aux stations de pompage
- le ruissellement des collines

La configuration très allongée de cette lagune avec une presqu'île centrale, un apport important d'eau douce au Sud par le canal de Fossone et une communication avec la mer par le grau situé au Nord induit un gradient de salinité croissant du Sud vers le Nord. Cette configuration particulière incite à considérer la lagune selon 3 bassins dont les caractéristiques hydrologiques seraient potentiellement distinctes sous l'influence plus ou moins prononcée des entrées marines.



**Figure 1** : Configuration de l'étang de Biguglia - caractéristiques morphologiques et principaux apports d'eau douce (en bleu).

**Tableau 1** : Caractéristiques de l'étang de Biguglia (les données de largeur et de section du grau ont été réalisées au niveau du pont au cours de la présente étude, la superficie, profondeur et volume sont issus de la bibliographie).

<b>Caractéristiques générales de la lagune</b>	
Superficie (ha)	1450
Volume (Mm <sup>3</sup> )	38
Profondeur moyenne (m)	1,5
Longueur du grau (m)	1700
Largeur du grau (m)	15
Section moyenne du grau (m <sup>2</sup> )	93,5
Section du grau à l'embouchure (m <sup>2</sup> )	16,5

### 3.1.3. Mise en œuvre des mesures

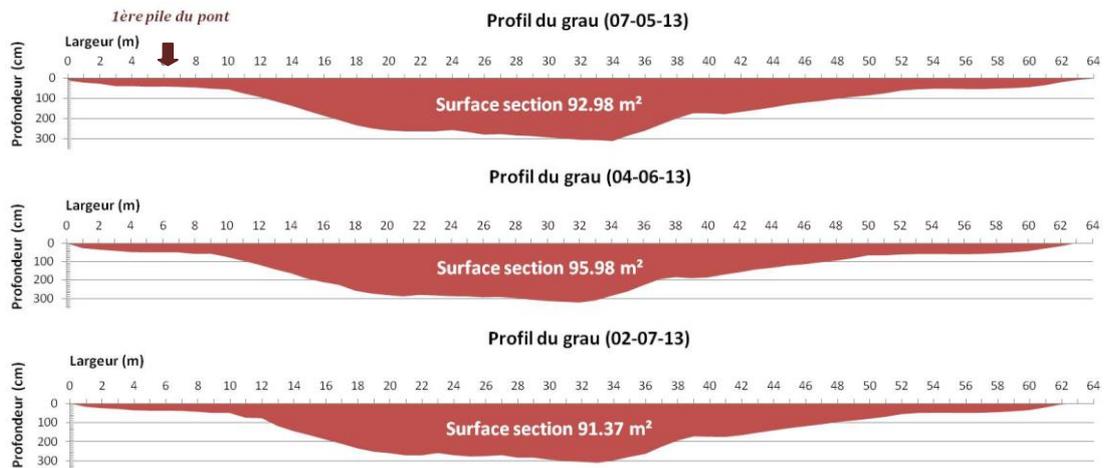
Cette étude a été initiée fin avril 2013. Bien que les mesures soient toujours en cours, ce rapport analyse les données acquises sur la période du 23/04/2013 au 07/08/2013.

#### *Mesure de la section du grau*

Il est nécessaire de connaître précisément les caractéristiques morphologiques du grau pour pouvoir estimer les débits instantanés à partir des hauteurs d'eau mesurées. En effet, la section du grau, qui constitue une des composantes de la formule de Manning-Strickler, représente la surface par laquelle transitent les volumes d'eau échangés entre la mer et la lagune. Or cette donnée peut varier fortement en fonction du niveau d'eau général de la lagune.

Trois mesures mensuelles de la section du grau ont donc été effectuées en mai, juin et juillet (figure 2), afin d'obtenir une valeur moyenne de la section du grau pour la période d'étude (Tableau 1). Le profil du grau a été mesuré au niveau du pont qui le traverse, à un endroit où les variations de niveau sont relativement faibles à moyen terme, au contraire de la sortie du grau qui est une zone soumise à d'importantes modifications du profil, en raison de la faible profondeur moyenne et du déplacement constant des bancs de sédiments, qui réorganisent constamment la morphologie de cette zone.

Afin de déterminer le profil du grau au niveau du pont, les mesures de profondeurs ont été effectuées tous les mètres à l'aide d'un mètre-mesure lesté, le long d'une corde métrée tendue, depuis la rive Est jusqu'à la rive Ouest.



**Figure 2 :** Evolution du profil du grau au niveau du pont pendant la période d'étude (3 mesures).

### *Mesure des hauteurs d'eau en mer et en lagune*

Afin de connaître l'évolution de la hauteur à la fois en mer et en lagune, 4 sondes NKE de type STP (Salinité-Température-Pression) ont été installées (figure 3). Ces sondes enregistrent les variations de niveau d'eau au-dessus de leur position au travers des différences de pression exercées par l'épaisseur variable de la couche d'eau.

En mer, la sonde (STPM) a été positionnée le 23/04/2013 à une profondeur d'environ 14 m..



**Figure 3 :** Position de la sonde mer (STPM) et des sondes lagune dans le bassin Nord (STPS1), le bassin central (STPS2) et le bassin Sud (STPS3).

Dans la lagune, 3 sondes STP ont été positionnées le 25/04/2013 au niveau de la station S1 dans le bassin Nord (sonde STPS1), au niveau de la station S2 dans le bassin central (sonde STPS2) et au niveau de la station S3 dans le bassin Sud (sonde STPS3). En outre, par sécurité, des sondes TP (qui enregistrent uniquement la température et la pression) ont été positionnées aux points S2 (sonde TPS2) et S3 (sonde TPS3). Toutes les sondes ont été positionnées à des profondeurs comprises entre 40 et 90 cm, pour éviter tout

risque de découverture en cas d'une baisse conséquente du niveau de l'eau pendant la période estivale.

D'autre part, les sondes ont été déchargées et nettoyées environ tous les 15 jours (occasionnellement toutes les 3 semaines) en mer et en lagune pour limiter le développement d'organismes au niveau des capteurs (biofouling), notamment en lagune où ce phénomène s'accroît pendant la période estivale, et ainsi éviter des biais éventuels des mesures.

**Tableau 2 : Récapitulatif de la mise à l'eau des 4 sondes STP et des 2 sondes TP pour la mesure des niveaux d'eau et des paramètres hydrologiques en mer et dans l'étang de Biguglia.**

<b>Nom sonde</b>	<b>Station</b>	<b>Coordonnées GPS</b>	<b>Mise en route</b>		<b>Mise à l'eau</b>	
			<b>Date</b>	<b>Heure</b>	<b>Date</b>	<b>Heure</b>
<b>STPM</b>	Mer	42.6422342 9.4722718	23/04/2013	13h56	23/04/2013	17h00
<b>STPS1</b>	S1 Lagune	42.63801 9.45328	25/04/2013	09h17	25/04/2013	10h50
<b>STPS2</b> <b>TPS2</b>	S2 Lagune	42.61465 9.47023	25/04/2013	09h19 09h22	25/04/2013	11h05
<b>STPS3</b> <b>TPS3</b>	S3 Lagune	42.58160 9.49370	25/04/2013	09h23 09h26	25/04/2013	11h35

## 4. ETUDE DES ECHANGES ENTRE LA MER ET L'ETANG DE BIGUGLIA

L'analyse des paramètres hydrologiques et des paramètres de niveaux d'eau entre mer et lagune pendant 3 mois a permis d'appréhender le fonctionnement de la lagune en caractérisant les échanges entre la mer et l'étang de Biguglia sur cette période. Les résultats de cette étude préliminaire sont présentés ci-dessous.

### 4.1. Analyse des harmoniques de marée

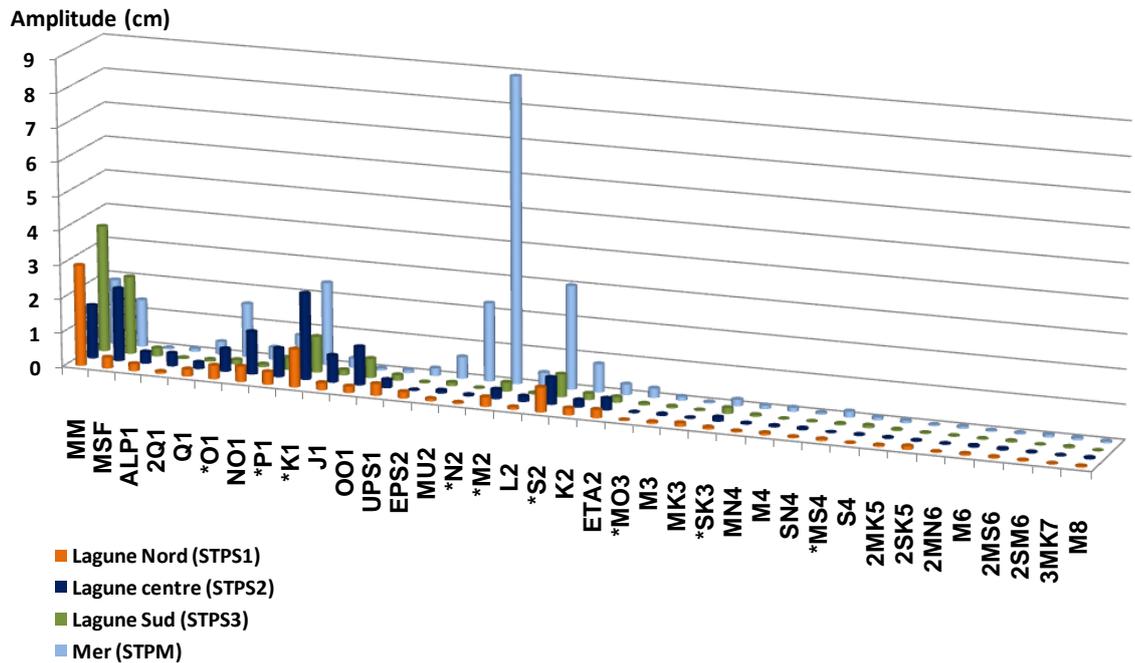
L'analyse des composantes harmoniques de marées nécessite une série de mesures de hauteur d'eau d'au moins une année pour obtenir des données suffisamment fiables.

Elle a toutefois été conduite ici sur trois mois de mesures à titre préliminaire aux trois stations de la lagune et à la station mer (figure 4) afin d'avoir une première estimation de l'impact du grau sur les composantes harmoniques haute fréquence de la marée (période infra journalière). On observe une prédominance des ondes diurnes (dont le nom est codé par un 1) et des ondes semi-diurnes (nom codé par un 2). En mer, ce sont les ondes semi-diurnes qui présentent les amplitudes les plus importantes, et notamment les ondes M2 (générée par la « lune moyenne ») et S2 (générée par le « soleil moyen »). En revanche, dans la lagune, les ondes de type semi-diurnes apparaissent très amorties, tandis que les ondes de type diurnes (K1, O1 et P1) sont peu amorties, en particulier dans le bassin central de la lagune qui présente des ondes diurnes d'amplitudes équivalentes à celles de la station mer. Les ondes tiers-diurne, quart-diurne et de périodes inférieures sont quasiment inexistantes. Ce phénomène est vraisemblablement en lien à l'amortissement des ondes de marée haute fréquence par le grau (la période de Helmholtz<sup>1</sup> du grau de Biguglia est de l'ordre de 7 heures. En outre, la part des composantes harmoniques basse fréquence (mensuelles et semi-annuelles (MM, MSF) ne pourra être mise en évidence qu'à partir de l'analyse de séries temporelles plus longues.

Le site d'étude présente donc une marée de type semi-diurne à inégalité diurne, avec deux marées par jour, d'amplitude inégale. Cette situation est similaire à celle observée au niveau des étangs du Languedoc-Roussillon (Fiandrino *et al.*, 2012). Cette marée semi-diurne semble être fortement amortie par le grau dans l'étang de Biguglia, au contraire des ondes de période journalière. Dans le cas de l'étang Biguglia, la marée est donc beaucoup moins influente qu'au niveau de l'étang du Prévost par exemple (Fiandrino *et al.*, 2012).

---

<sup>1</sup> Toute onde élémentaire pour laquelle la période T est inférieure à 10 Th sera amortie et déphasée par le grau.



*Figure 4 : Résultats de l'analyse des composantes harmoniques de marées à Biguglia, en mer et dans les différentes parties de la lagune.*

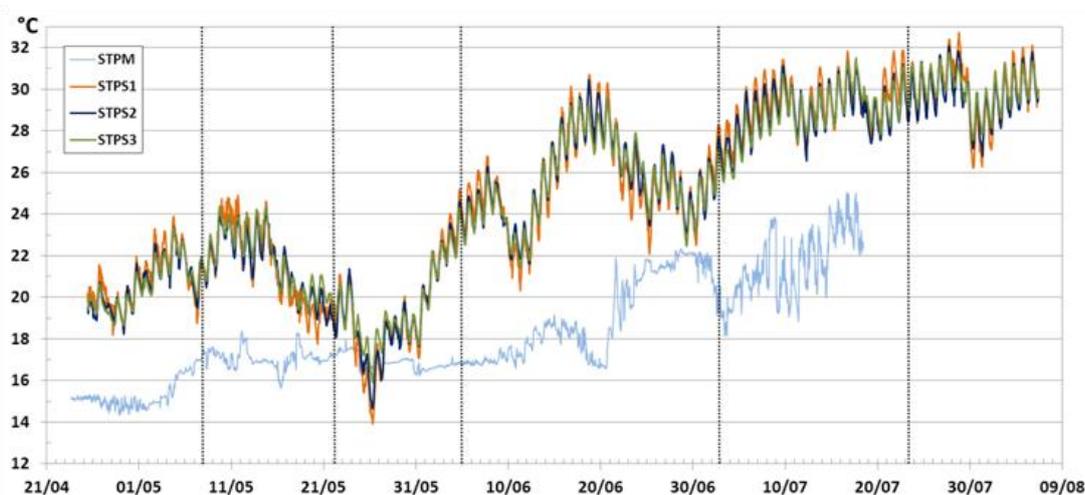
## 4.2. Analyse des paramètres hydrologiques enregistrés par les sondes STP

### 4.2.1. Evolution de la température

Les données de températures enregistrées par les sondes STP reflètent à la fois des variations journalières et saisonnières (figure 5). En mer, la sonde STP est positionnée à une profondeur de 14 m environ. Entre le 23/04 et 18/07, la température s'est échelonnée entre 14,4°C et 25°C. Il est possible de différencier plus précisément 3 périodes présentant des températures relativement homogènes : du 23/04 au 04/05 la température oscille autour de 15°C ; du 08/05 au 11/06 la température avoisine les 17°C ; enfin, à partir du 10/06 la température augmente régulièrement (exception faite d'une brusque diminution entre le 18/06 et le 21/06) pour atteindre des températures globalement supérieures à 20°C après le 21/06. Les variations journalières liées au cycle jour/nuit caractérisées par un réchauffement de l'eau pendant la phase diurne en raison de l'ensoleillement, sont globalement peu visibles au début de la période d'enregistrement, et deviennent plus marquées à partir du 08/07, alors que la colonne d'eau présente des températures élevées. A cette période, les écarts de température entre le jour et la nuit sont de l'ordre de 3 à 4°C.

Dans la lagune, l'évolution des températures dans les trois bassins est remarquablement synchrone, aussi bien en ce qui concerne les évolutions journalières que saisonnières. Les variations à moyen terme sont beaucoup plus importantes qu'en mer, avec des températures globalement bien plus élevées qu'en mer. Les sondes en lagunes étant

positionnées dans le premier mètre sous la surface, l'eau est davantage sujette aux variations de températures résultant de l'ensoleillement, de la pluviométrie et du vent. Ainsi, en lagune les températures de surface sont majoritairement supérieures à 18°C, mais un minimum de 13,9°C (station Nord S1) au cours d'une baisse de température survenue dans les 3 bassins a été enregistré le 26/05, les températures atteignant alors des valeurs similaires aux températures enregistrées par la sonde mer à 14 m de profondeur. A partir du mois de juillet, les températures dans la lagune se stabilisent entre 28 et 30°C, avec un maximum de 31,8°C enregistré à la station S1 le 28/07. L'oscillation journalière des températures, liées à l'ensoleillement diurne, est bien marquée dans la lagune, tout au long de la période d'enregistrement, avec une variation d'environ 2°C entre le jour et la nuit.



**Figure 5 :** Evolution de la température de l'eau en mer (STPM) et dans la lagune (bassin Nord=STPS1, bassin central=STPS2 et bassin Sud=STPS3) à partir des mesures des sondes STP (profondeurs comprises entre -0,3 et -1 m). Les jours de décharge des données des sondes positionnées en lagune sont représentés par les pointillés.

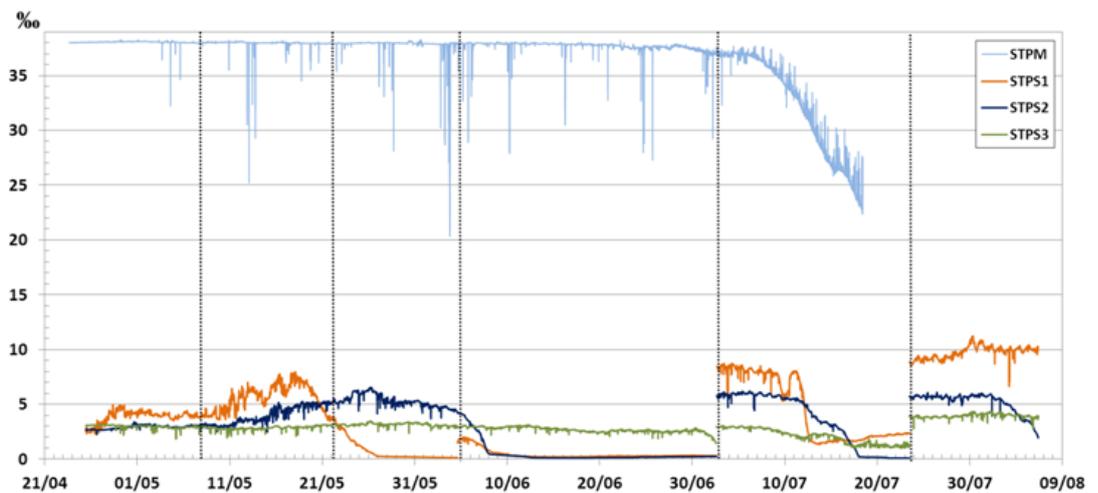
Les mesures des sondes STP révèlent donc une augmentation globale de la température de l'eau liée à l'augmentation de l'ensoleillement entre le printemps et l'été, tandis que les variations journalières sont moins marquées en mer que dans la lagune en raison de la position en profondeur de la sonde mer. Les températures sont généralement élevées dans la lagune puisqu'elles sont majoritairement supérieures à 18°C, dès la fin du mois d'avril. Les températures en mer et en lagune semblent se stabiliser à partir du mois de juillet, vraisemblablement en réponse aux conditions anticycloniques qui s'établissent durablement à partir du mois de juin.

#### 4.2.2. Evolution de la salinité

Les données de salinité enregistrées par la sonde mer STPM indiquent une masse d'eau saline régulièrement affectée par des dessalures ponctuelles (figure 6). Entre le 23/04 et le 29/06, la salinité est globalement homogène (autour de 37,8), avec une chute de salinité pouvant descendre jusqu'à 20,3 (le 03/06). La cause de ces dessalures reste

hypothétique et très certainement liée à un capteur de salinité défectueux. De plus, le capteur de salinité enregistre une déviation à partir du 30/06.

Dans l'étang, la salinité est peu variable au début de la période d'enregistrement, avec des valeurs autour de 3 pour les bassins centre et Sud, et des valeurs légèrement plus élevées (4 à 7) pour le bassin Nord correspondant donc à des eaux saumâtres. A partir du 19/05, jusqu'au 05/06, la salinité descend pour tomber à 0 à la station S1, traduisant éventuellement un apport important d'eau douce par le Bevinco. A la station S2 (centre de l'étang), la salinité suit la même évolution qu'à la station S1, alors que la salinité reste apparemment constante jusqu'au 23/07 dans le bassin sud (autour de 3-4). Il faut néanmoins constater un probable biais de la mesure de la salinité, à partir du 05/05 pour la sonde STPS1, et du 04/06 pour les sondes STPS2 et STPS3, résultant vraisemblablement du biofouling plus important se développant à partir de la période estivale. Le nettoyage des capteurs des sondes à chaque décharge, impliquant alors l'extraction de divers organismes ayant élu domicile au niveau des capteurs, pourrait expliquer les brusques augmentations de valeurs enregistrées après chaque décharge pendant la saison estivale. Les valeurs de salinité enregistrées après le 04/06 notamment sont donc probablement biaisées. Pour autant, ce biais ne semble concerner que les mesures de salinité car de tels décrochements de valeurs n'ont pas été observés sur les courbes de températures.



**Figure 6 :** Evolution de la salinité en mer (STPM) et dans la lagune (bassin Nord=STPS1, bassin central=STPS2 et bassin Sud=STPS3) à partir des mesures des sondes STP (profondeurs comprises entre -0,3 et -1 m). Les jours de décharge des données des sondes positionnées en lagune sont représentés par les pointillés.

### 4.3. Estimation des échanges entre mer et lagune par la méthode des hauteurs d'eau

#### 4.3.1. Analyse des hauteurs d'eau en mer et en lagune

##### *Définition des périodes homogènes*

L'application de la méthode des hauteurs d'eau est réalisable sur des périodes présentant des variations de niveaux d'eau homogènes (Fiandrino *et al.*, 2012). Concernant la série de mesures enregistrées à Biguglia, 5 périodes homogènes ont été déterminées (tableau 3), excluant notamment les décharges des sondes lagunes, qui implique la sortie d'eau des sondes, leur arrêt et leur remise en marche après extraction des données. Cette manipulation a pour conséquence que certaines mesures sont enregistrées à l'air libre. Ces points doivent donc être exclus de la série de données.

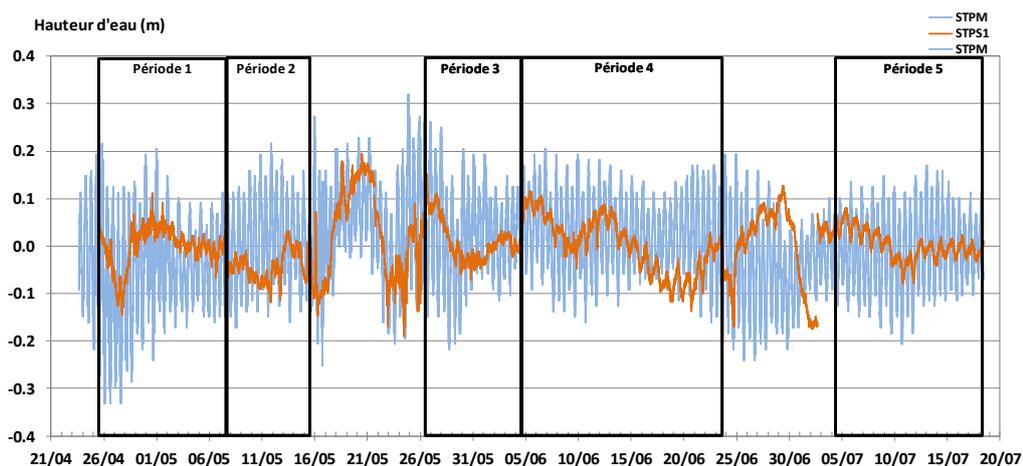
De plus, les sondes n'étant pas repositionnées au même niveau lors de cette opération, un décalage de quelques cm est possible entre ces différentes périodes.

**Tableau 3 :** Début et fin des 5 périodes homogènes définies pour les mesures de hauteurs d'eau en mer et en lagune (station S1).

Périodes	Jour	Heure	
		Mer	Lagune S1 (nord)
<b>1</b> <i>début</i> <i>fin</i>	25-avr	11:38	11:37
	07-mai	11:58	11:57
<b>2</b> <i>début</i> <i>fin</i>	07-mai	15:38	15:38
	15-mai	22:08	22:08
<b>3</b> <i>début</i> <i>fin</i>	26-mai	08:04	08:07
	04-juin	12:44	12:47
<b>4</b> <i>début</i> <i>fin</i>	04-juin	15:14	15:20
	23-juin	13:20	13:20
<b>5</b> <i>début</i> <i>fin</i>	04-juil	11:02	10:59
	18-juil	10:02	09:59

##### *Evolution des hauteurs d'eau*

Il n'est pas possible d'étudier des hauteurs d'eau en mer et dans la lagune dans un référentiel commun, c'est pourquoi les données sont traitées distinctement selon chaque période, et sont centrées sur la valeur moyenne calculée entre chaque décharge pour les mesures en lagune et sur la moyenne de toute la série pour les mesures en mer (figure 7).

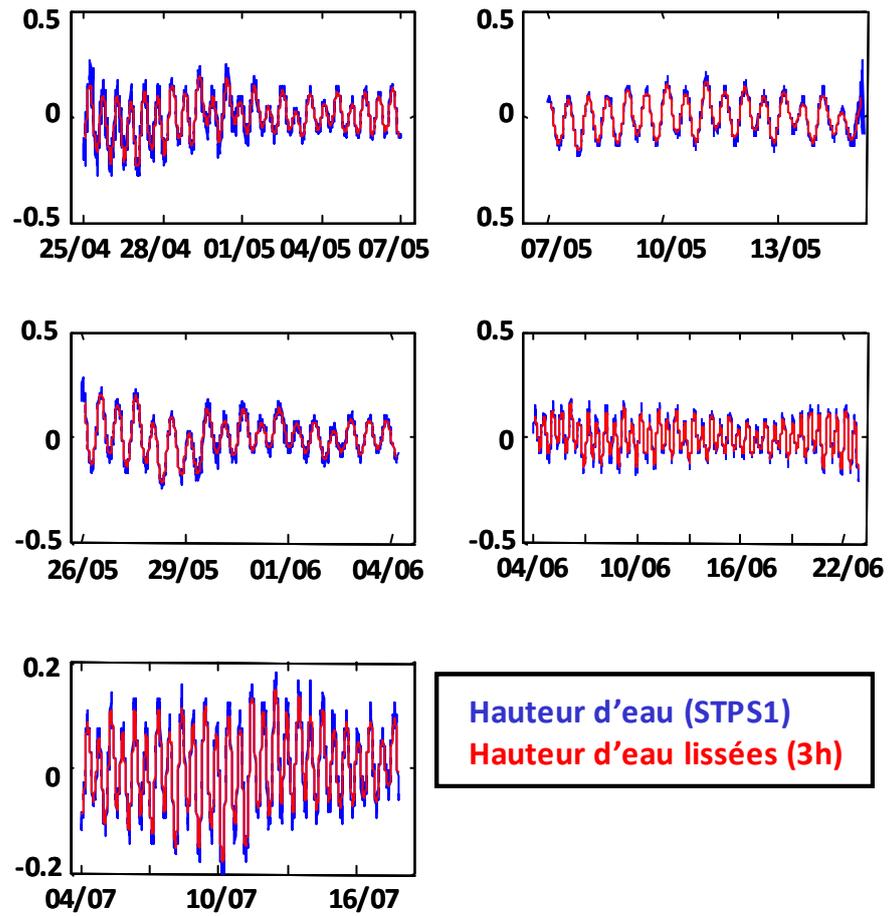


**Figure 7 :** Evolution des hauteurs d'eau en mer (STPM) et dans la lagune (STPS1). Les variations sont centrées sur la moyenne des hauteurs de toute la série (mer) ou sur la moyenne de chaque sous-période (station S1). Les 5 périodes homogènes sont également symbolisées.

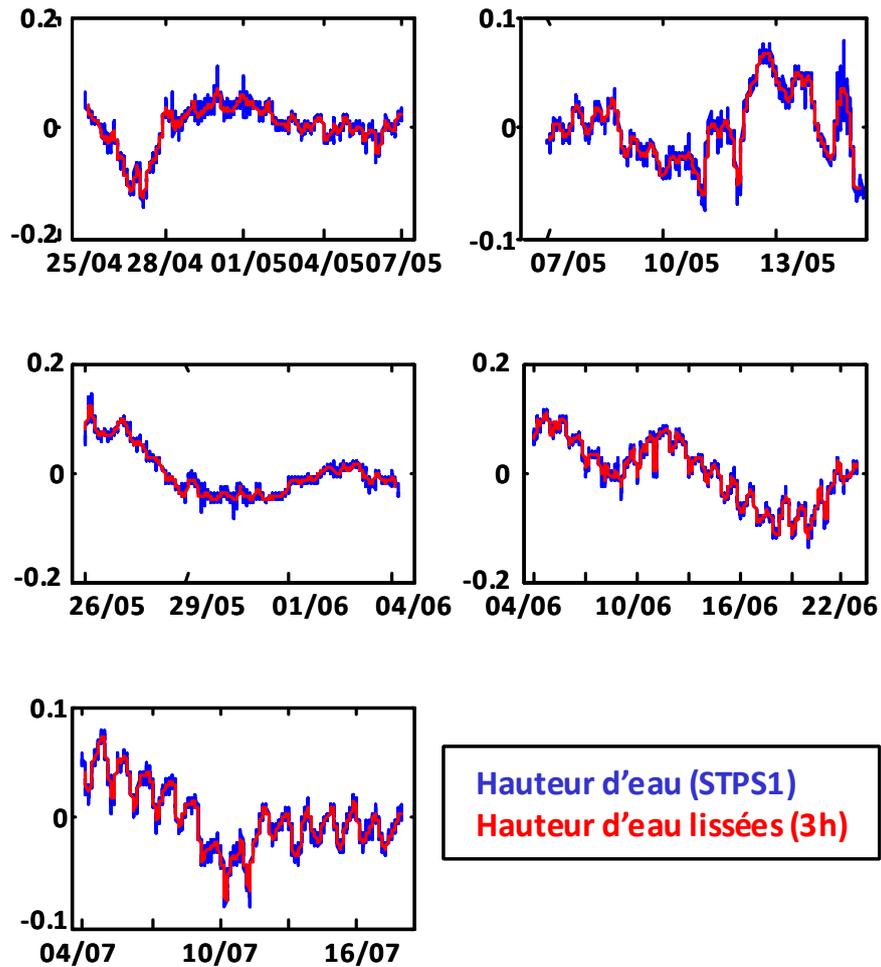
#### *Lissages des signaux de hauteurs d'eau*

Afin de lisser les variations à très haute fréquence résultant de la houle, du vent et du clapot tout en conservant le signal de hauteur d'eau qui traduit les échanges entre mer et lagune, un lissage sur un pas de temps de 3 heures a été effectué sur les données en mer (figure 8) et en lagune (figure 9).

En mer, le signal lissé révèle des variations régulières de la hauteur d'eau suivant un rythme bi-journalier, correspondant au cycle des marées (cf. § 4.1). Dans le bassin Nord de la lagune, le signal de marée apparaît plus ou moins marqué selon les périodes. Il est clairement visible à partir de début juin (périodes 4 et 5 lorsque les conditions de vent et de pression atmosphérique sont calmes). En revanche, d'avril à mai (périodes 1 à 3) les conditions météorologiques sont plus variables (dominance de conditions de basses pressions). Celles-ci engendrent des variations de la hauteur d'eau dans la lagune telles que le signal de marée est « masqué » par les variations de la pression atmosphérique.



*Figure 8 : Evolution des hauteurs d'eau en mer (STPM) ; données brutes centrées réduites (en bleu) et données lissées sur 3h (en rouge).*



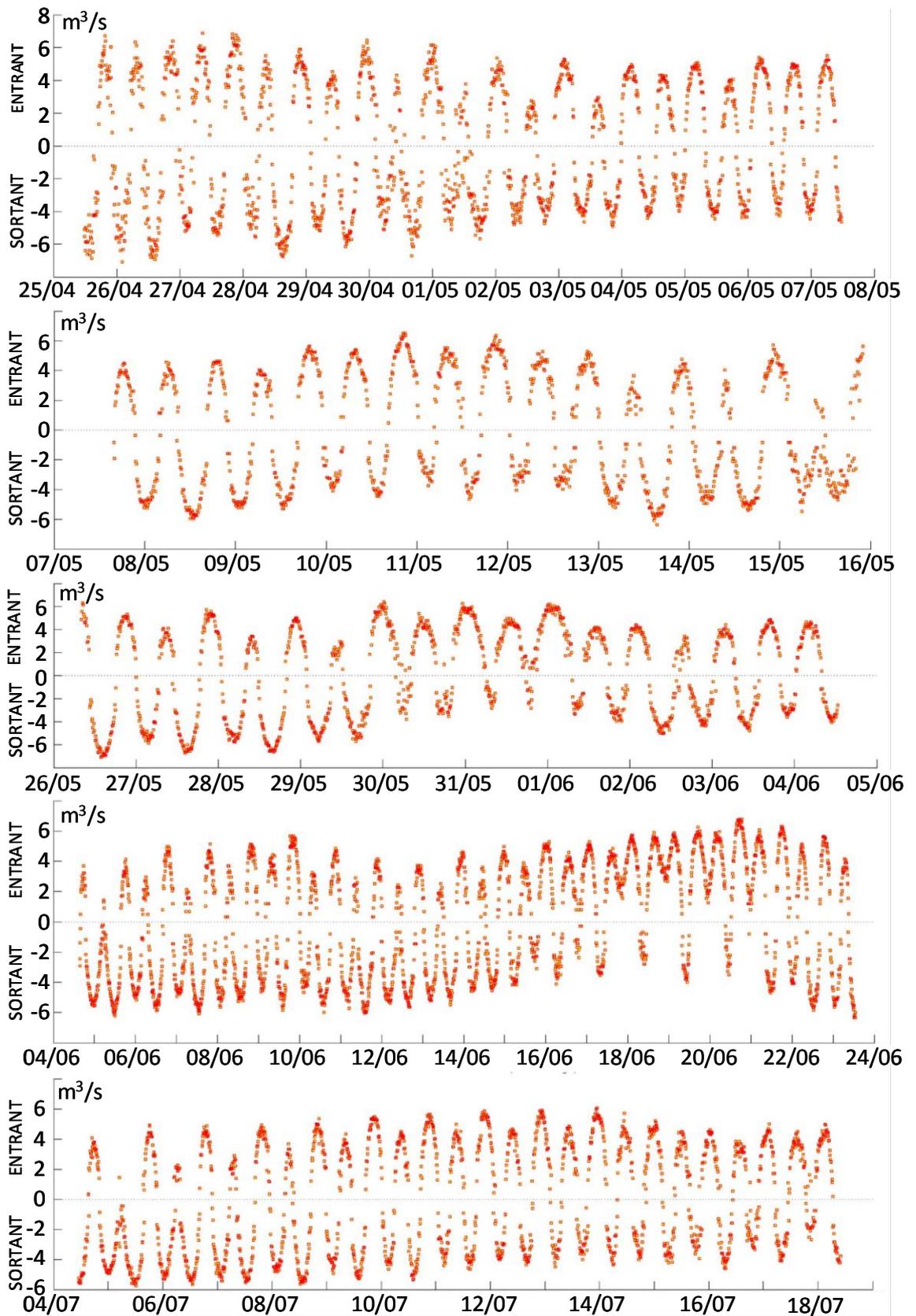
**Figure 9 :** Evolution des hauteurs d'eau dans la lagune (STPS1) ; données brutes centrées réduites (en bleu) et données lissées sur 3h (en rouge).

#### 4.3.2. Estimation des débits instantanés

Les débits instantanés (figure 10) ont été estimés à partir des différences de hauteurs d'eau enregistrées entre la station mer (STPM) et la station du bassin Nord de l'étang de Biguglia (STPS1).

Le débit entrant le plus fort atteint  $6,85 \text{ m}^3/\text{s}$  tandis que le débit sortant le plus important est de  $-7,1 \text{ m}^3/\text{s}$ . Les débits moyens entrants (respectivement sortants) sont de l'ordre  $+3,6 \text{ m}^3/\text{s}$  (respectivement  $-3,5 \text{ m}^3/\text{s}$ ). Les débits sont plus faibles au cours de la période 5, qui correspond à une météorologie très ensoleillée et calme, avec peu de variations de pression.

Les valeurs de débits instantanés calculés au niveau dans le grau de la lagune de Biguglia sont du même ordre de grandeur que celles mesurées dans l'étang de La Palme (Fiandrino *et al.*, 2012) et inférieures à celles mesurées et estimées dans le grau de l'étang du Prévost (Fiandrino *et al.*, 2012).



**Figure 10 :** Evolution temporelle des débits instantanés (pas de temps de 10 min) entre la mer et l'étang de Biguglia, estimés à partir des variations de hauteurs d'eau entre les stations STPM et STPS1 pendant les 5 périodes.

Ces débits étant en général surestimés par la méthode des hauteurs d'eau (Fiandrino *et al.*, 2012), il sera nécessaire d'appliquer un facteur de correction calculé à partir de campagnes de mesures directes de courant à Biguglia afin de mieux prendre en compte les frottements dans le calcul des débits à partir des hauteurs d'eau.

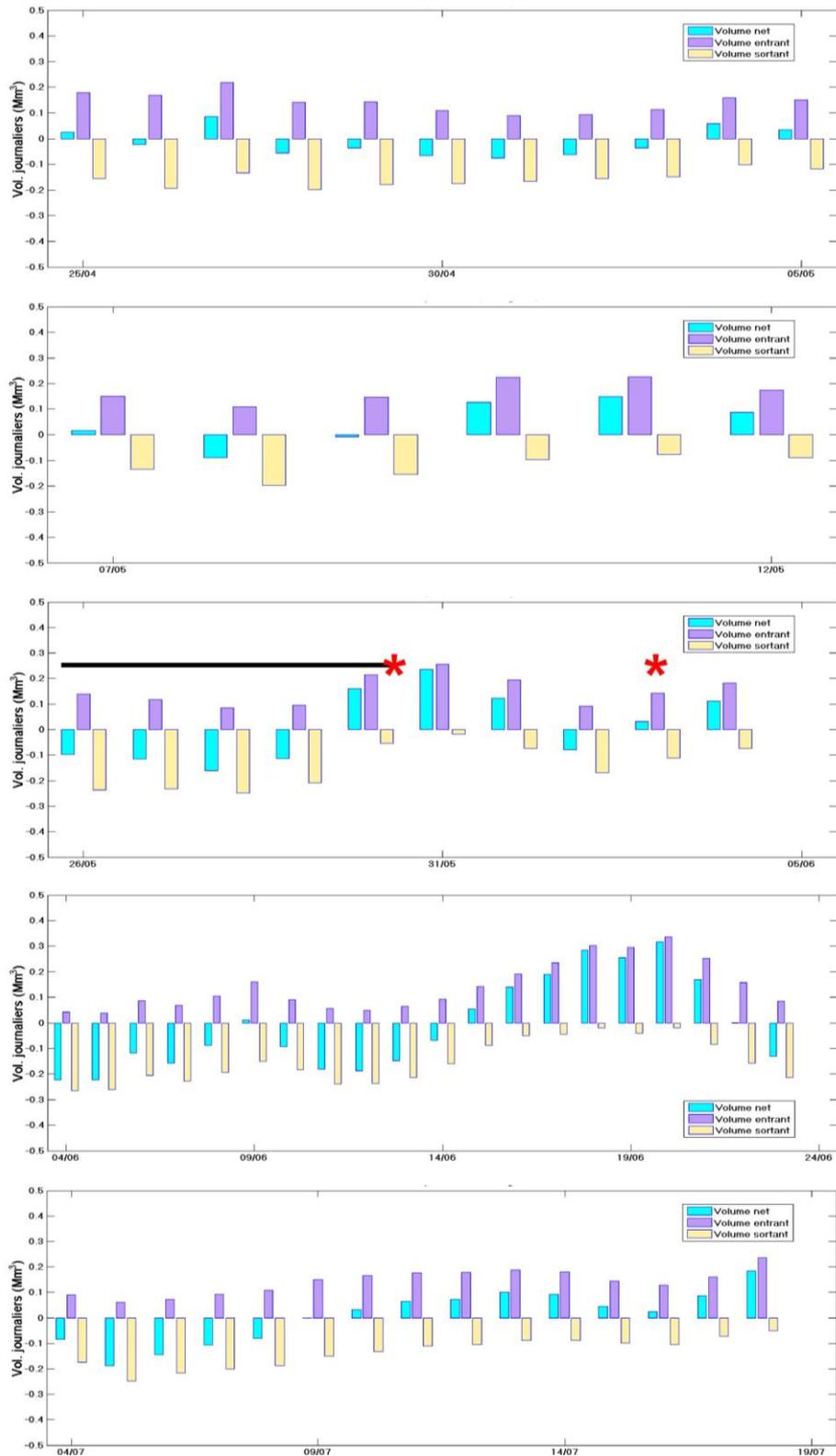
#### 4.3.3. Estimation des volumes journaliers échangés

Les volumes journaliers entrants et sortants ont été calculés à partir des débits instantanés, et permettent de déduire le volume net échangé sur une journée entre la lagune et la mer.

Les volumes journaliers estimés sur la période d'étude varient entre  $-0,61 \text{ Mm}^3/\text{j}$  et  $+0,59 \text{ Mm}^3$  (figure 11). Pour rappel, les valeurs négatives désignent par convention les volumes nets sortant de la lagune et les valeurs positives les volumes nets entrant dans la lagune. On observe une alternance de flux entrant et de flux sortant, les inversions se produisant parfois d'une journée sur l'autre. A partir de mi-juin cependant, les inversions de flux se produisent à des intervalles plus longs, reflétant éventuellement la stabilité atmosphérique des conditions anticycloniques dominant à cette période.

La dessalure observée à la station mer à partir du début de juillet ne semble pas reliée à un flux sortant des eaux saumâtres de la lagune : bien que les volumes échangés soient négatifs (flux sortant) au début du mois de juillet, ils deviennent positifs (flux entrant) du 10/07 au 18/07.

La méthode d'estimation des volumes journaliers ne peut tenir compte de la fermeture complète du grau (observée du 21/05 au 29/05). Les volumes journaliers estimés pour la période du 26 au 29 ne sont donc pas représentatifs, puisqu'à ce moment il n'y pas d'échanges directs possibles à travers le grau entre la mer et la lagune. Cela dit, il ne semble pas y avoir d'effet direct de l'ouverture du grau par intervention mécanique sur les échanges consécutifs. En effet, le volume net estimé traduit un flux globalement sortant pendant 10 jours à partir du 05/06, qui correspond au milieu de la période d'intervention sur le grau. Si l'on considère qu'il s'agit bien d'un effet de chasse celui-ci reste de courte durée et d'amplitude moyenne, au regard des volumes échangés sur le reste de la période d'étude. A l'instar de l'étang de La Palme, les cycles entrées/sorties ne sont pas infra-journaliers, mais plutôt de l'ordre de quelques jours (Fiandrino *et al.*, 2012).



**Figure 11 :** Estimation des volumes journaliers échangés entre la mer (station Mer) et la lagune de l'étang de Biguglia (station S1) sur les 5 périodes présentant des conditions homogènes, calculés à partir des données lissées sur 3 heures. Les jours de fermeture du grau (barre horizontale noire) et les jours d'intervention pour dégager le grau (astérisques rouges) sont indiqués.

## 5. CONCLUSIONS

L'étang de Biguglia présente une configuration originale du fait de sa géomorphologie particulière. Son orientation Nord-Sud avec une ouverture à la mer au Nord et un important apport d'eau douce par le Sud laisse envisager l'existence d'un gradient de salinité traduisant une influence décroissante des entrées marines. Toutefois, les salinités faibles ( $< 10$ ) sur toute la lagune rendent compte du confinement important de cette lagune avec des conséquences notoires sur la dilution des nutriments, des contaminants, et le développement du compartiment phytoplanctonique.

Cette étude préliminaire a permis d'étudier la nature des échanges entre la lagune et la mer sur une durée de 4 mois en appliquant la méthode des hauteurs d'eau à l'environnement particulier de Biguglia. La méthode a ainsi pu être appliquée avec succès grâce aux mesures de hauteurs d'eau des sondes STP placées en mer et en lagune.

Cette approche a tout d'abord permis de caractériser l'environnement hydrologique de la lagune au cours de la période estivale. Ainsi la température au niveau de l'étang est sujette à des variations journalières significatives du fait de la faible profondeur moyenne, et on observe logiquement une tendance au réchauffement avec l'augmentation de l'ensoleillement au début de l'été. Au contraire, l'existence d'un gradient de salinité croissante du Sud vers le Nord n'a pas été clairement mise en évidence, bien que les valeurs de salinité soient globalement légèrement plus élevées dans le bassin Nord. Des apports d'eau douce ponctuellement importants par le Bevinco pourraient éventuellement affaiblir ce gradient de salinité. D'autre part, les mesures de température et de salinité n'ont pas pu expliquer certaines variations et différences observées au niveau de la station en mer (dessalures ponctuelles ou persistantes). La mesure de paramètres hydrologiques seule ne permet donc pas d'appréhender les relations entre la lagune et la mer.

L'analyse des harmoniques de marée a permis de caractériser son influence au sein de la lagune, révélant un amortissement important des ondes semi-diurnes, alors que les ondes diurnes semblent se propager jusque dans le bassin Sud. En conséquence, les variations de hauteurs d'eau dans la lagune suivent un rythme journalier, alors qu'en mer les hauteurs d'eau oscillent avec une alternance de phases semi-diurne.

Les débits instantanés estimés à partir de la différence de hauteurs d'eau entre mer et lagune révèlent des inversions de courant deux fois par jour, en rapport avec la marée de type semi-diurne. Les débits instantanés deviennent également plus faibles à la fin de la période d'étude (période 5), tandis que les variations de hauteurs d'eau dans la lagune se stabilisent, traduisant l'influence de conditions anticycloniques persistantes à partir du mois de juillet. Les volumes journaliers échangés montrent des inversions régulières entre des périodes de plusieurs jours caractérisées par des flux majoritairement entrants puis sortants.

## 6. PERSPECTIVES

Plusieurs aspects n'ayant pas pu être traités au cours de cette étude préliminaire doivent être considérés dans un deuxième temps, afin de valider la méthode des hauteurs d'eau d'une part, et de comprendre plus précisément le fonctionnement de la lagune de Biguglia d'autre part.

Les données météorologiques n'ont pas pu être récupérées pour cette étude préliminaire. Il serait donc intéressant de mettre en relation les résultats observés avec l'évolution des pressions atmosphériques et du vent au cours de la période d'étude. D'autre part, il est important de poursuivre le suivi des hauteurs d'eau sur plusieurs saisons, afin de caractériser les différentes conditions hydrologiques rencontrées au cours d'un cycle annuel. Il est donc prévu de poursuivre l'acquisition des données des hauteurs d'eau, de température et de salinité pendant une année entière.

La méthode des hauteurs d'eau permet d'obtenir une bonne estimation des échanges entre mer et lagune sur la base de mesures dont l'acquisition est relativement aisée (mesures de hauteur d'eau). Cependant, il est nécessaire de réaliser en parallèle des mesures directes de débit dans le grau, de manière à valider la méthode et potentiellement définir un facteur de correction, car cette approche tend à surestimer les débits instantanés et les volumes journaliers échangés. Plusieurs campagnes de mesures de courant devront donc être réalisées à l'aide d'un ADCP tracté à différentes saisons.

## 7. REFERENCES

- Basset A., Elliott M., West R.J., Wilson J.G. (2013). Estuarine and lagoon biodiversity and their natural goods and services. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. Sous presse.
- Chapman P.M. (2012). Management of coastal lagoons under climate change. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 110, 32-35.
- Colin M., (2009). Estimation des échanges mer-lagune en lien avec la Directive Cadre sur l'Eau. Rapport de stage de Master I de l'Université de Perpignan, 37 p.
- Derolez V., Leurion A., Fiandrino A. (2012). Directive Cadre Eau. Estimation du degré d'échange avec la mer pour les lagunes du bassin Rhône Méditerranée & Corse. Agence de l'eau,  
Ref. RST. DOP/LER-LR/12-10, 36p.<http://archimer.ifremer.fr/doc/00094/20558/>
- Fiandrino A., Giraud A., Robin S., Pinatel C. (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 final du Contrat n° 2010/0034
- Frisoni GF & Dutrieux E (1992) L'étang de biguglia – Diagnostic écologique 1991-1992. Rapp IARE : 167 p.
- Lazure P., (2000). Mesures marégraphiques dans l'étang de Diane. Présentation des résultats. 11p.
- Di Lorenzo J.L., (1988). The overtide and filtering response of small inlet/bay systems. *LectureNotes and Coastal and Estuarine Studies* 29 : 24-53.
- Mehta J., Ozsoy A.E, (1978). Inlet hydraulics. In *Stability of Tidal Inlets Theory and Engineering* (Brunn, P. Ed.) Elsevier Publishing Co., New York, NY 96pp.
- Orsoni V., Souchu P., Sauzade D. (2001). Caractérisation de l'état d'eutrophisation des trois principaux étangs corses (Biguglia, Diana et Urbino), et proposition de renforcement de leur surveillance. Rapport final. <http://archimer.ifremer.fr/doc/00074/18534/r>
- Orsoni V. & Tomasino C. (en cours) Synthèse et mise en forme des données relatives à la bathymétrie de l'étang de Biguglia.