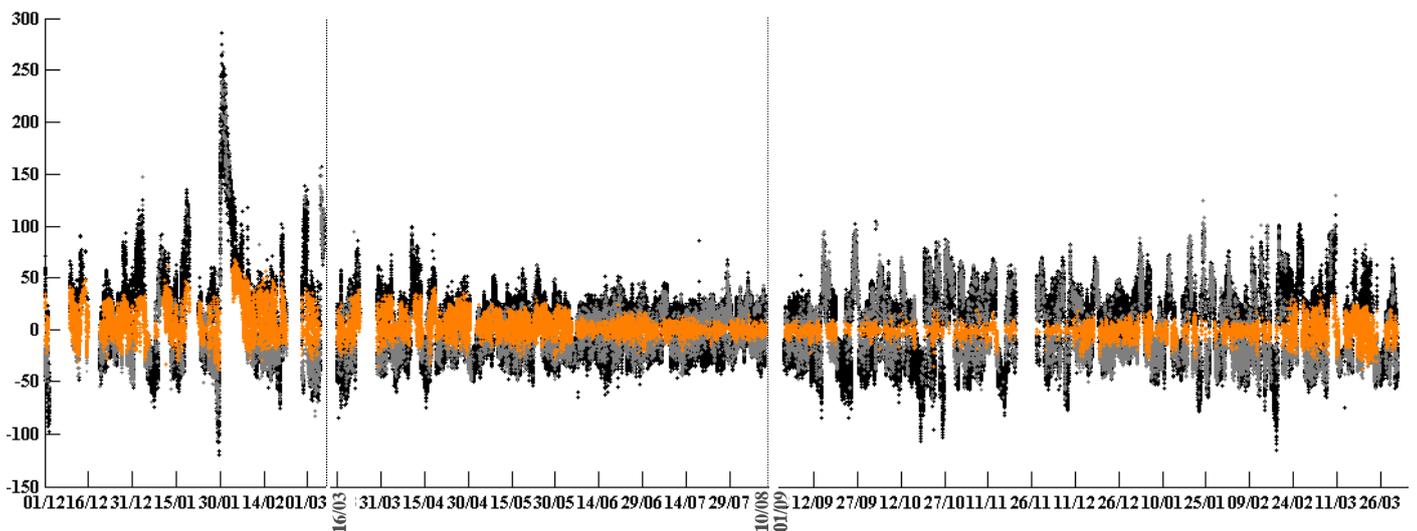

Développement d'une méthode d'estimation des débits dans les graus de lagunes

Application sur la lagune de Bages-Sigean



Débits instantanés (m³/s) dans le chenal portuaire de Port-La-Nouvelle

Fiche documentaire

Numéro d'identification du rapport : RST/LER/LR 12-02 Diffusion : libre : <input checked="" type="checkbox"/> restreinte : <input type="checkbox"/> interdite : <input type="checkbox"/> Validé par : Pascal Lazure Adresse électronique : pascal.lazure@ifremer.fr		date de publication : Fév. 2012 nombre de pages : 35 p + annexes bibliographie : oui illustration(s) : figures langue du rapport : française	
Titre de l'article : Développement d'une méthode d'estimation des débits dans les graus de lagunes ; Application sur la lagune de Bages-Sigean			
Contrat n° 07/3211071F		Rapport intermédiaire <input type="checkbox"/> Rapport définitif <input checked="" type="checkbox"/>	
Auteur(s) principal (aux) : Annie Fiandrino, Franck Lagarde		Organisme / Direction / Service, laboratoire Ifremer / Océanographie Dynamique des Ecosystèmes / Laboratoire Environnement Ressources du Languedoc Roussillon	
Contributeur(s) : Patrik Le Gall, Gregory Messiaen, Claude Chiantella, Benoit Roucher, Johann Meyer		Ifremer / Océanographie Dynamique des Ecosystèmes / Laboratoire Environnement Ressources du Languedoc Roussillon	
CADRE DE LA RECHERCHE :		Convention Cadre Ifremer / Agence de l'Eau Rhône Méditerranée & Corse, Contrat n° 07/3211071F	
Destinataire(s) :			
Résumé <p>Les travaux présentés dans le présent rapport finalisent l'étude engagée dans le cadre de l'Axe 1 : « <i>Amélioration des connaissances et compréhension des processus concernant le fonctionnement et le devenir du littoral méditerranéen</i> » de la Convention Cadre entre l'Ifremer et l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée et Corse portant sur le « <i>Développement de modèle hydrodynamiques et hydrosédimentaires sur les masses d'eau de transition</i> ». Au terme de cette étude, nous disposons d'une méthode de jaugeage des débits en canal, opérationnelle dans la majorité des configurations de profils verticaux de courant rencontrés. Le chenal portuaire de Port-La-Nouvelle, unique voie de communication entre la lagune de Bages-Sigean et la Méditerranée, a été retenu comme site pilote pour la mise au point de la méthode. La définition d'un protocole de déploiement des appareils de mesures, la mise à jour des besoins en terme de stratégie d'échantillonnage et la chaîne de traitement automatisée des données acquises sont aujourd'hui disponibles et font que cette méthode est applicable sur d'autres sites lagunaires.</p> <p>Cette étude a également mis à jour les ordres de grandeur des volumes journaliers entrants ($23 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ en moyenne) et sortants ($29 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ en moyenne) de la lagune de Bages-Sigean sous différents régimes hydro-climatiques. En particulier, une première estimation des temps de renouvellement a montré que l'événement pluvieux exceptionnel du début d'année 2006 serait susceptible de renouveler la totalité des eaux de la lagune (73 Mm^3 exportés en quinze jours pour un volume lagunaire de 60 Mm^3).</p> <p>L'acquisition de connaissances et de données sur le fonctionnement des échanges hydriques entre une lagune et la mer, ainsi que le développement de méthodes robustes et applicables en routine d'acquisition de données de débits dans les graus des lagunes présentent, dans les contextes européen (Directive Cadre sur l'Eau) et régional (Réseau de Suivi Lagunaire), un intérêt indéniable. Ainsi, l'Agence de l'Eau, la Région Languedoc-Roussillon et l'Ifremer ont lancé une nouvelle étude visant à construire puis évaluer, sur les lagunes méditerranéennes identifiées par la DCE comme masses d'eau de transition, des indicateurs hydro-morphologiques ou plus précisément selon la terminologie DCE, « des facteurs physiques ayant un impact potentiel sur la structure et la composition des peuplements biologiques ». Les connaissances et données maintenant disponibles sur la lagune de Bages-Sigean viendront largement alimenter cette étude.</p>			
Mots-clés Méthode jaugeage de débits, lagune, H-ADCP, 3D-ADCP, bilan hydrologique, échanges mer-lagune, canal portuaire, Port-La-Nouvelle.			

SOMMAIRE

1. INTRODUCTION.....	1
2. PROBLEMATIQUE.....	2
2.1. METHODE D’ESTIMATION DES DEBITS INITIALEMENT RETENUE.....	2
3. OBJECTIFS DE L’ETUDE	4
4. MATERIELS ET METHODES	5
4.1. SITE D’ETUDE : LE GRAU DE LA LAGUNE DE BAGES-SIGEAN	5
4.2. LES MATERIELS DE MESURE.....	6
4.3. CAMPAGNES D’ETALONNAGE DES DEBITS DANS LE CHENAL PORTUAIRE DE PORT-LA-NOUVELLE.....	7
4.4. METHODE D’ESTIMATION DES DEBITS DEVELOPPEE PAR LE LER-LR.....	9
4.5. METHODES D’ANALYSE STATISTIQUE ET DE CALCUL D’ERREUR, REPRESENTATION GRAPHIQUE DES RESULTATS	14
5. RESULTATS.....	17
5.1. CONDITIONS HYDRO METEOROLOGIQUES RENCONTREES LORS DES CAMPAGNES D’ETALONNAGE	17
5.2. CALIBRATION ET VALIDATION DE LA METHODE D’ESTIMATION DES DEBITS	21
5.3. ESTIMATION DES DEBITS A PARTIR DES DONNEES ACQUISES EN ROUTINE DANS LE CHENAL PORTUAIRE DE PORT-LA-NOUVELLE.....	25
6. CONCLUSION.....	33
7. RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	35

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...). En particulier, la préservation (voire la restauration) de ces milieux vis-à-vis du phénomène d'eutrophisation passe par une estimation fiable de la quantité d'éléments nutritifs que peuvent recevoir ces écosystèmes sans affecter leur fonctionnement écologique. Tout calcul de bilan de matière dans la lagune nécessite la connaissance préalable des charges importées par le bassin versant d'une part et exportées vers la mer d'autre part. **L'estimation des volumes d'eau qui, journallement, entrent et sortent de la lagune au travers des graus** (chenaux reliant la lagune à la mer) constitue donc des données indispensables à la quantification des flux échangés entre la lagune et la mer.

En outre, la tendance de ces milieux à stocker les apports en provenance du bassin versant dépend de la dynamique des masses d'eau et du temps de résidence des eaux dans les zones où se font les rejets.

Dès 2000, la Région Languedoc-Roussillon, l'Agence de l'Eau et l'Ifremer ont identifié, dans la convention cadre du Réseau de Suivi Lagunaire, le besoin de développer des outils d'aide à la gestion basés sur la modélisation mathématique du fonctionnement hydraulique de ces milieux afin d'améliorer la connaissance de la dynamique des masses d'eau au sein des écosystèmes lagunaires.

A ce jour, le LER-LR a mis en place, sur trois des principaux étangs de la Région, le modèle hydrodynamique MARS-3D développé par l'Ifremer. Ce modèle permet d'estimer les temps caractéristiques relatifs au fonctionnement hydrodynamique de ces milieux (temps de renouvellement, temps de résidence...), de quantifier les échanges avec la mer et de simuler la dispersion dans la lagune des apports en provenance du bassin versant.

L'application du modèle MARS-3D sur l'étang de Thau a été réalisée au début des années 90 dans le cadre du Chantier « Lagunes Méditerranéennes » du Programme National d'Environnement Côtier. L'application sur les sites de Salses-Leucate et Bages-Sigean a été effectuée dans le cadre du Réseau de Suivi Lagunaire. Avant toute utilisation opérationnelle de cet outil, il est indispensable de vérifier sa capacité à reproduire correctement la dynamique des masses d'eau à l'intérieur de la lagune ainsi que les échanges entre la lagune et la mer.

Les phénomènes qui gouvernent les échanges d'eau entre une lagune et la mer (principalement la marée, les variations de la pression atmosphérique, le vent) présentent des temps caractéristiques pouvant varier de quelques heures à la journée avec une forte variabilité temporelle. Par ailleurs, les topographies spécifiques de chaque grau (longueur, largeur, profondeur...) modifient la propagation des ondes de marée (déphasage et amortissement) et sont susceptibles de limiter, de façon plus ou moins importante, les quantités d'eau qui entrent et sortent de la lagune sur chaque cycle de marée. Une caractérisation fine des échanges mer-lagune et de l'impact du (ou des) grau(s) sur ces échanges nécessite de **mesurer les débits dans les graus à haute fréquence**.

2. Problématique

Le chenal portuaire de Port-la-Nouvelle, voie de communication entre la lagune de Bages-Sigean et la mer, a été retenu comme site pilote pour mettre en place une méthodologie d'acquisition en routine de mesures haute fréquence de débit dans un grau.

Cette étude a été engagée à la fin de l'année 2004 avec l'acquisition par le LER-LR de deux courantomètres acoustiques horizontaux (H-ADCP) avec le soutien de la Région Languedoc-Roussillon, de la DIREN et de l'Europe (FEDER)¹. Fin 2006, le dispositif expérimental a pu être complété par l'achat d'un courantomètre 3D-ADCP, cofinancé par la Région Languedoc-Roussillon, l'Agence de l'Eau RM& C² et l'Ifremer.

2.1. Méthode d'estimation des débits initialement retenue

Les connaissances antérieures acquises sur l'étang de Thau (CPER, 1997) et les contraintes techniques et financières ont orienté le choix de la méthode d'acquisition de mesures haute fréquence de débit dans le grau de Port-la-Nouvelle. La méthodologie initialement retenue (Méthode « Index Velocity »), mise au point par le fournisseur de courantomètres, est la même que celle utilisée pour estimer les débits des fleuves et des rivières.

Le courant dans une rivière présente un profil vertical homogène de la surface vers le fond, qui fait que l'estimation du débit peut être faite à partir de la mesure du champ de courant à une profondeur donnée et de l'épaisseur de la colonne d'eau. La relation existant entre le champ de courant horizontal à une profondeur donnée et le débit à travers une section de référence doit être définie de façon empirique. Plusieurs séries de mesures simultanées de débit de référence (acquises avec un courantomètre 3D-ADCP embarqué) et de champs de courant horizontaux (acquises avec un H-ADCP) sont nécessaires afin de mettre à jour cette relation et de la fiabiliser.

2.1.1. Principe de la méthode initialement retenue : Méthode de l'Index Velocity

La méthode de l'Index Velocity a été développée par USGS (U.S. Geological Survey) en 1982 (Rantz, 1982).

L'Index Velocity (V_i) est la vitesse moyenne du courant sur toute la largeur du chenal mesurée dans la tranche d'eau échantillonnée (Figure 1) par le profileur horizontal (H-ADCP). Le but de cette méthode est d'établir deux relations empiriques entre :

- la vitesse moyenne du courant (V en m/s) sur toute la section mesurée par le 3D-ADCP et l'Index Velocity (V_i en m/s)
- la section (A en m²) du canal mesurée par le 3D-ADCP et la hauteur d'eau (H en m) mesurée par le H-ADCP.

¹ « Mesures de débits dans le grau de Port-La-Nouvelle en vue de la modélisation des échanges hydrauliques entre la lagune de Bages-Sigean et la mer Méditerranée ». Subventions Région Languedoc-Roussillon, DIREN, Ifremer, FEDER (axe 3, mesure 1, sous-mesure :3, action 3 du complément de programmation - Docup objectif 2 (2000-2006) :

« Restaurer, aménager et gérer les milieux lagunaires et marins, modélisation permettant de quantifier et d'optimiser les échanges hydrauliques et des sédiments ».

² « Acquisition d'un courantomètre 3D-ADCP en vue de la fiabilisation de la méthode d'estimation des débits dans les graus des lagunes ». Subventions Région Languedoc-Roussillon, Agence de l'Eau RM&C, Ifremer.

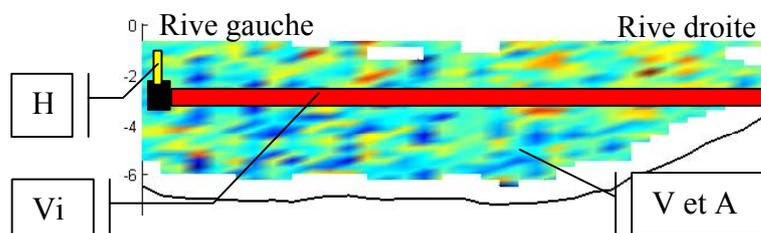


Figure 1 : Schéma de principe de la méthode de l'Index Velocity.

Les relations recherchées sont de type linéaire pour la Vitesse : $V = b_1 + b_2 V_i$
 et polynomiale d'ordre 2 pour l'Aire (A) en fonction de la Hauteur d'eau (H) :

$$A = a_1 + a_2 H + a_3 H^2$$

Le débit estimé (en m^3/s) est alors le produit : $Q = (a_1 + a_2 H + a_3 H^2) * (b_1 + b_2 V_i)$

2.1.2. Limite de validité de cette méthode

Des mesures de courant le long de la section longitudinale du grau depuis l'embouchure en mer jusqu'au barrage à vannes ont été réalisées au cours de différentes sessions d'étalonnage (cf. §.4.3).

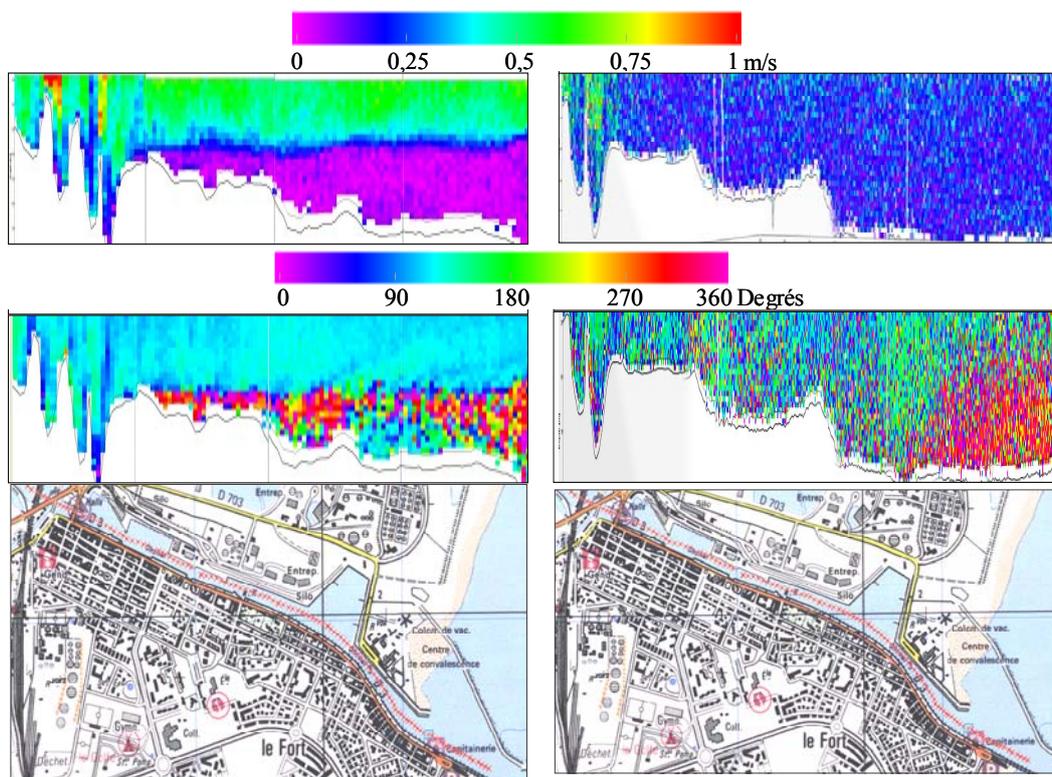


Figure 2 : Caractérisation de la stratification sur toute la longueur du grau. ([PL1]Bas) : Tracer (rouge) des transects³ réalisés le long du grau. (Haut) : Intensité du courant (en m/s) le long du transect. (Milieu) : Direction du courant (en degré) le long du transect. (Gauche) : Le 18 novembre 2005 : fortes précipitations sur le bassin versant, le coin salé remonte vers la lagune. (Droite) : Le 18 juillet 2005 : Stratification peu marquée et présente dans la partie aval du grau uniquement.

³ Transect : diagramme en profil représentant dans notre cas, une section transversale du grau.

L'étude menée par le LER-LR a apporté des éléments de compréhension sur le fonctionnement hydraulique du chenal portuaire de Port La nouvelle : les travaux de Roucher (2005), confirmés par l'étude menée dans le cadre du Réseau de Suivi Lagunaire (RSL, 2006) ont mis en évidence une dynamique particulière des masses d'eau dans ce chenal. Bien que la lagune de Bages-Sigean ne soit pas un milieu stratifié (le mélange des eaux par le vent est efficace dans ce milieu peu profond), une stratification a été mise à jour dans le grau. En effet, en fonction des conditions météorologiques, la remontée d'un coin salé dans le grau peut induire une inversion de courant entre la surface et le fond (Figure 2). Ce coin salé peut rester localisé près de l'embouchure du grau en mer ou se déplacer jusqu'en aval du barrage à vannes. En limitant la section efficace d'échange, la remontée du coin salé au niveau de la station de mesures des courants horizontaux induit un biais dans la méthode d'estimation des débits.

Nous n'avons pas trouvé dans la bibliographie, ni auprès du fournisseur, de méthode pour jauger de tels écoulements avec le matériel dont nous disposions. Les méthodes traditionnelles de jaugeage de débits en rivière s'étant avérées inadaptées pour le type d'écoulement rencontré dans le chenal portuaire de Port-la-Nouvelle, nous avons dû développer, en interne au laboratoire, une nouvelle méthode.

3. Objectifs de l'étude

Les objectifs de la présente étude sont doubles.

Dans un premier temps, il s'agit de détailler :

- le développement d'une méthode innovante de mesure de débits en canal soumis à des stratifications hydrologiques,
- le programme des campagnes de mesures en vue de l'étalonnage, du calibrage et de la fiabilisation de la méthode,
- la paramétrisation des algorithmes de la méthode.

Le second objectif de cette étude est de proposer une première synthèse des connaissances acquises sur les échanges entre la lagune de Bages-Sigean et la mer à partir des mesures de courant et de hauteur d'eau enregistrées durant 16 mois (de novembre 2005 à mars 2007) dans le chenal portuaire de Port-la-Nouvelle. L'application en routine de la méthode développée a en effet permis de préciser le fonctionnement hydraulique de ce grau.

4. Matériels et méthodes

4.1. Site d'étude : le grau de la lagune de Bages-Sigean

L'étang de Bages-Sigean est, après Thau et Salses-Leucate, la troisième plus importante lagune du Languedoc Roussillon avec une superficie de 3700 ha, 50 km de rive et un volume de 49 Mm³ (profondeur moyenne : 1,3 m, maximale : 2,85 m).

Orientée Nord-Sud sur environ 14 Km (Figure 3b), elle est constituée de plusieurs bassins et ne possède qu'une communication avec la mer par le Grau de Port-la-Nouvelle situé à l'extrémité sud-est du bassin sud de Sigean (Figure 3c-d). Elle présente de plus la particularité d'abriter deux îles dans sa partie centrale : l'île de la Planasse et la presqu'île de l'Aute reliée au rivage, au nord-est, par une bande de sédiments. Cette presqu'île constitue donc une frontière naturelle entre les bassins sud et nord et limite l'influence des eaux marines dans les zones les plus éloignées de la mer.

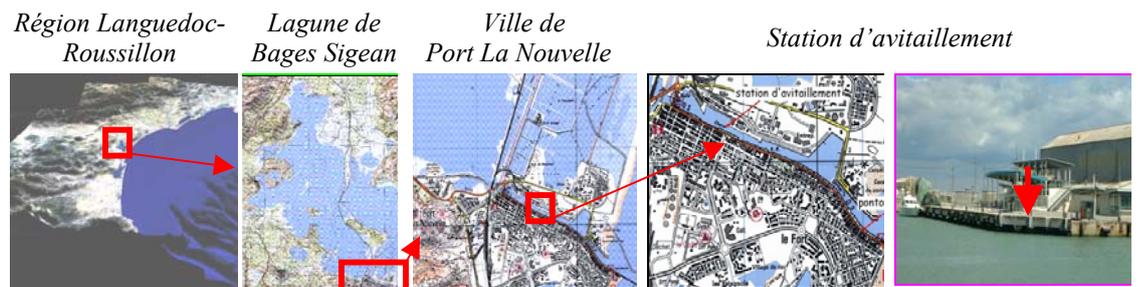


Figure 3 : Localisation du site de mesures du courant dans le grau de Port-La-Nouvelle (chenal de communication entre la lagune de Bages-Sigean et la mer Méditerranée).

Le grau de Port-La-Nouvelle est le seul axe de communication entre l'étang de Bages-Sigean et la mer Méditerranée. D'une longueur de 2 km, il est bordé de digues artificielles (Port de commerce) et reçoit les apports du canal de la Robine dans sa partie la plus amont, ainsi que les rejets de la station d'épuration de Port-La-Nouvelle à la hauteur de la station d'avitaillement. A son embouchure en mer, la section du chenal est d'environ 600 m² pour une profondeur maximale de 9 m et une largeur de 85 m. En remontant vers la lagune les levés mettent en évidence deux marches bathymétriques. Au droit de la station d'avitaillement, (Figure 3d) la section n'est plus que de 275 m² pour une profondeur maximale de 6 m et une largeur de 50 m. Plus en amont encore, la présence d'un ancien barrage à vannes, réduit encore la section mouillée qui n'est plus que de 89 m². Enfin, au débouché du grau dans la lagune, d'anciennes piles d'un pont ferroviaire encombrant la section qui à ce niveau est minimale (51 m²).

Le site instrumenté dans ce chenal portuaire (station d'avitaillement – Figure 3d) répond à trois exigences. (i) : une largeur du chenal (55 m) inférieure à la capacité de sondage du courantmètre H-ADCP (100 m) ; (ii) : une profondeur près de la rive suffisante pour permettre un positionnement optimal des courantmètres H-ADCP et des structures qui les supportent ; (iii) : un écoulement peu perturbé sur la totalité de la section.

4.2. Les matériels de mesure

4.2.1. Le courantomètre tridimensionnel

Le « Monitor » (Figure 4a) et le « Sentinel » (Figure 4b) sont deux courantomètres tridimensionnels conçus par RDI-Teledyne, munis de quatre transducteurs acoustiques, émettant à 1200 kHz leur permettant de mesurer le courant dans les trois dimensions (Anonyme, 2002).



Figure 4 : Présentations des deux 3D-ADCP, (a)°: le "monitor", et (b)°: le "sentinel" [RD Instruments, 2005].

Lorsqu'ils sont tractés par une embarcation ces courantomètres mesurent, en complément de l'intensité et de la direction du courant, la profondeur de la colonne d'eau ainsi que leur propre vitesse et direction de déplacement par rapport au fond. L'acquisition très haute fréquence (1 s) de ce type de données, le long de la section transversale d'un canal, permet d'estimer à la fois **l'aire de la section échantillonnée** et le **débit** dans le canal.

4.2.2. Les courantomètres horizontaux

Les courantomètres H-ADCP utilisés dans cette étude sont des profileurs de courant acoustique à effet doppler, appelés "Channel Master" (également conçus par RDI-Teledyne, Anonyme, 2005).

Ce type de courantomètre, initialement mis au point pour les rivières, est muni de deux transducteurs acoustiques émettant à une fréquence de 600 kHz lui permettant de mesurer **l'intensité et la direction du courant dans une couche horizontale** (à la profondeur à laquelle il est placé). Le nombre et la largeur des cellules échantillonnées (Figure 5) sont fixés par l'utilisateur. La résolution pour les vitesses est donnée à 0,1 mm/s.

L'H-ADCP possède également un transducteur acoustique vertical et un capteur de pression pour mesurer la **hauteur d'eau**. Il est également équipé d'un capteur de **température**. La résolution des mesures de hauteur d'eau est donnée à 0,1 mm.

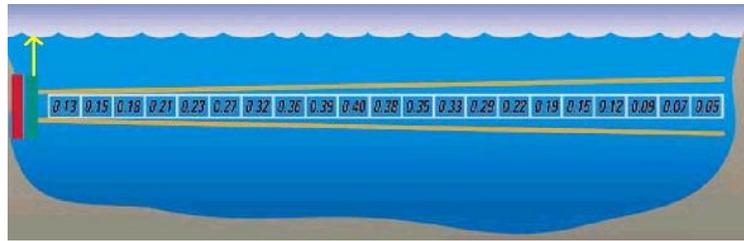


Figure 5 : L'H-ADCP mesure la vitesse du courant dans une couche d'eau défini du grau (source Anonyme, 2005)

L'H-ADCP est muni d'une mémoire interne de deux megabytes et est utilisé en mode statique, fixé à un support orientable (Figure 6).

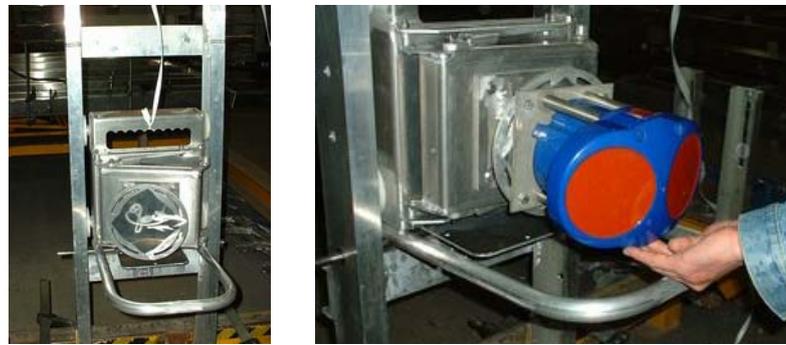


Figure 6 : L'H-ADCP et son support orientable.

4.3. Campagnes d'étalonnage des débits dans le chenal portuaire de Port-la-Nouvelle

Quatre campagnes d'étalonnage des débits ont été effectuées, avec le courantomètre 3D-ACDP embarqué, dans le chenal portuaire au niveau de la station d'avitaillement (Figure 3) entre janvier et mars 2007 : 164 mesures directes de débit et de section d'échange du grau [$Q_{mes}(t)$, $S(t)$] ont ainsi été réalisées (Tableau 1). La convention de signe retenue est la suivante : les débits **sortants** de la lagune sont définis **positifs**, les débits **entrants** dans la lagune sont définis **négatifs**.

Durant cette période, les deux courantomètres H-ADCP étaient positionnés à la station d'avitaillement, l'un au dessus de l'autre dans la colonne d'eau.

Les mesures de hauteur d'eau $\eta(t)$, acquises par le transducteur acoustique vertical du H-ADCP de surface dans son référentiel propre, sont redéfinies dans le référentiel de travail (cf. §.4.4.1).

Les données de courants horizontaux ont été acquises en découpant les sections échantillonnées aux deux profondeurs de mesure en 25 cellules de 2 m. Les données brutes de courant (intensité et direction) des deux H-ADCP ont été traitées afin de calculer les intensités moyennes du courant sur les largeurs du canal échantillonnées en surface « $V_{surf}(t)$ » et au fond « $V_{fond}(t)$ ». Concernant la direction des courants de surface et de fond, seules les informations relatives au sens du courant (« entrant » ou « sortant » de la lagune) ont été sauvegardées. La convention de signe définie précédemment pour les débits est reprise pour les courants.

Après traitement des données acquises par les deux H-ADCP, seules ont été gardées les mesures instantanées pour lesquelles nous disposons d'un jeu de données complet, à savoir les valeurs, à un même instant, des paramètres $[\eta(t), V_{\text{surf}}(t), V_{\text{fond}}(t)]$.

La fréquence d'acquisition de données des H-ADCP lors des campagnes du 30/01/2007 et du 02/02/2007 est de 1 minute. Pour les deux dernières campagnes, cette fréquence a été ramenée à 30 secondes.

Les mesures directes de débit acquises avec le 3D-ADCP devant être faites à vitesse réduite, la durée des transects varie de 2 à 4 minutes. Ainsi, pour **une** mesure directe des paramètres $[Q_{\text{mes}}(t_i), S(t_i)]$ à un instant t_i , nous disposons en moyenne, pour les deux premières campagnes, de 3 couples de valeurs des paramètres $[\eta(t_{i,j}), V_{\text{surf}}(t_{i,j}), V_{\text{fond}}(t_{i,j})]$. Pour les deux dernières campagnes, ce nombre de couples de données s'élève à 8.

Tableau 1 : Dates des campagnes d'étalonnage ; nombre de mesures des paramètres $[Q_{\text{mes}}(t), S(t)]$ effectuées à l'aide du 3D-ADCP et nombre de mesures des paramètres $[\eta(t), V_{\text{surf}}(t), V_{\text{fond}}(t)]$ acquises simultanément par les H-ADCP.

	Nombre de mesures des paramètres $[Q_{\text{mes}}, S]$	Nombre de mesures des paramètres $[\eta, V_{\text{surf}}, V_{\text{fond}}]$
30/01/2007	44	111
02/02/2007	42	84
07/03/2007	44	308
03/04/2007	34	312
TOTAL	164	815

Afin de caractériser la variabilité des courants de surface et de fond dans le chenal portuaire, et par suite, d'étudier la sensibilité de notre méthode d'estimation des débits à cette variabilité, le parti a été pris de ne pas moyenniser les valeurs des paramètres $[\eta(t_{i,j}), V_{\text{surf}}(t_{i,j}), V_{\text{fond}}(t_{i,j})]$ sur la durée d'acquisition d'**une** mesure des paramètres $[Q_{\text{mes}}(t_i), S(t_i)]$, mais à l'inverse, d'utiliser la même valeur des paramètres $[Q_{\text{mes}}(t_i), S(t_i)]$ pour tous les couples « j » des paramètres $[\eta(t_{i,j}), V_{\text{surf}}(t_{i,j}), V_{\text{fond}}(t_{i,j})]$.

Nous disposons ainsi de **815 jeux de données simultanées complets** $[Q_{\text{mes}}(t), S(t), \eta(t), V_{\text{surf}}(t), V_{\text{fond}}(t)]$.

4.4. Méthode d'estimation des débits développée par le LER-LR

4.4.1. Principe de la méthode

Afin de caractériser une éventuelle inversion de courant suivant la verticale dans le chenal portuaire de Port-La-Nouvelle (Figure 7) le LER-LR a mis au point une nouvelle méthode d'estimation des débits en utilisant deux courantomètres H-ADCP, placés l'un au dessus de l'autre dans la colonne d'eau (Figure 8) : le courantomètre du fond est positionné de façon à sonder la couche d'eau la plus profonde possible, sans que le fond ne perturbe la mesure.

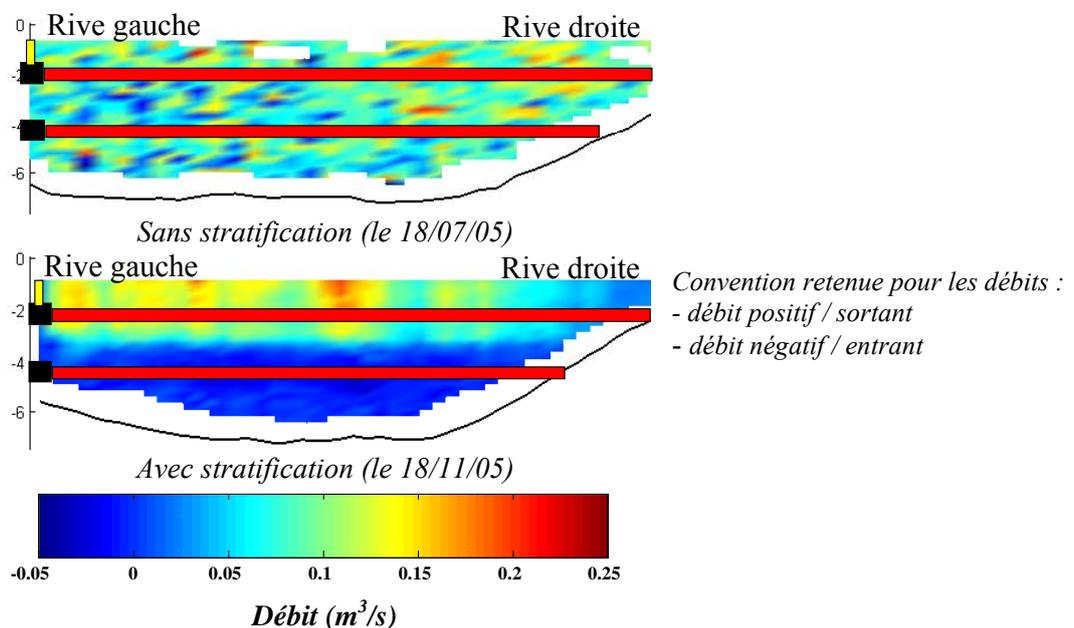


Figure 7 : Débits dans le chenal de Port-La-Nouvelle sans (haut) et avec (bas) cisaillement de la colonne d'eau. Les zones sondées par les deux courantomètres horizontaux sont représentées par les barres rouges.

Les données **nécessaires** à l'estimation du débit dans le chenal portuaire, à un instant t , sont :

- les paramètres caractéristiques d'une aire de référence : L_{surf} , η_{ref} , S_{ref} , H_{ref} (Figure 8)
- les intensités du courant moyennées sur la largeur du chenal aux deux profondeurs de mesure : $V_{surf}(t)$ et $V_{fond}(t)$,
- le sens du courant aux 2 profondeurs de mesure,
- la hauteur d'eau $\eta(t)$ repérée par rapport à η_{ref} ,

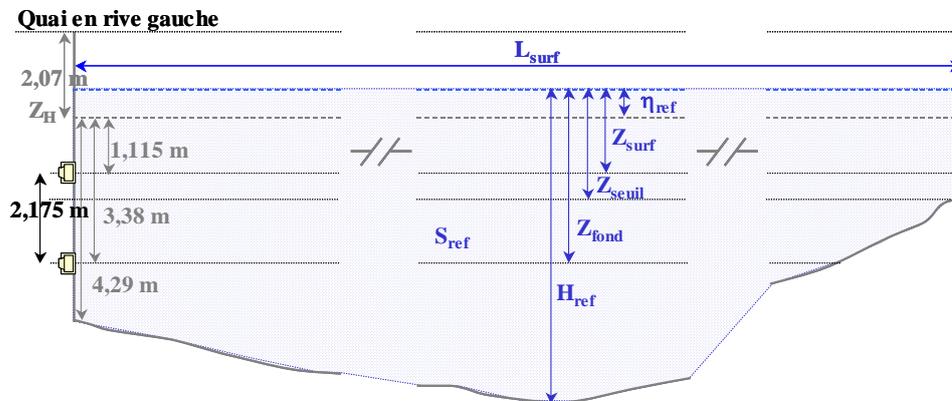


Figure 8 : Section transversale du chenal de Port-La-Nouvelle : schéma descriptif des paramètres des sections de référence repérées par rapport au zéro hydrographique Z_H .

avec les paramètres acquis par les H-ADCP lors des sessions d'étalonnage des débits :

- η_{ref} Hauteur d'eau mesurée par le H-ADCP de surface et origine ($z = 0$) du référentiel défini suivant la direction verticale. Dans ce référentiel les profondeurs sont définies positives vers le bas et l'élévation de la surface libre $\eta(t)$ est définie positive vers le haut.
- Z_{surf} Profondeur d'immersion du H-ADCP de surface,
- Z_{fond} Profondeur d'immersion du H-ADCP de fond.

et les paramètres acquis simultanément par le 3D-ADCP embarqué :

- L_{surf} Largeur du chenal en surface,
- S_{ref} Aire de la section de référence,
- H_{ref} Profondeur maximale sondée,
- Z_{seuil} Profondeur minimale sondée par le 3D-ADCP embarqué,

4.4.2. Formulation analytique des débits

La méthode développée sous le logiciel Matlab[®] est basée sur l'**hypothèse** qu'il est possible, à partir des mesures acquises, de décrire les profils verticaux i) : de vitesses de courant $V(z)$ et ii) : de la largeur du chenal $L(z)$ par **deux fonctions analytiques**. L'intégrale sur toute la colonne d'eau du produit de ces deux fonctions donne alors accès à une valeur du débit :

$$Q(t) = \int_{z=\eta(t)}^{z=H_{ref}} V(z,t).L(z,t).dz \quad (2)$$

avec :

- $V(z,t)$: profil vertical des vitesses de courant à l'instant t
- $L(z,t)$: profil vertical de la largeur du chenal à l'instant t

4.4.3. Caractérisation des sections de référence

Les sections d'échange des 164 transects étalonnés (cf. §.4.3) sont décrites à partir de leur largeur à la surface (L_{surf}), de leur aire échantillonnée ($Aire_{ref}$), des profondeurs maximale (H_{ref}) et minimale (Z_{seuil}) sondées (Figure 8).

Les largeurs en surface varient entre 43 m et 52 m et les aires entre 240 m² et 290 m². Quatre des 164 transects sont utilisés pour définir des **sections de référence** du chenal (notés de 1 à 4 sur la Figure 9). Un cinquième transect (noté 5), réalisé en novembre 2005 avant l'installation des courantomètres H-ADCP, a également été retenu car il correspond à une section d'échange plus importante.

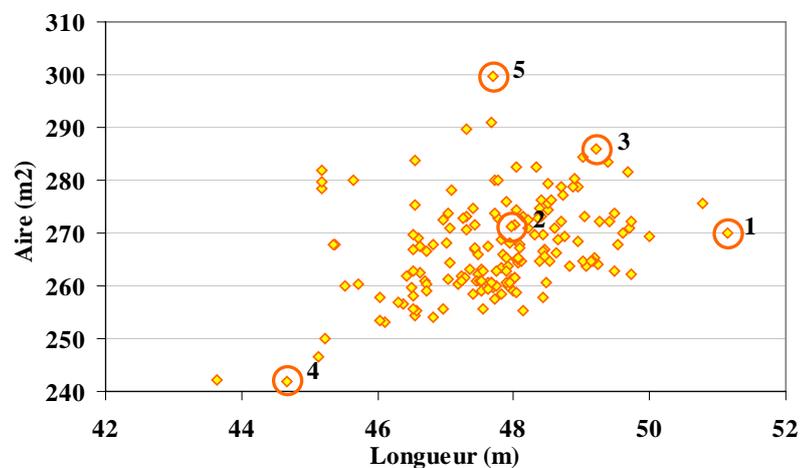


Figure 9 : Variations des aires échantillonnées en fonction des largeurs à la surface du chenal (L_{surf}) pour les 165 transects réalisés lors des campagnes

La première section de référence présente une largeur à la surface maximale et une aire moyenne, la seconde correspond à une aire et une section moyenne, la troisième à une aire proche des valeurs maximales et la quatrième présente une longueur et une aire minimale.

Ce jeu de paramètres de référence est complété par la donnée de la hauteur d'eau enregistrée simultanément par le H-ADCP de surface. Cette hauteur d'eau constitue l'élévation de référence (η_{ref}).

Les valeurs de l'ensemble de ces paramètres pour les cinq transects retenus sont regroupées dans le Tableau 2. La variabilité de ces aires est due aux variations de la hauteur d'eau, à l'évolution des fonds dans ce secteur du chenal ou les dragages sont fréquents (zone de dépôt sédimentaire).

Tableau 2 : Valeurs des paramètres caractéristiques des 5 sections de référence.

	n°	Aire _{ref} (m ²)	L _{surf} (m)	η_{ref} (m)	H _{ref} (m)	Z _{seuil} (m)
Aire 30/01/07-1	1	269,9	51,3	1,69	6,86	1,17
Aire 30/01/07-2	2	271,4	48,0	1,82	7,07	1,39
Aire 07/03/07	3	286,0	49,3	1,91	6,98	2,20
Aire 03/04/07	4	241,9	44,8	1,83	6,43	1,98
Aire 18/11/05	5	299,8	48,0	1,89	7,21	2,61

4.4.4. Détermination du profil vertical de la largeur du chenal $L(z)$ pour les sections de référence

Le profil vertical de la largeur du chenal est déterminé, pour chaque section de référence, entre la surface libre η_{ref} et le fond H_{ref} , à partir des profondeurs mesurées par le 3D-ADCP le long du transect :

- Si $\eta_{\text{ref}} < z < Z_{\text{seuil}}$, la largeur du chenal $L(z) = L_{\text{surf}}$,
- Si $Z_{\text{seuil}} < z < H_{\text{ref}}$, la largeur du chenal $L(z)$ est égale à la distance maximale entre deux points présentant cette même profondeur. L'évolution de la largeur de la section en fonction de la profondeur est ajustée par un polynôme d'ordre 2 (Figure 10). Les coefficients de ce polynôme pour les 5 transects sont regroupés dans le Tableau 3.

En imposant une section de référence fixe, on suppose que les seules variations d'aire au cours du temps sont celles liées aux variations de la surface libre. En particulier, les modifications de la section dues aux dragages ne sont pas prises en compte.

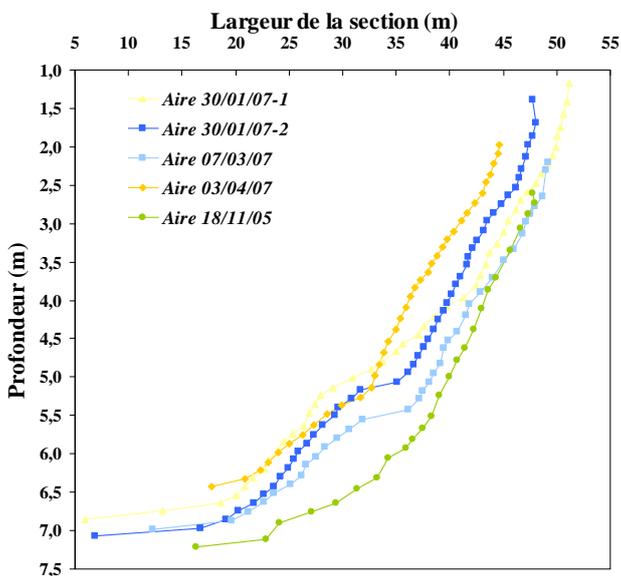


Tableau 3 : Valeurs des coefficients du polynôme d'ordre 2 : $L(z) = a_2 z^2 + a_1 z + a_0$ pour les 5 transects retenus.

	a_2	a_1	a_0	R^2
Aire 30/01/07-1	-0,9327	0,7565	51,826	0,983
Aire 30/01/07-2	-0,9413	2,2734	46,084	0,976
Aire 07/03/07	-1,2828	5,2428	43,094	0,983
Aire 03/04/07	-0,7449	0,9745	45,073	0,983
Aire 18/11/05	-1,3464	7,8248	35,161	0,962

Figure 10 : Profils verticaux de la largeur de la section $L(z)$ pour les 5 transects retenus.

4.4.5. Détermination des profils verticaux de courant $V(z)$

Trois configurations de courants en surface et au fond sont susceptibles d'être mesurées :

- **Configuration 1** : les courants de surface et de fond sont dirigés dans le même sens et tel que $|V_{\text{surf}}| > |V_{\text{fond}}|$ (Figure 11 a, d).
- **Configuration 2** : les courants de surface et de fond sont dirigés dans le même sens mais tel que $|V_{\text{surf}}| \leq |V_{\text{fond}}|$ (Figure 11 b, c).
- **Configuration 3** : les courants de surface et de fond sont de sens opposé (Figure 11 e).

Lorsque les processus à l'origine des échanges mer-lagune sont barotropes (ex : marée, variations de la pression atmosphérique), les courants mesurés en surface et au fond correspondent à la configuration 1 et le profil vertical du champ de courant tend vers un profil logarithmique (Figure 11 a). Lorsque des phénomènes baroclines se mettent en place (Figure 11 b-e) et s'opposent, en surface, aux forçages barotropes (ex : le vent, vidange des eaux lagunaires suite à un épisode pluvieux...), le champ de courant est alors la résultante de deux

courants de sens opposé et, l'intensité de la composante barocline du courant est d'autant plus importante qu'on est proche de la surface. Lorsque l'intensité du forçage barocline devient suffisamment importante le courant peut être, dans une couche de surface, de sens opposé au courant barotrope (Figure 11 c-e) ; l'épaisseur de cette couche de surface (Figure 11 c-e) dépend également de l'intensité du forçage barocline.

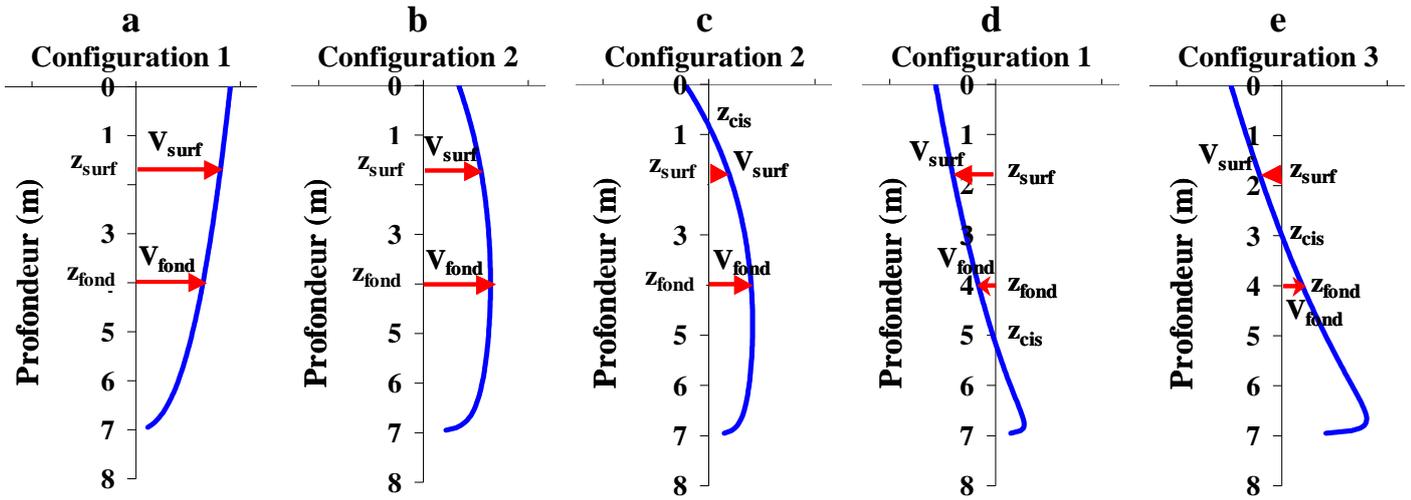


Figure 11 : Représentations schématiques d'une évolution possible du profil vertical du courant (courbe bleue) barotrope (a) puis lorsqu'un forçage barocline se met en place et s'intensifie (b-e). Les courants « vus » par les courantomètres de surface et de fond sont représentés par les flèches rouges.

Du fait de cette évolution continue du profil vertical des courants en fonction de l'évolution des forçages, une seule et même fonction analytique est utilisée pour décrire les trois types de configuration susceptibles d'être mesurées (eq. 1).

$$V(z) = C_1 \ln \left[\frac{H_{tot} - z}{z_0} \right] + C_2 (H_{tot} - z)^\alpha \quad (3)$$

avec :

H_{tot} : hauteur d'eau totale : $H_{tot} = H_{ref} + \eta$

z_0 : épaisseur de la couche limite au fond, $z_0 = 0,0035$ m.

La fonction « logarithme » permet de reproduire les profils verticaux de courant associés à un forçage « purement » barotrope. L'ajout de la fonction « puissance », qui induit un courant d'autant plus important qu'on se rapproche de la surface, permet de rendre compte des phénomènes baroclines.

Les coefficients C_1 et C_2 sont exprimés en fonction des courants V_{surf} et V_{fond} , mesurés aux deux profondeurs Z_{surf} et Z_{fond} , comme suit :

$$C_1 = \frac{V_{surf} (H_{tot} - z_{fond})^\alpha - V_{fond} (H_{tot} - z_{surf})^\alpha}{(H_{tot} - z_{fond})^\alpha \cdot \ln \left[\frac{H_{tot} - z_{surf}}{z_0} \right] - (H_{tot} - z_{surf})^\alpha \cdot \ln \left[\frac{H_{tot} - z_{fond}}{z_0} \right]} \quad (4)$$

et

$$C_2 = \frac{V_{\text{surf}} - C_1 \ln \left[\frac{H_{\text{tot}} - z_{\text{surf}}}{z_0} \right]}{(H_{\text{tot}} - z_{\text{surf}})^\alpha} \quad (5)$$

Le paramètre α contrôle la composante barocline du profil vertical de courant et constitue un degré de liberté dans la paramétrisation de la méthode.

4.5. Méthodes d'analyse statistique et de calcul d'erreur, représentation graphique des résultats

4.5.1. Optimisation de la paramétrisation de la méthode d'estimation des débits

L'analyse statistique retenue pour déterminer la meilleure valeur possible de ce paramètre α est basée sur l'estimation des coefficients des droites de régression $Q_{\text{mesuré}} = a Q_{\text{méth.}} + b$, R^2 (Pineiro *et al.*, 2008) et sur les tests statistiques permettant de comparer les coefficients a et b de la régression à des valeurs théoriques $a_{\text{th}} = 1$ et $b_{\text{th}} = 0$ (Scherrer, 1984).

- Soit l'hypothèse H_0 : $a = a_{\text{th}}$ (resp. $b = b_{\text{th}}$)
- et l'hypothèse alternative H_1 : $a \neq a_{\text{th}}$ (resp. $b \neq b_{\text{th}}$)

Les valeurs des tests t_{ac} (resp. t_{bc}) permettent d'accepter l'hypothèse H_0 si t_{ac} (resp. t_{bc}) est inférieur à une valeur critique qui suit une distribution de Student (Scherrer, 1984).

4.5.2. Calcul d'erreur sur les débits estimés

Une fois le paramètre α calé pour chacune des 3 configurations de courant (cf. §.4.4.5 pour la définition de ces configurations), l'erreur commise sur les débits estimés est définie par l'erreur relative moyenne comme suit :

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

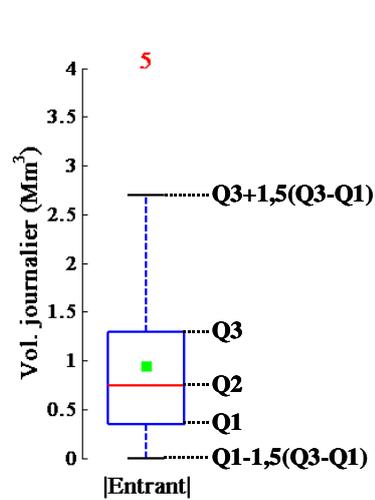
Où : j correspond au type de configuration ($j = 1$ à 3)

$N_{\text{config}(j)}$ correspond au nombre de données de débit au sein de chaque configuration.

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

4.5.3. Boîtes à moustache

La représentation graphique sous forme de « boîte à moustache » (Tukey, 1977) est utilisée pour visualiser, de façon synthétique, les plages de variations (distribution) d'une variable.



$Q1$: premier quartile, 25% des valeurs de la variable sont inférieures à la valeur de $Q1$

$Q2$: deuxième quartile égal à la médiane, 50% des valeurs de la variable sont inférieures à cette valeur

$Q3$: troisième quartile, 75% des valeurs de la variable sont inférieures à cette valeur

L'écart interquartile $EIQ = Q3 - Q1$ est utilisé comme un indicateur de dispersion de la série de donnée et permet de définir les « moustaches » : la moustache inférieure est égale à $Q1 - 1,5 EIQ$, la moustache supérieure est égale $Q3 + 1,5 EIQ$.

Les valeurs qui sont hors de l'intervalle défini par les moustaches sont considérés comme atypiques ne sont pas représentés. La valeur maximale est indiquée par le chiffre en rouge. Le carré vert correspond à la valeur moyenne de la série

Figure 12 : Exemple de représentation graphique sous forme de boîte à moustache des volumes journaliers (exprimés en Mm^3) entrants dans la lagune de Bages-Sigean sur la période du 23 novembre 2005 au 31 mars 2007.

5. Résultats

L'analyse des données de hauteur d'eau et de courants à deux profondeurs, acquises en haute fréquence par les H-ADCP lors des campagnes d'étalonnage, ont permis de mieux appréhender le fonctionnement des échanges entre la mer et la lagune de Bages-Sigean. Ce fonctionnement, qui conditionne fortement la paramétrisation de la méthode, est donc présenté au préalable à la description de la calibration et de la validation de cette méthode.

5.1. Conditions hydro météorologiques rencontrées lors des campagnes d'étalonnage

Les étalonnages des débits ont été réalisés lors des périodes de haute-mer et/ou en début de marée descendante. Ce sont donc quasi exclusivement des phases de flot⁴ qui ont été jaugées (Figure 13). Deux renverses de courant ont toutefois été suivies : le 30/01/07 (renverse de flot càd passage du flot au jusant) et le 03/04/07 (renverse de jusant - passage du jusant au flot).

Le 30 janvier et le 7 mars (Figure 14), les profils verticaux de courant sont majoritairement de type « barotrope » (Configuration 1). A l'inverse, le 2 février et le 3 avril, la répartition des courants de surface et de fond, majoritairement au sein des configurations 2 et 3, suggère que les forçages qui agissent sur la dynamique des échanges sont baroclines.

i) : Campagne du 30 janvier 2007

La campagne du 30 janvier se situe durant une période de temps calme : le vent est faible (inférieur à 20 km/h) de secteur Nord, la pression atmosphérique est relativement haute et stable (Figure I.1 - Annexe I).

Les échanges entre la mer et la lagune sont donc principalement gouvernés par la marée. Les débits maximaux mesurés sont de l'ordre de 40 m³/s (Figure 15C) et les profils verticaux de champs de courant sont majoritairement de type « barotrope » (configuration 1 - Figure 14), la décroissante du courant durant la phase de perdant se faisant de façon homogène sur toute la colonne d'eau (Figure 15B). Les quelques profils verticaux de courants qui présentent une inversion (configuration 3) sont observés au moment de la renverse et engendrent donc des débits faibles centrés autour de zéro (Figure 15C).

ii) : Campagne du 2 février 2007

La campagne de mesure du 2 février a été réalisée à la fin d'un épisode de tramontane (fort vent de Nord-Nord-Ouest) associé à une augmentation de la pression atmosphérique (Figure I.1 - Annexe I). Cet épisode, qui a eu pour effet de « vidanger » la lagune et de transporter les masses d'eau côtière de la côte vers le large, fait que les niveaux d'eau dans le chenal portuaire sont bas (Figure 15A). Le vent, soufflant à 30 km/h de secteur Nord-Nord Ouest entraîne les masses d'eau de surface vers la mer et tend à s'opposer, dans la couche de surface, au flot de la marée. Sur la majorité des profils échantillonnés, les courants de surface sont entrants mais avec une intensité inférieure à celle des courants de fond (configuration 2). Des inversions de courant suivant la verticale sont ponctuellement observées avec des courants de fond qui demeurent entrant et des courants de surface qui entraînent les masses d'eau lagunaires vers la mer (Figure 15B). Les débits résultants sont toujours entrants avec des valeurs maximales, enregistrées au moment de la pleine mer, qui ne dépassent pas 45 m³/s (Figure 15C).

⁴ Le flot est le courant qui porte dans la direction de propagation de l'onde marée (le jusant est le courant qui porte en sens inverse).

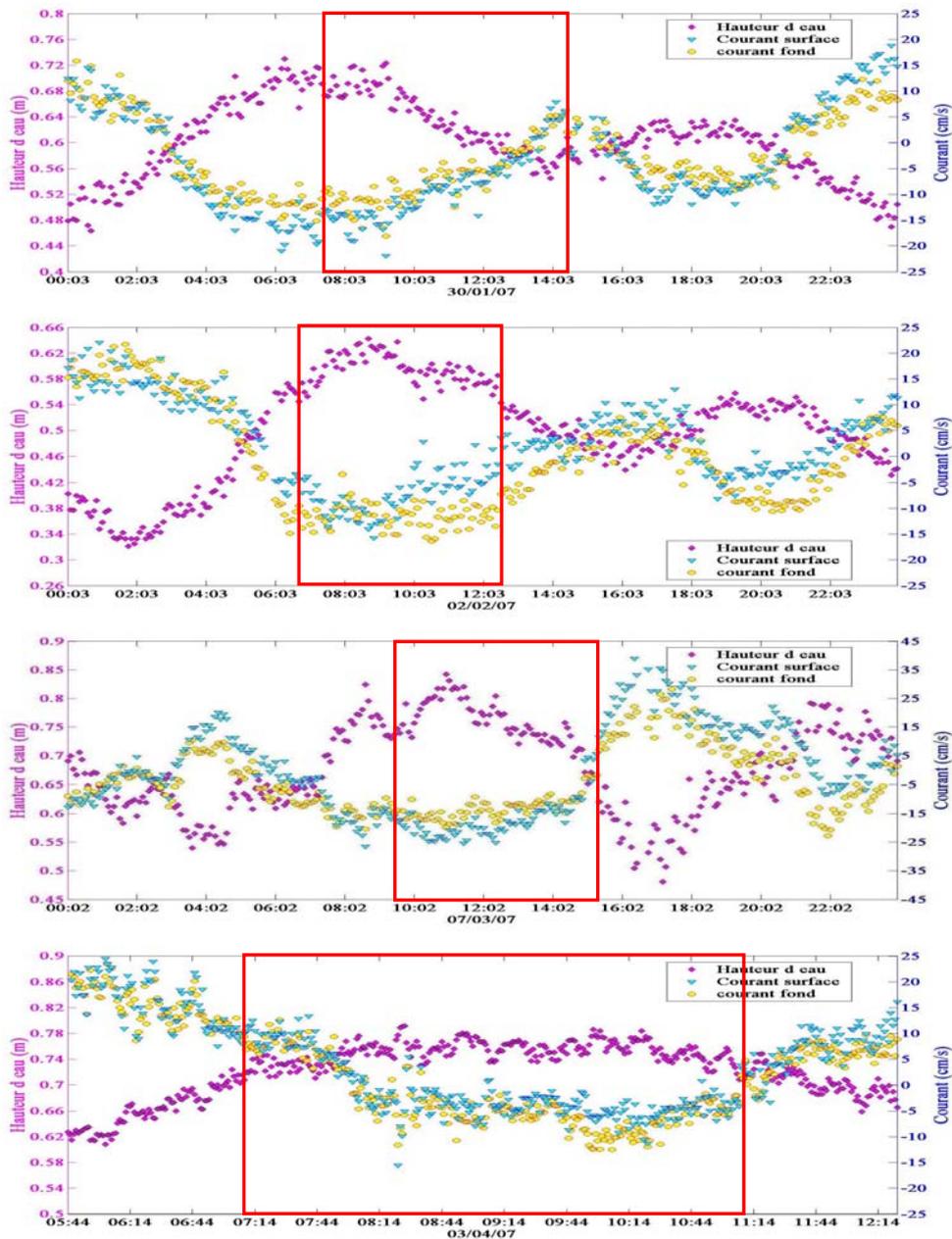


Figure 13 : Evolution temporelle des hauteurs d'eau (losanges roses) et des courants de surface (triangles bleus) et de fond (ronds jaunes) mesurés dans le chenal de Port-La-Nouvelle les 30/01/07, 02/02/07, 07/03/07, 03/04/07. La convention retenue est que les courants sont positifs - sortants (resp. négatifs - entrants). Les rectangles rouges délimitent les plages d'étalonnage des débits.

iii) : Campagne du 7 mars 2007

La campagne du 7 mars a été réalisée durant le passage d'une perturbation et du fait des basses pressions, les niveaux d'eau dans le chenal portuaire sont relativement hauts (Figure 15A).

Durant toute la durée de la campagne, les effets du vent et de la marée s'ajoutent : en début de campagne, la marée et le vent de secteur sud (avec des rafales à 70 km/h) associé à une dépression (Figure I.1 - Annexe I) engendrent des entrées d'eaux marines. Les profils verticaux de courants sont majoritairement de type « barotrope » (configuration 1 - Figure 15B) et l'entrée des eaux marines se fait sur toute la colonne d'eau : c'est lors de cette session d'étalonnage que les courants et les débits maximaux ont été enregistrés (50-60 m³/s). En fin de campagne, la marée est en phase de jusant et le vent forçit et passe au Nord-Ouest : les courants sont sortants avec un profil de type « barotrope » (configuration 1).

iv) : *Campagne du 3 avril 2007*

La campagne du 3 avril, se situe après un épisode de vent de sud soutenu, associé à une baisse de la pression atmosphérique (Figure I.1 - Annexe I). Quelques heures avant le début de l'étalonnage le vent tourne et passe Nord-Nord-Est avec une intensité de 36 km/h. Durant la renverse de jusant échantillonnée en début de campagne le vent et la marée engendrent des courants sortants avec des profils de type « barotropes ». Les débits sont donc positifs mais tendent à s'annuler avant de s'inverser. Les échanges demeurent peu importants sur toute la durée de la campagne et les débits entrants, maximaux au moment de la pleine mer, ne dépassent pas 25 m³/s.

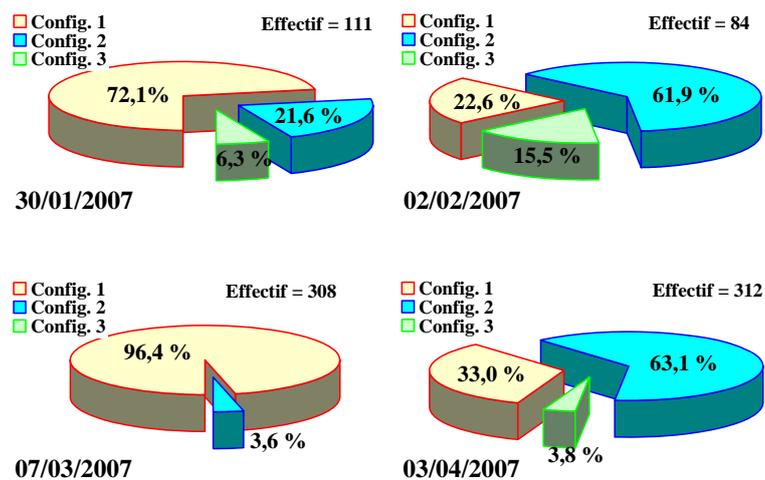


Figure 14 : Répartition, au sein des trois configurations identifiées au §4.1.3, des profils de courant mesurés avec les H-ADCP lors de quatre campagnes terrain. Rappel : Configuration 1 : les courants de surface et de fond sont dirigés dans le même sens et tel que $|V_{surf}| > |V_{fond}|$; Configuration 2 : les courants de surface et de fond sont dirigés dans le même sens mais tel que $|V_{surf}| \leq |V_{fond}|$; Configuration 3 : les courants de surface et de fond sont de sens opposé.

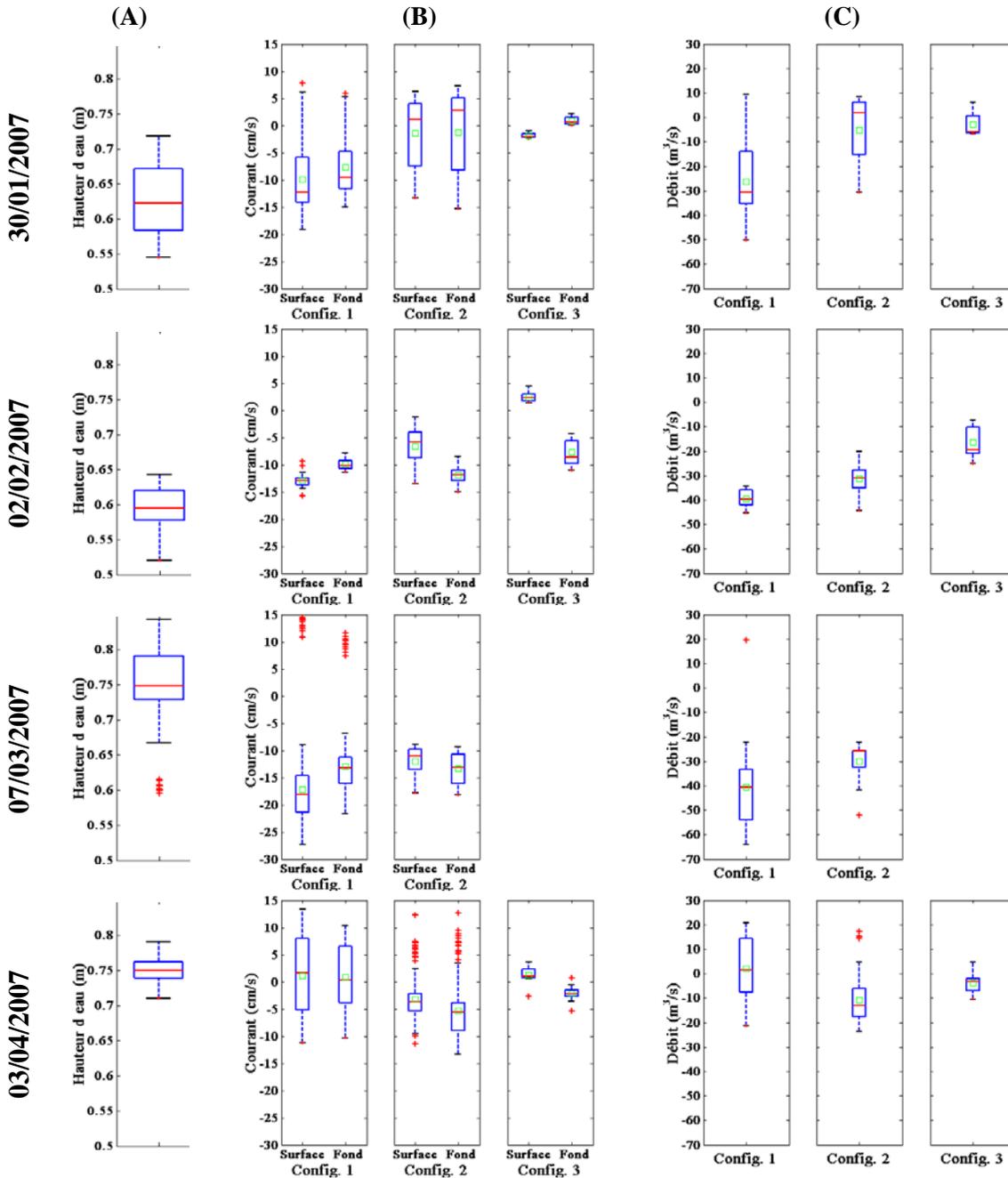


Figure 15 : Distribution des hauteurs d'eau (A), des courants de surface et de fond mesurés par les H-ADCP (B), et des débits mesurés par le 3D-ADCP(C) lors des quatre campagnes de terrain. Les courants et les débits sont regroupés en distinguant les trois configurations identifiées au §4.1.3.

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

La calibration et la validation de la méthode ont nécessité de séparer les jeux de données en deux : afin de construire des jeux de données les plus homogènes possibles (en terme d'effectif total et d'effectif au sein de chacune des trois configurations) le regroupement a été fait de la façon suivante :

- jeux de données de calibration : les 30/01/2007 et 03/04/2007
- jeux de données de validation : les 02/02/2007 et 07/03/2007.

Tableau 4 : Répartition du nombre de données de débit au sein des trois configurations de courant possibles, pour les 2 jeux de données de calibration et validation.

	Effectif			Total
	Config. 1	Config. 2	Config. 3	
Données Calibration	183	221	19	423
Données Validation	316	63	13	392

5.2.1. Estimation du paramètre α

L'évolution continue des forçages engendrent une évolution continue des profils verticaux de courant (et par conséquent des débits). Afin d'assurer cette même continuité aux valeurs des débits estimés à partir de notre méthode, il convient, en toute rigueur, d'utiliser une seule et même valeur du paramètre α pour les trois types de configuration. La valeur de α peut toutefois être différente pour les différentes aires testées.

La plage de variation du paramètre α , qui contrôle la composante barocline du profil vertical de courant, est contrainte par le fait que le courant doit tendre vers zéro au fond (lorsque z tend vers $H_{\text{tot}}-z_0$). On montre empiriquement que cette condition est vérifiée dès lors que $\alpha \geq \alpha_{\text{seuil}}$ avec $\alpha_{\text{seuil}} = 0,3$.

Pour chacune des cinq sections de référence testées, les valeurs du paramètre α qui, pour le jeu de données de calibration, permettent d'ajuster au mieux les débits estimés sont regroupées dans le Tableau 5. Les valeurs des coefficients de la régression ($Q_{\text{mes}} = a Q_{\text{mod}} + b$, R^2 - cf §.3.4) sont également reportées dans ce tableau. Les représentations graphiques des débits mesurés et estimés avec ces cinq paramétrisations d'aire sont regroupées en Annexe II.

Dans le cas où les courants de surface et de fond sont dans la configuration 1 (profils verticaux tendant vers un profil « barotrope »), les débits estimés pour les deux jeux de données reproduisent de façon très satisfaisante les débits mesurés ($R^2 > 90\%$) et ce pour toutes les paramétrisations d'aire utilisées.

Dans le cas où les courants de surface et de fond sont dans la configuration 2, les différentes paramétrisations d'aire permettent d'expliquer près de 85% de la variance observée sur les débits du jeu de données de calibration. Dans cette configuration, les données de validation sont peu nombreuses (63) et le coefficient de corrélation n'est plus que de 50%. On observe en particulier sur les données du 02/02/2007 un écart systématique entre les mesures et le modèle (ordonnée à l'origine de la droite de régression « b » Tableau 5 en bas) compris entre 10 et 15 m³/s.

Tableau 5 : Valeurs du paramètre α retenues (eq.1), des coefficients a , b et R^2 de la régression $Q_{mes} = a Q_{mod} + b$, pour chacune des aires. Les valeurs des coefficients a et b surlignées en vert sont celles pour lesquelles le paramètre est significativement égal à la valeur théorique ($a_{th} = 1$; $b_{th} = 0$).
En haut : jeu de données de calibration (le 30/01/2007 et le 03/04/2007). **En bas** : jeu de données de validation (le 02/02/2007 et le 07/03/2007).

Aire	α	Config. 1			Config. 2			Config. 3			Tous types confondus		
		a	b	R ²	a	b	R ²	a	b	R ²	a	b	R ²
Aire 30/01/07-1	0,333	0,89	-2,47	0,90	0,72	-1,98	0,84	1,71	-1,12	0,45	0,83	-1,79	0,87
Aire 30/01/07-2	0,333	0,92	-2,48	0,90	0,73	-1,89	0,84	1,33	-1,44	0,36	0,85	-1,70	0,87
Aire 07/03/07	0,333	0,88	-2,47	0,90	0,71	-1,91	0,84	1,38	-1,34	0,38	0,82	-1,72	0,87
Aire 03/04/07	0,333	1,02	-2,46	0,90	0,85	-2,04	0,83	2,20	-1,08	0,49	0,96	-1,86	0,88
Aire 18/11/05	1	0,85	-2,47	0,91	0,68	-1,93	0,84	1,39	-1,29	0,40	0,79	-1,74	0,87

Aire	α	Config. 1			Config. 2			Config. 3			Tous types confondus		
		a	b	R ²	a	b	R ²	a	b	R ²	a	b	R ²
Aire 30/01/07-1	0,333	0,96	-1,53	0,91	0,63	-13,36	0,49	1,26	-3,97	0,86	0,92	-3,80	0,90
Aire 30/01/07-2	0,333	1,00	-1,56	0,91	0,68	-12,15	0,49	1,23	-2,67	0,86	0,97	-3,04	0,90
Aire 07/03/07	0,333	0,96	-1,54	0,91	0,65	-12,44	0,49	1,20	-3,00	0,86	0,93	-3,21	0,90
Aire 03/04/07	0,333	1,10	-1,51	0,91	0,71	-14,17	0,49	1,51	-4,99	0,85	1,04	-4,33	0,90
Aire 18/11/05	1	0,92	-1,52	0,91	0,62	-12,50	0,49	1,16	-3,16	0,86	0,89	-3,27	0,90

Dans le cas où les courants de surface et de fond sont dans la configuration 3, les débits mesurés sont faibles, $-3,5 \text{ m}^3/\text{s}$ et $-16 \text{ m}^3/\text{s}$ en moyenne pour le jeu de données de calibration et validation (Figure II.3 - Annexe II), et nous disposons de peu de données (respectivement 19 et 13 pour les jeux de données de calibration et de validation). Ces conditions particulières expliquent les faibles corrélations entre débits estimés et mesurés ainsi que les biais importants observés dans cette configuration.

5.2.2. Sensibilité des résultats à la paramétrisation d'aire

La paramétrisation d'aire « 030407 » est celle qui fournit, pour les trois configurations, les débits (entrants et sortants) les moins importants (Figures I.1-I.3 Annexe I). Il s'avère que les paramètres descripteurs de cette aire (aire et profondeur de référence - Tableau 2) sont également les plus faibles ($Aire_{ref} = 242 \text{ m}^2$, $H_{ref} = 6,43 \text{ m}$).

En outre, la paramétrisation d'aire « 181105 », qui présente les paramètres descripteurs les plus élevés ($Aire_{ref} = 300 \text{ m}^2$, $H_{ref} = 7,21 \text{ m}$) est celle qui estime les débits les plus importants. Les aires et hauteurs de référence des trois autres paramétrisations d'aire « 300107-1 », « 300107-2 » et « 070307 » sont assez similaires et correspondent à des valeurs intermédiaires ($Aire_{ref}$ comprises entre 270 m^2 et 286 m^2 , H_{ref} comprises entre $6,86 \text{ m}$ et $7,07 \text{ m}$). Le paramètre α est également identique ($\alpha = 0,333$). Les débits estimés avec ces trois paramétrisations sont, de ce fait, peu différents et correspondent également à des valeurs intermédiaires.

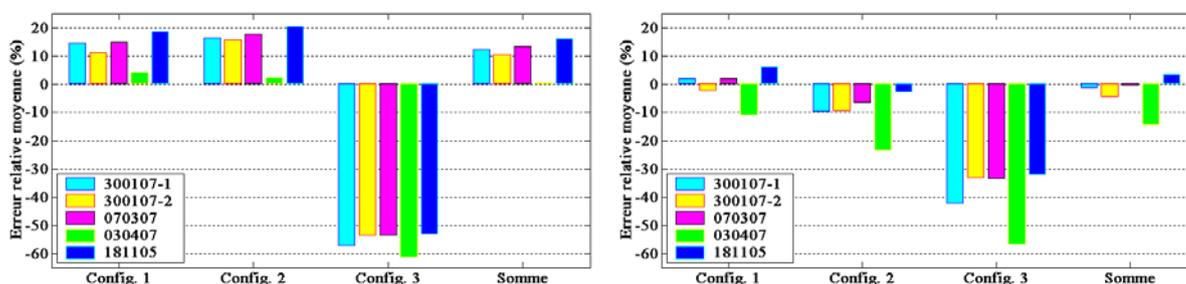


Figure 16 : Erreur relative moyenne sur les débits (%). (Gauche) : jeu de données de calibration, (Droite) : jeu de données de validation.

i) : Estimation des erreurs commises avec la paramétrisation d'aire « 030407 »

Dans les configurations de profils verticaux de courant 1 et 2, les erreurs commises (eq. 1) sur les débits du jeu de données de calibration (Figure 16 - gauche) sont très faibles (inférieure à 4%). En revanche, les débits du jeu de données de validation (Figure 16 - droite) sont sous-estimés et l'erreur relative moyenne commise dans ce cas dépasse 20% pour la configuration 2. Ceci est à mettre en relation avec le fait que les débits mesurés le 02/02/2007 (et qui dans cette configuration constitue la majeure partie du jeu de données) sont systématiquement plus importants que les débits estimés (Figure II.2 - Annexe II). Cet écart systématique entre débits mesurés et débits estimés ne se reproduit pas pour les 3 autres campagnes de mesures.

Dans la configuration 3, les débits des deux jeux de données sont également fortement sous-estimés, et ce, pour les cinq paramétrisations d'aire. La paramétrisation d'aire « 030407 » étant celle qui estime les débits les plus faibles, il est logique que les erreurs commises dans ce cas soient les plus importantes (de l'ordre de 60%).

Globalement (en moyenne sur les trois configurations et sur les deux jeux de données), cette paramétrisation d'aire fournit une estimation fiable des débits avec une légère tendance à la sous-estimation (erreur inférieure à 10%).

ii) : Estimation des erreurs commises avec les paramétrisations d'aire « 300107-1 », « 300107-2 » et « 070307 ».

Les erreurs commises pour les configurations 1 et 2 sur les débits du jeu de données de calibration sont de l'ordre de +15% (Figure 16 - gauche). Les débits estimés sont donc, en moyenne, légèrement supérieurs aux débits mesurés. Les erreurs commises sur les débits du jeu de données de validation sont plus faibles (au maximum 10% en valeur absolue) et dans ce cas, de même que pour l'aire « 030407_33 », la méthode tend à sous-estimer les débits.

Ces trois paramétrisations d'aire, pour lesquelles les débits estimés sont intermédiaires, sont celles qui engendrent globalement le moins d'erreur. Au sein de ces trois configurations, l'aire « 300107_5 » apparaît comme optimale.

i) : Estimation des erreurs commises avec la paramétrisation d'aire « 181105 »

La paramétrisation d'aire « 181105_1 », qui fournit les débits les plus élevés, tend globalement à surestimer les débits, excepté dans la configuration 3. Dans ce cas, cette paramétrisation d'aire est celle qui engendre la sous-estimation la moins importante.

5.2.3. Conclusion

Le parti pris de considérer plusieurs aires de référence rend la méthode d'estimation des débits robuste puisque trois paramétrisations d'aire permettent de calculer les débits avec une erreur estimée inférieure à 10%. En outre, deux paramétrisations supplémentaires fixent la plage de variation autour de cette « valeur optimisée » du débit.

Par ailleurs, la sous-estimation des débits observée dans la configuration 3, lorsque les profils verticaux de courant présentent une inversion sur la verticale, **met à jour les limites de calibration** de la méthode engendrées par les données d'étalonnage **sans toutefois remettre en cause sa validité** :

- i) lors des campagnes d'étalonnage, les profils verticaux de courant présentant une inversion mesurée entre les 2 H-ADCP n'ont été observés que lors de renverses de courant. Les débits mesurés dans cette configuration sont donc globalement faibles et tendent vers zéros (Figure II.3 - Annexe II). Des profils de courant fortement baroclines, tel que ceux mesurés le 18 novembre 2005 (Figure 2), n'ont malheureusement pas été observés lors des campagnes d'étalonnage et la paramétrisation de la méthode dans cette configuration particulière n'a pu être calée.
- ii) Cependant, les sous-estimations commises dans ces configurations particulières de renverse de courant, où les débits tendent vers zéro et s'inversent, n'engendrent que peu d'erreur sur l'estimation des échanges entre la lagune et la mer. En particulier, le renouvellement des masses d'eau lagunaire se fait principalement lors d'épisodes météorologiques marqués (événements pluvieux accompagnés de vent de fort vent de sud, épisode de tramontane soutenu pendant plusieurs jours).
En outre, les sens des débits (entrants/sortants) observés dans cette configuration sont globalement bien reproduits (Figure II.3 - Annexe II). Cela signifie en particulier que cette méthode d'estimation des débits n'induit pas de biais sur la description de l'onde de marée qui se propage dans le chenal de Port-La-nouvelle.

En conclusion, dans la plupart des configurations hydrauliques rencontrées dans le chenal portuaire de Port-La-Nouvelle, la méthode développée dans cette étude permet de fournir une estimation fiable des débits ainsi qu'une incertitude sur cette estimation et ce, même dans un contexte où les contraintes de déploiements de matériel de mesure sont fortes. En effet, dans un canal où la dynamique sédimentaire est importante et impose des dragages fréquents par les services portuaires, il n'est pas envisageable de déployer un profileur vertical 3D-ADCP sur des périodes longues.

5.3. Estimation des débits à partir des données acquises en routine dans le chenal portuaire de Port-La-Nouvelle

Les deux courantomètres H-ADCP ont été installés à la station d'avitaillement de Port-La-Nouvelle durant 16 mois, entre le **1^{er} décembre 2005** et le **31 mars 2007**. Durant cette période, 114 470 mesures de hauteur d'eau, et de courant à 2 profondeurs ont été acquises à un pas de temps de 5 mn. La méthode d'estimation des débits définie précédemment a été appliquée en routine sur ce jeu de données.

A chaque pas de temps « t », cinq valeurs du débit instantané sont calculées en utilisant les cinq paramétrisations d'aire définies précédemment. Par ailleurs, afin de caractériser séparément les phases de flot et de jusant, les débits instantanés ont été traités en distinguant les débits entrants et les débits sortants. Ainsi, à chaque pas de temps on définit, pour chacune des deux séries de débits entrants et sortants, la valeur moyenne [$Q_E^{moy}(t)$, $Q_S^{moy}(t)$], et les valeurs minimales [$Q_E^{min}(t)$, $Q_S^{min}(t)$] et maximales [$Q_E^{max}(t)$, $Q_S^{max}(t)$] calculées à partir des cinq jeux de données. Les valeurs minimales et maximales des débits permettront de borner l'incertitude autour de la valeur moyenne.

5.3.1. Débits instantanés calculés sur la période du 1^{er} décembre 2005 au 31 mars 2007

En moyenne sur toute la période étudiée, les débits sortants par le chenal portuaire de Port-La-Nouvelle (Q_S^{moy}) sont de 29,3 m³/s (carrés verts sur la Figure 17). La plage de variation autour de cette valeur est de [-8,5 % ; +5,5 %]. Les débits entrants (Q_E^{moy}) sont en règle générale plus faibles, avec une valeur moyenne de 23,1 m³/s et une plage de variation associée de [-13,0% ; +9,5%].

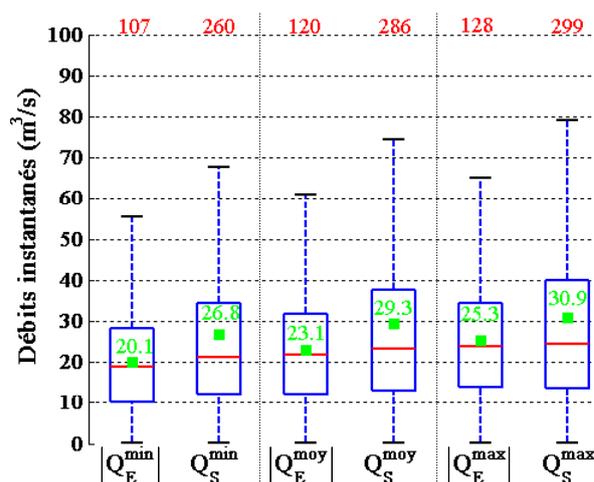


Figure 17 : Distribution, sur la période du 01/12/2005 au 31/03/2007, des débits instantanés entrants dans la lagune (en valeur absolue) : $|Q_E^{min}|$, $|Q_E^{moy}|$ et $|Q_E^{max}|$ et sortants de la lagune : Q_S^{min} , Q_S^{moy} et Q_S^{max} .

Les distributions mensuelles des débits instantanés sortants Q_S^{moy} et entrants Q_E^{moy} (Figure 18) mettent à jour une variabilité saisonnière, avec des débits plus faibles en été : +15 m³/s (en juin et juillet 2006) et des débits plus importants en automne [+34 m³/s⁵ (sortants) et -31 m³/s

⁵ A titre de comparaison, les débits mesurés dans les canaux de Sète (Fiandrino-SDEI, com. pers.) sont en moyenne de l'ordre de 125 m³/s.

(entrants) en octobre 2006]; et en hiver [+56 m³/s et +52 m³/s en débits sortants, respectivement en janvier et février 2006 contre -27 m³/s et -21 m³/s en débits entrants pour ces deux mêmes mois]. Les incertitudes maximales sur ces valeurs moyennes mensuelles sont [-10% ; +6%] pour les débits sortants et [-16% ; +13%] pour les débits entrants (non illustrées ici).

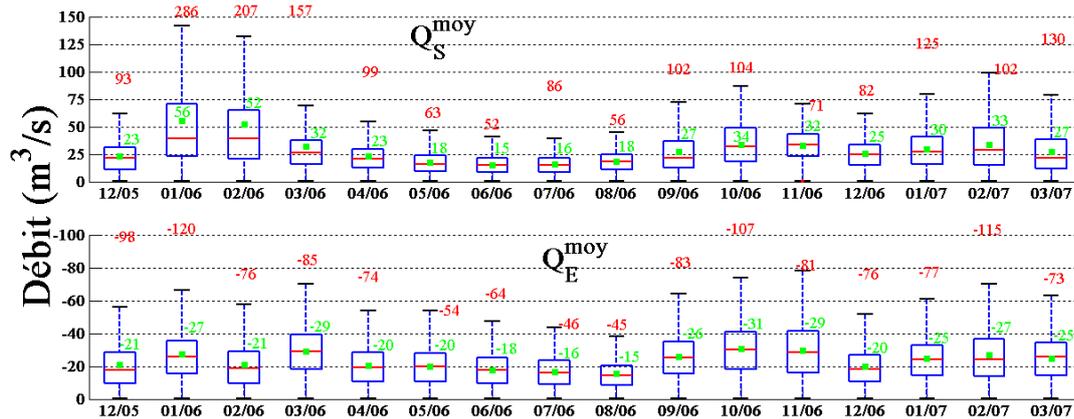


Figure 18 : Distributions mensuelles (axe des abscisses mm/aa) des débits estimés (séries Q_E^{moy} et Q_S^{moy}) sur la période du 01/12/2005 au 31/03/2007. (En haut) : échanges de la lagune vers la mer (Q_S^{moy}). (En bas) : échanges de la mer vers la lagune (Q_E^{moy}).

Les débits les plus importants ont été enregistrés lors de l'événement pluvieux qui a eu lieu entre le 29 janvier et le 8 février 2006 (Figure 19). Cet événement pluvieux a été particulièrement intense avec un cumul des précipitations de 180 mm sur trois jours entre le 27 et le 29 janvier, dont 163 mm pour la seule journée de 29 janvier. En outre, le mois de janvier 2006 a été exceptionnellement pluvieux avec un cumul des précipitations mensuelles de 249 mm. Notons, à titre de comparaison qu'en moyenne sur les années 2000-2009 les précipitations pour ce mois sont de 79 mm (Ifremer, 2010).

Les débits maximaux entrants, enregistrés au cours de la journée du 29 janvier (Figure 19), s'élèvent à 120 m³/s [-11% ; +6,7%]. Le lendemain, les débits sortants atteignent la valeur maximale de 286 m³/s [-9% ; +4,5%]. Par suite, les débits sont exclusivement sortants jusqu'au 6 février. Ainsi, huit jours ont été nécessaires pour évacuer les eaux continentales excédentaires que la lagune a reçues durant cet événement pluvieux.

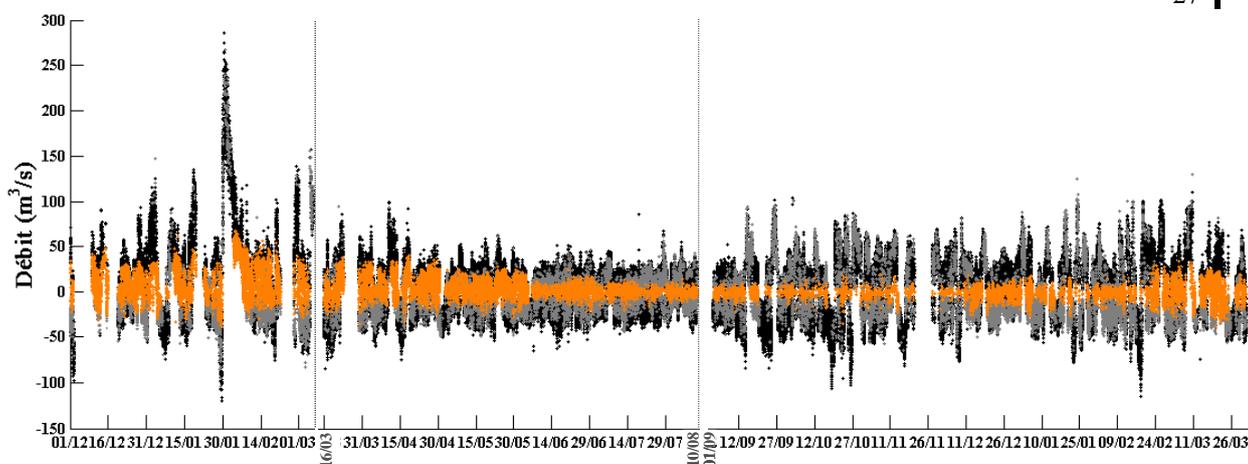


Figure 19 : Evolution temporelle des débits instantanés estimés sur la période du 01/12/2005 au 31/03/2007. Configuration 1 (courbe noire) ; Configuration 2 (courbe grise) ; Configuration 3 (courbe orange).

5.3.2. Volumes journaliers calculés sur la période du 1^{er} décembre 2005 au 31 mars 2007

i) : à la station d'avitaillement

L'intégration sur une journée des débits instantanés entrants et sortants de la lagune (Q_E^{moy} , Q_S^{moy}) donne accès aux volumes entrants et sortants (V_E^{Mer} et V_S^{Mer} , exprimés en Mm^3/j) qui journalièrement transitent dans le chenal portuaire de Port-La-Nouvelle (Figure 20).

L'épisode pluvieux de fin janvier –début février 2006 est traité indépendamment du reste de la période afin de caractériser le fonctionnement de l'hydrosystème lors d'un événement pluvieux exceptionnel. On distingue donc la Période 2 du 1^{er} janvier au 28 février 2006 (correspondant à 53 jours de mesures effectives) des 14 autres mois (Période 1 = décembre 2005 + la période du 1^{er} mars 2006 au 31 mars 2007, correspondant à 378 jours de mesures effectives).

En moyenne sur la période 1, les volumes journaliers sortants (V_S^{Mer}) par le chenal portuaire de Port-La-Nouvelle sont de $+1,18 \text{ Mm}^3/\text{j}$ $[-9,1\% ; +6,7\%]$ (carrés verts sur la Figure 20). Les volumes journaliers entrants (V_E^{Mer}), de l'ordre de $-0,97 \text{ Mm}^3/\text{j}$ $[-11,3\% ; +7\%]$, sont significativement plus faibles.

Les différences observées entre les débits entrants et sortants se répercutent tout naturellement sur les volumes journaliers échangés et, en moyenne sur la période 1, on observe un bilan net journalier (ΔV^{Lag}) de $+0,21 \text{ Mm}^3/\text{j}$ $[-3,6\% ; +6,5\%]$ en faveur d'une exportation d'eau vers la mer.

Sur la période 2, les bilans nets journaliers moyens sur les 2 mois (Figure 20) sont de l'ordre de $+2,27 \text{ Mm}^3/\text{j}$ $[-10\% ; +7,5\%]$. Plus précisément, sur la période de l'événement pluvieux de fin janvier-début février 2006 (du 23/01 au 10/02 inclus), ces bilans nets journaliers sont, en moyenne sur ces 19 jours, de $+3,88 \text{ Mm}^3/\text{j}$ $[-10,1\% ; +7,3\%]$. Ainsi durant cet événement pluvieux **plus de 73 Mm^3 d'eau ont été exportés vers la mer.**

Lors d'un événement pluvieux moins intense, tel que celui survenu les 17 et 18 février 2007 (cumul de 93,3 mm en 2 jours – Annexe 1), ce sont près de 14 Mm^3 d'eau $[-8,3\% ; +7,2\%]$ qui ont été exportés vers la mer entre le 15/02 et le 27/02/2007.

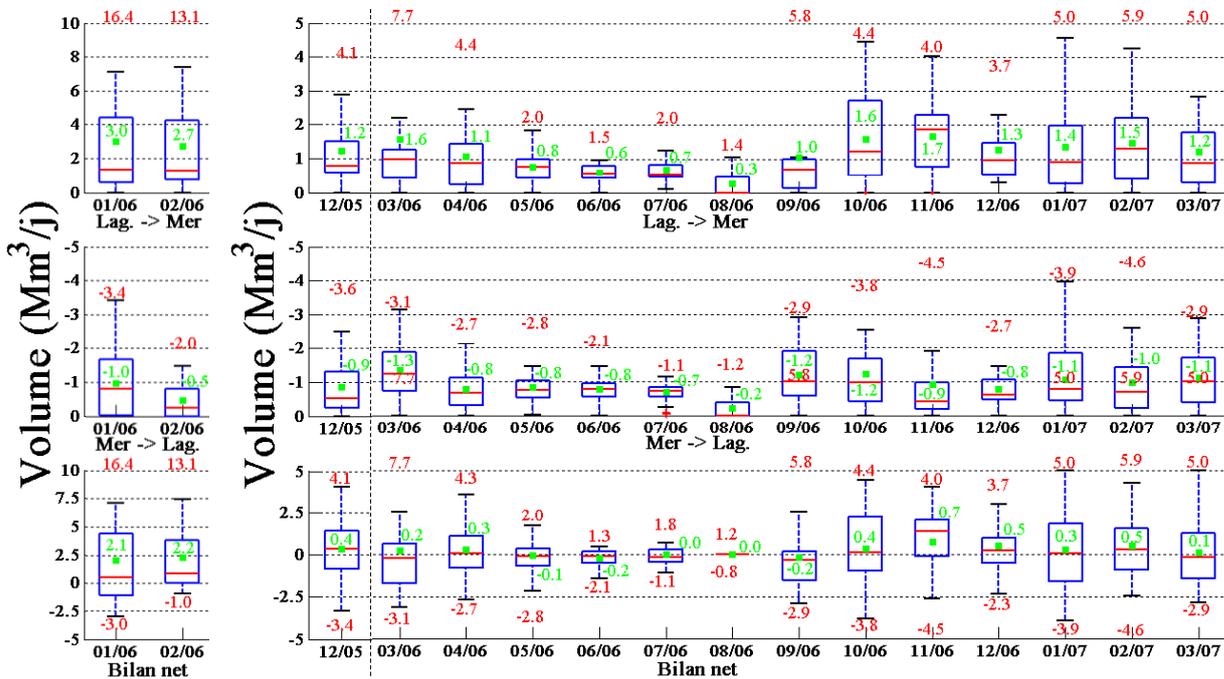


Figure 20 : Distributions mensuelles des volumes journaliers sortants de la lagune (en haut), entrants dans la lagune (au centre) et des bilans nets (en bas). La série est séparée en deux, en distinguant les mois de janvier et février 2006 (Période 2) des 14 autres mois (Période 1).

ii) : échanges entre la lagune de Bages-Sigean et la mer

Les déséquilibres mis à jour entre débits / volumes journaliers entrants et sortants mesurés dans le chenal portuaire de Port-La-Nouvelle sont en partie dus aux apports continentaux que la lagune de Bages-Sigean et le canal de la Robine reçoivent et évacuent vers la mer.

L'estimation des débits et des volumes journaliers est faite à la station d'avitaillement de Port-La-Nouvelle, c'est-à-dire en aval du point d'entrée de la Robine dans ce chenal portuaire. Ainsi, les apports d'eaux douces par le bief aval de la Robine directement dans le chenal portuaire de Port-La-Nouvelle ($V^{\text{Bief Aval}}$ - Figure 21), contribuent au bilan net effectué sur les volumes journaliers estimés à la station d'avitaillement (+0,21 Mm³/j calculés en moyenne sur la Période 1) mais ne contribuent pas aux échanges entre la lagune de Bages-Sigean et la mer ouverte (ΔV^{Lag} - Figure 21).

En considérant un débit instantané moyen de la Robine de 0,98 m³/s à l'écluse de Mandirac (Le Noc, com. pers.), le volume journalier d'eau douce V^{Robine} , estimé en moyenne sur la Période 1, est de l'ordre de 0,084 Mm³/j. En considérant en outre que 1/3 (PNR, com. pers.) de ce volume alimente le bief aval, l'apport journalier d'eau douce directement dans le chenal portuaire de Port-La-Nouvelle ($V^{\text{Bief Aval}}$) est de 0,028 Mm³/j. Les 2/3 du volume restant (soit 0,056 Mm³/j) transitent par le Canélou ($V^{\text{Canélou}}$) et alimentent la partie nord de l'étang de Bages-Sigean.

Le bilan journalier net des échanges entre la lagune et la mer (ΔV^{Lag}) est donc ramené à +0,18 Mm³/j. Ce bilan reste significativement en faveur des exportations d'eaux de la lagune vers la mer. **Sur la Période 1, la lagune a exporté 68 Mm³ d'eau vers la mer.** L'épisode pluvieux exceptionnel de fin janvier-début février 2006 a donc donné lieu à des exportations d'eaux lagunaires vers la mer (de l'ordre de 73 Mm³) plus importantes que celles mesurées sur

les 14 autres mois du suivi. Rappelons à titre de comparaison, que le volume de la lagune est de l'ordre de 60 Mm³.

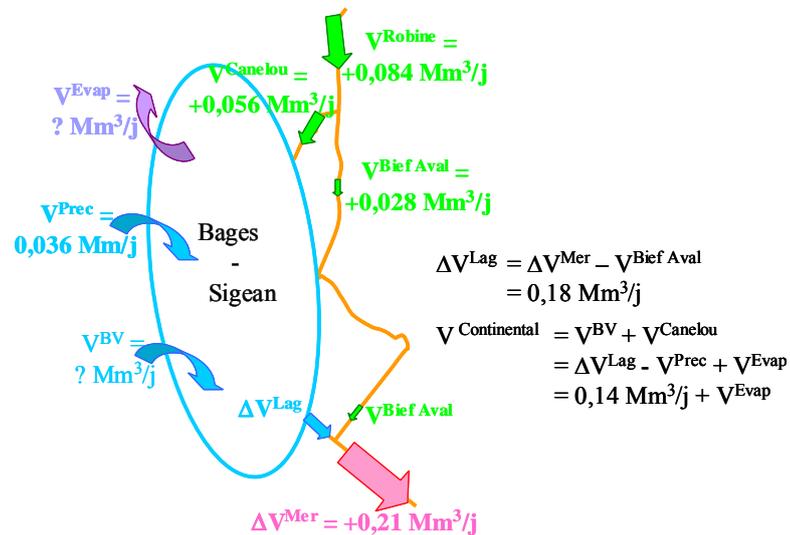


Figure 21 : Schéma conceptuel du bilan hydrique sur la lagune de Bages-Sigean. Les valeurs des volumes journaliers échangés entre la lagune et l'extérieur sont estimées pour les 14 mois de la Période 1.

5.3.3. Vers une première estimation des apports continentaux à la lagune de Bages-Sigean

En l'absence de données des débits des cours d'eau du bassin versant, ces résultats fournissent une base à l'estimation des apports d'eaux continentales à la lagune.

Sur de longues périodes le volume de la lagune reste constant et par conséquent le bilan des volumes d'eau échangés entre la lagune et l'extérieur (son bassin versant, la mer ouverte et l'atmosphère) est nul. Ainsi, sur une période donnée, pour laquelle l'hypothèse de volume constant est acceptable, le bilan net des échanges entre la lagune et la mer ouverte (ΔV^{Lag}) compense exactement les volumes d'eau échangés aux autres interfaces (càd les apports par le bassin versant et les précipitations directes sur la surface de la lagune et les pertes par évaporation - Figure 21).

Le calcul des bilans nets à l'interface « lagune - mer ouverte », complété par les données météorologiques de précipitation et d'évaporation permet ainsi d'estimer les apports d'eaux continentales à la lagune.

Sur la Période 1 les précipitations directes sur la surface de la lagune (3590 ha), ramenées à une moyenne journalière, représentent un apport de 0,036 Mm³/j.

Une estimation du volume journalier évaporé (0,14 Mm³/j) peut être faite à partir de l'évaporation annuelle évaluée à 1,406 m à Gruissan en moyenne sur la période de 1970 à 1991 (BRL/AME, 1999). Ces volumes sont tels qu'ils sont susceptibles de multiplier par un facteur 2 les apports continentaux journaliers. Une attention particulière doit donc être portée à l'estimation des volumes évaporés. Cette estimation, en fonction des saisons, est en cours de réalisation avec la mise en place du modèle LOICZ sur la lagune de Bages-Sigean dans le cadre du volet « Innovation méthodologiques » du Réseau de Suivi Lagunaire.

Les calculs présentés ici constituent une première approche d'une méthode d'estimation des apports maritimes et continentaux à une lagune, basée sur des différences significatives de volumes journaliers entrants et sortants d'une lagune. La pertinence et la robustesse de cette méthode vont être testées dans le cadre du projet « Echanges mer-lagune »⁶. Les connaissances et les données acquises lors de la présente étude ainsi que les résultats du modèle LOICZ appliqué à la lagune de Bages-Sigean (Le Noc, 2010) viendront largement alimenter cette étude de faisabilité.

5.3.4. Conditions d'apparition de profils de courant verticaux cisailés dans le chenal portuaire de Port-La-Nouvelle

Une attention particulière a été portée aux profils verticaux présentant une inversion de courant afin de préciser les limites de calibration de la méthode mises à jour lors des campagnes d'étalonnage.

Dans la majorité des cas (près de 64 %), les profils de courant suivant la verticale sont caractéristiques d'un écoulement barotrope (Configuration 1 -Figure 22), confirmant que la marée constitue le principal forçage de la dynamique des échanges mer-lagune.

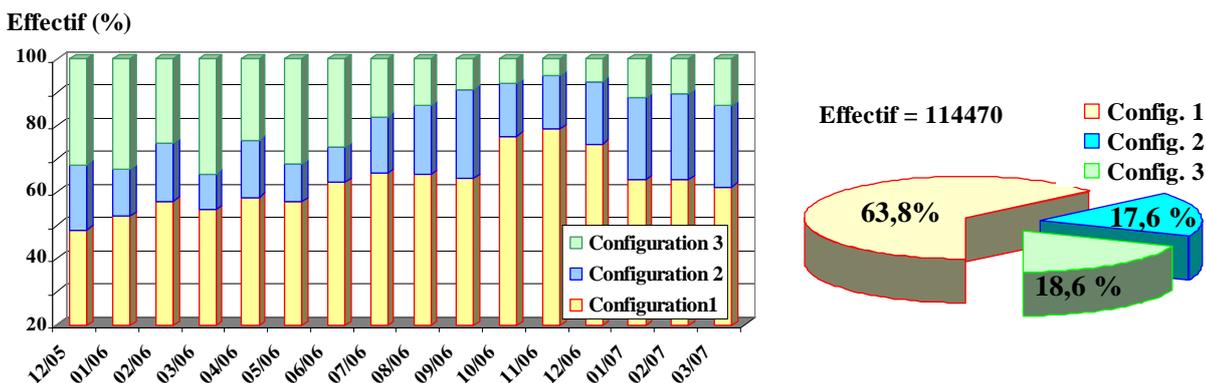


Figure 22 : Répartition, au sein des trois configurations identifiées au §4.1.3, des profils de courant mesurés avec les H-ADCP sur la période du 01/12/2005 au 31/03/2007. A gauche : répartitions mensuelles. A droite : répartition par rapport à l'effectif total. Rappel : Configuration 1 : les courants de surface et de fond sont dirigés dans le même sens et tel que $|V_{surf}| > |V_{fond}|$; Configuration 2 : les courants de surface et de fond sont dirigés dans le même sens mais tel que $|V_{surf}| \leq |V_{fond}|$; Configuration 3 : les courants de surface et de fond sont de sens opposé.

Toutefois, des inversions de courant suivant la verticale (Configuration 3) sont observées dans plus de 18 % des cas (Figure 22).

L'analyse des données acquises sur les 16 mois de suivis confirme les observations faites lors des sessions d'étalonnage, à savoir que ces inversions de courant entre la surface et le fond se produisent généralement au moment des renverses de courant (Figure 19 - courbe orange).

Les situations les plus fréquemment rencontrées sont les suivantes :

- lors de l'inversion de courant à mi-montant (passage de débits sortants à des débits entrants), la renverse des courants commence par la couche de fond. Les courants de

⁶ Projet « Echanges mer-lagunes : Validation d'une méthode d'estimation et définition d'indicateurs associés » co-financé par l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée et Corse (Convention 2010 0034), la Région Languedoc-Roussillon et l'Ifremer.

surface sont encore sortants (positifs) alors que les courants de fond sont déjà entrants (négatifs),

- lors de l'inversion de courant à mi-descendant (passage de débits entrants à des débits sortants), la renverse des courants commencent par la couche de surface. Les courants de fond sont encore entrants (négatifs) alors que les courants de surface sont déjà sortants (positifs).

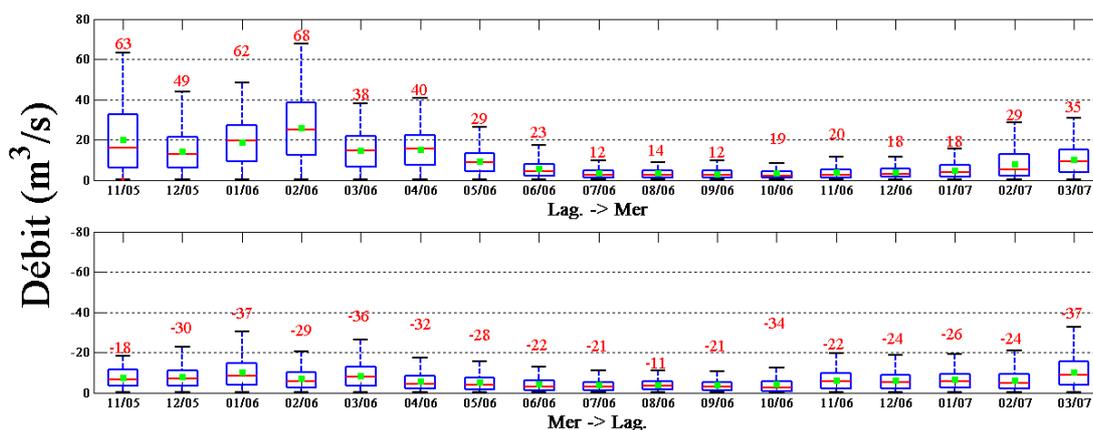


Figure 23 : Distributions mensuelles sur la période du 23/11/2005 au 31/03/2007 des valeurs moyennes, sur les cinq paramétrisations, des débits estimés lorsque les profils verticaux de courant présentent une inversion suivant la verticale (Configuration 3). (En haut) : échanges de la lagune vers la mer. (En bas) : échanges de la mer vers la lagune. Les figures des distributions temporelles des débits pour les configurations 1 et 2 sont en Annexe III.

Ainsi, du fait qu'ils sont généralement enregistrés au moment de renverse de courant, les débits dans la configuration 3 sont faibles (Figure 23). En moyenne sur toute la période étudiée, les débits sortants sont de $13,1 \text{ m}^3/\text{s}$ avec une plage de variation associée de $[-8 \% ; +4,5 \%$]. Les débits moyens entrants sont de $6,6 \text{ m}^3/\text{s}$ $[-19,6 \% ; +7,5 \%$]. Les débits maximaux sortants sont de $68 \text{ m}^3/\text{s}$ $[-10,3 \% ; +7,4 \%$ en février 2006 suite aux fortes pluies des 27-29 janvier, les débits entrants sont aux plus égaux à $37 \text{ m}^3/\text{s}$ $[-8 \% ; +10,8 \%$].

En outre, une variabilité intra-annuelle est mise à jour dans la fréquence d'apparition de ce phénomène. Sur la période de juillet à novembre 2006, les débits estimés (Figure 23) et le nombre de profils dans la configuration 3 (Figure 22) sont significativement plus faibles que sur le reste de la période. L'explication est vraisemblablement à rechercher dans la concomitance de conditions météorologiques de temps calme (vent, pression atmosphérique) et de conditions de marée particulières (mortes-eaux). Toutefois ce lien est loin d'être trivial et nécessite, pour être éventuellement mis à jour, une analyse fine⁷ des variables hydro-climatiques qui agissent en interaction.

5.3.5. Description des courants de marée dans le chenal portuaire de Port-la-Nouvelle

En Méditerranée, la marée est semi-diurne à inégalité diurne : les ondes diurnes et semi-diurnes⁸ sont du même ordre de grandeur, toutefois les ondes 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. Ce

⁷ Analyse de recherche de corrélation entre des séries temporelles avec des outils de traitement du signal

⁸ Les harmoniques diurnes (respectivement semi-diurnes) sont des ondes de période voisine de 24 h (respectivement 12 h).

signal de marée semi-diurne à inégalité diurne, de période proche de 24h50, est clairement identifiable sur les mesures de hauteur d'eau du mois de juin 2006 (Figure 24).

Une onde de marée, qui en l'absence d'obstacle prend la forme d'une **onde progressive**, est telle que le **flot** (resp. le jusant) **atteint son maximum au moment de la pleine-mer** (resp. la basse-mer). En présence d'une côte, l'onde de marée donne naissance à une onde réfléchie qui, en interférant avec l'onde incidente, génère une **onde stationnaire**. Dans ce cas, le **flot** (resp. le jusant) **s'annule au moment de la pleine-mer** (resp. la basse-mer). En présence d'un obstacle (tel qu'un grau), on observe généralement une situation intermédiaire avec la superposition d'ondes stationnaires et progressives et un déphasage entre les signaux de courant et de hauteur d'eau. Le **flot** est **maximum entre le mi-montant et la pleine mer** c'est-à-dire qu'il est **en avance de phase** par rapport au maximum de la **hauteur d'eau**.

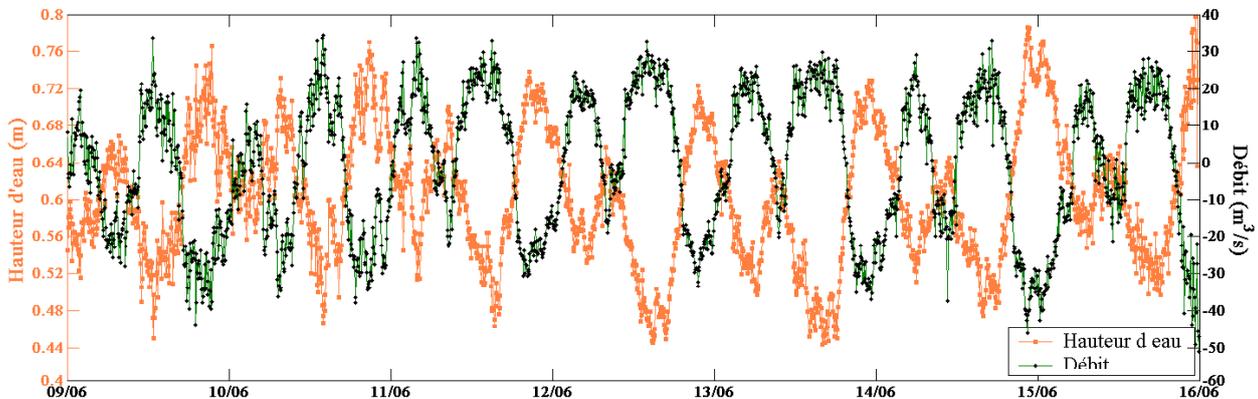


Figure 24 : Evolution temporelle des hauteurs d'eau (courbe orange) et des débits instantanés estimés (courbe noire) sur la période du 06/06 au 13/06/2006.

Or les évolutions temporelles des hauteurs d'eau et des débits acquis sur 16 mois dans le chenal portuaire de Port-La-Nouvelle mettent à jour des signaux en opposition de phase, à savoir que les instants des débits maximaux sortants (positifs) et entrants (négatifs) sont quasi simultanés aux instants des basses mers et hautes mers (Figure 24). **L'onde de marée qui se propage dans le chenal portuaire de Port-La-Nouvelle est donc une onde progressive peu perturbée par la lagune.**

Sur les 16 mois de mesures, les déphasages entre les instants des extrema des hauteurs d'eau et des débits sont centrés autour d'une valeur moyenne proche de zéro (+6 mn) et 75% des valeurs sont inférieures à 2 heures.

6. Conclusion

Les travaux présentés dans le présent rapport finalisent l'étude engagée dans le cadre de l'Axe 1 : « *Amélioration des connaissances et compréhension des processus concernant le fonctionnement et le devenir du littoral méditerranéen* » de la Convention Cadre entre l'Ifremer et l'Agence de l'Eau Rhône Méditerranée et Corse portant sur le « *Développement de modèle hydrodynamiques et hydrosédimentaires sur les masses d'eau de transition* ».

Au terme de cette étude, nous disposons d'une **méthode de jaugeage des débits en canal**, opérationnelle dans la majorité des configurations de profils verticaux de courant rencontrées. Le chenal portuaire de Port-La-Nouvelle, unique voie de communication entre la lagune de Bages-Sigean et la Méditerranée, a été retenu comme site pilote pour la mise au point de la méthode. La définition d'un protocole de déploiement des appareils de mesures, la mise à jour des besoins en terme de stratégie d'échantillonnage et la chaîne de traitement automatisée des données acquises sont aujourd'hui disponibles et font que cette méthode est applicable sur d'autres sites lagunaires (Salses-Leucate, Diana, le grau de Carnon, ...).

Une première application en routine de cette méthode a été réalisée entre décembre 2005 et mars 2007 sur le site pilote de Port-La-Nouvelle. A notre connaissance, il n'existait pas ou peu de données permettant de caractériser les échanges mer-lagune dans ce chenal portuaire. L'analyse des données de débits, de courants à deux profondeurs⁹ et de hauteurs d'eau acquises durant 16 mois a permis de mieux appréhender le fonctionnement hydraulique de ce grau (propagation de l'onde de marée, mise en place d'une inversion de courant sur la verticale lors des renverses de marée...). Nous avons eu, en outre, l'opportunité d'échantillonner les débits lors d'un événement pluvieux exceptionnel (fin janvier –début février 2006).

Les séries temporelles, en haute fréquence (pas de temps de 5 mn), de hauteur d'eau et de débit dans le chenal portuaire de Port-La-Nouvelle constituent une base de données qui permettra de forcer, calibrer et valider le modèle hydrodynamique MARS-3D appliqué sur la lagune de Bages-Sigean. Une première application de ce modèle validé sera, en collaboration avec le PNR, d'étudier l'impact de l'enlèvement des anciennes piles du pont SNCF sur le fonctionnement écologique de l'écosystème (temps de renouvellement, « salinisation » de l'étang...).

Cette étude a également mis à jour les ordres de grandeur des volumes journaliers entrants et sortants de la lagune de Bages-Sigean sous différents régimes hydro-climatiques. En particulier, une première estimation des temps de renouvellement a montré que l'événement pluvieux exceptionnel du début d'année 2006 serait susceptible de renouveler la totalité des eaux de la lagune.

L'acquisition de connaissances et de données sur le fonctionnement des échanges hydriques entre une lagune et la mer, ainsi que le développement de méthodes robustes et applicables en routine d'acquisition de données de débits dans les graus des lagunes présentent, dans les contextes européen (Directive Cadre sur l'Eau)¹⁰ et régional (Réseau de Suivi Lagunaire), un intérêt indéniable. Ainsi, l'Agence de l'Eau¹⁰, la Région Languedoc-Roussillon¹¹ et l'Ifremer

⁹ Les données de courant à deux profondeurs, non décrites dans le présent rapport, ont été transmises à Mr PUJOL, Responsable du Pôle Territorial de Port-La-Nouvelle (gestionnaire du port pour la Région Languedoc-Roussillon). L'analyse de ces données devraient leur permettre d'aider à la manœuvre des cargos dans cette zone portuaire en particulier lorsque les profils verticaux de courants présentent un cisaillement.

¹⁰ Convention n° 2010 0034 entre l'Agence de l'Eau RM&C et l'Ifremer : « *Echanges mer-lagunes : validation d'une méthode d'estimation et définition d'indicateurs associés* ».

lancent une nouvelle étude visant à construire puis évaluer, sur les lagunes méditerranéennes identifiées par la DCE comme masses d'eau de transition, des indicateurs hydro-morphologiques ou plus précisément selon la terminologie DCE, « *des facteurs physiques ayant un impact potentiel sur la structure et la composition des peuplements biologiques* ». Les connaissances et données maintenant disponibles sur la lagune de Bages-Sigean viendront largement alimenter cette étude.

¹¹ Convention entre la Région Languedoc-Roussillon et l'Ifremer :« *Validation d'une méthode simple d'estimation des volumes journaliers entrants et sortants des lagunes à partir de mesures de hauteur d'eau et part et d'autre des graus* ».

7. Références bibliographiques

- Anonyme, 2002, WorkHorse Sentinel ADCP User's guide. *In* RDInstruments, San Diego, California, USA, 957-6163-00, 40 p.
- Anonyme, 2005. WinH-ADCP user's guide. *In* RDInstruments, 95B-6000-00, 40 p.
- Anonyme, 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.
- BRL/AME, 1999. Définition d'un plan de gestion des apports trophiques du canal de la Robine dans l'étang de Bages-Sigean. 61 p. + Annexes.
- 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.
- Lagarde F., Fiandrino A., Le Gall P., Roucher B., 2006. Application de la méthode de l'Index Velocity pour la mesure de débits dans le canal portuaire de Port La Nouvelle ; limites, contraintes et perspectives. Poster conférence Atelier Expérimentation et Instrumentation 2006.
- Le Noc S., 2010. Développement d'outils d'aide à la gestion des milieux eutrophisés : application du modèle LOICZ aux lagunes de Thau et Bages-Sigean. Rapport de stage de Master II Gestion des Littoraux et des mers. 95 p + Annexes.
- Michel L., *Sine data*. Hardware. *In* RDI Europe, La Gaude, France, 12 p.
- Pineiro G., Perelman S., Guerschman J. P., Paruelo J. M., 2008. How to evaluate models: Observed vs. predicted or predicted vs. observed? *Ecol. Model.* 216, 316-322.
- RSL, 2006, Réseau de Suivi Lagunaire du Languedoc Roussillon, bilan de résultats 2006, Rapport Scientifique et Technique RST/LER/LR//7-06 ; RSL-07/2007. pp 120-121.
- Rantz S.E., 1982. Measurement and Computation of Streamflow. *In* USGS, Washington, USA, volume 1, 313 p.
- RD Instruments, 2005. Acoustic Doppler Current Profilers, *Sine loco*, [page consultée le 01/06/03]. Disponible à l'adresse web : <http://www.rdinstruments.com/>
- Roucher B., 2005. Mise en place, étalonnage et collecte des données de courantomètres à effet Doppler dans le grau de Port La Nouvelle. Rapport de stage de fin d'études, Intechmer/Ifremer LERLR. 40 p.
- Scherrer B., 1984. Biostatistique. *Ed* Gaëtan Morin. Paris, 850 p.

ANNEXES

ANNEXE I : Conditions météorologiques rencontrées sur la période étudiée.

A.I.1. Vent et pression atmosphérique enregistrés à la station Météo-France de Leucate lors des sessions d'étalonnage des débits dans le chenal portuaire de Port-La-Nouvelle

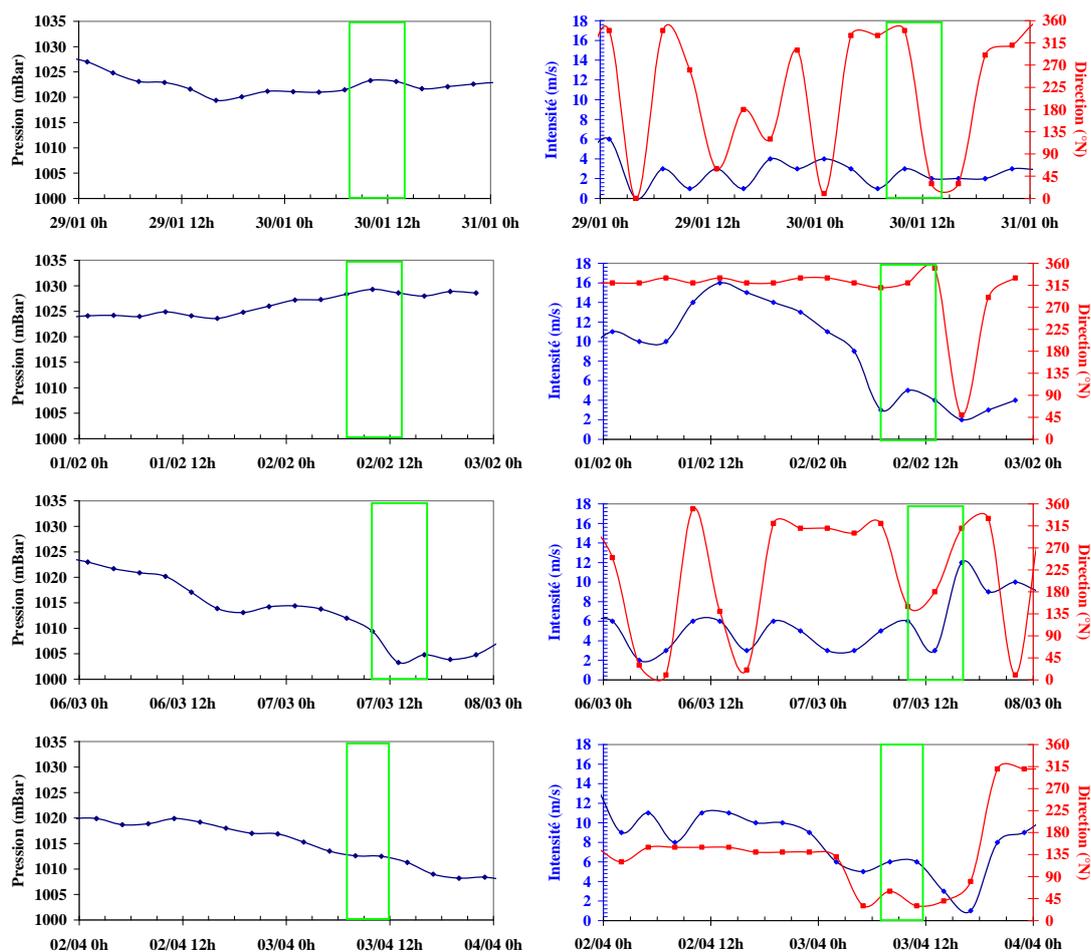


Figure I.1 : Evolution temporelle (à gauche) de la pression atmosphérique et (à droite) du vent (intensité et direction) mesurés à la station Météo France de Leucate les 30/01/07, 02/02/07, 07/03/07, 03/04/07.

A.I.2. Précipitations enregistrées à la station Météo-France de Narbonne sur la période du 01/12/2005 au 31/03/2007

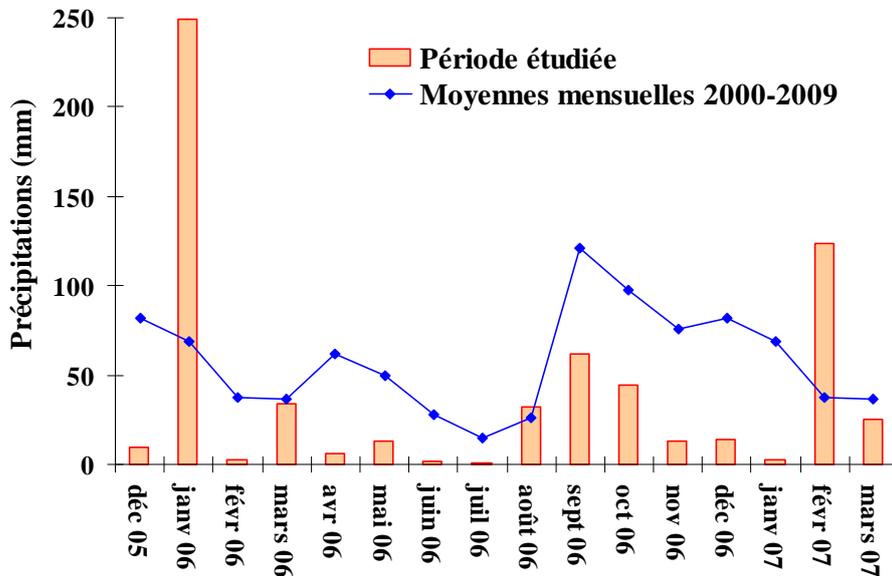


Figure I.2 : Histogramme des précipitations mensuelles enregistrées à la station Météo France sur la période du 01/12/2005 au 31/03/2007. Les précipitations mensuelles moyennes sur la période 2000-2009 sont représentées par la courbe bleue.

Les débits les plus importants enregistrés dans le chenal portuaire de Port-La-Nouvelle sont survenus lors de l'événement pluvieux qui a eu lieu entre le 29 janvier et le 8 février 2006. Cet événement pluvieux a été particulièrement intense avec un cumul des précipitations de 180 mm sur trois jours entre le 27 et le 29 janvier, dont 163 mm pour la seule journée de 29 janvier. En outre, le mois de janvier 2006 a été exceptionnellement pluvieux avec un cumul des précipitations mensuelles de 249 mm. Notons, à titre de comparaison qu'en moyenne sur les années 2000-2009 les précipitations pour ce mois sont de 79 mm (Ifremer, 2010). De même, avec un cumul de 123 mm, le mois de février 2007 affiche une pluviométrie deux fois supérieure à la moyenne mensuelle sur les 10 dernières années.

A l'inverse, les 13 autres mois de l'étude sont déficitaires comparativement aux moyennes mensuelles calculées sur la période 2000-2009.

ANNEXE II : Débits estimés lors des sessions d'étalonnage avec les 5 aires de référence

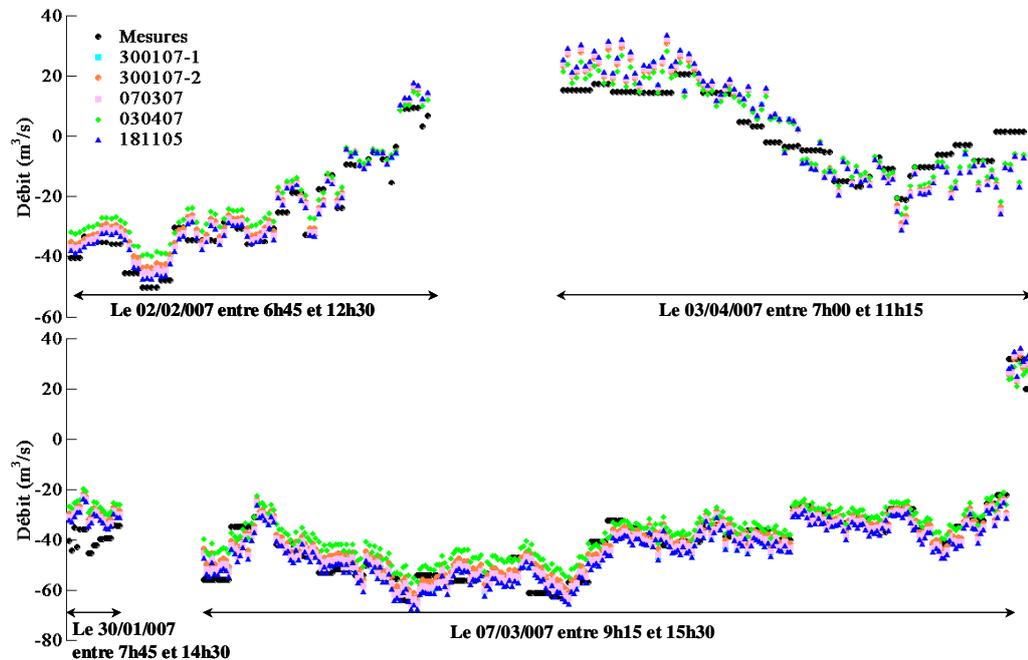


Figure II.1 : Comparaison des débits mesurés et estimés avec les cinq paramétrisations d'aire utilisées, lorsque les courants de surface et de fond sont dans la Configuration 1. (En haut) : jeu de données de calibration ; (En bas) : jeu de données de validation.

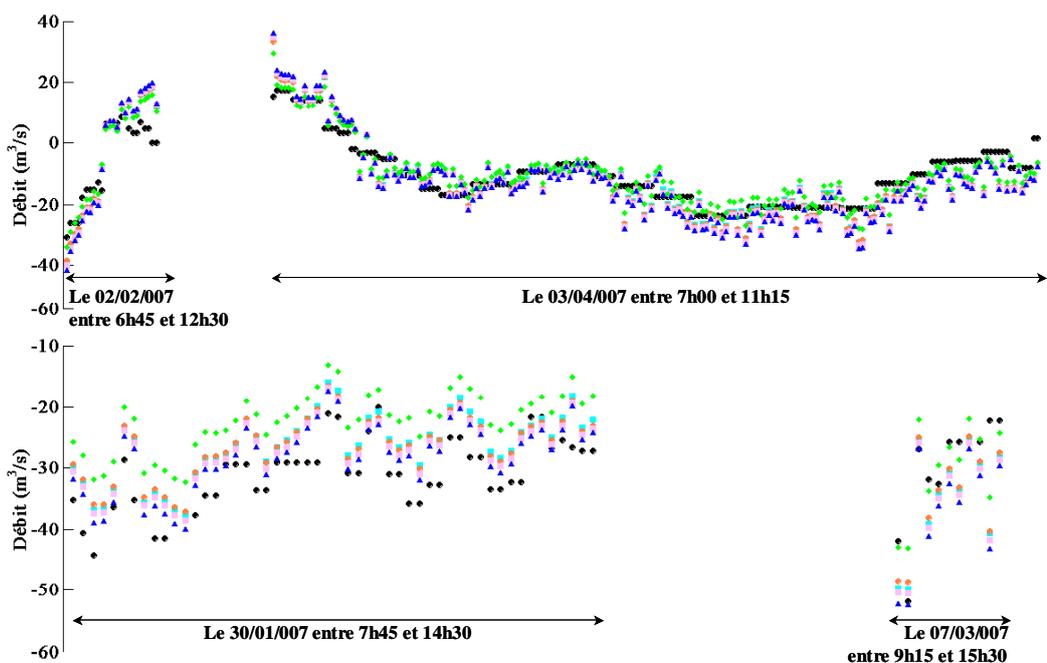


Figure II.2 : Comparaison des débits mesurés et estimés avec les cinq paramétrisations d'aire utilisées, lorsque les courants de surface et de fond sont dans la Configuration 2. (En haut) : jeu de données de calibration ; (En bas) : jeu de données de validation. La légende est identique à celle de la Figure II.1.

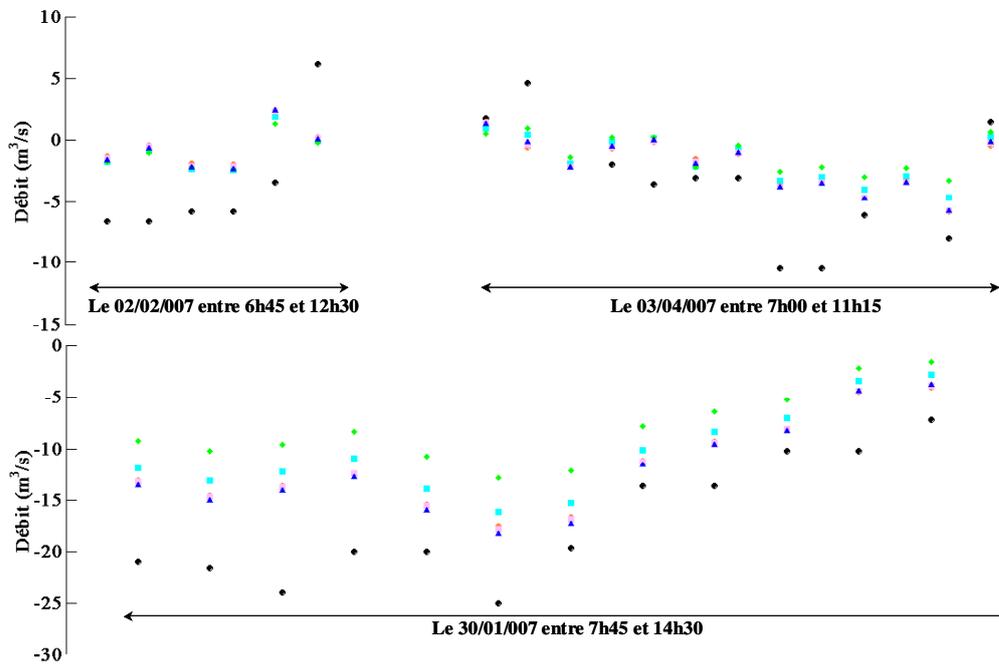


Figure II.3 : Comparaison des débits mesurés et estimés avec les cinq paramétrisations d'aire utilisées, lorsque les courants de surface et de fond sont dans la Configuration 3. (En haut) : jeu de données de calibration ; (En bas) : jeu de données de validation. La légende est identique à celle de la Figure II.1

ANNEXE III : Débits estimés à l'aide de méthode développée par le LER-LR sur la période du 1^{er} décembre 2005 au 31 mars 2007

A.III.1. Distributions mensuelles des débits estimés dans les configurations de profils verticaux de courant 1 et 2

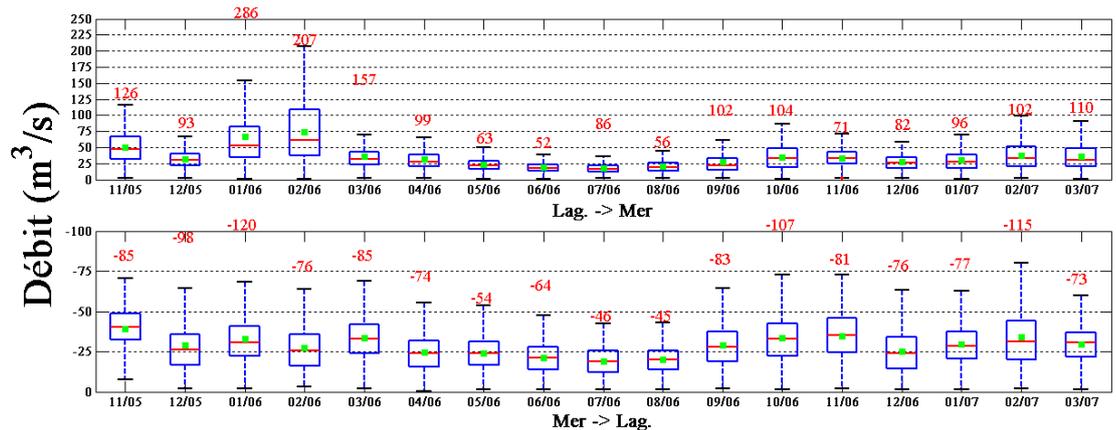


Figure III.1.1 : Distributions mensuelles, sur la période du 23/11/2005 au 31/03/2007, des débits estimés lorsque les profils verticaux de courant présentent une inversion suivant la verticale (Configuration 1). (En haut) : échanges de la lagune vers la mer. (En bas) : échanges de la mer vers la lagune. Les carrés verts représentent la valeur moyenne des débits calculée par mois.

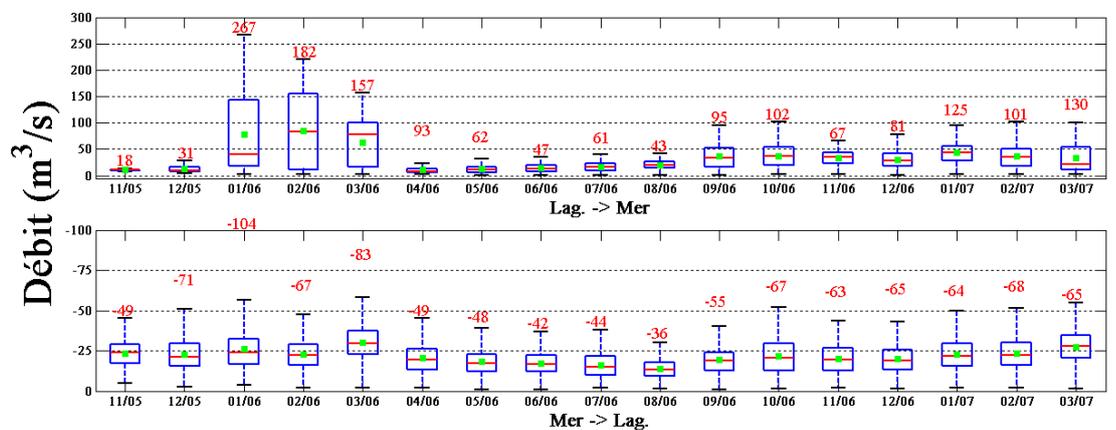


Figure III.1.2 : Distributions mensuelles, sur la période du 23/11/2005 au 31/03/2007, des débits estimés lorsque les profils verticaux de courant présentent une inversion suivant la verticale (Configuration 2). (En haut) : échanges de la lagune vers la mer. (En bas) : échanges de la mer vers la lagune. Les carrés verts représentent la valeur moyenne des débits calculée par mois.

A. III.2. Evolutions temporelles des débits estimés pour les 16 mois de suivi

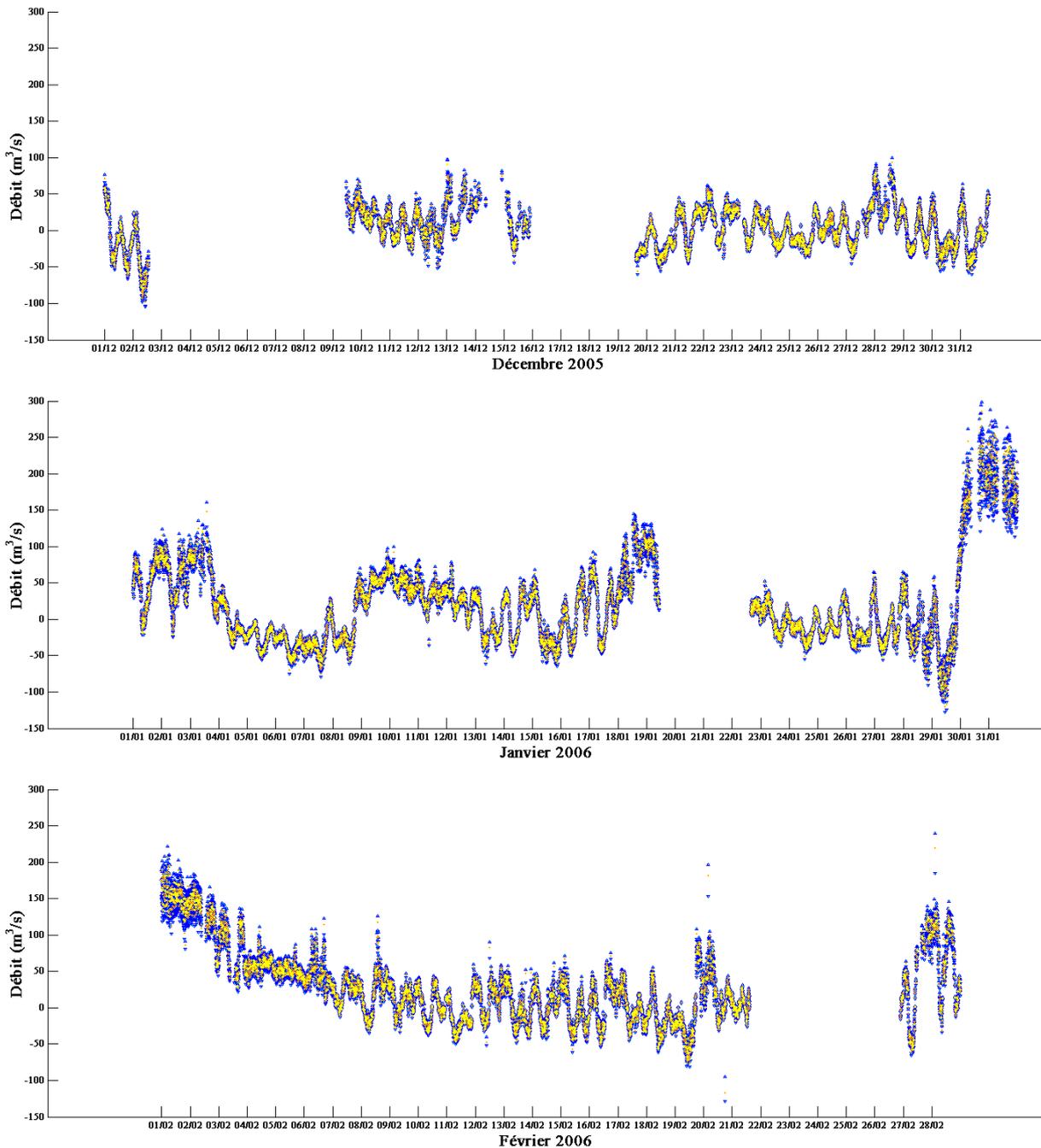


Figure III.2.1 : Evolution temporelle des débits instantanés estimés pour les mois de décembre 2005 et janvier et février 2006. Valeurs moyennes (jaune) et extrémales (bleues) des débits calculées à partir des cinq paramétrisations d'aire.

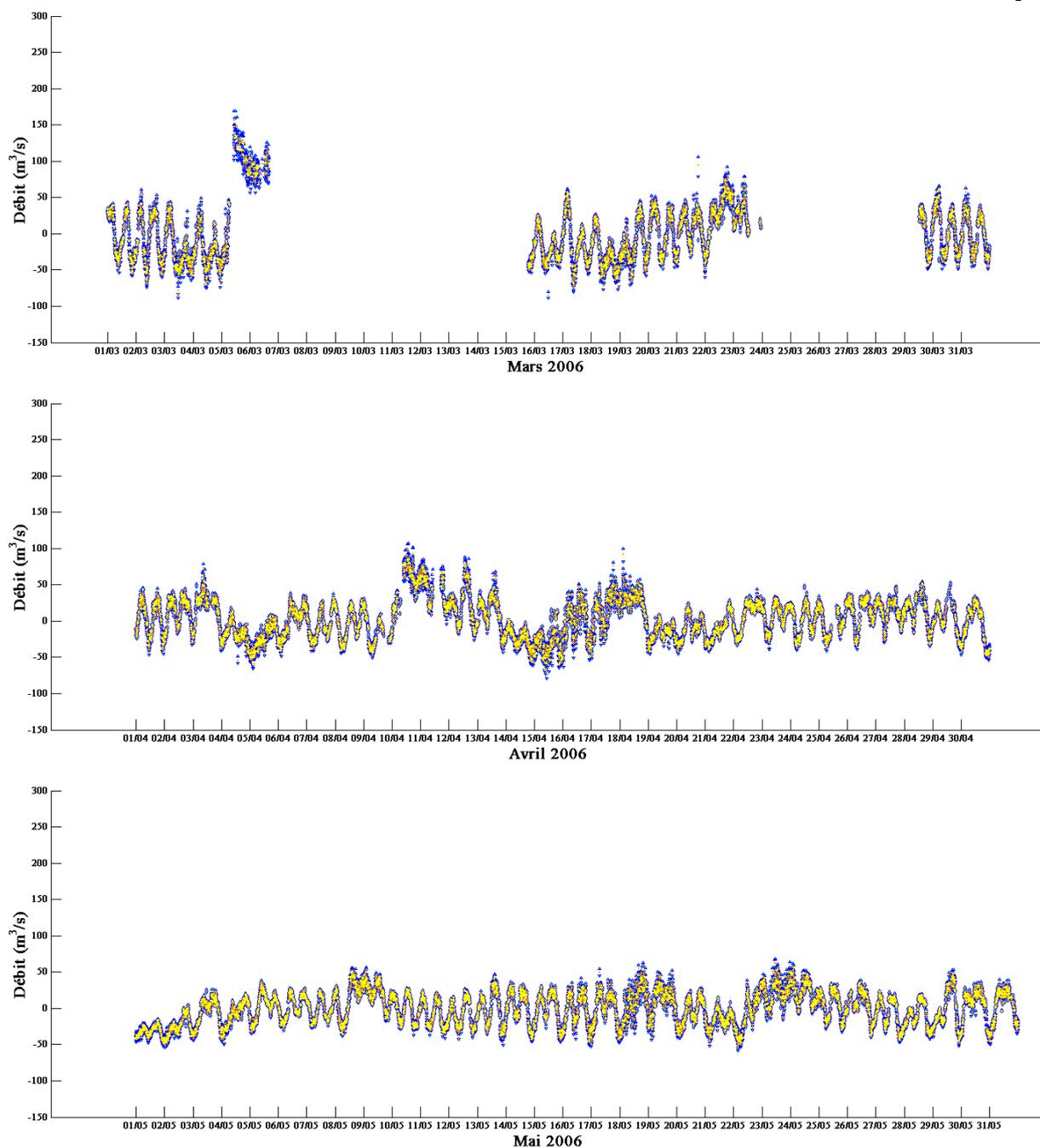


Figure III.2.2 : Evolution temporelle des débits instantanés estimés pour les mois mars, avril, mai 2006. Valeurs moyennes (jaune) et extrémales (bleues) des débits calculées à partir des cinq paramétrisations d'aire.

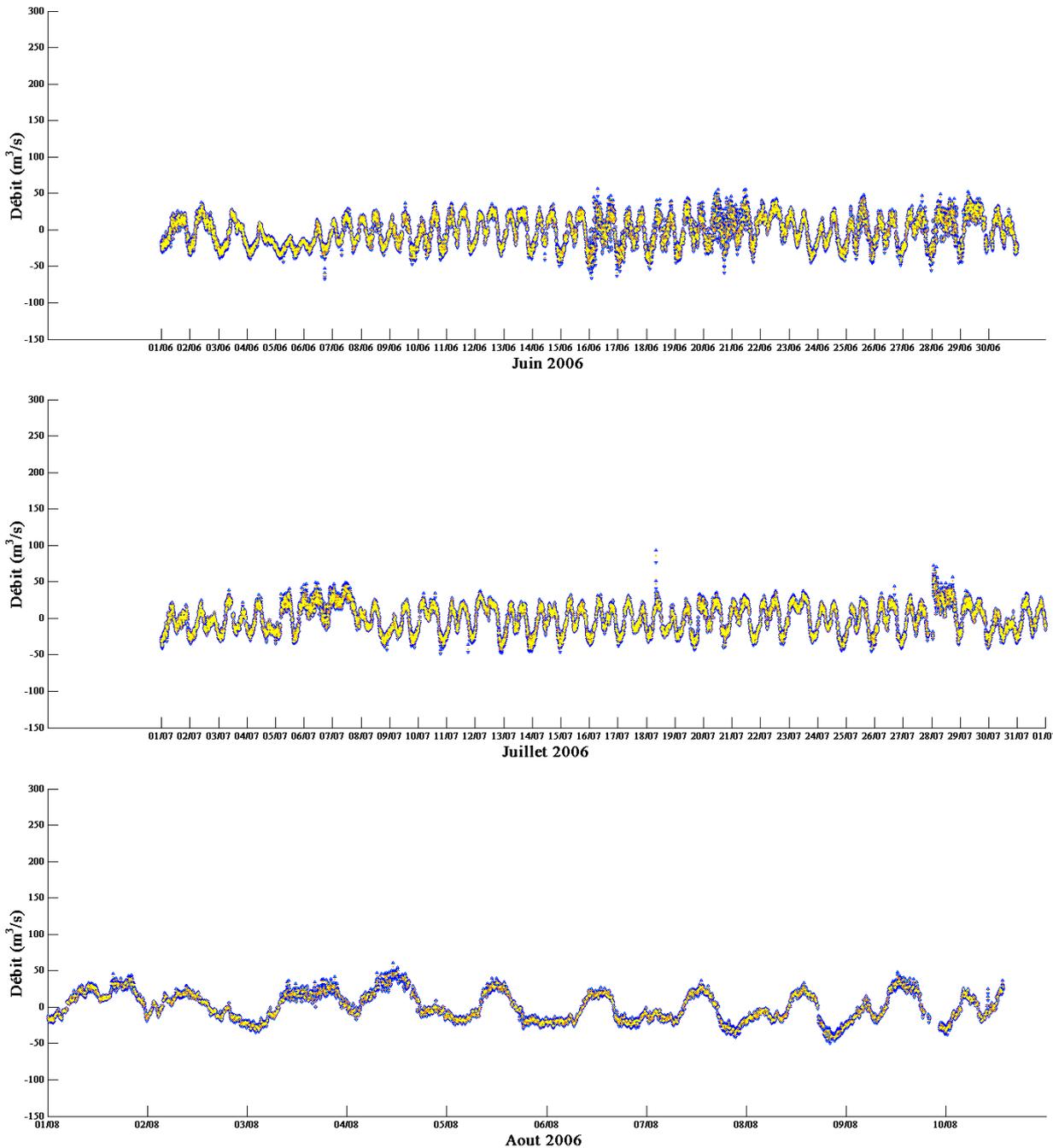


Figure III.2.3 : Evolution temporelle des débits instantanés estimés pour les mois juin, juillet, août 2006. Valeurs moyennes (jaune) et extrémales (bleues) des débits calculées à partir des cinq paramétrisations d'aire.

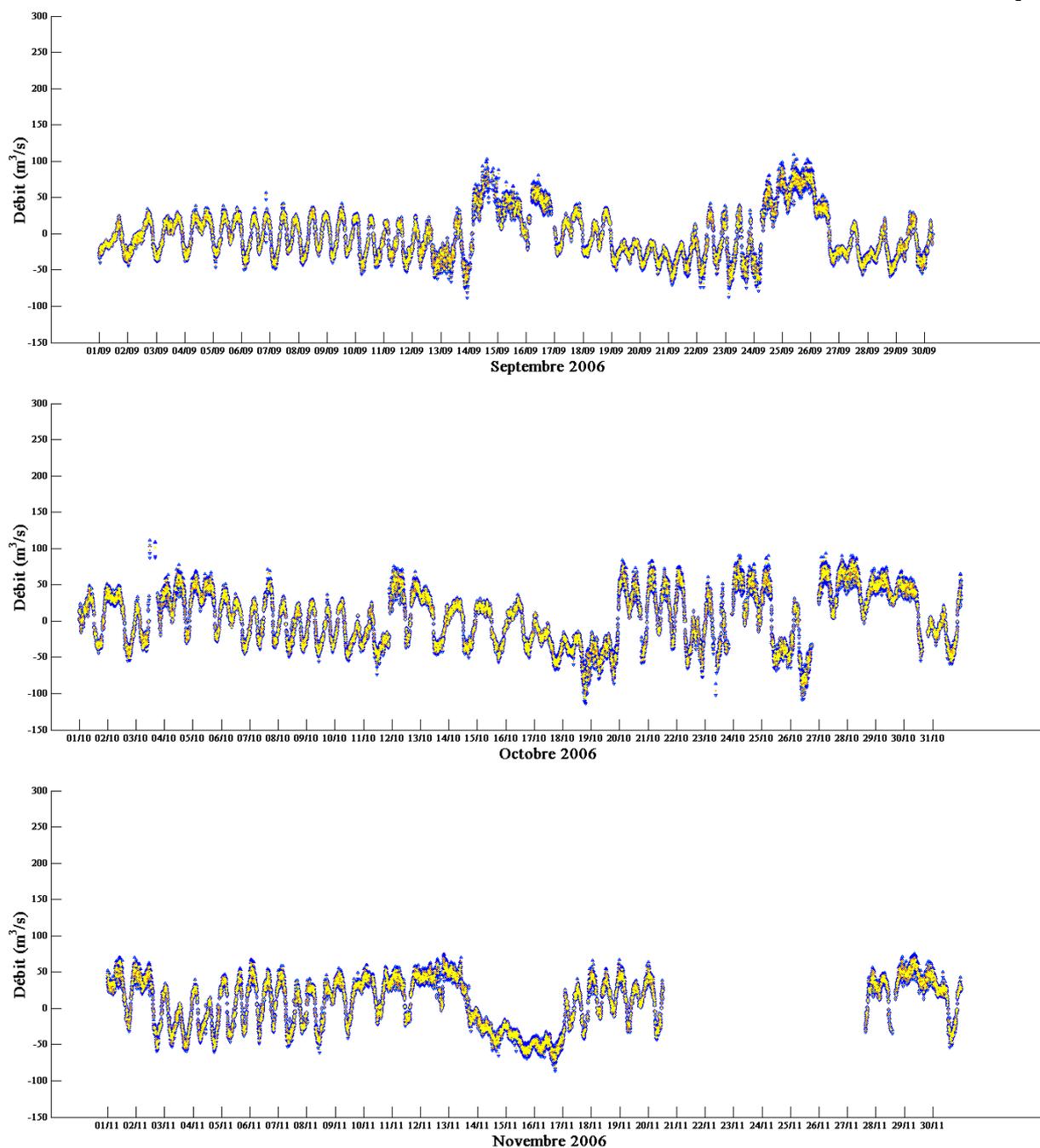


Figure III.2.4 : Evolution temporelle des débits instantanés estimés pour les mois septembre, octobre, novembre 2006. Valeurs moyennes (jaune) et extrémales (bleues) des débits calculées à partir des cinq paramétrisations d'aire.

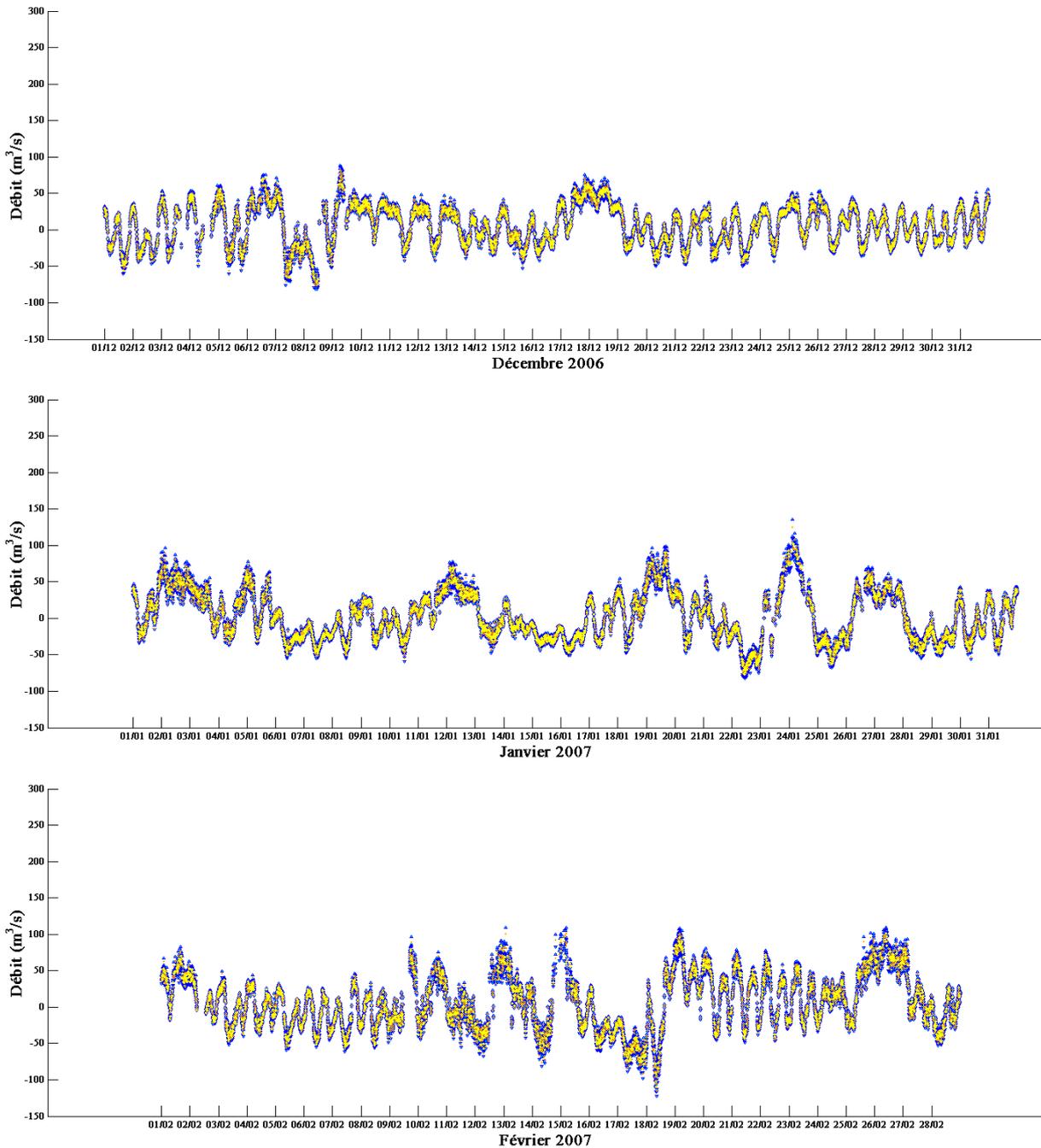


Figure III.2.5 : Evolution temporelle des débits instantanés estimés pour les mois décembre 2006 et janvier et février 2007. Valeurs moyennes (jaune) et extrémales (bleues) des débits calculées à partir des cinq paramétrisations d'aire.

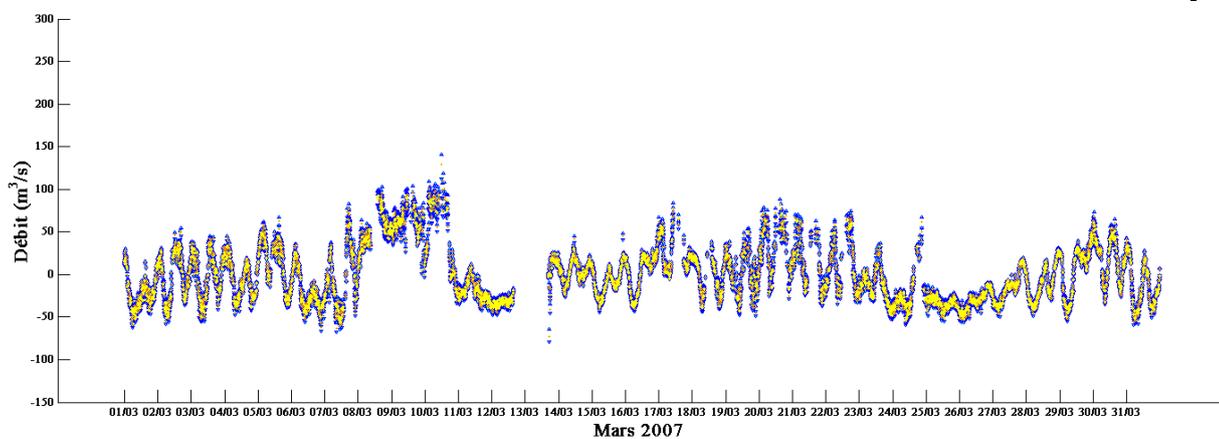


Figure III.2.6 : Evolution temporelle des débits instantanés estimés pour le mois de mars 2007. Valeurs moyennes (jaune) et extrémales (bleues) des débits calculées à partir des cinq paramétrisations d'aire.

ANNEXE IV : Bilans journaliers nets, entrants et sortants des échanges entre la lagune de Bages-Sigean et la mer sur la période du 1^{er} décembre 2005 au 31 mars 2007

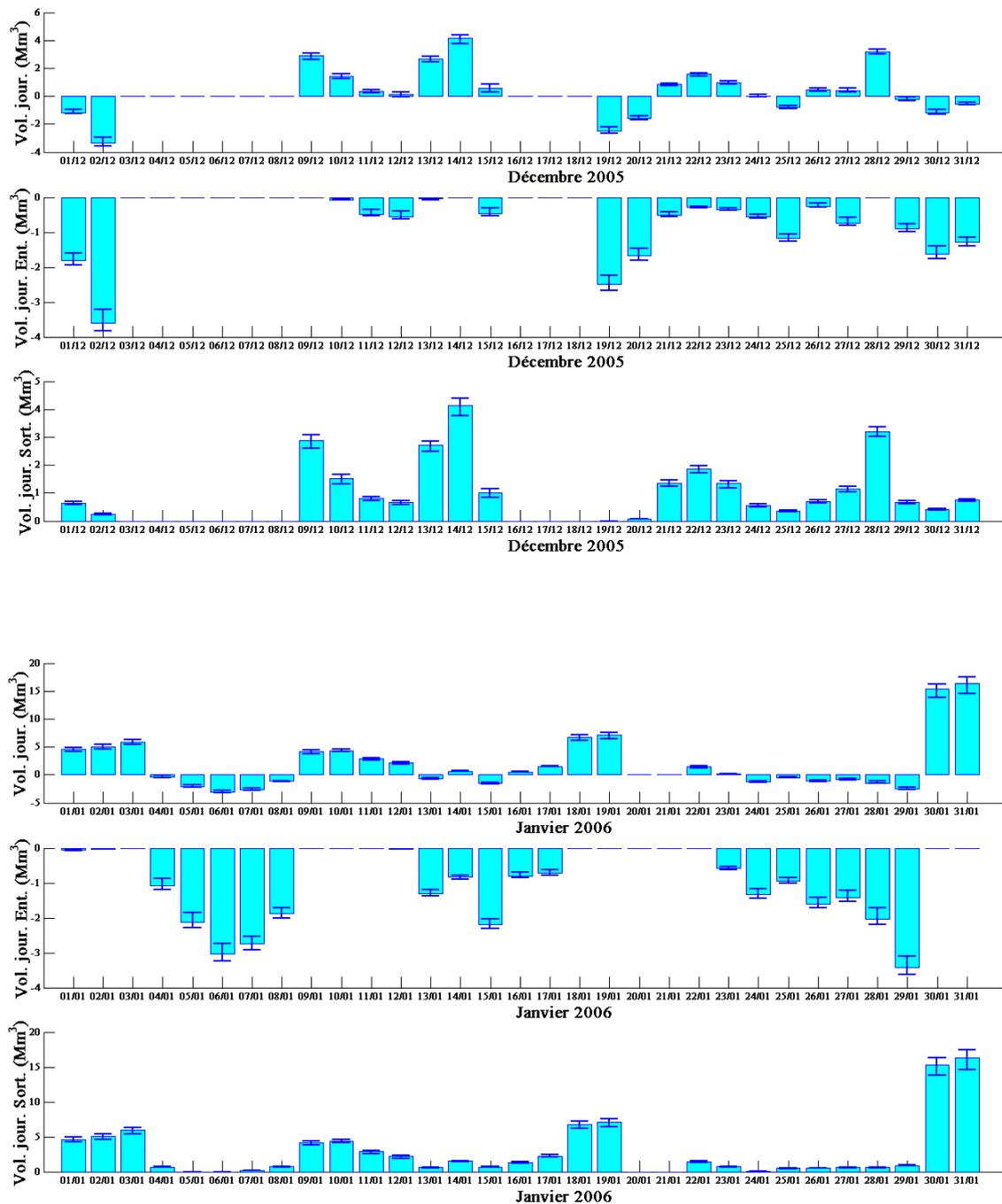


Figure IV.1 : Bilan net des échanges mer-lagune (en haut) et des volumes journaliers entrants et sortants de la lagune de Bages-Sigean pour le mois de décembre 2005 et janvier 2006. Valeurs moyennes (histogramme) et extrêmes (barre d'erreur) calculées à partir des cinq paramétrisations d'aire.

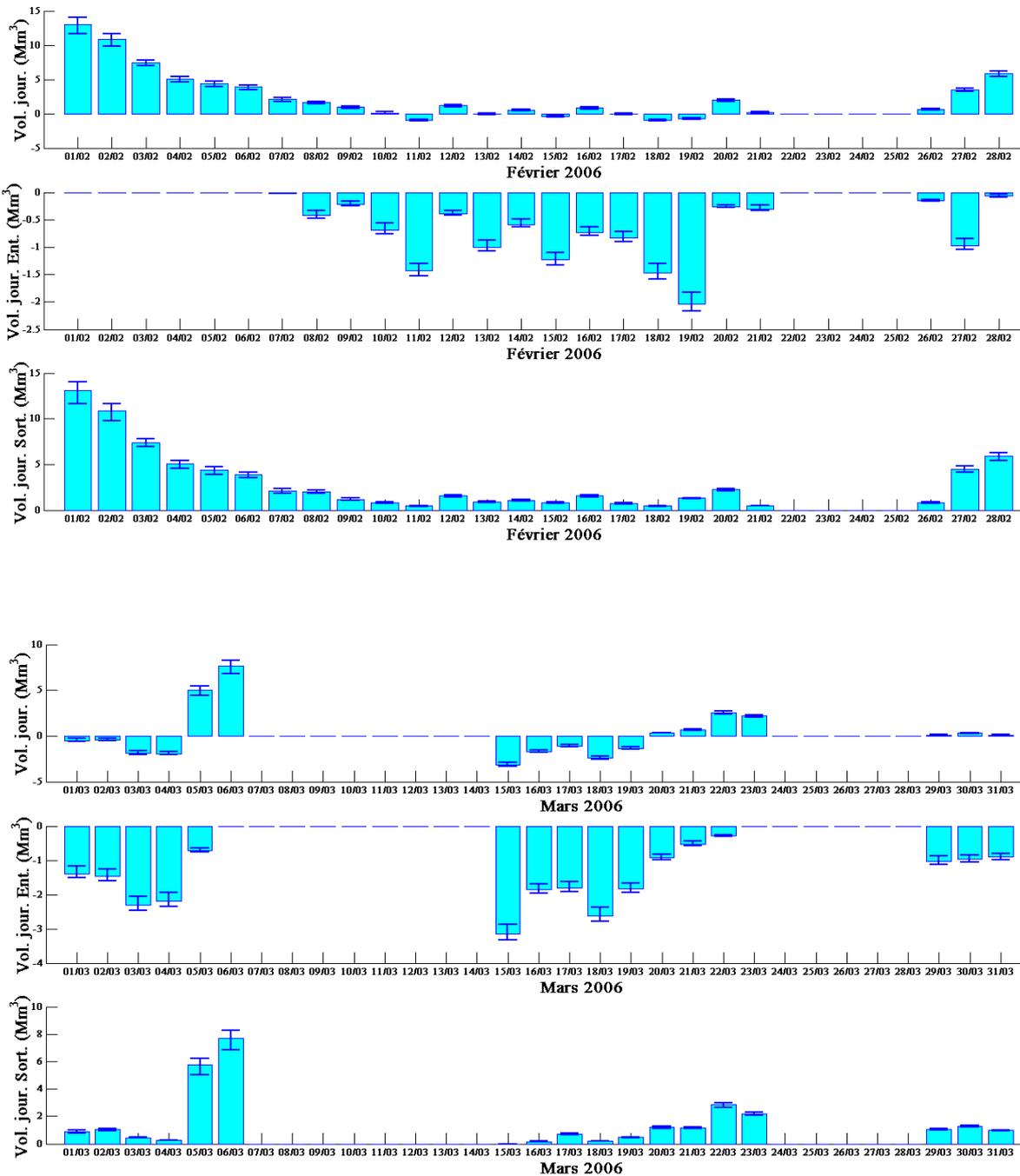


Figure IV.2 : Bilan net des échanges mer-lagune (en haut) et des volumes journaliers entrants et sortants de la lagune de Bages-Sigean pour le mois de février et mars 2006. Valeurs moyennes (histogramme) et extrêmes (barre d'erreur) calculées à partir des cinq paramétrisations d'aire.

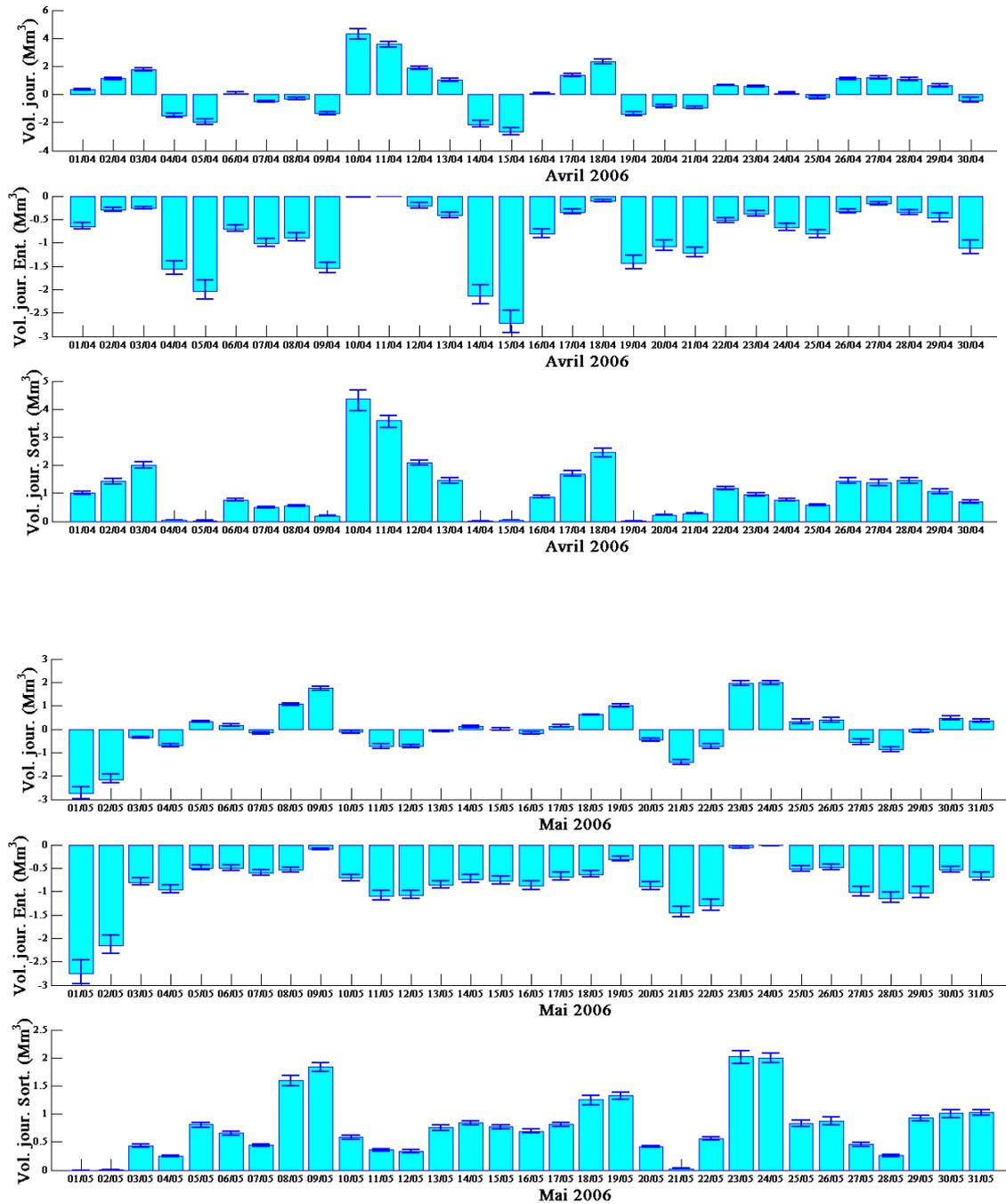


Figure IV.3 : Bilan net des échanges mer-lagune (en haut) et des volumes journaliers entrants et sortants de la lagune de Bages-Sigean pour le mois d'avril et mai 2006. Valeurs moyennes (histogramme) et extrêmes (barre d'erreur) calculées à partir des cinq paramétrisations d'aire.

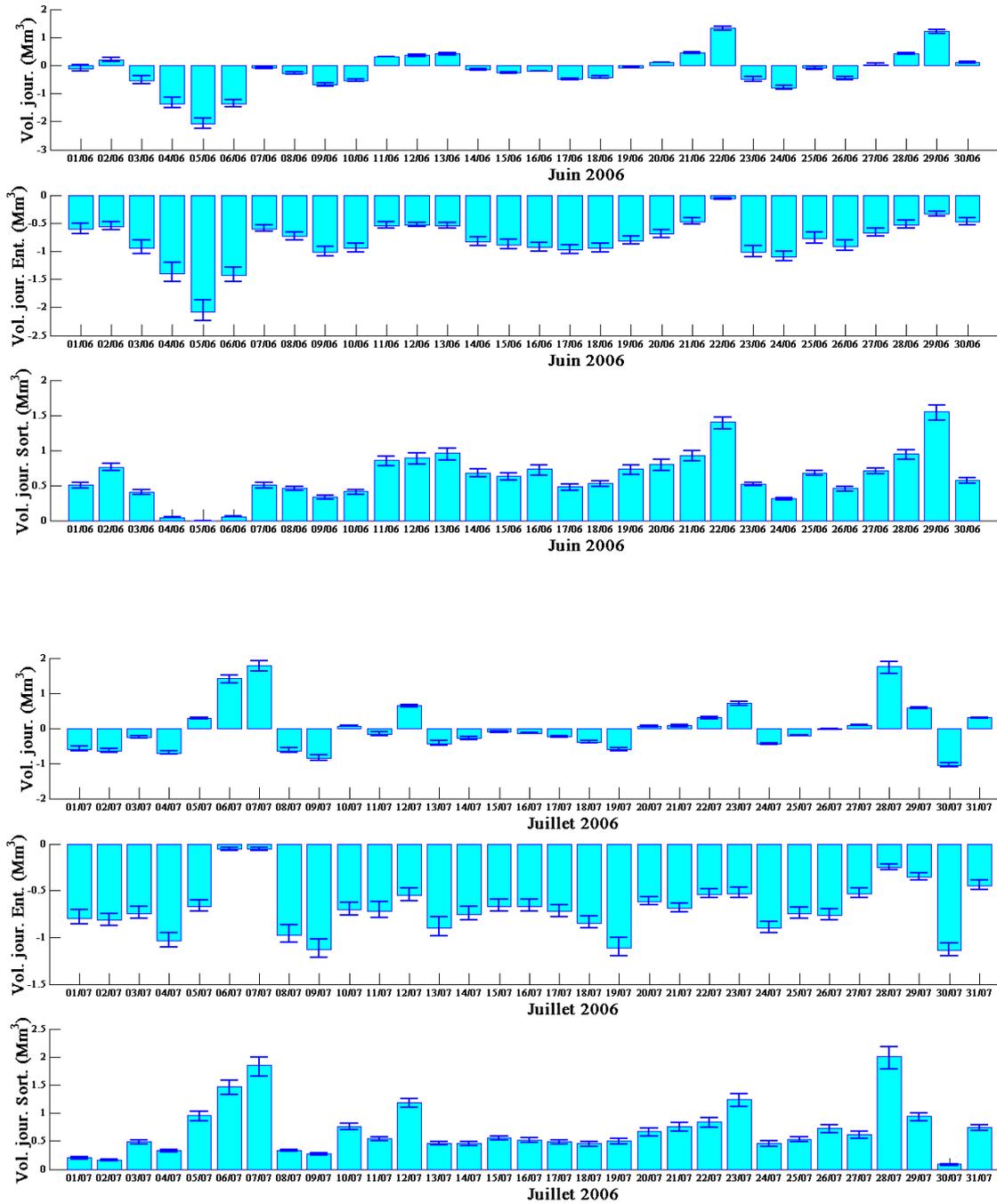


Figure IV.4 : Bilan net des échanges mer-lagune (en haut) et des volumes journaliers entrants et sortants de la lagune de Bages-Sigean pour le mois de juin et juillet 2006. Valeurs moyennes (histogramme) et extrêmes (barre d'erreur) calculées à partir des cinq paramétrisations d'aire.

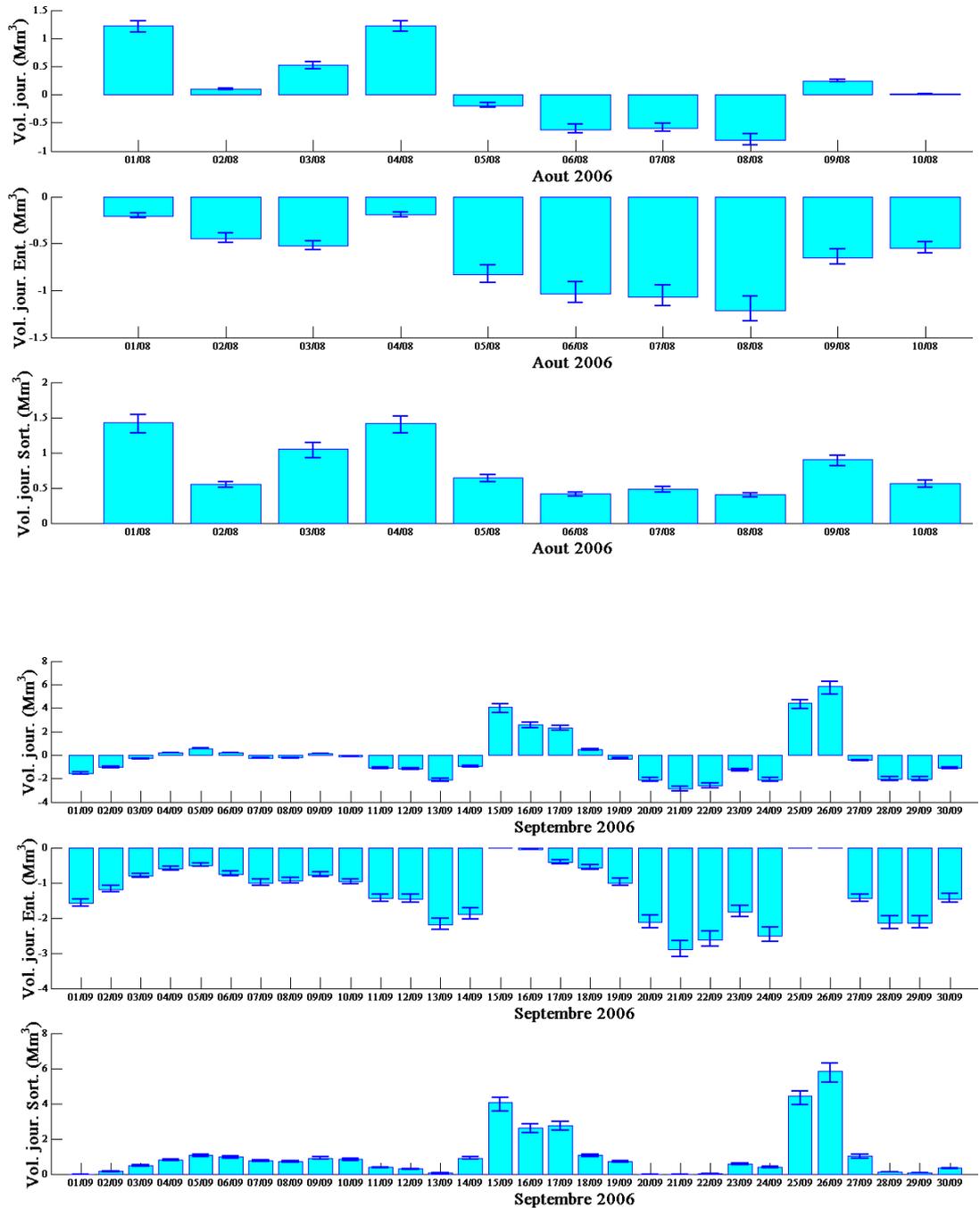


Figure IV.5 : Bilan net des échanges mer-lagune (en haut) et des volumes journaliers entrants et sortants de la lagune de Bages-Sigean pour le mois d'août et septembre 2006. Valeurs moyennes (histogramme) et extrêmes (barre d'erreur) calculées à partir des cinq paramétrisations d'aire.

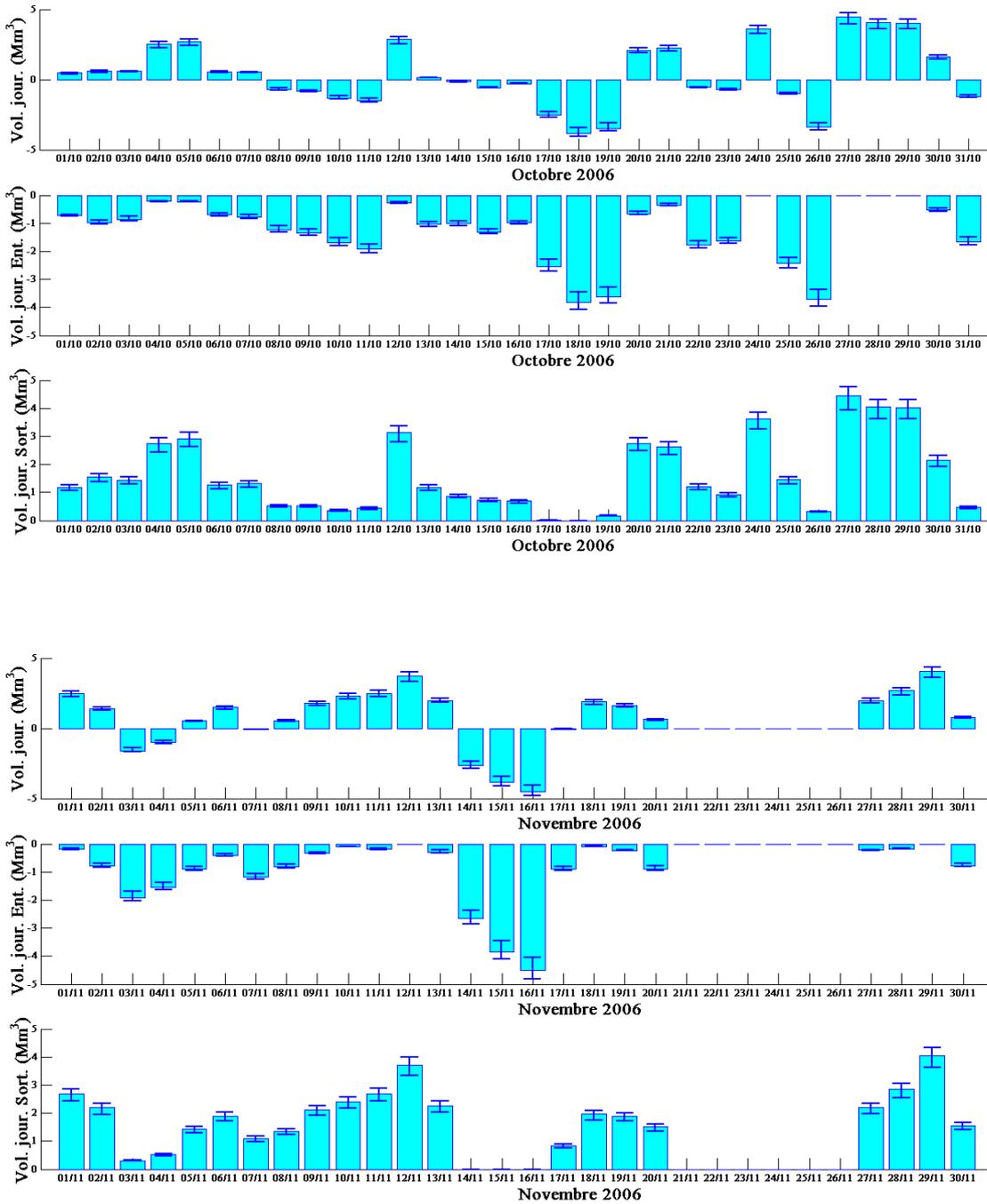


Figure IV.6 : Bilan net des échanges mer-lagune (en haut) et des volumes journaliers entrants et sortants de la lagune de Bages-Sigean pour le mois d'octobre et novembre 2006. Valeurs moyennes (histogramme) et extrêmes (barre d'erreur) calculées à partir des cinq paramétrisations d'aire.

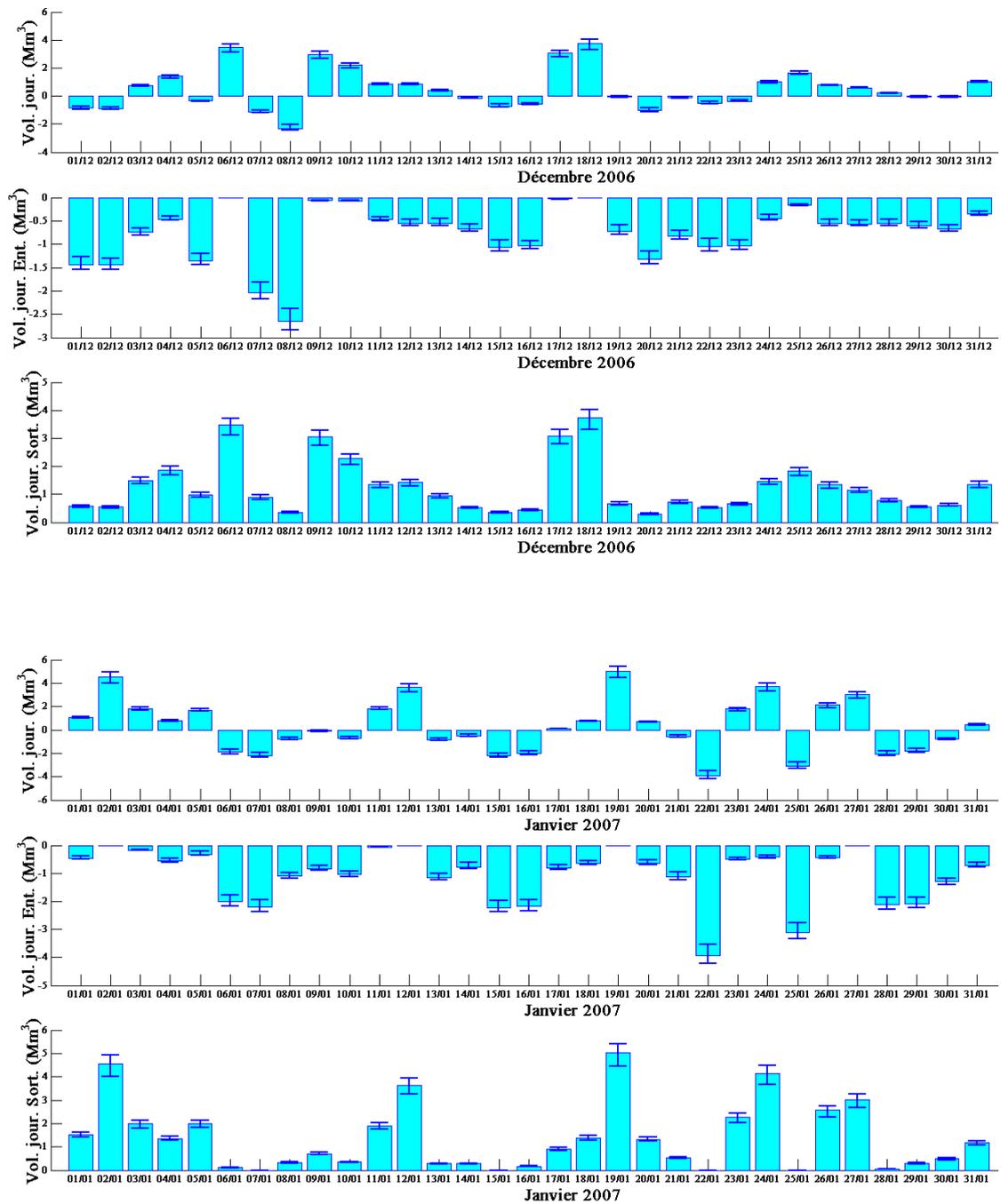


Figure IV.7 : Bilan net des échanges mer-lagune (en haut) et des volumes journaliers entrants et sortants de la lagune de Bages-Sigean pour le mois de décembre 2006 et janvier 2007. Valeurs moyennes (histogramme) et extrémales (barre d'erreur) calculées à partir des cinq paramétrisations d'aire.

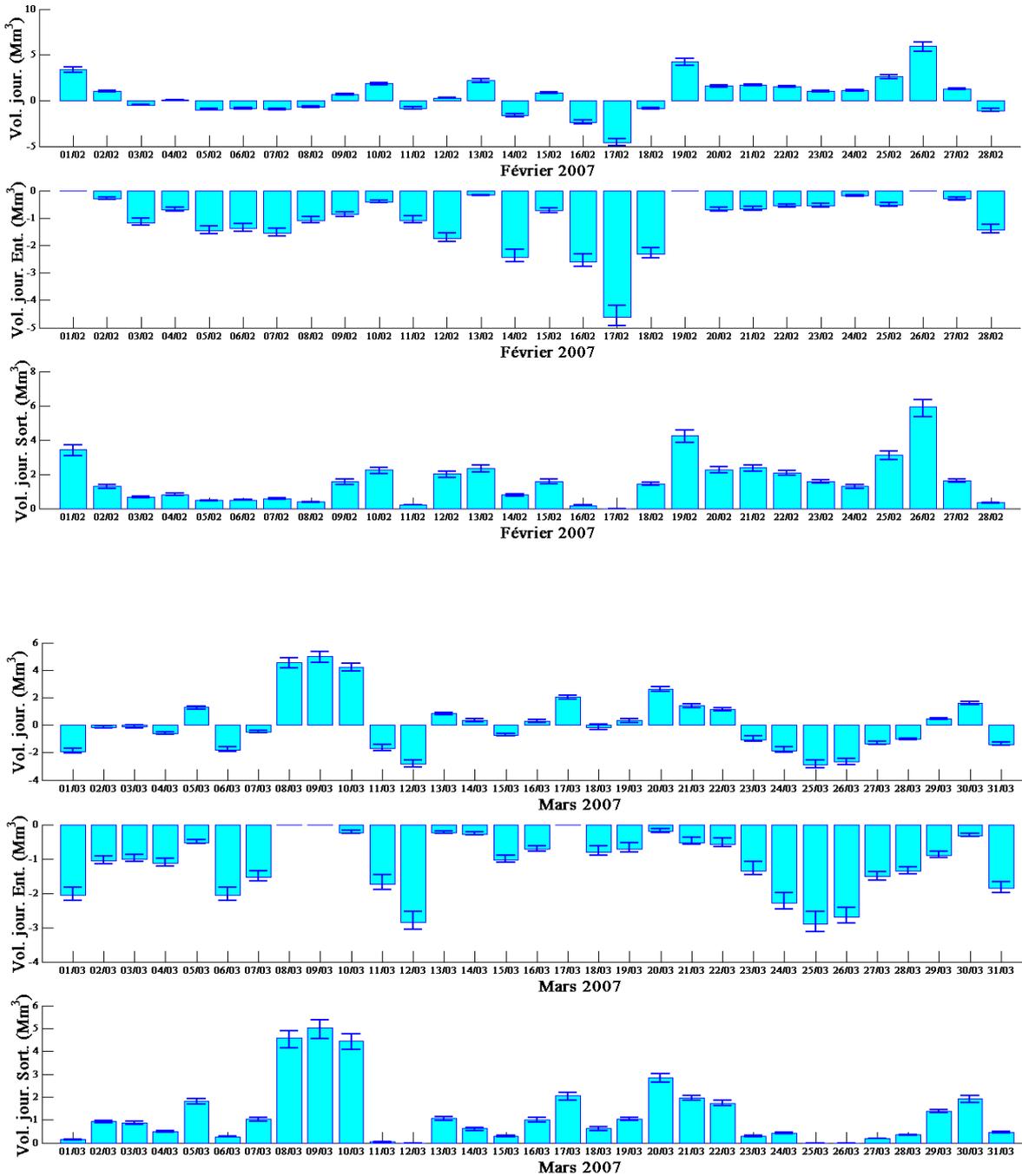


Figure IV.8 : Bilan net des échanges mer-lagune (en haut) et des volumes journaliers entrants et sortants de la lagune de Bages-Sigean pour le mois de février et mars 2007. Valeurs moyennes (histogramme) et extrêmes (barre d'erreur) calculées à partir des cinq paramétrisations d'aire.