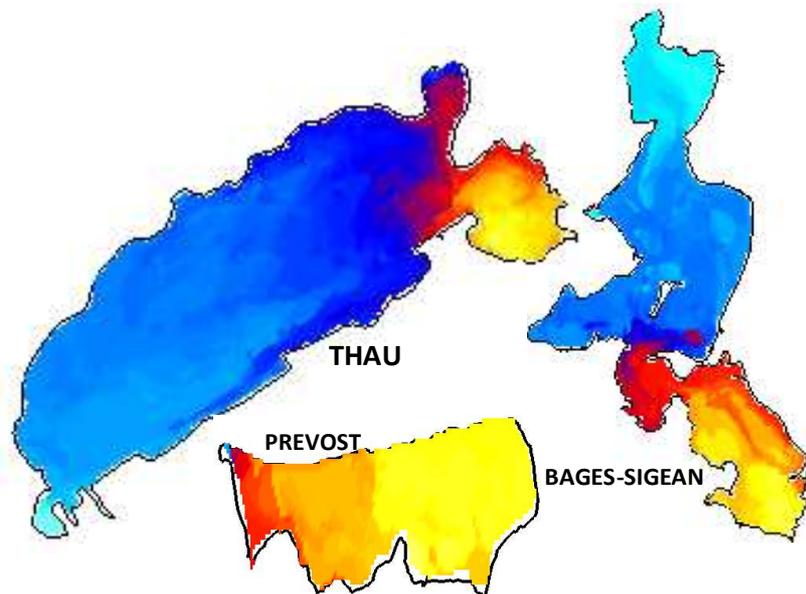


- (1) Département Océanographie et Dynamique des Ecosystèmes côtiers - Laboratoire Environnement Ressources du Languedoc Roussillon
(2) Agence de l'Eau Rhône Méditerranée et Corse
(3) IXSurvey – La Ciotat

Annie Fiandrino⁽¹⁾, Anaïs Giraud⁽²⁾, Sandrine Robin⁽³⁾, Christine Pinatel⁽³⁾

Octobre 2012 R.INT.ODE/UL/LER/LR 12-35

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 des contrats : n°10/3211472 (Agence de l'Eau)

n°10/3211590 (Région Languedoc-Roussillon)

Validation d'une méthode d'estimation des volumes
d'eau échangés entre la mer et les lagunes et
définition d'indicateurs hydrodynamiques associés

Fiche documentaire

| | | |
|---|---|---|
| Numéro d'identification du rapport : n°12-35 Diffusion : libre : <input checked="" type="checkbox"/> restreinte : <input type="checkbox"/> interdite : <input type="checkbox"/> | | date de publication : Oct. 2012 nombre de pages : 96 bibliographie : Oui illustration(s) : Oui langue du rapport : Française |
| Validé par : Bruno Andral Adresse électronique : Bruno.Andral@ifremer.fr | | |
| Validation d'une méthode d'estimation des volumes d'eau échangés entre la mer et les lagunes et définition d'indicateurs hydrodynamiques associés | | |
| Contrats n° 10/3211472 et 10/3211590 Rapport intermédiaire <input type="checkbox"/> Rapport définitif <input checked="" type="checkbox"/> | | |
| Auteur(s) principal(aux) : (1) A. Fiandrino (2) A. Giraud (3) S. Robin (3) C. Pinatel | Organisme / Direction / Service, laboratoire (1) Département Océanographie et Dynamique des Ecosystèmes côtiers - Laboratoire Environnement Ressources du Languedoc Roussillon (2) Agence de l'Eau Rhône Méditerranée et Corse (3) IXSurvey – La Ciotat | |
| Encadrement(s) : | | |
| Cadre de la recherche : Convention cadre AERM&C et Ifremer et contrat d'étude avec la région Languedoc-Roussillon | | |
| Destinataire : AERM&C, Région Languedoc-Roussillon | | |
| Résumé <p>La Directive Cadre sur l'Eau demande de définir pour les masses d'eau de transition « des facteurs physiques et chimiques ayant un impact potentiel sur la structure et la composition des peuplements biologiques ». Dans les lagunes, le fonctionnement des échanges avec la mer, la circulation des masses d'eau au sein de l'écosystème, la topographie (sinuosité du contour, marche bathymétrique...) qui peut dans certains secteurs géographiques fortement contraindre et limiter cette dynamique des masses d'eau, constituent autant de facteurs physiques pertinents à caractériser. Le temps de renouvellement et le temps de résidence des masses d'eau représentent des indicateurs caractéristiques de ces facteurs physiques. Le temps de renouvellement, défini à l'échelle globale d'une lagune, est calculé à partir des volumes d'eau qui journallement entrent et sortent de la lagune au travers des graus.</p> <p>Cette étude a permis de valider une méthode simple d'estimation de ces volumes journaliers échangés entre une lagune et la mer à partir de mesures haute fréquence de hauteurs d'eau de part et d'autre du grau. Des préconisations relatives au protocole d'acquisition et de traitement des données de hauteur d'eau et de salinité ont été émises et les limites d'application de la méthode ont été précisées.</p> <p>Le temps de résidence qui fournit une information spatialisée sur la dynamique des masses d'eau a également été calculé à l'aide du modèle hydrodynamique MARS-3D (sur les lagunes de Thau, Bages-Sigean, l'ensemble du complexe des étangs Palavasiens et l'étang de l'Or).</p> <p>La confrontation de ces deux indicateurs a permis de mettre à jour la notion de volume de mélange qui renseigne sur les zones où le mélange entre eaux saumâtres et eaux marines est efficace et sur les zones confinées.</p> | | |
| Mots-clés Echanges mer-lagune, méthode d'estimation, indicateurs hydrodynamiques, efficacité de mélange | | |

SOMMAIRE

| | |
|---|-----------|
| 1. INTRODUCTION..... | 1 |
| 2. OBJECTIFS | 3 |
| 3. MATERIELS ET METHODES | 5 |
| 3.1. DYNAMIQUE DES ECHANGES ENTRE LA MER ET LES LAGUNES | 5 |
| 3.2. METHODE D'ESTIMATION DES VOLUMES JOURNALIERS ECHANGES ENTRE LA MER ET UNE LAGUNE A PARTIR DE MESURES DE HAUTEUR D'EAU DE PART ET D'AUTRE DU GRAU..... | 7 |
| 3.3. INDICATEURS HYDRODYNAMIQUES | 10 |
| 3.4. LE MODELE HYDRODYNAMIQUE MARS-3D ET SES SITES D'APPLICATION | 13 |
| 3.5. SITES D'ETUDE ET CAMPAGNES DE MESURE | 15 |
| 4. RESULTATS – ETANG DU PREVOST | 23 |
| 4.1. ANALYSE DES SIGNAUX DE HAUTEUR D'EAU EN MER ET DANS L'ETANG DU PREVOST 23 | |
| 4.2. ANALYSE DES SIGNAUX MESURES DANS LE GRAU DU PREVOST..... | 30 |
| 4.3. APPLICATION DE LA METHODE D'ESTIMATION DES DEBITS A PARTIR DES MESURES DE HAUTEUR D'EAU | 35 |
| 5. RESULTATS – ETANG DE LA PALME | 43 |
| 5.1. ANALYSE DES SIGNAUX DE HAUTEUR DANS L'ETANG DE LA PALME ET DE SALINITE EN AVAL ET EN AMONT DU PONT SNCF..... | 43 |
| 5.2. ANALYSE DES SIGNAUX DE COURANT MESURES SOUS LE PONT SNCF..... | 48 |
| 6. INDICATEURS HYDRODYNAMIQUES | 59 |
| 6.1. TAUX DE RENOUVELLEMENT | 59 |
| 6.2. TEMPS DE RESIDENCE | 61 |
| 6.3. CONFRONTATION DU TAUX/TEMPS DE RENOUVELLEMENT ET DU TEMPS DE RESIDENCE..... | 66 |
| 6.4. IMPACT POTENTIEL DES FACTEURS PHYSIQUES SUR LA STRUCTURE ET LA COMPOSITION DES PEUPELEMENTS BIOLOGIQUES ?..... | 67 |
| 7. CONCLUSION ET PERSPECTIVES | 71 |
| 8. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES | 74 |

1. Introduction

Les lagunes méditerranéennes sont des systèmes semi-fermés soumis à une forte pression anthropique (apports par les bassins versants en éléments nutritifs, contaminants chimiques...). Tout calcul de bilan de matière à l'échelle d'une lagune nécessite la connaissance préalable d'une part des volumes d'eau douce et des charges en contaminants importées par le bassin versant et d'autre part des volumes d'eau saumâtre et des charges en contaminants exportées vers la mer. De même, les volumes d'eau de mer qui entrent dans une lagune participent à la dilution des concentrations en contaminants dans le milieu.

La Directive Cadre sur l'Eau demande de définir pour les masses d'eau de transition « des facteurs physiques et chimiques ayant un impact potentiel sur la structure et la composition des peuplements biologiques ». Dans les lagunes, le fonctionnement des échanges avec la mer, la circulation des masses d'eau au sein de l'écosystème, la topographie (sinuosité du contour, marche bathymétrique...) qui peut dans certains secteurs géographiques fortement contraindre et limiter cette dynamique des masses d'eau, constituent autant de facteurs physiques pertinents à caractériser. Les bilans hydriques et par conséquent le temps de renouvellement des masses d'eau qu'il est possible de définir à l'échelle globale d'une lagune représentent des indicateurs caractéristiques de ces facteurs physiques. En complément, le temps de résidence des eaux, simulé à l'aide de modèles hydrodynamiques, fournit une information spatialisée et donc locale sur la dynamique des masses d'eau.

A partir d'une estimation des volumes d'eau qui, journallement, entrent et sortent de la lagune au travers des graus, il est possible de calculer un temps de renouvellement des eaux lagunaires ainsi que la part respective des apports continentaux et marins à ce temps de renouvellement.

Toutefois le temps de renouvellement constitue un indicateur global puisque son estimation est basée sur l'hypothèse que la lagune est un milieu parfaitement mélangé. Cet indicateur ne permet donc pas de rendre compte de la tendance de certains secteurs lagunaires à stocker les apports en contaminants en provenance du bassin versant.

L'information spatialisée fournie par le temps de résidence des eaux consiste à cartographier les zones plus ou moins bien mélangées (et par conséquent plus ou moins confinées) au sein d'une lagune. Cette information permet de proposer une gestion adaptée et optimale des points de rejets (nutriments, contaminants...) i) : en limitant le stockage de matières polluantes dans les secteurs confinés et ii) : en favorisant la dilution de ces matières polluantes dans les secteurs les mieux renouvelés.

2. Objectifs

Une étude récente réalisée dans le cadre d'un stage de Master (Colin, 2009) a montré qu'une caractérisation « simple » des volumes journaliers entrants et sortants d'une lagune peut être faite à partir de mesures haute fréquence de hauteurs d'eau de part et d'autre du grau.

La robustesse et la fiabilité de cette méthode simple d'estimation des échanges mer-lagune doivent être caractérisées afin que celle-ci puisse être appliquée à terme sur les lagunes qui le nécessitent. Pour cela, il est nécessaire de tester cette méthode sur un pool de lagunes présentant des fonctionnements hydrauliques différents.

L'objectif de la présente étude est donc double. Il s'est agit :

- d'une part, de valider la méthode d'estimation des 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 deux lagunes, Le Prévost et La Palme, qui présentent, vis-à-vis des entrées / sorties d'eau, des fonctionnements différents.
- d'autre part de fournir, sur les sites sur lesquels le modèle hydrodynamique MARS-3D est appliqué¹, des temps de résidence locaux et des temps de renouvellement simulés. Ces deux indicateurs sont comparés afin de préciser la représentativité spatiale du temps de renouvellement. Les secteurs lagunaires pour lesquels les temps de résidence sont plus importants que le temps de renouvellement calculé globalement à l'échelle de la lagune peuvent alors être considérés comme des secteurs « sensibles », c'est-à-dire susceptibles de stocker de la matière. Des cartographies de secteurs sensibles sont proposées sur les lagunes sur lesquelles le modèle hydrodynamique est appliqué.

Ce rapport présente, dans la troisième partie, l'ensemble du matériel et des méthodes utilisés dans la suite du travail avec en particulier la méthode d'estimation des échanges et une présentation des différents indicateurs hydrodynamiques. Les résultats obtenus sur les lagunes du Prévost et de La Palme et les limites d'application de la méthode d'estimation des débits sont exposés dans la quatrième partie. Les résultats obtenus sur l'étang de Thau dans le cadre de l'étude préliminaire (Colin, 2009) sont également repris ici. La cinquième partie regroupe les résultats concernant les indicateurs hydrodynamiques. Les conclusions et perspectives à cette étude sont exposées dans la dernière partie.

¹ Actuellement le modèle hydrodynamique MARS-3D est appliqué sur les étangs de Thau, Bages-Sigean et sur le complexe des étangs Palavasiens et l'étang de l'Or dans le cadre d'une thèse co-financée par la Région LR et l'Ifremer.

3. Matériels et méthodes

3.1. Dynamique des échanges entre la mer et les lagunes

Les échanges d'eau entre la mer et une lagune sont la conséquence des différences de niveaux d'eau qui existent de part et d'autre de son / ses grau(s). Plus cette différence de niveaux est grande et plus l'échange induit est important, l'échange se faisant la plupart du temps du niveau le plus haut vers le niveau le plus bas (Région Languedoc-Roussillon, 2000).

Le grau agit comme un filtre qui, par le frottement du courant sur le fond, freine les mouvements d'eau dans un sens ou dans l'autre et limite les échanges mer-lagune. (Mehta, 1978 ; Di Lorenzo, 1988 ; Lazure, 2000). Ce frein sera d'autant plus important que la section d'échange et la profondeur du grau sont faibles et que le grau est long.

Les variations de niveau côté mer sont principalement dues aux effets conjugués de la marée, de la pression atmosphérique et du vent (Burtchaell, 2000). Le vent, les apports d'eau douce et l'évaporation font varier les niveaux d'eau dans la lagune. Les volumes journaliers entrants et sortants sont donc la résultante de l'intégration dans le temps de l'ensemble de ces processus qui présentent des temps caractéristiques très différents et fortement variables car directement liés à la variabilité des conditions environnementales (hydrologie / météorologie).

3.1.1. La marée

La marée est le seul forçage permanent agissant sur toutes les lagunes méditerranéennes connectées à la mer. Ce caractère permanent fait que ce forçage joue un rôle essentiel dans les échanges d'eau entre la mer et la lagune. Ce phénomène correspond aux variations du niveau de la mer dues à l'attraction gravitationnelle de la Lune et du Soleil sur la Terre.

La marée peut être considérée comme la somme de marées élémentaires strictement périodiques appelées composantes harmoniques. La courbe de marée d'une composante est une sinusoïde dont l'amplitude et la phase ne dépendent que du lieu d'observation.

Les composantes harmoniques sont réparties en quatre groupes (SHOM) :

- les ondes de longues périodes : bimensuelles, mensuelles, semestrielles, annuelles... (Ondes Sa)
- les ondes diurnes dont la période est voisine de 24 heures (Ondes K1 ; O1)
- les ondes semi-diurnes dont la période est voisine de 12 heures (Ondes M2 ; S2)
- les ondes supérieures et composées de périodes quart-diurne, tiers-diurne...

Les ondes diurnes et semi-diurnes sont généralement les plus importantes. Elles génèrent la forme générale de la marée en un lieu et déterminent le type de la marée.

En Méditerranée, la marée est semi-diurne à inégalité diurne : les harmoniques diurnes et semi-diurnes sont du même ordre de grandeur, toutefois les harmoniques semi-diurnes sont légèrement plus importantes. Il y a donc deux pleines mers et deux basses mers par jour, mais les amplitudes des deux pleines mers (ou deux basses mers) successives sont différentes. L'amplitude moyenne de la marée est de 20 cm environ (toutefois elle peut atteindre jusqu'à 1 m dans le Golfe de Gabès ou en mer Adriatique, NASA). Cette faible amplitude est due à l'atténuation de la marée lorsque les eaux de l'Atlantique entrent par le détroit de Gibraltar en mer Méditerranée.

Un signal temporel de hauteur d'eau peut être décomposé en ses différentes composantes de marée à partir de l'analyse harmonique (Foreman, 1977). Les résultats de cette analyse sont les amplitudes et les phases relatives de chacune des ondes de marée.

L'analyse harmonique des séries temporelles de hauteur d'eau enregistrées dans le cadre de cette étude sur les sites du Prévost et de La Palme a été réalisée grâce au logiciel fourni par Foreman. Les caractéristiques (amplitude et phase) de chaque composante de l'onde de marée mesurée en mer et dans les lagunes sont comparées aux caractéristiques des ondes de marée fournis par le SHOM à Sète et Banyuls.

3.1.2. La pression atmosphérique

La pression atmosphérique, qui traduit le poids que l'air exerce sur le monde qui nous entoure, varie en permanence sous l'action de nombreuses contraintes et selon des lois complexes. Une hausse de la pression que l'air exerce sur la mer s'accompagne donc d'une baisse du niveau en mer (décôte barométrique) tandis qu'une baisse de pression de 1 millibar occasionne une augmentation du niveau de la mer (surcôte barométrique) de 1 centimètre : c'est le phénomène du baromètre inversé [$\pm 1 \text{mBar} = \mp 1 \text{cm}$].

Aux oscillations régulières dues à la marée se superpose donc le forçage induit par les variations irrégulières de la pression atmosphérique.

3.1.3. Le vent

Même si l'effet du vent sur les lagunes est irrégulier, son rôle est déterminant dans la dynamique des masses d'eau à l'intérieur des étangs car il permet la mise en mouvement des masses d'eaux par l'apparition de courants. Le vent, phénomène barocline², agit sur un plan d'eau (lagune, Golfe du Lion en l'occurrence) en poussant l'eau superficielle dans la direction du vent : il s'ensuit alors un basculement du plan d'eau autour de son niveau moyen. En fonction de sa direction, de sa vitesse, de la longueur du fetch³ et de la durée du coup de vent, la surcote ou la décote dynamique ne sera pas la même (Burtchaell, 2000). D'autre part, lorsque le vent s'arrête, le basculement s'inverse progressivement : c'est le phénomène de seiche (Annexe I).

Le Golfe du Lion peut être considéré comme un bassin semi-fermé dans lequel ce phénomène d'oscillation est susceptible de se mettre en place sous certaines conditions de vent. Selon les deux axes principaux du Golfe du Lion, deux périodes de résonance peuvent être calculées. Une seiche de période 1h, 1h30 ou 3h selon le nombre de nœuds peut s'établir suivant l'axe ouest-est, une seiche de période de l'ordre de 13 mn, 20 mn, 40 mn peut s'établir suivant l'axe nord-sud (Annexe I).

Les étangs Méditerranéens français sont orientés de telle sorte que les vents de terre secs et froids (Tramontane N-O, Mistral N-O) provoquent une baisse du niveau de la mer près de la côte et facilitent l'écoulement de l'eau de l'étang vers la mer. Par contre, les vents marins chauds et humides (secteur sud) engendrent une hausse du niveau marin et les eaux marines pénètrent dans les étangs (Moine, 2005).

3.1.4. Impact des graus sur la propagation de la marée

Au passage des graus, qui constituent des étranglements plus ou moins importants, la marée subit le phénomène d'amortissement dû à l'étranglement de la passe. En effet, l'onde de marée perd plus ou moins d'énergie en fonction de la section du grau qu'elle traverse. On observe

² Barocline : dont l'effet n'est pas uniforme sur la verticale.

³ Fetch : Distance sur un plan d'eau au dessus de laquelle souffle un vent sans rencontrer d'obstacle. Plus cette distance est faible et moins l'impact du vent est important.

alors une différence d'amplitude entre la mer et la lagune et un déphasage de la marée dans la lagune.

Cet amortissement décrit par DiLorenzo (1988) est fonction d'une période caractéristique du système, appelée période d'Helmholtz propre à chaque grau, telle que :

$$T_h = \frac{2\pi}{F_h} \quad \text{avec} \quad F_h = \sqrt{\left(g \frac{A_c}{L A_s} \right)}$$

avec :

- F_h : fréquence d'Helmholtz.
- g : accélération de la pesanteur (9.81 m/s²).
- L : longueur du grau (en m); A_c : section du grau(en m²).
- A_s : surface de l'étang (en m²).

Toute onde élémentaire pour laquelle la période T est inférieure à $10 T_h$ sera amortie et déphasée par le grau. L'amortissement des ondes de marée (α) peut être calculé à partir du rapport des marnages dans l'étang et en mer :

$$\alpha = \frac{\Delta\eta}{\text{Marn}_{\text{mer}}} \quad \text{avec} \quad \Delta\eta = \text{Marn}_{\text{mer}} - \text{Marn}_{\text{lag}}$$

Où Marn_{mer} et Marn_{lag} représentent respectivement le marnage en mer et dans la lagune.

3.2. Méthode d'estimation des volumes journaliers échangés entre la mer et une lagune à partir de mesures de hauteur d'eau de part et d'autre du grau

3.2.1. Estimation des débits instantanés

Si on fait l'hypothèse que les variations de la hauteur d'eau dans la lagune sont les mêmes sur toute la surface (on néglige ici en particulier les phénomènes de seiche), le débit d'eau transitant par le grau peut être estimé en utilisant les méthodes développées en hydraulique à surface libre pour estimer les débits des cours d'eau en régime permanent (Lazure, 2000). Dans ce cas, le débit (Q_{MS} exprimé en m³/s) est calculé par la formule de Manning-Strickler :

$$Q_{MS} = \text{signe}(dh) \cdot K_{st} \cdot S \cdot R_h^{2/3} \sqrt{\frac{|dh|}{L}}$$

Où :

- K_{st} : constante de rugosité des parois exprimée en m^{1/3}/s. $K_{st} \approx 40$ dans le cas des chenaux artificiels)
- S : section du canal (en m²)
- R_h : rayon hydraulique (en m) avec $R_h = l h / (2h + 1)$
- dh : différence de hauteur d'eau entre la mer et la lagune (en m)
- L : longueur du canal (en m)
- l : largeur du canal (en m)
- h : hauteur moyenne du canal (en m).

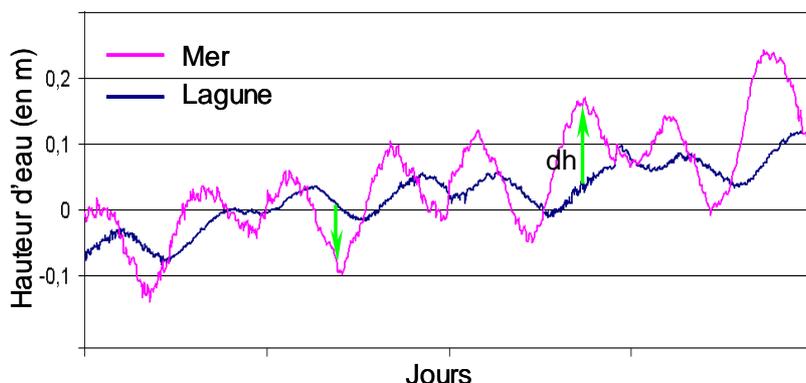


Figure 1 : Evolution temporelle des hauteurs de part et d'autre du grau. Schéma illustratif de la méthode de Manning-Strickler d'estimation des débits à travers le grau.

La différence de hauteur d'eau (dh) de part et d'autre du grau varie en permanence au cours du temps et est alternativement positive (lorsque le niveau en mer est supérieur au niveau dans la lagune) et négative (Figure 1) lorsque le niveau dans la lagune est supérieure au niveau en mer. La convention de signe retenue est que les débits entrants dans la lagune sont définis positifs et les débits sortants sont définis négatifs.

Outre les séries temporelles de hauteurs d'eau en mer et dans la lagune, cette méthode d'estimation des débits nécessitent de disposer des caractéristiques morphologiques du grau.

Par ailleurs, afin de vérifier la validité de cette méthode et d'en fixer ses limites d'utilisation, les débits instantanés estimés doivent être confrontés à des mesures directes de débit dans les graus.

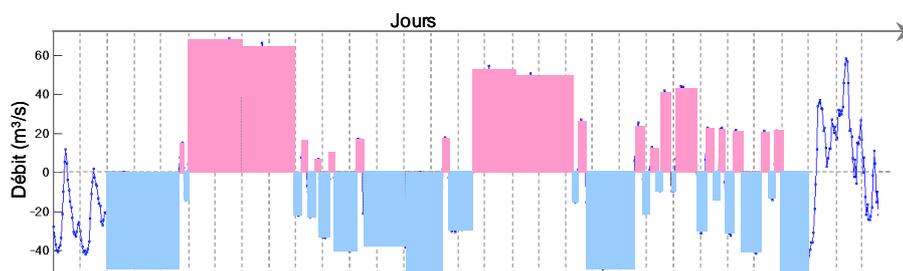
Le matériel utilisé par l'entreprise IXSurvey pour réaliser l'ensemble des mesures est décrit en Annexe II.

3.2.2. Estimation des volumes journaliers échangés entre la mer et la lagune

La formule de Manning-Strickler permet de calculer les séries temporelles de débits instantanés à partir de séries temporelles de hauteurs d'eau mesurées de part et d'autre d'un grau.

L'intégration, sur la journée, des débits instantanés donne accès aux volumes nets échangés entre la lagune et la mer (Figure 2). Les volumes journaliers entrants et sortants de la lagune sont obtenus en distinguant, lors de l'intégration dans le temps, les phases de débits entrants et sortants.

Un calcul similaire des volumes échangés entre la mer et la lagune peut être fait à partir de mesures directes de débits.



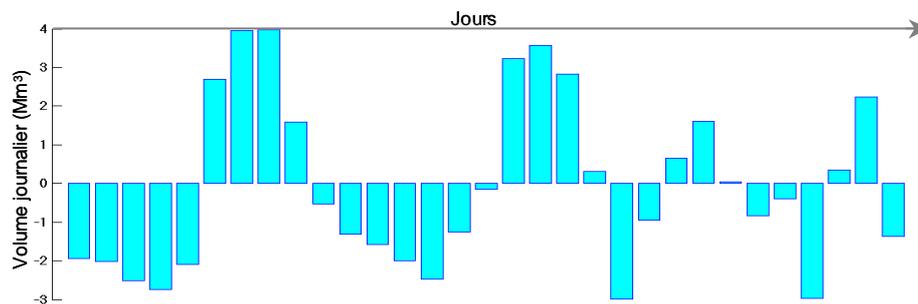


Figure 2 : Schéma explicatif du calcul des volumes journaliers échangés entre la mer et la lagune (en bas) à partir des débits instantanés intégrés sur la journée (en haut). Les débits entrants sont représentés en rose ; les débits sortants sont représentés en bleu. Les données utilisées pour ces illustrations ont été acquises dans le chenal portuaire de Port-La-Nouvelle⁴ entre décembre 2005 et mars 2007.

3.2.3. Estimation de l'erreur commise sur les volumes journaliers estimés

L'erreur commise sur l'estimation des volumes journaliers entrants et sortants de la lagune à partir de la méthode de Manning-Strickler est définie par l'erreur relative moyenne comme suit :

$$\overline{\Delta Q(j)} = \frac{1}{N_{\text{config}(j)}} \sum_{i=1}^{N_{\text{config}(j)}} \left(\frac{Q_{\text{méth.}}(i) - Q_{\text{mesuré}}(i)}{Q_{\text{mes}}(i)} \right)$$

Où : j correspond au type de configuration (j = 1 à 3)

N est l'effectif du jeu de données.

Une erreur relative moyenne positive (respectivement négative) signifie que la méthode a tendance à surestimer (respectivement sous-estimer) les débits.

⁴ Les données de débits dans le chenal portuaire de Port-La-Nouvelle ont été acquises dans le cadre de l'étude « Développement d'une méthode d'estimation des débits dans les graus de lagunes : Application sur la lagune de Bages-Sigean » – contrat d'étude n° 07/3211071F co-financée par l'Agence de l'Eau RM&C, la Région Languedoc-Roussillon et l'Ifremer.

3.3. 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.

3.3.1. 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 faite 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.

Calcul du temps de renouvellement à partir des mesures de hauteur d'eau de part et d'autre des graus

En milieu semi-fermé, l'hypothèse de volume constant n'est pas réaliste, les variations journalières du volume pouvant être importantes (Figure 2). Afin de respecter cette hypothèse de volume constant, le calcul de temps de renouvellement est fait sur des périodes de durée $\Delta T^{Ent-Sort}$ (Figure 3) telles que, sur ces périodes, les volumes entrant (**Vol.E**) et sortant (**Vol.S**) de la lagune via les graus sont égaux.

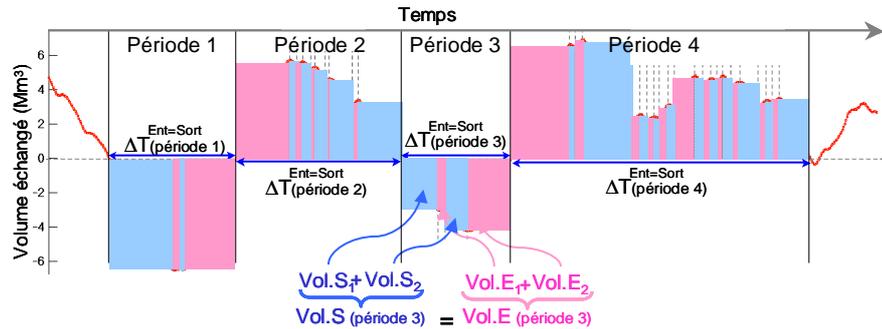


Figure 3 : Schéma explicatif du calcul du temps de renouvellement en fonction des volumes échangés entre la mer et la lagune

Soit, F_E (en Mm^3/j) = $Vol.E$ (en Mm^3) / $\Delta T^{Ent=Sort}$ (en jours) et

F_S (en Mm^3/j) = $Vol.S$ (en Mm^3) / $\Delta T^{Ent=Sort}$ (en jours)

Sur chacune des périodes définies en vérifiant l'hypothèse de volume constant, le temps de renouvellement est calculé selon la formulation suivante :

$$T_R \text{ (en jours)} = V_{lag} \text{ (en } Mm^3) \Delta T^{Ent=Sort} \text{ (en jours)} / Vol.E \text{ (en } Mm^3).$$

Pour chaque période, les volumes entrant (**Vol.E**) et sortant de la lagune (**Vol.S**) sont obtenus en intégrant les débits instantanés (Q_E) et (Q_S), sur les phases d'entrant et de sortant enregistrées sur toute la durée $\Delta T^{Ent=Sort}$ de la période (Figure 4).

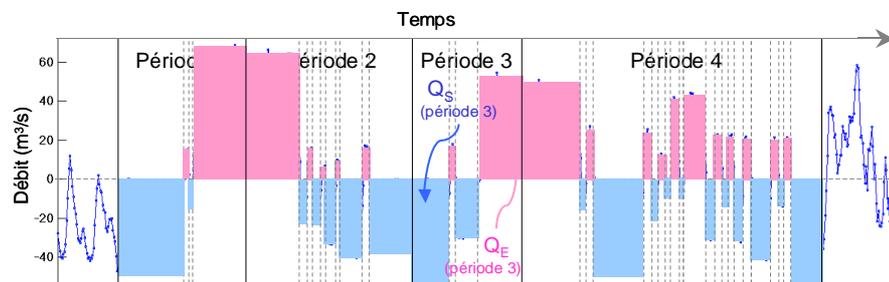


Figure 4 : Schéma explicatif du calcul des volumes échangés entre la mer et la lagune en fonction des débits instantanés

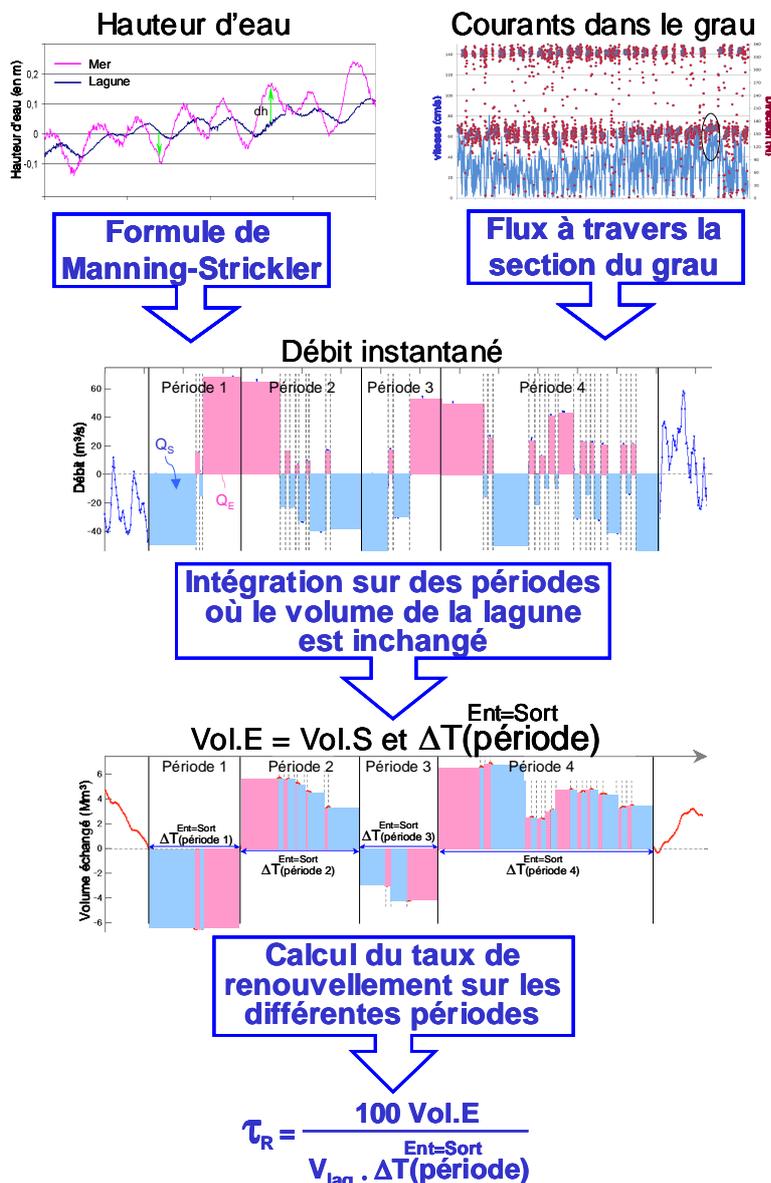
En résumé :

Dans ce travail, une méthode est proposée pour estimer le taux (ou temps) de renouvellement à partir des mesures de hauteurs d'eau de part et d'autre du grau en suivant les trois étapes résumées sur la figure ci-dessous :

Étape 1 : Estimation des débits instantanés à partir des mesures de hauteurs de part et d'autre du grau (via l'utilisation de la formule de Manning-Strickler). Les débits instantanés peuvent également être estimés à partir de mesures de courant dans le grau.

Étape 2 : Estimation des volumes entrants et sortants de la lagune sur des périodes (de durée $\Delta T^{\text{Ent=Sort}}$) où le volume total de la lagune peut être considéré comme inchangé (Vol.E = Vol.S)

Étape 3 : Calcul du taux (ou temps) de renouvellement sur les différentes périodes identifiées à partir du volume entrant et de la durée de la période ($\Delta T^{\text{Ent=Sort}}$)



3.3.2. 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,
- une substance dissoute conservative dont la concentration est initialisée à 0 unités/l dans tout le domaine et dont la source est en mer. Cette substance entre dans le domaine lors des phases de remplissage de la lagune.

Le modèle hydrodynamique MARS-3D, développé par l'Ifremer, est actuellement appliqué sur les lagunes de Thau, Bages-Sigean et sur le complexe des étangs Palavasiens et de l'étang de l'Or. Cet outil numérique a donc pu être utilisé dans la présente étude pour définir les temps de résidence sur l'ensemble de ces lagunes.

3.4. Le modèle hydrodynamique MARS-3D et ses sites d'application

Le modèle MARS 3D a été développé au laboratoire de Physique hydrodynamique et sédimentaire (PHYSED) de l'Ifremer. Ce code de calcul est adapté à la simulation des écoulements des régions côtières de l'océan d'une échelle régionale à locale (golfe, estuaire, lagune...). Le code de calcul et les méthodes de résolution employées sont détaillés dans les travaux de Lazure et Dumas (2008).

L'application du modèle hydrodynamique MARS-3D sur la lagune de Thau a été réalisée dans le cadre du chantier « Lagunes Méditerranéennes » du PNEC (Programme National d'Ecologie Côtière) pour reproduire la circulation des masses d'eau sous l'action de différentes conditions météorologiques (Lazure, 1992).

Les levés bathymétriques utilisés pour définir la grille de calcul du modèle à une résolution horizontale de 100 mètres (Figure 5) ont été acquis entre 1984 et 1987. Le trait de côte est issu des banques de données de l'IGN (BD carthage, 1998 ; BD cartho, 1997).

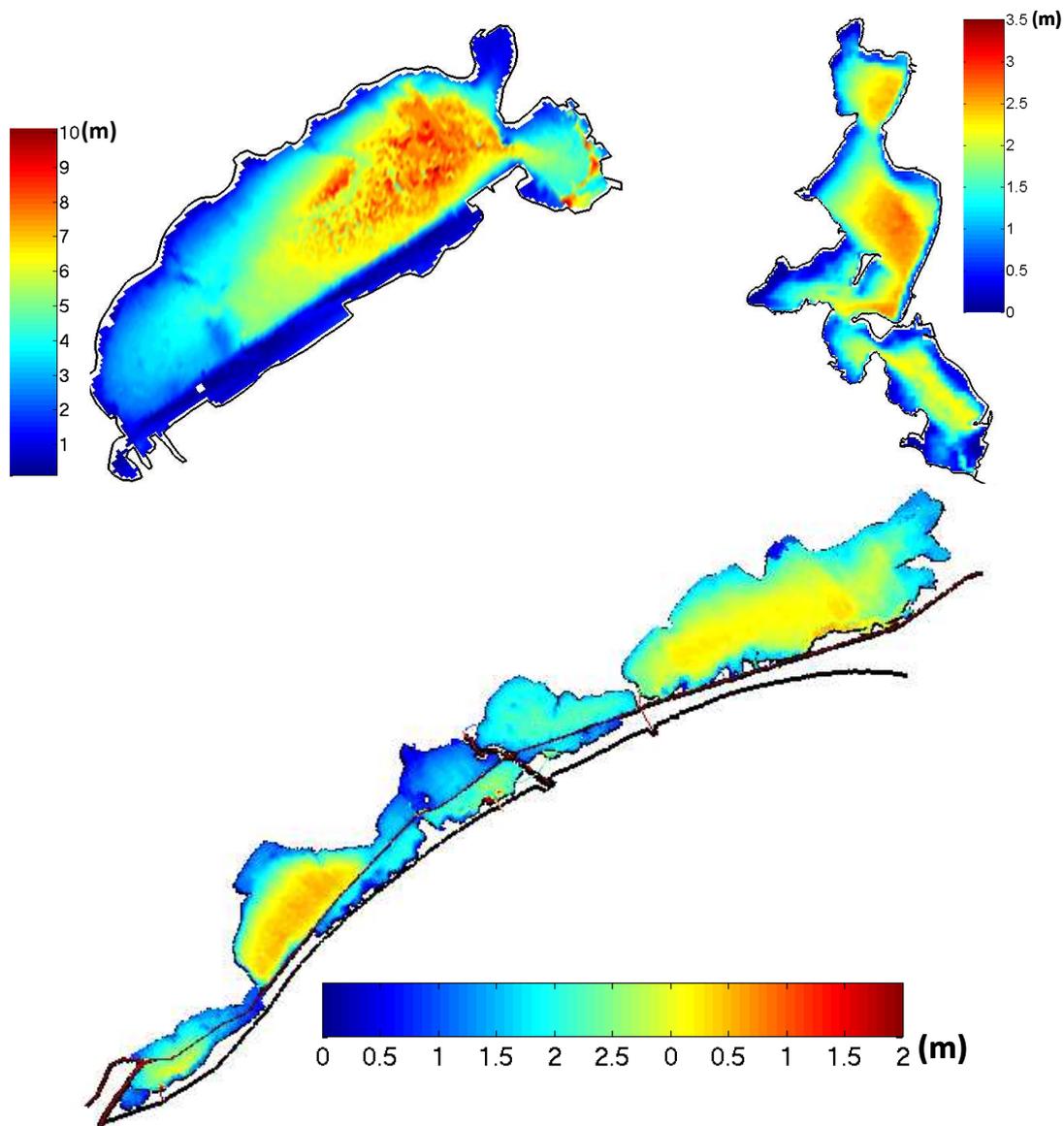


Figure 5 : Grilles bathymétriques des modèles MARS-3D Thau (en haut à gauche), Bages-Sigean (en haut à droite), complexe des étangs Palavasiens – étang de l’or – CRAS (en bas). Les figures ne sont pas à la même échelle.

Le modèle de la lagune de Bages-Sigean a été développé dans le cadre du Réseau de Suivi Lagunaire en 2003. Les levés bathymétriques utilisés pour définir la grille de calcul du modèle à une résolution horizontale de 65 mètres (Figure 5) ont été acquis en 2001 et sont la propriété du Parc Naturel Régional de la Narbonnaise.

Le modèle du complexe des étangs Palavasiens – étang de l’Or – canal du Rhône à Sète (CRAS) est développé dans le cadre de la thèse de Jérôme Castaings (en cours). Les levés bathymétriques utilisés pour définir la grille de calcul du modèle à une résolution horizontale de 30 mètres (Figure 5) ont été acquis entre 2004 et 2006 par le Service Maritime de Navigation en Languedoc-Roussillon (SMNLR).

3.5. Sites d'étude et campagnes de mesure

Jusqu'à présent, l'étang de Thau constituait le seul site sur lequel des jeux de données complets nécessaires à l'application et à la validation de la méthode (hauteurs d'eau de part et d'autre du grau et débits mesurés dans le grau) étaient disponibles. A noter que des mesures de débit dans le chenal portuaire de Port-la-Nouvelle⁵ sont également disponibles. Ces mesures ont permis de calibrer et valider le modèle MARS-3D appliqué sur la lagune de Bages-Sigean. Les indicateurs hydrodynamiques seront donc évalués sur ce site. En revanche, la méthode d'estimation des débits ne peut être appliquée sur ce site, aucune mesure de hauteur de part et d'autre du chenal n'ayant été acquise en parallèle aux mesures de débit.

Deux sites supplémentaires ont été échantillonnés dans le cadre de cette étude afin de tester la fiabilité de cette méthode : les lagunes du Prévost et de La Palme. Ces deux sites ont été choisis au regard de la relative complexité de leurs échanges avec la mer. L'acquisition des données nécessaires à l'application et à la validation de la méthode sur ces deux sites a fait l'objet d'une collaboration avec l'entreprise IXSurvey.

3.5.1. Etang du Prévost

L'étang du Prévost fait partie du complexe des étangs Palavasiens, traversé d'est en ouest par le canal du Rhône à Sète, véritable « colonne vertébrale » qui fait communiquer entre elles chaque lagune et qui reçoit et redistribue les apports des fleuves côtiers Héraultais et Gardois (la Mosson, le Lez, le canal de Lunel, le Vidourle et le Vistre). L'étang du Prévost est, avec l'étang d'Ingril, le seul des étangs Palavasiens à disposer d'une communication directe avec la mer, via un grau endigué. Avec une surface de 250 ha et une profondeur moyenne de 1 m (repérée par rapport au niveau moyen de l'étang), le volume de l'étang du Prévost est d'environ 2,67 Mm³.

En termes d'apports d'eaux continentales, l'étang du Prévost est en communication directe avec le Lez par une passe dans sa partie est (La Canalette) et avec le Canal du Rhône à Sète via deux passes au nord (Figure 6).

Ces apports permanents rendent complexe le fonctionnement de cette lagune et permettront de tester la possibilité d'estimer, à l'aide de cette méthode, la part des apports continentaux et marins au temps de renouvellement.

⁵ Les données de débits dans le chenal portuaire de Port-La-Nouvelle ont été acquises dans le cadre de l'étude « Développement d'une méthode d'estimation des débits dans les graus de lagunes : Application sur la lagune de Bages-Sigean » – contrat d'étude n° 07/3211071F co-financée par l'Agence de l'Eau RM&C, la Région Languedoc-Roussillon et l'ifremer.



Figure 6 : Etang du Prévost (source Google Maps). Les flèches rouges symbolisent les passes avec le Canal du Rhône à Sète (au nord) et le Lez (via la Canalette à l'est).

La localisation des stations de mesures de courants dans le grau et de hauteurs d'eau en mer et dans la lagune du Prévost sont présentées sur la Figure 7.



| Stations de mesures | Coordonnées GPS (WGS84) |
|-----------------------------------|---------------------------------|
| Point 1 - Mer | 43°30'49.02" N 3°55'13.92" E |
| Point 2 - Etang du Prévost | 43°31'16.70" N 3°54'29.47" E |
| Point 3 - Grau | 43°31'12.33" N 3°54'44.98" E |

Figure 7 : Localisation des stations de mesure de hauteur d'eau en mer (Point 1 Mer) et dans l'étang du Prévost (Point 2 Etang du Prévost) et des mesures de débit dans le grau du Prévost (Point 3 Grau).

Les données de hauteur d'eau au Point 1 – Mer et Point 2 – Etang du Prévost ont été acquises durant plus de 8 mois entre le 17 mai 2010 et le 7 février 2011 (Tableau 1), à une fréquence de 10 minutes.

Des récupérations intermédiaires des données ont été effectuées à 4 reprises durant l'année 2010 :

- le 2 juin 2010 entre 10h55 et 13h00
- le 29 juillet entre 10h40 et 11h45
- le 13 octobre entre 11h50 et 12h10
- le 6 décembre entre 13h20 et 14h30.

Tableau 1 : Récapitulatif des campagnes de mesures aux trois stations dans l'étang du Prévost.

| Stations de mesures | Paramètres mesurés | Période de mesure |
|-----------------------------------|--|--|
| Point 1 - Mer | Hauteur d'eau Température Salinité | Du 17/05/10 11:45 au 07/02/11 12:40 |
| Point 2 - Etang du Prévost | Hauteur d'eau Température Salinité | Du 17/05/10 14:45 au 07/02/11 13:40 |
| Point 3 - Grau | Profil de courant Température Salinité | Du 17/05/10 au 01/06/10 Du 06/12/10 au 05/10/11 |

Ces récupérations ont été faites par un échange standard des appareils de mesure. Ainsi, le positionnement des capteurs de pression dans la colonne d'eau n'est pas strictement identique après chaque relèvement. La période d'acquisition des hauteurs d'eau est donc découpée en cinq campagnes.

En complément, des mesures de courant dans le grau du Prévost ont été acquises en début et en fin des campagnes d'échantillonnage des hauteurs d'eau :

- lors d'une campagne printanière : du 17 mai au 2 juin 2010.
- Lors d'une campagne hivernale : du 6 décembre 2010 au 7 février 2011.

Les données de courant acquises lors de la campagne hivernale ne couvrent finalement pas l'intégralité de la période échantillonnée car à partir du 6 janvier 2011 le tripode supportant le courantomètre a été ensablé (Figure 8) probablement suite au coup de mer survenu durant la première semaine du mois de janvier 2011 (Figure 16). Ceci étant, un jeu de données d'un mois (du 6 décembre 2010 au 6 janvier 2011) est exploitable pour caractériser les conditions d'échange en période hivernale.



Figure 8 : Envasement du tripode qui supporte le courantomètre dans le grau du Prévost (photo IXSurvey - février 2011).

3.5.2. Etang de La Palme

Sur une base topographique, l'étang de La Palme peut être découpé en quatre bassins (Wilke *et al*, 2000). Deux bassins au nord de la voie de chemin de fer (les bassins Nord-Ouest et Centre - Figure 7), le bassin Sud entre le pont SNCF et le pont des Coussoules et, à l'aval du pont des Coussoules, le Grau en communication avec la mer qui présente un fonctionnement naturel (ouverture / fermeture au gré des événements météorologiques).

Le volume total de l'étang (lorsqu'on considère les quatre bassins) est de l'ordre de $3,3 \text{ Mm}^3$ pour une surface de près de 500 ha. Avec un volume de $3,1 \text{ Mm}^3$ et une surface de 437 ha, les bassins Centre et Nord-Ouest constituent près de 90% de l'étang de La Palme.

L'objectif de ce travail étant d'estimer le temps de renouvellement de ces deux bassins principaux, les stations de mesures de hauteur d'eau ont été positionnées de part et d'autre du pont SNCF. La station de mesure des courants a été positionnée sous le pont pour mesurer les débits échangés entre les bassins Centre et Sud.

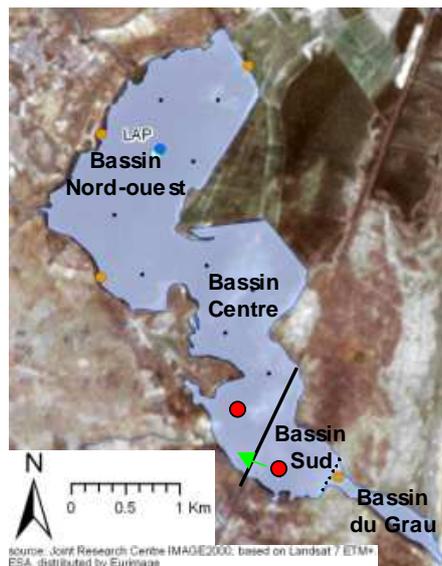
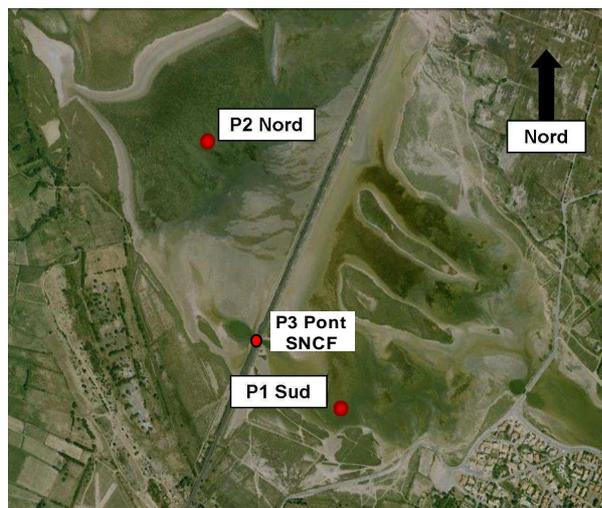


Figure 9 : Etang de La Palme en distinguant les quatre bassins qui le constituent. Les points rouges repèrent les stations de mesures de hauteur d'eau de part et d'autre du pont SNCF (chenal de communication entre les bassins sud et centre sous le pont SNCF matérialisé par la flèche verte).

Des études antérieures (Wilke *et al*, 2000) ont montré qu'il existe dans l'étang de La Palme plusieurs zones d'accumulation de sédiments sableux. Un secteur a en particulier été identifié au nord-ouest du pont SNCF, secteur où les hauts fonds qui se forment engendrent progressivement une coupure hydraulique entre les bassins situés de part et d'autre du pont SNCF. Les deux points de mesure de hauteur d'eau P1-Sud et P2-Nord étant positionnés respectivement en aval et en amont de cette zone d'ensablement, la robustesse et la fiabilité de la méthode pourront être testées lors de la formation progressive de la coupure hydraulique.



| Stations de mesures | Coordonnées GPS (WGS84) |
|---------------------|---------------------------------|
| Point 1 - Sud | 42°56'22.68" N 3°01'19.62" E |
| Point 2 - Nord | 42°56'40.44" N 3°00'56.04" E |
| Point 3 - Pont SNCF | Sous le pont SNCF |

Figure 10 : Localisation des stations de mesure de hauteur d'eau de part et d'autre du pont SNCF dans l'étang de La Palme (P1 Sud et P2 Nord) et des mesures de débit sous le pont SNCF (Point 3 Grau).

Les données de hauteur d'eau aux points P1-Sud et P2-Nord ont été acquises durant près de 8 mois, entre le 14 octobre 2010 et le 6 juin 2011 (Tableau 2), à une fréquence de 10 minutes. Des récupérations intermédiaires des données ont été effectuées à 3 reprises :

- le 7 décembre 2010 entre 9h20 et 10h10
- le 8 février 2011 entre 8h50 et 9h50
- le 21 avril 2011 entre 8h50 et 10h20.

Tableau 2 : Récapitulatif des campagnes de mesures aux trois stations dans l'étang de La Palme.

| Stations de mesures | Paramètres mesurés | Période de mesure |
|---------------------|--|--|
| Point 1 - Sud | Hauteur d'eau Température Salinité | Du 14/10/10 10:00 au 06/06/11 08:50 |
| Point 2 - Nord | Hauteur d'eau Température Salinité | Du 14/10/10 09:40 au 06/06/11 09:20 |
| Point 3 - Pont SNCF | Profil de courant | Du 07/12/10 au 04/02/11 Du 21/04/11 au 06/06/11 |

A noter que le grau de l'étang de La Palme s'est réouvert lors de la tempête des 10 et 11 octobre 2010, soit quelques jours avant le début de l'échantillonnage, et qu'il est resté ouvert durant toute la durée de la campagne de mesure.

3.5.3. Etang de Thau

L'étang de Thau a constitué, avec l'étang de Berre, un site pilote pour l'application de la méthode d'estimation des débits (Colin, 2009). Les jeux de données (hauteurs d'eau dans la lagune, débits et hauteurs d'eau dans les canaux de Sète) utilisés n'ont pas été acquis spécifiquement pour un test de faisabilité de la méthode. Ils sont issus de différentes sources :

- depuis novembre 2007, la Cellule Hydrographique de la Région Languedoc Roussillon assure l'acquisition, le traitement, la sauvegarde et la mise à disposition de données de hauteur d'eau au marégraphe de Sète (Point CQEL sur la Figure 11) à un pas de temps de 10 mn
- des mesures de hauteur d'eau dans l'étang de Thau (Point ADCP sur la Figure 11) ont été acquises entre le 17 avril 2009 et le 9 juillet 2009 dans le cadre de l'étude « *Développement d'un modèle sédimentaire sur les masses d'eau de transition* »⁶ Ces mesures ont été acquises à une fréquence de 10 mn à l'aide d'un courantomètre Doppler (Acoustic Doppler Current Profiler).
- Dans le cadre du projet GAMA (Gestion Active des Milieux Aquatiques) porté par la SDEI (filiale de la Lyonnaise des Eaux) et Thau Agglomération, les canaux de Sète sont équipés, depuis avril 2009, de deux courantomètres positionnés sous le pont Sadi Carnot (point SDEI sur la Figure 11) et sous le pont de la Victoire. Ces données, acquises à une fréquence de 10 mn nous ont été fournies gratuitement par la SDEI.

La période sur laquelle le jeu de données est complet est contrainte par la disponibilité de données de hauteur d'eau dans la lagune. Elle s'étend du 17/04/2009 à 0h00 au 9 juillet 2009 à 9h30.



Figure 11 : Localisation des stations de mesure de hauteur d'eau de part et d'autre des canaux de Sète dans l'étang de Thau (Point CQEL et Point ADCP) et des mesures de débit sous le pont Sadi Carnot dans les canaux de Sète.

L'application de la méthode de Manning-Strickler sur ces jeux de données n'est pas détaillée dans ce rapport. Seuls les résultats relatifs aux indicateurs hydrodynamiques calculés pour l'étang de Thau sont reportés ici.

⁶ Contrat d'étude n°07/3211071 réalisé dans le cadre de la convention Cadre « AERM&C et Ifremer.

Le Tableau 3 résume les caractéristiques morphologiques des sections d'échanges dans les canaux des lagunes du Prévost, de La Palme et de Thau.

Tableau 3 : *Caractéristiques morphologiques du grau du Prévost, de la section d'échange sous le pont SNCF dans l'étang de la Palme et de la section d'échange sous le pont Sadi Carnot dans les canaux de Sète.*

| | Etang du Prévost | Etang de La Palme | Etang de Thau |
|--|-------------------------|--------------------------|----------------------|
| Longueur du grau (m) | 393 | 30 | 2400 |
| Largeur du grau (m) | 30 | 10 | 44 |
| Section d'échange (m²) | 53 | 17,5 | 300 |
| Profondeur moyenne du grau (m) | 1,76 | 1,75 | 6,82 |
| Rayon hydraulique (m) | 1,6 | 1,3 | 5,2 |

4. Résultats – Etang du Prévost

4.1. Analyse des signaux de hauteur d'eau en mer et dans l'étang du Prévost

4.1.1. Description générale

Ne disposant d'aucun moyen pour définir les hauteurs d'eau acquises en mer et dans la lagune dans un référentiel commun (zéro hydrographique), les cinq périodes échantillonnées sont étudiées indépendamment les unes des autres et les variations de la hauteur d'eau aux points P1 - Mer et P2 – Etang du Prévost sont centrées autour de la valeur moyenne calculée pour chacune des périodes. Les hauteurs enregistrées lors des premières et dernières périodes (du 17/05 au 02/06/2010 et du 06/12/2010 au 07/02/2011), périodes durant lesquelles les débits dans le grau du Prévost ont également été gaugés, sont regroupées sur la Figure 12. Les données des périodes intermédiaires sont présentées en Annexe III.

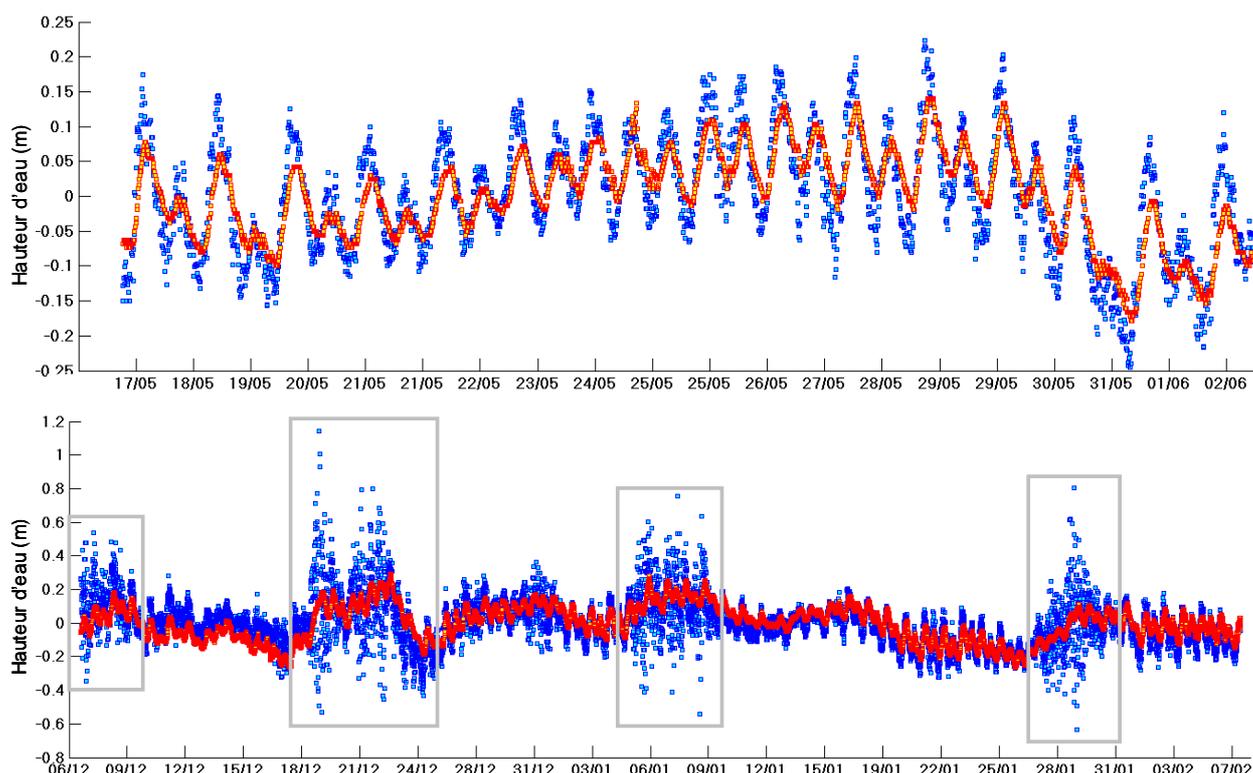


Figure 12 : Evolution temporelle des hauteurs d'eau aux points P1-Mer (en bleu) et P2-Etang du Prévost (en rouge) enregistrées durant les premières et dernières périodes d'échantillonnage. Les variations sont centrées autour de la valeur moyenne de la hauteur calculée sur chaque sous-période. La fréquence d'échantillonnage est de 10 mn.

Durant la campagne hivernale, les signaux de hauteur d'eau présentent une plus forte variabilité que durant la période printanière, avec en particulier quatre épisodes de fortes perturbations du signal de hauteur d'eau en mer (périodes encadrées en gris sur la Figure 12).

Les signaux de hauteur d'eau étant centrés autour de la valeur moyenne de la hauteur d'eau calculée sur la durée des sous-périodes échantillonnées, il est important, avant d'appliquer la

méthode d'estimation des débits, de définir des périodes « homogènes ». En complément du découpage imposé par les dates de récupération des données (cf. §.3.4.1), la campagne hivernale est décomposée en quatre périodes. Les cinq périodes « homogènes » ainsi définies sont les suivantes :

- du 17/05/2010 à 10h45 au 02/06/2010 à 10h55
- du 06/12/2010 à 14h30 au 10/12/2010 à 0h (Figure 13-haut gauche)
- du 10/12/2010 à 0h05 au 18/12/2010 à 0h (Figure 13-haut droite)
- du 18/12/2010 à 0h05 au 26/12/2010 à 0h (Figure 13-milieu)
- du 26/12/2010 à 0h05 au 07/02/2011 à 12h40 (Figure 13-bas).

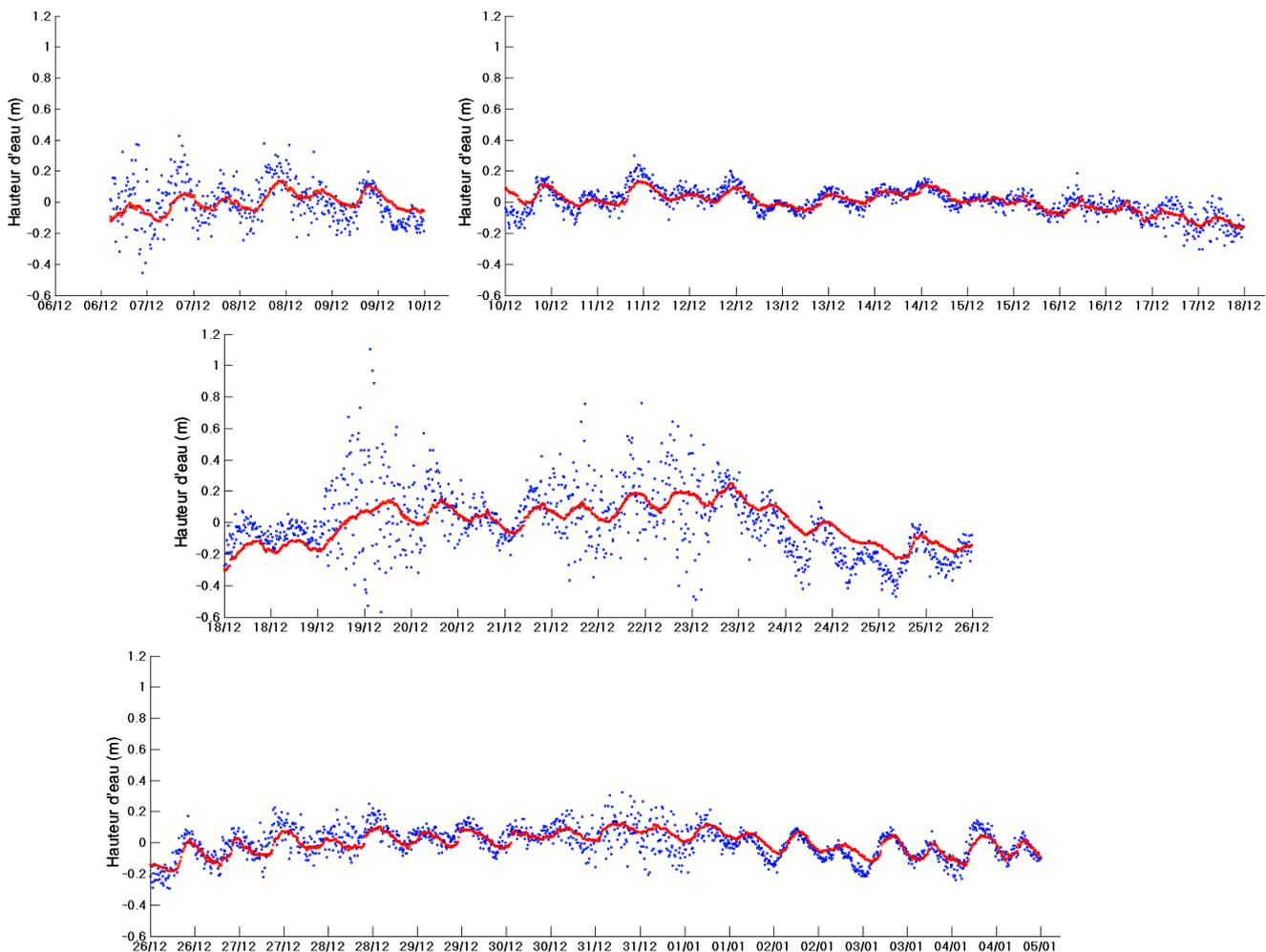


Figure 13 : Evolution temporelle des hauteurs d'eau aux points P1-Mer (en bleu) et P2-Etang du Prévost (en rouge) enregistrées durant la campagne hivernale en distinguant quatre périodes. Les variations sont centrées autour de la valeur moyenne de la hauteur d'eau calculée sur chaque sous-période. La fréquence d'échantillonnage est de 10 mn.

La part de chacun des processus (marée, pression atmosphérique, vent) à la « construction » des signaux de hauteurs d'eau peut être mise en évidence de façon plus ou moins qualitative. L'extraction des ondes de marée est réalisée à partir de l'analyse harmonique. Les effets des variations de pression atmosphérique peuvent être appréhendés à partir de la loi du baromètre

inversé appliquée aux mesures de pression enregistrées à Fréjorgues par Météo-France. Les effets induits par le vent (houle en mer, seiche dans le Golfe du Lion, transport des masses d'eau en mer et dans la lagune) ne seront analysés ici que de façon quantitative.

4.1.2. Analyse harmonique des signaux de hauteur d'eau en mer et dans l'étang du Prévost

L'analyse harmonique consiste à rechercher dans le signal temporel de la hauteur d'eau les différentes composantes de marée et leurs amplitudes.

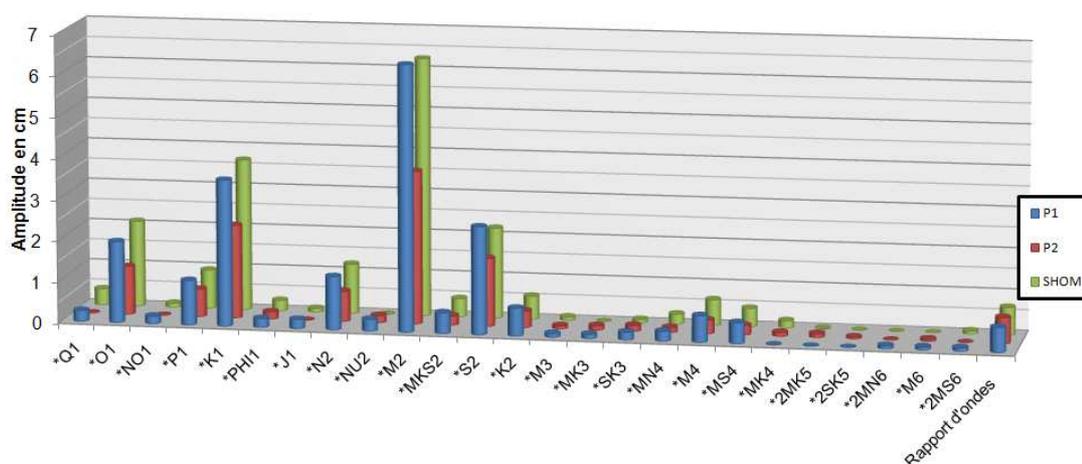


Figure 14 : Comparaison des résultats de l'analyse harmonique de la marée aux points P1-Mer, P2-Etang du Prévost et prédite à Sète à partir des constantes harmoniques fournies par le SHOM.

Différentes composantes de marée ont pu être identifiées au cours de la campagne (Figure 14), les ondes semi-diurnes (M2 et S2) et diurnes (O1 et K1) sont prépondérantes :

- l'onde M2 est la marée générée par la "lune moyenne", astre fictif animé d'un mouvement uniforme sur une orbite circulaire située dans le plan de l'équateur et ayant la même période de révolution que la Lune réelle. Cette composante semi-diurne présente deux pleines mers et deux basses mers par jour lunaire (24h50 min)
- l'onde S2 représente la marée due au "soleil moyen", astre fictif animé d'un mouvement uniforme, sur une orbite circulaire située dans le plan de l'équateur. Cette composante semi-diurne représente deux pleines mers et deux basses mers par jour solaire (24h)
- l'onde O1 est induite par les variations de déclinaison (angle que fait un astre avec le plan de l'équateur) de la Lune
- l'onde K1 a pour origine les variations de déclinaison de la Lune et du Soleil. Cette composante diurne est marquée par une pleine mer et une basse mer par jour sidéral (23h56min).
- des sous harmoniques tiers-diurnes et quart-diurnes qui résultent de l'interaction de la marée sur le fond ont également été observées.

En conclusion de cette analyse harmonique, il ressort que :

- la composition des ondes semi-diurnes et diurnes dans les signaux en mer et dans la lagune résulte en une marée de type semi-diurne à inégalité diurne. Ce type de marée présente deux pleines mers consécutives (respectivement deux basses mers).

- sur le signal de hauteur d'eau au point P1-Mer différents pics d'énergie sont présents pour des périodes proches de la période de résonance du Golfe du Lion suivant l'axe ouest-est (autour de 3h – oscillation avec un seul nœud cf. Annexe I).

Cette composante ne se retrouve pas dans le signal de hauteur d'eau enregistré dans l'étang. L'oscillation induite par l'effet du vent dans le Golfe du Lion « n'entre » donc pas dans l'étang du Prévost.

4.1.3. Impact du grau du Prévost sur la propagation de la marée dans l'étang

L'effet de filtre induit par le grau sur la propagation de l'onde de marée à l'intérieur de la lagune peut également être quantifié. L'amortissement du signal de hauteur (α) entre le point P1-Mer et le point P2-Etang du Prévost, calculé en moyenne sur la totalité de la période échantillonnée, est de l'ordre de 40 %. Le déphasage, calculé à partir des heures de hautes et basses mers en ces deux points, est en moyenne de 1h15 (Figure 15).

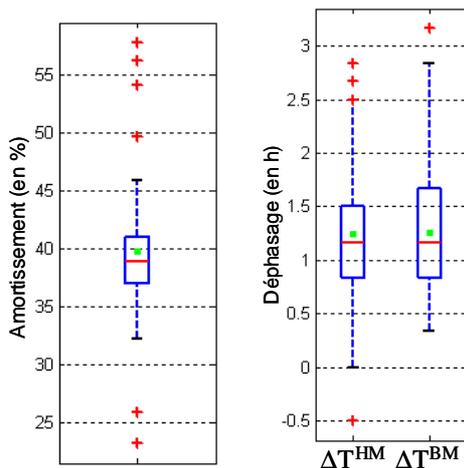


Figure 15 : Distribution temporelle en boîte à moustache : (à gauche) : de l'amortissement des ondes de marée (à droite) : du déphasage entre les heures de pleines mers (ΔT^{HM}) et les basses mers (ΔT^{BM}) engendré par le grau du Prévost

4.1.4. Relation entre hauteur d'eau et paramètres météorologiques (vent, pression atmosphérique)

La confrontation des hauteurs significatives des vagues (enregistrées par le CETMEF à la Bouée Sète (43°22.26'N – 3°46.77'E) et des vents enregistrés à Fréjorgues par Météo-France permet de mettre en évidence le lien entre les épisodes de vent de secteur sud-est et les épisodes de plus fortes houles (Figure 16).

Les variations haute fréquence de la hauteur d'eau, caractéristiques de la houle, sont fortement marquées au point P1-Mer (signal bleu - Figure 17). A titre de comparaison, sont également présentées sur cette figure, les hauteurs d'eau enregistrées au marégraphe de Sète par la Cellule Hydrographique de la Région Languedoc-Roussillon (courbe jaune) ainsi que les variations de la hauteur d'eau dues aux variations de la pression atmosphérique (courbe rouge). Il apparaît que l'effet de la houle n'est pas visible sur les mesures enregistrées au marégraphe de Sète. En outre, cette houle « n'entre pas » dans l'étang du Prévost (courbe rouge - Figure 12).

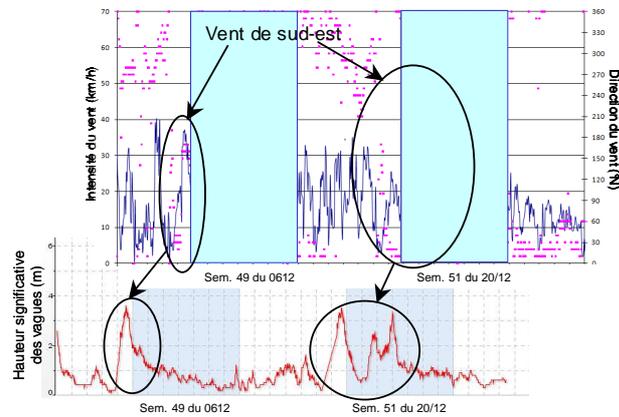
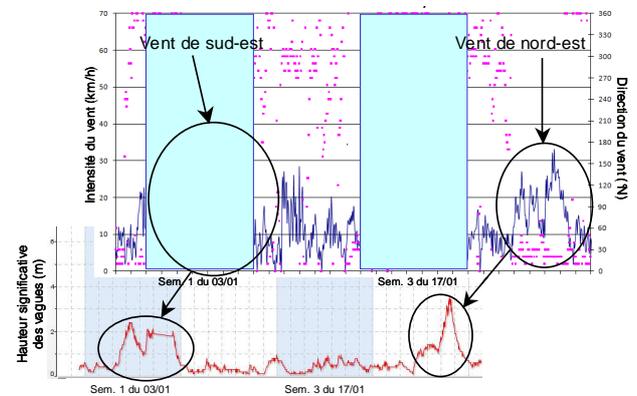


Figure 16 : Evolution temporelle, aux mois de décembre 2010 (à gauche) et janvier 2011 (en bas), des hauteurs significatives des vagues enregistrées à la bouée située au large de Sète (Observations réseau CETMEF CANDHIS en partenariat avec la DRE Languedoc-Roussillon SEL/RL – 2010 PREVIMER) et des intensités (courbe bleu) et directions (points magenta) du vent enregistré à Fréjorgues par Météo-France.



Ces mêmes vents de secteur sud-est, généralement associés à des conditions dépressionnaires, ramènent les eaux du large vers la côte, entraînant ainsi une augmentation des hauteurs d'eau à la côte et dans la lagune et des phases de remplissage de la lagune.

Par ailleurs, les épisodes de fort vent de nord-ouest (Figure 18) n'ont que peu d'impact sur la hauteur significative des vagues. Dans ces conditions de vent, qui n'engendrent pas de phénomène de houle, le transport des masses d'eau de la cote vers le large induit un déficit d'eau à la cote et par conséquent une baisse du niveau marin et des phases de vidange de la lagune.

Ce phénomène de décote est plus marqué au marégraphe de Sète qu'au point P1-Mer. A titre illustratif, les épisodes de vent de nord-ouest survenus entre la mi-octobre et début novembre 2010 (Figure 18) associés à des conditions anticycloniques (hausse de la pression atmosphérique - Figure 19) peuvent être détaillés ici. Les vents de nord-ouest induisent en effet une baisse du niveau marin plus importante au niveau du marégraphe de Sète qu'au point P1-Mer (resp. courbes orange et bleue - Figure 20). De même, la corrélation entre variations de la pression atmosphérique et variations de la hauteur d'eau est plus directe au marégraphe de Sète.

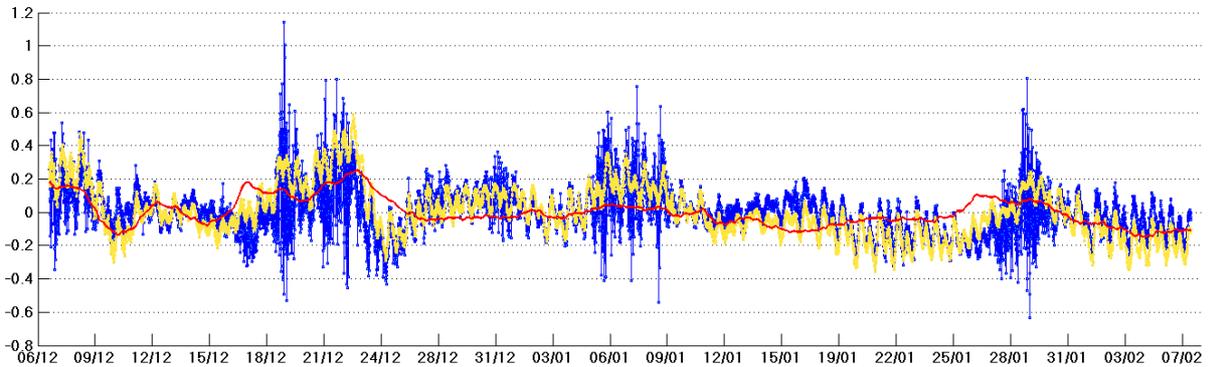


Figure 17 : Evolution temporelle des hauteurs d'eau aux points P1-Mer (en bleu) et au marégraphe de Sète (en jaune) enregistrées entre le 6 décembre 2010 et le 7 février 2011. La courbe rouge correspond à la part des variations de la hauteur d'eau due aux variations de la pression atmosphérique (loi du baromètre inversé). Les variations sont centrées autour de la valeur moyenne de la hauteur calculée sur chaque sous-période. La fréquence d'échantillonnage est de 10 mn.

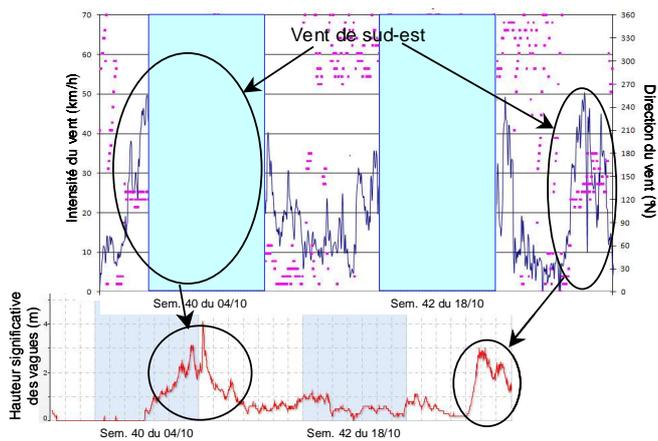
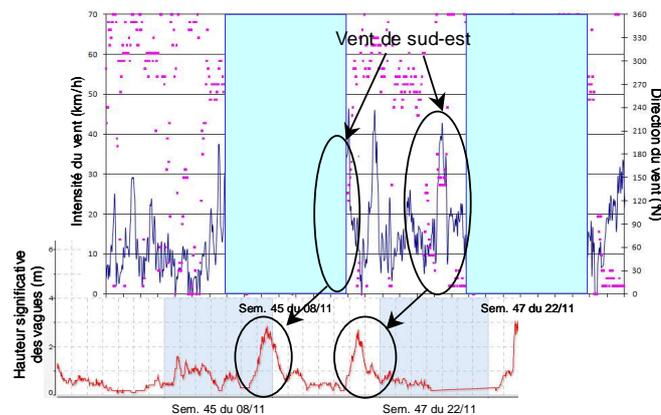


Figure 18 : Evolution temporelle, aux mois d'octobre (à gauche) et novembre 2010 (en bas), des hauteurs significatives des vagues enregistrées à la bouée située au large de Sète (Observations réseau CETMEF CANDHIS en partenariat avec la DRE Languedoc-Roussillon SEL/RL – 2010 PREVIMER) et des intensités (courbe bleu) et direction (points magenta) du vent enregistré à Fréjorgues par Météo-France.



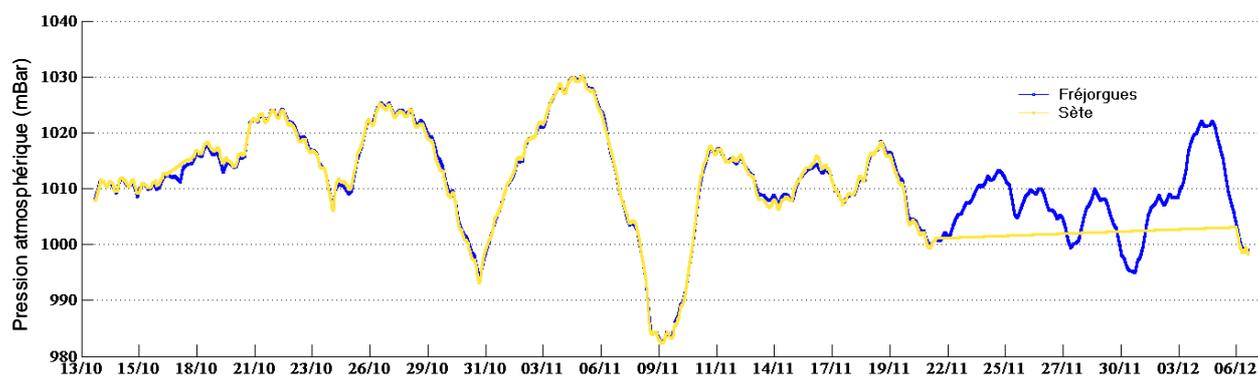


Figure 19 : Evolution temporelle de la pression atmosphérique enregistrée entre le 13 octobre et le 6 décembre 2010 à Fréjorgues par Météo-France (courbe bleue) et à Sète par la cellule hydrographique.

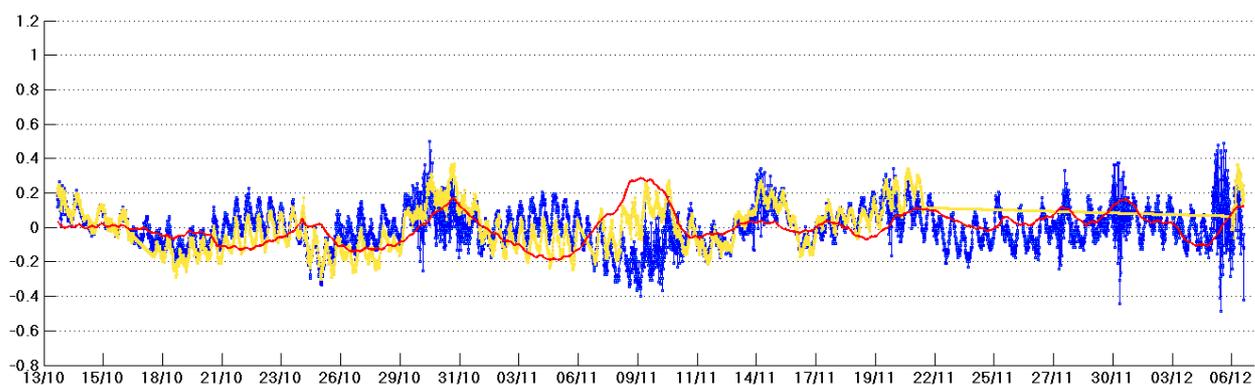


Figure 20 : Evolution temporelle des hauteurs d'eau aux points PI-Mer (en bleu) et au marégraphe de Sète enregistrées entre le 13 octobre et le 6 décembre 2010. La courbe rouge correspond à la part des variations de la hauteur d'eau due aux variations de la pression atmosphérique (loi du baromètre inversé). Les variations sont centrées autour de la valeur moyenne de la hauteur calculée sur chaque sous-période. La fréquence d'échantillonnage est de 10 mn.

En résumé :

La marée qui se propage dans le Golfe d'Aigues-Mortes et dans l'étang du Prévost est de type semi-diurne à inégalité diurne.

Le grau joue un rôle de filtre sur la propagation de l'onde dans l'étang du Prévost et induit un **amortissement** et un **déphasage** de l'onde de marée dans l'étang : le marnage dans l'étang est de l'ordre de 60% du marnage en mer ; dans l'étang du Prévost les niveaux d'eau maximaux (pleines eaux) et minimaux (basses mers) sont atteints avec un retard d'environ 1h15 par rapport aux pleines mers et basses mer mesurées dans le Golfe d'Aigues-Mortes.

Dans le Golfe d'Aigues-Mortes le rôle du vent sur la dynamique des masses d'eau est important (houle, seiche ...) et peut dans certains cas « brouiller » le lien existant entre les variations de la hauteur d'eau en mer et dans la lagune du Prévost. Certains processus tels que la houle n'agissent que coté mer et « n'entrent » pas dans la lagune. Les processus liés aux variations de la pression atmosphérique qui agissent à la fois sur les hauteurs d'eau en mer et dans la lagune sont identifiables mais perturbé probablement par les oscillations du Golfe du Lion sous l'action des vents.

Les phases de i) vidange et de ii) remplissage de la lagune sont cependant observables i) en conditions anticycloniques associées à des vents de nord-ouest où le transport des masses d'eau se fait de la côte vers le large et ii) en conditions dépressionnaires associées à des vents de sud-est où le transport des masses d'eau se fait du large vers la cote.

4.2. Analyse des signaux mesurés dans le grau du Prévost

4.2.1. Profils verticaux de courant

Les profils verticaux de courant acquis dans le grau du Prévost durant les campagnes printanière et hivernale mettent à jour des courants homogènes de la surface au fond sans cisaillement suivant la verticale.

La plupart du temps, la vitesse dans le grau est inférieure à 40 cm/s. Cependant des vitesses du courant plus importantes ont été enregistrées durant la deuxième campagne de mesure, dépassant même 1 m/s au fond du grau.

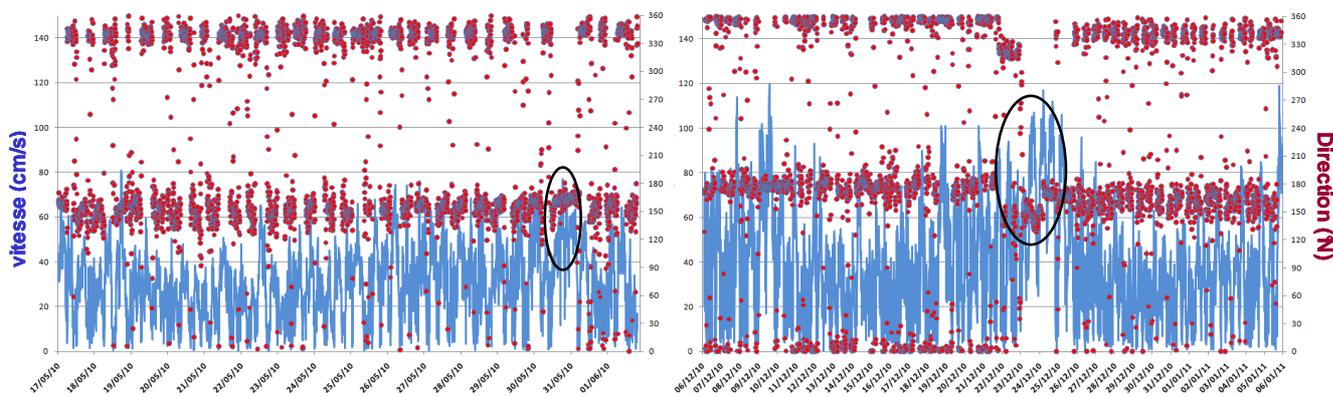


Figure 21 : Evolution temporelle des courants de fond (intensité (bleu) et direction (grenat)) mesurés dans le grau du Prévost durant les campagnes printanière (gauche) et hivernale (droite).

En termes de direction, le courant est canalisé dans le grau et il est organisé selon deux axes principaux différents lors des deux campagnes (Figure 22) :

- suivant l'axe nord-ouest / sud-est lors de la campagne printanière,
- suivant l'axe nord sud lors de la campagne hivernale.

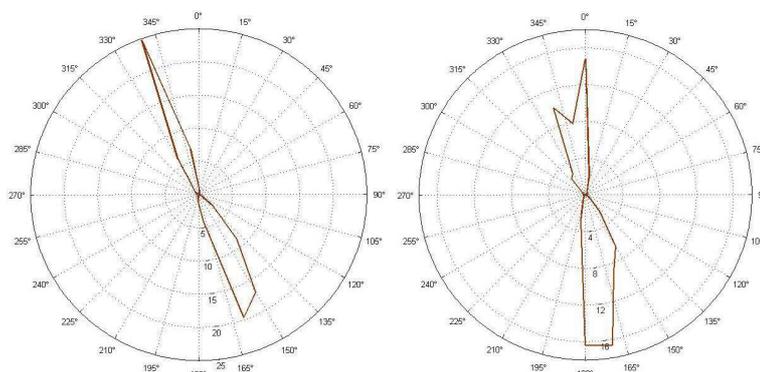


Figure 22 : Roses des directions du courant de fond lors des campagnes printanière (gauche) et hivernale (droite).

Cette différence entre les axes du courant lors des deux campagnes de mesure peut vraisemblablement s'expliquer par le mouvement des sédiments dans le grau. Le mouvement du sable au fond est principalement lié aux conditions hydrodynamiques. Etant donné que le courant est plus fort en hiver qu'au printemps, celui-ci peut plus facilement modifier le relief du fond et créer des axes différents de circulation selon la saison.

Ceci étant, les courants sortants s'orientent majoritairement autour de l'axe 165°N et les courants entrants suivant l'axe 345°N. Les renverses de courant sont principalement gouvernées par la marée avec une inversion du sens du courant dans le grau toutes les 6 heures environ.

Cependant le vent peut, dans certaines conditions, constituer un forçage prépondérant des mouvements de masses d'eau entrantes et sortantes par le grau, en annihilant les renverses de marée (cf les situations du 31/05 et des 23-24/12/2010 où le vent de nord-ouest force un courant sortant pendant plus de 12 heures, annulant une des deux renverses journalières de flot).

4.2.2. Caractérisation des échanges entre la mer et la lagune du Prévost

Etape 1 : Calcul des débits instantanés à partir de mesures de courant dans le grau

A partir des profils verticaux de courants mesurés et d'une caractérisation de la section d'échange, les débits instantanés ont été calculés à un pas de temps de 10 mn (Figure 23).

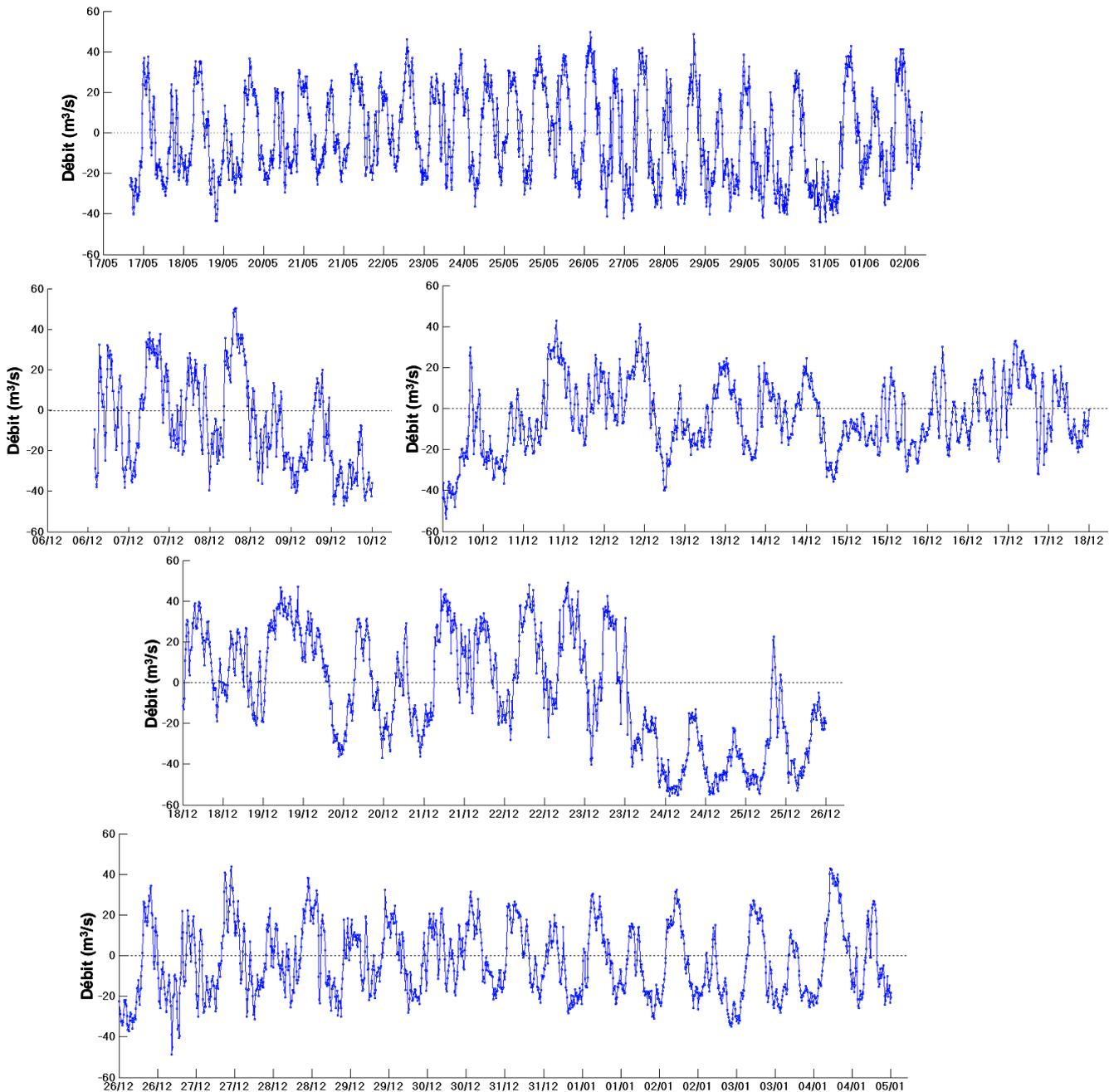


Figure 23 : Evolution temporelle des débits instantanés mesurés dans le grau du Prévost lors des cinq périodes échantillonnées durant les campagnes printanière et hivernale. La fréquence d'échantillonnage est de 10 mn.

Les débits maximaux entrant et sortant les plus élevés sont respectivement $+50 \text{ m}^3/\text{s}$ (enregistré le 8 décembre 2010 – période 2) et $-55 \text{ m}^3/\text{s}$ (enregistré le 24 décembre 2010 - période 2). Les valeurs moyennes journalières des débits entrants et sortants de la lagune, sur les cinq sous-périodes échantillonnées, sont de l'ordre de $17 \text{ m}^3/\text{s}$ (Figure 24-a et b).

Etape 2 : Calcul des volumes journaliers échangés entre la mer et la lagune

L'estimation des volumes journaliers entrants et sortants de la lagune est obtenue en intégrant les débits journaliers moyens entrants et sortants sur les durées des phases de flot et de jusant (Figure 24-c et d). La différence des volumes entrants et sortants donne accès au bilan journalier net des échanges entre la lagune et la mer (Figure 24-e).

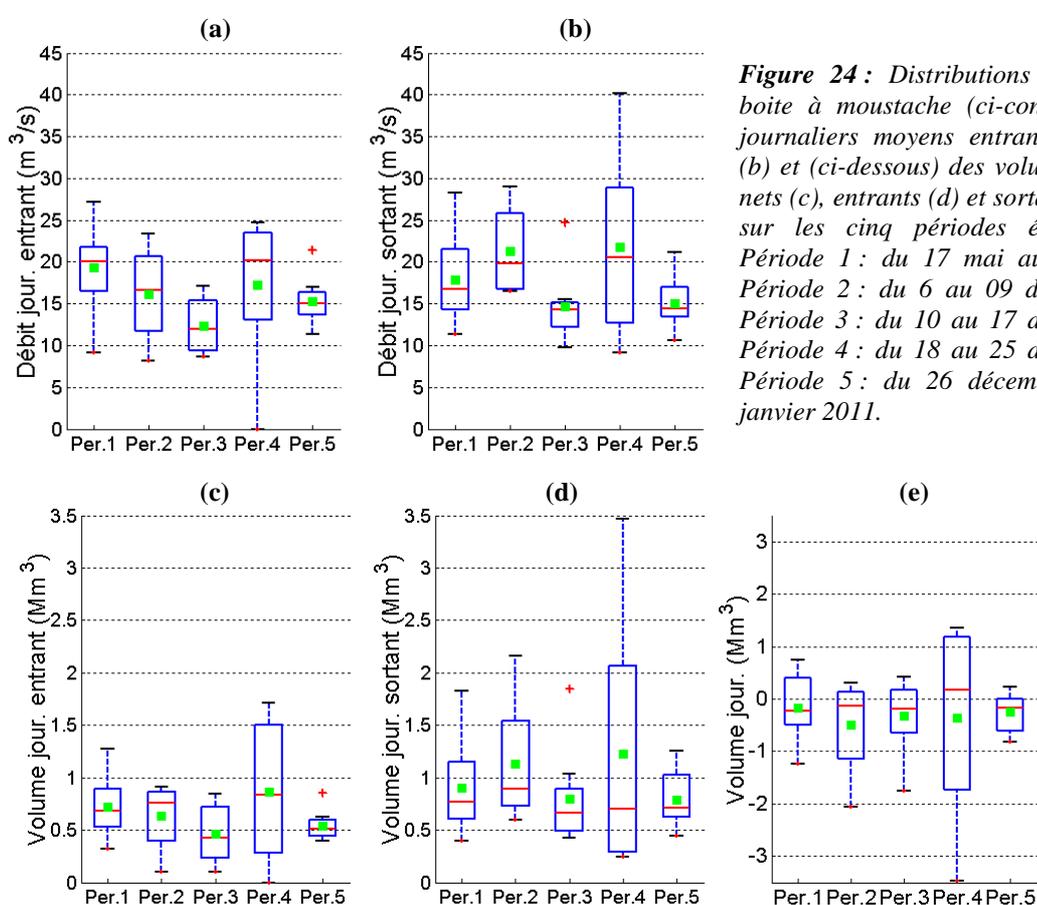


Figure 24 : Distributions temporelles en boîte à moustache (ci-contre) des débits journaliers moyens entrants (a), sortants (b) et (ci-dessous) des volumes journaliers nets (c), entrants (d) et sortants (e) mesurés sur les cinq périodes échantillonnées : Période 1 : du 17 mai au 2 juin 2010 ; Période 2 : du 6 au 09 décembre 2010 ; Période 3 : du 10 au 17 décembre 2010 ; Période 4 : du 18 au 25 décembre 2010 ; Période 5 : du 26 décembre 2010 au 5 janvier 2011.

Durant la campagne printanière (Per.1) les entrées/sorties de l'étang du Prévost ont été relativement équilibrées (Figure 25) avec un bilan journalier net égal, en moyenne sur la durée de la campagne, égal à $-0,15 \text{ Mm}^3$, soit légèrement en faveur des exportations d'eau de la lagune vers la mer (Figure 24-e). Cet équilibre entre entrées et sorties est également vérifié sur la période 5 (du 26 décembre 2010 au 5 janvier 2011) avec un bilan journalier net, en moyenne sur toute la période, également en faveur des sorties d'eaux saumâtres de la lagune ($-0,22 \text{ Mm}^3$).

A noter que les 5 et 6 janvier 2011, une importante phase de « remplissage » de la lagune (non prise en compte dans la période 5) a vraisemblablement transporté d'importantes quantités de

sable vers la côte comme en témoigne l'ensablement du courantomètre positionné dans le grau (Figure 8).

Les échanges mesurés entre le 18 et le 25 décembre 2010 (Per.4) présentent une forte variabilité, avec en particulier des phases importantes de « vidange » de la lagune, telles que celles mesurées les 24 et 25 décembre 2010 (Figure 25). Celles-ci font suite à des phases marquées de « remplissage » de la lagune enregistrées les 19, 21 et 22 décembre 2010.

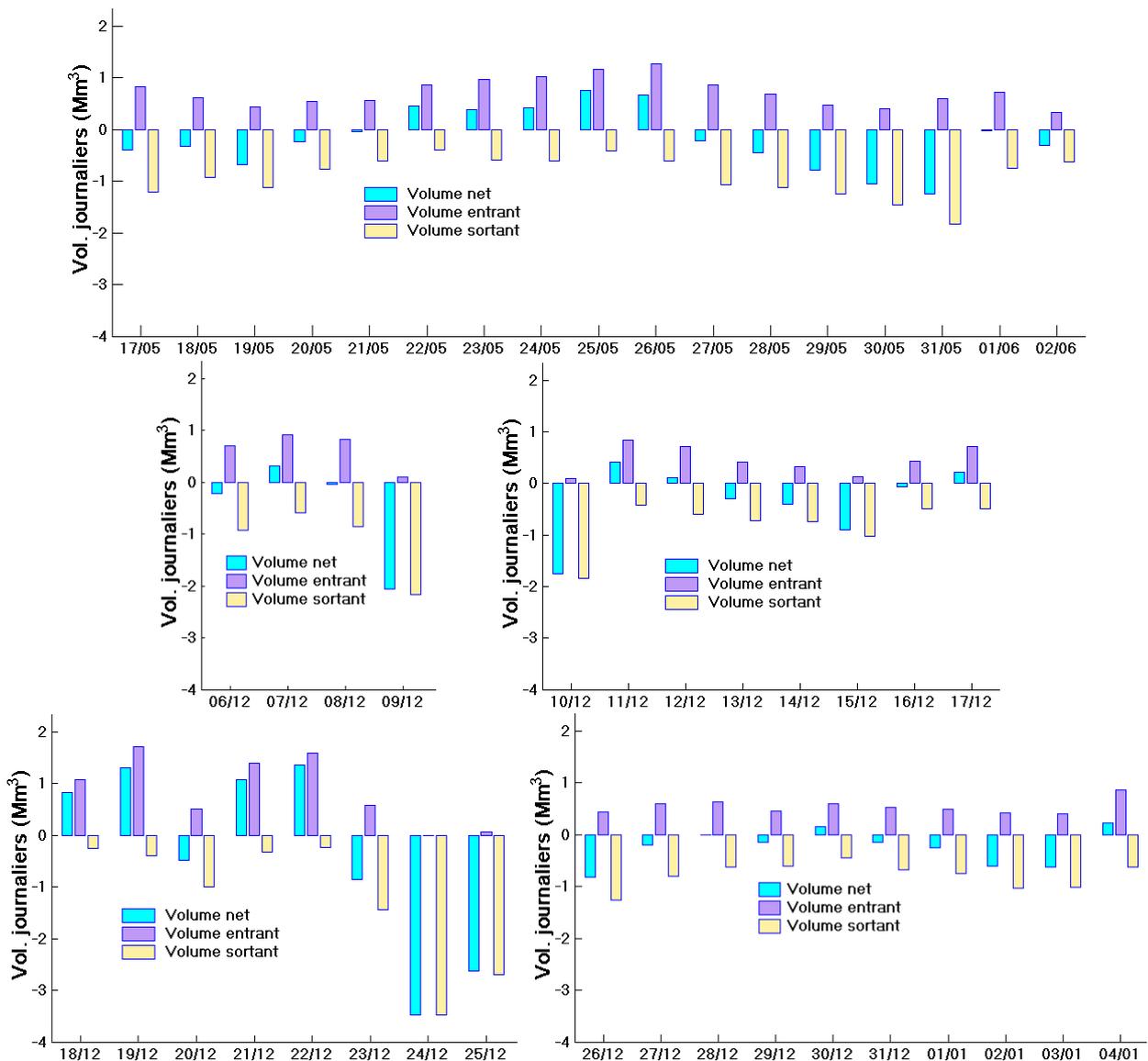


Figure 25 : Volumes journaliers nets (cyan), entrants (mauve) et sortants (orange) mesurés lors des campagnes printanière (haut) et hivernale (milieu et bas).

En résumé

En conditions météorologiques de temps calme (telles que celles rencontrées lors de la période 1), la lagune du Prévost a tendance à exporter des eaux saumâtres vers la mer. Le bilan net journalier moyen est de l'ordre de $-0,15 \text{ Mm}^3$. Les volumes journaliers moyens d'eaux marines qui alimentent la lagune sont de l'ordre de $0,6 \text{ Mm}^3$.

Ces entrées d'eaux marines peuvent atteindre $1,5 \text{ Mm}^3$ lors de coup de vent de mer ou de tempête. Les phases de vidange qui suivent sont susceptibles d'exporter jusqu'à $3,5 \text{ Mm}^3$ (cf. tempête du 18 au 25 décembre 2010), les 2 Mm^3 excédentaires correspondant aux apports d'eaux continentales.

4.3. Application de la méthode d'estimation des débits à partir des mesures de hauteur d'eau

Au préalable à l'application de la méthode, un traitement est appliqué aux signaux bruts de hauteur d'eau afin de supprimer les données aberrantes et de lisser les variations très haute fréquence (houles, vagues en mer, clapot dans la lagune). Un lissage des données sur une période de 3 heures est effectué pour ne garder dans le signal de hauteur d'eau au point P1 - Mer que la part du signal qui « entre » dans l'étang du Prévost. Ce pas de temps de 3 heures permet de lisser d'une part, le phénomène de seiche (de période de l'ordre de 3 heures) mis en évidence par l'analyse harmonique du signal de hauteur d'eau au point P1 - Mer et d'autre part les fortes variations dues à la houle en mer.

Compte tenu de la relative stabilité des conditions météorologiques durant la période printanière, c'est cette période qui a été retenue pour calibrer la méthode. La validation de la méthode est faite sur les quatre périodes de la campagne hivernale.

4.3.1. Calibration et validation de la méthode d'estimation des débits

Etapes 1 et 2 : Débits instantanés et des volumes journaliers estimés à partir de mesures de hauteur d'eau de part et d'autre du grau

Les débits instantanés (Q_{MS}) sont calculés à partir des mesures de hauteur d'eau de part et d'autre du grau et des caractéristiques du grau définies dans le Tableau 3 en utilisant la formule de Manning-Strickler (§ 3.2.).

L'application de cette méthode sur les données de hauteur d'eau acquises entre le 17 mai et le 2 juin 2010 aboutit à une sur-estimation des débits instantanés de l'ordre de 25 %.

Après application d'un facteur correctif ($\beta = 0,7439$ dans la relation $Q_{est} = \beta Q_{MS}$), les débits estimés sur la campagne printanière sont en très bon accord avec les mesures (Figure 26) : la corrélation entre débits instantanés mesurés et estimés obtenues lors de la campagne printanière est supérieure à 85 %.

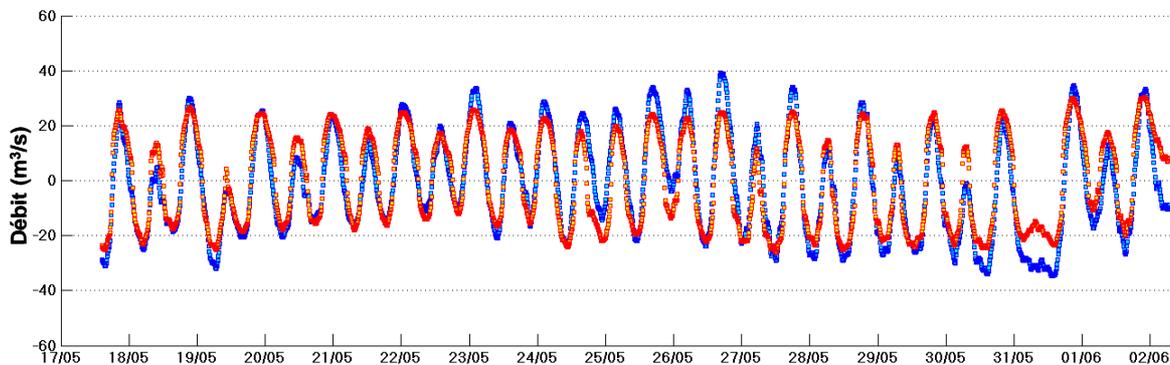


Figure 26 : Evolution temporelle des débits instantanés mesurés (en bleu) et estimés à partir des mesures de hauteur d'eau (en rouge) durant la campagne printanière. Les signaux de hauteur d'eau utilisés pour estimer les débits ont été lissés sur un intervalle de 3 heures.

L'application de cette méthode sur les quatre périodes de la campagne hivernale, avec le même facteur correctif ($\beta = 0,7439$) fournit une estimation fiable des débits instantanés (Figure 27) puisque les corrélations entre débits estimés et mesurés sont supérieures à 60 %, excepté sur la période 5 (du 26 décembre 2010 au 5 janvier 2011) où cette corrélation n'est que de 40 %.

L'intégration des débits instantanés sur la journée fournit les volumes journaliers nets échangés entre la lagune du Prévost et la mer (Figure A.V.1 - Annexe V). Sur la totalité des cinq sous-périodes échantillonnées, la corrélation entre volumes échangés estimés et mesurés est de 56%.

Une analyse des volumes journaliers entrants et sortants montrent que la méthode de Manning-Strickler fournit une très bonne estimation des volumes journaliers sortants (Figure 28) avec une corrélation entre volumes sortants estimés et mesurés de 70% et une erreur relative moyenne de +1% (cf. définition § 3.2.3), la méthode ayant tendance à sous-estimer les volumes sortants.

L'estimation des volumes entrants dans la lagune via le grau (Figure 28) est en revanche moins bonne puisque la corrélation n'est plus que de 34%. L'erreur relative moyenne est de +62%⁷, la méthode ayant tendance à fortement sur-estimer les volumes entrants.

Contrairement à la mesure directe de courants dans le grau, qui ne rend compte que des entrées d'eaux marines dans la lagune, la méthode de Manning-Strickler intègre, dans le calcul des volumes entrants, les apports d'eaux marines et continentales. De ce fait, les volumes entrants dans l'étang du Prévost, estimés à partir de la méthode de Manning-Strickler, doivent être interprétés comme la somme des volumes d'eaux marines entrants par le grau et des volumes d'eaux « continentales » apportées par le Canal du Rhône à Sète et la Canalette – prise d'eau sur le Lez (Figure 2). La sur-estimation des volumes entrants (Figure 29 a et d) estimés par la méthode de Manning-Strickler, comparativement aux volumes entrants mesurés dans le grau, trouve donc ici toute sa justification.

⁷ Cette erreur ne prend pas en compte les couples de données où les mesures sont nulles l'estimation est non nulle. Ces couples de données sont au nombre de 3 sur l'effectif total de 47.

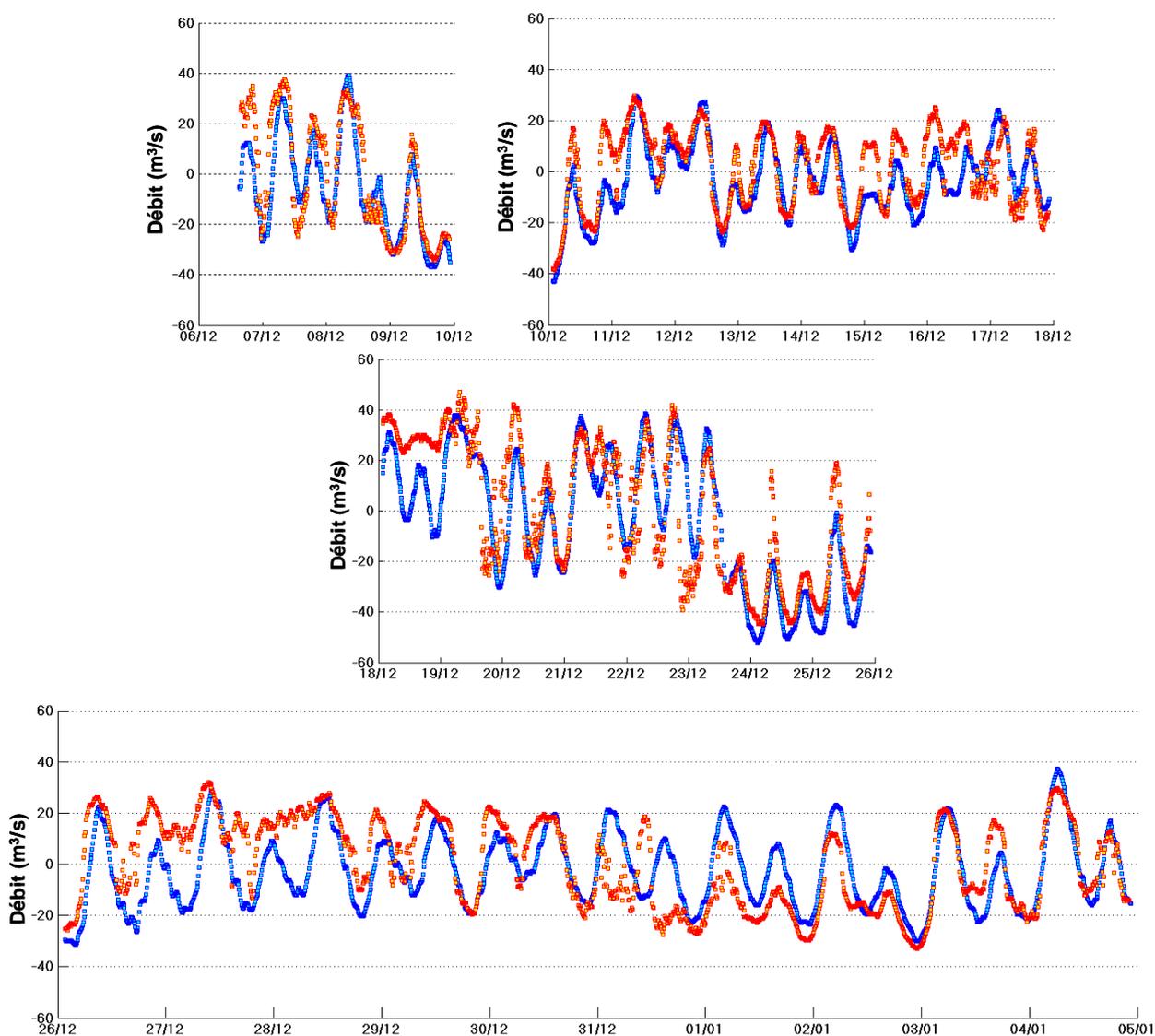


Figure 27 : Evolution temporelle des débits instantanés mesurés (en bleu) et estimés à partir des mesures de hauteur d'eau (en rouge) durant les quatre périodes de la campagne hivernale. Les signaux de hauteur d'eau utilisés pour estimer les débits ont été lissés sur une durée de 3 heures.

Dans un tel contexte, le bon accord entre les débits instantanés mesurés et estimés sur la période printanière en condition de temps calme (Figure 26) nous permet de fournir un ordre de grandeur de ces volumes d'eaux « continentales » qui journalièrement entrent dans la lagune du Prévost : la sur-estimation de 20% des volumes journaliers entrants mise à jour sur cette période pourrait être attribuée aux entrées d'eaux par le canal du Rhône à Sète et la Canalette.

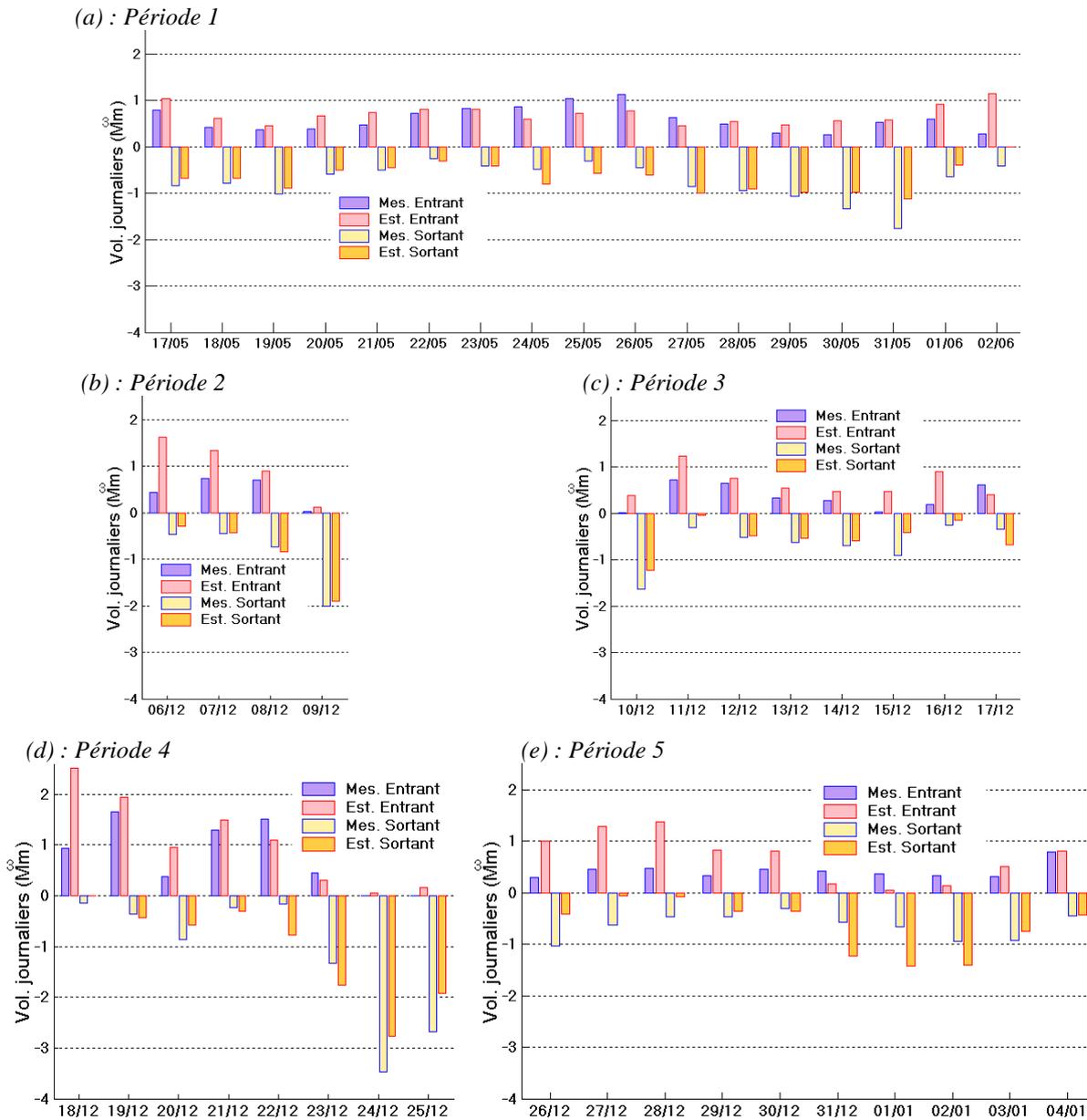


Figure 28 : Comparaison mesures – estimation des volumes journaliers entrants et sortants de la lagune du Prévost lors des cinq sous-périodes échantillonnées au printemps et en hiver.

En outre, le bon accord entre volumes sortants estimés par la méthode de Manning-Strickler et mesurés dans le grau (Figure 29 c) tend à prouver que les sorties d’eau saumâtres de la lagune du Prévost se font majoritairement par la mer. Les échanges d’eau entre l’étang du Prévost et le Canal du Rhône à Sète se font donc principalement du Canal vers la lagune.

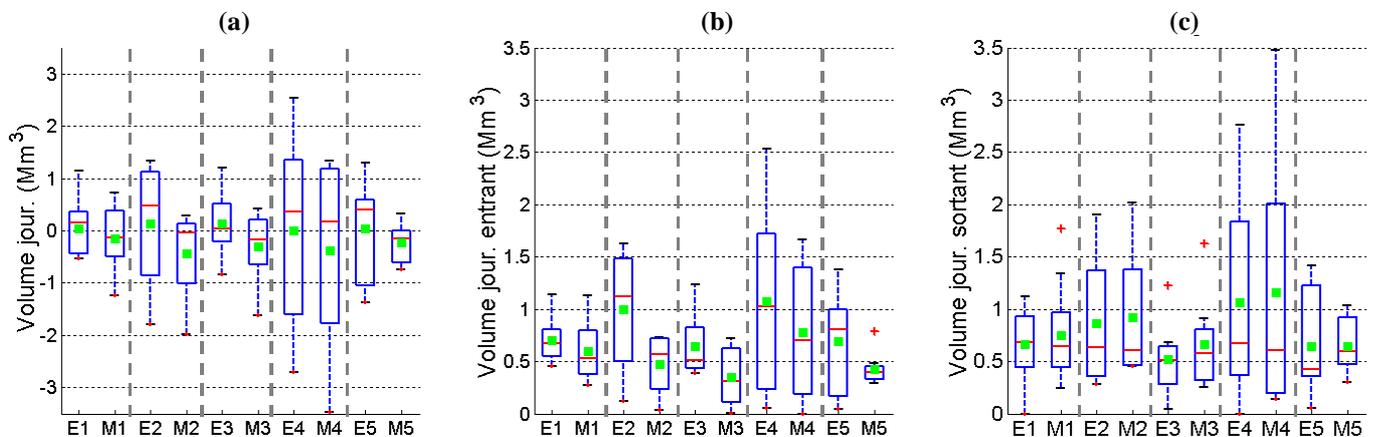


Figure 29 : Distributions temporelles en boîte à moustache des volumes journaliers nets (a), entrants (b) et sortants (c) mesurés et estimés sur les cinq périodes échantillonnées. Les notations (M/E) sur l'axe des abscisses font référence aux mesures et aux estimations. Les chiffres de 1 à 5 font référence aux périodes.

En résumé

Les signaux de hauteur d'eau en mer et dans la lagune ne sont pas repérés dans un référentiel commun (tel que le zéro hydrographique). Les signaux de hauteur d'eau sont centrés autour de la valeur moyenne de la hauteur d'eau calculée sur la durée de la période échantillonnée. Au préalable à son application, la méthode d'estimation des débits par la formule de Manning-Strickler nécessite donc un traitement des séries temporelles des données brutes de hauteur d'eau. Il est nécessaire de :

- définir des périodes « homogènes » en termes de variabilité des mesures autour de la valeur moyenne. Une fois ces sous-périodes identifiées, l'application de la méthode se fait sur chaque sous-période indépendamment les unes des autres.
- lisser les variations à très haute fréquence (houles, vagues en mer, clapot dans la lagune) qui peuvent exister dans le signal de hauteur d'eau en mer. La période de lissage est choisie afin de ne garder, dans le signal de hauteur d'eau en mer, que la part qui « entre » dans la lagune.

Après calibration et validation de la méthode d'estimation des débits par la formule de Manning-Strickler, son application sur la lagune du Prévost permet d'aboutir aux conclusions suivantes :

- La méthode d'estimation des débits à partir de mesures de hauteur d'eau de part et d'autre du grau fournit une estimation fiable des volumes journaliers sortants (70% de la variance des mesures est reproduite par la méthode avec une erreur relative de +1%).
- Cette méthode tend à sur-estimer les volumes journaliers entrants dans la lagune du Prévost. Or, contrairement à la mesure directe de courants dans le grau, qui ne rend compte que des entrées d'eaux marines dans la lagune, la méthode de Manning-Strickler intègre, dans le calcul des volumes entrants, les apports d'eaux marines et continentales. Dans le contexte hydrologique particulier de la lagune du Prévost où il existe des échanges permanents d'eau avec le CRAS et le Lez (contexte qui a d'ailleurs justifié le choix de ce site), cette sur-estimation des débits permet d'émettre l'hypothèse que sur les 0,75 Mm³ qui, en période calme, sortent journalièrement de la lagune du Prévost, 20% sont d'origine « continentale ».

Etape 3 : Calcul du taux de renouvellement

Le calcul du taux de renouvellement, basé sur l'hypothèse que le volume de la lagune reste inchangé, nécessite de définir des périodes pour lesquelles les volumes entrants et sortants de la lagune sont égaux (Figure 3). Sur les cinq sous-périodes échantillonnées, 20 périodes satisfont cette condition (Figure 30).

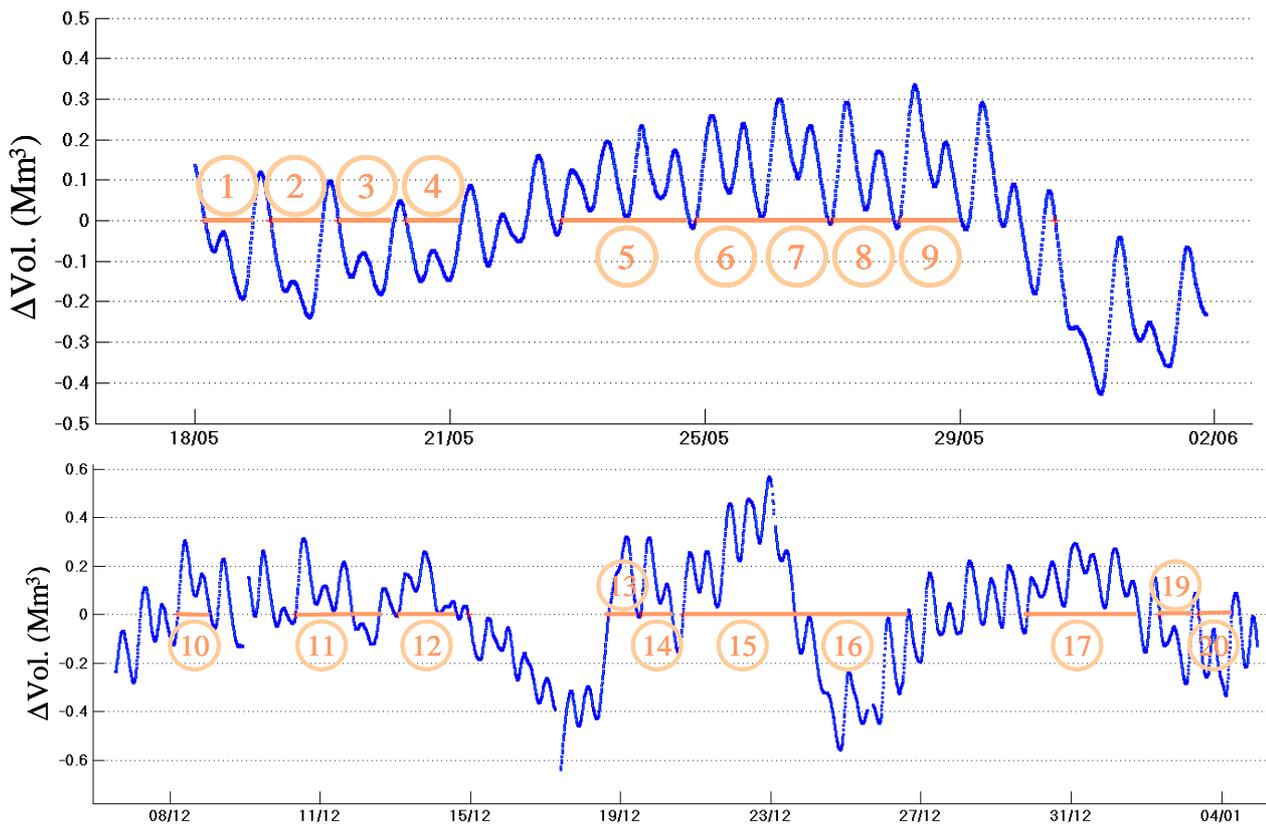


Figure 30 : Evolution temporelle des variations du volume de la lagune du Prévost autour de sa valeur moyenne. Les périodes sur lesquelles l'hypothèse de volume inchangé est vérifiée sont signalées par un trait saumon.

La valeur moyenne du taux de renouvellement journalier (τ_{Rmes}) calculée à partir des mesures est de l'ordre de 20 %. La valeur moyenne estimée par la méthode de Manning Strickler est légèrement plus élevée $\tau_{Rest} = 24 \%$ (Figure 31), du fait elle intègre à la fois le renouvellement par des eaux marines et continentales.

Les valeurs les plus élevées du taux de renouvellement journaliers ($\tau_{Rmes} = 48 \%$ et $\tau_{Rest} = 54 \%$) sont obtenues entre le 18 et le 25 décembre 2010 (périodes 13 à 15 - Figure 30). En période de temps calme, les taux de renouvellement journaliers sont de l'ordre de $\tau_{Rmes} = 7 \%$ et $\tau_{Rest} = 6 \%$.

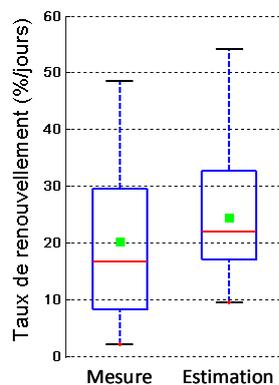


Figure 31 : Distributions temporelles en boîte à moustache des taux de renouvellement calculés sur l'étang du Prévost sur des périodes pour lesquelles le volume de la lagune reste inchangé ; (à gauche) : à partir des volumes mesurés ; (à droite) : à partir des volumes estimés par la méthode de Manning-Strickler.

5. Résultats – Etang de La Palme

5.1. Analyse des signaux de hauteur dans l'étang de La Palme et de salinité en aval et en amont du Pont SNCF

5.1.1. Description générale

Le traitement des données acquises sur l'étang de La Palme est identique à celui appliqué sur les données du Prévost.

Les deux périodes sur lesquelles les débits sous le pont SNCF ont été échantillonnés sont étudiées indépendamment et les variations de la hauteur d'eau aux points P1-Sud et P2-Nord sont centrées autour de la valeur moyenne calculée sur chacune des périodes. Les hauteurs d'eau enregistrées à une fréquence de 10 mn sur toute la durée de la campagne de mesures sont regroupées sur la Figure A.VI.1 en Annexe VI.

Les signaux de hauteur d'eau ne présentent pas de perturbations haute fréquence nécessitant un découpage supplémentaire en périodes homogènes. Cependant une analyse des salinités mesurées de part et d'autre du pont SNCF met en évidence « une rupture » dans le mélange des masses d'eau entre ces deux secteurs de l'étang, à partir du 15 mai 2011 (Figure 32 haut).

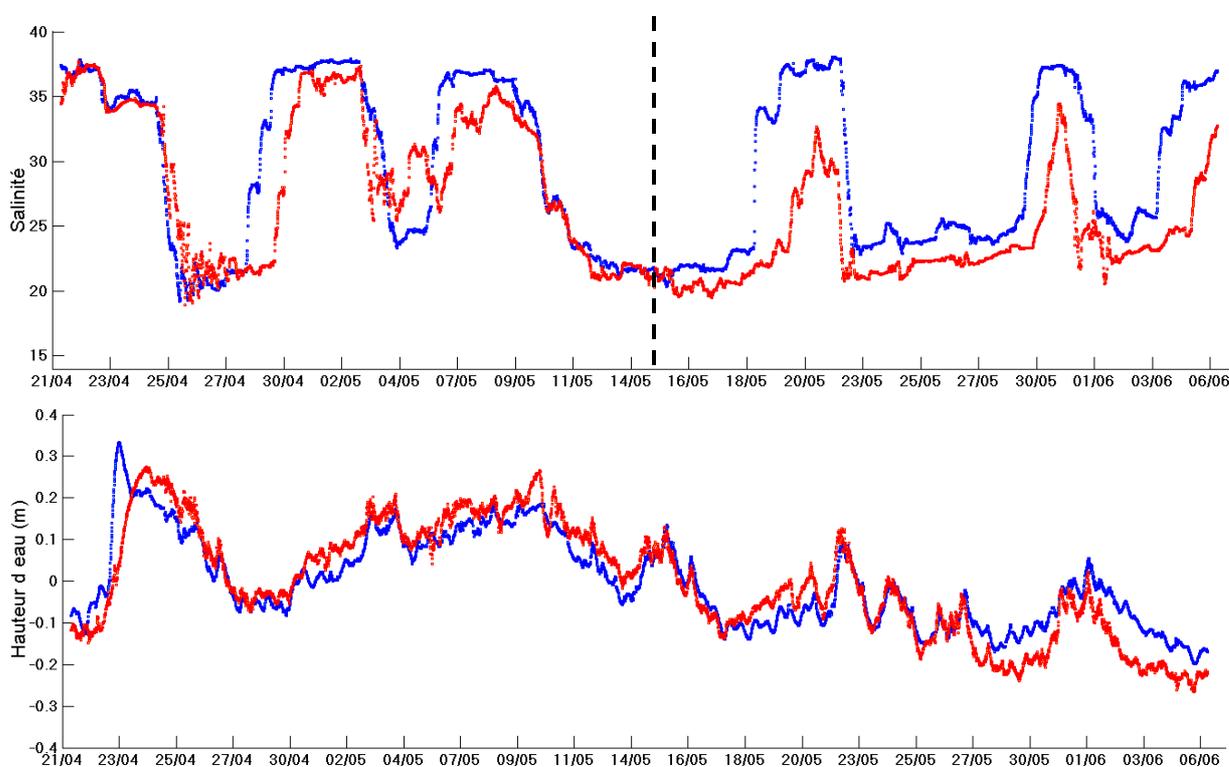


Figure 32 : Evolution temporelle de la salinité (en haut) et des hauteurs d'eau (en bas) aux points P1-Sud (en bleu) et P2-Nord (en rouge) enregistrées dans l'étang de La Palme durant la deuxième et la dernière période d'échantillonnage.

Les salinités de part et d'autre du pont SNCF suivent la même évolution sur toute la période échantillonnée et jusqu'à la mi-mai les écarts ponctuels qui peuvent exister entre les points P1-Sud et P2-Nord ne durent que quelques jours (cf. Figure A.VI.2 de l'Annexe VI). A partir du 15 mai, un gradient de 2 unités de salinité s'instaure entre les deux stations de mesure et perdure jusqu'à la fin de la période d'échantillonnage. Ce gradient de salinité témoigne d'un mélange « moins efficace » entre les masses d'eau situées de part et d'autre du pont SNCF vraisemblablement dû à l'ensablement progressif de la zone située au nord-ouest du pont (Figure 10). Cette coupure hydraulique ne commence à avoir des répercussions notables sur la hauteur d'eau des bassins situés en amont du pont SNCF qu'à partir du 27 mai (Figure 32-bas), date à laquelle un écart systématique apparaît entre les hauteurs d'eau des points P1-Sud et P2-Nord.

La mise en place de la coupure hydraulique en amont du pont SNCF à partir de la mi-mai impose un découpage supplémentaire. La deuxième période d'échantillonnage des débits est donc scindée en deux. Trois périodes « homogènes » (notées « Période HQ ») sont ainsi définies, durant lesquelles les hauteurs d'eau ont été mesurées aux points P1-Sud et P2-Nord et les débits ont été jaugés sous le pont SNCF :

- **Période HQ 1** : du 07/12/2010 à 10h10 au 08/02/2011 à 8h50
- **Période HQ 2** : du 21/04/2011 à 10h20 au 15/05/2011 à 0h
- **Période HQ 3** : du 15/05/2011 à 0h05 au 06/06/2011 à 8h50

A ces trois périodes, s'ajoutent deux périodes supplémentaires (notées « Période H ») durant lesquelles seules les hauteurs d'eau ont été mesurées aux points P1-Sud et P2-Nord :

- **Période H 1** : du 14/10/2010 à 10h00 au 07/12/2010 à 9h20
- **Période H 2** : du 08/06/2011 à 09h50 au 21/04/2011 à 8h50.

5.1.2. Analyse harmonique des signaux de hauteur d'eau dans l'étang de La Palme de part et d'autre du pont SNCF

L'analyse harmonique consiste à rechercher dans le signal temporel de la hauteur d'eau les différentes composantes de marée et leurs amplitudes. Les hauteurs d'eau mesurées dans l'étang de La Palme sont comparées au signal de marée à Banyuls dont les composantes harmoniques sont fournies par le SHOM.

La marée à Banyuls est dominée par (Figure 33) :

- les ondes semi-diurnes (M2 et S2) et diurnes (K1 et O1),
- les composantes longues périodes de la marée (semi-annuelles et mensuelles) sont identifiables ainsi que des sous harmoniques tiers-diurnes et quart-diurnes qui résultent de l'interaction de la marée sur le fond.

La composition des ondes semi-diurnes et diurnes résulte en une marée de type semi-diurne à inégalité diurne. Ce type de marée présente deux hautes mers consécutives (respectivement deux basses mers) dont les amplitudes peuvent être très différentes.

Dans l'étang de La Palme au point P1-Sud seules les ondes diurnes (K1, P1) et semi-diurnes (M2, S2) sont identifiables. Au point P2-Nord, ce sont les ondes semi-diurnes (S2) et diurnes (K1) qui prédominent. Aux deux stations de mesure, les composantes de la marée sont fortement atténuées et déphasées par le passage du grau et les différents goulets d'étranglement. Le pont SNCF joue encore un rôle de filtre et la marée au point P2-Nord est encore plus atténuée qu'au point P1-Sud.

De cette analyse harmonique il ressort que le signal de marée est peu visible dans l'étang de La Palme, la propagation de l'onde de marée en amont du pont SNCF étant très limitée. La marée ne constitue donc pas un forçage prépondérant dans les échanges entre la mer et les bassins situés au nord du pont SNCF.

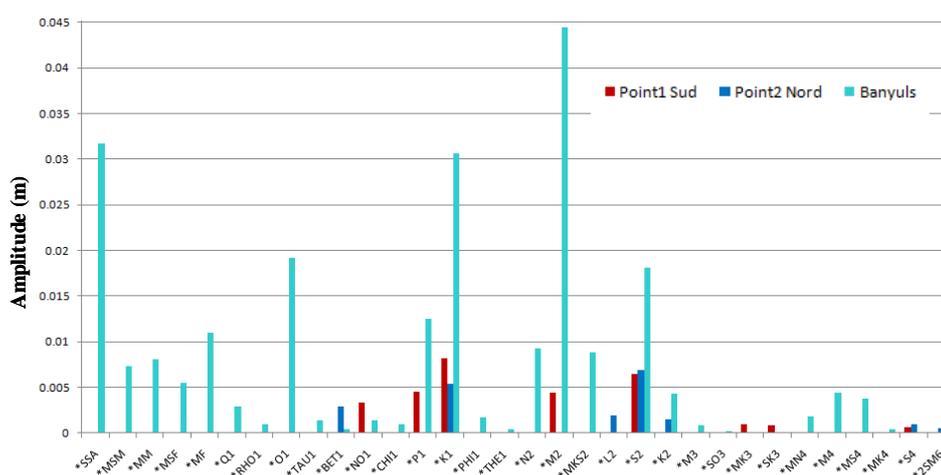


Figure 33 : Comparaison des résultats de l'analyse harmonique de la marée aux points P1-Sud, P2-Nord dans l'étang de La Palme et prédite à Banyuls à partir des constantes harmoniques fournies par le SHOM.

5.1.3. Relation entre hauteur d'eau, salinité et paramètres météorologiques (vent, pression atmosphérique)

Les mesures de pression atmosphérique enregistrées à la station Météo-France de Leucate ont été converties en variations de la hauteur d'eau suivant la loi du baromètre inversé (cf. § 3.1.2). La comparaison des mesures de hauteur d'eau dans l'étang de La Palme avec ce signal théorique (Figure 34 et Figures A.VI.3. à A.VI.5 de l'Annexe VI) ne met pas en évidence une relation simultanée entre les variations barométriques (signaux jaunes) et les variations de la hauteur d'eau dans l'étang (signaux bleus et rouges). Toutefois, il semblerait que les effets du forçage barométrique sur les hauteurs d'eau dans l'étang de La Palme se fasse sentir avec un décalage de un à deux jours (signaux orange).

Entre octobre 2010 et juin 2011, trois événements pluvieux importants sont survenus :

- Lors de la Période H 1 (Figure 34) : entre le 9 et le 12 octobre 2010, le cumul des précipitations atteint 135 mm. Des précipitations de moindre intensité sont également survenues à la fin du mois. Après ces fortes pluies, deux nouvelles dépressions se succèdent (les 28-29 octobre et du 5 au 8 novembre) qui ont pour effet de remplir à nouveau la lagune. Des vents de secteur sud-est sont associés à la première dépression. Des hausses de la pression atmosphérique, associées à de forts vents de secteur nord-ouest, ont tendance à vidanger la lagune suite à ces trois phases de remplissage. Ces successions de « remplissage » de la lagune par des eaux marines puis de vidange des eaux lagunaires dessalées par les eaux de ruissellement sur le bassin versant, se « lisent » clairement sur les variations de la salinité du part et d'autre du pont SNCF.
- Lors de la Période HQ 1 (Figure A.VI.3 Annexe VI) : entre le 27 et le 30 janvier 2011, le cumul des précipitations est de 73 mm. Le même « scénario » que précédemment se reproduit, avec une augmentation du niveau d'eau de part et d'autre du grau de près de

70 cm en 3 jours du fait des effets cumulés de la baisse de la pression atmosphérique et du coup de vent de sud-est. La vidange qui suit dure près d'une semaine et la dessalure associée est proche de 20 unités.

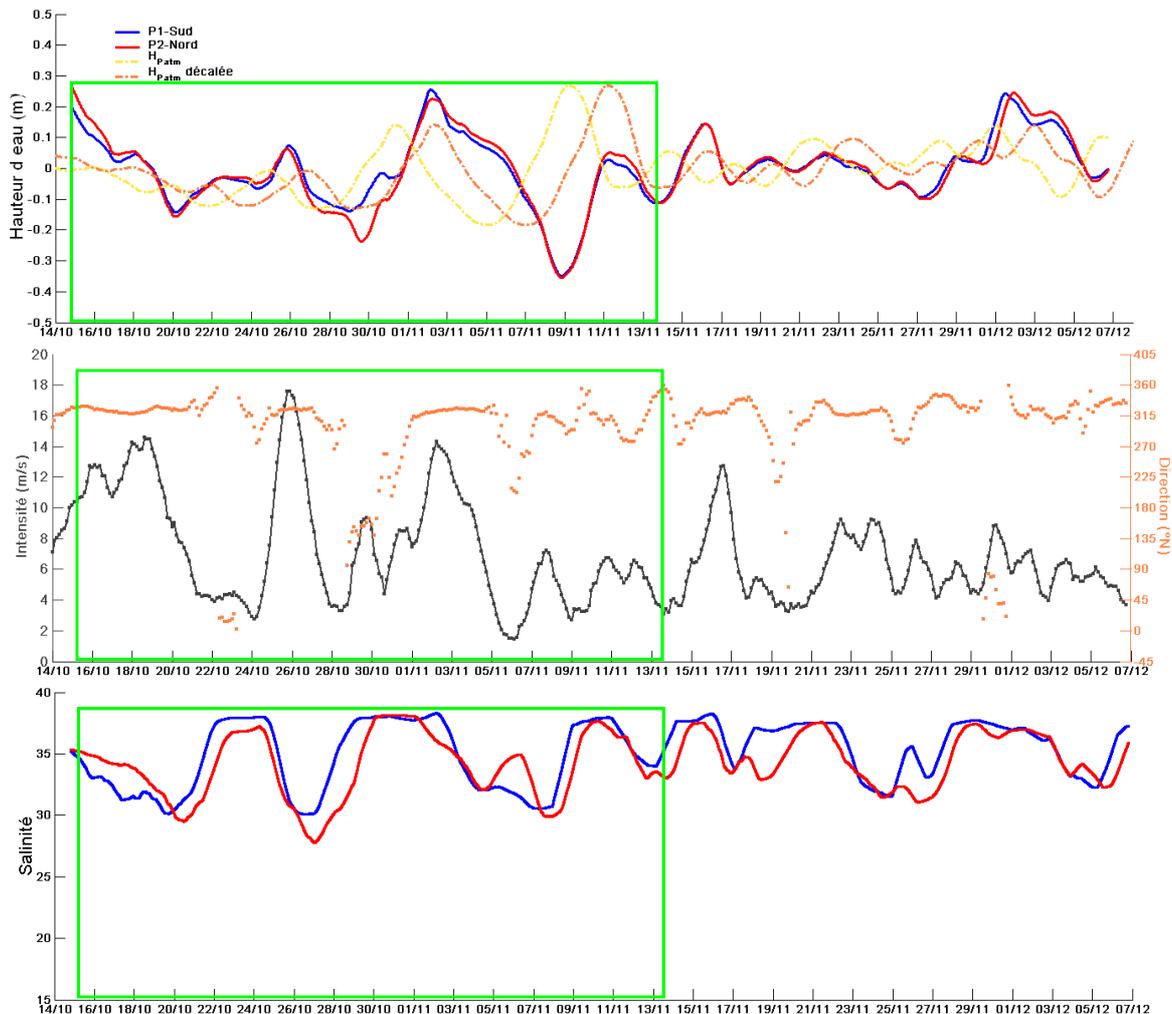


Figure 34 : Evolution temporelle des hauteurs d'eau (en haut) et des salinités (en bas) enregistrées aux points P1-Sud (en bleu) et P2-Nord (en rouge) dans l'étang de La Palme durant la période d'échantillonnage H 1. La courbe en pointillés jaunes correspond à la hauteur d'eau théorique calculée à partir de la loi du baromètre inversé. La courbe en pointillés rouges est décalée de 2 jours par rapport à ce signal théorique. (au centre) : Evolution temporelle des vents (intensités et directions) enregistrés à la station Météo-France de Leucate. Ces trois séries sont lissées sur la journée. Les rectangles verts encadrent les conditions rencontrées suite à l'évènement pluvieux de la mi-octobre.

- Lors de la Période H 2 (Figure 35) : entre le 12 et le 16 mars 2011, le cumul des précipitations est de 96 mm. Cet évènement suit la même chronologie que les deux épisodes précédents mais il est encore plus marqué puisque le début de l'évènement pluvieux s'accompagne d'une tempête : des vents violents de secteur sud-est soufflent (à plus de 70 km/h) pendant près d'une semaine. Sur cette période, l'élévation du niveau d'eau dans la lagune est proche de 70 cm puis la vidange des eaux saumâtres excédentaires se fait en une douzaine de jours. L'impact de cet évènement pluvieux sur

la salinité est important : la salinité descend à 15 aux deux points de mesure et cette dessalure perdure pendant près d'un mois.

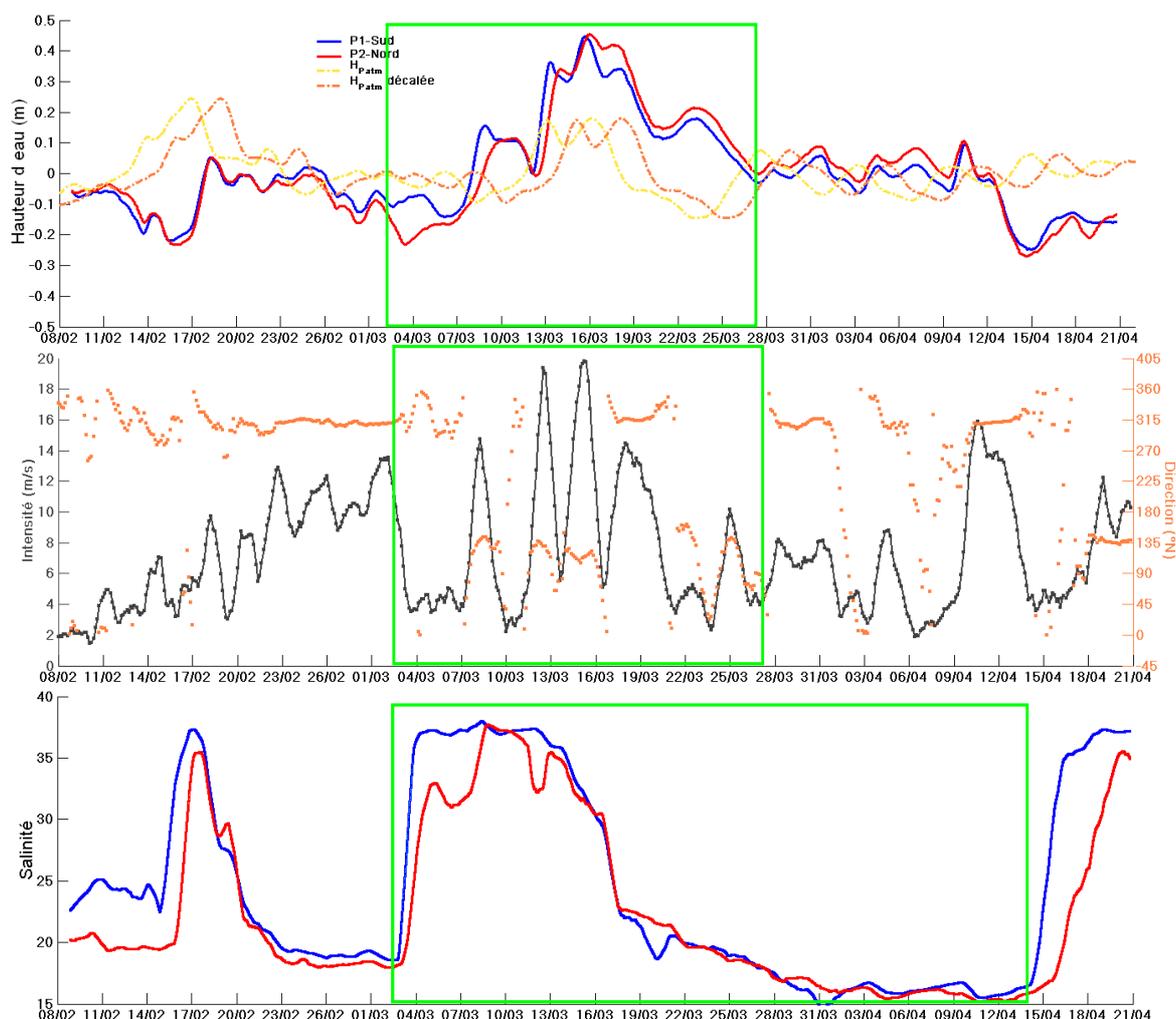


Figure 35 : Evolution temporelle des hauteurs d'eau (en haut) et des salinités (en bas) enregistrées aux points P1-Sud (en bleu) et P2-Nord (en rouge) enregistrées dans l'étang de La Palme durant la période d'échantillonnage H 2. (au centre) : Evolution temporelle des vents (intensités et directions) enregistrés à la station Météo-France de Leucate. Ces trois séries sont lissées sur la journée. Les rectangles verts encadrent les conditions rencontrées suite à l'évènement pluvieux de la mi-octobre.

En résumé

La propagation de l'onde de marée dans la lagune de La Palme est fortement limitée même dans le bassin Sud. La marée ne constitue donc pas un forçage prépondérant des échanges d'eau entre les bassins situés de part et d'autre du pont SNCF.

Combiné aux variations de la pression atmosphérique, le vent constitue donc, sur la lagune de La Palme, un des principaux forçages des échanges d'eau entre les bassins situés de part et d'autre du pont SNCF. Par frottement à la surface de l'eau et transfert d'énergie de l'air à l'eau, le vent engendre des courants dans la lagune. La masse d'eau de surface est alors transportée dans le sens du vent. Un vent de secteur sud-est, généralement associé au passage de la dépression et aux précipitations, participe au transport des masses d'eau marines vers l'intérieur de la lagune. A l'inverse, le vent de secteur nord-ouest, qui accompagne la hausse de la pression atmosphérique en fin d'évènement, « pousse » les masses d'eau saumâtres excédentaires apportées par le ruissellement sur le bassin versant vers l'extérieur de la lagune. Ces successions de phases de « remplissage » puis de vidange sont particulièrement bien illustrées sur les évènements pluvieux d'octobre 2010, janvier et mars 2011.

5.2. Analyse des signaux de courant mesurés sous le pont SNCF

5.2.1. Profils verticaux de courant

Les profils verticaux de courants mesurés sous le pont SCNF en automne et au printemps mettent à jour des courants homogènes de la surface au fond sans cisaillement suivant la verticale. Le courant bien canalisé est dirigé selon deux secteurs directionnels prépondérants : Nord-ouest (entrant) et Sud-ouest (sortant). Les vitesses maximales (de l'ordre de 2 m/s) sont enregistrées en courant sortant

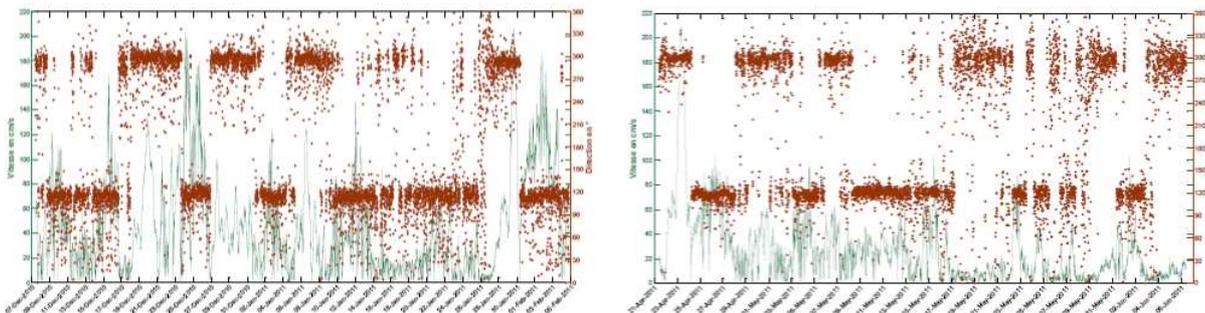


Figure 36 : Evolution temporelle des courants moyens sur la verticale mesurés sous le pont SNCF durant les campagnes d'automne (gauche) et de printemps (droite). La direction indiquée est celle dans laquelle porte le courant : les courants orientés au 300°N entrent dans le Bassin Centre, les courants orientés au 120°N sortent du Bassin Centre vers le Bassin Sud.

5.2.2. Caractérisation des échanges entre les bassins situés au nord et au sud du pont SNCF

Etape 1 : Calcul des débits instantanés à partir de mesures de courant dans le grau

A partir des profils verticaux de courants mesurés et d'une caractérisation de la section d'échange sous le pont SNCF, les débits instantanés ont été calculés à un pas de temps de 10 mn (Figure 37).

Les débits instantanés entrants les plus élevés ont été mesurés lors de l'évènement pluvieux de fin janvier 2011 (+38 m³/s) et en avril 2011 (+35 m³/s) au début de la campagne HQ 2. Les conditions météorologiques qui sont à l'origine de cette phase de remplissage/ vidange de la lagune sont illustrées sur la Figure A.VI.4 de l'Annexe VI. De même, les successions de dépressions survenues en décembre 2010 et janvier 2011 ont engendré des débits entrants relativement élevés +10 à +20 m³/s.

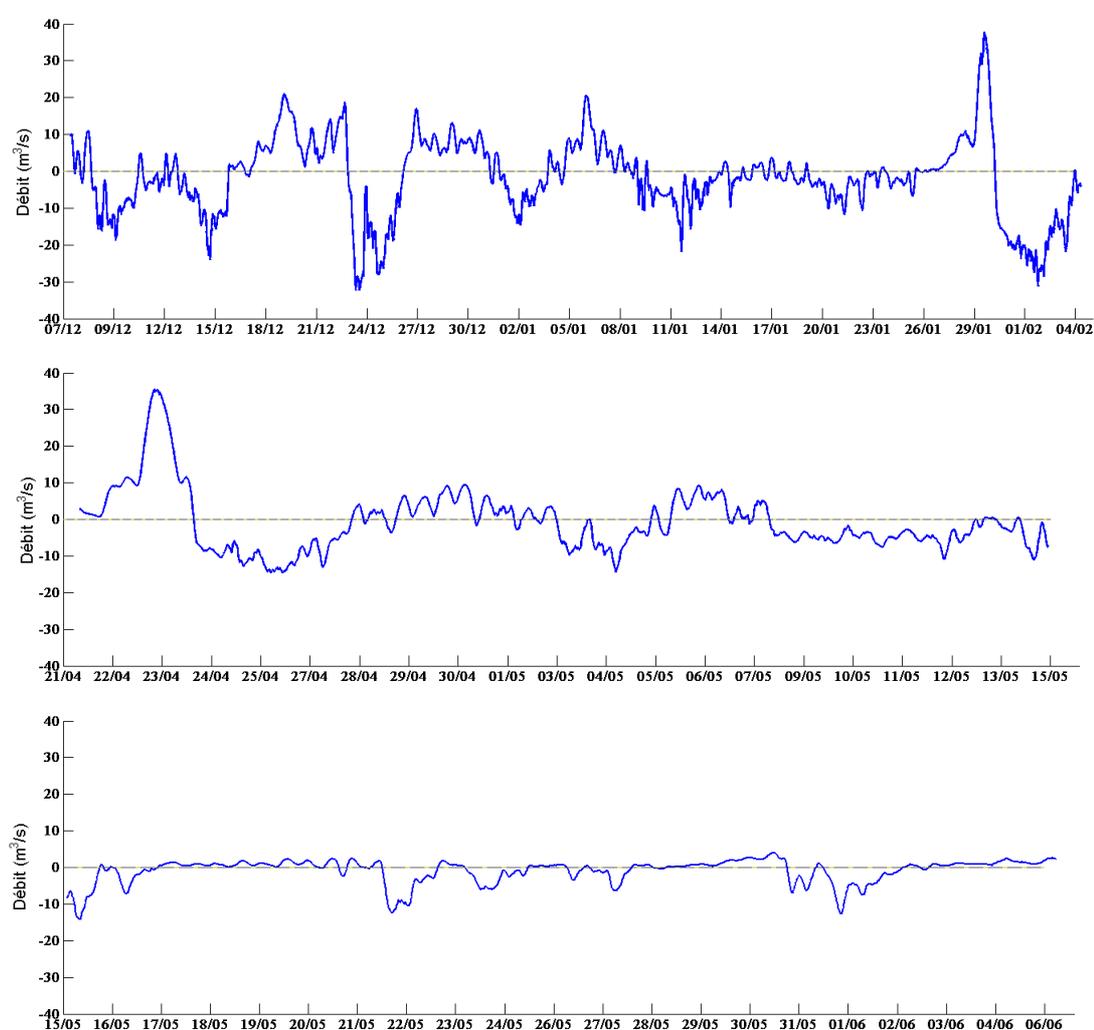


Figure 37 : Evolution temporelle des débits instantanés mesurés sous le pont SNCF dans la lagune de La Palme lors des périodes HQ 1 'en haut), HQ 2 (au centre) et HQ 3 (en bas). Un lissage sur 3 heures a été appliqué aux données acquises à une fréquence de 10 mn.

Les débits sortants maximaux ($- 31 \text{ m}^3/\text{s}$) sont enregistrés le 24 décembre 2010, à la faveur d'un fort coup de vent de secteur nord (figure A.VI.3 Annexe VI) et suite à l'évènement pluvieux de janvier 2011.

Les débits entrants enregistrés sur la Période HQ 3 sont très faibles et les débits sortants n'atteignent $-10 \text{ m}^3/\text{s}$ qu'à trois occasions, les 15 et 21 et 31 mai 2011 (Figure 37) lors de coup de vent de secteur nord-ouest (Figure A.VI.5 Annexe VI). Notons en outre que, si ces trois phases de « vidange » d'eaux saumâtres ont une signature claire sur les signaux de salinité de part et d'autre du pont SNCF, elles n'ont que peu de répercussions sur les signaux de hauteur d'eau.

En dehors de ces périodes d'évènements pluvieux ou de coup de vent, les débits entrants et sortants sont relativement faibles : de l'ordre de $2,5 \text{ m}^3/\text{s}$ en moyenne sur toute la période (Figure 39 a et b). En outre, en accord avec les conclusions obtenues sur l'analyse des hauteurs d'eau, il apparaît que les renverses de courant dues à la marée ne sont pas (ou très rarement) mesurables.

Etape 2 : Calcul des volumes journaliers échangés entre la mer et la lagune

La marée ne constituant pas un forçage prépondérant des échanges d'eau sous le pont SNCF, les variations des débits à l'échelle intra-journalières ne sont pas significatives. Un lissage à l'échelle de la journée est appliqué sur les débits instantanés avant de définir les volumes journaliers entrants et sortants obtenus en intégrant les débits journaliers entrants et sortants sur la journée. Les volumes nets qui transitent journalièrement sous le pont SNCF sont la résultante des différences entre les entrées et les sorties.

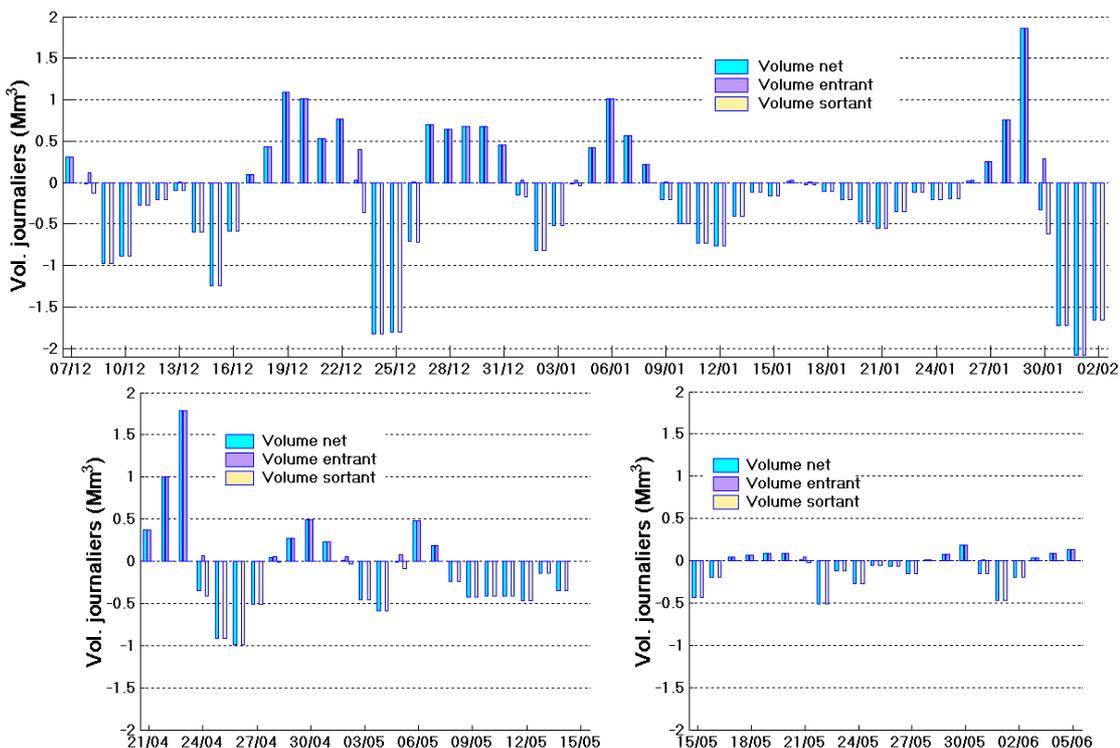


Figure 38 : Volumes journaliers nets (cyan), entrants (mauve) et sortants (orange) mesurés lors des trois campagnes HQ1 (en haut), HQ2 et HQ3 (bas gauche et droite).

Du fait du faible impact de la marée sur les échanges d'eau sous le pont SNCF, les cycles entrées/sorties ne sont pas infra-journaliers mais plutôt de l'ordre de quelques jours (Figure 38) : en d'autres termes, sur une journée, les volumes échangés sont soit entrants, soit sortants, et au moins 3-4 jours en moyennes sont nécessaires pour ré-équilibrer les entrées/sorties.

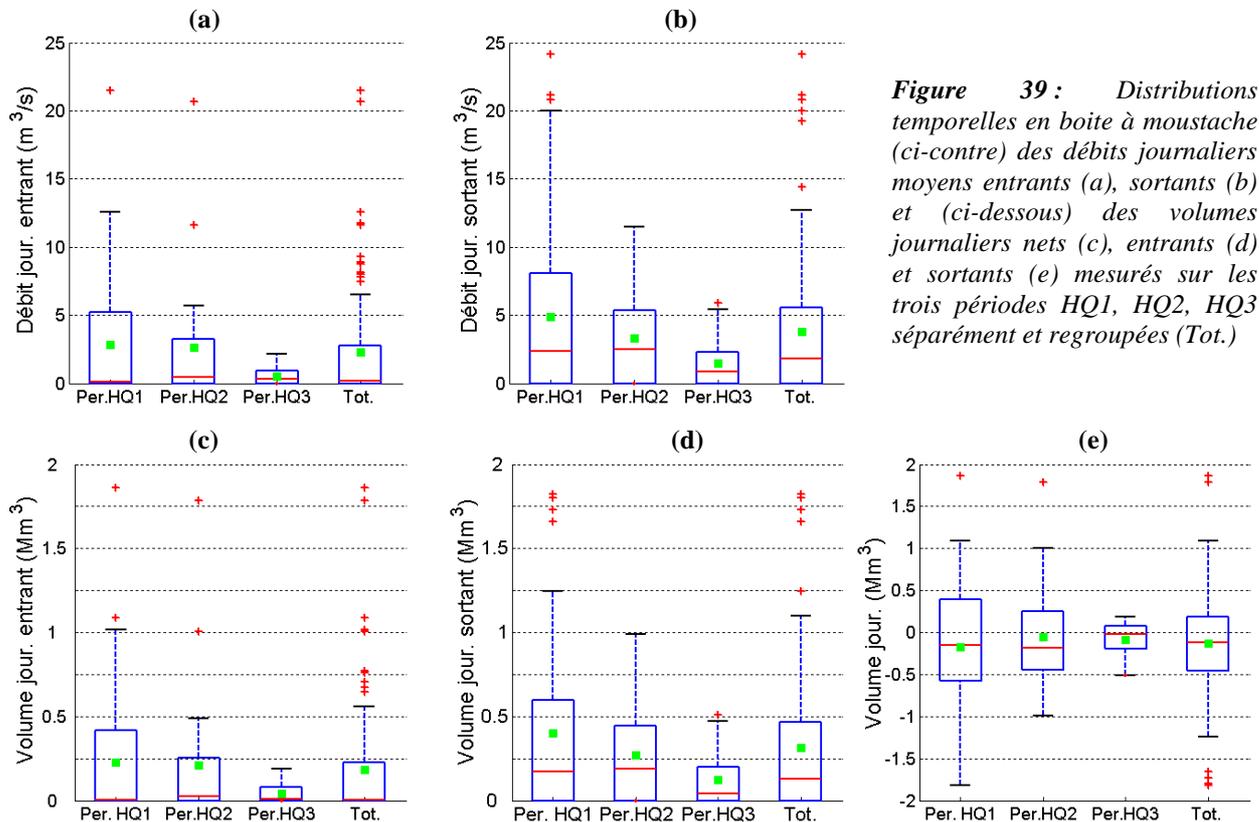


Figure 39 : Distributions temporelles en boîte à moustache (ci-contre) des débits journaliers moyens entrants (a), sortants (b) et (ci-dessous) des volumes journaliers nets (c), entrants (d) et sortants (e) mesurés sur les trois périodes HQ1, HQ2, HQ3 séparément et regroupées (Tot.)

En outre, la variabilité saisonnière des principaux forçages (pression atmosphérique et vent) se retrouve clairement dans les volumes échangés : les volumes journaliers entrants et sortants diminuent sensiblement entre l'automne et l'été (Figure 39). Les valeurs moyennes des volumes entrants / sortants et nets sont de $[+0,23 / -0,40$ et $-0,17 \text{ Mm}^3/\text{j}]$ en automne (Per.HQ1) contre $[+0,04 / -0,12$ et $-0,08 \text{ Mm}^3/\text{j}]$ en été (Per.HQ3).

Les déséquilibres, plus marqués en automne, en faveur des sorties rendent compte de l'exportation des eaux continentales excédentaires apportées lors des événements pluvieux via le ruissellement sur le bassin versant et les précipitations directes sur la lagune. A la fin du printemps et en été, le déséquilibre observé (toujours) en faveur de l'exportation des eaux lagunaires traduit une diminution du volume de l'étang (baisse du niveau d'eau qui commence à être visible en amont du pont SNCF dès la fin du mois de mai – Figure 32). L'évaporation n'est pas compensée par des entrées d'eaux marines.

En résumé

Les échanges d'eau entre les bassins situés de part et d'autre du pont SNCF affichent une variabilité saisonnière marquée, avec un bilan net en faveur de l'exportation d'eaux saumâtres de l'ordre de $-0,17 \text{ Mm}^3/\text{j}$ en automne et de $-0,08 \text{ Mm}^3/\text{j}$ au printemps. Les entrées d'eaux marines, de l'ordre de $+0,23 \text{ Mm}^3/\text{j}$ en automne, diminuent également fortement pour n'être plus que de $+0,04 \text{ Mm}^3/\text{j}$ au printemps. L'exportation d'eaux saumâtres en automne et en hiver correspond à la vidange des eaux continentales excédentaires apportées à la lagune lors d'événements pluvieux. La baisse du niveau de l'étang qui débute à la fin du mois de mai, associée à un bilan net toujours en faveur des sorties d'eaux saumâtres, sont la conséquence de l'impact des coupures hydrauliques qui se mettent progressivement en place (en amont du pont SNCF, puis fermeture du grau). L'évaporation, non compensée par les entrées d'eaux marines, participe également à cette diminution du volume de l'étang de La Palme dès la fin du mois de mai 2011.

5.2.3. Application de la méthode d'estimation des débits

Étapes 1 et 2 : Débits instantanés et des volumes journaliers estimés à partir de mesures de hauteur d'eau de part et d'autre du pont SNCF

Les débits instantanés (Q_{MS}) sont calculés en utilisant la formule de Manning-Strickler (§ 3.2.) à partir des mesures de hauteur d'eau de part et d'autre du pont SNCF et des caractéristiques de la section d'échange sous le pont définies dans le Tableau 3.

La méthode a été appliquée, pour calibration, sur les signaux de hauteur d'eau lissés à 24 heures acquis entre le 7 décembre 2010 et le 8 février 2011. Les débits instantanés Q_{MS} surestiment les échanges et un facteur correctif est appliqué ($\beta = 0,3$ dans la relation $Q_{est} = \beta Q_{MS}$) afin d'obtenir les débits estimés Q_{est} (Figure 42).

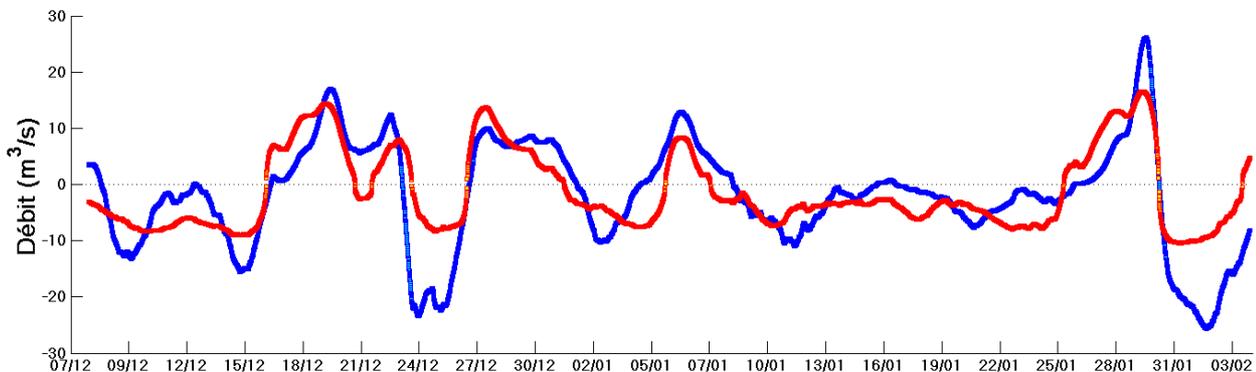


Figure 40 : Evolution temporelle des débits instantanés mesurés (en bleu) et estimés à partir des mesures de hauteur d'eau (en rouge) durant la période HQI sous le pont SNCF dans l'étang de La Palme. Les signaux de hauteur d'eau utilisés pour estimer les débits ont été lissés sur 24 heures.

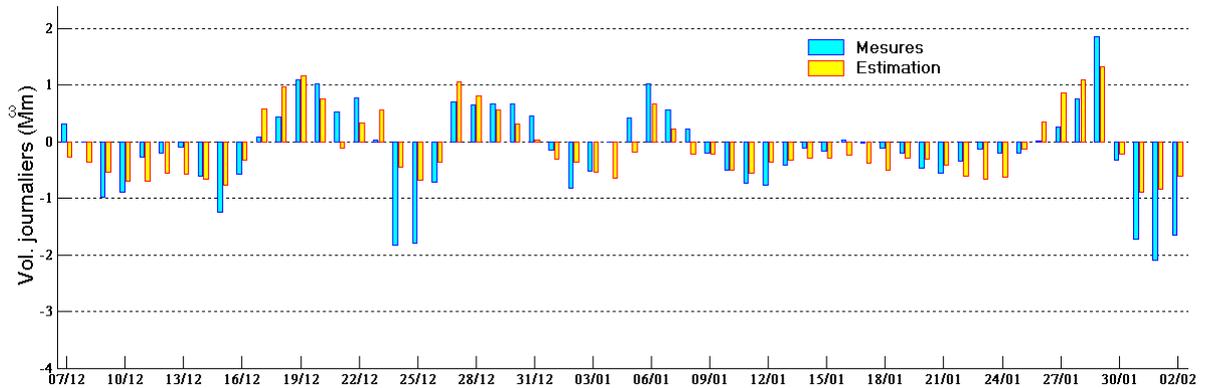


Figure 41 : Comparaison mesures – estimation des volumes journaliers échangés sous le pont SCNF dans la lagune de La Palme lors de la période HQ1.

Les débits instantanés estimés suivent la même tendance que les débits mesurés (Figure 40), La méthode rend compte de près de 60 % de la variabilité des débits nets journaliers, toutefois les débits sortants sont sous-estimés. Les cycles sur lesquels l'eau entre et sort sous le pont SNCF sont en outre bien reproduits par la méthode (Figure 43).

L'application de la méthode sur les deux autres périodes (HQ2 et HQ3) fournit des débits instantanés qui, dans certains cas, ne sont plus en accord avec les mesures (Figure 42) :

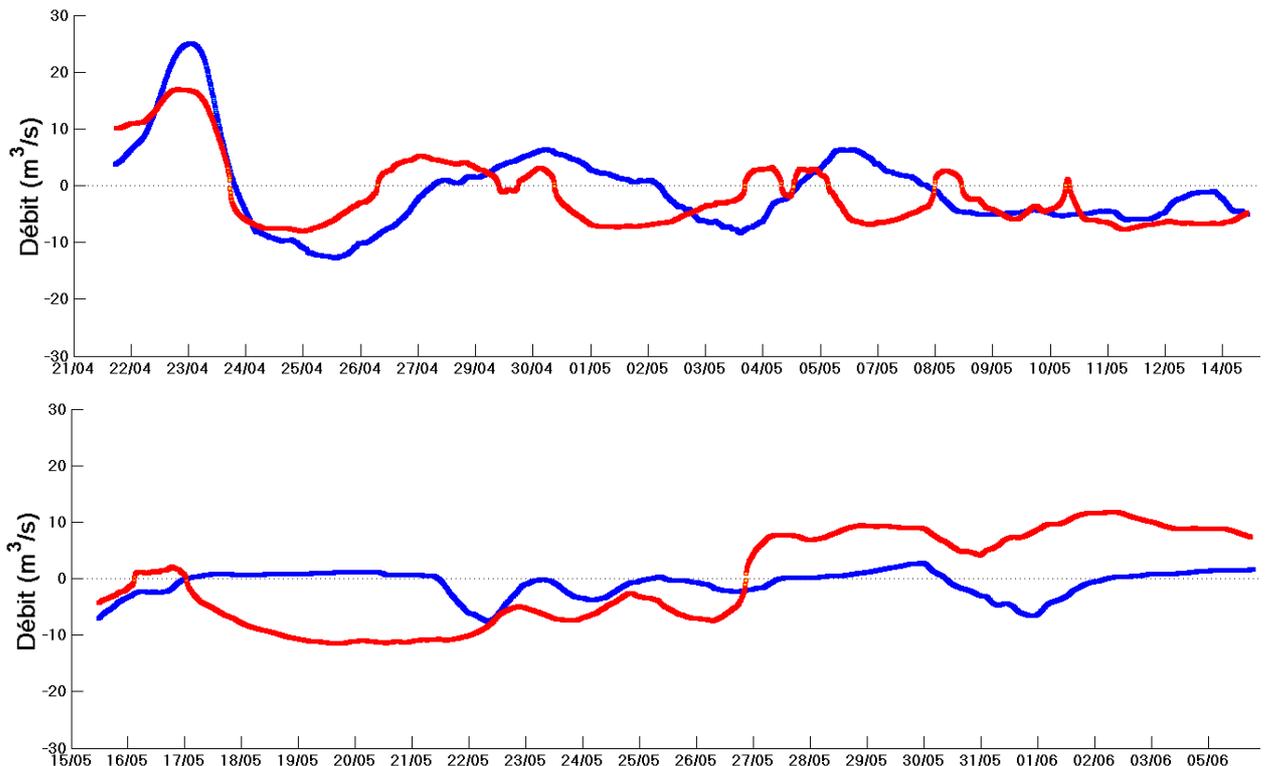


Figure 42 : Evolution temporelle des débits instantanés mesurés (en bleu) et estimés à partir des mesures de hauteur d'eau (en rouge) durant les périodes HQ1, HQ2 et HQ3 sous le pont SNCF dans l'étang de La Palme. Les signaux de hauteur d'eau utilisés pour estimer les débits ont été lissés sur 24 heures.

- A partir du 25 avril, la méthode ne reproduit plus correctement la durée des phases de courants sortants et un déphasage apparaît entre les mesures et l'estimation : le sens des échanges estimés peut même être inversé par rapport au signal mesuré (entre le 26 avril et le 8 mai 2011 - Figure 43).

Dans ces cas-là, les différences de hauteur d'eau de part et d'autre du pont SNCF sont faibles (Figure A.VI.4 – Annexe VI) car les variations de la pression atmosphérique sont également faibles et le vent constitue le seul moteur des échanges :

- lorsque le vent est de secteur Nord Nord-Ouest, la hauteur d'eau en aval du pont SNCF peut être supérieure à la hauteur d'eau en amont (tel que les 27 et 28 avril 2011) alors que le courant est sortant (c.à.d. dirigé du niveau d'eau le plus bas vers le niveau le plus haut),
- lorsque le vent est de secteur Sud Sud-Est, la hauteur d'eau en aval du pont SNCF peut être inférieure à la hauteur d'eau en amont (tel que les 1^{er} et 2 mai 2011) alors que le courant est entrant (là encore, dirigé du niveau d'eau le plus bas vers le niveau le plus haut).

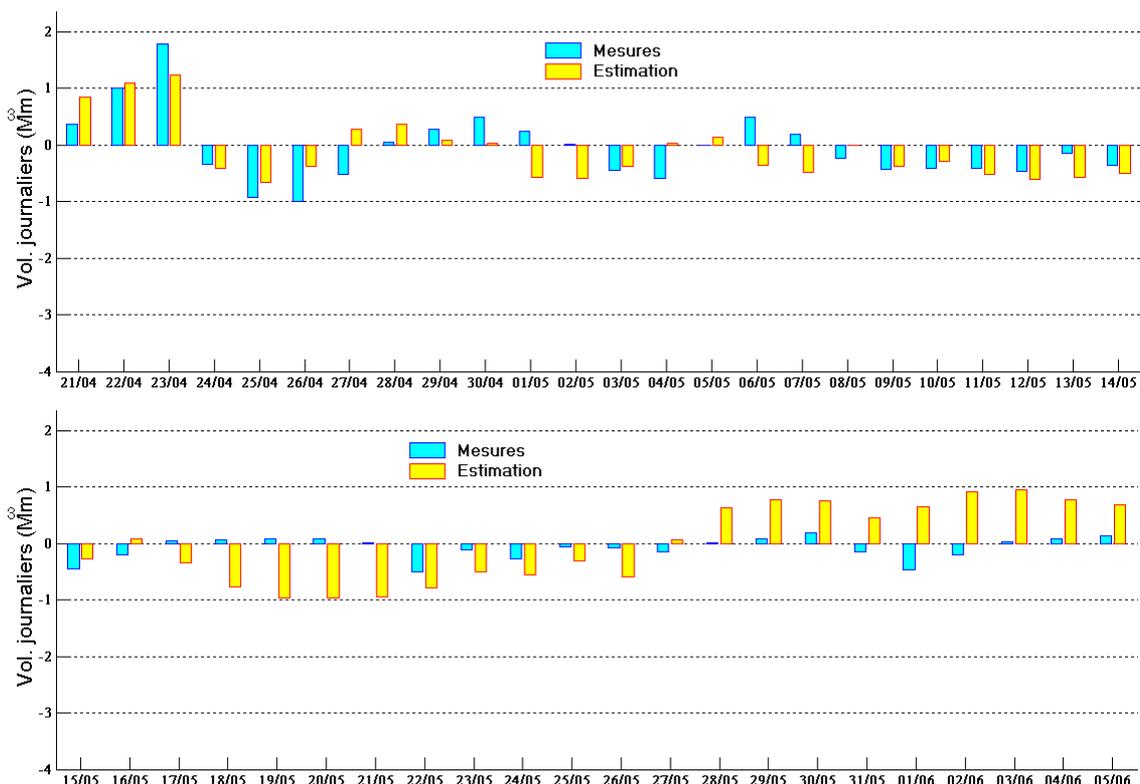


Figure 43 : Comparaison mesures – estimation des volumes journaliers échangés sous le pont SNCF dans la lagune de La Palme lors des 3 périodes HQ1, HQ2, HQ3.

Ces situations sont l'illustration du basculement du plan d'eau induit et entretenu par le vent (cf. § 3.1.3) et tel que les courants sont orientés de la rive au vent (niveau d'eau le plus bas) vers la rive sous le vent (niveau d'eau le plus haut). Dans une telle situation, où le vent est le moteur des échanges, les courants qui s'instaurent n'ont pas pour effet de compenser les différences de hauteur d'eau de part et d'autre du pont mais à l'inverse de

les entretenir. L'hypothèse qui sous-tend la définition et l'application de la méthode n'est donc plus vérifiée.

- Après le 15 mai 2011, la méthode ne permet plus d'estimer les débits. La coupure hydraulique en amont du pont SNCF se met progressivement en place, et les échanges entre les bassins situés de part et d'autre du pont sont de plus en plus limités : les débits entrants et sortants ne dépassent que rarement $2,5 \text{ m}^3/\text{s}$ (Figure 45).

En l'absence de débits mesurés, la confrontation des signaux de débits estimés et de salinités permet de fixer les limites d'application de la méthode. Il existe en effet une corrélation forte entre le sens des échanges et la salinité mesurée de part et d'autre du pont SNCF (Figure 44). En dehors de la période estivale où l'évaporation est importante, la salinité de la lagune est généralement plus faible que la salinité en mer, du fait des apports d'eau douce. Ainsi, lorsque les débits sont entrants, la salinité des bassins Sud et Centre (Figure 6) est influencée par les entrées d'eau marines. On enregistre alors une augmentation de la salinité concomitante à une inversion des débits : phase de débits entrants (positifs) qui succèdent à une phase de débits sortants (négatifs) - ces inversions sont repérées par les lignes verticales noires sur la Figure 44. Lorsque les débits sont sortants, la salinité au sud de l'étang est influencée par les eaux dessalées du bassin Nord-Ouest. On enregistre une baisse de la salinité simultanée à une inversion des débits : phase de débits sortants (négatifs) qui succèdent à une phase de débits entrants (positifs) - ces inversions sont repérées par les lignes verticales rouges sur la Figure 44.

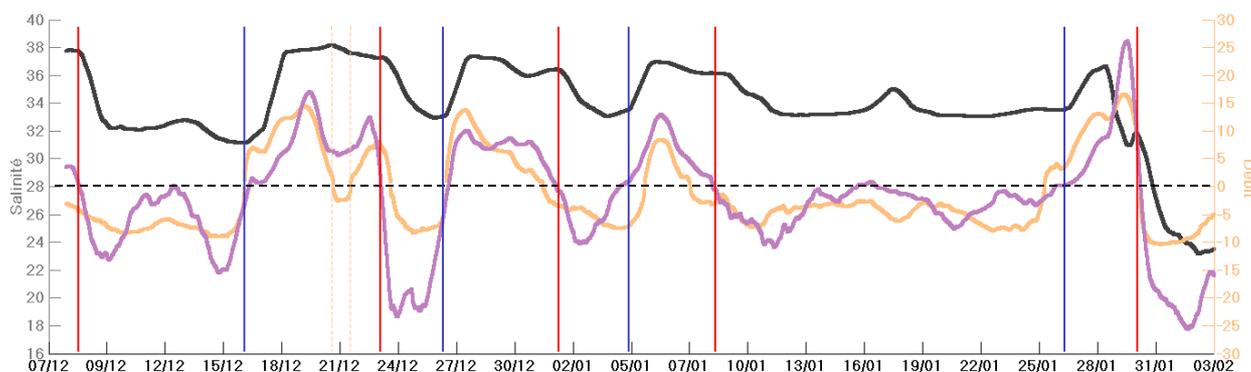


Figure 44 : Evolution temporelle de la salinité au point P1-Sud (en noir) dans l'étang de La Palme, des débits mesurés (en violet) et estimés (en saumon) sous le pont SNCF sur la période HQ1. Ces trois séries sont lissées sur la journée.

Dans les cas où des inversions de débits estimés ne sont pas associées à des variations notables de la salinité (de telles situations, enregistrées sur les périodes HQ2 et HQ3, sont illustrées en Annexe VII - Figure A.VII. 1), on pourra conclure que la méthode ne fournit pas une estimation correcte des débits. Ces périodes durant lesquelles les débits sont mal estimés pourraient donc être exclues des séries temporelles dès lors que leur durée est trop importante.

Ceci étant, sans exclusion de périodes, les volumes journaliers estimés sur les deux périodes HQ1 et HQ2 sont en bon accord avec les mesures (Figure 45).

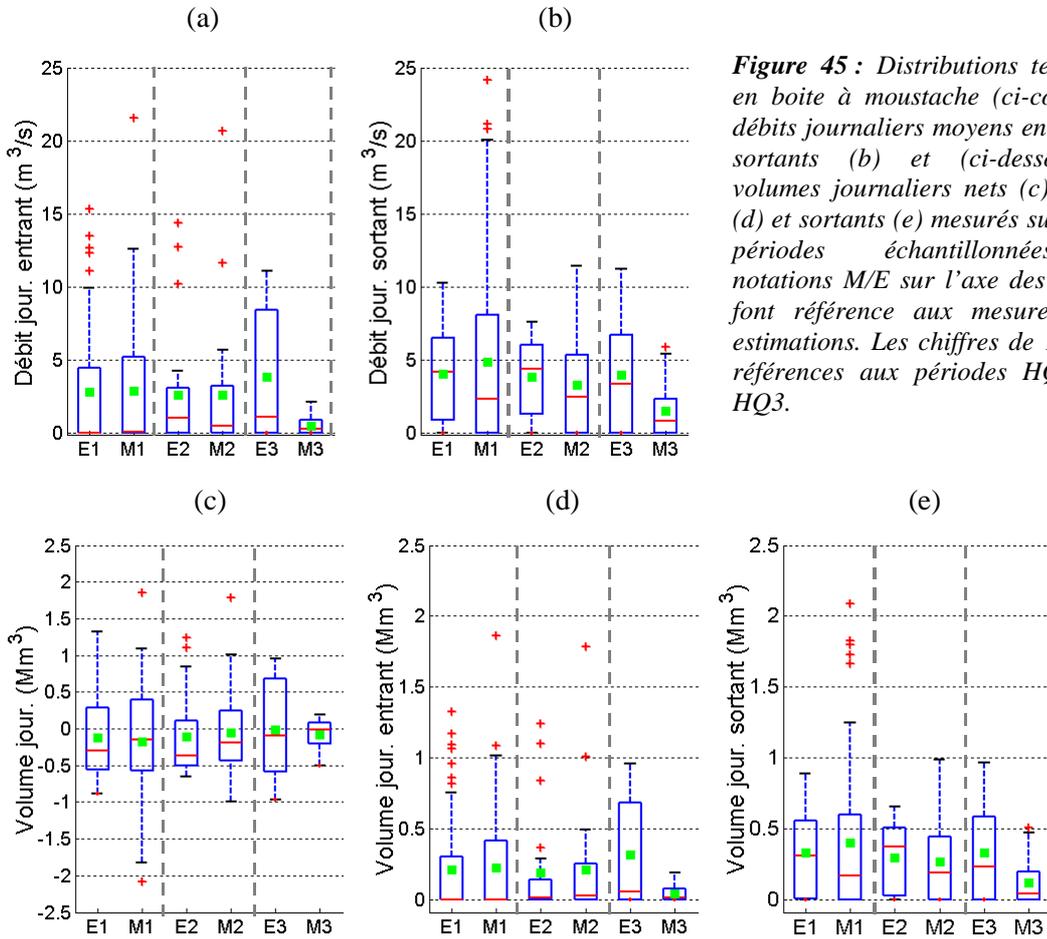


Figure 45 : Distributions temporelles en boîte à moustache (ci-contre) des débits journaliers moyens entrants (a), sortants (b) et (ci-dessous) des volumes journaliers nets (c), entrants (d) et sortants (e) mesurés sur les trois périodes échantillonnées. Les notations M/E sur l'axe des abscisses font référence aux mesures et aux estimations. Les chiffres de 1 à 3 font références aux périodes HQ1, HQ2, HQ3.

En résumé

Lorsque les forçages sont barotropes (variations de la pression atmosphérique) les hypothèses qui sous-tendent la méthode de Manning-Strickler sont vérifiées et celle-ci fournit une bonne estimation des volumes journaliers entrants et sortants. Lorsque les forçages sont baroclines (prédominance du vent), le sens des courants dans la passe n'est plus gouverné par les différences de hauteurs d'eau de part et d'autre et la méthode n'est plus applicable. La salinité constitue un paramètre de « contrôle » qui permet de définir les périodes sur laquelle la méthode est ou n'est pas applicable puisqu'elle met à jour une incohérence sur le sens des débits estimés.

Par ailleurs, dans une telle situation (qui en 2011 a débuté à partir de la mi-mai), les débits sont très faibles et la non-prise en compte des échanges constitue une erreur qui peut être considérée comme négligeable.

Etape 3 : Calcul du taux de renouvellement

Le calcul du taux de renouvellement, basé sur l'hypothèse que le volume de la lagune reste inchangé, nécessite de définir des périodes pour lesquelles les volumes entrants et sortants de la lagune sont égaux (Figure 3). Sur les trois sous-périodes échantillonnées, 27 périodes satisfont cette condition.

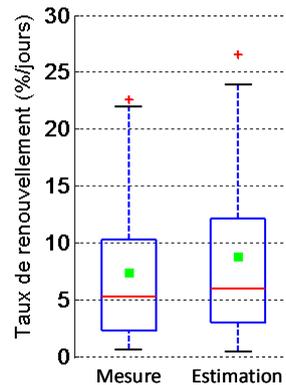


Figure 46 : Distributions temporelles en boîte à moustache des taux de renouvellement calculés sur l'étang de La Palme sur des périodes pour lesquelles le volume de la lagune reste inchangé ; (à gauche) : à partir des volumes mesurés ; (à droite) : à partir des volumes estimés par la méthode de Manning-Strickler.

La valeur moyenne du taux de renouvellement journalier calculée à partir des mesures est de l'ordre de $\tau_{\text{Rmes}} = 7\%$. La valeur moyenne estimée par la méthode de Manning Strickler est très proche $\tau_{\text{Rest}} = 8\%$ (Figure 46). Les valeurs les plus élevées ($\tau_{\text{Rmes}} = 22\%$ et $\tau_{\text{Rest}} = 24\%$) sont obtenues entre le 16 et le 26 décembre 2010.

Sur l'étang de La Palme, la méthode de Manning-Strickler fournit une très bonne estimation des taux de renouvellement (excepté sur la période HQ3 où les taux de renouvellement estimés peuvent être fortement sur-estimés du fait de l'erreur commise sur les débits instantanés). Ceci s'explique par le fait que lorsque le vent est le principal moteur de la dynamique des échanges (à partir du 25 avril 2011), les taux de renouvellement journaliers mesurés sont faibles (inférieurs à 4%) et ainsi, ces conditions météorologiques participent peu au renouvellement des masses d'eau. L'incapacité de reproduire ces échanges avec la méthode de Manning-Strickler n'induit donc pas d'erreur significative sur l'estimation du taux de renouvellement.

6. Indicateurs hydrodynamiques

Le modèle hydrodynamique MARS-3D (Lazure et Dumas, 2008) a été appliqué sur les lagunes de Thau, Bages-Sigean, et l'ensemble du complexe des étangs Palavasiens et de l'étang de l'Or. Ce modèle permet de calculer un taux de renouvellement et un temps de résidence local. Les périodes simulées sont fixées en fonction des jeux de données de forçage disponibles. Le tableau 4 récapitule, sur chaque lagune, les périodes simulées et l'origine des données de forçage utilisées.

Tableau 4 : Récapitulatif, des conditions de simulation pour les trois lagunes sur lesquelles le modèle hydrodynamique MARS-3D est appliqué.

| Lagunes | Période simulée | Forçages | |
|-----------------------|--|--|---|
| | | Météorologiques | Conditions limites en mer |
| THAU | du 14/05/2008 au 07/02/2009 du 15/03/2009 au 17/08/2009 | Vent enregistré sur l'étang (zone conchylicole de Marseillan) ⁽¹⁾ et Pression atmosphérique enregistrée au Sémaphore de Sète (Météo-France) | Hauteur d'eau dans les canaux de Sète mesurée par la Cellule Hydrographique de la Région Languedoc Roussillon |
| BAGES-SIGEAN | du 01/12/2005 au 31/03/2007 | Vent et pression atmosphérique enregistrés à Leucate (Météo-France) | Hauteur d'eau mesurée dans le grau de Port-La-Nouvelle ⁽²⁾ |
| PALAVASIENS-OR | du 18/05/2010 au 15/08/2010 du 01/10/2010 au 28/12/2010 | Vent et pression atmosphérique enregistrés à Fréjorgues (Météo-France) | Hauteur d'eau en mer mesurée au droit du grau du Prévost (point P1-Mer) |

⁽¹⁾ Données acquises dans le cadre d'une collaboration entre le LER-LR et le Centre National de Recherche en Météorologie (Toulouse)

⁽²⁾ Données acquises dans le cadre de l'étude n°07/321 1071F co-financée par l'Agence de l'Eau RM&C, la Région Languedoc-Roussillon et l'Ifremer.

Les simulations présentées ici ont été réalisées afin d'étudier spécifiquement la dynamique du mélange des eaux saumâtres et marines. Dans ce contexte, les apports d'eaux douces par les bassins versants ne sont pas pris en compte.

Le temps de calcul sur la grille des étangs Palavasiens- étang de l'Or- CRAS étant important (48 h de temps de calcul pour simuler 20 jours), les simulations sur ce complexe ont été découpées en deux périodes de trois mois (Tableau 4) : une période printemps-été (du 17/05 au 15/08/2010) et une période automne-hiver (du 01/10 au 28/12/2010).

6.1. Taux de renouvellement

Le taux de renouvellement, mesure le pourcentage d'eaux marines (normalisé par le volume total de la lagune) qui entre journalièrement dans la lagune et se mélange aux eaux saumâtres. Cet indicateur global fournit une première « classification » des écosystèmes basée sur **leur ouverture à la mer**.

Avec un taux de renouvellement journalier le plus élevé ($TR_{PREVOST}=20\%$), l'étang du Prévost apparaît comme un écosystème bien ouvert sur la mer. A l'opposé, l'étang de Bages-Sigean se révèle être la lagune la plus confinée ($TR_{BAGES-SIGEAN} = 1,1\%$). Son taux de renouvellement est proche de celui de l'étang de Thau ($TR_{THAU} = 2\%$) alors qu'il existe un facteur 0,22 entre les volumes de ces deux étangs (Tableau 5). L'étang de La Palme apparaît également comme une lagune confinée ($TR_{LAPALME}=8\%$). Ce confinement présente cependant une variabilité

saisonnaire puisqu'en période hivernale le taux de renouvellement journalier peut atteindre 20 %.

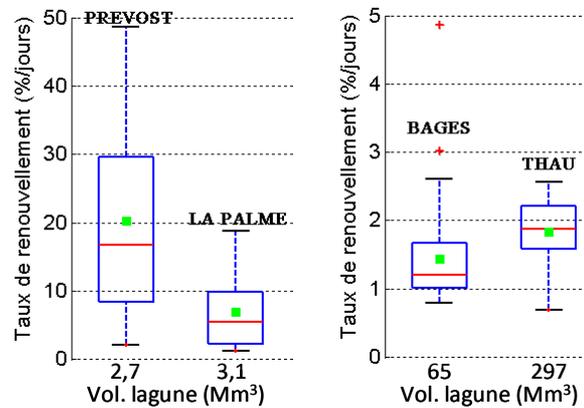


Figure 47 : Distributions temporelles en boîte à moustache des taux de renouvellement calculés à partir des mesures de débits dans les graus sur les étangs du Prévost, de la Palme et les étangs de Bages-Sigean et de Thau. Les échelles sont différentes pour améliorer la lisibilité des graphes.

La capacité du modèle hydrodynamique MARS-3D appliqué sur les étangs de Thau et de Bages-Sigean, à reproduire les échanges avec la mer a été vérifiée i) : dans le cadre du projet OMEGA-THAU (Fiandrino *et al.*, 2010) et ii) : dans le cadre de l'« Etude préalable de l'impact des différents scénarii d'aménagement et de gestion sur le fonctionnement écologique de l'étang de Bages-Sigean » (Cesmat *et al.*, 2011). Une première confrontation des résultats de simulation aux mesures réalisées dans le grau du Prévost dans le cadre de cette étude a permis de caler les échanges entre cette lagune et la mer au sein du modèle « PALAVASIENS-OR-CRAS ». Les taux de renouvellement simulés sur ces trois lagunes (Figure 48) sont en très bon accord avec les mesures (Figure 47).

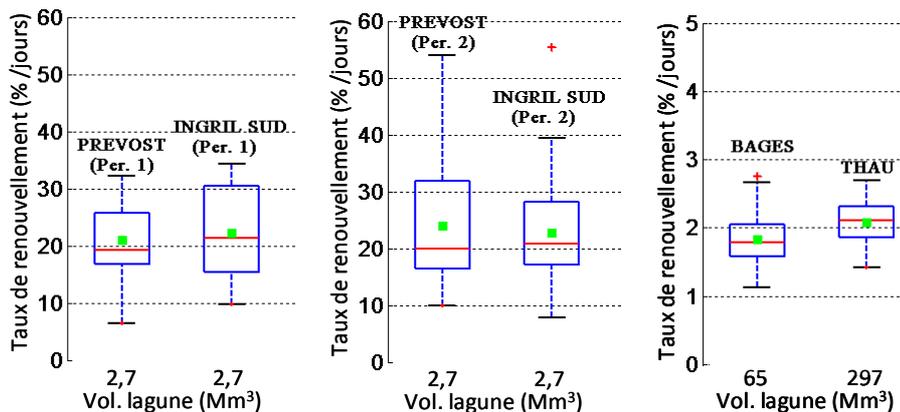


Figure 48 : Distributions temporelles en boîte à moustache des taux de renouvellement calculés à partir des résultats de simulation sur les étangs de Bages-Sigean, de Thau ainsi que du Prévost et de l'Ingril pour les périodes printemps-été (Per.1) et automne-hiver (Per.2). Les échelles sont différentes pour faciliter la lecture des graphes.

En revanche, les échanges dans les graus de l'Ingril (Figure 48) et de Carnon, au niveau des débouchés du Lez à Palavas et du canal du Rhône à Sète dans l'étang de Thau et en mer, ainsi

que les échanges dans l'ensemble des passes n'ont pu être confrontés à la réalité terrain faute de mesures disponibles.

6.2. Temps de résidence

Le taux de renouvellement, basé uniquement sur les volumes échangés avec la mer, ne renseigne pas sur la dynamique des masses d'eau à l'intérieur de la lagune et sur l'existence de zones mélangées et de zones confinées au sein même de la lagune.

La dynamique des substances dissoutes dans les eaux lagunaires et leur tendance à être exportées vers la mer ou stockées dans l'écosystème est la résultante des effets combinés du vent et des échanges avec la mer. Afin de caractériser cette dynamique, le temps de résidence prend en compte les processus de mélange et de transport des masses d'eau. Ce temps de résidence local, défini à l'échelle de la maille de la grille de calcul, peut être interprété comme le temps qu'une particule d'eau, localisée dans une maille donnée, passe dans la lagune avant de la quitter définitivement. Cet indicateur est calculé en moyenne sur la colonne d'eau. Dans des milieux peu profonds, tels que les lagunes languedociennes, où la masse d'eau est relativement bien mélangée sur la verticale, le temps de résidence des eaux dans les couches de surface et de fond est peu différent.

L'estimation du temps de résidence local fait apparaître des différences marquées au sein des différents écosystèmes. Dans l'étang de Thau (Figure 49 - en haut à gauche), la zone du Petit Etang proche du grau affiche les temps de résidence les plus faibles, 45 jours en moyenne ; les temps de résidence des eaux dans la Crique de l'Angle sont de l'ordre de 80 jours. En dehors de ces deux secteurs, le Grand Etang apparaît comme une zone relativement homogène où le temps de résidence des eaux est en moyenne de l'ordre de 110 jours.

De même, dans la lagune de Bages-Sigean (Figure 49 - en haut à droite), la présence de l'île de l'Aute au centre de l'étang joue le rôle d'une véritable frontière hydrologique : le temps de résidence des eaux dans les bassins situés au sud de cette île et en connexion avec la mer est, en moyenne sur tout le secteur, de 76 jours pour un volume d'environ 19 Mm³ alors qu'il est proche de 7 mois dans le bassin nord dont le volume est d'environ 47 Mm³. Dans le bassin de Bages, à l'extrême nord de la lagune le temps de résidence atteint 9 mois.

Sur le complexe des étangs Palavasiens et l'étang de l'Or (Figure 49 - en bas), les temps de résidence sont très variables selon les lagunes : inférieurs à 10 jours sur la lagune du Prévost, qui est en connexion directe avec la mer, et supérieurs à 90 jours (durée des simulations) sur l'étang de Vic et une partie de l'étang de Pierre-Blanche (qui sont les deux lagunes les plus éloignées des connexions avec la mer). L'étang de l'Ingril, également ouvert sur la mer à l'extrémité ouest de sa partie Sud, présente des temps de résidence variant de 20 jours dans les secteurs proches du grau à 50 jours dans les secteurs situés à l'extrémité est de sa partie sud et dans sa partie nord (en rive droite du canal du Rhône à Sète). Sur les étangs du Grec et du Méjean les temps de résidence sont relativement homogènes et similaires, de l'ordre du mois. Sur l'étang de l'Arnel, les temps de résidence varient de 20 à 60 jours : les valeurs minimales correspondant à la zone centrale qui est en connexion avec canal du Rhône à Sète et bénéficie vraisemblablement des entrées d'eaux marines dans le Prévost. L'étang de l'Or constitue une masse d'eau relativement homogène.

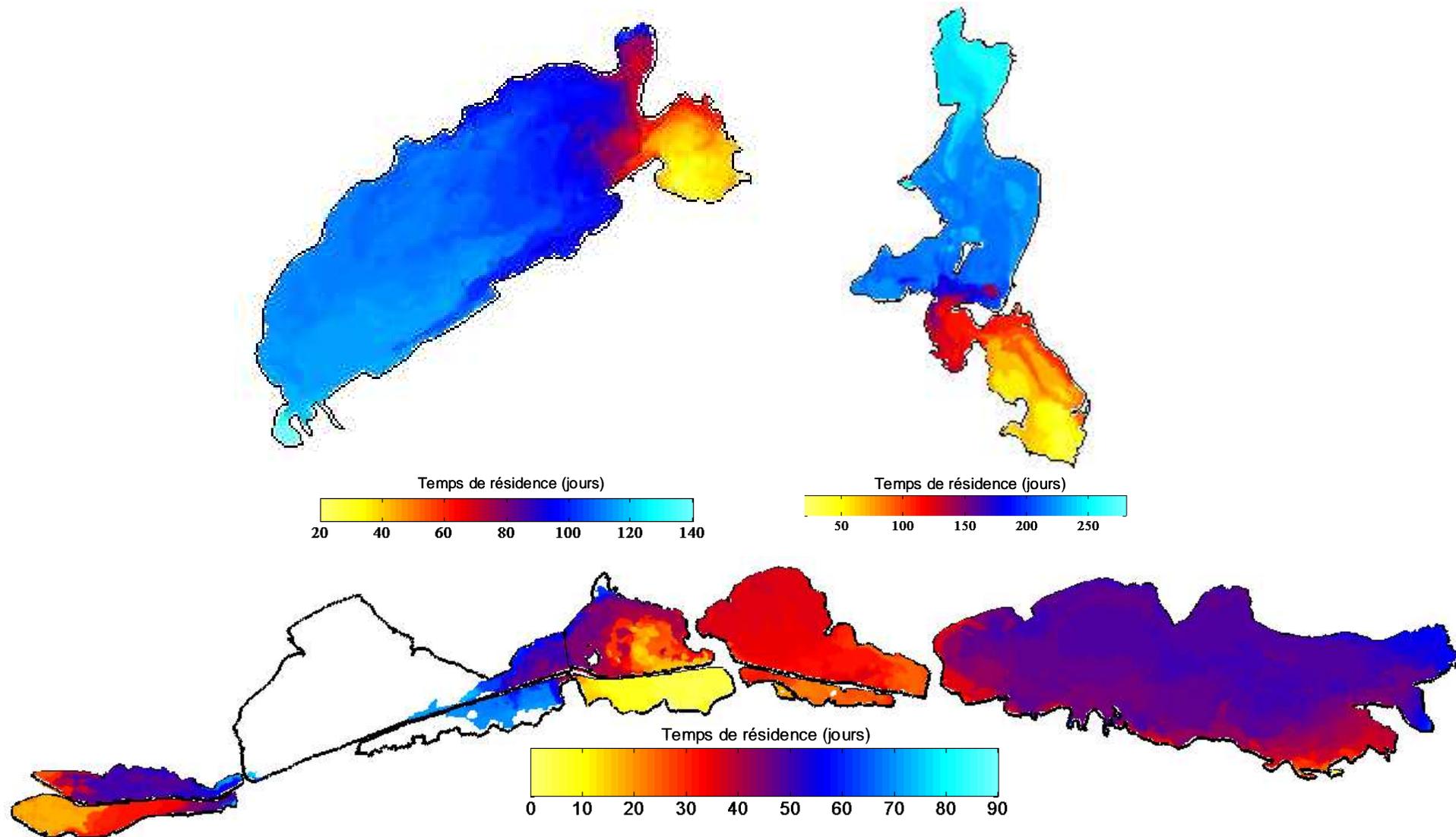


Figure 49 : Cartographie du temps de résidence simulés à l'aide du modèle MARS-3D sur les lagunes de Thau (en haut à gauche), Bages-Sigean (en haut à droite) et l'ensemble du complexe des étangs Palavasiens (en bas).

Ces résultats de simulations sur le complexe des étangs Palavasiens sont toutefois préliminaires dans la mesure où seuls les volumes entrants et sortants à travers le grau du Prévost ont pu être validés à partir des mesures réalisées dans cette étude. En règle générale, avant calage, le modèle hydrodynamique MARS-3D a tendance à sur-estimer les débits dans les graus (et probablement également dans toutes les passes). Les temps de résidence annoncés ici sont donc probablement sous-estimés.

Tableau 5 : Récapitulatif, des volumes (Mm^3), des temps de renouvellement et pour toutes les lagunes sur lesquelles le modèle MARS-3D est appliqué, des temps de résidence calculés en moyenne sur toute la lagune et par secteur de lagune pour Thau et Bages-Sigean. ND = Non Déterminé

| | Volume (Mm^3) | Temps de renouvellement moyen sur la lagune (j) | Temps de résidence moyen sur la lagune (j) |
|-----------------------|----------------------|--|---|
| La Palme | 1,1 | 12 | ND |
| Bages-Sigean | 65 | 91 | 150 |
| Bassin Sud | 18 | ND | 76 |
| Bassin Nord | 47 | ND | 210 |
| Thau | 296 | 50 | 100 |
| Petit Etang | 30 | ND | 45 |
| Grand Etang | 262,4 | ND | 110 |
| Crique de l'Angle | 3,6 | ND | 80 |
| Ingril Sud | 2,7 | 5 | 31 |
| Ingril Nord | 2,5 | ND | 47 |
| Pierre-Blanche | 2,8 | ND | ND |
| Vic | 18 | ND | ND |
| Prévost | 2,7 | 5 | 8,5 |
| Arnel | 5,3 | ND | 34 |
| Grec | 1,4 | ND | 26 |
| Méjean | 9,1 | ND | 32 |
| Or | 40 | ND | 47 |

Le tableau 5 regroupe les temps de renouvellement et le temps de résidence moyen calculé pour toutes les lagunes sur lesquelles le modèle MARS-3D est appliqué. A titre de comparaison, le temps de résidence des eaux dans le bassin d'Arcachon, simulé en condition hivernale (sans prendre en compte le débit des rivières) est de 58 jours (Plus *et al.*, 2006) pour un volume oscillant⁸ de $384 Mm^3$ correspondant à un coefficient de marée moyen (Coef. 70). Dans le bassin de Marennes Oléron, dont le volume oscillant est de $610 Mm^3$ pour un coefficient de marée moyen, le temps de résidence est de l'ordre d'une dizaine de jours (Stanisière *et al.*, 2006). Cette comparaison avec les systèmes « Atlantiques » confirme, si besoin était, que les milieux lagunaires sont des milieux fortement confinés.

Le temps de résidence renseigne sur l'**efficacité de mélange des eaux** dans la lagune. Cette efficacité est fonction de la sinuosité du contour qui va contraindre les cellules de circulation qui se mettent en place sous l'action des vents. Sur la lagune de Bages-Sigean, la localisation de ces cellules de recirculation est relativement stable, quelle que soit la direction du vent (Figure 50).

⁸ Volume oscillant correspond à la masse d'eau qui se déplace alternativement de l'amont vers l'aval du bassin sous l'action de la marée. Il est calculé comme la différence entre le volume maximal du bassin à pleine mer et le volume du bassin à basse mer.

A l'ouest de l'île de l'Aute, les cellules de recirculation entre les bassins nord et sud sont peu connectées et sont à l'origine du confinement important des bassins situés au nord de cette île.

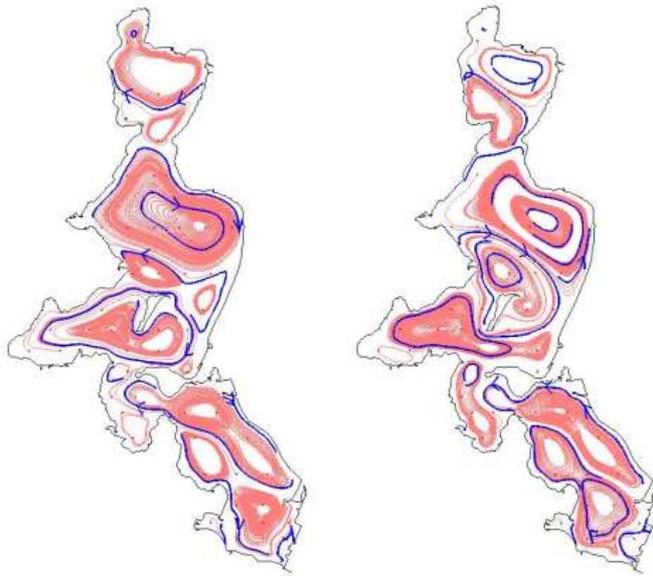


Figure 50 : lignes de courants moyens sur la verticale induites par des vents de secteur ouest (à gauche) et par des vents de secteur sud-est (à droite) dans la lagune de Bages-Sigean.

Sur l'étang de Thau, les cellules de recirculation induites par le vent sont beaucoup plus instables (Figure 51) en fonction du vent et font qu'aucun secteur dans le Grand Etang n'est aussi durablement isolé du reste de la lagune que ne l'est le bassin nord de la lagune de Bages-Sigean.

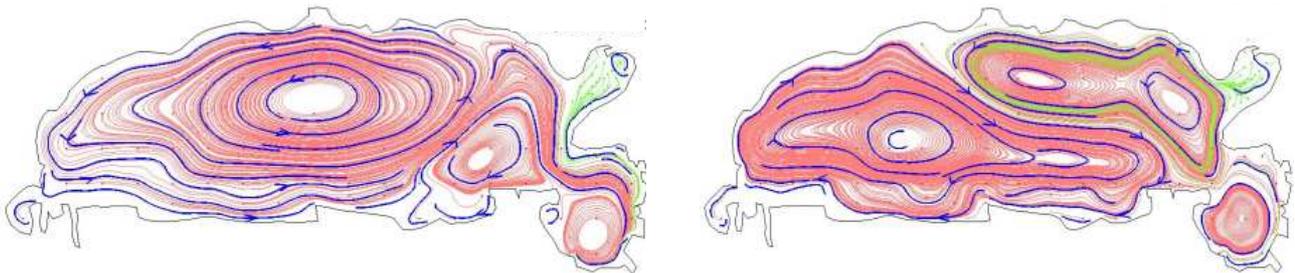


Figure 51 : lignes de courants moyens sur la verticale induites par des vents de secteur nord-ouest (à gauche) et par des vents de secteur sud-est (à droite) dans la lagune de Thau.

6.3. Confrontation du taux/temps de renouvellement et du temps de résidence

Le temps de résidence apporte donc une information quantitative sur les temps caractéristiques de la physique des écosystèmes qui est complémentaire à l'information, le plus souvent, qualitative fournie par le taux de renouvellement.

En effet, dans le cas de milieux confinés (tels que Bages-Sigean et Thau) les valeurs du taux de renouvellement (1,1% - soit 90 jours pour renouveler les 65 Mm³ de Bages-Sigean et 2% - soit 50 jours pour renouveler les 296 Mm³ de l'étang de Thau) ne sont pas fiables puisque

l'hypothèse qui sous-tend la définition du taux de renouvellement (milieux parfaitement mélangés) n'est pas vérifiée.

Ce même constat peut être fait sur l'étang de l'Ingril où le temps de renouvellement de 5 jours pour renouveler les 2,7 Mm³ de l'étang est bien plus faible que les 31 jours estimés par le temps de résidence. La forme allongée de la lagune et les étranglements successifs vers l'est font que des cellules de recirculation doivent exister entre les 3 bassins expliquant ainsi les différences de temps de résidence entre la partie ouest (en connexion avec la mer) et la partie est plus confinée.

En revanche, sur l'étang du Prévost, le temps de résidence (8 jours) et le temps de renouvellement (5 jours pour renouveler les 2,7 Mm³ de la lagune) sont du même ordre de grandeur. Il s'avère que l'étang du Prévost est un milieu bien mélangé et que dans ce cas, l'hypothèse sur laquelle est basé le calcul du taux de renouvellement est vérifiée. Sur un tel milieu, l'information qualitative contenue dans cet indicateur global est alors pertinente. De même, l'estimation du temps de résidence local (Figure 49) suggère que le Petit Etang dans l'étang de Thau et le Bassin Sud de l'étang de Bages-Sigean constituent, pour ces deux lagunes, les zones où les eaux marines et saumâtres se mélangent. Ce constat est confirmé par le fait que dans ces deux secteurs les temps de renouvellement sont du même ordre de grandeur que les temps de résidence (Tableau 5).

Ainsi, en l'absence de modèle hydrodynamique sur un site la représentativité du taux de renouvellement pourra être précisée, à dire d'expert, en fonction de la bathymétrie et de la sinuosité du contour de la lagune et des données de salinité en différentes stations de mesures (leur nombre et localisation dépendant de la morphologie de la lagune).

La valeur du taux de renouvellement sur l'étang de La Palme (8%, soit 12 jours pour renouveler les 3,1 Mm³), prévoit que cette lagune est confinée. Toutefois les étranglements successifs en aval et en amont du bassin Centre suggèrent que le temps de résidence dans les bassins situés en amont du pont SNCF est vraisemblablement plus long que les 12 jours estimés par le taux de renouvellement. L'hypothèse que nous pouvons faire ici est que ce temps de renouvellement est vraisemblablement représentatif du secteur de l'étang compris entre le pont SNCF et l'étranglement qui délimite la frontière entre le bassin Sud et le Bassin Centre (Figure 9). Les secteurs de l'étang situés au nord de cette frontière (Bassins Centre et Nord-Ouest) peuvent être considérés comme confinés.

6.4. Impact potentiel des facteurs physiques sur la structure et la composition des peuplements biologiques ?

Ces descripteurs hydrodynamiques fournissent des échelles de temps caractéristiques de la physique des écosystèmes. Or, la DCE impose d'aller plus loin et de caractériser l'impact potentiel de ces facteurs physiques sur la composition des peuplements biologiques.

6.4.1. Confinement

La notion de confinement introduite par Guélorget et Perthuisot (1983) rend compte, d'un point de vue qualitatif, du lien existant entre les caractéristiques hydromorphologiques d'un écosystème et la composition des peuplements biologiques qui s'y développent. Ces auteurs

font en effet le constat que, dans les milieux paraliques⁹, il existe une zonation biologique qui s'organise schématiquement selon la distance à la mer. Sans fournir une définition exacte ni une méthode pour le quantifier, ces auteurs introduisent la notion de confinement (par rapport à la mer) comme la « grandeur » responsable de cette zonation biologique. Par suite, bien que le confinement dépende principalement des caractéristiques morphologiques et hydrodynamiques du milieu, les indicateurs proposés par de nombreux auteurs pour caractériser le confinement sont des indicateurs biologiques (voir référence dans Frénod et Goubert, 2007). Récemment, Frénod et Goubert (2007), puis Frénod et Rousseau (2011) ont proposé une définition du confinement, afin de l'estimer numériquement, dans le cas de milieux dont la dynamique des échanges avec la mer n'est forcée que par la marée et l'évaporation :

- Le confinement instantané en chaque point de la lagune et à chaque instant est le temps que les eaux ont passé dans la lagune avant d'être en ce point donné à cet instant donné. La valeur moyenne du confinement instantané sur une période de marée donne accès au confinement effectif.

Ceci étant, tel que défini par ces auteurs, le confinement que l'on peut estimer à l'aide de modèle hydrodynamique n'intègre pas plus l'impact sur la biologie que le temps de renouvellement ou le temps de résidence.

6.4.2. Mélange

Un indicateur « spatio-temporel » pourrait être défini en s'appuyant à la fois sur les notions de temps de renouvellement et de « **Volume de mélange** » introduites par (Gordon *et al.*, 1996) dans le modèle LOICZ de bilan de matière: Cette variable conceptuelle correspond au volume d'eau qui oscille entre la mer et la lagune, en admettant que ce volume entre dans la lagune sous forme d'eau de mer, se mélange parfaitement avec un volume équivalent d'eaux de la lagune, pour ressortir sous forme d'eaux saumâtres. Au préalable à la quantification du volume de mélange sur les différentes lagunes, il convient d'en fixer clairement la définition.

Une première définition du « **Volume de mélange** », basée sur la notion de « milieu parfaitement mélangé » pourrait être : « *le volume du secteur de la lagune dans lequel se disperse un volume d'eaux marines (V_{mer}) entrant par le grau et tel que V_{mer} est égal au volume total de la lagune* ». Dans ce cas, si l'hypothèse de volume parfaitement et immédiatement mélangé qui sous-tend la définition du temps de renouvellement est vérifiée, le « Volume de mélange » serait égal au volume total de la lagune. Dans le cas contraire le temps de renouvellement pourrait être corrigé en précisant que, durant ce laps de temps, ce n'est pas le volume total de la lagune qui a été renouvelé mais seulement un pourcentage α de ce volume (avec $\alpha = \text{Vol. mélange} / \text{Vol. lagune}$).

Une seconde définition, basée sur l'hypothèse de volume constant peut également être proposée : « *le volume du secteur de la lagune dans lequel se disperse un volume d'eaux marines entrant par le grau sur une période dont la durée (ΔT) est contrainte par le fait que, durant cette période, les volumes entrants dans la lagune et sortants par le grau sont égaux $\Delta T = \Delta T^{\text{Ent-Sort}}$ (cf. § 3.3.1)* ». $\Delta T^{\text{Ent-Sort}}$ peut alors être considéré comme le temps de résidence des eaux lagunaires dans le volume de mélange. Différents couples de valeurs (Volume de

⁹ **Paralique** : (du grec *para* « à côté de » et *halos* « le sel » et par extension la mer) qualifie un écosystème aquatique littoral qui est en contact avec la mer par une communication étroite. C'est un système de transition entre le milieu marin et le milieu continental (Castaings, 2008).

mélange, $\Delta T^{\text{Ent-Sort}}$) seront obtenus pour différentes conditions météorologiques et l'efficacité du mélange pourra donc être caractérisée en fonction de conditions hydro-climatiques types.

Dans cette zone de mélange, le temps de résidence des eaux et des substances dissoutes qu'elle transporte sera généralement inférieur au temps caractéristique des processus biologiques. Ainsi, une fraction des nutriments présents dans cette zone sera exportée à l'extérieur de la lagune avant d'avoir pu être assimilée par les producteurs primaires. A l'inverse, les autres secteurs de la lagune seront considérés comme des **secteurs confinés** (par rapport à la mer) dans lesquels l'assimilation des nutriments se fera « efficacement » (càd avant leur exportation à l'extérieur des secteurs confinés par les processus physiques).

7. Conclusion et perspectives

Cette étude a permis de proposer un protocole d'acquisition et de traitement des données de hauteur d'eau et de salinité afin d'estimer les débits instantanés dans un grau ou à travers une passe qui limite les échanges entre deux parties d'étang (tel que le pont SNCF dans l'étang de La Palme). La méthode proposée, basée sur la formulation de Manning-Strickler développée en hydraulique à surface libre pour estimer les débits des cours d'eau en régime permanent, a été fiabilisée et ses limites d'application ont été fixées. Lorsque les forçages qui gouvernent les échanges sont barotropes (marée, variation de la pression atmosphérique) la méthode est opérationnelle. En complément des échanges avec la mer, la différence entre les volumes journaliers entrants et sortants donne accès, sur plusieurs mois, aux quantités d'eaux « continentales » apportées par le bassin versant.

Lorsque les forçages sont baroclines (prédominance du vent), l'hypothèse sur laquelle se base de la méthode n'est plus vérifiée et celle-ci n'est donc plus applicable. Cette situation a été observée sur l'étang de La Palme au printemps puis en été avant que le grau ne se ferme. Un critère, qui s'appuie sur la forte corrélation qui existe entre la salinité et le sens des débits dans la passe, permet de discriminer les périodes sur lesquelles la méthode est applicable et les périodes sur lesquelles elle ne l'est plus. A noter que les échanges induits par le vent sont peu importants (comparativement aux échanges induits par des forçages barotropes) et durant ces périodes, on peut considérer qu'ils sont négligeables.

Des préconisations peuvent être émises quant à l'acquisition de données nécessaires à l'application de la méthode Manning-Strickler sur une lagune :

- en complément des mesures de hauteur d'eau, indispensables à l'application de la méthode, il est fortement conseillé de mesurer simultanément la salinité. Ce paramètre rend compte du mélange des masses d'eau et apporte une information qualitative qui peut permettre de fixer les limites de validité de la méthode. De même, la mesure de la température est également recommandée. Ce paramètre, bien que non utile ici, est facile à acquérir et permet, lorsqu'il est associé à la salinité, de qualifier les conditions hydrologiques de la période échantillonnée (année sèche/année humide, année froide/année chaude...),
- la durée de la période échantillonnée doit être suffisamment longue pour rendre compte des conditions hydro-climatiques caractéristiques du site étudié. Un échantillonnage sur une année hydrologique complète à une fréquence de 10 minutes est recommandé.
- la localisation et le nombre de stations de mesures à l'intérieur de la lagune dépendent de sa topographie. En complément de la station localisée dans le bassin en connexion avec la mer, il peut être nécessaire de positionner une station supplémentaire dans le bassin le plus éloigné du grau i) : lorsque la lagune est constituée de plusieurs bassins ; ii) : lorsque le vent est susceptible d'engendrer des basculements du plan d'eau du même ordre de grandeur que les différences de hauteur d'eau de part et d'autre du grau.
- les sondes utilisées pour mesurer la hauteur d'eau (capteurs de pression) aux différentes stations doivent avoir une précision suffisante et de préférence être identiques. Dans le cas où les appareils de mesure de hauteur d'eau sont différents, il est vivement conseillé de réaliser une campagne d'inter-calibration (positionner les sondes au même endroit durant quelques jours) afin de vérifier la cohérence des mesures acquises par les différents appareils.

A partir des débits instantanés, le taux de renouvellement a été estimé sur les lagunes de Thau, Bages-Sigean, le Prévost et La Palme. Ce taux mesure le pourcentage d'eaux marines (normalisé par le volume total de la lagune) qui entre journalièrement dans la lagune et se

mélange aux eaux saumâtres. Cet indicateur global fournit une première « classification » des écosystèmes basée sur **leur ouverture à la mer**. Avec le taux de renouvellement journalier le plus élevé ($TR_{PREVOST}=20\%$), l'étang du Prévost apparaît comme un écosystème bien ouvert sur la mer. A l'opposé, l'étang de Bages-Sigean se révèle être la lagune la plus confinée ($TR_{BAGES-SIGEAN} = 1,1\%$). Son taux de renouvellement est proche de celui de l'étang de Thau ($TR_{THAU} = 2\%$) alors qu'il existe un facteur 0,2 entre les volumes de ces deux étangs. L'étang de La Palme apparaît également comme une lagune confinée ($TR_{LAPALME}=8\%$). Ce confinement présente cependant une variabilité saisonnière puisqu'en période hivernale le taux de renouvellement journalier peut atteindre 20 %.

Cette forte variabilité du taux de renouvellement nécessitera de définir un **taux de renouvellement « caractéristique »** des conditions environnementales rencontrées sur chaque lagune. Les valeurs du taux de renouvellement pourraient, par exemple, être pondérées par un coefficient fonction de la fréquence d'apparition des conditions météorologiques/hydrologiques associées. Ceci nécessiterait donc de définir, pour chaque lagune, des typologies de conditions environnementales.

En complément de cet indicateur global, le temps de résidence a été calculé pour les lagunes sur lesquelles le modèle hydrodynamique MARS-3D est appliqué (Thau, Bages-Sigean, l'ensemble du complexe des étangs Palavasiens et l'étang de l'Or). Le temps de résidence, calculé en chaque maille de la grille de calcul du modèle, renseigne sur **l'efficacité de mélange des eaux** dans la lagune et sur l'existence de zones mélangées et de zones confinées au sein même de la lagune. Cette efficacité est fonction de la sinuosité du contour qui va contraindre les cellules de circulation qui se mettent en place sous l'action des vents.

Cet indicateur doit être défini à l'aide d'un modèle hydrodynamique. Toutefois, les travaux menés dans le cadre de cette étude sur l'étang de la Palme montrent que, en l'absence de modèle disponible sur un site, la cohérence entre le temps de résidence et le temps de renouvellement peut être précisée, à dire d'expert, en fonction de la bathymétrie et de la sinuosité du contour de la lagune et des données de salinité.

Les temps de renouvellement et de résidence fournissent des échelles de temps caractéristiques de la physique des écosystèmes. Afin de calculer un indicateur hydrodynamique « spatial » voire « spatio-temporel », les descripteurs couplés (**Volume de mélange, $\Delta T^{Ent-Sort}$**) ont été introduits. Dans le cas où le volume de mélange ne représente qu'une partie de la lagune, les secteurs restant peuvent alors être considérés comme des secteurs confinés (par rapport à la mer). Dans ces secteurs confinés, l'assimilation des nutriments par les producteurs primaires sera plus efficace que dans les zones de mélange où une partie des nutriments sera exportée vers l'extérieur avant d'être assimilée. Les quantités d'azote et de phosphore que l'écosystème sera susceptible d'exporter dépendront donc de la répartition des charges en azote et phosphore au sein de ces deux secteurs distincts.

Le volume de mélange doit être défini à l'aide d'un modèle hydrodynamique. Une démarche similaire à celle appliquée dans cette étude pourrait être mise œuvre afin de faire le lien entre ces descripteurs qui nécessitent l'utilisation de modèles et les grandeurs mesurables *in situ* (volumes journaliers entrants et sortants de la lagune). Par suite, en l'absence de modèle disponible sur un site, les couples de descripteurs (Volume de mélange, $\Delta T^{Ent-Sort}$) pourraient être définis, pour différentes conditions hydro-climatiques, à partir du taux de renouvellement, de la bathymétrie et de la sinuosité du contour de la lagune et des données de salinité en différentes stations de mesures (leur nombre et localisation dépendant de la morphologie de la lagune).

En complément des travaux réalisés dans le cadre des projets RESTOLAG et RSL-LOICZ, les connaissances acquises dans la présente étude nous ont permis de poser les hypothèses de

travail des études à venir à savoir que : les indicateurs hydrodynamiques permettent, en première approche et sans nécessiter la mise en œuvre de modèles complexes couplés hydrodynamique-biogéochimie, d'améliorer la prise en compte des processus physiques au sein de modèles de bilan de matière (basés sur la méthodologie LOICZ) i) : en précisant la délimitation de **zones homogènes** au sein de l'écosystème (zone mélangée et zone confinée décrites par des « boîtes » dans le modèle LOICZ) et ii) : en affinant la paramétrisation des phénomènes de mélange entre la mer et la zone mélangée d'une part et entre les zones mélangée et confinée d'autre part (notion de « volume de mélange » dans la méthodologie LOICZ).

8. Références bibliographiques

Burtchaell O., 2000. Les variations du niveau de l'étang de Thau- Etude des phénomènes de surcôtes-décôtes au sein d'un milieu lagunaire méditerranéen. Mémoire de maîtrise en Géographie, Université Paris1. 188p.

CPER, 1997. Etude des impacts du projet d'enlèvement des ouvrages du barrage à vannes. BRL pour la commune de Port-La-Nouvelle, Programme Life, 84 p + Annexes.

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.

Di Lorenzo J.L., 1988. The overtide and filtering response of small inlet/bay systems. Lecture Notes and Coastal and Estuarine Studies 29 : 24-53.

Foreman M. G. 1977. Manual for tidal heights analysis and prediction. Pacific Marine Science Report 77-10. Institute of Ocean Sciences, Patricia Bay, Sidney C.-B., 58 pp.

Frénod E., Goubert E., 2007. A first step towards modelling confinement of paralic ecosystems. Ecol. Model. 200, 139-148.

Frénod E., Rousseau A., 2011. Confinement – models and simulations.

Gordon et al., 1996. LOICZ Biogeochemical Modelling Guidelines. LOICZ Reports and Studies n°5.

Guélorget O., Perthuisot J.P., 1983. Le domaine paralique. Expression géologiques biologiques et économiques du confinement. Presse de l'Ecole Normale Supérieure 16-1983, 45 rue d'Ulm, Paris, 136 p.

Lazure P., 2000. Mesures marégraphiques dans l'étang de Diane. Présentation des résultats. 11p.

Lazure P., 1992. Etude de la dynamique de l'étang de Thau par modèle numérique tridimensionnel. Vie et Milieu 42: 137-145.

Lazure P., Dumas F., 2008. An external-internal mode coupling for a 3D hydrodynamical model for applications at regional scale (MARS). Advances in Water Resources 31 :233-250.

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.

Moine S.,1995. Etang de Thau ; Contribution à la connaissance des apports du bassin versant et à la compréhension des échanges mer-étang par le grau de Sète. DEA National d'Hydrologie, Université de Montpellier II, 77p.

Plus M., Maurer D., Stanisière J.Y., Dumas F., 2006. Caractérisation des composantes d'une lagune mésotidale, le bassin d'Arcachon. Rapport Scientifique et Technique RST/LER/AR/06.007. 54 p. Contribution au Chantier Littoral Atlantique du PNEC.

Rantz S.E., 1982. Measurement and Computation of Streamflow. *In* USGS, Washington, USA, volume 1, 313p.

Région Languedoc-Roussillon., 2000. Guide méthodologique de gestion des lagunes méditerranéennes- Tome 1 : Les eaux. Document pour le programme européen Life,1, 190 p.

Stanisière J.Y., Dumas F., Plus M., Maurer D., Robert S., 2006. Caractérisation des composantes hydrodynamiques d'un système côtier semi-fermé, le bassin de Marennes-

Oléron. DOP/LER.LER/PC/06.1059. 112 p. Contribution au Chantier Littoral Atlantique du PNEC.

Wilke M., Boutière H., Müller M., 2000. Etude de faisabilité d'interventions légères susceptibles d'améliorer la circulation des eaux à l'intérieur de la lagune de La Palme (Aude) et de freiner la sédimentation naturelle. Rapport d'étude de la première partie : Les mouvements d'eau. 63 p.

ANNEXES

ANNEXE I : Mouvement d'oscillation d'un plan d'eau sous l'action du vent : phénomène de seiche

Une seiche est une oscillation libre de l'eau, dans un bassin fermé ou semi fermé, correspondant à sa période naturelle. Les seiches sont souvent observées dans les ports, les lacs, les baies et dans presque tout bassin distinct de taille moyenne. Elles peuvent être causées par le passage d'un système de pression au-dessus du bassin ou par la formation et la disparition subséquente d'une dénivellation due au vent dans le bassin.

Après le déclenchement du phénomène, la surface libre oscille jusqu'à l'amortissement par frottement. La période de résonance T d'un bassin fermé est de la forme :

$$T = \frac{L}{n \sqrt{gd}}$$

Avec :

- L : longueur du bassin,
- d : profondeur du bassin
- g : gravité terrestre = $9,81 \text{ m.s}^{-1}$
- n : nombre de nœuds de l'oscillation (Figure AI. 1)

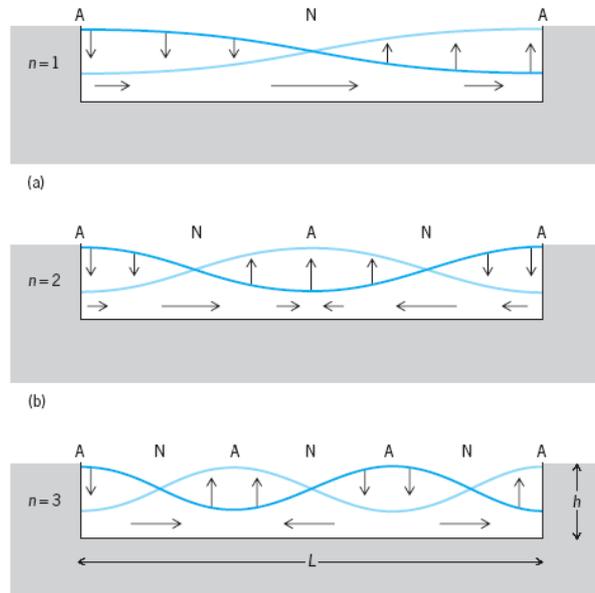


Figure AI. 1 : Représentation des oscillations en bassin fermé

A partir de cette théorie il est possible de calculer la période propre de résonance du Golfe du Lion en faisant l'hypothèse simplificatrice que le Golfe du Lion peut être considéré comme un bassin rectangulaire fermé ayant une longueur de 150 000 m, une largeur de 70 000 m et une profondeur moyenne de 90 m (Figure AI. 2).

Le Tableau AI. 1 résume les valeurs des périodes de résonance du Golfe du Lion suivant ses deux axes principaux.

Tableau AI. 1 : Périodes de résonance du Golfe du Lion suivant ses deux axes principaux

| Nombre de nœud n | Axe Est-Ouest | Axe Nord-sud |
|--------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| | Période de résonance du Golfe du Lion | Période de résonance du Golfe du Lion |
| 1 | 3h | 40 min |
| 2 | 1h30 | 20 min |
| 3 | 1h | 13 min |



Figure AI. 2 : Golfe du Lion – Schématisation des axes d'établissement d'oscillations

ANNEXE II : Techniques et matériels de mesure des différents paramètres hydrodynamiques et hydrologiques

A.II.1 Profils de courant dans les graus

Les mesures de profils de courant dans le grau du Prévost et sous le Pont SNCF dan l'étang de La Palme ont été réalisées par l'entreprise IXSurvey avec un courantomètre Aquadopp Profileur 2 MHz de chez Nortek (Figure AII. 1).

L'utilisation de cet appareil permet de définir des couches de mesures fines suivant la verticale et donc de décrire le profil du courant avec une résolution fine (25 cm). Cette résolution permet de mesurer les courants plus près du fond et de la surface (20 cm). L'Aquadopp Profileur comprend :

- trois transducteurs acoustiques disposés à 120° les uns des autres et inclinés de 25° par rapport à la verticale
- un compas magnétique et deux inclinomètres
- un capteur de pression
- des batteries
- un ensemble de cartes électroniques
- une liaison série RS232 pour la programmation et la récupération des données.



| | Aquadopp Profileur 2 Mhz |
|---------------------------------------|-----------------------------|
| Poids (kg) | 2,4 |
| Longueur (cm) | 55 |
| Diamètre (cm) | 7,5 |
| Portée max. (m) | 4 - 10 |
| Taille des cellules (m) | 0,1 - 2 |
| Zone blanche max. (m) | 0,05 |
| Immersion max. (mm) | 300 |
| Résolution des vitesses (mm/s) | 1 |
| Résolution des direction (°) | 0,1 |
| Nombre de couche max | 128 |

Figure AII. 1 : Aquadopp profiler de chez Nortek et ses caractéristiques techniques.

L'Aquadopp Profileur est totalement autonome, il est programmé avant la mise à l'eau puis exécute automatiquement les mesures et stocke les données dans un datalogger. A l'issue des mesures les données sont extraites du datalogger avec un PC par une liaison RS232.

Rappel sur la technologie Doppler

Le fonctionnement de l'Aquadopp Profileur est basé sur le **principe Doppler** (changement de la fréquence lié à la vitesse d'un émetteur ou d'un récepteur) appliqué sur les particules présentes dans l'eau. Une impulsion acoustique est envoyée dans l'eau, cette impulsion est réfléchiée par les particules présentes dans l'eau (particules type MES ou plancton qui n'ont pas de mouvements propres et qui se déplacent donc à la même vitesse que le courant), et

revient vers le capteur avec une fréquence différente. La différence de fréquence entre l'onde émise et l'onde reçue est directement liée à la vitesse de la particule par la relation :

$$\Delta F = 2F (V / C)$$

où F la fréquence de l'impulsion émise par le capteur, ΔF le décalage en fréquence, C la vitesse du son dans l'eau (autour de 1525 m/s) et V est la vitesse de la particule (donc du courant).

Plus l'eau est turbide (donc chargée en particules), plus il y a d'informations réfléchies vers le capteur et meilleurs sont les résultats.

Principe de la mesure du courant (vitesse et direction)

La vitesse du courant est déterminée à partir de la différence de fréquence induite par la vitesse des particules en suspension dans l'eau.

La direction du courant est obtenue grâce à l'utilisation simultanée des 3 transducteurs du courantomètre, ces 3 transducteurs étant orientés différemment, ceux-ci permettent de calculer la direction en fonction des informations de vitesses fournies par chacun des transducteurs.

L'Aquadopp Profiler est un courantomètre profileur, c'est-à-dire qu'il fournit des mesures de vitesses et de directions de courant sur toute la hauteur d'eau. La colonne d'eau est découpée en couches uniformes, et sur chaque couche la direction et la valeur moyennée de la vitesse sont déterminées (Figure AII. 2).

La mesure dans les différentes couches est obtenue en appliquant un retard temporel entre l'instant d'émission et celui de réception. L'épaisseur d'une couche est liée au temps d'analyse.

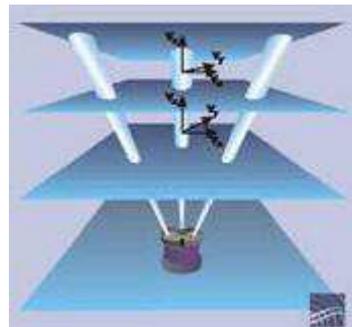


Figure AII. 2 : Illustration de la mesure du courant couche par couche

A.II.2 Calcul des débits dans le grau à partir des mesures de courant

Les débits sont calculés en considérant que la vitesse du courant est homogène sur toute la largeur du grau. Les débits sont obtenus pour chacune des couches en multipliant la vitesse projetée par la section, la section du grau étant mesurée au préalable.

A.II.3 Mesures des hauteurs d'eau, de la température et salinité

Des sondes SBE37 ont été utilisées pour mesurer les hauteurs d'eau, la salinité et la température (Figure AII. 3).



Figure AII. 3 : Sonde SBE37 munie d'un capteur de pression, de salinité et température.

Ces sondes en titane sont totalement autonomes, elles sont programmées avant leur mise à l'eau puis exécutent automatiquement les mesures et stockent les données dans leur mémoire interne.

A l'issue des mesures les données sont téléchargées sur un PC.

La précision sur la mesure de pression est de 0.01% de la hauteur d'eau, la précision sur la mesure de la conductivité est de 0.003 mS/cm, la précision sur la mesure de la température est de 0.002°C.

ANNEXE III : Evolution des hauteurs d'eau aux points P1-Mer et P2-Etang du Prévost entre le 2 juin le 6 décembre 2010

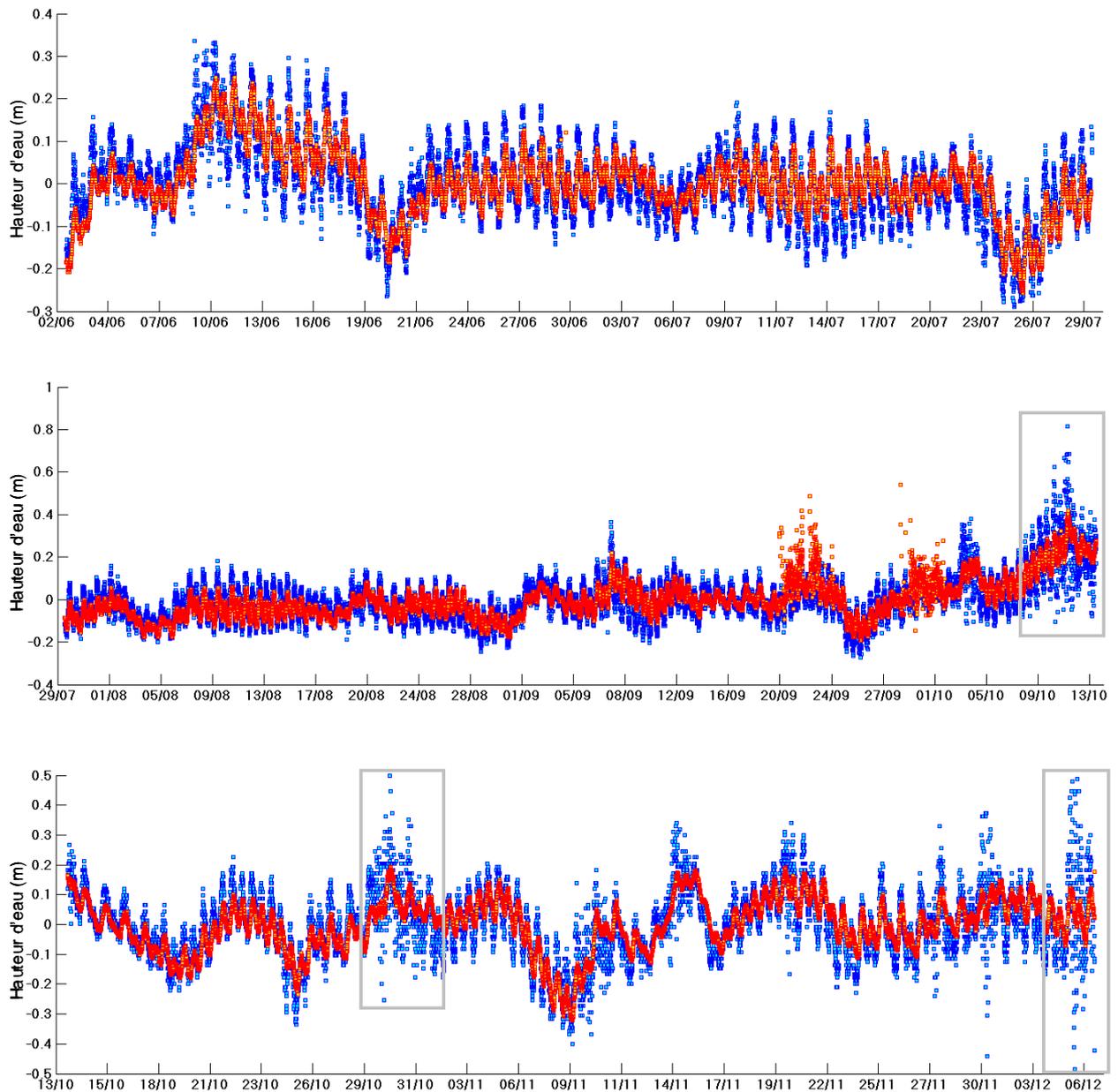
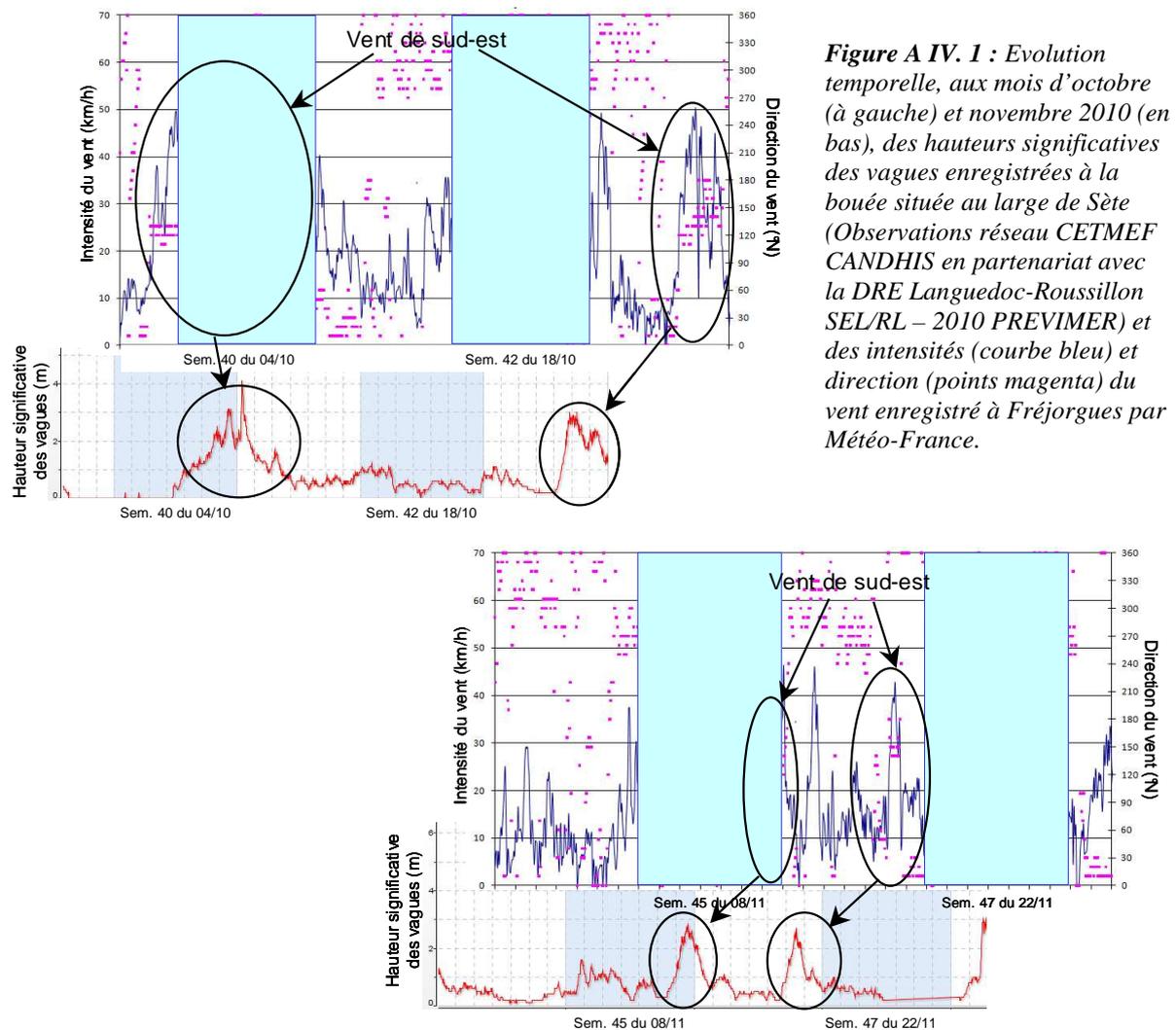


Figure AIII. 1 : Evolution temporelle des hauteurs d'eau aux points P1-Mer (en bleu) et P2-Etang du Prévost (en rouge) entre le 2 juin et le 6 décembre 2010. Les variations sont centrées autour de la valeur moyenne de la hauteur calculée sur chaque sous-période échantillonnée. La fréquence d'échantillonnage est de 10 mn.

ANNEXE IV : Evolution temporelle des intensités et direction du vent mesuré à la station météo-France de Fréjorgues



ANNEXE V : Comparaison des volumes journaliers nets échangés entre la lagune du Prévost et la Méditerranée lors des cinq campagnes d'échantillonnage des débits dans le grau.

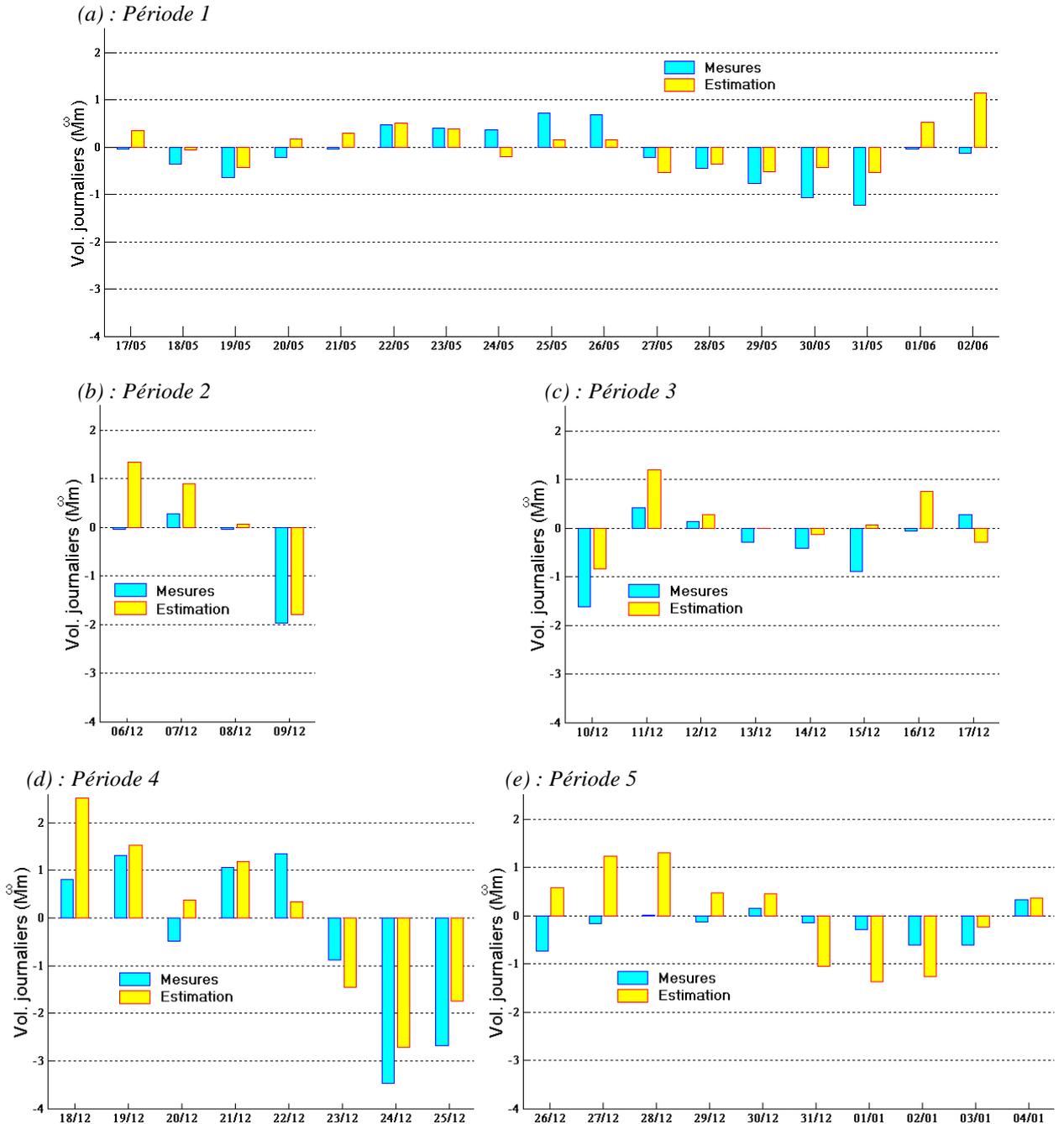


Figure A.V. 1 : Comparaison mesures (cyan) – estimation (jaune) des volumes journaliers nets échangés entre la mer et la lagune du Prévost lors des cinq sous-périodes échantillonnées au printemps et en hiver.

ANNEXE VI : Evolution des hauteurs d'eau et des salinités aux points P1-Sud et P2-Nord enregistrées dans l'étang de La Palme entre le 14 octobre 2010 et le 6 juin 2011.

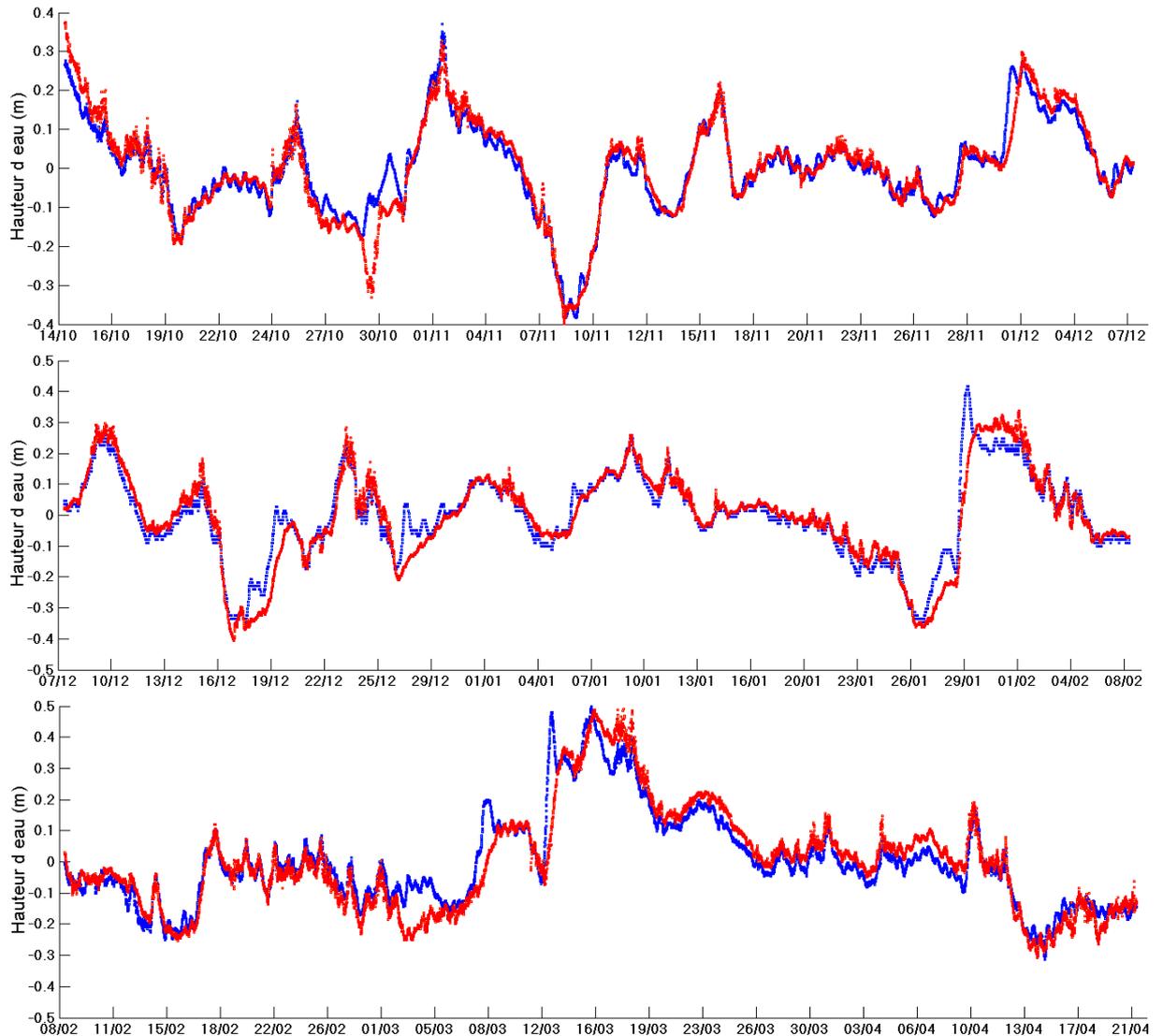


Figure A.VI. 1 : Evolution temporelle des hauteurs d'eau aux points P1-Sud (en bleu) et P2-Nord dans l'étang de La Palme (en rouge) enregistrées entre le 14/10/2010 et le 21/04/2011. Les variations sont centrées autour de la valeur moyenne de la hauteur calculée sur chaque sous-période échantillonnée. La fréquence d'échantillonnage est de 10 mn.

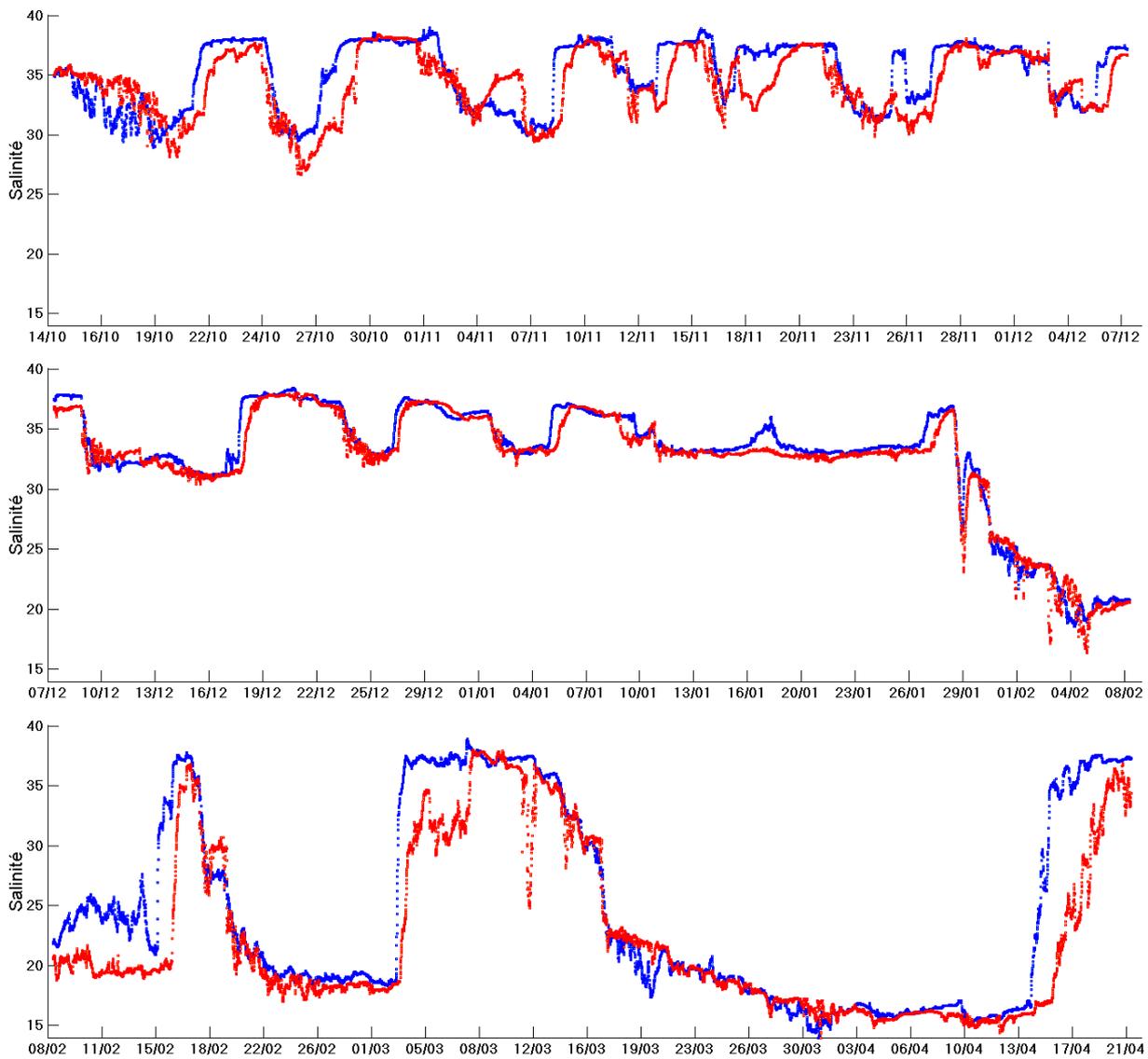


Figure A.VI. 2 : Evolution temporelle de la salinité aux points P1-Sud (en bleu) et P2-Nord (en rouge) dans l'étang de La Palme entre le 14/10/2010 et le 21/04/2011. La fréquence d'échantillonnage est de 10 mn.

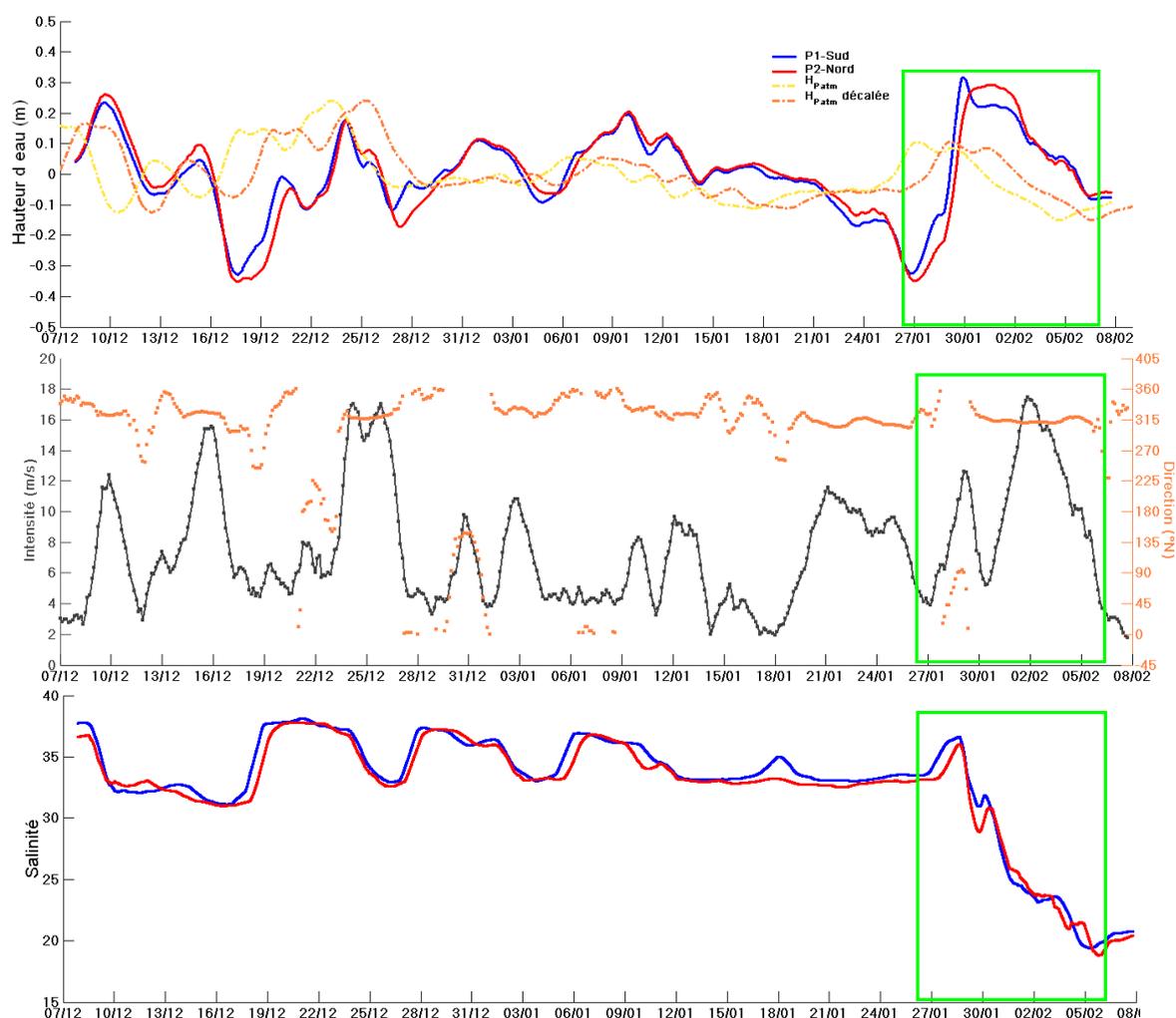


Figure A.VI. 3 : Evolution temporelle des hauteurs d'eau (en haut) et des salinités (en bas) enregistrées aux points P1-Sud (en bleu) et P2-Nord (en rouge) dans l'étang de La Palme durant la période HQ 1. La courbe en pointillés jaunes correspond à la hauteur d'eau théorique calculée à partir de la loi du baromètre inversé. La courbe en pointillés rouges est décalée de 2 jours par rapport à ce signal théorique. (au centre) : Evolution temporelle des vents (intensités et directions) enregistrés à la station Météo-France de Leucate. Ces trois séries sont lissées sur la journée. Les rectangles verts encadrent les conditions rencontrées suite à l'évènement pluvieux de la fin janvier 2011.

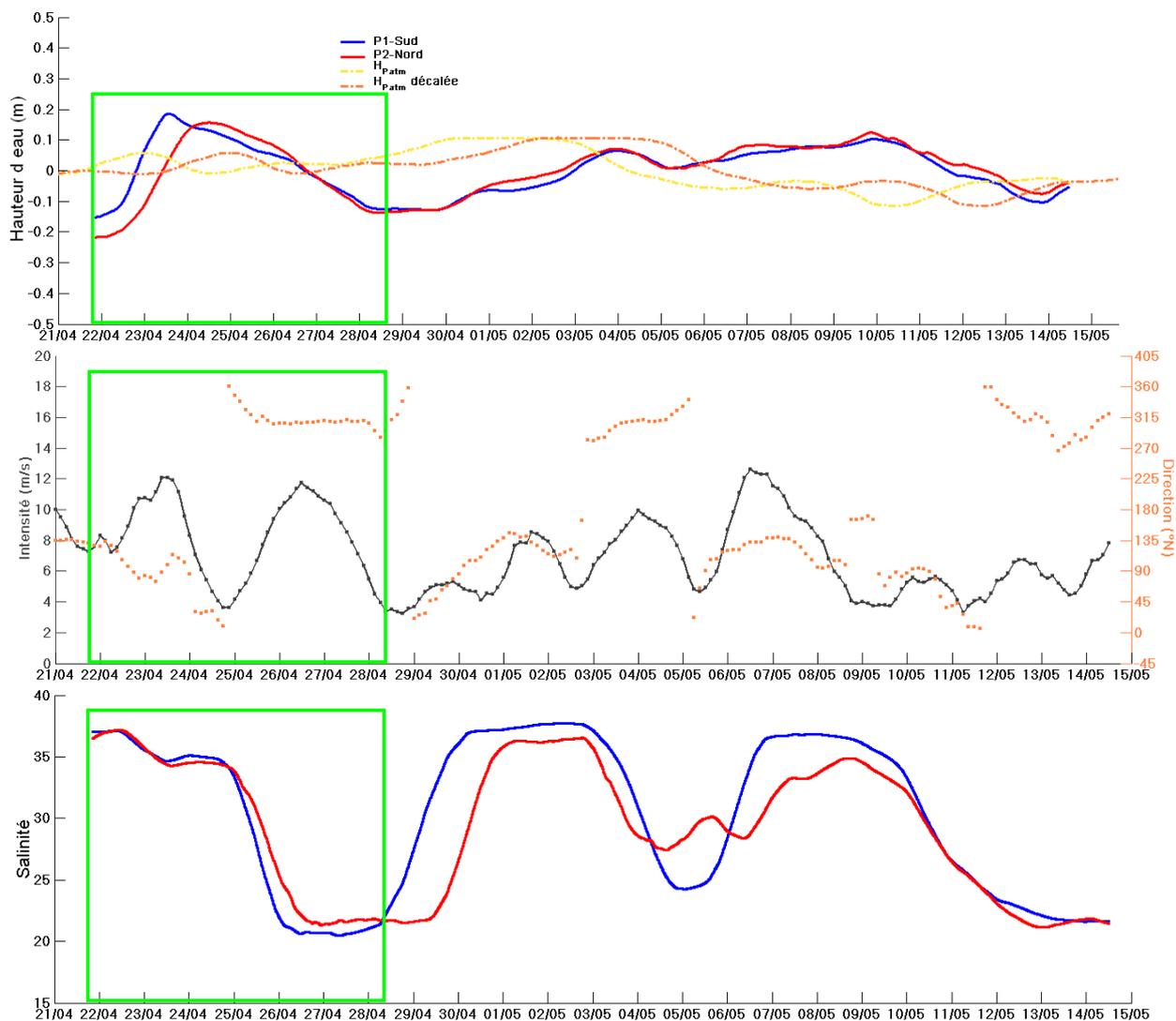


Figure A.VI. 4 : Evolution temporelle des hauteurs d'eau (en haut) et des salinités (en bas) enregistrées aux points P1-Sud (en bleu) et P2-Nord (en rouge) dans l'étang de La Palme durant la période HQ 2. La courbe en pointillés jaunes correspond à la hauteur d'eau théorique calculée à partir de la loi du baromètre inversé. La courbe en pointillés rouges est décalée de 2 jours par rapport à ce signal théorique. (au centre) : Evolution temporelle des vents (intensités et directions) enregistrés à la station Météo-France de Leucate. Ces trois séries sont lissées sur la journée.

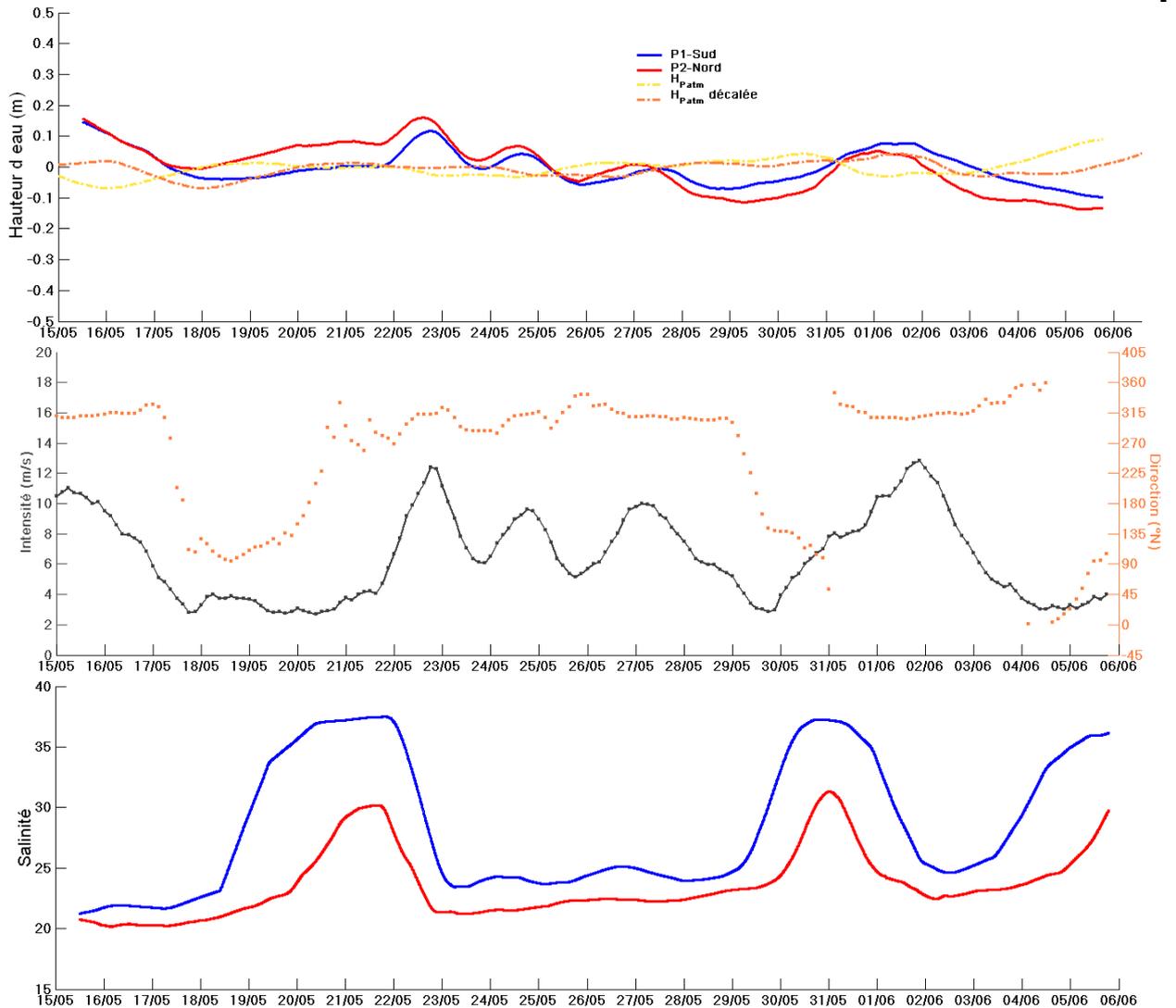


Figure A.VI. 5 : Evolution temporelle des hauteurs d'eau (en haut) et des salinités (en bas) enregistrées aux points P1-Sud (en bleu) et P2-Nord (en rouge) dans l'étang de La Palme durant la période HQ 3. La courbe en pointillés jaunes correspond à la hauteur d'eau théorique calculée à partir de la loi du baromètre inversé. La courbe en pointillés rouges est décalée de 2 jours par rapport à ce signal théorique. (au centre) : Evolution temporelle des vents (intensités et directions) enregistrés à la station Météo-France de Leucate. Ces trois séries sont lissées sur la journée.

ANNEXE VII : Evolution des débits mesurés et estimés et de la salinité au point P2-Nord dans l'étang de La Palme entre le 14 octobre 2010 et le 6 juin 2011.

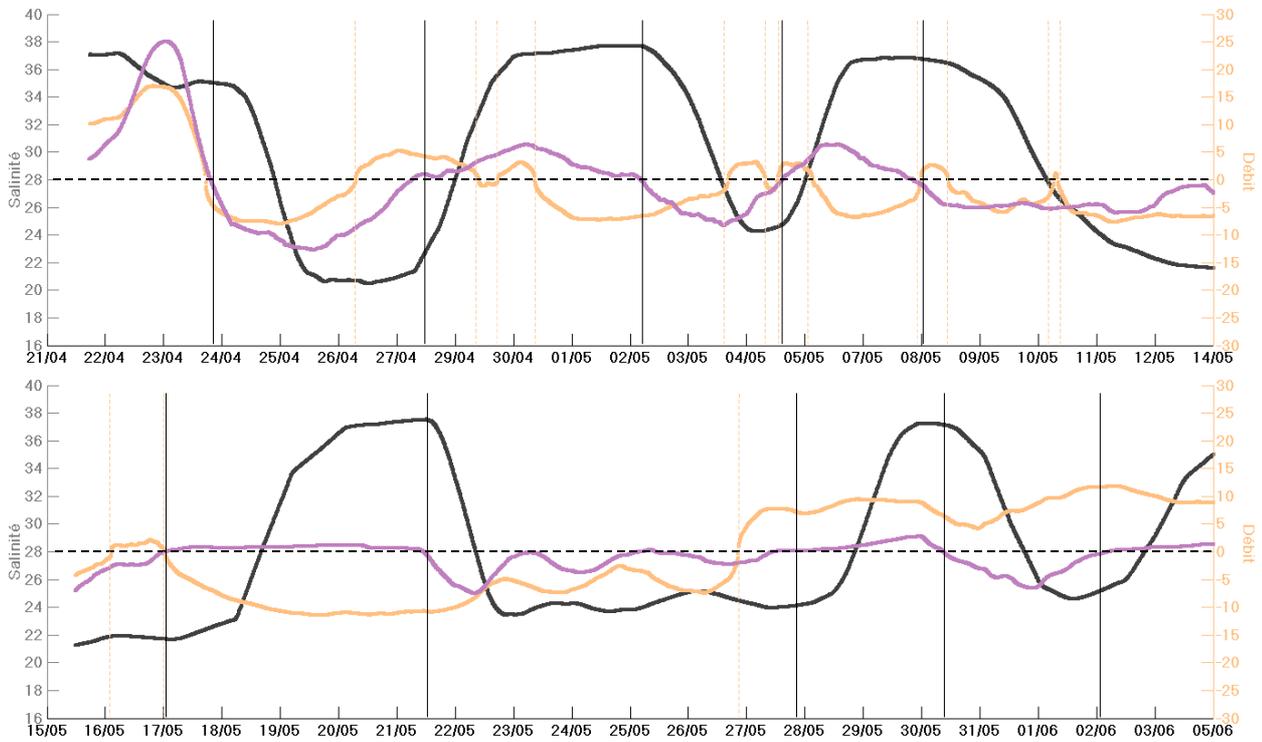


Figure A.VII. 1 : Evolution temporelle de la salinité au point P1-Sud (en noir) dans l'étang de La Palme, des débits mesurés (en violet) et estimés (en saumon) sous le pont SNCF sur les périodes HQ2, HQ3. Ces trois séries sont lissées sur la journée.