



Etude hydrologique de l'étang de Bages-Sigean

Impact de différents scénarii d'aménagement
et de gestion sur les variations de salinité



Conservatoire
des Espaces Naturels
du Languedoc-Roussillon



Etude hydrologique de l'étang de Bages-Sigean

Impact de différents scénarii d'aménagement
et de gestion sur les variations de salinité

Février 2012

Auteur : CESMAT Ludovic

Ont collaboré à cette étude : DUSSERRE Karine, FIANDRINO Annie et BENAU Laurent

SOMMAIRE

I	INTRODUCTION ET PROBLEMATIQUE	5
I.1	PRESENTATION DE L'ETANG DE BAGES-SIGEAN	5
I.2	CONTEXTE DE L'ETUDE : UN MILIEU LAGUNAIRE EN PHASE DE RESTAURATION.....	6
I.3	ACTIONS DE GESTION ENVISAGEES SUR L'ETANG DE BAGES-SIGEAN	7
I.4	L'AIDE ATTENDUE DE LA MODELISATION ET LE LIEN AVEC LE COMITE SCIENTIFIQUE.....	8
I.5	OBJECTIFS DE L'ETUDE.....	8
II	METHODOLOGIE : DONNEES ET OUTILS UTILISES, CALAGE DU MODELE	
	HYDRODYNAMIQUE SUR LA PERIODE 2005/2007.....	9
II.1	DONNEES HYDRO-CLIMATIQUES SUR L'ETANG DE BAGES-SIGEAN ET FORÇAGE DU MODELE MARS 3D	9
	9	
II.1.1	<i>Données utilisées comme forçage du modèle hydrodynamique MARS 3D.....</i>	9
II.1.1.a	Données météorologiques.....	9
II.1.1.b	Données disponibles sur les apports d'eau par le bassin versant	12
II.1.1.c	Estimation des apports d'eau douce sur la période 2000 à 2010 pour les sous-bassins versants « naturels » 16	
II.1.1.d	Données de hauteur d'eau dans le grau de Port La nouvelle	17
II.1.2	<i>Données d'observations dans la lagune utilisées comme base de comparaison avec les résultats du modèle MARS 3D.....</i>	19
II.1.2.a	Données de débits et d'échanges mer/lagune	19
II.1.2.b	Données de salinité dans la lagune de Bages-Sigean.....	21
II.2	LE MODELE MARS 3D SUR LA LAGUNE DE BAGES-SIGEAN	22
II.2.1	<i>Présentation du modèle hydrodynamique MARS 3D.....</i>	22
II.2.1.a	Formulation, hypothèse de calcul et résolution des équations	22
II.2.1.b	Domaine d'étude et grille de calcul	24
II.2.2	<i>Calibration du modèle sur la période 2005-2007, comparaison des débits mesurés et observés dans le grau de Port La Nouvelle.....</i>	25
II.2.2.a	Méthode et paramètres des simulations	25
II.2.2.b	Résultats des comparaisons mesures / modèle.....	26
II.2.2.c	Simulation identique et optimale mais avec une hauteur d'eau « théorique » et estimée par le modèle 31	
II.2.2.d	Amélioration des estimations des apports du bassin versant de l'épisode de janvier/février 2006 à partir des débits mesurés dans le grau.....	37
II.3	SYNTHESE DE LA PARTIE II : RECUEIL DES DONNEES DE CALAGE DU MODELE.....	44
III	IMPACT DES DIFFERENTS SCENARII D'AMENAGEMENTS ET DE GESTION SUR LA	
	SALINITE DE LA LAGUNE	45
III.1	<i>Choix des indicateurs statistiques estimés à partir des résultats de simulation.....</i>	45
III.2	<i>Présentation et description du scénario de référence</i>	46
III.3	SCENARII D'AMENAGEMENT DU GRAU DE PORT LA NOUVELLE.....	51

III.3.1	Effet de l'enlèvement du barrage à vannes sur la période 2004-2010.....	51
III.3.2	Scénario de l'enlèvement des piles du pont de la voie ferrée.....	53
III.3.3	<i>Comparaison avec les aménagements passés sur l'étang de Salses-Leucate.....</i>	<i>55</i>
III.4	SCENARI DE GESTION DU CANAL DE LA ROBINE ET DES APPORTS D'EAU DOUCE PAR LE CANELOU....	57
III.4.1	Scénario de coupure totale des apports du Canélou.....	57
III.4.2	Scénario de coupure estivale des apports du Canélou.....	63
III.4.3	Scénario d'apports d'eau douce hivernaux (2.5 m3/s).....	66
III.4.4	Scénario de rejet des prises d'eau agricoles.....	68
III.4.5	Scénario d'apports « ancestraux » du canal.....	72
IV	SYNTHESE DES RESULTATS, CONCLUSION ET DISCUSSION	74
V	BIBLIOGRAPHIE	78
VI	TABLES ET INDEX	79
VI.1	LISTE DES FIGURES :	79
VI.2	LISTES DES TABLEAUX	83
VII	ANNEXES	84

I Introduction et problématique

1.1 Présentation de l'étang de Bages-Sigean

L'étang de Bages-Sigean d'une surface de 3700 hectares, est l'une des plus vastes lagunes du Languedoc-Roussillon. Située dans le département de l'Aude, entre Narbonne et Port la Nouvelle, cette lagune est alimentée par un bassin versant d'une superficie d'environ 440 km², s'étendant sur le territoire de 22 communes.

Les apports d'eau douce dans Bages-Sigean proviennent à la fois des cours d'eau (apports non permanents) et du canal de la Robine (apports quasi permanents). Alimenté par les eaux du fleuve Aude, le canal de la Robine draine l'ensemble de la basse-plaine narbonnaise et se rejette dans la partie nord de l'étang via le déversoir du Canérou. Le lien de la lagune avec la mer se fait par un grau unique, situé au sud à Port la Nouvelle, sur lequel ont été aménagés plusieurs ouvrages limitant la section d'échange mer-étang.

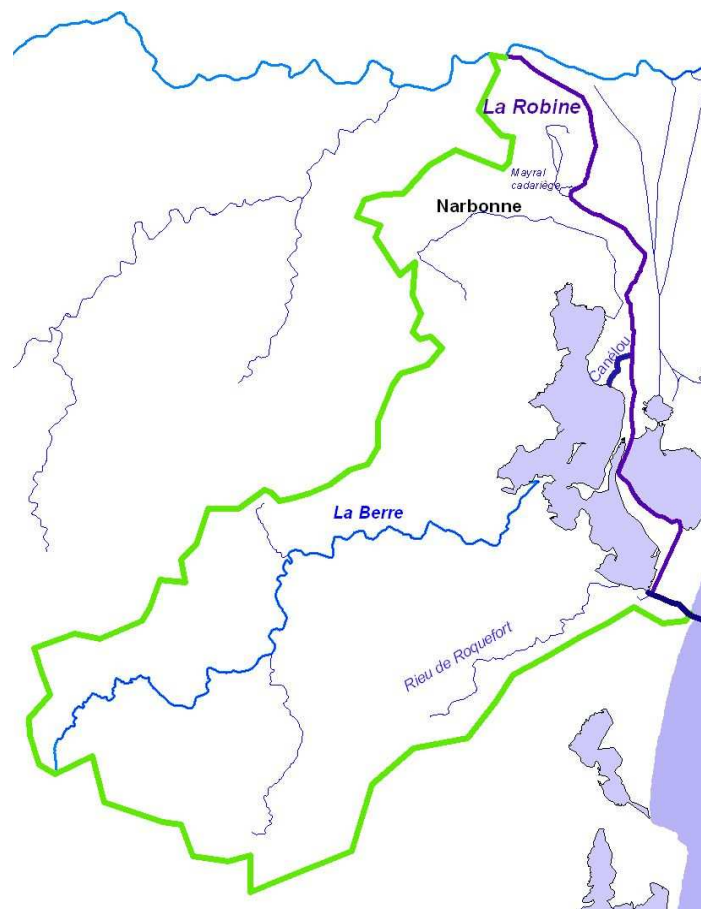


Figure 1 : Carte des principaux cours d'eau

1.2 Contexte de l'étude : un milieu lagunaire en phase de restauration

Depuis la création du Parc naturel régional, un travail de gestion concertée du milieu lagunaire a été mis en place sur l'ensemble du territoire du Narbonnais, impliquant les acteurs présents sur le bassin versant et sur la lagune. Un contrat pour les étangs du Narbonnais (dont celui de Bages-Sigean) a été mis en œuvre sur la période 2005-2009, avec comme objectif prioritaire l'amélioration de la qualité des eaux, notamment la lutte contre l'eutrophisation. Le Réseau de Suivi Lagunaire a permis de suivre l'impact sur le milieu des actions engagées.

Jusqu'en 2005, les diagnostics réalisés dans le cadre du Réseau de Suivi Lagunaire sur la lagune de Bages-Sigean mettaient en évidence un gradient d'eutrophisation décroissant du nord vers le sud de la lagune. Le **bassin nord**, plus éloigné de la mer et plus directement soumis aux apports d'eau douce (principalement issus du canal de la Robine) affichait, lors du diagnostic complet de 2005, un état « médiocre » vis-à-vis de l'eutrophisation. Avec la mise en œuvre du contrat d'étangs, d'importants travaux ont été réalisés sur le bassin versant, avec comme objectif commun de réduire les apports polluants (d'origine urbaine, industrielle et agricole) et notamment les apports en sels nutritifs. Les résultats les plus spectaculaires sont ceux de la mise aux normes des stations d'épuration dont les apports à l'étang ne représentent plus que 12% pour l'azote (résultat 2009, contre 44% en 2003). En parallèle, les échanges mer-étang ont été améliorés grâce à l'enlèvement partiel du barrage à vannes dans le grau de Port la Nouvelle.

L'ensemble de ces aménagements fait qu'aujourd'hui l'étang de Bages-Sigean est en phase de **restauration vis-à-vis de l'eutrophisation** : les suivis RSL montrent que depuis maintenant quatre ans l'état vis-à-vis de l'eutrophisation de la colonne d'eau du bassin nord oscille entre des états « moyen » et « bon ». Les bassins médian et sud oscillent entre les états « bon » et « très bon ». La baisse en fréquence et en intensité des marées vertes et la recolonisation de certains secteurs lagunaires par des herbiers à zostères (espèces de référence au sens de la DCE) témoignent également de cette tendance à la restauration. Toutefois, certains compartiments de l'écosystème tels que le phytoplancton ou les macrophytes affichent encore aujourd'hui dans le bassin nord des états respectivement médiocre et moyen vis-à-vis de l'eutrophisation.

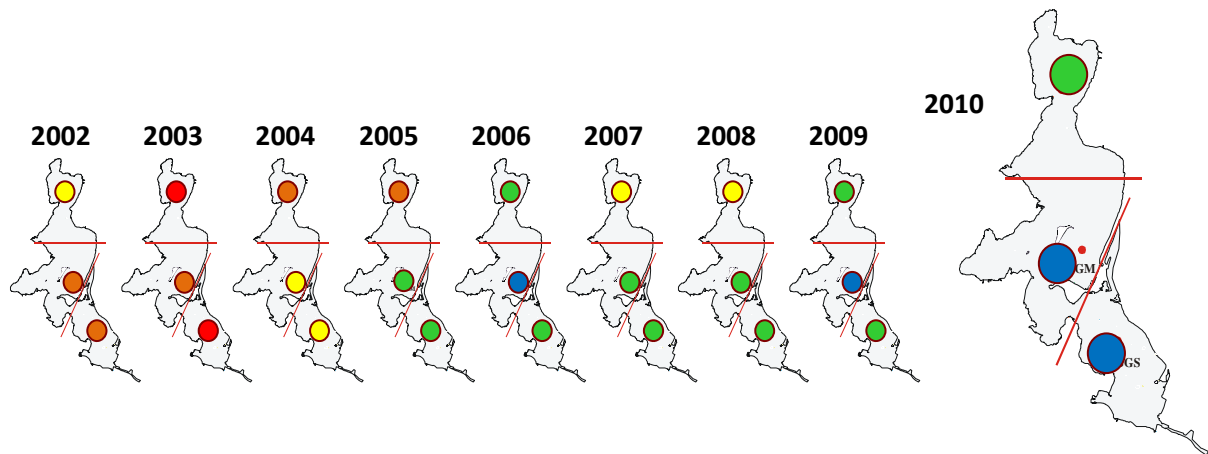


Figure 2 : Etat vis-à-vis de l'eutrophisation de la colonne d'eau (résultats du RSL 2002-2010)

Légende : ■ Très bon ■ Bon ■ Moyen ■ Médiocre ■ Mauvais

1.3 Actions de gestion envisagées sur l'étang de Bages-Sigean

Afin de répondre à l'objectif de bon état écologique imposé par la Directive Cadre sur l'Eau et restaurer l'état vis-à-vis de l'eutrophisation de l'ensemble des compartiments de l'écosystème, de nouvelles actions devront être mises en œuvre dans les années à venir sur le bassin versant et la lagune.

Deux types d'actions sont actuellement envisagés :

- La modification des échanges mer-étang par l'enlèvement d'anciennes piles sous le pont de la voie ferrée dans le grau de Port la Nouvelle afin de restaurer le fonctionnement naturel du grau entravé par ces embâcles et d'augmenter le renouvellement des masses d'eau dans la lagune.
- La modification (volume, saisonnalité) des apports en eau douce à la lagune par l'optimisation des modes de gestion du canal de la Robine via le déversoir du Canélou.

Ces différentes actions ont été présentées en 2010 aux acteurs locaux dans le cadre du bilan du contrat d'étangs et des perspectives de l'après-contrat. Ces propositions ont alors soulevé un certain nombre de **questionnements en lien avec l'équilibre écologique de l'étang de Bages-Sigean**. En effet, les acteurs locaux s'interrogent aujourd'hui sur **l'impact** de ces actions **en terme d'évolution de la salinité de l'étang de Bages-Sigean** et des **risques de marinisation** trop importante du milieu lagunaire. Précisons que l'exemple de l'ouverture de deux graus sur l'étang de Salse-Leucate dans les années 70 est régulièrement intervenu dans les arguments de ces acteurs locaux, notamment des pêcheurs.

1.4 L'aide attendue de la modélisation et le lien avec le Comité Scientifique

Pour répondre à ces interrogations, le Parc naturel régional, chargé de la coordination des actions de gestion autour de l'étang de Bages-Sigean, et son Conseil Scientifique, se sont accordés sur l'intérêt d'engager une **étude préalable de l'impact de ces actions sur la salinité** et, **au sens plus large, sur l'équilibre écologique de l'étang de Bages-Sigean**. Pour ce faire, il a été décidé **d'utiliser le modèle hydrodynamique MARS 3D** mis en place sur ce site dans le cadre du Réseau de Suivi Lagunaire, et d'en faire un projet d'aide à la gestion pour l'année 2011. En effet, le modèle hydrodynamique Mars 3D, élaboré par l'Ifremer en 2004-2005, a déjà été valorisé à deux reprises en 2006 et en 2007 pour tester l'impact de scénarios de gestion sur le renouvellement des masses d'eau dans cet étang, mais jamais sur **le facteur salinité**, au centre de la réflexion actuelle.

En parallèle, un autre outil de modélisation est en cours de développement dans le cadre du RSL, au travers d'un partenariat entre l'Université de Montpellier II et l'Ifremer. Il s'agit du **modèle LOICZ** qui devrait apporter à la fin de l'année 2011 des éléments de réponse quant aux flux maximaux de nutriments qu'une lagune peut tolérer sans s'enrichir. Un lien doit être fait entre les travaux sur les 2 modèles, apportant des réponses complémentaires, afin d'éclairer au mieux la prise de décision locale pour la gestion de l'étang de Bages-Sigean.

L'ensemble des réponses fournies par les deux modèles pourra ensuite être exploité par le comité scientifique associé à la présente étude, afin de répondre le plus précisément possible, **à dire d'experts**, aux questions soulevées par les acteurs locaux sur l'équilibre écologique du milieu lagunaire.

1.5 Objectifs de l'étude

Les objectifs de la présente étude sont :

- d'apporter des éléments de réponses aux questions que se posent les acteurs locaux sur l'évolution de la salinité et de l'équilibre écologique de la lagune de Bages-Sigean ;
- permettre d'évaluer les changements induits sur la salinité dans la lagune par des scénarios de gestion préétablis : modification des apports d'eau douce par le Canérou et modification des échanges mer/lagune. ;
- **d'aider à la gestion concertée** de ce milieu lagunaire, **avec en point de mire les objectifs de bon état écologique imposé par la DCE**.

II Méthodologie : données et outils utilisés, calage du modèle hydrodynamique sur la période 2005/2007

II.1 Données hydro-climatiques sur l'étang de Bages-Sigean et forçage du modèle MARS 3D

II.1.1 Données utilisées comme forçage du modèle hydrodynamique MARS 3D

II.1.1.a Données météorologiques

Les données météorologiques ont été collectées auprès de Météo-France à la station de Narbonne pour la pluie et à la station de Leucate pour le vent (intensité et direction), la température de l'air, la nébulosité, l'humidité relative de l'air et la pression atmosphérique. Les données de pluie couvrent la période de janvier 1995 à mars 2011 avec une donnée de pluie cumulée journalière sur cette période. Les données à la station de Leucate sont acquises à un pas de temps tri-horaire, soit toutes les 3 heures sur la période de janvier 2000 à mars 2011.

Les cumuls annuels de pluie sont présentés sur la Figure 3. Ces cumuls sont les plus importants pour l'année 1996 atteignant au total 1200 mm de pluie et sont les plus faibles avec 365 mm pour l'année 1998. La moyenne des cumuls annuels sur la période de 1995 à 2010 est de 623 mm. **On remarque que les années à partir de 2006 jusqu'en 2010 sont au dessous de cette moyenne avec des cumuls compris entre 450 et 550 mm.**

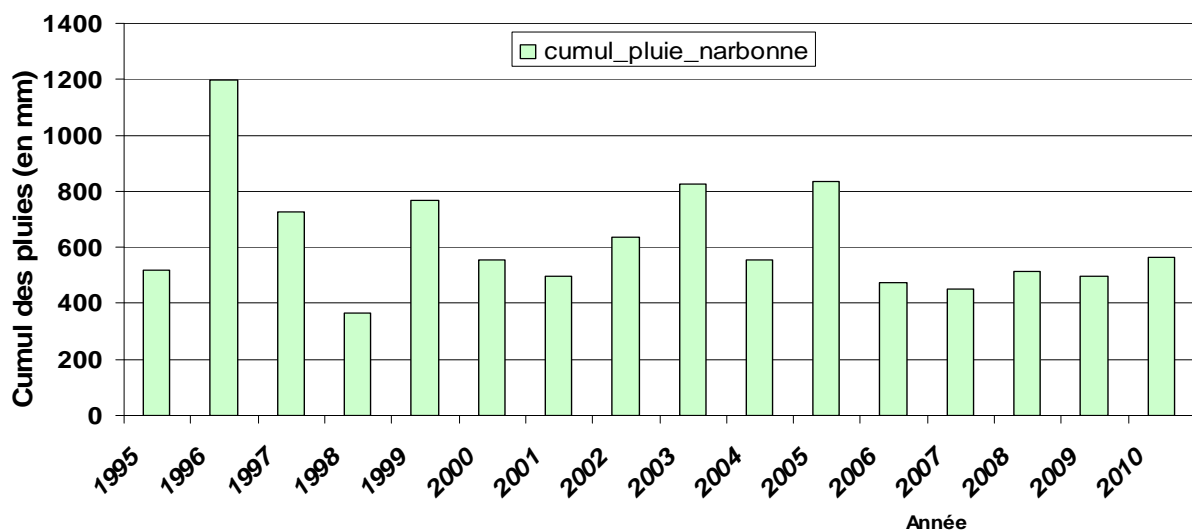


Figure 3 : Cumul des pluies annuelles sur la période 1995-2010

Au niveau de la distribution des pluies et de leur intensité au cours d'une année, la Figure 4 représente les boîtes à moustaches de chaque année entre 1995 et 2010. Les valeurs des paramètres de ces figures sont présentées sur le Tableau 1.

Param/année	1995	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
Nb jours pluie	103	139	109	105	122	114	104	150	112	114	120	78	85	110	85	115
Q1	0,2	0,6	0,4	0,2	0,4	0,4	0,4	0,2	0,6	0,4	0,2	0,2	0,6	0,4	0,6	0,2
Min	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Moust.Inf	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2
Médiane	1,0	3,0	1,0	1,2	1,4	1,5	1,4	0,8	2,3	0,8	0,8	0,9	2,4	1,0	1,4	0,6
Moust.Sup	66,0	103,0	101,2	32,0	92,2	51,0	100,0	86,0	120,1	56,8	119,1	163,4	59,0	57,8	46,0	106,6
Max	66,0	103,0	101,2	32,0	92,2	51,0	100,0	86,0	120,1	56,8	119,1	163,4	59,0	57,8	46,0	106,6
Q3	4,9	7,6	7,0	4,4	4,8	4,8	5,1	4,0	6,1	2,8	4,0	5,0	4,0	4,3	7,0	3,7

Tableau 1 : distribution des pluies : valeurs des boîtes à moustaches (nombre d'échantillons,

Q1 premier quartile, minimum, médiane, maximum et Q3 troisième quartile)

Les années 2002 et 1996 sont les années avec le plus grand nombre de jours de pluies (respectivement 139 et 150). La période de 2006 à 2010 correspond à une série de 5 années peu pluvieuses, avec un nombre de jours de pluie réduit. Les pluies médianes de chaque année se situent entre 0.6 (2010) et 3 (1996). Les valeurs maximales de pluie journalière de chaque année entre 1995 et 2010 sont comprises entre 32 mm (1998) et 163 mm (2006). Pour l'année 2006, la pluie maximale de 163 mm représente près d'un tiers du cumul de pluie annuel. Les trois principaux paramètres qui peuvent caractériser une année pluvieuse en terme de cumul total annuel sont en premier ordre le nombre de jours de pluie et leur valeur médiane, et en second ordre l'intensité maximale des événements les moins fréquents (pluies se trouvant au dessus du 9ième percentile), à savoir les pluies les plus intenses au cours de l'année.

Sur la période 2000 – 2010, apparaissent :

- 8 années « sèches » : 2000, 2001, 2004 et de 2006 à 2010 ;
- une année de pluviométrie moyenne : 2002
- 2 années « pluvieuses » : 2003 et 2005

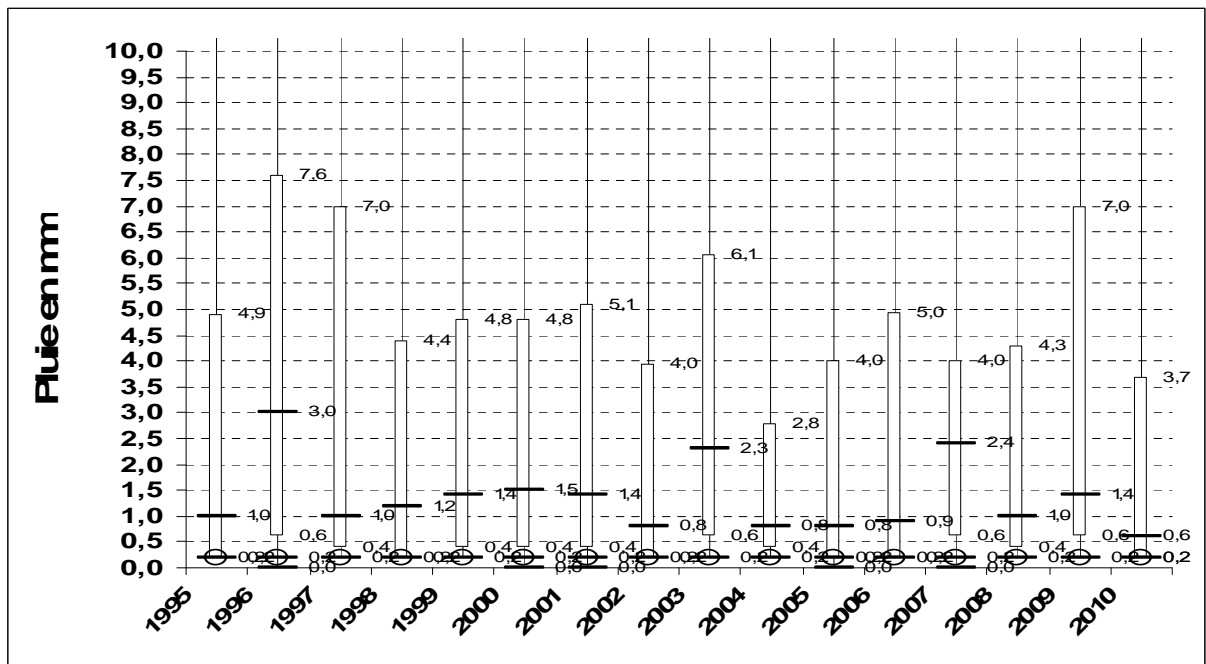
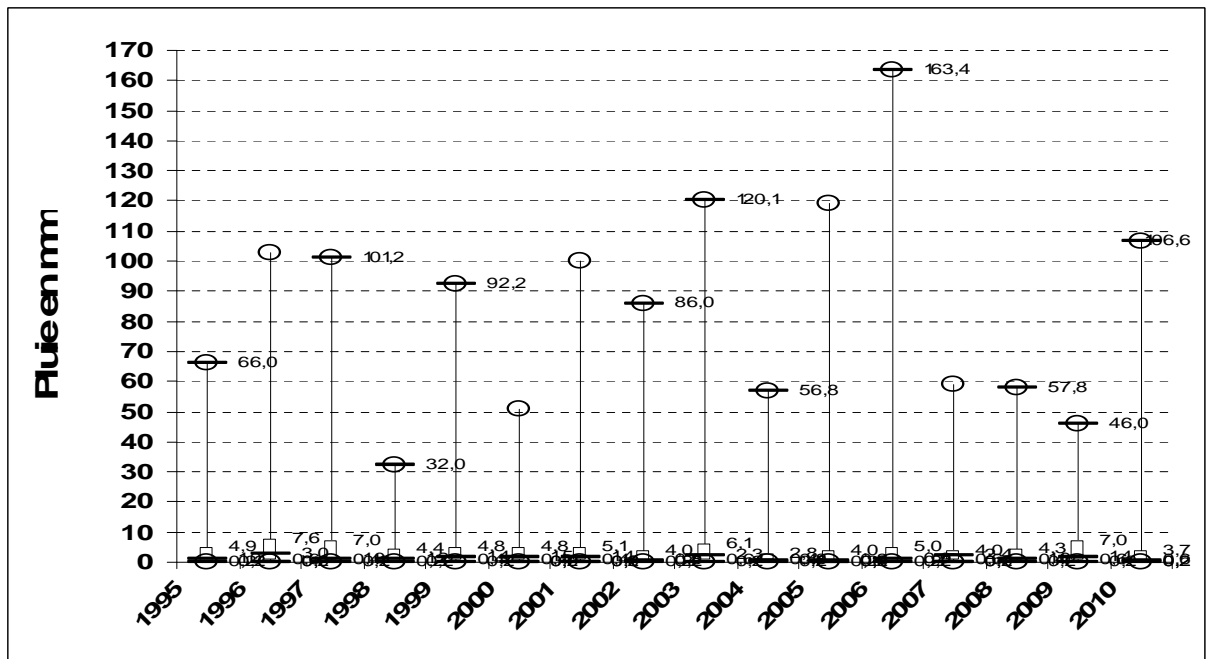


Figure 4 : Boîtes à moustaches des distributions des intensités de pluies des années 1995 à 2010 avec 2 échelles de représentation, en haut pour voir les pluies maximales et en bas pour voir les pluies médianes et les quartiles

II.1.1.b Données disponibles sur les apports d'eau par le bassin versant

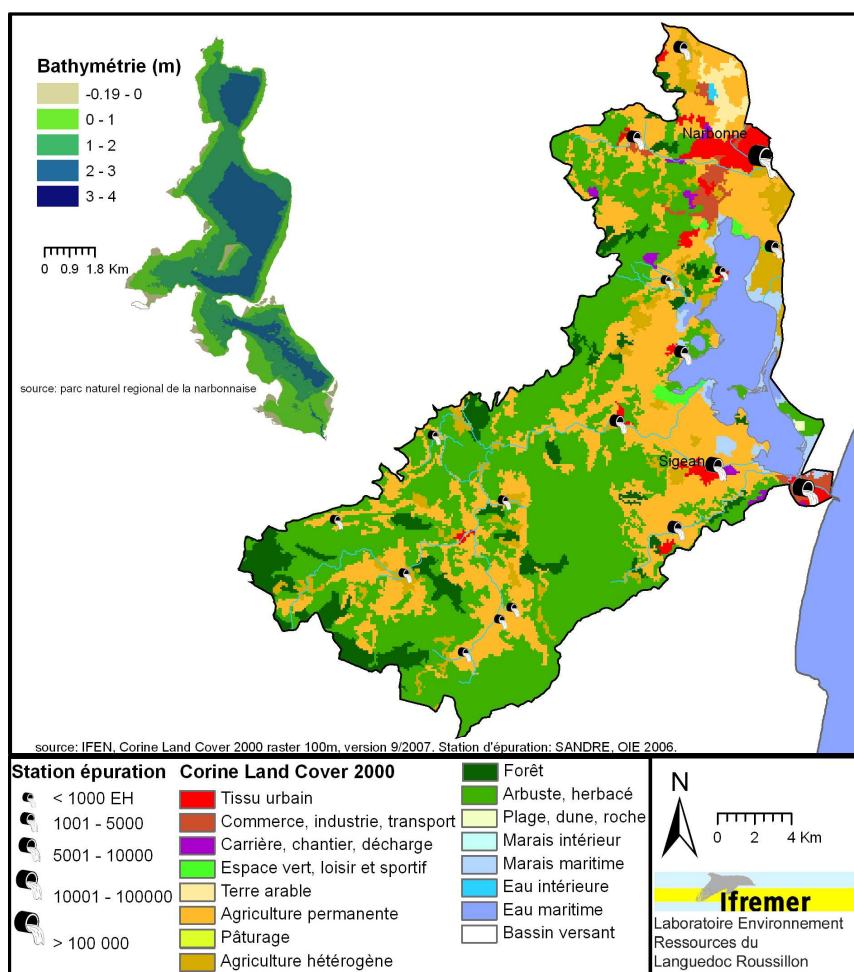


Figure 5 : Etang de Bages-Sigean et son bassin versant (RSL, 2010)

Le bassin versant de l'étang de Bages-Sigean est présenté Figure 5. Les principaux apports d'eau douce à la lagune sont d'une part composés :

- des apports des sous bassins versants « naturels » (surfaces exposées dans le Tableau 2),
- d'autre part des apports du canal de la Robine (déversoir du Canélou dans le bassin nord de l'étang)
- et le bief aval du canal venant dans le grau de Port La Nouvelle.

L'eau du canal de la Robine est issue du fleuve Aude, avec une prise d'eau au niveau de Moussoulens, qui alimente le canal géré par VNF pour la navigation fluviale. Entre la prise d'eau sur l'Aude et le déversoir du Canélou, il existe plusieurs arrivées d'eau (pluvial) et de nombreuses prises d'eau, en grande partie agricoles.

Nom du sous-bassin versant	Superficie en km ²
Talweg du Rec de Veyret	57.84
Massif de Fontfroide	54.77
Corbières et vallée de la Berre	236.05
Rieu de Roquefort	59.24

Tableau 2 : Superficie des principaux sous bassins versants de l'étang de Bages-Sigean (BRL, 1999)

Les données disponibles sur les apports d'eau douce dans la lagune sont peu nombreuses. Sur les sous bassins versants de la lagune, il existe uniquement des données de débits journalières sur la Berre de janvier à novembre 2005 (Figure 6). Ces 11 mois de données montrent que la Berre a de très faibles débits en phase de temps sec, et que le bassin versant réagit très rapidement aux épisodes de pluies. Les débits en phase de pluie ont atteint des valeurs de 60 m³/s. Le volume d'eau total apporté par la Berre à l'étang de Bages-Sigean au cours de ces onze mois de données est de 49 millions de m³.

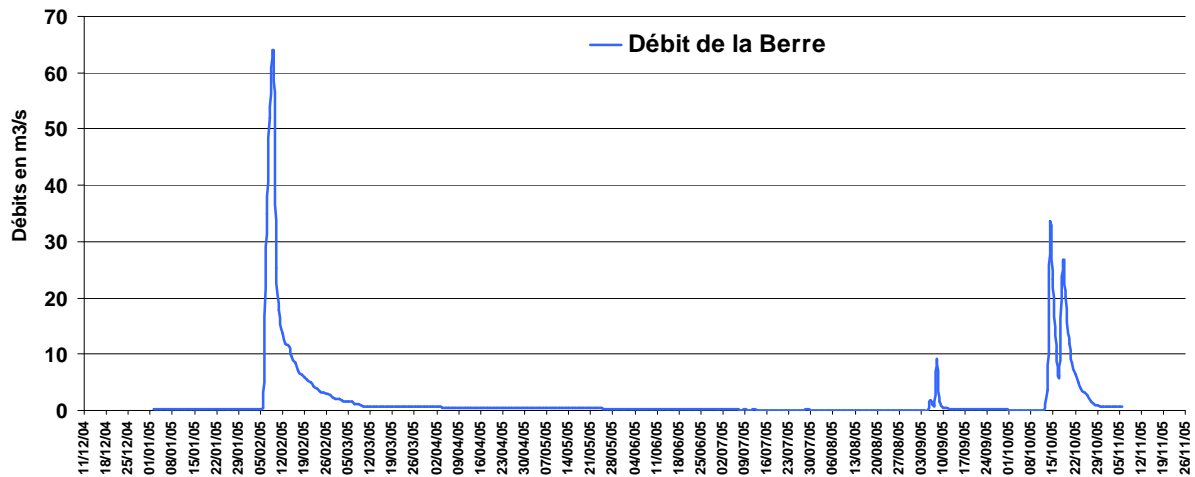


Figure 6 : Débit de la Berre entre janvier 2005 et novembre 2005

Pour le canal de La Robine, il existe davantage de données acquises par VNF à différents endroits du canal, des débits ont pu être estimés à partir de mesures de niveau de hauteurs d'eau. Les données qui nous intéressent dans le cadre de cette étude sont essentiellement celles des exutoires à la lagune. Les données en amont seront peu utilisées car il a été démontré que **les débits à la prise d'eau de l'Aude et les déversements dans la lagune ne sont pas corrélés** (Le Noc et De Wit, 2010, Figure 7). Les données utiles pour forcer le modèle MARS 3D sont celles de **déversements à Mandirac (Canélou)**, elles sont présentées sur la Figure 8.

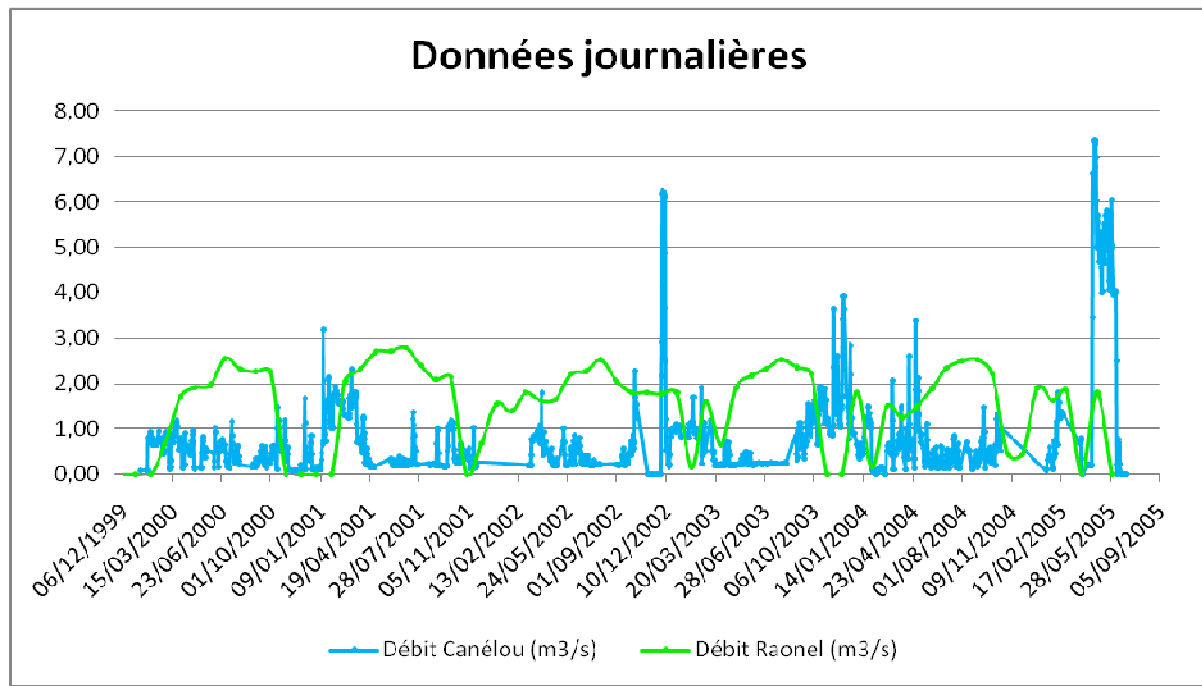


Figure 7 : Evolution des débits mesurés au niveau de la prise d'eau sur l'Aude à Raonel et du déversoir du Canélou sur la période de 2000 à 2005 (Le Noc et De Witt, 2010)

Contrairement au fonctionnement du bassin versant de la Berre qui réagit rapidement aux pluies, le système du Canélou est un système régulé artificiellement pour la navigation et, indirectement, l'irrigation agricole de la basse-plaine narbonnaise. L'influence des pluies dans ce signal est difficilement identifiable. En automne 2002 et en automne 2004, deux importants pics de débits sont présents durant une période de plusieurs semaines à des niveaux de débits respectivement de 22 m³/s et de 32 m³/s (Figure 8). Ces valeurs mesurées sont étonnantes tant par leurs intensités que par leurs durées. Il est fort probable que ces mesures traduisent un problème technique de métrologie. **Par conséquent toutes les mesures de débits supérieures à 7 m³/s ont été supprimées.**

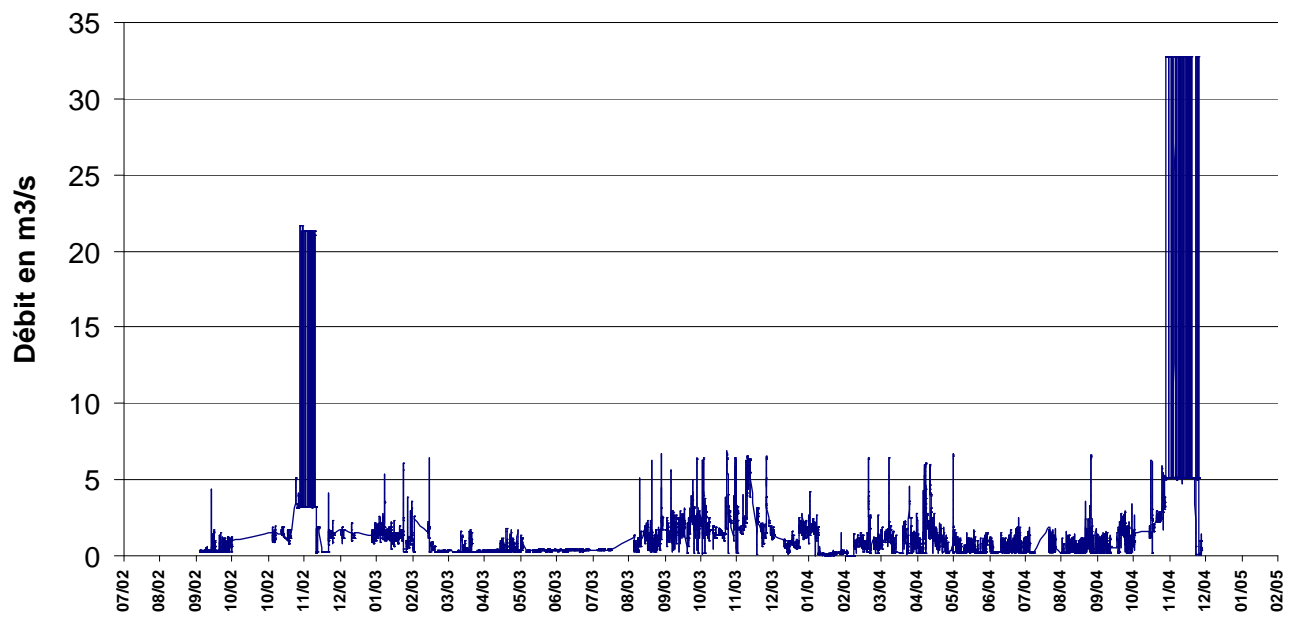
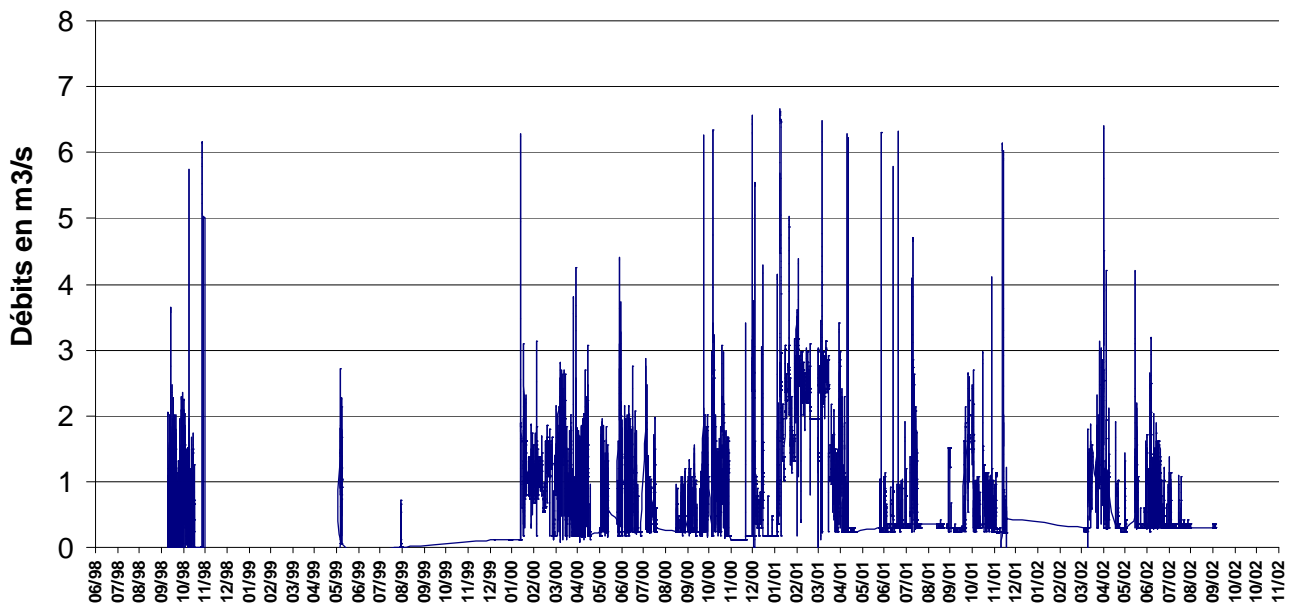


Figure 8 : Données de débits au déversoir du Canérou (Mandirac) de 1998 à 2002 (en haut) et de 2002 à 2005 (en bas)

II.1.1.c Estimation des apports d'eau douce sur la période 2000 à 2010 pour les sous-bassins versants « naturels »

Le chapitre précédent montre la faible quantité de données hydrologiques disponibles sur bassin versant de l'étang de Bages-Sigean, en particulier pour les sous-bassins versants « naturels » du massif de Fontfroide, de la Berre et du Rieu de Roquefort. Il convient alors de faire des estimations des volumes d'eau douce qui arrivent dans la lagune sur notre période d'étude (2000-2010) à partir des données de pluie que nous avons. Les modèles hydrologiques pluie/débit sont des outils complexes et représente une thématique à part entière. Dans notre cas, il n'est pas possible de pouvoir approfondir toute la partie hydrologique, mais l'on sait que ces bassins versants réagissent très rapidement aux pluies comme nous l'avions étudié sur l'étang de Thau (Omega-Thau, 2010). Ainsi sur les 11 mois de données de la Berre nous avons estimé que près de 49 millions de m³ ont été apportés la lagune, sur un volume tombé sur le bassin versant au cours des pluies de ces 11 mois de 144 millions de m³.

Sur cette période il a donc été transféré vers la lagune 34 % du volume d'eau tombé sur le bassin versant. Le transfert d'eau du bassin versant vers la lagune dépend de nombreux paramètres comme la nature des sols, la pente moyenne, le taux d'humidité des sols, la végétation, etc. Ce taux n'est donc pas constant au cours de période ainsi que sur les différents bassins versants qui ont des caractéristiques géomorphologiques spécifiques. En l'absence de données précises sur ces bassins versants, nous avons choisi d'utiliser ce taux de transfert pour reconstruire un signal de débit à partir du signal de pluie pour les bassins versants du Rieu de Roquefort, du massif de Fontfroide et de la Berre (Figure 9).

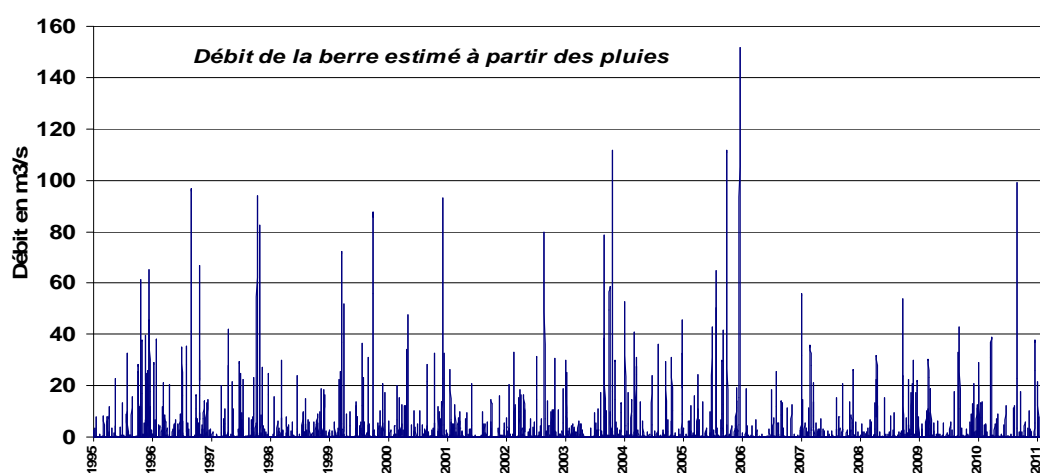


Figure 9 : débit de la Berre estimé à partir d'un taux de transfert de 34 % sur la période 1995/2010

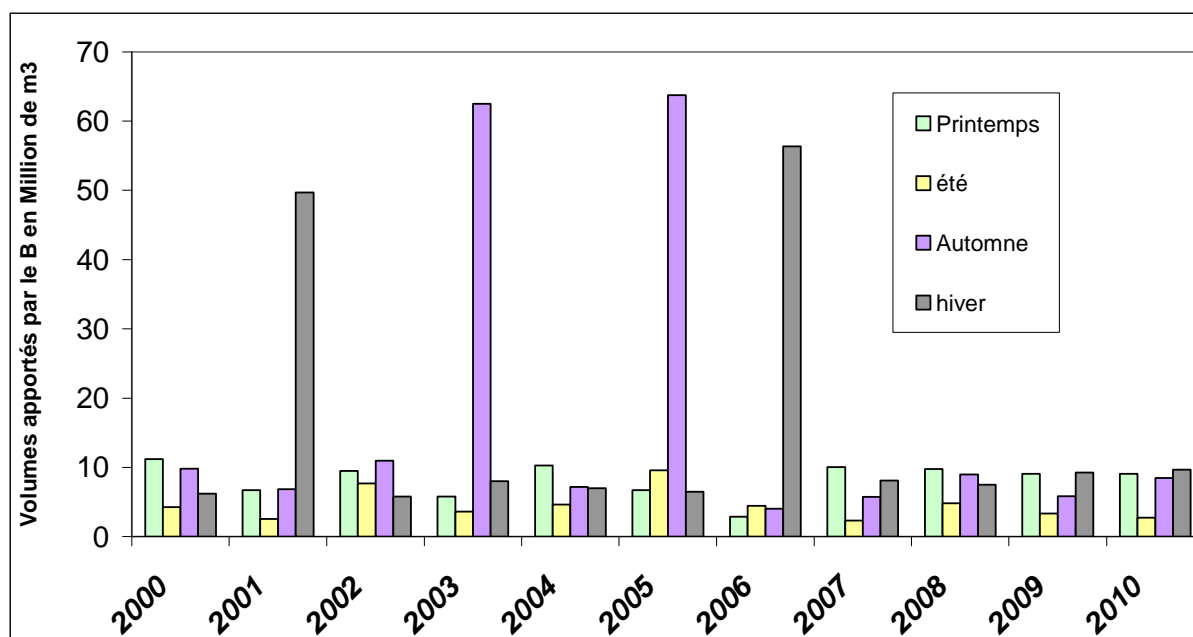


Figure 10 : Volumes d'eau apportés par l'ensemble du bassin versant naturel (Berre-Font froide, Rieu de Roquefort) estimés à partir des pluies, bilan par saison et par année (2000-2010)

La Figure 10 présente les volumes d'eau apportés à la lagune pour les différentes saisons sur la période de 2000 à 2010. Les apports d'eau sont plus importants d'une façon générale en automne et en hiver. Au niveau des apports annuels, ils sont estimés entre 30 et 35 millions de m³ pour les années 2000, 2002, et de 2007 à 2010. Cependant on remarque que certains épisodes intenses au cours de l'automne ou de l'hiver peuvent à eux seuls dépasser les volumes d'eau annuels apportés à la lagune. Par exemple en hiver 2006, près de 60 millions de m³ d'eau ont été apportés sur un seul évènement intense. Ces évènements intenses apparaissent sur 4 années entre 2000 et 2010, l'année 2001, 2003, 2005 et 2006.

II.1.1.d Données de hauteur d'eau dans le grau de Port La nouvelle

Le grau de Port la Nouvelle a été instrumenté par le laboratoire LER/LR de l'Ifremer de novembre 2005 à mars 2007. L'ensemble des données recueillies et des traitements analytiques de ces données sont présentés dans le travail de Fiandrino et Lagarde (2010). Pour notre étude, ces données limnigraphiques vont être utilisées pour forcer le modèle MARS 3D. **Ce signal oscille autour du niveau moyen de 0.62 m au dessus du zéro hydrographique.**

Sur la Figure 11, les variations périodiques (diurne et semi-diurne) sont liées à la marée astronomique. Des variations de hauteurs d'eau à l'échelle de temps de quelques jours peuvent être liées, quant à elles, à la pression atmosphérique et au vent (le passage d'une dépression élève le niveau et celui d'un anticyclone le fait baisser). Ainsi, sur la période 2005/2007, **les niveaux les plus hauts** ont été enregistrés fin janvier 2006, en octobre 2006 et début février 2007, avec des niveaux **de 1.2m au dessus du zéro**

hydrographique. Ces épisodes correspondent à des périodes de tempêtes et de fortes entrées maritimes. Au contraire, **les niveaux les plus bas ont été mesurés avec des valeurs de 0.2m** début janvier 2007. Ces niveaux correspondent à des périodes de forte pression atmosphérique liée à des masses d'air froid avec de forts coups de vent terrestre.

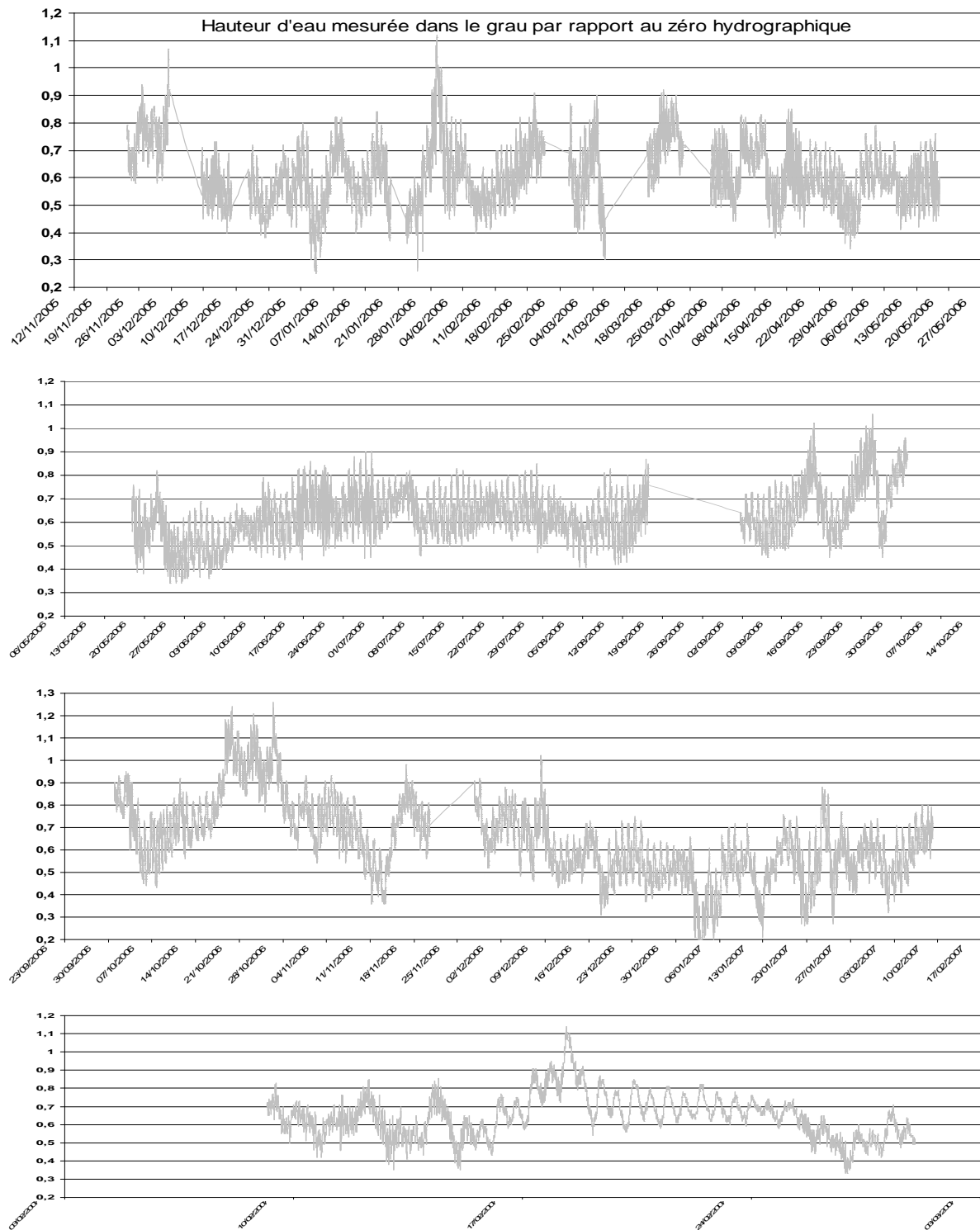


Figure 11 : Signal de hauteur d'eau mesuré dans le grau de Port La Nouvelle de novembre 2005 à mars 2007, par rapport au zéro hydrographique

II.1.2 Données d'observations dans la lagune utilisées comme base de comparaison avec les résultats du modèle MARS 3D

II.1.2.a Données de débits et d'échanges mer/lagune

Les données de débits ont été acquises sur la période novembre 2005 à mars 2007 à un pas de temps de 5 minutes à l'aide de deux courantomètres doppler placés en sub-surface et au fond du grau de Port La Nouvelle. Les détails techniques d'acquisition et de post-traitement de ces données sont présentés dans le travail de Fiandrino et Lagarde, 2010. Ces données ont permis de réaliser une estimation des débits dans le grau afin de mieux appréhender les échanges mer/lagune. Ces estimations sont présentées sur la Figure 12 avec les débits sortants ayant une valeur positive.

D'une manière générale, **les débits dans le grau oscillent entre -75 et +75 m³/s** sous l'influence de la marée. **Les débits sortants les plus forts** sont mesurés avec des valeurs de **300 m³/s** au cours de forts épisodes pluvieux (fin janvier 2006). **Les débits entrants les plus importants** ont des valeurs d'environ **100 m³/s** et sont liés à l'effet conjugué de la marée, de faibles pressions atmosphériques et d'entrées maritimes fortes.

A partir de ces données, l'intégration à la journée et au mois permet d'estimer les volumes entrants et sortants entre la lagune et la mer par le grau (Fiandrino et Lagarde, 2010). Il a ainsi été montré au travers des volumes nets échangés (volumes entrants moins volumes sortants) que **la lagune de Bages-Sigean a tendance à exporter de l'eau. Il y a donc davantage d'eau qui sort de la lagune qu'il n'en rentre.** Ce phénomène est particulièrement net lors d'épisodes pluvieux (comme celui de février 2006) ou pendant la période hivernale où les niveaux d'évaporation sont faibles et les apports du bassin versant plus importants. **Ce bilan « exportateur d'eau » de la lagune** se retrouve d'ailleurs dans les niveaux de salinité moyennes observés dans la lagune inférieurs aux niveaux de salinité en mer.

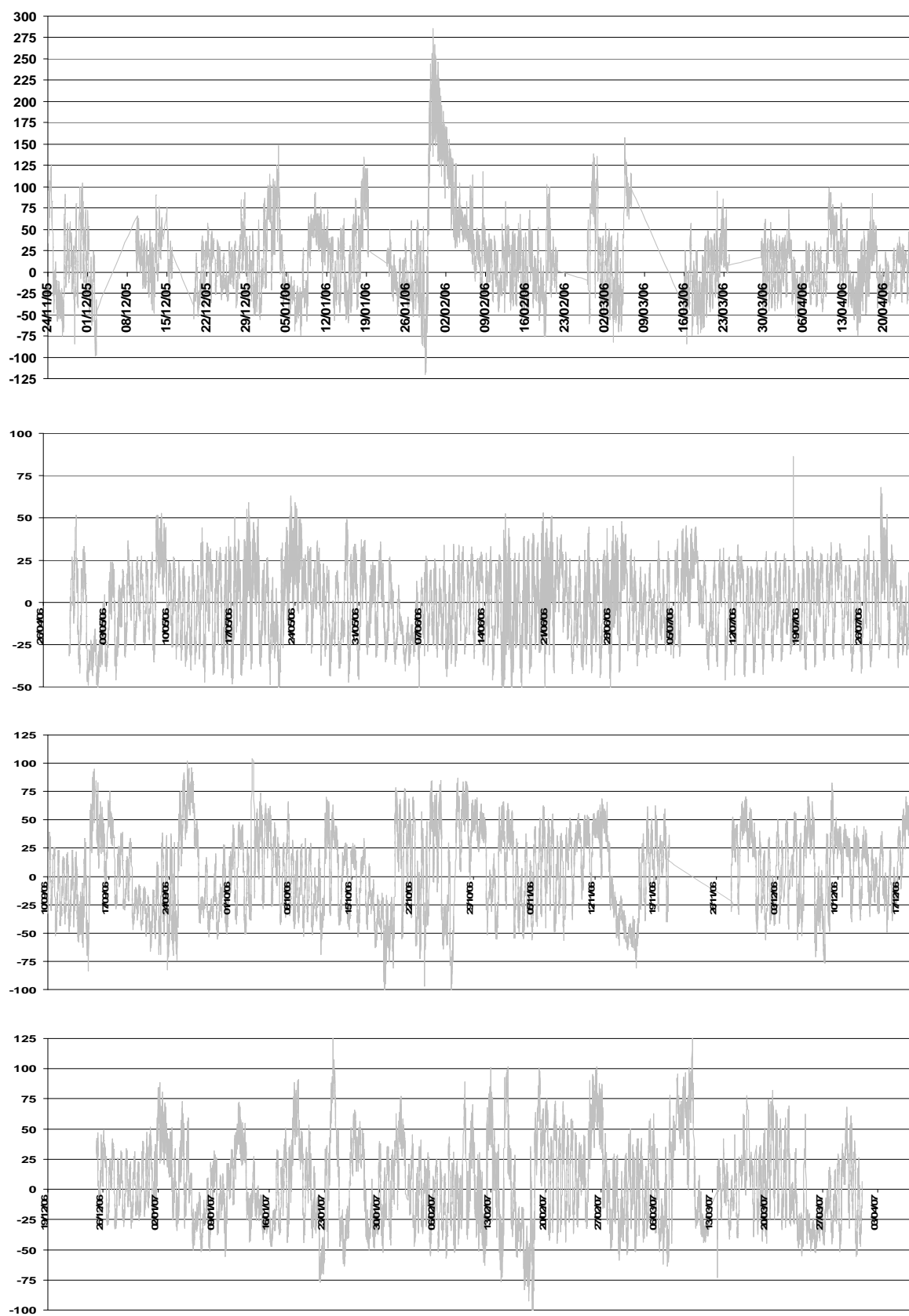


Figure 12 : données de débit de novembre 2005 à mars 2007 dans le grau de Port La Nouvelle (un débit positif correspond à un débit sortant de la lagune) – Source : Fiandrino, Lagarde 2010

II.1.2.b Données de salinité dans la lagune de Bages-Sigean

Dans le cadre du réseau FIL MED, les données de salinité sont acquises à un pas de temps mensuel par le Parc naturel régional au niveau de quatre stations situées à Bages, à Peyriac, à Sigean et à l'entrée du grau de Port la Nouvelle. La Figure 13 présente les variations de salinité enregistrées entre 2000 et 2010. La salinité dans la lagune est systématiquement inférieure à la salinité dans le grau et présente des variations saisonnières plus importantes. Les variations saisonnières de salinité aux 3 stations de Bages, Peyriac et Sigean sont comparables. Cependant, il existe un **gradient croissant de salinité entre les stations de Bages, Peyriac et Sigean.**

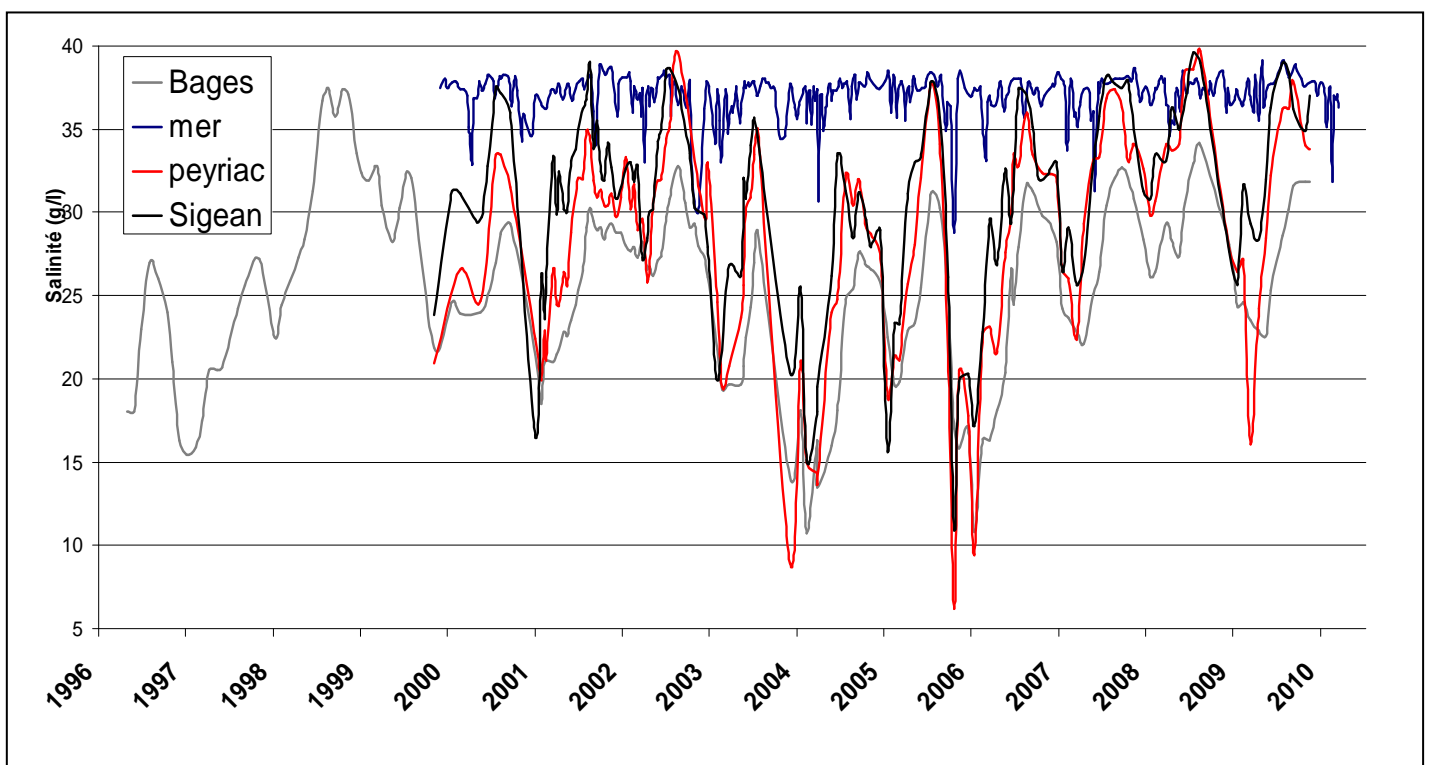


Figure 13 : Salinité mesurée en différentes stations entre 1995 et 2010, en mer (bleu, à Sigean (noir), à Peyriac (rouge) et à Bages (en gris) (données RSL-FILMED)

II.2 Le modèle Mars 3D sur la lagune de Bages-Sigean

II.2.1 Présentation du modèle hydrodynamique MARS 3D

Le modèle MARS 3D a été développé au laboratoire de Physique hydrodynamique et sédimentaire (PHYSED) de l'IFREMER à Brest. Ce code de calcul est particulièrement adapté à la simulation des écoulements des régions côtières de l'océan d'une échelle régionale à locale (golfe, estuaire, lagune...). Le code de calcul et les méthodes de résolution employées sont détaillés dans les travaux de Lazure et Dumas (2007).

II.2.1.a Formulation, hypothèse de calcul et résolution des équations

MARS 3D résout les équations de Navier-Stokes sous l'hypothèse d'hydrostaticité et avec l'approximation de Boussinesq (Lazure et Dumas, 2007). Ce code simule le champ de courant, de température, de salinité, la hauteur de la surface libre ainsi que toute autre variable dissoute dans les trois dimensions du domaine. Il est écrit en FORTRAN 90/95 et est basé sur des méthodes de différences finies en utilisant un maillage régulier. Un changement de coordonnées σ sur la verticale est réalisé sur les équations du mouvement afin de conserver un nombre de maille constant sur une colonne d'eau égal à 10. Le modèle prend en compte les différents forçages agissant sur la dynamique des eaux tels que les ondes de marée, les variations de pression atmosphériques, le vent ainsi que les gradients de densité.

La résolution des équations se fait par une séparation des modes, un modèle 2D est couplé à un modèle 3D afin de considérer séparément les ondes de gravité de surface et les ondes internes. Le modèle 2D fournit la pente de la surface libre au modèle 3D, qui lui-même fournit au modèle 2D les valeurs des frottements sur le fond et les termes non linéaires. Le mode externe calcule les courants barotropes et le mode interne estime les courants baroclines. Un processus itératif contraint les vitesses calculées par le mode externe à être égales aux vitesses intégrées sur la verticale du mode interne. Les ondes externes ayant des vitesses supérieures aux ondes internes, afin de respecter les conditions de stabilité (Courant-Friedrichs-Lewy), le pas de temps de calcul pour le mode barotrope est plus petit que pour le mode barocline.

La méthode des différences finies utilise une discrétisation régulière suivant x et y , avec un schéma semi-implicite de type ADI qui résout les équations par demi pas de temps (les lignes : équation suivant x ; les colonnes : équations suivant y). Le critère de stabilité est $\frac{\Delta x}{\Delta t} > 0.2 U_{\max}$ (avec Δx pas d'espace, Δt pas de temps de calcul et U_{\max} courant maximal rencontré dans le domaine d'étude).

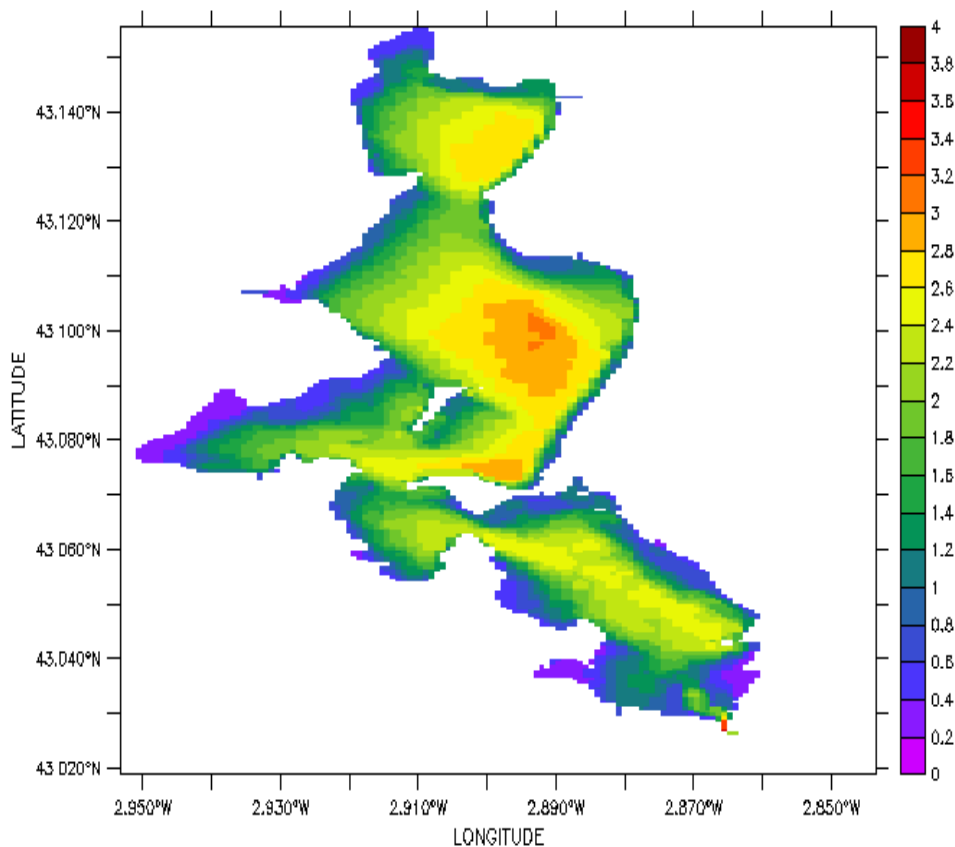
Enfin au sujet de la prise en compte de la turbulence, décrivons pour cela d'une manière simplifiée la mécanique d'un fluide. Les forces s'exerçant sur un fluide le mettent en mouvement avec un flux laminaire jusqu'à un certain seuil. Ce seuil est défini par le nombre de Reynolds qui dépend du rapport entre la vitesse du fluide et la viscosité du fluide. Au niveau de ce seuil, lorsqu'on augmente encore les forces génératrices du mouvement, le mouvement du fluide va suivre un flux non plus laminaire mais turbulent sous l'effet de des forces de tension s'opposant au mouvement. Les forces de tensions s'opposant aux mouvements augmentent avec les forces génératrices et se mettent en place dans différentes échelles de tailles au sein de la dynamique du fluide. La turbulence se traduit dans les équations par les termes non linéaires des tensions de Reynolds avec un terme à estimer à la dimension d'une viscosité appelé ainsi viscosité turbulente. Les calculs d'estimation de ce terme de viscosité turbulente peuvent alors se faire de plusieurs manières au sein du modèle :

- fermeture à 0 équation supplémentaire où la viscosité turbulente horizontale dépend uniquement du cisaillement et la viscosité turbulente verticale dépend d'une longueur de mélange. Plusieurs modèles peuvent être choisis pour fermer les équations sans équation supplémentaire : la longueur de mélange de Prandtl, le modèle de Quentin ou le modèle de Pacanowski et Philander,
- fermeture à 1 équation supplémentaire où la viscosité turbulente dépend de l'énergie cinétique turbulente (k). L'énergie cinétique turbulente suit ensuite une équation d'advection-diffusion sur le domaine étudié,
- fermeture à 2 équations où la viscosité turbulente dépend d'un terme source d'énergie cinétique turbulente (k) et d'un terme de dissipation visqueuse (ϵ), les deux termes suivent une équation d'advection-diffusion sur le domaine.

II.2.1.b Domaine d'étude et grille de calcul

La discrétisation de l'espace est le principal facteur limitant pour utiliser le modèle Mars puisqu'il définit le temps de calcul pour les applications futures.

Sur la lagune de Bages-Sigean, la résolution spatiale du modèle est de 65 mètres (Figure 14), ce qui implique un pas de temps de calcul pour l'évolution de l'état du système toutes les 20 secondes.



bathymetry relative to the mean level (m)

Figure 14 : Grille de calcul bathymétrique du modèle MARS 3D

(65m de résolution) sur la lagune de Bages-Sigean

Des premières applications du code ont été réalisées pour investiguer les échanges mer/ lagune, calculer des temps de résidence des eaux à l'intérieur de la lagune mais aussi estimer l'effet d'un creusement d'un canal au travers de la Sèche l'île de l'Aute, afin de favoriser le renouvellement des eaux dans la partie nord de la lagune (Ifremer, 2006 ; Ifremer, 2007).

II.2.2 Calibration du modèle sur la période 2005-2007, comparaison des débits mesurés et observés dans le grau de Port La Nouvelle

II.2.2.a Méthode et paramètres des simulations

L'ensemble des forçages utilisés ont été présentés dans le paragraphe II.1.1.

Il existe des paramètres dans le modèle que l'on qualifiera de « contrôlables » car ils influent sur les valeurs des champs de sorties tels que les courants, la salinité, etc. Pour modifier les valeurs des débits dans les graus et des échanges entre mer et lagune, il est possible de jouer sur 2 paramètres contrôlables dans le modèle : tout d'abord la section d'échange du grau et ensuite la viscosité turbulente dans le grau. Pour diminuer les échanges et les débits dans les graus, il suffit d'augmenter la viscosité turbulente et donc les forces de frottement et/ou de diminuer la section du grau.

Il a donc été dressé un plan d'expérience (Tableau 3) en croisant l'ensemble des prises en compte et valeurs testées des paramètres contrôlables. Ces simulations sont traitées et comparées aux mesures de débits réalisées entre novembre 2005 et mars 2007. Cette comparaison, présentée au paragraphe suivant, permet d'identifier un jeu « optimal » de paramètres du modèle.

Paramètre de contrôle	surfaces échanges du grau (m ²)	Viscosité turbulente	Apports_BV	Signal Hauteur d'eau
Différents Cas	81 m ²	modèle de gaspard	Avec Apports du BV estimés à partir des pluies	Signal mesuré
	60m ²			
	51 m ²			
	40m ²	Nz=0.1 ; kz=0.01	Sans apports	Signal théorique
	30m ²	Nz=1 ; kz=0.1		
	25m ²			
20 m ²				

Tableau 3 : Plan d'expérience sur les paramètres contrôlables et les différentes prises en compte des forçages pour les simulations de calibrations

Sur la période 2005/2007, cette comparaison des débits mesurés et simulés a été réalisée à 2 niveaux. Premièrement les paramètres ont été optimisés sur des périodes hors événements pluvieux ou de forts coups de vent, afin que le modèle reproduise bien les échanges mer/lagune sous l'effet de la marée. Deuxièmement l'analyse a été focalisée sur des événements pluvieux comme celui de fin janvier 2006, afin de bien reproduire les débits dans les graus et de vérifier ainsi la qualité des nos estimations d'apports d'eau du bassin versant.

Une deuxième partie de l'analyse des résultats du modèle de la période 2005/2007 a consisté à prendre les paramètres optimaux issus de la première analyse puis de forcer le modèle avec une hauteur d'eau « théorique », calculée à partir des composantes harmoniques de la marée et de la pression atmosphérique. L'erreur que commet le modèle sur les débits et les volumes journaliers échangés mer/lagune, en prenant un forçage de hauteur d'eau simulé plutôt qu'un signal observé, est ensuite évaluée.

II.2.2.b Résultats des comparaisons mesures / modèle

L'analyse des simulations et les comparaisons entre les mesures de débits dans le grau et les estimations ont été réalisées d'une manière à la fois descriptive et quantitative.

Ce paragraphe expose les analyses et les comparaisons d'un seul paramétrage, celui qui a été retenu comme le plus optimal. La paramétrisation de la turbulence et de la viscosité dans le grau est un paramètre contrôlable qui influe peu sur les débits instantanés simulés. Ces débits étaient d'ailleurs deux fois trop importants avec une section « réaliste ». C'est ce paramètre de section qui est le plus contraignant et qui permet de régler et de caler au mieux les débits simulés avec ceux observés. Une section de 25m² dans le modèle permet d'expliquer au mieux les observations de débit entre novembre 2006 et mars 2007.

D'une manière générale, les débits simulés estiment correctement les débits observés sur l'ensemble de la période (Figure 15, Figure 16 et Figure 17). **Seuls les débits dans le grau au cours d'épisodes pluvieux sont mal estimés**, notamment au cours de l'épisode de fin janvier 2006 avec des débits mesurés sortants de la lagune qui ont atteint 300 m³/s (Figure 15).

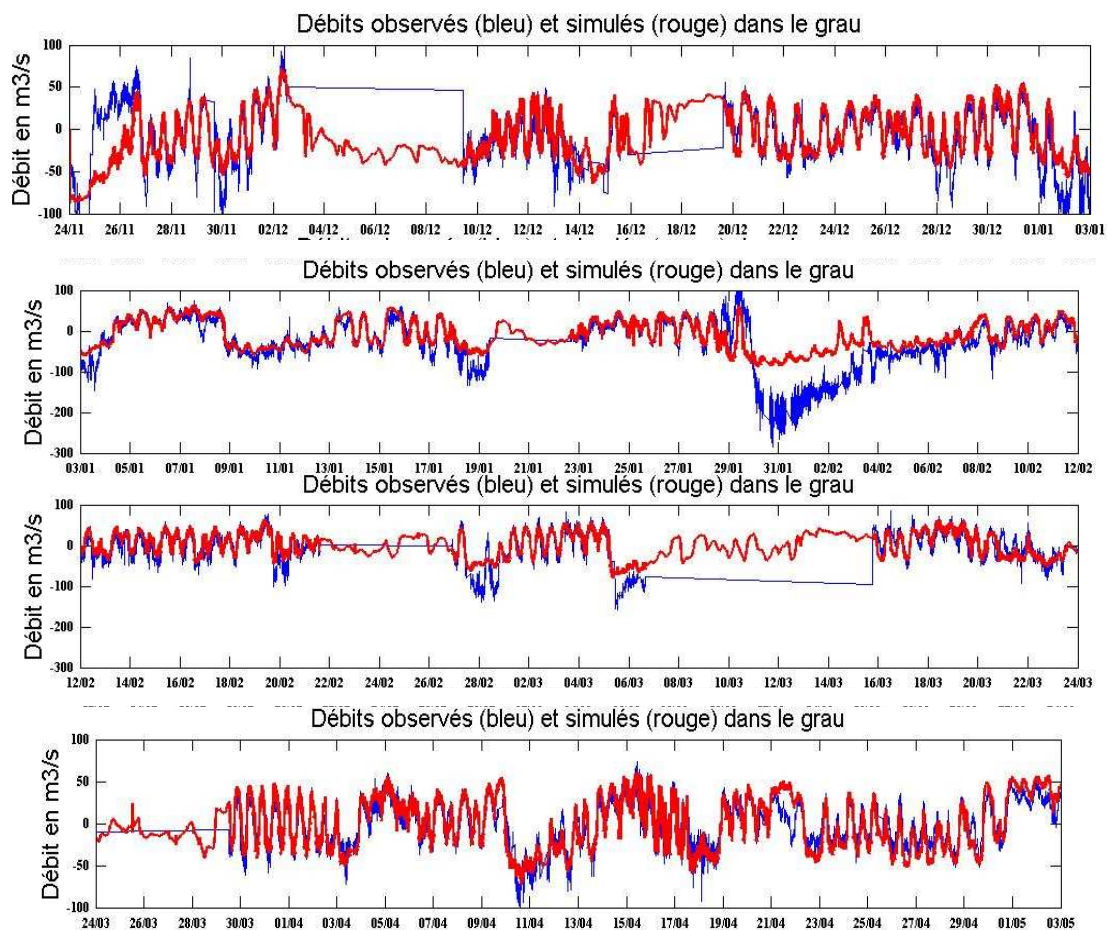


Figure 15 : Débit observés (en bleu) et simulés (en rouge) du 24 novembre 2005 au 03 mai 2006

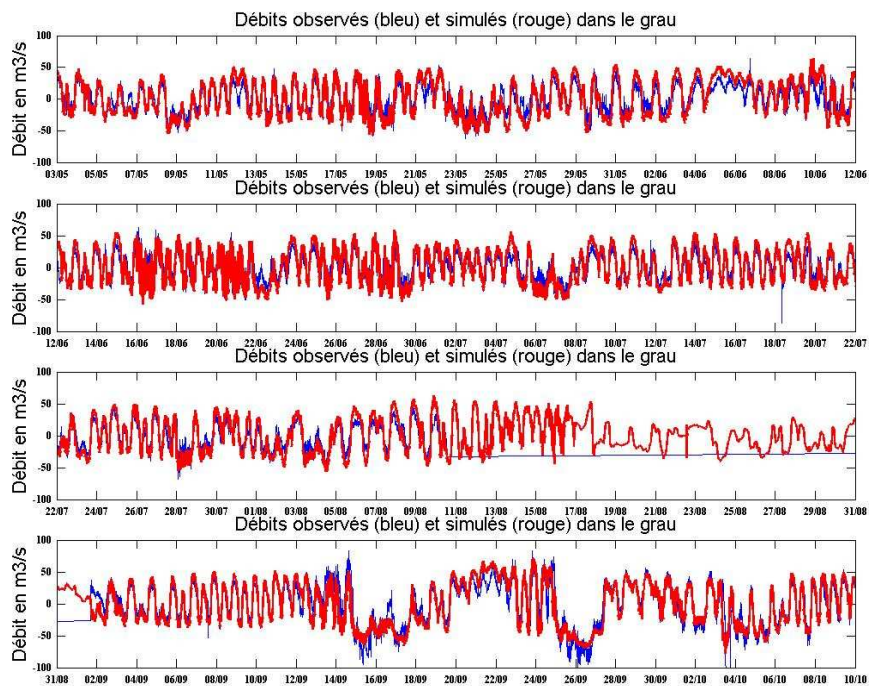


Figure 16 : Débit observés (en bleu) et simulés (en rouge) du 3 mai 2006 au 10 octobre 2006

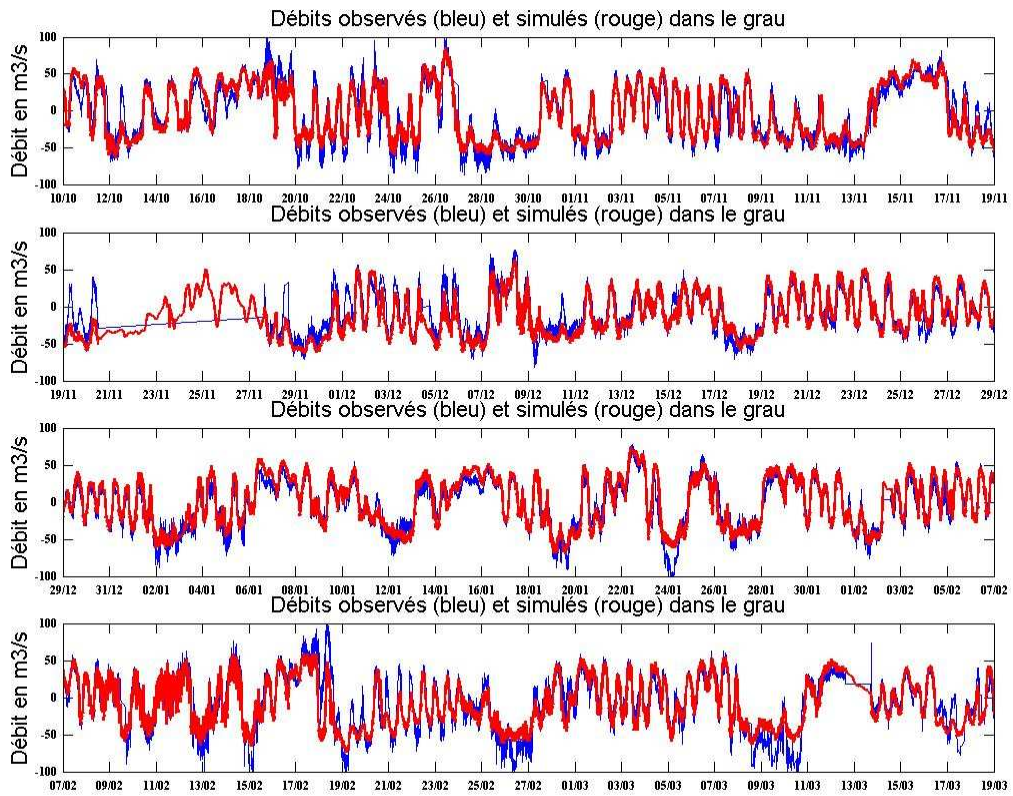


Figure 17 : Débit observés (en bleu) et simulés (en rouge) du 10 octobre 2006 au 1^{er} avril 2007

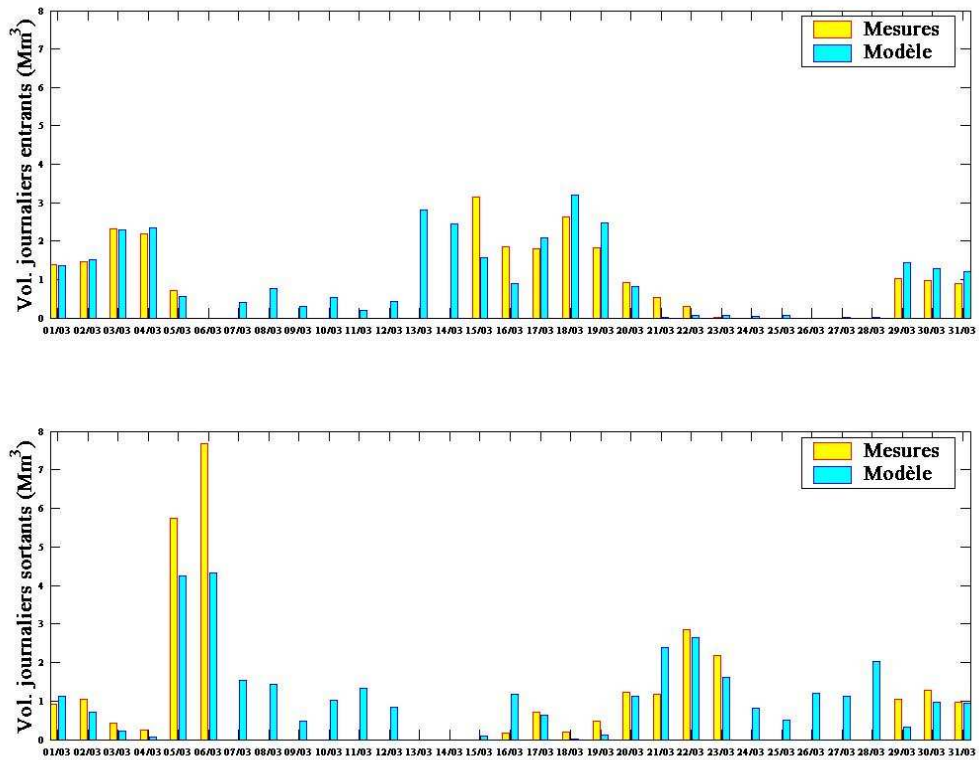


Figure 18 : Volumes journaliers entrants et sortants de la lagune simulés (bleu) et observés (jaune) au cours du mois de mars 2006

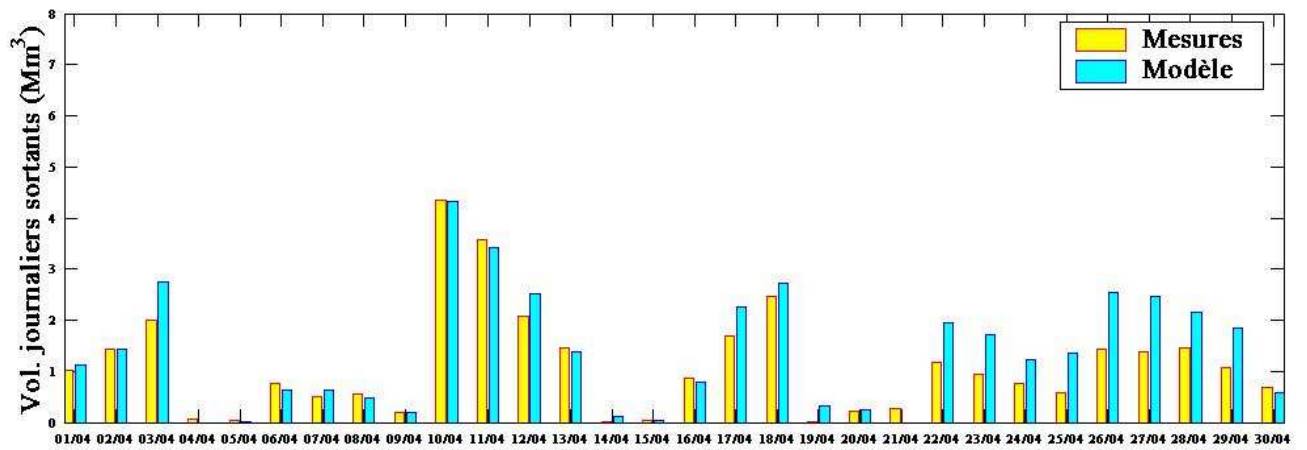
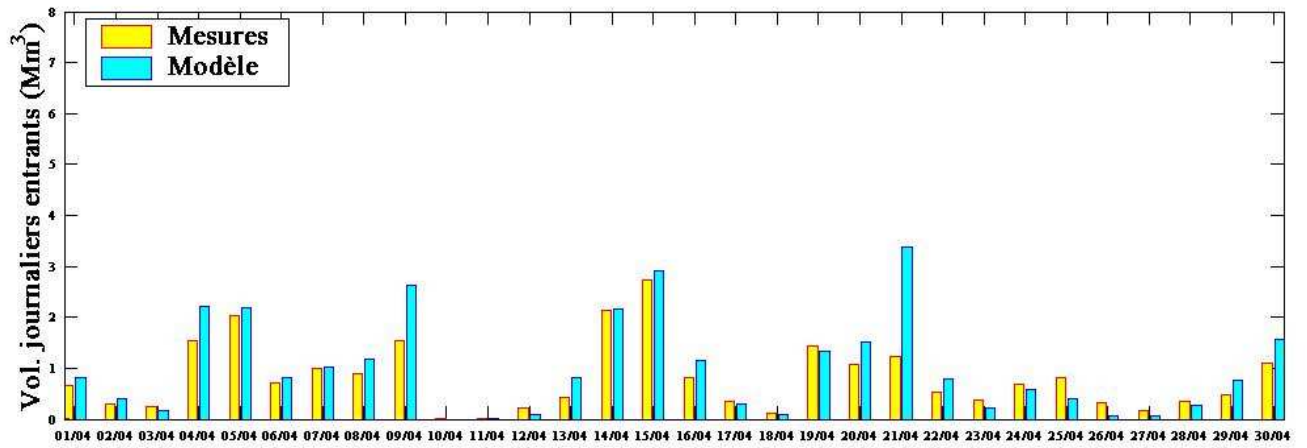


Figure 19 : Volumes journaliers entrants et sortants de la lagune simulés (bleu) et observés (jaune) au cours du mois d'Avril 2006

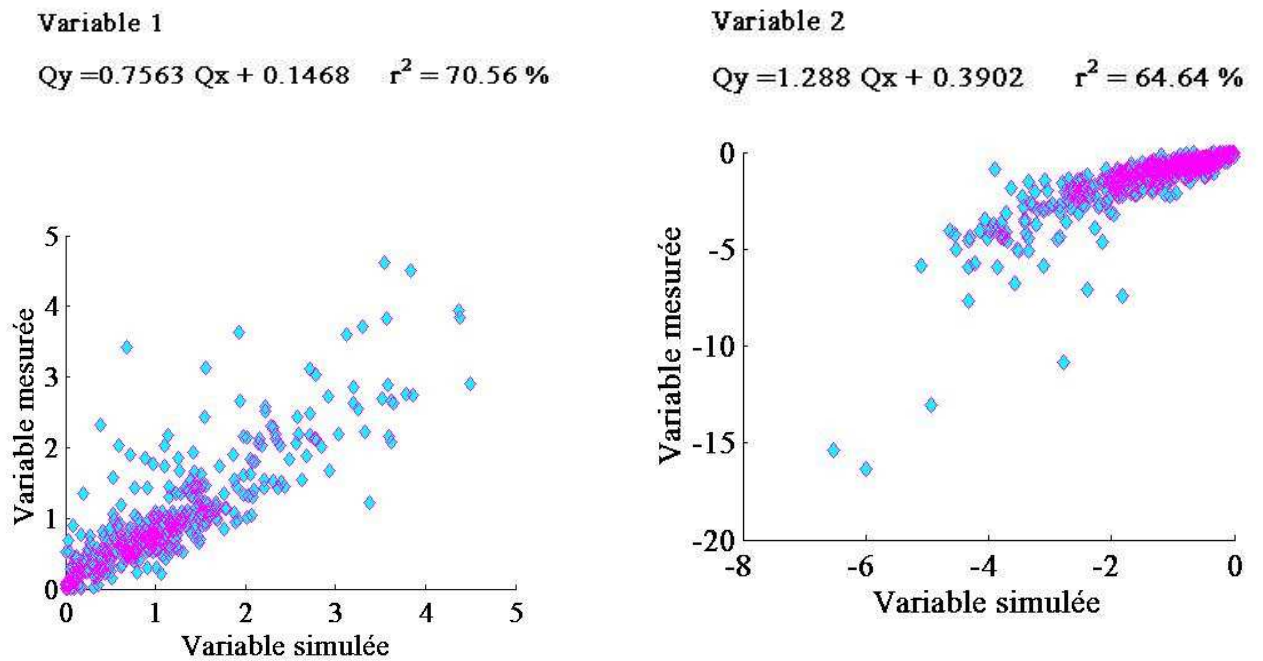


Figure 20 : Comparaison et régression statistiques des volumes journaliers entrants (à gauche) et sortants (à droite) simulés et observés sur la période de décembre 2005 à Avril 2007

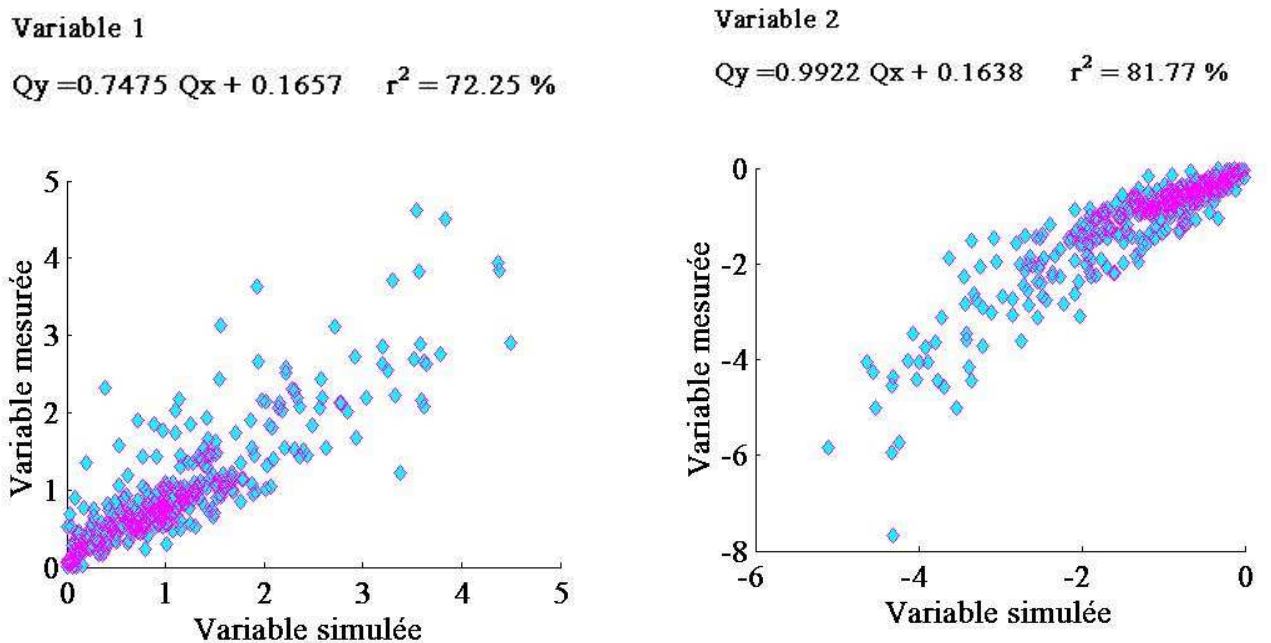


Figure 21 : Comparaison et régression statistiques des volumes journaliers entrants (à gauche) et sortants (à droite) simulés et observés sur la période de mars 2006 à Avril 2007 (on enlève la période du gros évènement pluvieux de février 2006)

II.2.2.c Simulation identique et optimale mais avec une hauteur d'eau « théorique » et estimée par le modèle

II.2.2.c.1 Présentation et objectif de ces simulations sur les hauteurs d'eau estimée par le modèle

Pour le calage du modèle, les données de hauteur d'eau observées ont été utilisées pour forcer le modèle sur les années 2006 et 2007. Cependant pour les scénarii proposés plus loin sur la période de 2000 à 2010, le forçage en hauteur d'eau est estimé par le modèle à partir du calcul de la marée et de la pression atmosphérique. Il est alors intéressant de simuler la période de novembre 2005 à mars 2007 avec un paramétrage choisi et optimal et le forçage en hauteur d'eau théorique. Cette analyse nous permet de visualiser et d'estimer l'erreur du modèle sur le signal de hauteur d'eau, sur les débits instantanés ainsi que sur les volumes d'eau journaliers transitant par le grau entre la lagune et la mer.

La hauteur d'eau estimée par le modèle à l'entrée du grau, présente d'importantes différences avec la hauteur d'eau observée (Figure 22, Figure 23 et Figure 24). Si les tendances générales et les variations sont assez bien synchronisées, en revanche, les niveaux de variations de hauteurs d'eau sur les cycles de marées et des événements d'entrées maritimes ou de haute pression semblent sous-estimés. De plus, de juin à août 2006, il existe une sous-estimation systématique de près de 20 cm sur le niveau moyen autour duquel les hauteurs oscillent (Figure 22, Figure 23 et Figure 24). Ces erreurs d'estimations proviennent de différents processus non pris en compte dans les calculs de forçage de hauteur d'eau. En premier ordre, le processus qui influe probablement le plus sur ces différences est le facteur vent. Il agit sur le niveau en mer en décote pour des vents terrestres ou en surcote pour des vents marins. La non-prise en compte de l'influence du vent sur le niveau en mer explique une grande part des écarts entre les niveaux observés et simulés. Cependant pour les périodes estivales comme de juin à août 2006, l'écart systématique ne peut être expliqué par le facteur vent. Un autre processus non pris en compte dans l'estimation de la hauteur d'eau peut expliquer ces écarts : il s'agit de la densité de l'eau et de la pression hydrostatique associée. En effet, une masse d'eau moins dense (plus chaude et moins salée) devra occuper une hauteur plus importante qu'une masse d'eau plus salée pour obtenir la même pression hydrostatique sur le fond. Si les caractéristiques de la densité de l'eau sont prises en compte pour estimer les courants baroclines dans le modèle, la densité de l'eau n'est pas prise en compte pour corriger la hauteur d'eau en forçage à la frontière.

Prenons un exemple d'une profondeur de 4m ($z=4m$) dans le grau avec P la pression, ρ la densité, S une surface, g la constante d'accélération et ϵ la hauteur d'eau fluctuante. La pression hydrostatique au fond du grau se calcule pour 2 cas d'une masse d'eau de différente densité comme :

$P_1 = \rho_1 \cdot g \cdot S \cdot (z + \varepsilon_1)$ et $P_2 = \rho_2 \cdot g \cdot S \cdot (z + \varepsilon_2)$. Posons alors $P_1 = P_2$ pour conserver la pression hydrostatique dans le grau et une densité de l'eau de 1 % au dessus dans un cas soit : $\rho_1 = 1.01 \cdot \rho_2$ en prenant dans le premier cas une hauteur « d'eau de référence » soit « égale à 0 : $\varepsilon_1 = 0$ » il en vient avec $P_1 = P_2$ la formulation suivante : $\rho_1 \cdot z = \rho_2 \cdot (z + \varepsilon_2)$ soit finalement avec $\rho_1 = 1.01 \cdot \rho_2$ on trouve $\varepsilon_2 = 0.01 \cdot z$ soit pour notre exemple une hauteur d'eau de 4 centimètres pour une profondeur de 4 mètres. Ainsi une masse d'eau dessalée entraînant une baisse de 1% de la densité entraînerait une surcote de 4 cm dans le grau.

Nous savons que la masse d'eau de la lagune est dessalée par rapport à la mer et que le bief aval du canal de la Robine (se jetant dans le grau) entraîne souvent des stratifications de la masse d'eau dans le grau. Ces deux phénomènes influent sur la densité de la masse d'eau et donc sur le niveau de hauteur d'eau dans le grau. Ils ne sont pas pris en compte dans le modèle et peuvent expliquer en partie les erreurs d'estimation du modèle.

II.2.2.c.2 Résultats de ces simulations

Les hauteurs d'eau estimées sont d'une manière générale assez fidèles aux variations de hauteurs d'eau mesurées (Figure 22, Figure 23 et Figure 24). Si les renverses et les amplitudes sont bien phasées et représentées par le modèle, il existe cependant quelquefois un biais systématique avec le modèle qui sous-estime les valeurs mesurées. Au niveau des débits, le signal simulé représente assez bien le signal mesuré. Seules les périodes avec des événements pluvieux ou météorologiques particuliers (vents forts) sont moins bien représentées (Figure 25, Figure 26 et Figure 27). Au niveau des volumes journaliers échangés, en simulant une hauteur d'eau théorique pour forcer en condition à la limite, la part de variabilité observée expliquée par le modèle diminue mais reste satisfaisante. En effet, sur les débits sortants, en prenant un signal de hauteur d'eau simulé, le modèle explique 55% de la variabilité observée (sans biais) des volumes journaliers sortants hors épisode pluvieux de janvier 2006 (Figure 29). Pour cet épisode, le modèle explique seulement 49 % de la variabilité, avec une tendance à sous-estimer ces volumes. Au niveau des volumes d'eau entrants dans la lagune, le modèle sous-estime ces volumes systématiquement d'environ 30 % et explique 37 % de la variabilité observée (Figure 28 et Figure 29).

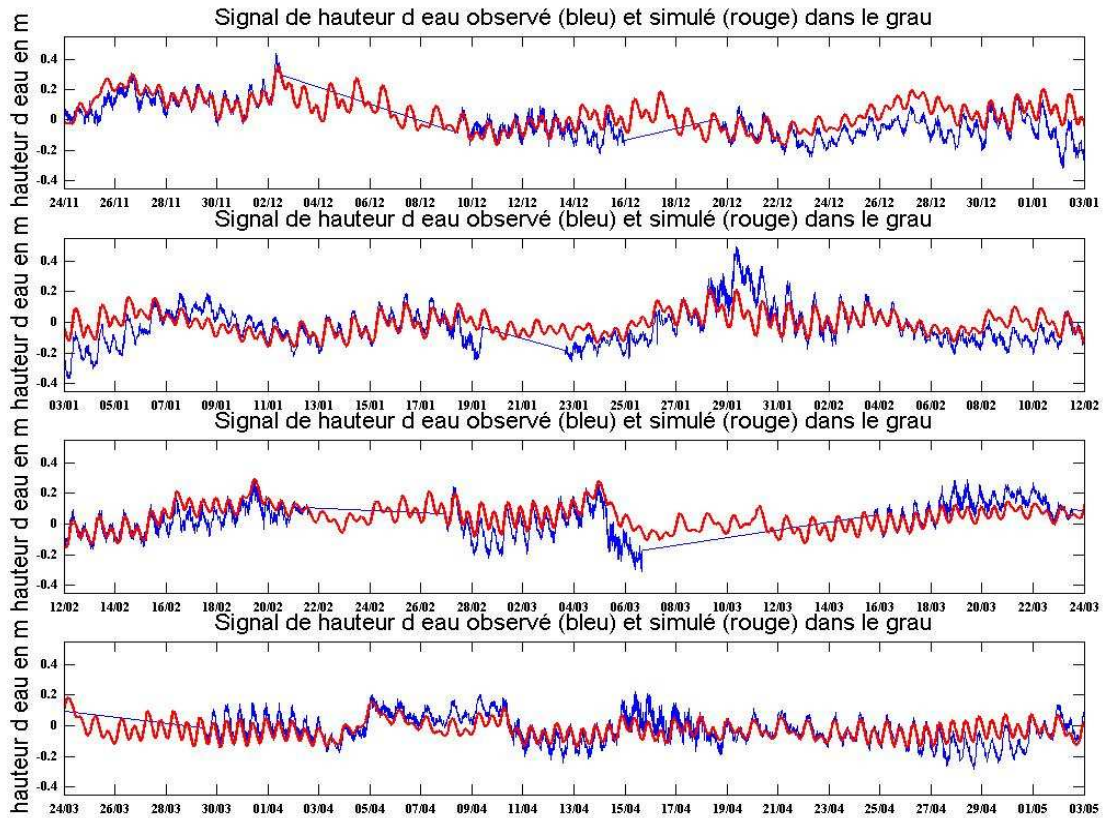


Figure 22 : comparaison entre les hauteurs d'eau observée (en bleu) et simulés (en rouge) du 24 novembre 2005 au 03 mai 2006

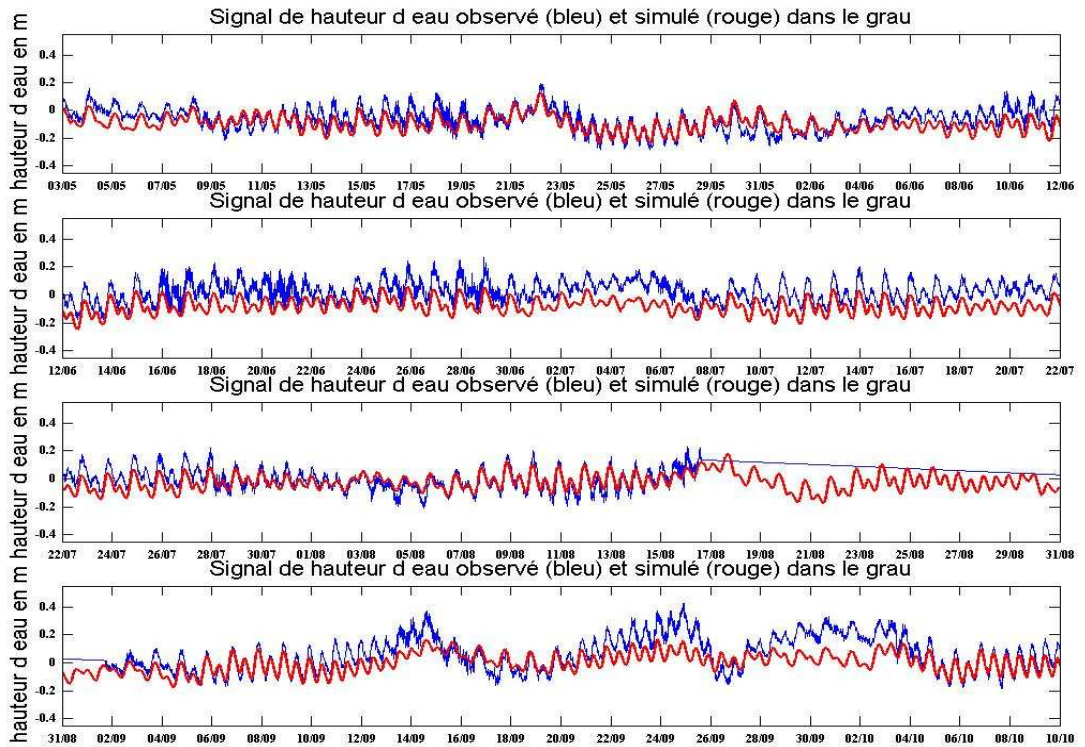


Figure 23 : comparaison entre les hauteurs d'eau observée (en bleu) et simulés (en rouge) du 3 mai 2006 au 10 octobre 2006

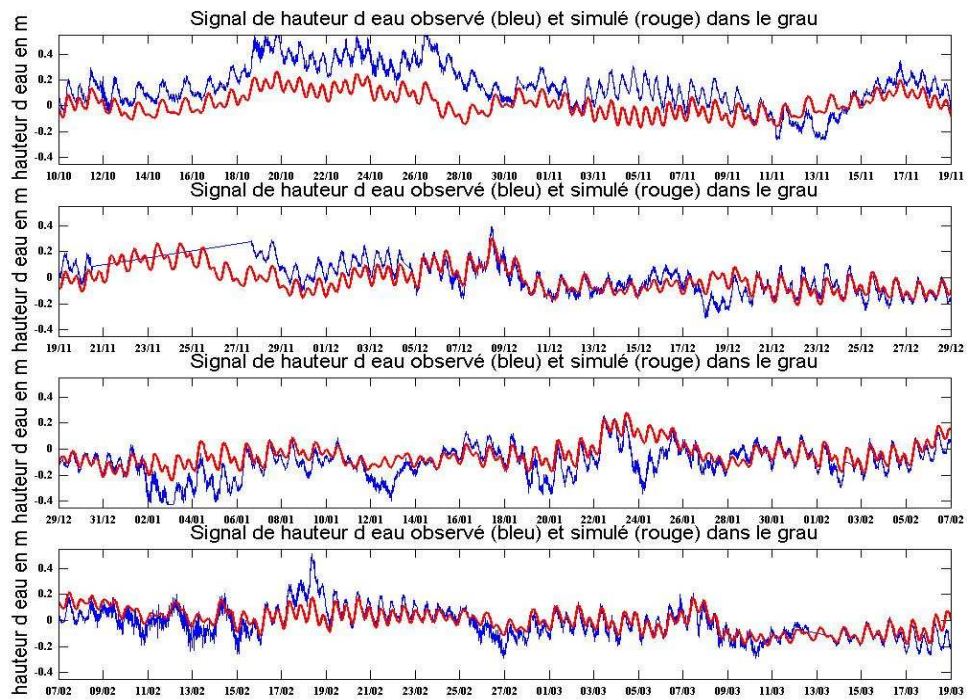


Figure 24 : comparaison entre les hauteurs d'eau observée (en bleu) et simulés (en rouge) du 10 octobre 2006 au 1^{er} avril 2007

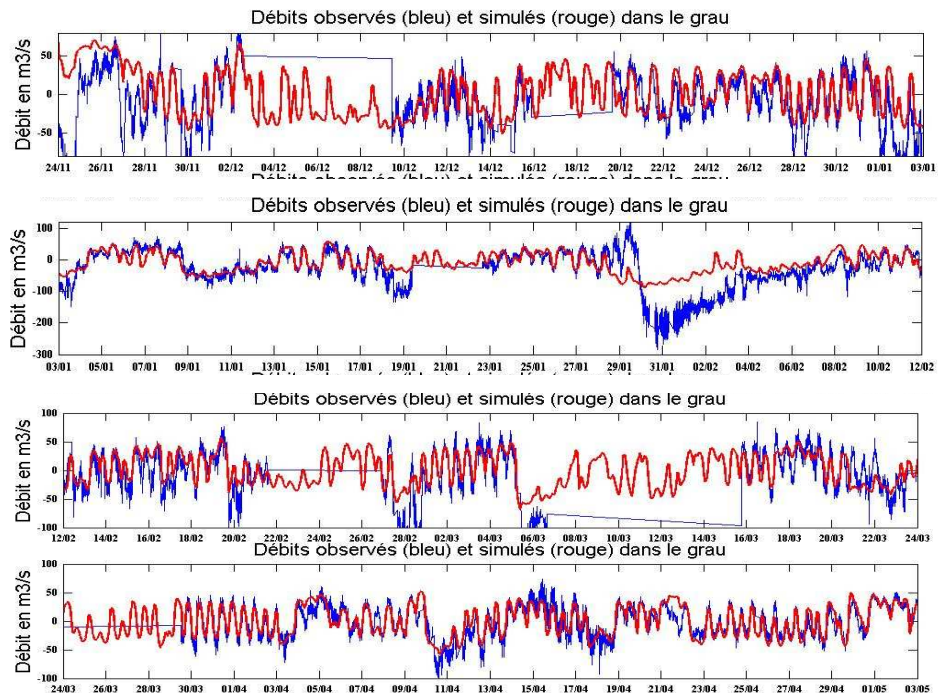


Figure 25 : Débit observés (en bleu) et simulés (en rouge) du 24 novembre 2005 au 03 mai 2006

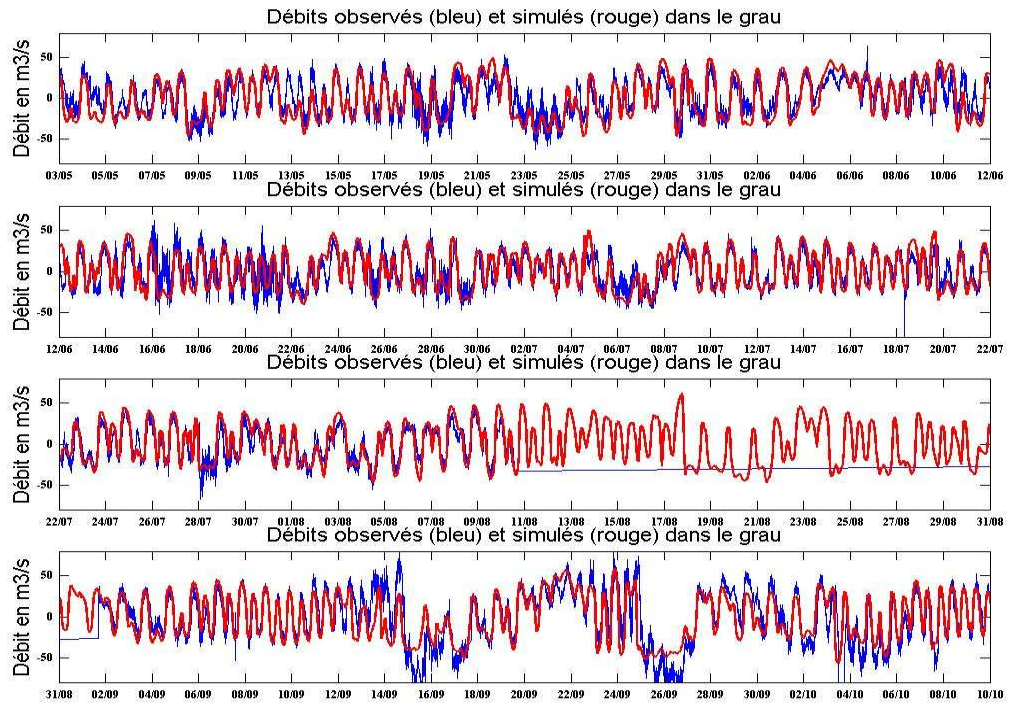


Figure 26 : Débit observés (en bleu) et simulés (en rouge) du 3 mai 2006 au 10 octobre 2006

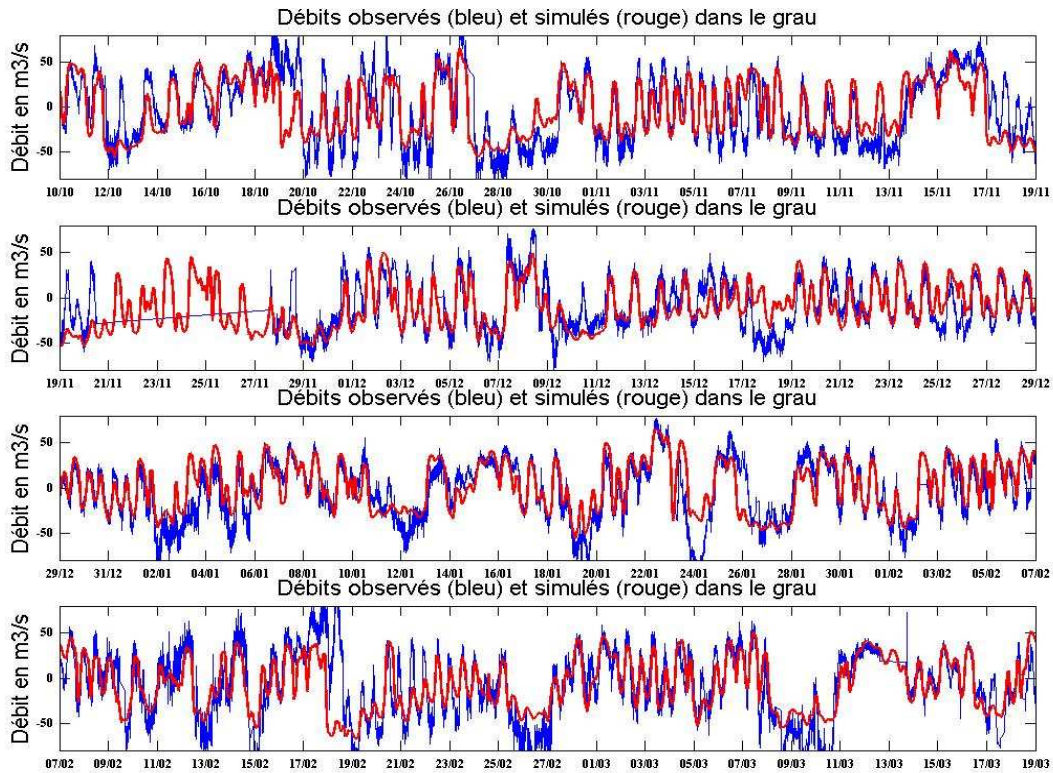


Figure 27 : Débit observés (en bleu) et simulés (en rouge) du 10 octobre 2006 au 1^{er} avril 2007

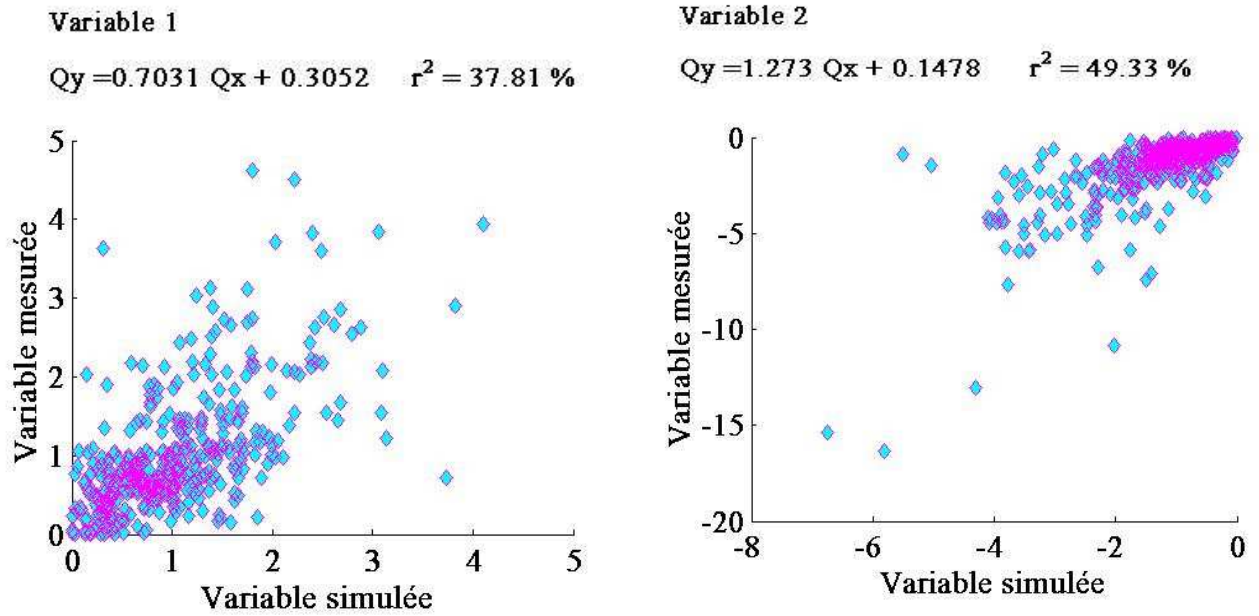


Figure 28 : Comparaison et régression statistiques des volumes journaliers entrants (à gauche) et sortants (à droite) simulés et observés sur la période de décembre 2005 à Avril 2007

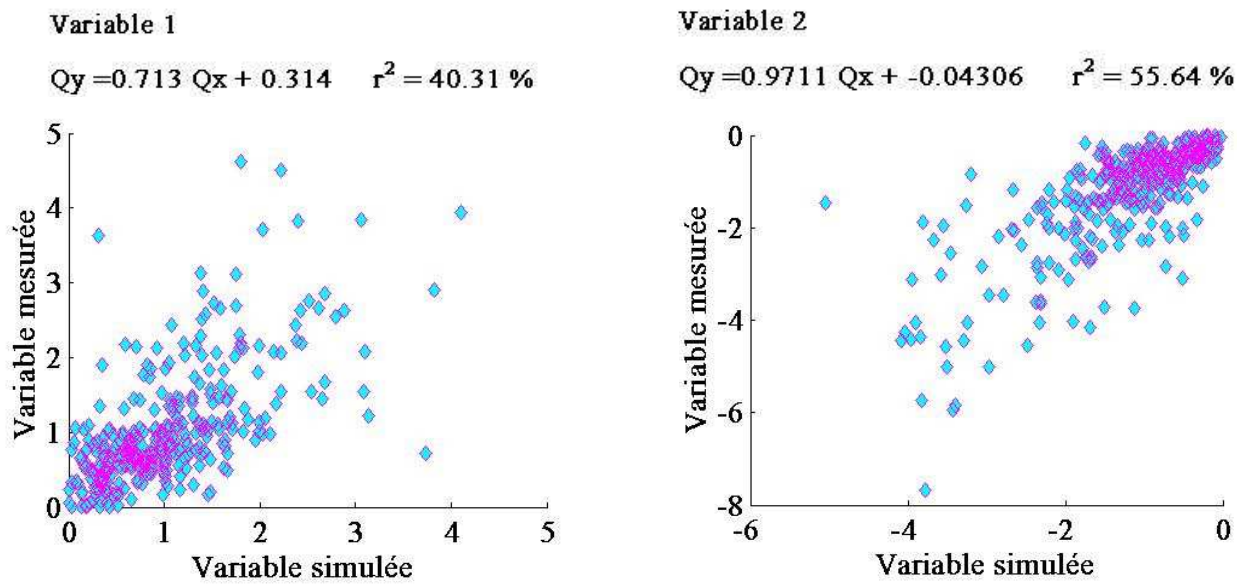


Figure 29 : Comparaison et régression statistiques des volumes journaliers entrants (à gauche) et sortants (à droite) simulés et observés sur la période de mars 2006 à Avril 2007 (on enlève la période du gros événement pluvieux de février 2006)

II.2.2.d Amélioration des estimations des apports du bassin versant de l'épisode de janvier/février 2006 à partir des débits mesurés dans le grau

II.2.2.d.1 Présentation et objectif de ces simulations

Au cours de l'épisode pluvieux très intense de fin janvier 2006, les débits mesurés dans le grau sont montés à 300 m³/s et une quantité de près de 40 millions de m³ d'eau a été exportée vers la mer. Sur les résultats de simulation, même avec un paramétrage optimal, ces débits sortant importants et ces volumes exportés vers la mer ne sont pas bien reproduits et complètement sous-estimés. Les débits du bassin versant utilisés et estimés apportent près de 22 Mm³ d'eau sur la période de l'épisode. Ainsi, de nouvelles estimations des contributions des apports d'eau du bassin versant ont été réalisées sur cette période à l'aide de l'outil de modélisation LOICZ (Le Noc, 2010). De nouveaux forçages sont utilisés (cf annexes) afin de reconduire l'analyse statistique.

II.2.2.d.2 Résultats de ces simulations

Les résultats sur les hauteurs d'eau et sur les signaux de débits simulés sont assez proches de ceux de la partie précédente (Figure 30, Figure 31 et Figure 32). L'amélioration des estimations de l'hydrologie du bassin versant ne semble pas modifier fortement les débits et les hauteurs d'eau dans le grau. Cependant, sur les volumes journaliers sortants et entrants, le modèle explique davantage la variabilité observée sans augmenter le biais d'estimation. Ainsi sur les volumes entrants sur toute la période, le modèle passe de 37 à 44% de variance expliquée, et sur les volumes d'eau sortants, il passe de 55 à 61 % (Figure 33, Figure 34, Figure 35 et Figure 36). Finalement, les corrections sur l'hydrologie améliorent légèrement les estimations du modèle sur les volumes échangés mer/lagune.

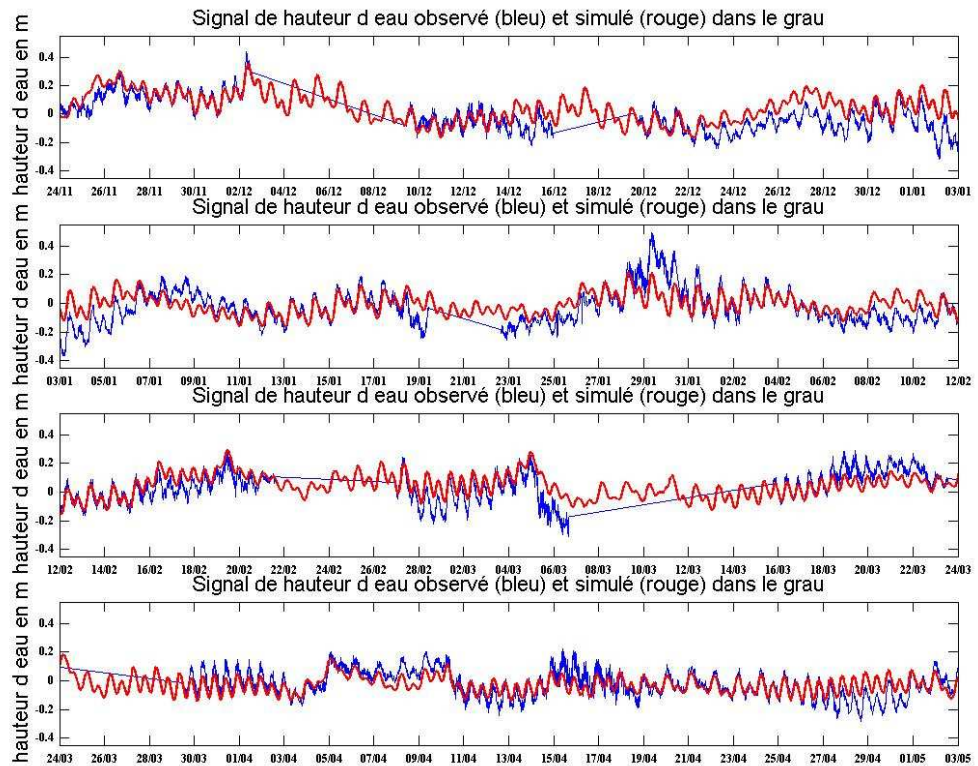


Figure 30 : Hauteurs d'eau observées (en bleu) et simulés (en rouge) du 24 novembre 2005 au 03 mai 2006

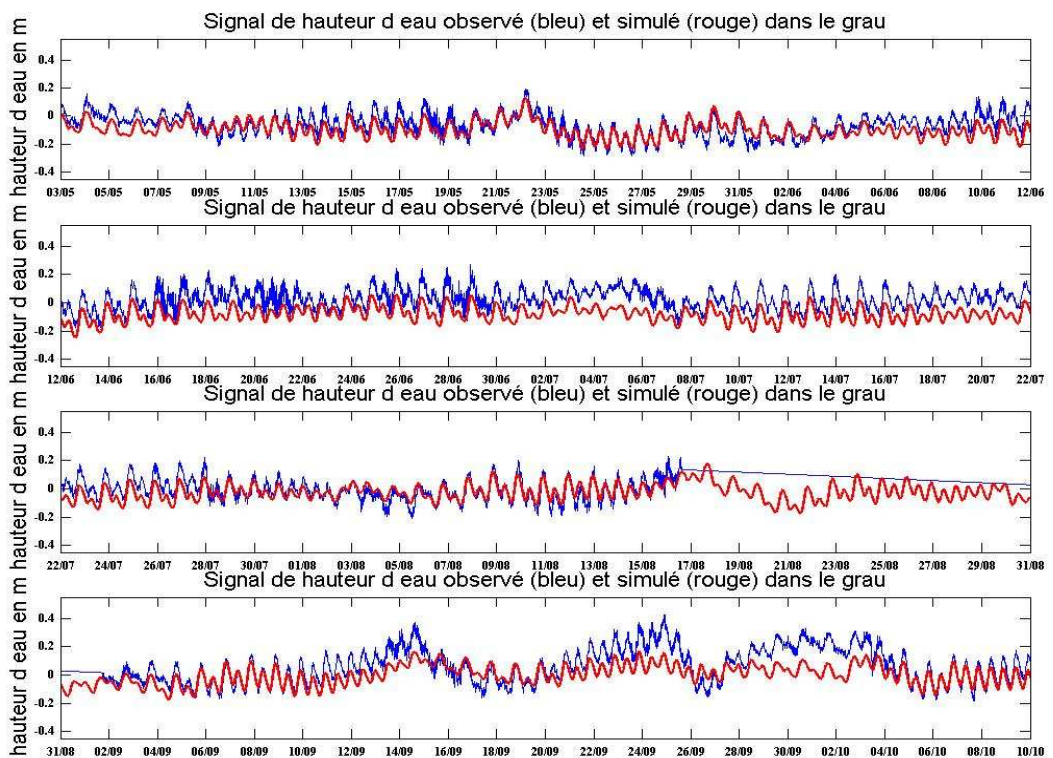


Figure 31 : Hauteurs d'eau observées (en bleu) et simulés (en rouge) du 3 mai 2006 au 10 octobre 2006

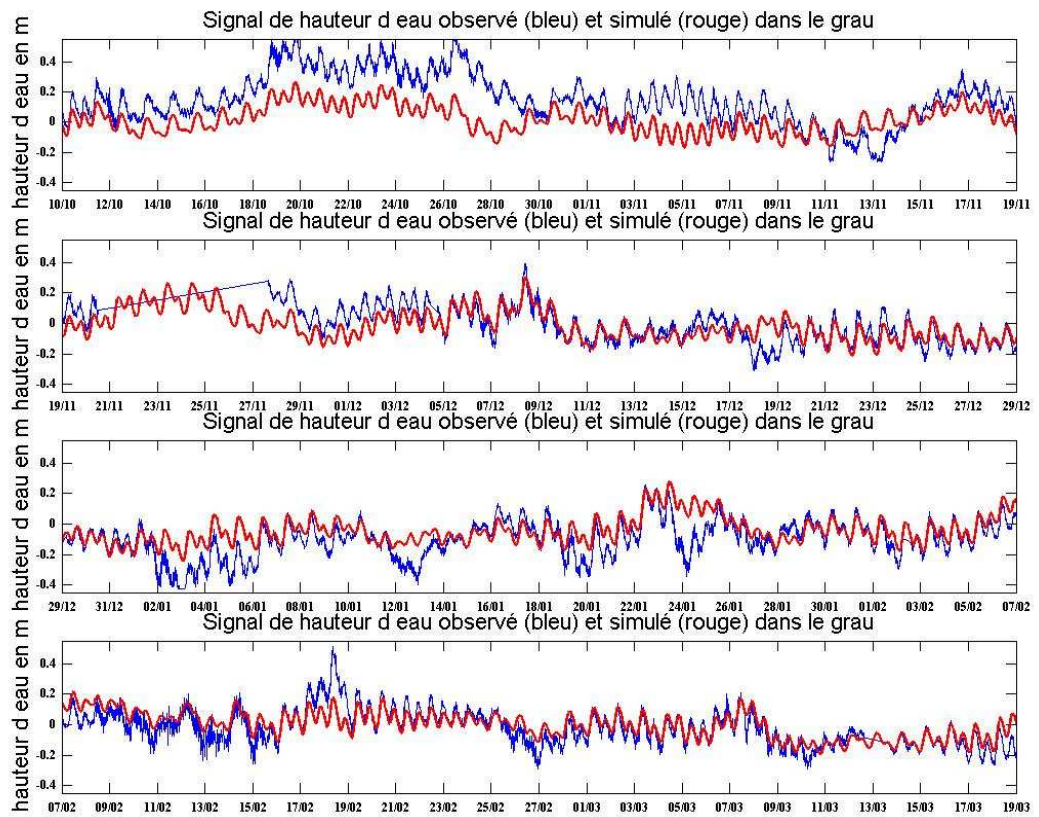


Figure 32 : Hauteurs d'eau observées (en bleu) et simulés (en rouge) du 10 octobre 2006 au 1^{er} avril 2007

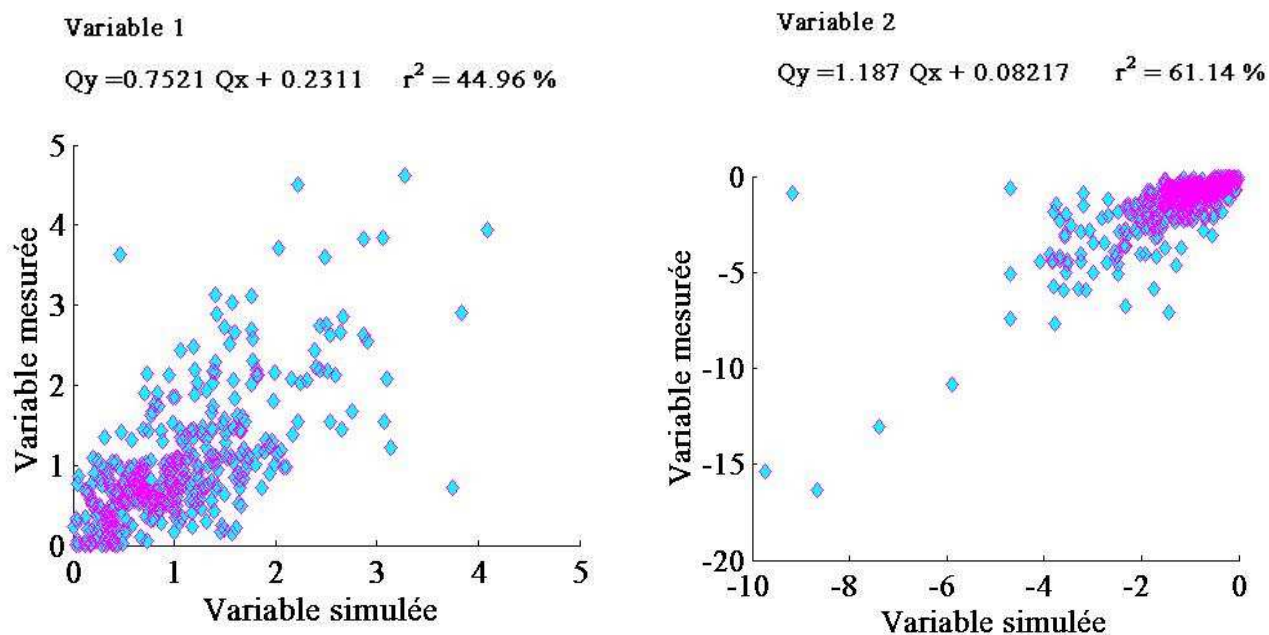


Figure 33 : Comparaison et régressions statistiques des volumes journaliers entrants (à gauche) et sortants (à droite) simulés et observés sur la période de décembre 2005 à Avril 2007 (hauteur d'eau théorique)

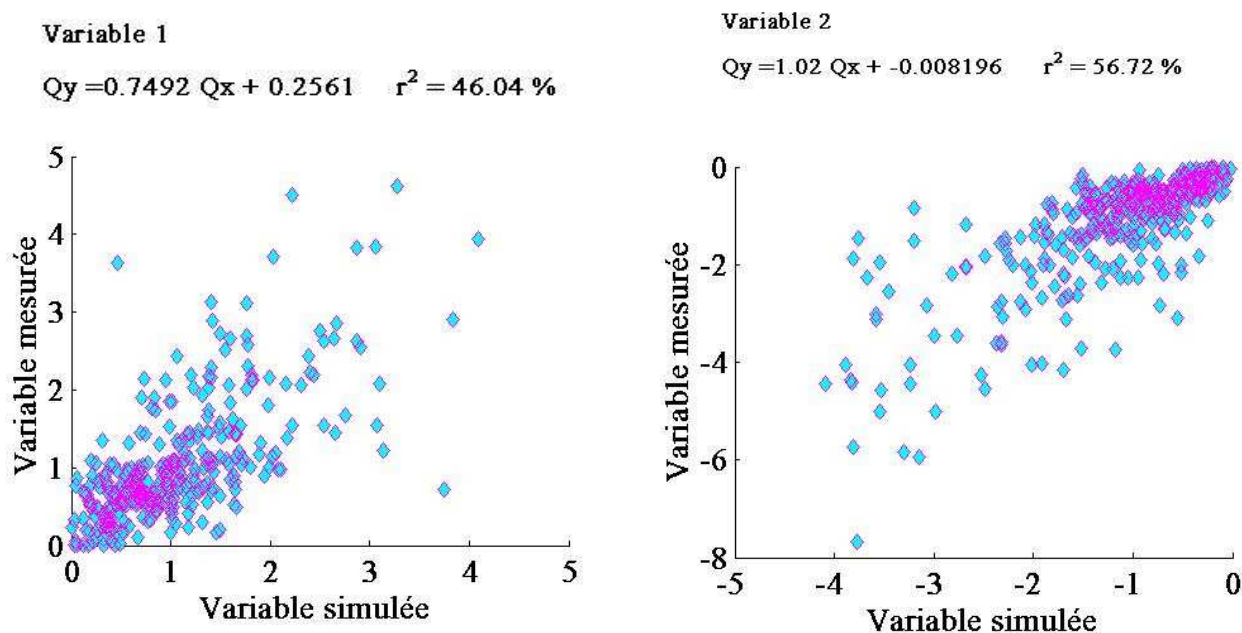


Figure 34 : Comparaison et régressions statistiques des volumes journaliers entrants (à gauche) et sortants (à droite) simulés et observés sur la période de mars 2006 à Avril 2007 (on enlève la période du gros évènement pluvieux de février 2006) (hauteur d'eau théorique)

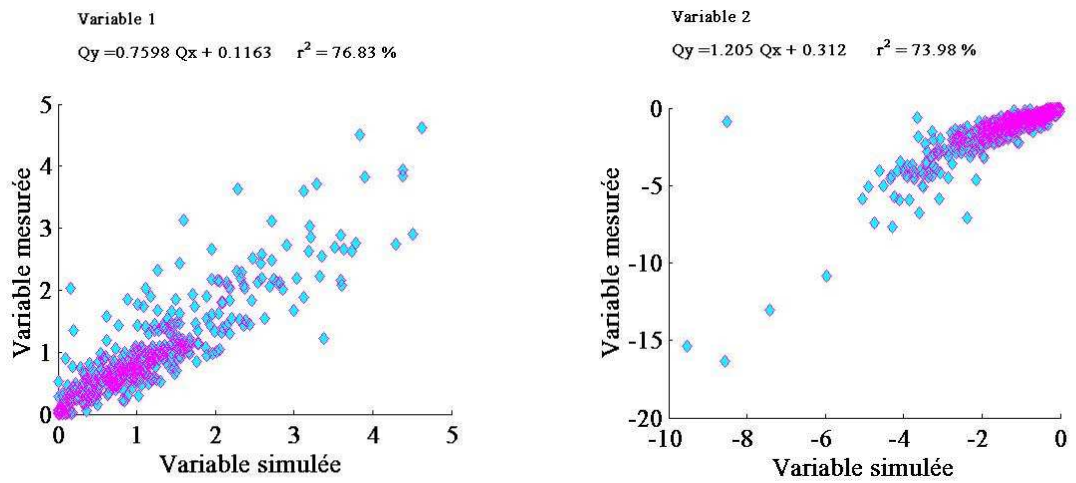


Figure 35 : Comparaison et régressions statistiques des volumes journaliers entrants (à gauche) et sortants (à droite) simulés et observés sur la période de décembre 2005 à Avril 2007 (hauteur d'eau mesurée)

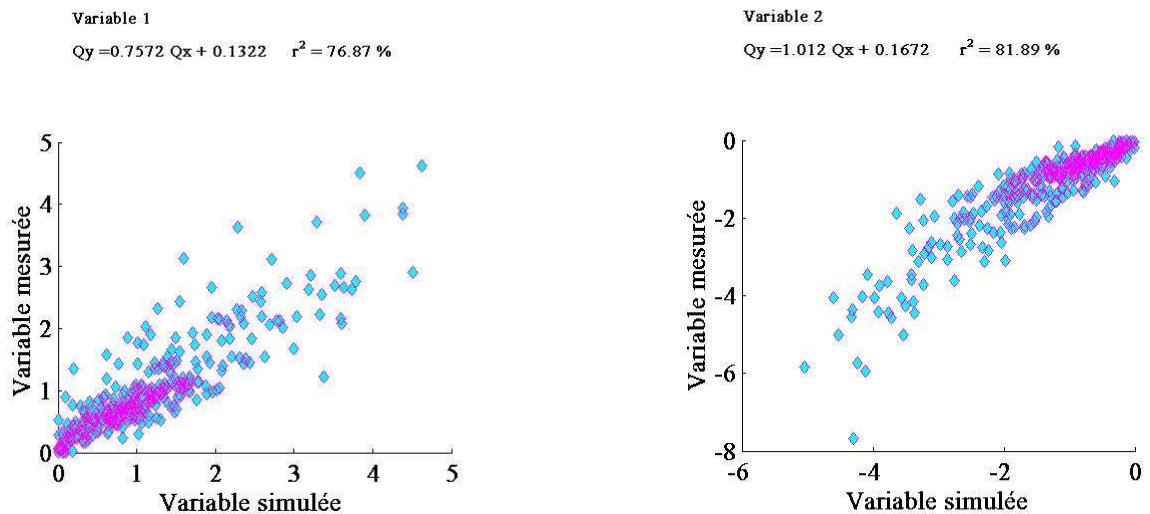


Figure 36 : Comparaison et régressions statistiques des volumes journaliers entrants (à gauche) et sortants (à droite) simulés et observés sur la période de mars 2006 à Avril 2007 (on enlève la période du gros événement pluvieux de février 2006) (hauteur d'eau mesurée)

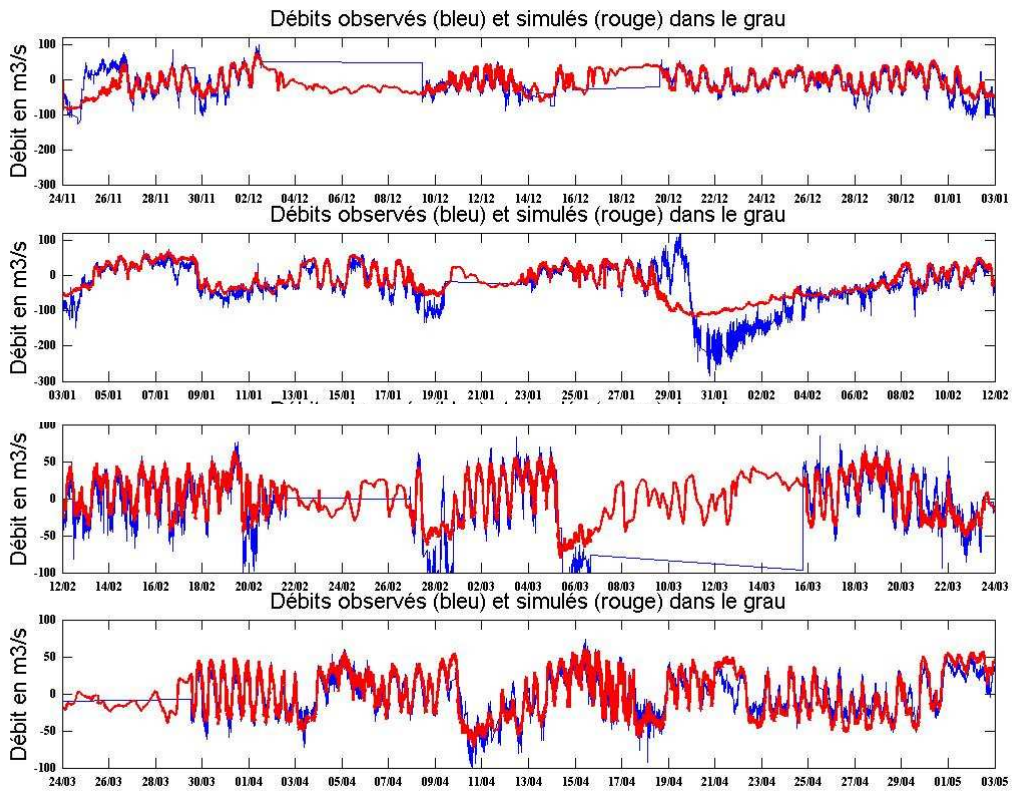


Figure 37 : Débit observés (en bleu) et simulés (en rouge) du 24 novembre 2005 au 03 mai 2006

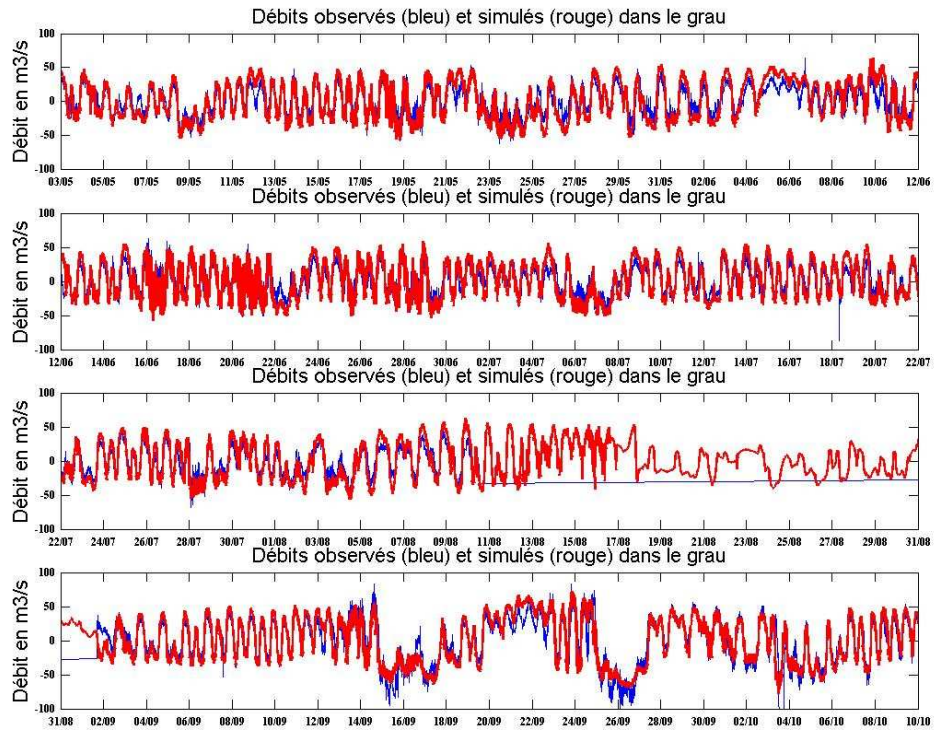


Figure 38 : Débit observés (en bleu) et simulés (en rouge) du 3 mai 2006 au 10 octobre 2006

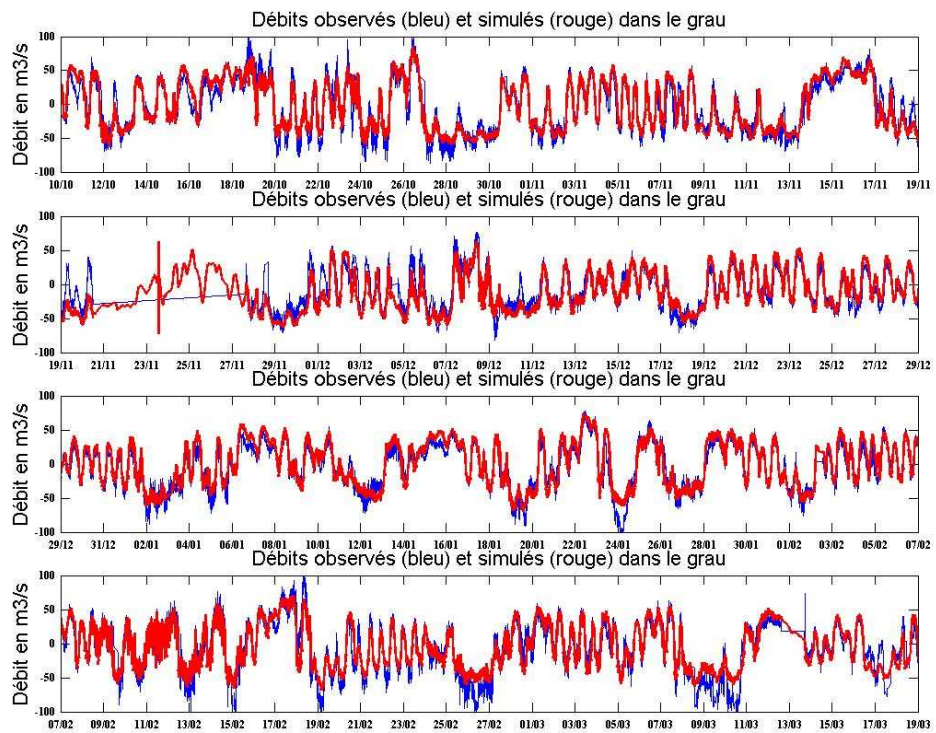


Figure 39 : Débit observés (en bleu) et simulés (en rouge) du 10 octobre 2006 au 1^{er} avril 2007

11.3 Synthèse de la partie II : recueil des données de calage du modèle

Cette première étape de l'étude aura permis de regrouper l'ensemble des données hydrologiques et météorologiques disponibles autour et sur la lagune de Bages-Sigean. Ces données ne couvrent malheureusement pas l'ensemble du bassin versant, ni toute la durée d'étude proposée (2000/2010). Il y a donc sur cette lagune une **carence importante de données hydrologiques**, en particulier sur les apports par le bassin versant. Les débits du Canérou ne sont connus que sur la moitié de la période, tandis que ceux de la Berre, pourtant non négligeables, n'ont été enregistrés que sur 11 mois.

Des premières estimations ont toutefois permis de hiérarchiser et d'estimer les ordres de grandeurs des apports à la lagune. On estime ainsi que sur les 10 dernières années, les volumes d'eau apportés par le Canérou et la Berre sont assez comparables (autour de 30 Mm³ par an chacun sur la période 2000-2010). **Cependant, lors d'évènements pluvieux extrêmes** observés certaines années (Figure 10, p17), **le bassin versant naturel peut apporter près de 60 millions de m³**, soit près du double des volumes moyens annuels d'eau douce.

Par ailleurs, les données disponibles sur le Canérou ont suscité quelques interrogations. En effet, la différence entre les volumes d'eau mesurés en amont à la prise d'eau sur l'Aude et les volumes d'eau déversés en aval dans la lagune indique que **près de la moitié des volumes d'eau ont disparu, pour un usage vraisemblablement agricole**. Compte-tenu de la proximité des zones agricoles et des volumes mis en jeu, il serait important de connaître la part de cette eau qui arrive à la lagune, tant sur le thème hydrologique (impact sur la salinité de la lagune) que trophique (eutrophisation).

Une fois le système hydrologique mieux conceptualisé, **un travail technique de calibration du modèle Mars 3D** a pu être réalisé. Ce travail a consisté à utiliser le code sur la période nov 2005 - av 2007 afin d'estimer les débits dans le grau et de les comparer avec les mesures réalisées sur cette même période. Ce travail a permis de montrer la robustesse et la précision des estimations du modèle qui représente plus de 80 % de la variabilité observée. Cependant, ces résultats de qualité sont produits à partir de simulations utilisant des données acquises durant la période 2005 - 2007. Lorsque ces données ne sont pas disponibles (en dehors de 2005-2007), le modèle doit estimer la hauteur d'eau en mer. Les débits dans le grau sont donc moins bien estimés et ne représentent que 55% de la variabilité pour les débits sortants et 44 % pour les débits entrants. **Le modèle est donc un outil très performant, notamment en l'utilisant avec des données mesurées (limingaphiques et hydrologiques), et reste encore assez performant et utile lorsque les données sont absentes ou incomplètes.**

III Impact des différents scénarii d'aménagements et de gestion sur la salinité de la lagune

III.1 Choix des indicateurs statistiques estimés à partir des résultats de simulation

- 1) Plusieurs indicateurs statistiques vont être estimés à partir des résultats des simulations. La lagune est découpée en 4 secteurs présentés sur la figure 40. **La salinité moyenne au cours du temps par secteur** est calculée pour chaque simulation. Elle permet de décrire l'évolution de la salinité moyenne pour les 4 masses d'eau correspondantes aux 4 secteurs choisis (Figure 42).
- 2) La salinité moyenne par case est calculée pour toute la durée de la simulation, **cela permet d'établir la cartographie de la salinité moyenne sur l'étang de 2000 à 2010**. De plus une carte de la différence de salinité moyenne entre le scénario de référence et le scénario testé est réalisée.
- 3) Une comparaison entre les salinités observées entre 2000 et 2010 **au niveau des points de mesures** (FILMED : Bages, Peyriac, Sigean, Port La Nouvelle et points RSL : nord, sud et milieu) et les salinités simulées en ces mêmes points est réalisée (Figure 43)
- 4) La différence de la salinité moyenne par secteur au cours du temps est calculée entre le scénario de référence et le scénario testé. Ces **écarts de la salinité moyenne par secteur** couvrent donc la période de 2000 -2010 (Figure 48). Cette série est ensuite utilisée pour retracer une différence sur un signal « type annuel » pour voir ensuite les **variabilités saisonnières et inter-annuelles de ces écarts** (Figure 44).. Une « boxplot » pour chaque jour de l'année est tracée en utilisant donc 11 valeurs pour chaque jour (11 ans de simulation).

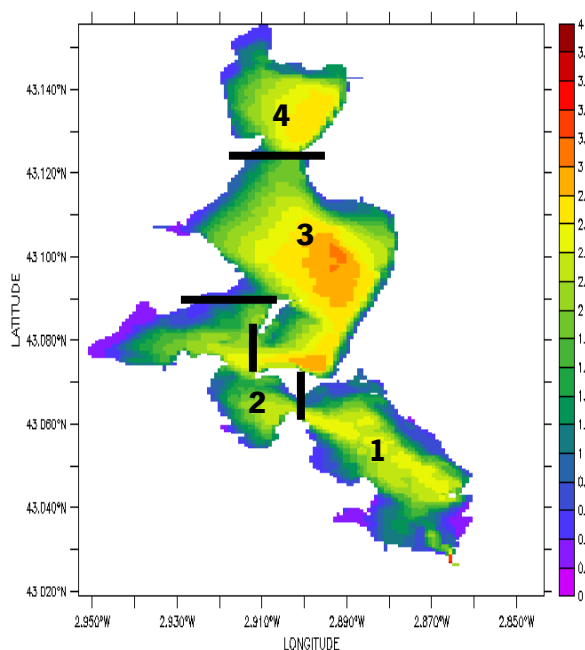


Figure 40 : Découpage en 4 secteurs de la lagune de Bages-Sigean pour l'estimation des moyennes de salinité au cours des simulations

bathymetry relative to the mean level (m)

III.2 Présentation et description du scénario de référence

La situation de référence est réalisée sur la période 2000 - 2010 en prenant compte la section avant l'ouverture du barrage à vannes jusqu'en avril 2004 (date de l'enlèvement de l'ouvrage), puis la nouvelle section du grau d'avril 2004 à aujourd'hui.

Pour les apports du bassin versant, les mesures de débit du Canelou ne sont disponibles qu'entre 2000 et 2004 et en 2010. Pour la période de 2005 à 2009 sur laquelle il n'y a pas de données disponibles, nous avons reproduit le signal mesuré de 2000 à 2004, en ayant enlevé les valeurs suspectes (supérieure à 7 m³/s) des années 2002 et 2004. Pour le reste du bassin versant, nous utilisons les débits estimés à partir des pluies, présentés dans la première partie de ce travail (II.1.1.b, p12).

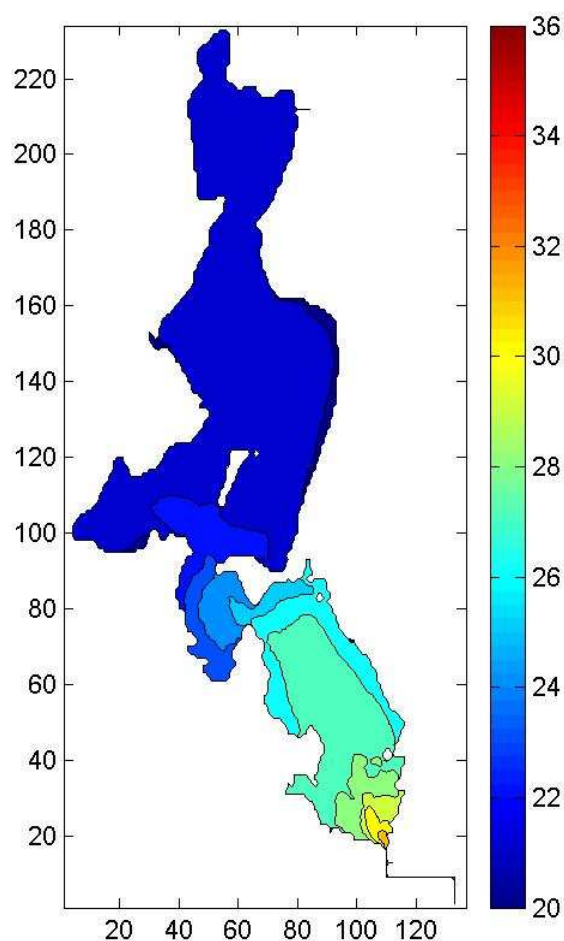


Figure 41 : Carte de la salinité moyenne du scénario de référence entre 2000 et 2010

La répartition de la salinité moyenne sur l'ensemble de la période de simulation montre un **gradient nord-sud**. Les salinités moyennes sont entre 20 et 23 unités de salinité sur la moitié nord de la lagune (Figure 41), et s'élèvent jusqu'à près de 32 unités de salinité au sud près du grau de Port la Nouvelle. Le bassin sud de la lagune a une salinité moyenne proche de 26 entre 2000 et 2010. En terme de salinité

moyenne, il semble en réalité n'exister que 2 grandes zones homogènes dans la lagune de Bages-Sigean : un grand bassin nord regroupant les secteurs 2, 3 et 4 , en moyenne plus dessalé de 5/6 unités, et le bassin sud (secteur 1).

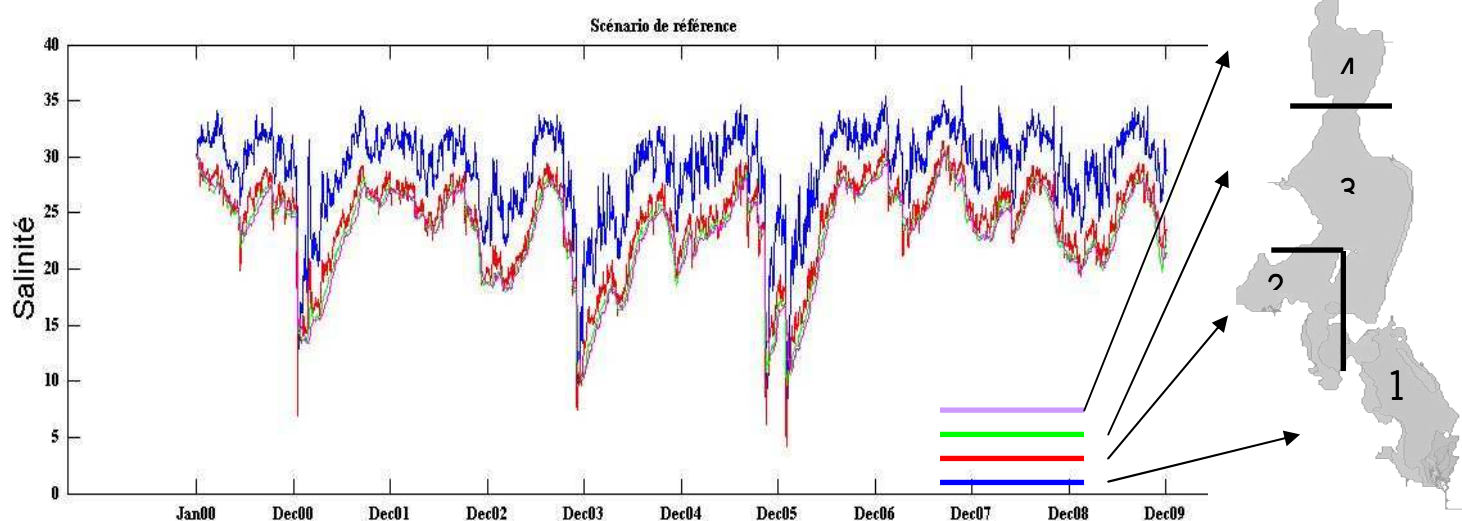


Figure 42 : Evolution de la salinité moyenne pour les 4 secteurs et sous-bassins choisis entre 2000 et 2010 pour le scénario de référence

La Figure 42 représente l'évolution temporelle de la salinité moyenne pour les 4 secteurs choisis (du secteur 1 au Sud au secteur 4 au Nord). On remarque pour les 4 secteurs que les variations de salinité au cours du temps (variations saisonnières et inter-annuelles) sont assez similaires. Le signal du secteur 1 (en bleu) présente les mêmes variations temporelles mais avec une salinité systématiquement plus forte d'environ 5 unités. Les signaux des 3 autres secteurs (2,3 et 4) sont très proches et semblent caractériser une masse d'eau relativement homogène.

La figure 43 représente les variations de salinité aux points de suivi et d'observations de la salinité sur la lagune de Bages-Sigean entre 2000 et 2011. Sur cette figure, le signal en bleu correspond à la salinité simulée par le modèle pour chaque point et les points rouges aux mesures effectuées. Nous remarquons que les estimations faites par le modèle, la variabilité saisonnière, inter-annuelle et entre les points est assez bien représentée. On observe cependant une sous-estimation modérée et systématique du modèle par rapport aux observations. Il a été montré que les échanges entre la mer et la lagune sont bien reproduits par le modèle (Cesmat et al, 2011). Cette sous-estimation de la salinité provient donc vraisemblablement des forçages hydrologiques surestimés sur cette période. Les apports d'eau douce sont surestimés essentiellement pour le bassin versant naturel (surtout la Berre) puisque les débits ont été estimés à partir des pluies.

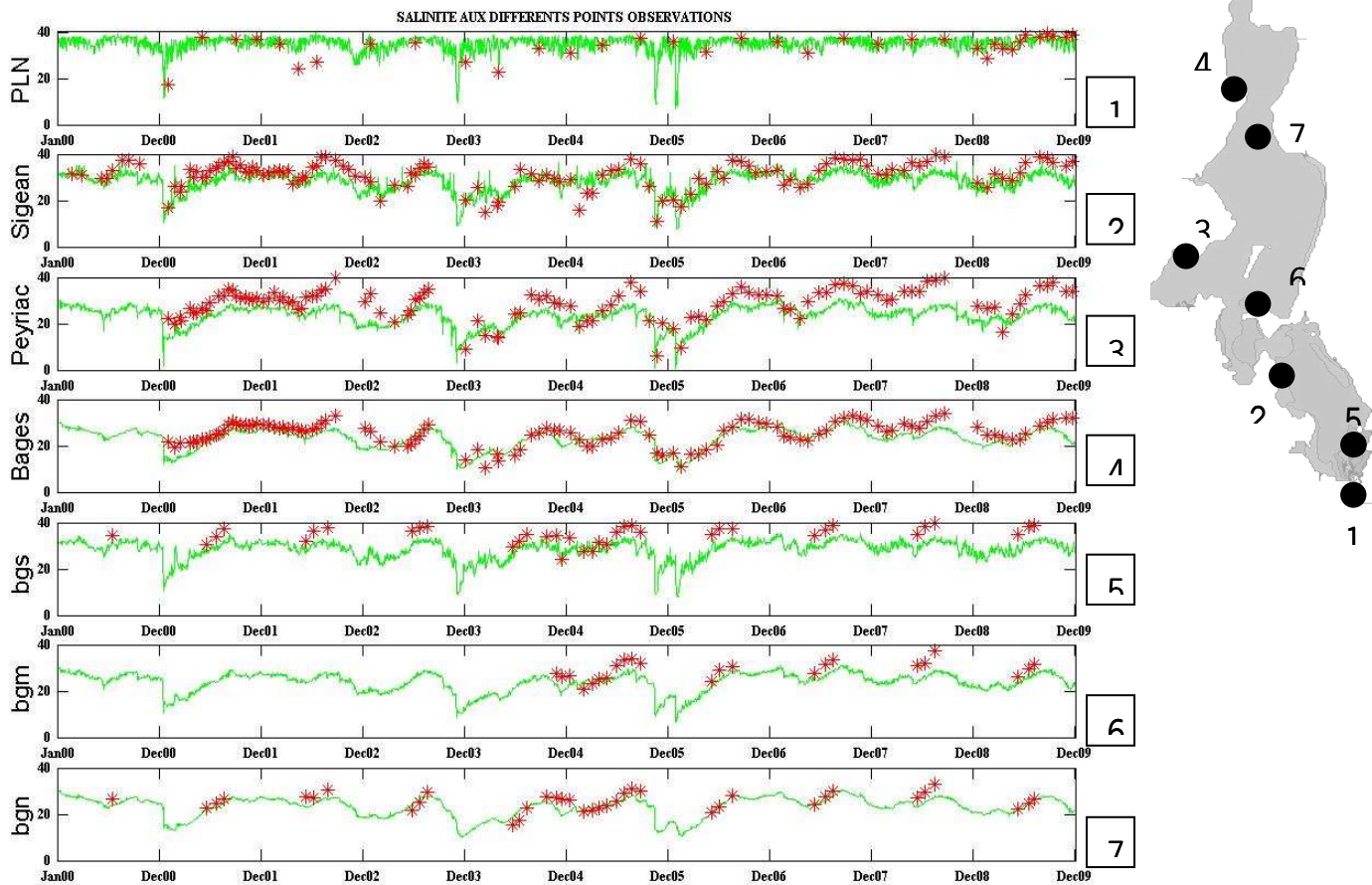


Figure 43 : Evolution de la salinité aux 7 points de suivis, signal estimé par le modèle pour le scénario de référence (en vert) et mesures effectuées (points rouges) sur la période de 2000 à 2010

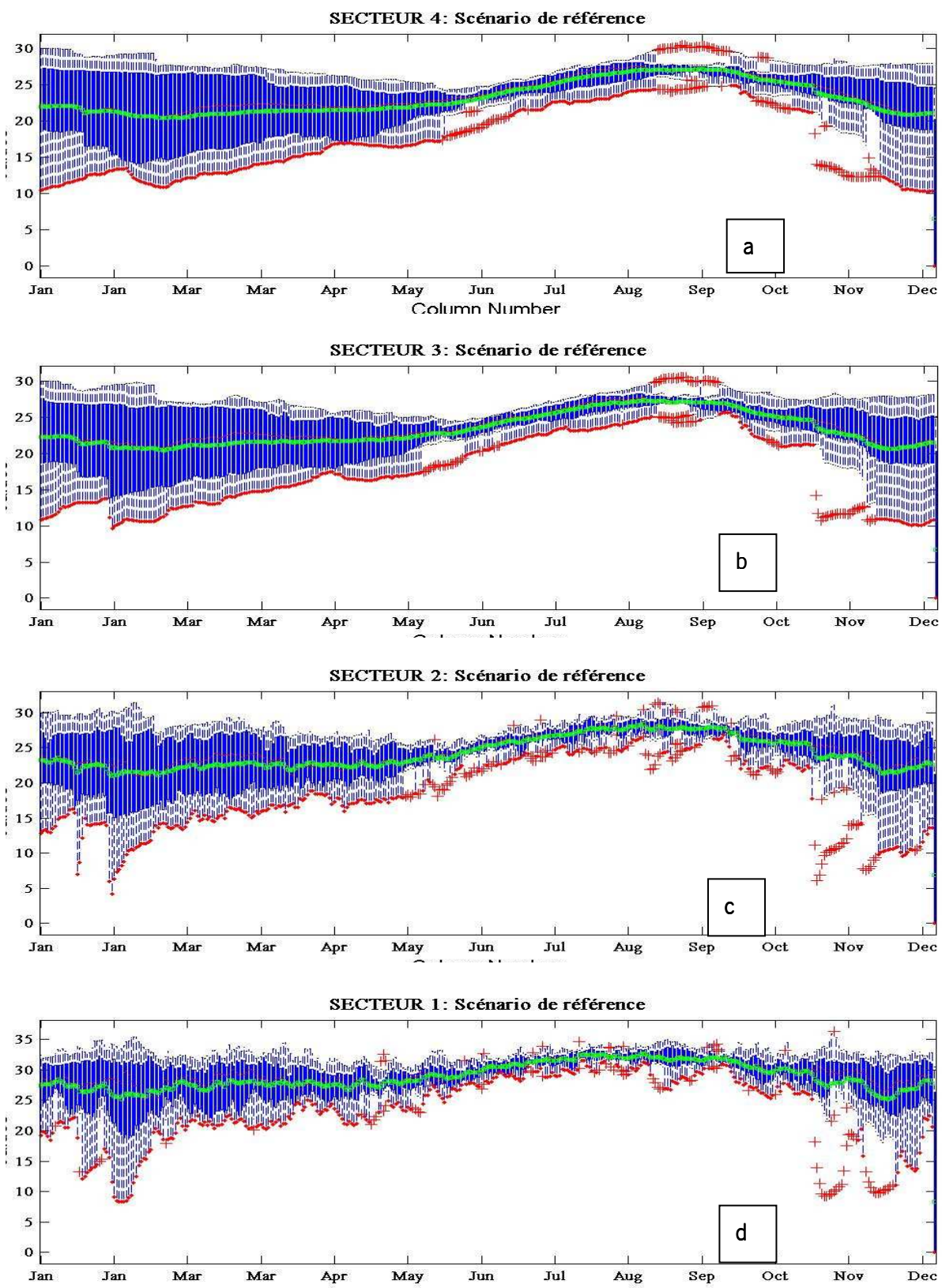


Figure 44 : Boxplot de la salinité de chaque jour de l'année pour les 10 ans (scénario de référence)

La Figure 44 montre la variation de la salinité pour les 10 ans de simulation de la situation de référence au cours d'une année, pour les 4 secteurs de la lagune. Pour chaque jour de l'année, la moyenne est représentée en vert, la valeurs médianes pour les 10 années en rouge, les barres bleues correspondent au 1er et 3ième quartile et les points rouges aux valeurs extrêmes. Ces représentations permettent de caractériser une année type avec l'amplitude de variations saisonnières de la salinité pour chaque secteur, mais elles permettent également de quantifier la variabilité interannuelle de la salinité au cours de l'année.

Pour le secteur 1 (sud de la lagune), on remarque que les salinités moyennes varient au cours de l'année de 26 en hiver à 30 en été. Au nord de la lagune (secteur 4), on remarque que l'amplitude moyenne de variations saisonnières est supérieure, avec des variations de salinité de 21 unités en hiver à 26 unités en été. Les amplitudes de variations saisonnières de la salinité sont légèrement plus importantes dans le bassin nord de la lagune (5 à 6 unités de salinité) que dans le bassin sud (4 unités). Ensuite, la variation interannuelle de salinité (différence entre les années de suivi) est plus importante en hiver et au printemps (de novembre au mois de mai), tandis qu'en été la variabilité entre les années représentées en bleu sur la Figure 44 est plus faible, quelque soit le secteur de la lagune. En été la variabilité entre les années de la salinité moyenne par secteur atteint 2 unités de salinité. Par contre durant les périodes hivernales, d'une année sur l'autre les variations de salinité sont plus importantes, l'espace inter-quartile est proche de 12 unités de salinité Figure 44. Cette variabilité inter-annuelle est d'ailleurs légèrement plus importante dans le bassin nord que dans le bassin sud, avec 12 unités de salinité sur les secteurs 2, 3 et 4 et 10 unités de salinité sur le secteur 1.

Finalement cette analyse nous permet de hiérarchiser l'influence de différents facteurs et différentes échelles temporelles sur les variations de salinité dans la lagune.

Ainsi, la variabilité interannuelle liée aux différences de pluviométrie d'une année sur l'autre est le facteur générant les plus grandes amplitudes de variations dans la lagune (entre 10 et 12 unités de salinité) mais pendant la moitié de l'année, de novembre à mai. Elle est plus faible en été avec au maximum de 2 unités de salinité.

III.3 Scénarii d'aménagement du grau de Port La Nouvelle

III.3.1 Effet de l'enlèvement du barrage à vannes sur la période 2004-2010

Le premier scénario sur le grau est réalisé sur la période 2004-2010. Pour simuler l'impact qu'a eu l'enlèvement du barrage à vannes sur la salinité de l'étang, il convient de **raisonner à l'envers** et de simuler l'impact du « non-enlèvement de ce barrage » puisque la situation de référence intègre cet enlèvement, avec une modification de la section d'échanges en 2004, passant de 54m² entre 2000 et 2003 à 59 m² entre 2004 et 2010. Par conséquent, ce premier scénario est effectué en **conservant la section de 54m² avant l'ouverture du barrage à vannes sur toute la période 2000-2010.**

La structure spatiale de la salinité moyenne sur la période de simulation change peu, il existe toujours un gradient nord-sud de cette salinité moyenne en conservant le barrage à Vannes (Figure 45). La répartition de la différence de salinité moyenne entre la situation de référence et la simulation barrage à Vannes montre des valeurs négatives de -0.6 unité de salinité dans le bassin nord, jusqu'à -1 unité de salinité près du grau de Port la Nouvelle dans le sud de la lagune (Figure 45). Ainsi, on peut estimer que l'enlèvement du barrage à vannes à entraîner une « marinsation moyenne » de la lagune de 0.8 unité de salinité dans le bassin nord et de 0.9 de salinité dans le bassin sud.

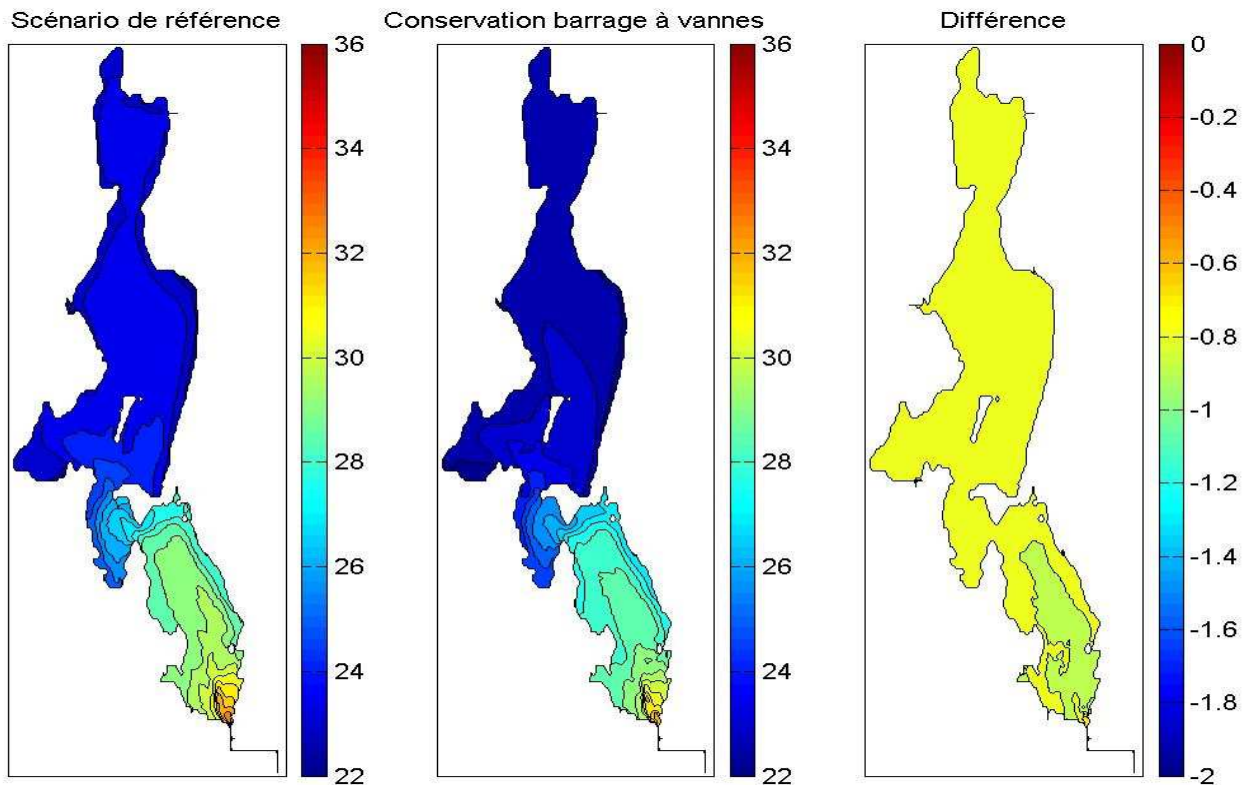


Figure 45 : Salinité moyenne (2004-2010) du scénario de référence (à gauche), le scénario de « non enlèvement du barrage à vannes » (au centre) et la différence des deux scénarii (à droite)

Au niveau temporel, l'écart de la salinité moyenne entre les 2 simulations est proche de 1 unité de salinité et reste assez constant tout au long de la période à partir de 2004 (Figure 46). De plus, on se rend compte que cette différence se met rapidement en place et reste assez constante au niveau saisonnier (au cours d'une année) ainsi qu'au niveau interannuel.

Ainsi, d'après les résultats du modèle, l'enlèvement du barrage à vannes a salinisé l'étang de 0.8 au nord à 1 unité de salinité au sud dès la première année de la réalisation de l'ouvrage.

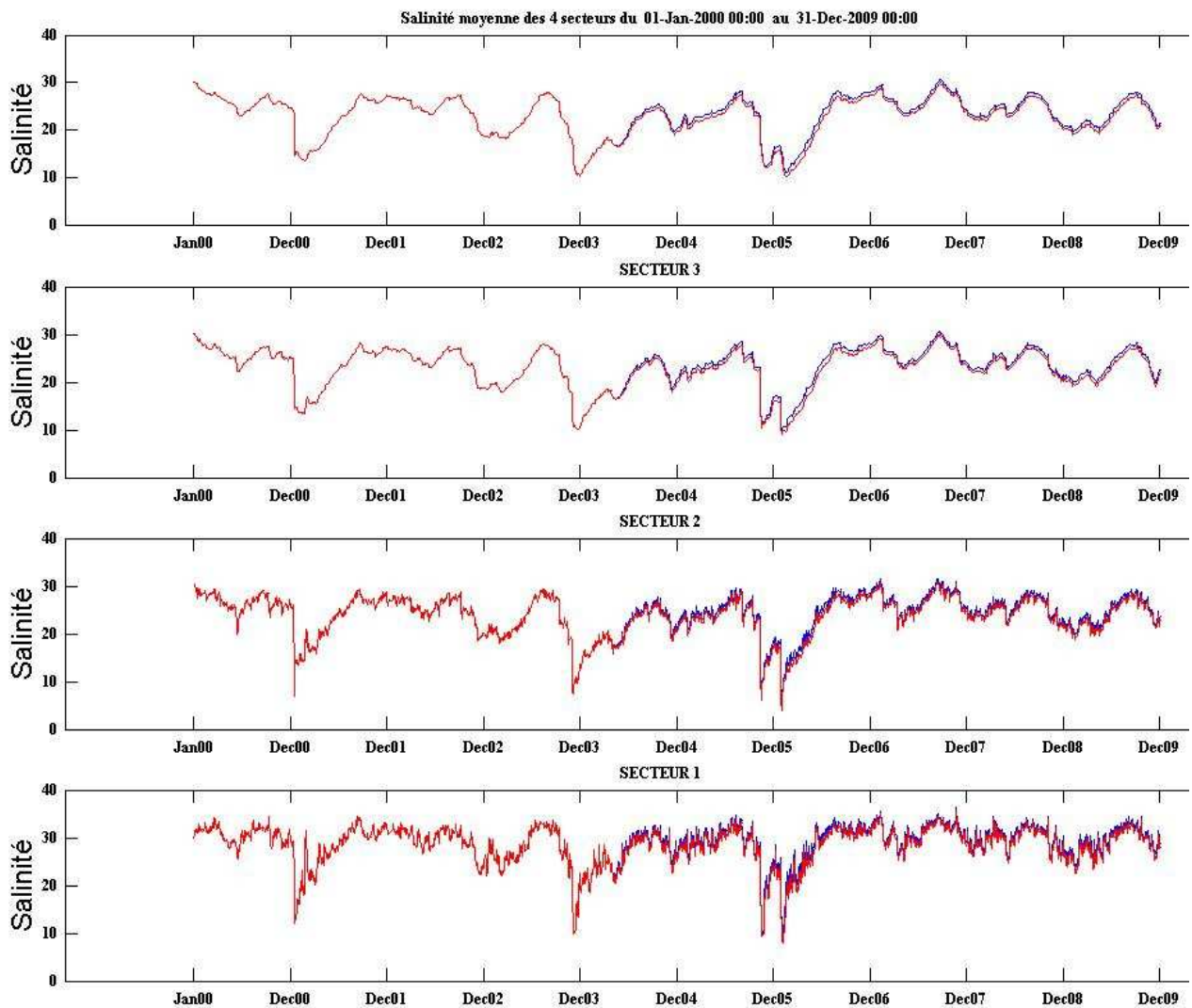


Figure 46 : Salinité moyenne pour les 4 secteurs définis entre 2000 et 2010 pour le scénario de référence (en bleu) et pour la simulation de conservation du barrage à Vannes (en rouge)

III.3.2 Scénario de l'enlèvement des piles du pont de la voie ferrée

Le second scénario sur le grau de la lagune correspond à l'enlèvement des anciennes piles du pont de la voie ferrée, ce qui induit une augmentation de la section d'échanges dans le grau de Port la Nouvelle à hauteur de 100m² (au lieu de 59 m² dans la situation de référence) sur la période 2004 - 2010. La Figure 47 expose la carte de la salinité moyenne 2004-2010 avec ce changement de la section d'échanges (au centre) et la différence avec la situation de référence (à droite). On remarque que la structure et le gradient de salinité Nord-sud de l'étang sont peu changés mais que la salinité moyenne est plus importante. Ainsi, la salinité moyenne est augmentée de 1.6 à 1.8 unités de salinité dans le bassin nord et dans le bassin sud.

Les différences de salinités moyennes entre 2004 et 2010 sont présentées pour les 4 secteurs choisis sur la Figure 48. Il apparaît une saisonnalité et un cycle annuel dans ces différences. En effet, l'impact de l'agrandissement de la surface d'échange entraîne une marinisation légèrement plus marquée durant l'été que durant l'hiver (Figure 48 et Figure 49).

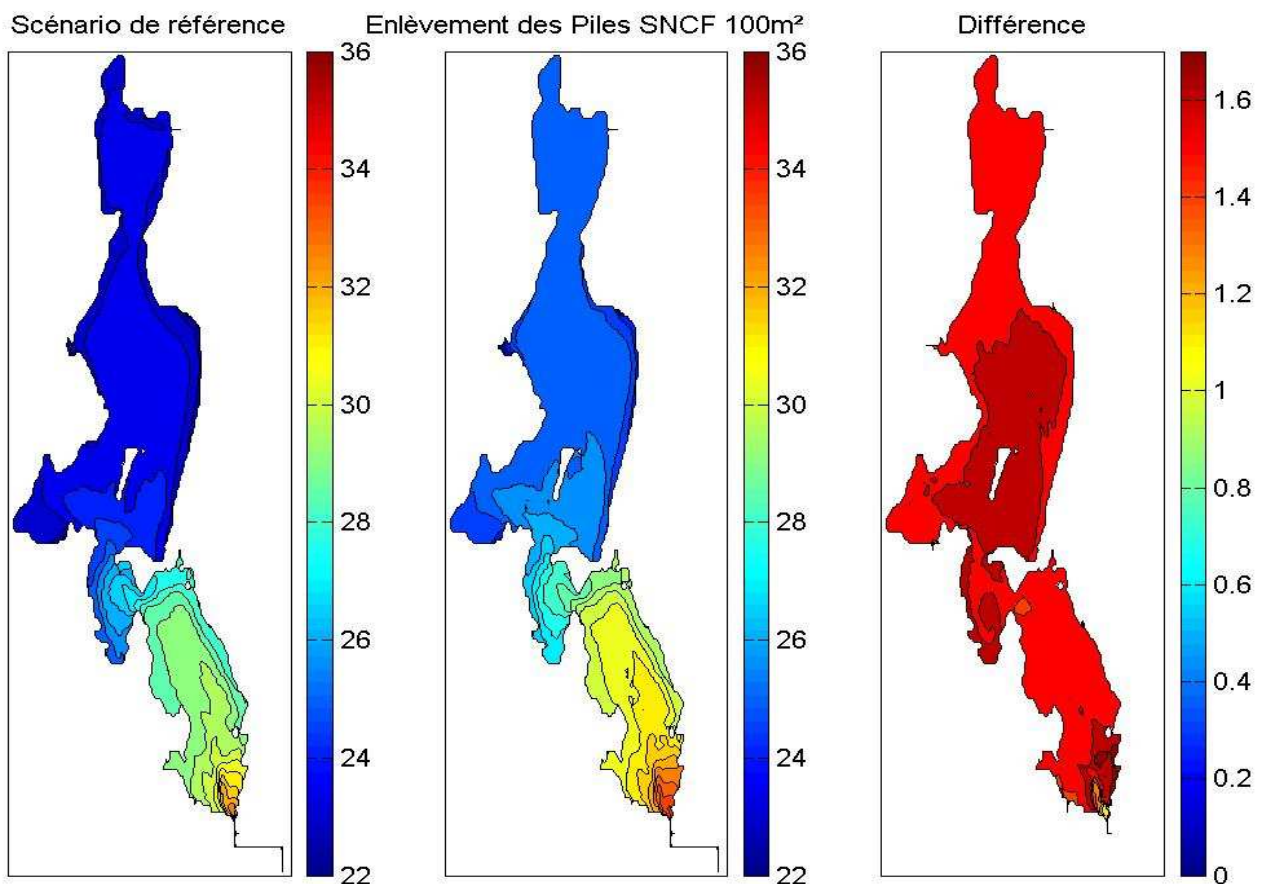


Figure 47 : Salinité moyenne (2004-2010) du scénario de référence (à gauche), du scénario d'enlèvement des anciennes piles du pont de la voie ferrée (100m² de section) au centre et la différence des deux scénarii (à droite)

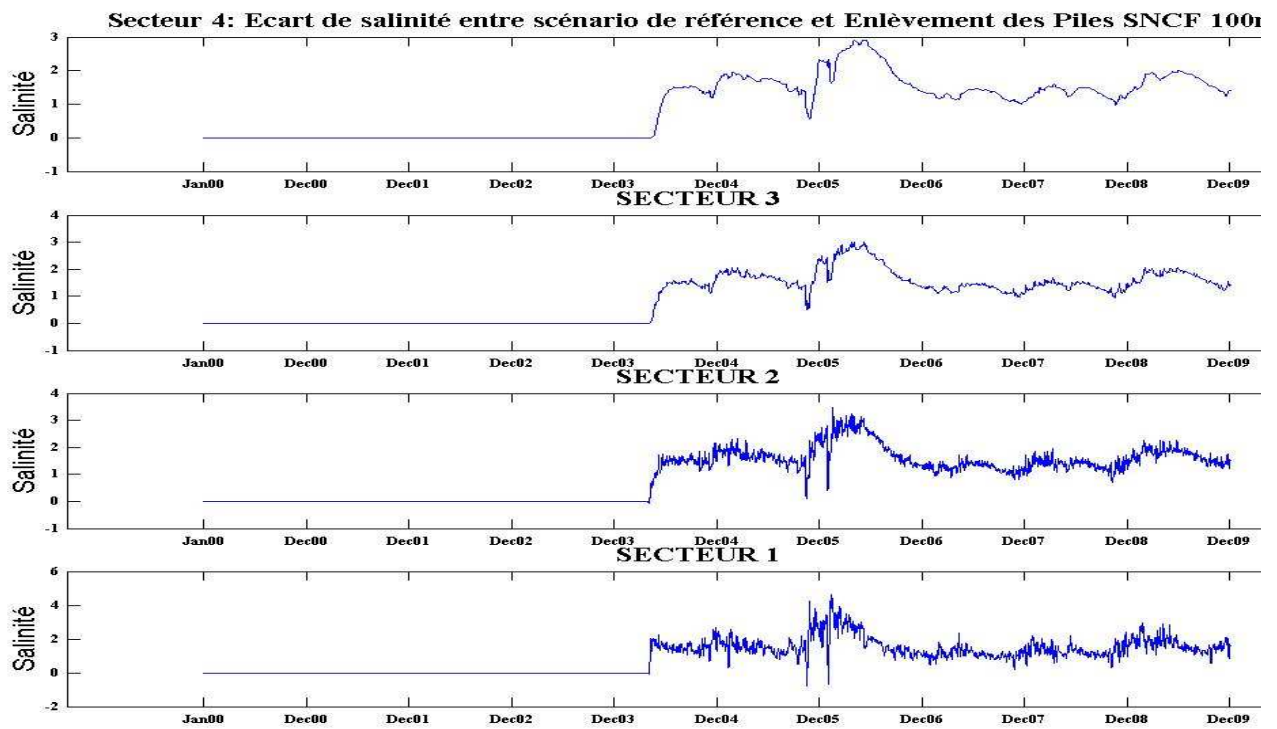


Figure 48 : Différence de la Salinité moyenne pour les 4 secteurs définis entre 2000 et 2010 entre le scénario de référence et le scénario d'enlèvement des piles de Pont SNCF (100m²)

SECTEUR 4: différence de salinité moyenne par secteur entre le scénario de référence et Enlèvement des Piles SNCF 100m²

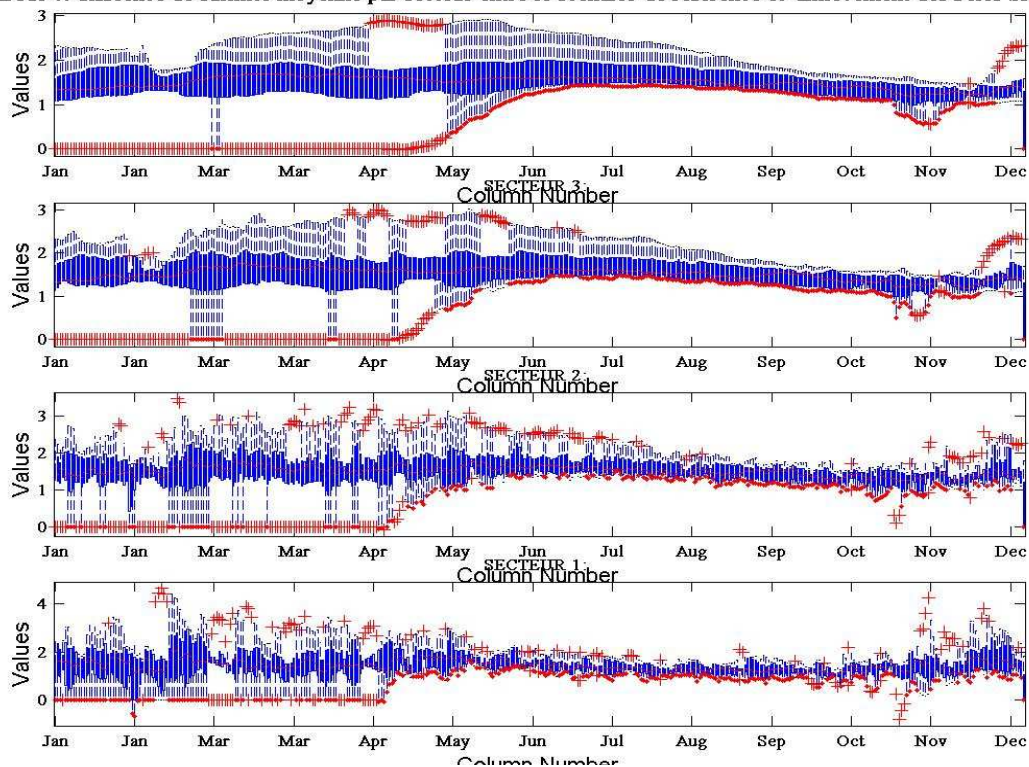


Figure 49 : Boxplot journalières (2000-2010) pour les 4 secteurs de la différence de salinité entre les scénario de référence et l'enlèvement des piles de pont SNCF (100m²).

III.3.3 Comparaison avec les aménagements passés sur l'étang de Salses-Leucate

Entre 1965 et 1975, le lido de l'étang de Salses-Leucate a connu de grands travaux d'aménagement avec plusieurs opérations successives d'ouverture des graus à la mer. Ces aménagements ont entraîné une nette augmentation de la salinité de l'étang et plus largement ont eu un impact important sur l'équilibre hydrobiologique lagunaire. Une synthèse des aménagements réalisés et des conséquences sur la salinité de l'étang de Salses-Leucate a été présentée dans les travaux de Wilke (1997, 2001, 2002), avec une analyse de plus de 3000 mesures de salinité mesurées entre 1955 et 1997. Les connaissances acquises indiquent que :

- Jusqu'en 1966, il n'existait que 2 graus : le grau des Conchyliculteurs au nord, le grau Saint-Ange au sud. Ce dernier était presque toujours colmaté, seul le grau des conchyliculteurs assurait la communication avec la mer.
- Avec l'aménagement du littoral et la construction de port de Port Barcares entre 1965 et 1967 l'ancien grau de Saint-Ange a été creusé à une profondeur de 2m, sur une largeur de 30 à 40 m et sur une longueur de 2km.
- Puis en 1968-1969, un nouveau grau a été créé, le grau de Port-Leucate, qui devient la principale ouverture permanente de cet étang à la mer, sur une longueur de 3 km, une largeur de 50 m et une profondeur de 4m.
- L'ancien grau des Conchyliculteurs, qui était le seul vraiment en fonction avant cette période, est alors devenu la plus petite des ouvertures à la mer. Ce grau fut ensuite entretenu par dragage. En 1975 (Cahet *et al.*) sa largeur est estimée à 24 m, pour une profondeur de 0.5 à 1.5 m et une longueur de 500m.

Par conséquent, sur une période de 10 ans (1965-1975), la section d'échanges de l'étang de Salses-Leucate avec la mer a été multipliée par un facteur 12, passant d'environ 24 m², repartis sur 2 graus, à 284m² de section totale sur 3 graus. Ces éléments nous permettent de faire une comparaison avec les aménagements réalisés ou à l'étude sur le grau de Port la Nouvelle (*Tableau 4*).

La conséquence de ces modifications sur les paramètres physico-chimiques de l'étang de Salses-Leucate ont été étudiées dans les travaux de Wilke. L'analyse de l'évolution de la salinité moyenne sur cette lagune entre aril 1955 et novembre 1997 a montré qu'avant les transformations hydrauliques, la salinité se situait entre 13 et 30. Elle se situait entre 20 et 30 certaines années. D'autres années elle restait inférieure à 20. A partir des années 75 et jusqu'en 997, les salinités moyennes mesurées dans l'étang de

Salses-Leucate se situaient entre 27 et 41, ce qui correspond à une **augmentation importante de la salinité, comprise entre 11 et 14 unités.**

	Aménagements réalisés sur les graus de l'étang de SALSSES-LEUCATE (1965-1975)	Aménagements récents (2004) ou futurs sur le grau de l'étang de BAGES-SIGEAN
Contexte de ces aménagements	Mission RACINE- développement de zones urbanisées sur le littoral	Préservation du milieu lagunaire enlèvement d'anciens obstacles Contrat d'étangs / trame bleue
Données générales sur les lagunes concernées	Surface moyenne : 5400 ha Volume moyen : 90 Mm³ 3 graus	Surface moyenne : 3700 ha Volume moyen : 50 Mm³ 1 grau
Section initiale d'échanges entre la mer et la lagune	2 graus, dont un colmaté et l'autre intermittent Section initiale estimée à 20 m² sur 2 graus	1 seul grau avec 2 obstacles - barrage à vannes : 54 m ² - embâcles pont de la voie ferrée : 59 m ² Section initiale estimée à 54 m² sur 1 seul grau
Section d'échanges après aménagements	3 graus : Grau St-Ange : 60m ² Grau Port -Leucate : 200m ² Grau Conchyliculteurs : 24 m ² Section totale estimée à 284 m² sur 3 graus	Enlèvement partiel barrage à vannes (2004) : 54 m ² -> 102 m ² Enlèvement embâcles sous pont voie ferrée : +59 m ² -> 100 m ² Section totale estimée à 100 m² sur 1 seul grau
Impact sur la salinité (mesuré pour Salses Leucate ou estimé pour Bages-Sigean)	Situation initiale : salinité moyenne entre 13 et 30 unités Après aménagements : salinité moyenne entre 27 et 41 unités Augmentation : + 13 unités sur 10 ans	Enlèvement partiel barrage à vannes Augmentation : + 0.6 à 1 unités Enlèvement embâcles pont voie ferrée ! Augmentation : + 1.6 à 1.8 unités Augmentation : + 2 à 3 unités sur 10 ans

Tableau 4 : Comparaison des aménagements réalisés sur les graus des étangs de Salses-Leucate et les aménagements à l'étude sur le grau de Bages-Sigean et de leur impact sur la salinité moyenne lagunaire

III.4 Scénarii de gestion du canal de la Robine et des apports d'eau douce par le Canélou

Cette partie traite des différents scénarii de gestion du canal de la Robine. Plusieurs simulations sont comparées à la situation de référence afin d'appréhender et quantifier l'impact spatio-temporel de ces modifications de la gestion du Canélou sur la salinité de la lagune. Ainsi les différents scénarii choisis pour cette étude sont :

- 1) La coupure totale des apports du Canal de la Robine par le Canélou ;
- 2) La coupure des apports estivaux d'eau douce par le Canélou ;
- 3) L'augmentation des apports d'eau douce du Canélou à 2.5 m³/s (correspondant à la marge de manœuvre dont dispose VNF l'hiver) ;
- 4) Impact des volumes d'eau agricole disparus rive droite que l'on emmène à la lagune.
- 5) Augmentation des débits du Canélou à 8m³/s, correspondant à une situation « historique ». En effet, d'après les informations données par VNF, plusieurs moulins existaient sur la Robine jusque dans les années 70. Pour alimenter ces moulins, un débit d'environ 8m³/s était nécessaire. Ces gros volumes d'eau s'écoulaient majoritairement dans la lagune. L'idée de cette simulation est de voir si l'on retrouve les salinités mesurées dans l'étang entre 1960 et 1970 avec le modèle Mars 3D.

III.4.1 Scénario de coupure totale des apports du Canélou

On remarque que la salinité moyenne augmente fortement sur l'ensemble de la lagune lorsque les apports d'eau douce du Canélou sont coupés en totalité (Figure 50). Il existe toujours un gradient de salinité entre le nord et le sud de l'étang, mais il est plus faible, avec une différence de 3 unités de salinité entre le bassin nord et le bassin sud, contre 5 sur la situation de référence. La carte des différences spatiales de la salinité moyenne (Figure 50, à droite) montre une variabilité spatiale très marquée. La coupure du Canélou a un effet très important sur la salinité moyenne du bassin nord (+4-5 unités de salinité) et diminue graduellement pour atteindre 2 unités d'augmentation au sud de l'étang.

La différence de salinité par secteur au cours du temps est présentée Figure 51. On remarque que jusqu'en 2004, il y a une augmentation de 4 à 5 unités de salinité dans les secteurs 2,3 et 4 et de 2 à 3 unités dans le secteur 1. A noter l'existence de pics, avec des valeurs proches de +10 unités sur chaque secteur. Ces pics correspondent à des apports d'eau douce très importants par le Canélou certains automnes.

La Figure 52 montre les Boxplots pour chaque année et pour chaque secteur entre la situation de référence et le scénario de coupure totale du Canélou. Sur ces années on remarque pour chaque secteur une augmentation systématique de l'ensemble des boîtes, de près de 5 unités pour les secteurs de nord (secteur 3 et 4) et proche de 3 unités pour les secteurs sud (Figure 52). La dispersion des mesures est légèrement diminuée avec la coupure du Canélou, ce qui pourrait s'expliquer par une baisse de la variabilité de la salinité au niveau saisonnier. Les événements extrêmes, avec de très basse salinités lors d'évènements pluvieux sont encore présents dans la situation de coupure du Canélou. Ces faibles salinités proviennent de l'influence du reste du bassin versant et en particulier des apports de la Berre.

En construisant des boxplots journalières pour les années 2000 à 2004 pour la situation de référence et le scénario de coupure du Canélou (Figure 53), on constate que sur le secteur 4 (au nord) l'augmentation de la salinité moyenne et des quartiles est proche de 5 unités. La variabilité interannuelle des salinités (Figure 53, en bleu) reste importante sur la majeure partie de l'année (février à septembre) lorsque l'on coupe le Canélou, elle est comparable à celle du scénario de référence. Elle est importante au printemps et plus faible l'été comme pour le scénario de référence. Cependant, entre septembre et janvier, la variabilité inter-annuelle diminue fortement pour le scénario de coupure totale du Canélou. Ceci montre l'importance des apports du Canélou au cours de l'année. **La variabilité interannuelle des salinités moyennes dans la lagune de Bages-Sigean semble donc être :**

- au printemps plutôt sous l'influence du bassin versant (Berre et autres),**
- et durant l'automne, plutôt sous l'influence du Canélou.**

Enfin, rappelons que l'amplitude des variations saisonnières de salinité était de 7 unités entre l'hiver et l'été dans le bassin nord (6 dans le bassin sud). En coupant le Canélou, cette amplitude diminue fortement puisque les salinités pour les moyennes interannuelles oscillent entre 27 en hiver et 31 en été.

La coupure du Canélou diminue donc presque par deux l'amplitude de variation saisonnière de la salinité sur l'ensemble de la lagune (Figure 53 et Figure 54).

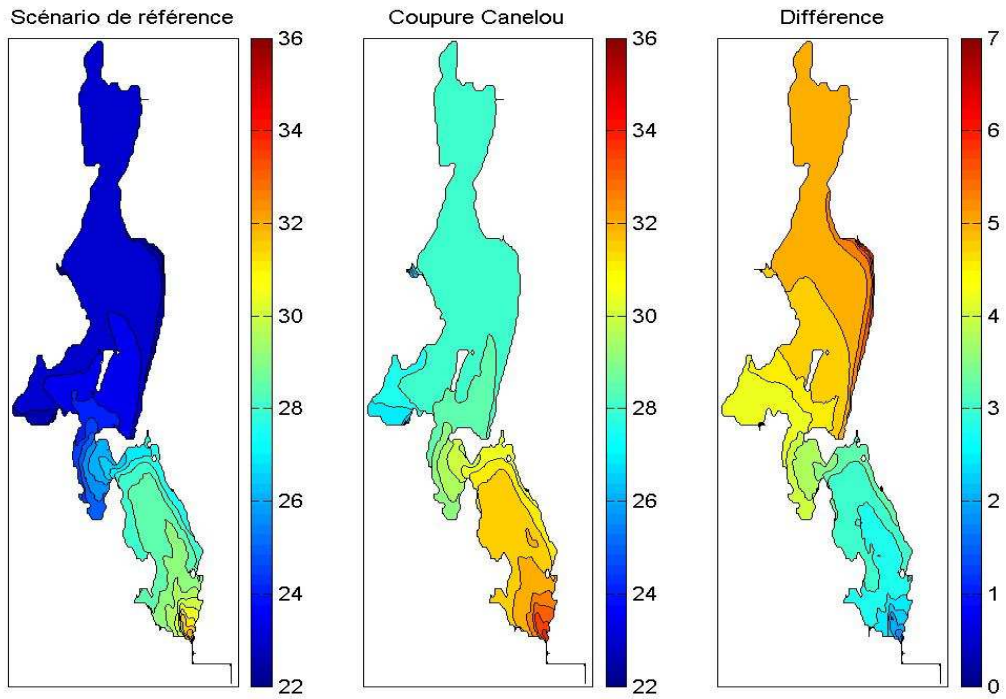


Figure 50 : Salinité moyenne (2000-2004) du scénario de référence (à gauche), le scénario « coupure du Canérou » (au centre) et la différence des deux scénarii (à droite)

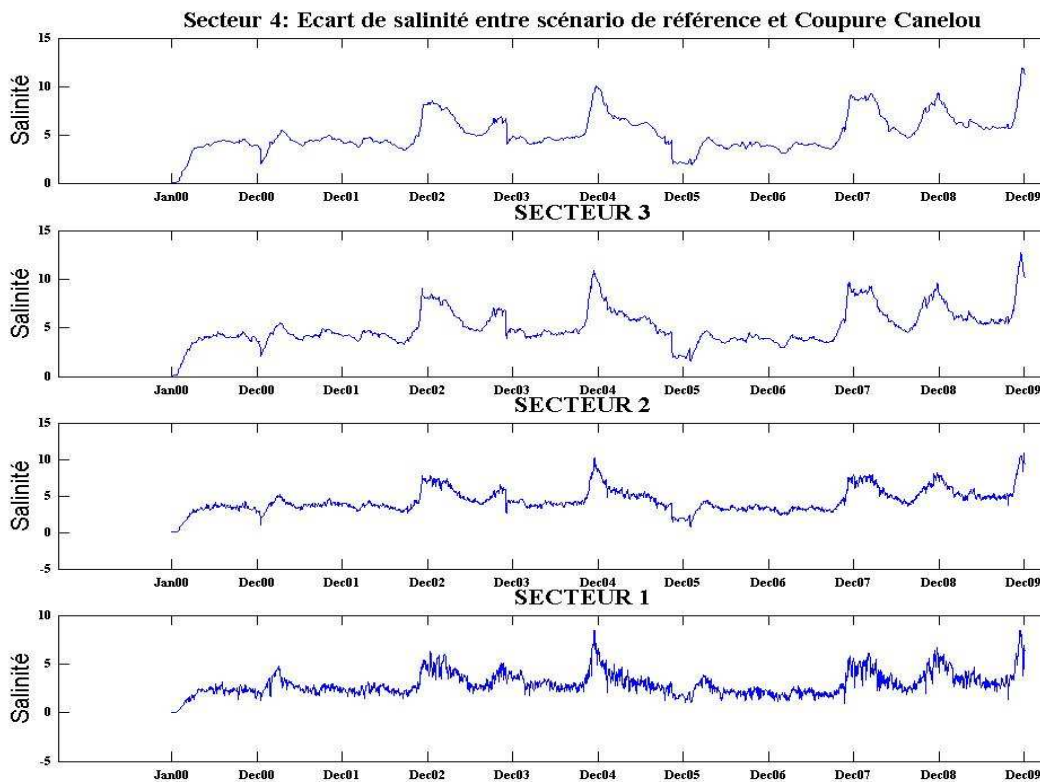


Figure 51 : Différence de la Salinité moyenne pour les 4 secteurs définis entre 2000 et 2010 entre le scénario de référence et le scénario de coupure totale du Canérou

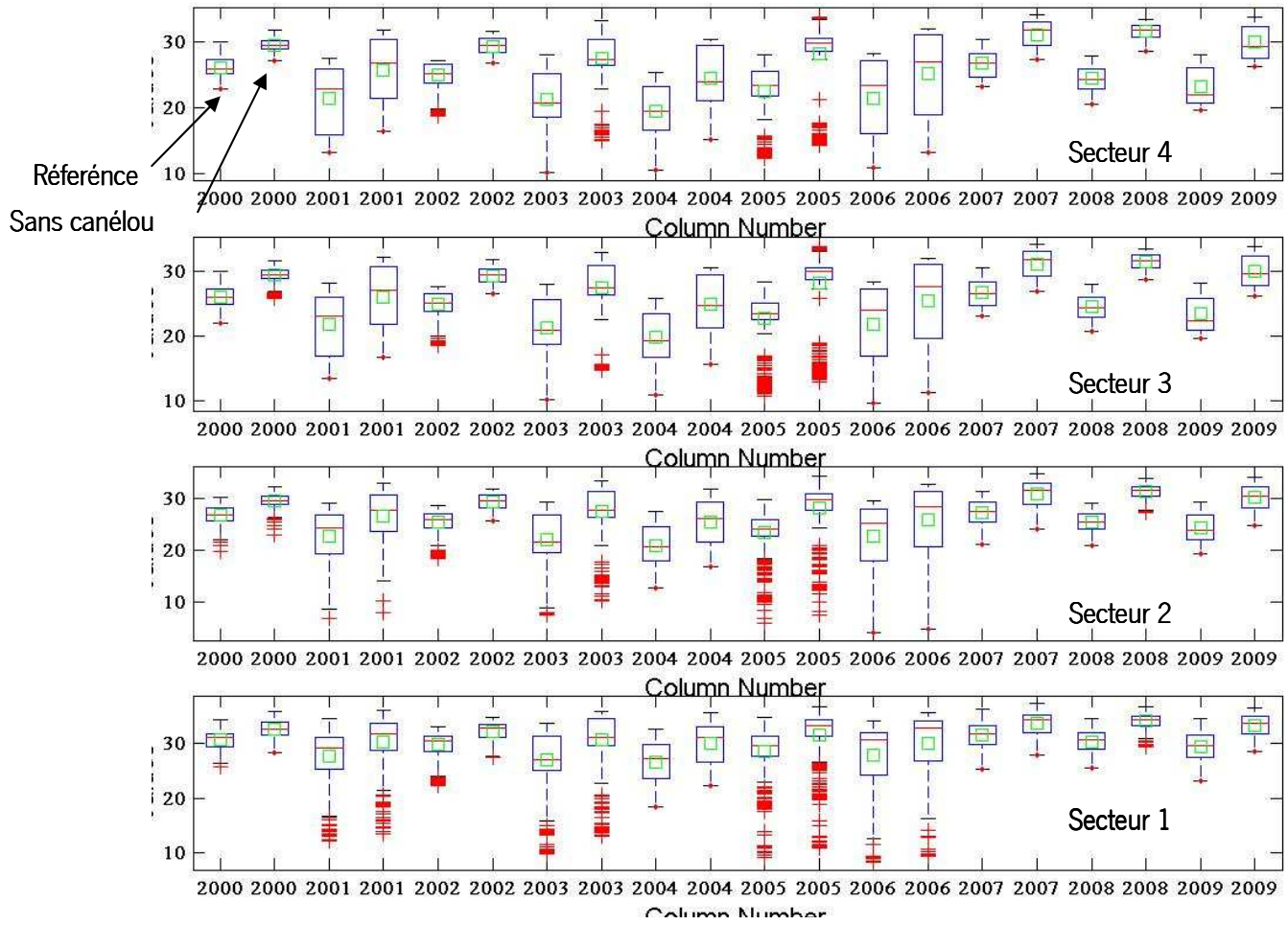


Figure 52 : Comparaison des Boxplots des salinités des années 2000 à 2010 pour les 4 secteurs de la lagune entre le scénario de référence et le scénario de coupure totale du Canelou (rajout de la moyenne en vert)

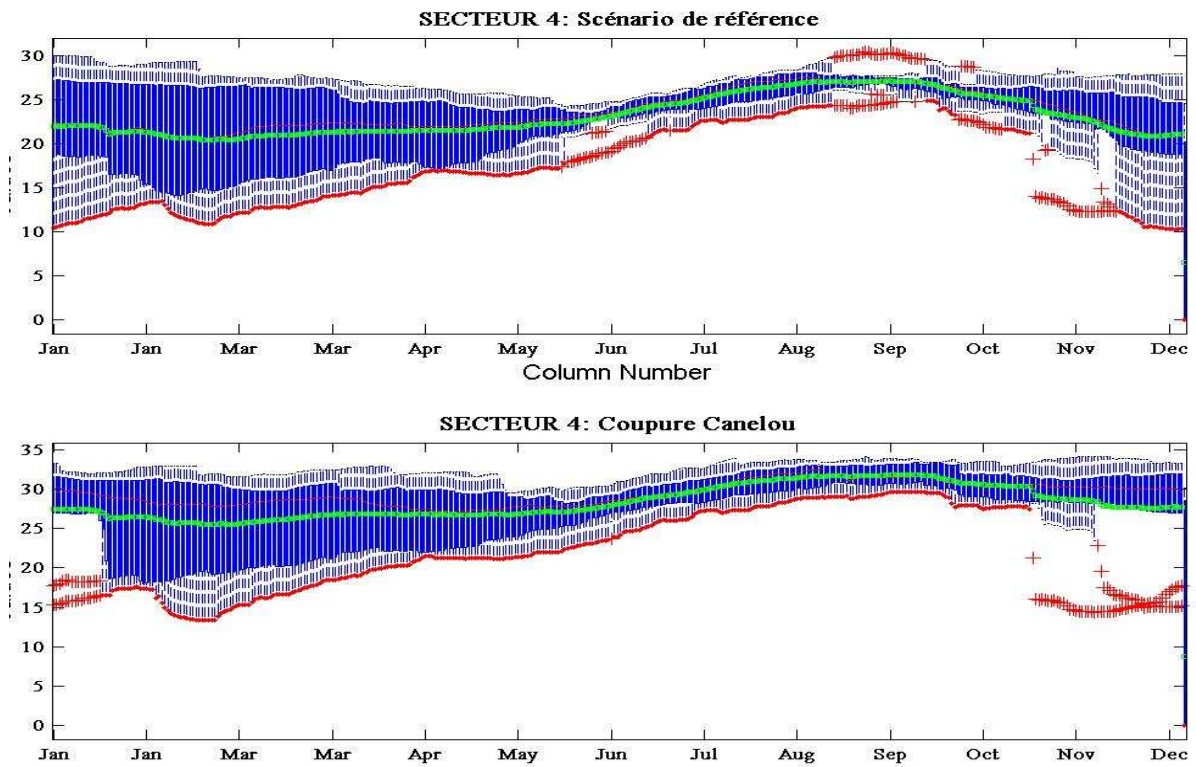


Figure 53 : Boxplot journalieres (2000-2004) pour le secteur 4 de la situation de référence et du scénario de coupure du Canelou.

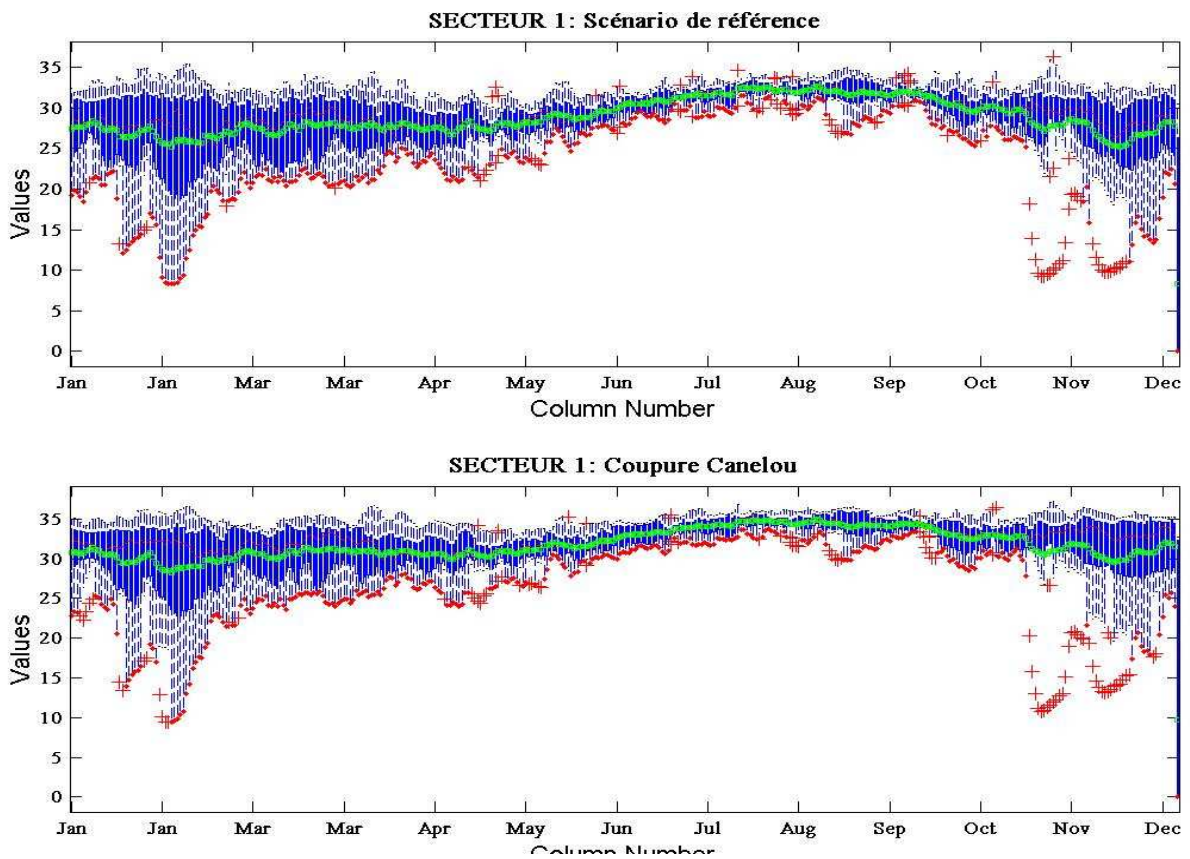


Figure 54 : Boxplot journalieres (2000-2004) pour le secteur 1 de la situation de référence et du scénario de coupure du Canelou.

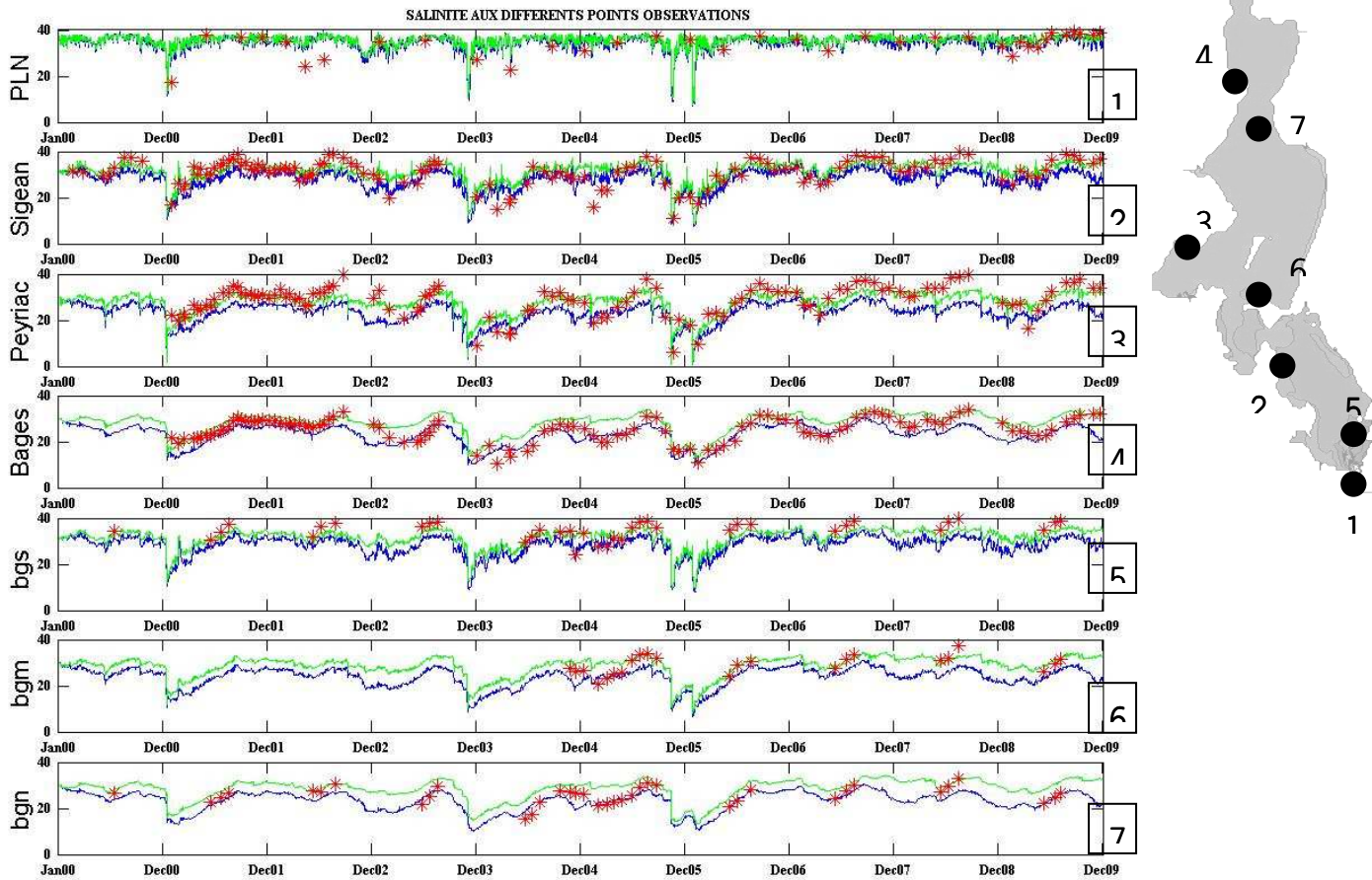


Figure 55 : Comparaison des observations de salinité en 7 points de la lagune réalisées entre 2000 et 2010 avec le résultat de simulation pour le scénario de référence (en bleu) et pour le scénario de coupure du Canérou (en vert)

III.4.2 Scénario de coupure estivale des apports du Canélou

L'influence de l'arrêt des apports du Canélou à la lagune (juin/juillet/août) sur la salinité moyenne de la lagune entre 2000 et 2010 est présentée sur la Figure 56. La structure spatiale des salinités moyenne est sensiblement la même avec des salinités légèrement plus importante. Ce scénario de gestion entraînerait une tendance à l'augmentation de la salinité moyenne (2000-2010) de 0.7 à 0.9 unités sur l'ensemble du bassin nord (Figure 56, à droite) et de 0.3 à 0.5 unités sur la partie sud de la lagune.

Si on regarde les variations de salinités moyennes par secteur de la lagune de 2000 à 2010 entre la situation de référence et le scénario de coupure estivale des apports du Canélou (Figure 57), on remarque que les augmentations de salinités sont d'une part cycliques, centrées sur la période estivale et d'autre part plus importantes sur les secteurs nord (2.5 unités au maximum) qu'au sud (1.2 unité de salinité).

La Figure 58 permet de visualiser et quantifier l'augmentation de salinité d'une année type sur les 4 secteurs avec la gestion de coupure estivale du Canélou, ainsi que d'estimer la variabilité interannuelle sur les 11 années d'étude (2000-2010).

Le maximum de l'augmentation de salinité est observé fin août pour chaque secteur (Figure 58). Il est d'environ 3 unités de salinité pour les secteurs 2,3 et 4 et de seulement 1.2 unité pour le secteur1, le plus au sud de la lagune. L'impact de la coupure du Canélou en juin/juillet/août se répercute dans le temps sur les salinités moyennes de chaque secteur. Ainsi en fin d'année, l'augmentation de salinité liée à la coupure estivale s'élèverait encore à 0.3 unités de salinité au dessus d'une situation de référence sur les secteurs 2,3 et 4 (Figure 58). Il est possible de considérer que l'effet de la coupure estivale des apports du Canélou devient négligeable sur l'augmentation de la salinité seulement en février/mars de l'année suivante (Figure 58). La « mémoire » ou la « trace » d'une gestion du Canélou l'été sur la salinité moyenne par secteur semble s'étendre sur les 6 à 7 mois qui suivent l'évènement.

Enfin la variabilité inter-annuelle des salinités moyennes par secteur durant l'été n'est pas sensiblement diminuée par l'arrêt des apports du Canélou. D'une part l'été est la saison où la variabilité inter-annuelle des salinités de la lagune est la plus faible. D'autre part, le Canélou ne montre pas non plus de variabilité inter-annuelle sur les apports en été, son fonctionnement semble similaire chaque été sur la période de données.

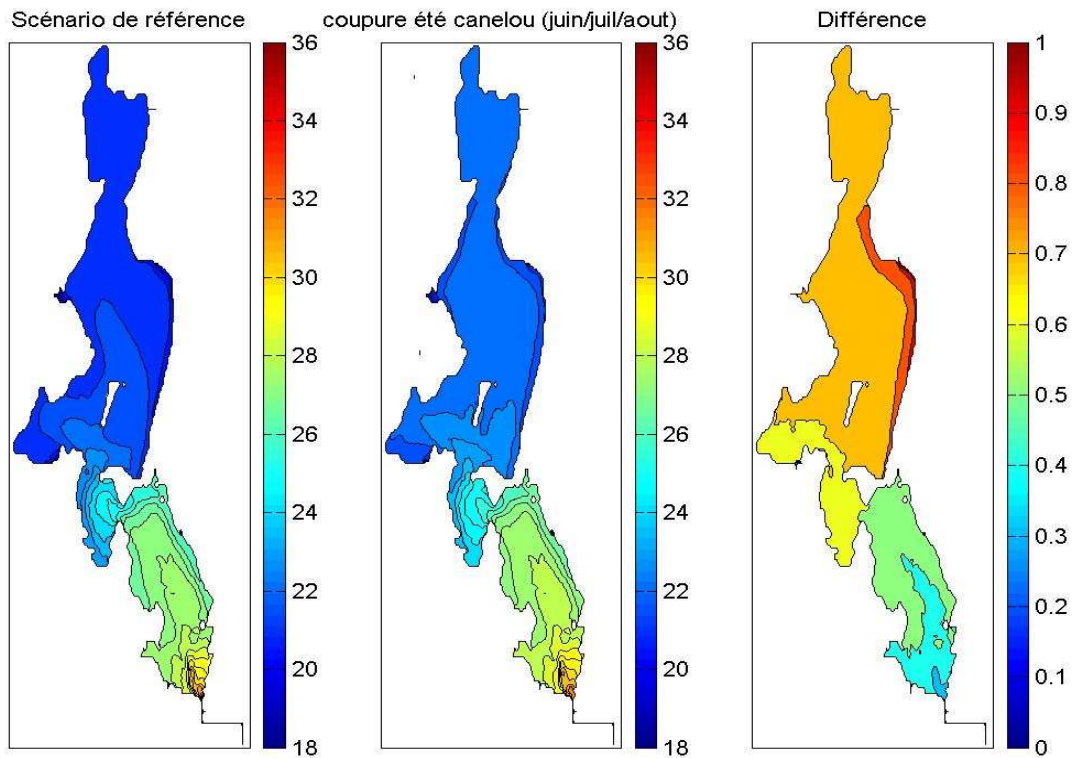


Figure 56 : Salinité moyenne (2000-2011) du scénario de référence (à gauche), le scénario « coupure des apports estivaux du Canérou » (au centre) et la différence des deux scénarii (à droite)

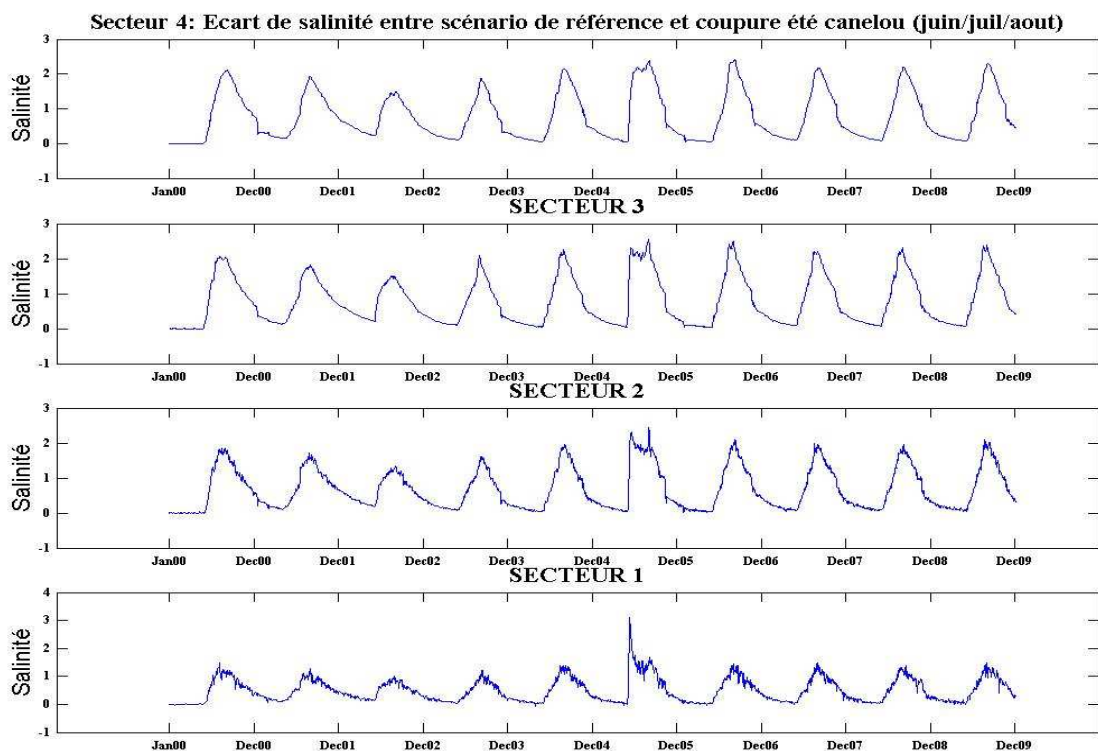


Figure 57 : Différence de la Salinité moyenne pour les 4 secteurs définis entre 2000 et 2010 entre le scénario de référence et le scénario de coupure estivale (juin/juillet/août) du Canérou

SECTEUR 4 : différence de salinité moyenne par secteur entre le scénario de référence et coupure été canelou (juin/juil/aout)

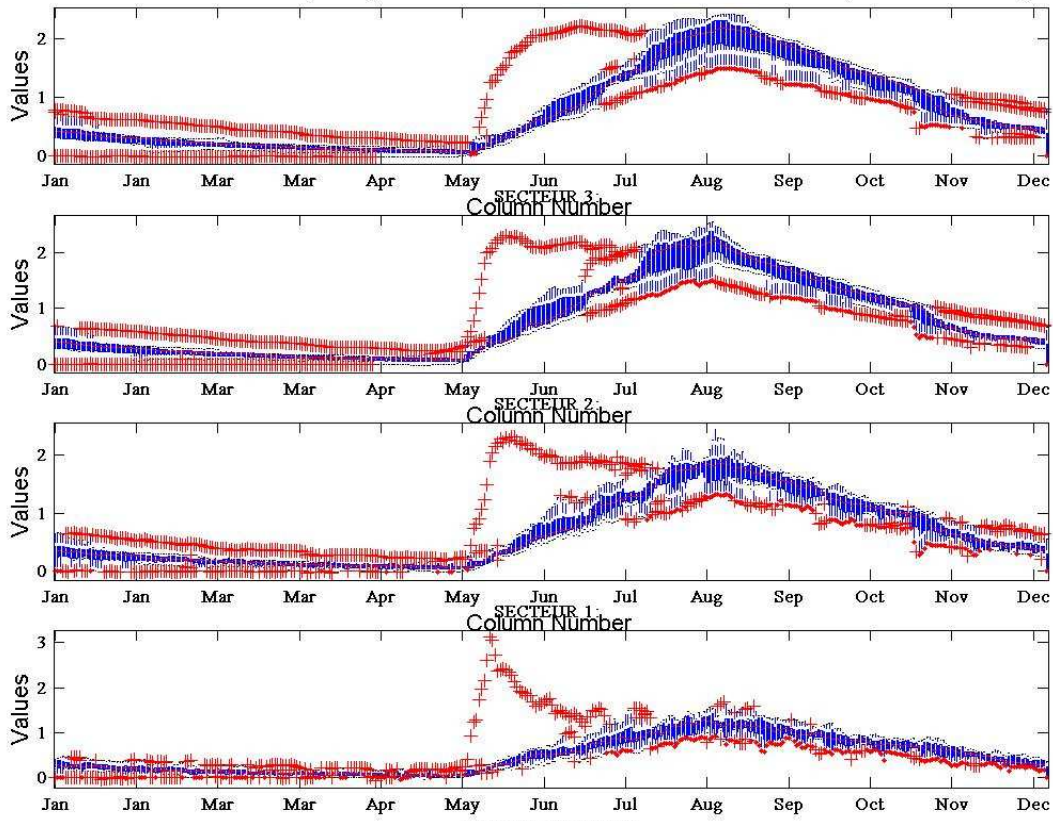


Figure 58 : Boxplot journalières (2000-2010) pour les 4 secteurs 4 des différences de salinité moyenne sur l'année entre la situation de référence et du scénario de coupure estivale du Canelou.

III.4.3 Scénario d'apports d'eau douce hivernaux (2.5 m³/s)

Les résultats de la simulation d'augmentation des apports en hiver du Canélou sur la salinité moyenne sont présentés sur la Figure 59. Les apports hivernaux (2.5 m³/s pendant 3 mois) diminuent la salinité moyenne sur la période 2000-2010 de 1.2 à 1.4 unités de salinité, et de 0.8 à 1 unité dans le bassin sud. L'hiver, les baisses de salinité dans le secteur nord de la lagune (secteur 3 et 4) atteignent 5 unités, tandis que dans le sud (secteur 1 et 2), elles sont comprises entre 2 et 4 unités (Figure 60). Si on retrace une année type avec des boxplots journalières des 11 années de simulations (Figure 61), on remarque que la baisse de salinité est maximale fin février puis diminue régulièrement par la suite et devient négligeable (en dessous d'1 unité) à partir de l'été. Les apports d'eau douce d'hiver ont un effet significatif sur la salinité de la lagune les 6 premiers mois de l'année. L'influence des apports d'hiver par le Canélou sont faibles à partir de l'été (inférieurs à 1 unité au nord et 0.5 au sud) et sont largement couverts par la variabilité interannuelle.

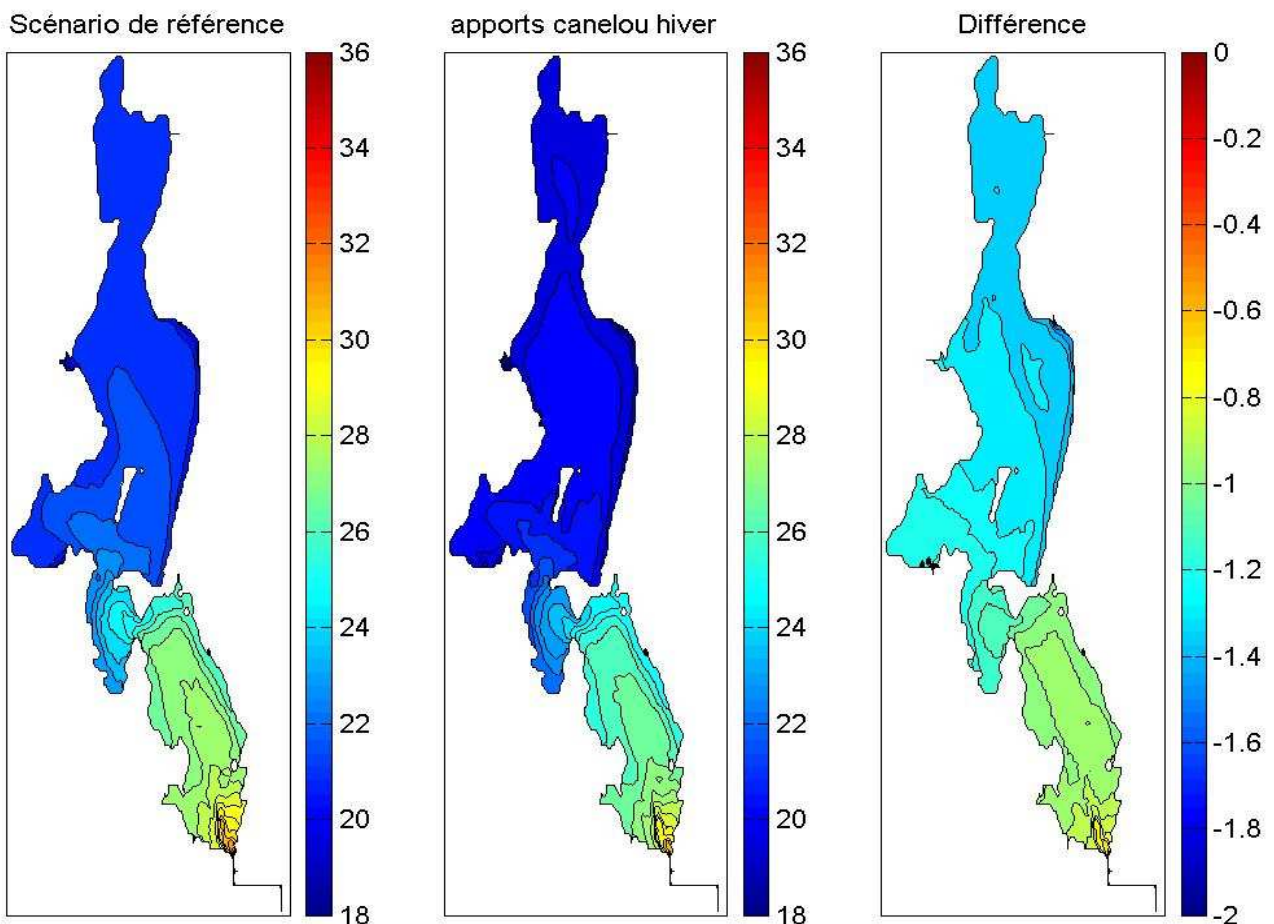


Figure 59 : Salinité moyenne (2000-2010) du scénario de référence (à gauche), le scénario « d'augmentation des apports hivernaux du Canélou (2.5 m³/s) » (au centre) et la différence des deux scénarii (à droite)

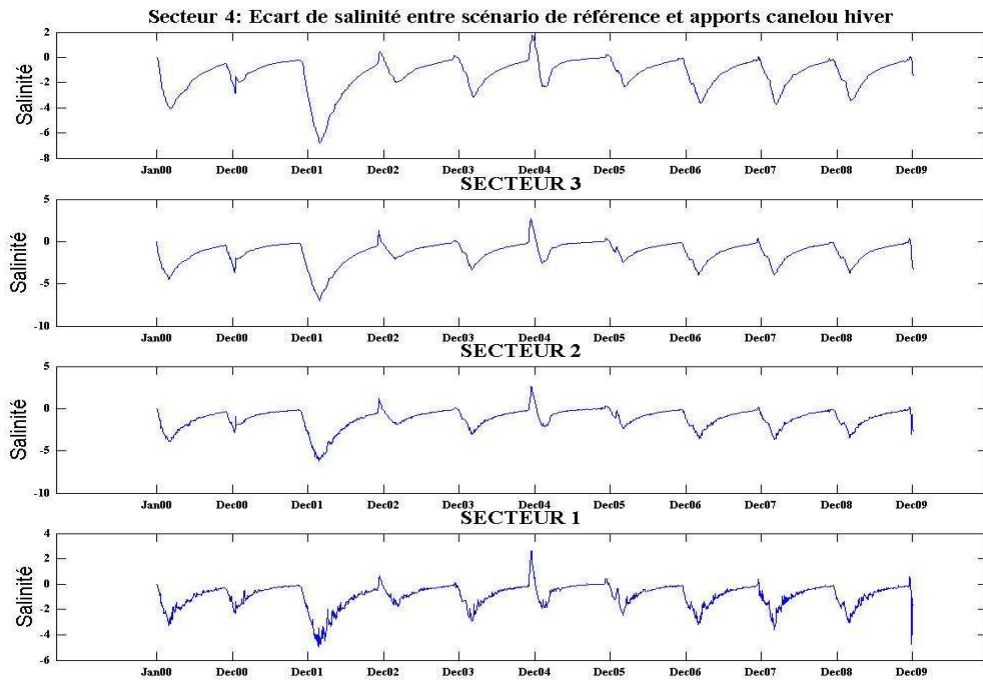


Figure 60 : Différence de la Salinité moyenne pour les 4 secteurs définis entre 2000 et 2010 entre le scénario de référence et le scénario d'apports hivernaux d'eau douce par le Canélou

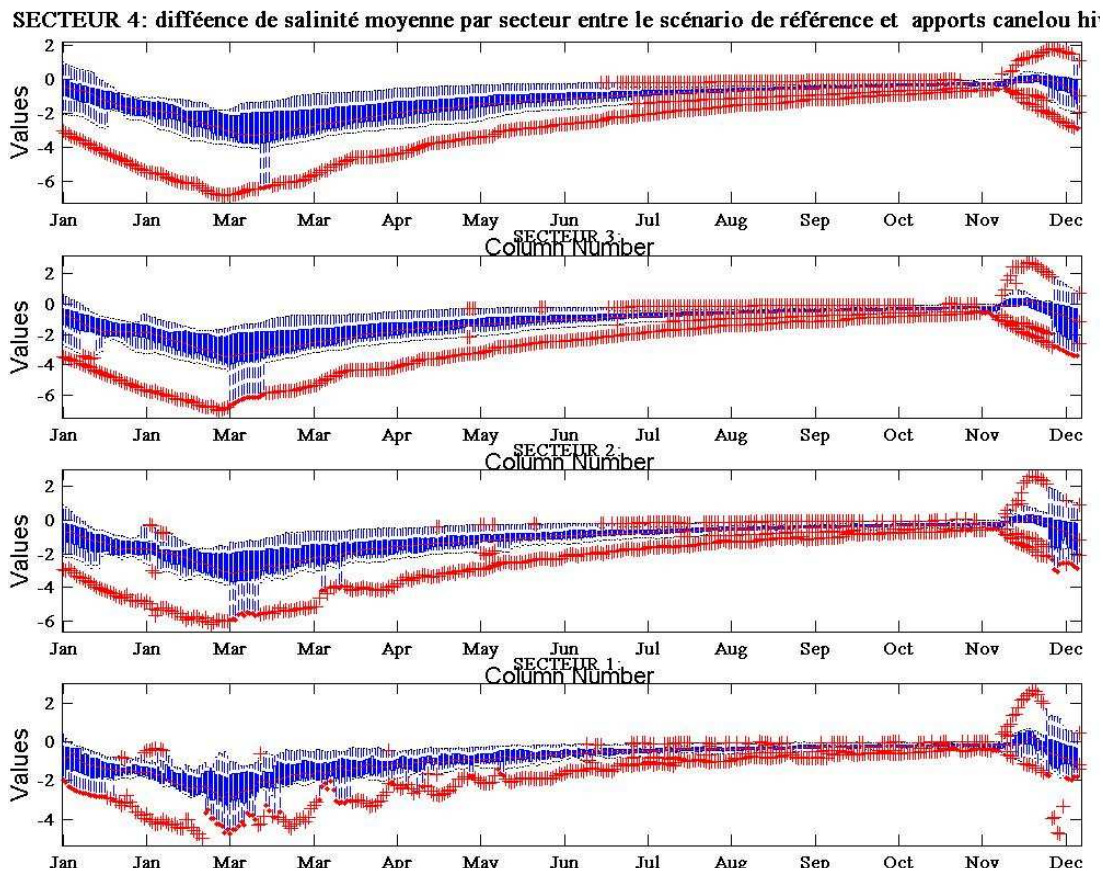


Figure 61 : Boxplot journalières (2000-2010) pour les 4 secteurs 4 des différences de salinité moyenne sur l'année entre la situation de référence et du scénario d'apports hivernaux par le Canélou.

III.4.4 Scénario de rejet des prises d'eau agricoles

Ce scénario a été imaginé à partir des données hydrologiques recueillies sur le canal de la Robine. En faisant la différence sur la période 2000-2005 entre les volumes apportés d'eau douce au niveau de Cadariège ajoutés à la prise d'eau sur l'Aude à Raonel avec les volumes d'eau douce qui sortent par le Canélou et le bief aval, il apparaît qu'environ la moitié des volumes d'eau douce seulement se retrouve en sortie du système. Ces volumes d'eau manquant semblent correspondre aux volumes prélevés pour l'irrigation agricole sur les 2 rives du canal. Or 45 % des surfaces agricoles se trouvent sur la rive droite, sur le bassin versant de la lagune de Bages-Sigean. Ces volumes d'eau prélevés sont de même ordre de grandeur que les volumes d'eau apportés par le Canélou, ce qui signifie qu'ils sont très importants et qu'ils peuvent jouer un rôle majeur sur le fonctionnement hydrologique de la lagune. Une partie de ces volumes d'eau douce utilisés par les agriculteurs est absorbée par les cultures et la végétation, une autre partie peut s'infiltrer dans les sols ou s'évaporer. Il est toutefois possible d'imaginer qu'une partie importante de cette eau « agricole » est transférée dans la lagune, étant donné la proximité de ces zones cultivées de l'étang.

Deux scénarii de transfert à l'étang de ces eaux « agricoles » ont été étudiés. Le premier scénario est de faire arriver 100 % des volumes d'eau manquant rive droite, et le deuxième 50 % de ces volumes afin d'estimer l'impact possible sur la salinité de la lagune.

Les résultats du modèle indiquent que les volumes d'eau agricole influent fortement sur la salinité de la lagune (Figure 62), même dans le cas du second scénario (Figure 63). Avec 100 % des apports agricoles, la salinité moyenne (2000-2010) diminue de -3.5 à -2.5 unités dans le bassin nord et de -2.5 à -1.5 unités dans le bassin sud. Avec 50 % des volumes agricoles, les baisses des salinités moyennes sont de -2 à -1 unité de salinité dans le bassin nord et de -1 à -0.5 unité dans le bassin sud.

Au niveau temporel, on remarque que les variations de salinité résultantes des apports agricoles sont cycliques et saisonnières quelque soit le secteur de la lagune (Figure 64 et Figure 65). En effet, les salinités moyennes par secteur sont impactées surtout pendant la période d'Avril à Octobre (de -4 à -6 unités sur le secteur 4). Pendant la phase hivernale, l'influence de ces apports est moins importante mais reste autour de -2 unités par rapport à la situation de référence.

Pour la simulation correspondant à 50 % des prises d'eau agricoles dans la lagune, les variations de salinité moyenne sont moins importantes que précédemment (Figure 66). Pour le secteur 4, la baisse de salinité moyenne est de 2- -3 unités durant la période estivale et seulement de -1 unité pour la période hivernale (Figure 66).

Finalement plusieurs points importants ressortent à partir de l'analyse de ces graphiques. Les apports agricoles ont potentiellement un énorme impact sur la salinité de l'étang dans chaque secteur durant la période de Mars à Septembre (-2 à -5 unités de salinité selon le secteur). De plus, si les prises d'eau agricoles et donc les apports à la lagune cessent en hiver, la « mémoire » ou la « trace » des apports estivaux perdure, pour finalement impacter de -1 à -2 unités de salinité dans le secteur nord. L'impact potentiel des prises d'eau agricoles sur la salinité est fortement saisonnier (Figure 65 et Figure 66), avec un maximum de dessalure en été et un minimum en hiver. Ce schéma est inversé par rapport aux variations « naturelles » de la salinité dans les lagunes, avec des baisses de salinité maximales en hiver (après les apports d'automne) et des augmentations en été (apports moins importants et une plus forte évaporation). Ainsi les apports agricoles semblent faire diminuer l'amplitude de variations saisonnières des salinités dans la lagune.

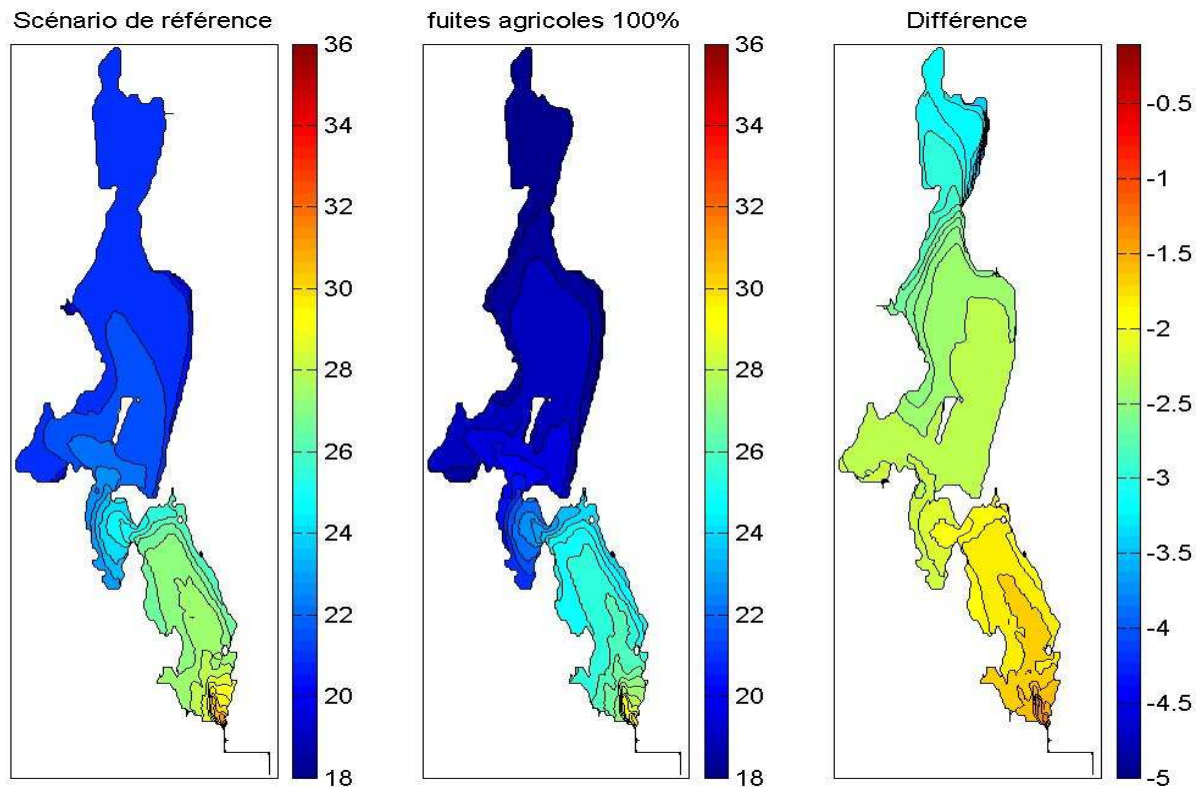


Figure 62 : Salinité moyenne (2000-2010) du scénario de référence (à gauche), le scénario « d'apport de 100% des prises agricoles rive droite » (au centre) et la différence des deux scénarii (à droite)

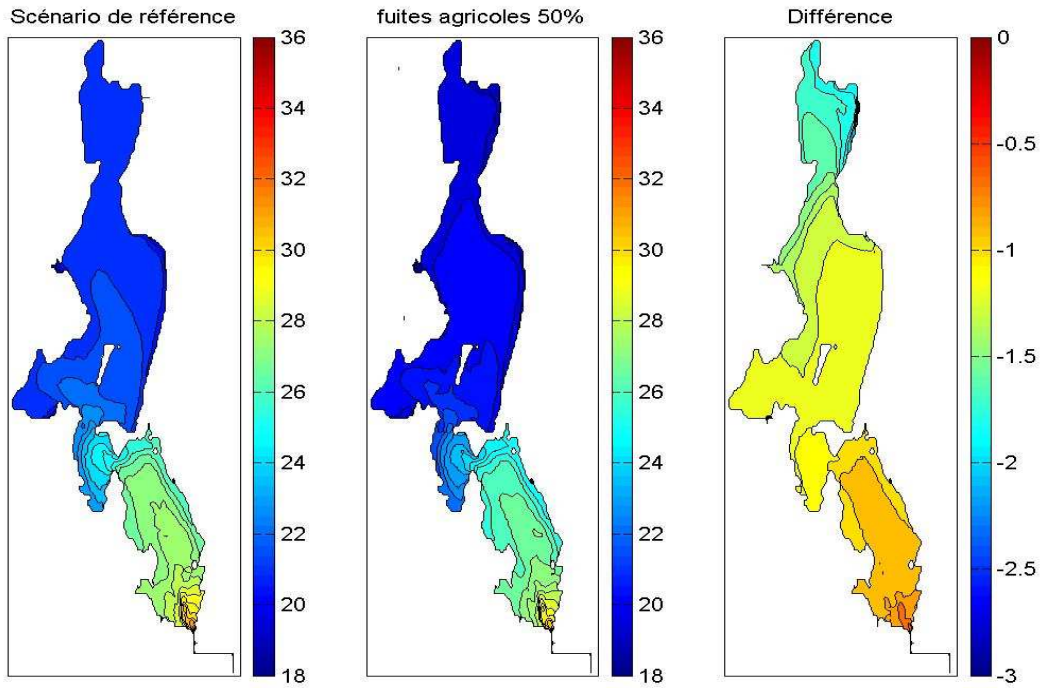


Figure 63 : Salinité moyenne (2000-2010) du scénario de référence (à gauche), le scénario « d'apport de 50% des prises agricoles rive droite » (au centre) et la différence des deux scénarii (à droite)

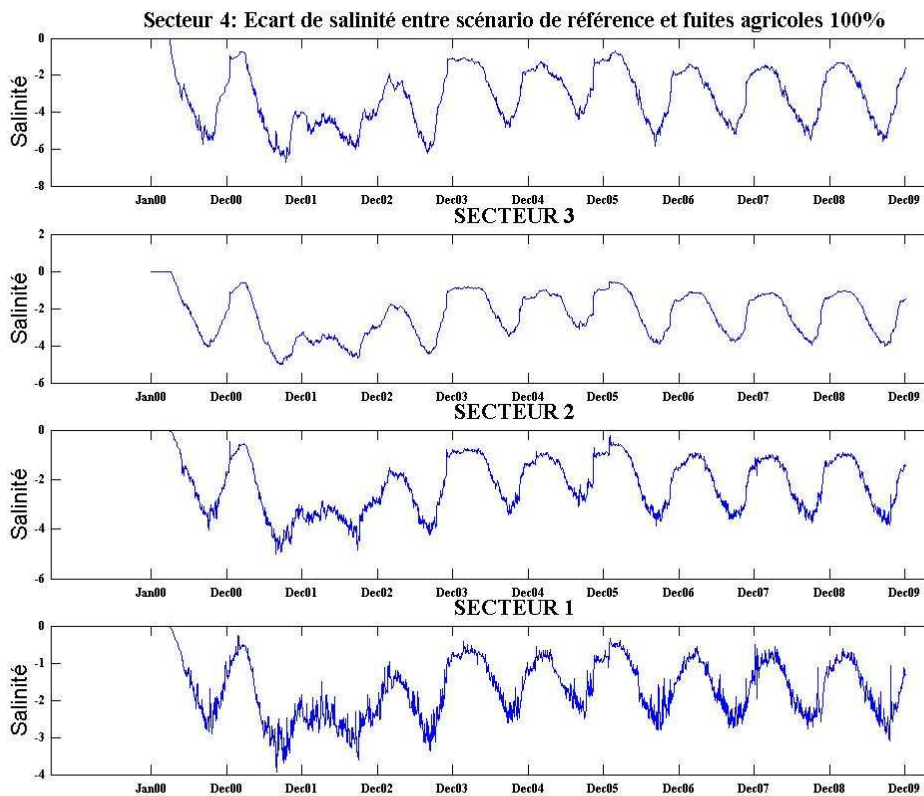


Figure 64 : Différence de la Salinité moyenne pour les 4 secteurs définis entre 2000 et 2010 entre le scénario de référence et le scénario d'apports agricoles (100%)

SECTEUR 4: différence de salinité moyenne par secteur entre le scénario de référence et fuites agricoles 100%

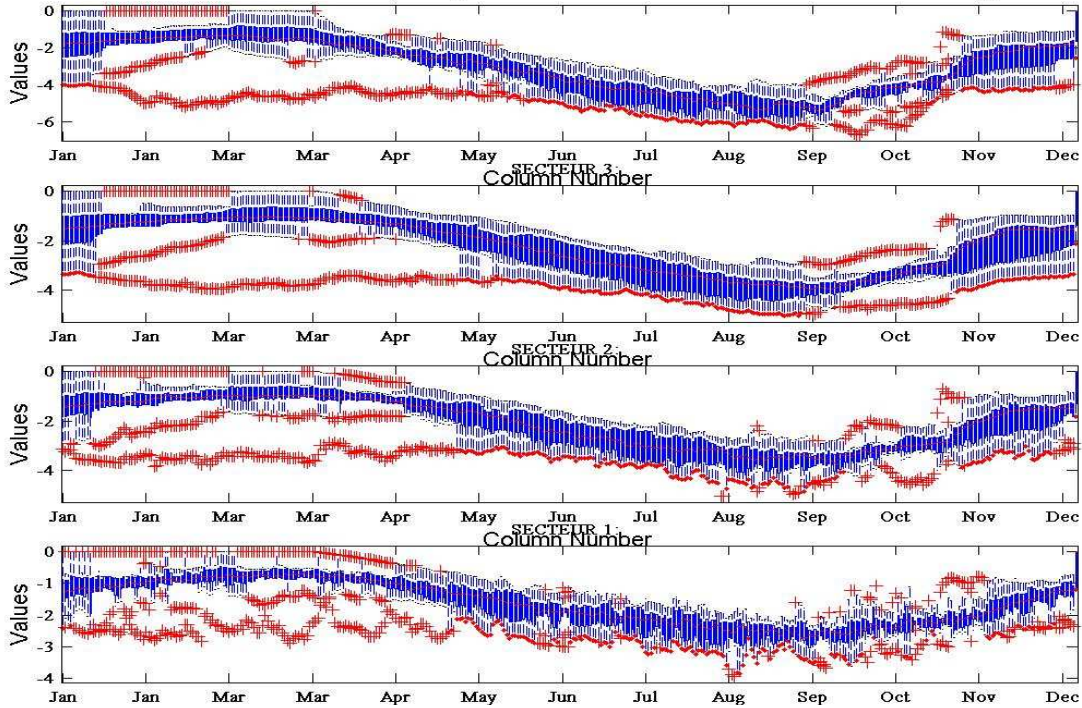


Figure 65 : Boxplot journalieres (2000-2010) pour les 4 secteurs 4 des différences de salinité moyenne sur l'année entre la situation de référence et du scénario d'apports agricoles (100%)

SECTEUR 4: différence de salinité moyenne par secteur entre le scénario de référence et fuites agricoles 50%

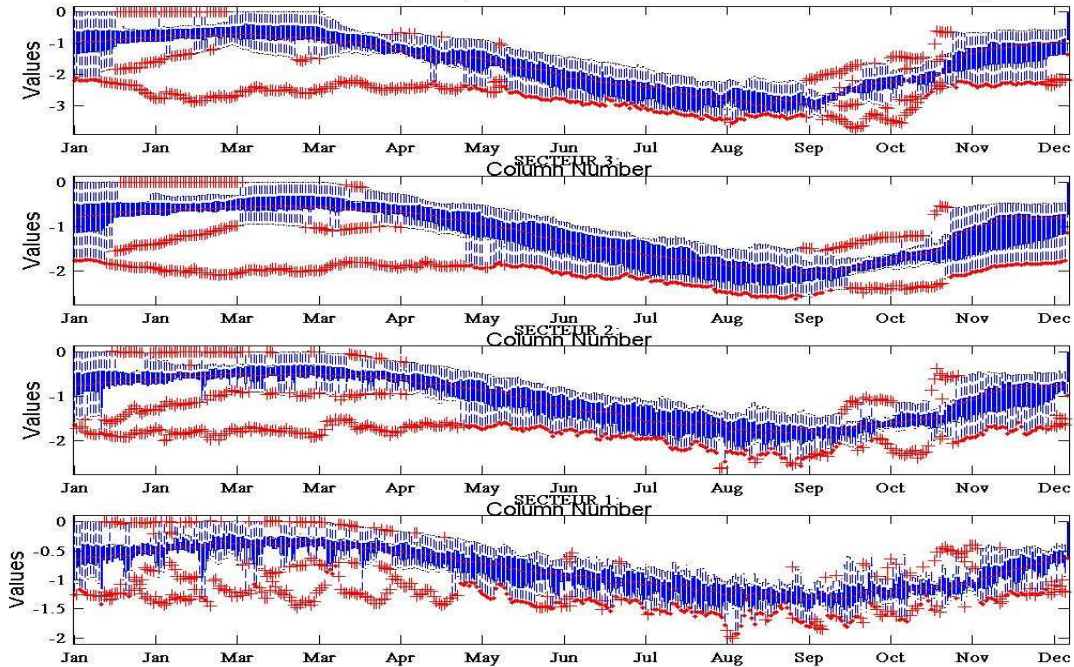


Figure 66 : Boxplots journalieres (2000-2010) pour les 4 secteurs 4 des différences de salinité moyenne sur l'année entre la situation de référence et du scénario d'apports agricoles (50%)

III.4.5 Scénario d'apports « ancestraux » du canal

Ce scénario est proposé afin d'estimer les salinités de la lagune ancestralement. Les moulins sur le canal de la Robine pouvaient fonctionner avec un débit de 8.5 m³/s, il a ainsi été choisi d'apporter par le Canélou ce débit constant pendant les 10 années de simulation.

Avec de tels apports d'eau douce, la salinité moyenne (2000-2010) de la lagune du bassin nord est en dessous de 5 unités de salinité, et celle du bassin sud entre 10 et 15 unités de salinité (Figure 67 et Figure 68). Le gradient de salinité Nord-Sud installé est donc proche de 10 unités et bien plus important que celui observé aujourd'hui (autour de 5 unités). La baisse de salinité moyenne est autour de 17 unités dans la partie nord et de 14 unités dans la partie sud. Au bout de 6 mois le système s'équilibre autour des salinités moyenne et les variations saisonnières et inter-annuelles de salinité dans les secteurs de la lagune ne sont pas marquées (Figure 68).

La baisse de salinité par rapports au scénario de référence a donc une variabilité saisonnière (Figure 69), elle est plus importante chaque été (-15 secteur 1 à -20 unités secteur 4) et moins importante l'hiver (autour de -10 unités).

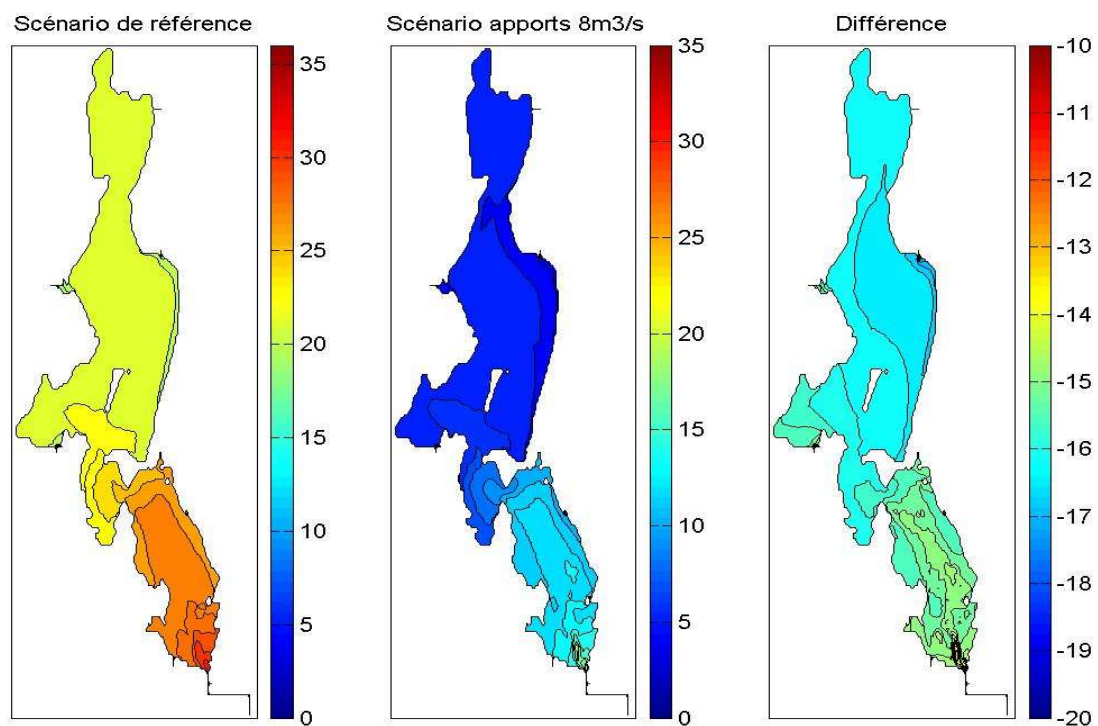


Figure 67 : Salinité moyenne (2000-2010) du scénario de référence (à gauche), le scénario « 8.5 m³/s par le Canélou » (au centre) et la différence des deux scénarii (à droite)

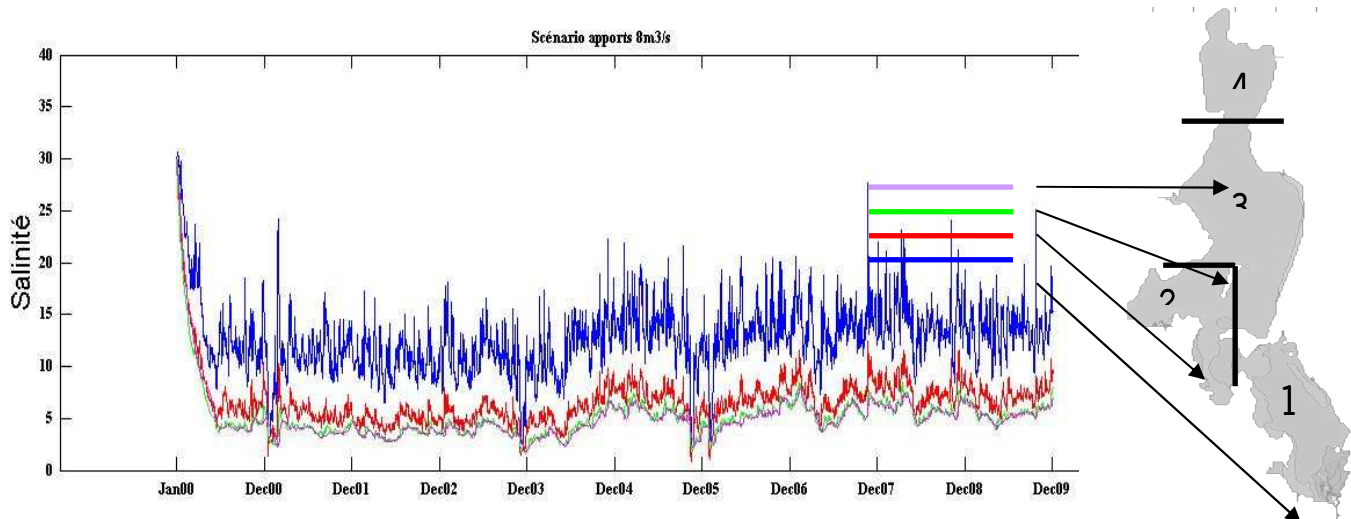


Figure 68 : Evolution de la salinité moyenne pour les 4 secteurs et sous-bassins choisis entre 2000 et 2010 pour le scénario d'apports de 8 m³/s de la Robine

SECTEUR 4: différence de salinité moyenne par secteur entre le scénario de référence et Scénario apports 8m3/s

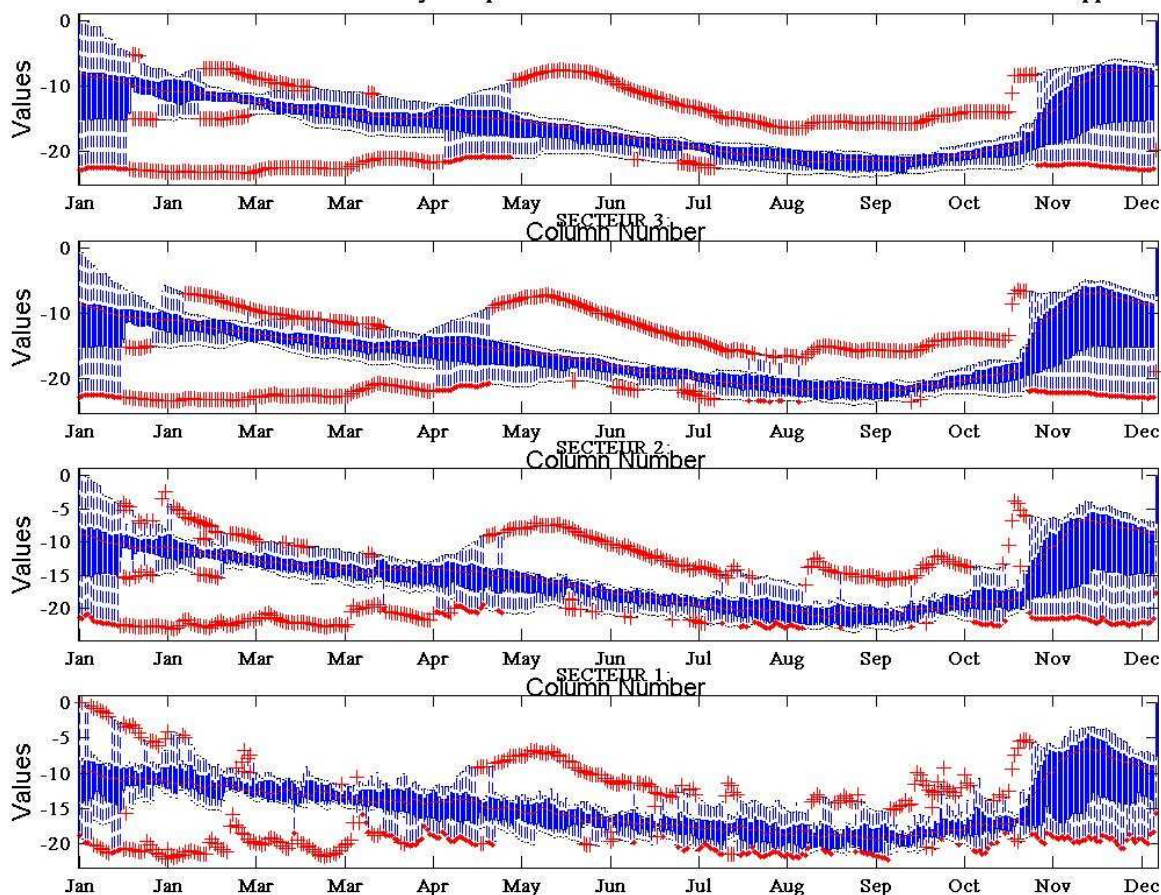


Figure 69 : Boxplot journalières (2000-2010) pour les 4 secteurs 4 des différences de salinité moyenne sur l'année entre la situation de référence et du scénario d'apport 8 m³/s

IV Synthèse des résultats, conclusion et discussion

L'ensemble des résultats des différentes simulations est synthétisé dans le Tableau 5. Ces résultats sont organisés et présentés d'une part pour chaque bassin (partie nord de la lagune et partie sud) et d'autre part sur un plan temporel, avec les effets sur les variations de salinité au sein d'une année ou sur les variations interannuelles.

Ce travail a permis de connaître et de quantifier l'impact sur la salinité de la lagune pour les scénarii testés, correspondant soit à des aménagements de la section du grau (III.3), soit à des modifications de la gestion hydraulique du canal de la Robine (III.4). Ces impacts ont pu être décrits et quantifiés tant sur un plan spatial (différences d'impact sur le bassin nord ou sud de la lagune) que sur un plan temporel (effet sur l'amplitude de variation saisonnière de salinité, différences interannuelles, tendance à long terme...).

Sur les scénarii d'aménagement de section du grau, il a tout d'abord été montré que la suppression du barrage à vannes (effectuée en 2004) a entraîné rapidement une tendance à l'augmentation de la salinité moyenne de 0.6 à 0.8 unités dans le bassin nord de la lagune et de 0,8 à 1 dans le bassin sud. L'enlèvement des anciennes piles du pont de la voie ferrée augmenterait de façon plus significative les salinités de la lagune. Les estimations de cette augmentation sont de 1.6 à 1.8 unités dans le bassin nord comme dans le bassin sud. Cette augmentation de salinité n'est pas constante au cours de l'année, elle serait plus marquée l'été (+3 unités) et moins importante l'hiver (+1 unité). Pour l'aménagement des sections du grau, le bassin sud subirait des variations plus importantes que dans le bassin Nord.

Au contraire, tous les scénarii étudiés de gestion du canal de la Robine impactent davantage le bassin nord que le bassin Sud. Par exemple, en cas de coupure totale du Canérou, la salinité moyenne du bassin nord augmenterait de 4.5 à 5 unités de salinité et le bassin sud de 2 à 3 unités.

L'ensemble des résultats discrimine nettement l'existence de deux bassins dans cette lagune correspondant à 2 masses d'eau. Le bassin sud est un bassin « tampon » entre les eaux marines y entrant et sortant cycliquement avec la marée et les variations du niveau de la mer, et les eaux saumâtres du bassin nord, récepteur de la plus grande partie des eaux douces du bassin versant arrivant à la lagune. Ainsi un état d'équilibre avec un gradient de salinité s'installe systématiquement entre le bassin sud et nord, il est environ de 5 unités et traduit un équilibre d'échange des masses d'eau entre la mer, le bassin sud et le bassin nord. Le bassin sud « tampon » est la zone où le mélange des masses d'eau lagunaire et

Simulation	Variation moyenne salinité Bassin NORD	Variation moyenne salinité Bassin SUD	Quantification et description de l'Effet saisonnier et/ ou inter annuel
Situation de référence	Amplitude saisonnière : 5/6 Variabilité inter-annuelle :12	Amplitude saisonnière : 4/5 Variabilité inter-annuelle :10	Variabilité inter-annuelle est de 8 à 10 unités novembre en mai En été variabilité inter-annuelle :2/3 unités de salinité
Conservation barrage-Vannes	-0.6 à -0.8	-0.8 à -1	Constante au cours de l'année
Enlèvement des piles de pont SNCF (100m²)	+1.6 à +1.8	+1.6 à +1.8	Légèrement + prononcé en été (mars-septembre) qu'en hiver
Coupure du Canélou	+4.5 à +5	+2 à +3	Effet sur la variabilité inter-annuelle : baisse de Novembre moins prononcé l'hiver, peu d'effet de février à septembre Effet sur amplitude saisonnière : Baisse de moitié des amplitudes de variations de chaque secteur
Coupure du Canélou estivale	+0.7-+0.9	+0.3-+0.5	Effet saisonnier : +3 en août à +0.5 en décembre En dessous +0.3 entre janvier et juin.
Apports du canélou en hiver (2.5 m³/s 3 mois)	-1.2 à -1.4	-0.6 à -1	Effet saisonnier : -5 l'hiver à -1 unité en juin En dessous de -1 unité reste de l'année
Apports agricole (100%)	-3.5 à -2.5	-2.5 à -1.5	Effet saisonnier : Marqués d'Avril à Septembre (-2 à -5 unités secteur nord) Proche de -2 unités entre Octobre et Mars (secteur Nord) Diminution de l'amplitude de variation saisonnière dans les secteurs puisque anti-phasé aux variations naturelles
Apports agricole (50%)	-2 à -1	-1 à -0.5	Effet saisonnier : Marqués d'Avril à Septembre (-2 à -3 unités secteur nord) Proche de -1 unités entre Octobre et Mars (secteur Nord) Diminution de l'amplitude de variation saisonnière dans les secteurs puisque anti-phasé aux variations naturelles
Apports ancestraux avec un canal de la Robine (8 m³/s – moulin)	-15 à -18	-12 à -15	

Tableau 5 : Récapitulatifs de l'effet sur la salinité moyenne par secteur ou variation saisonnière et inter-annuelle entre la situation de référence et l'ensemble des scénarii étudié

marine se réalise de façon permanente (échanges quotidiens de masse d'eau marine entrée / sortie avec la marée etc...). Le bassin nord aussi est une zone de mélange mais de façon épisodique avec les événements pluvieux et les apports plus régulés et constants par le Canérou. L'amplitude saisonnière de salinité (variation entre l'hiver et l'été) est d'ailleurs plus importante dans le bassin nord que dans le bassin sud qui tamponne davantage ces variations saisonnières par les masses d'eau marine.

D'une manière générale, plus l'eau douce arrive dans le bassin nord, plus le gradient de salinité Nord-Sud à l'état d'équilibre des deux bassins est prononcé, et plus l'amplitude des variations saisonnières de salinité est importante.

Ainsi, dans le scénario de gestion du canal de la Robine, notamment celui de la coupure totale des apports, le gradient permanent de salinité entre le nord et le sud serait divisé de moitié (2.5 à 3 au lieu de 5 unités), ainsi que les amplitudes de variations saisonnières de salinité dans le bassin nord et sud, avec une gamme allant de 26 à 31 unités entre l'hiver et l'été. Ces résultats montrent l'importance de l'impact du Canérou sur la lagune de Bages-Sigean, qui donne la spécificité du fonctionnement de cette lagune, dont la salinité est toute l'année inférieure à celle de la mer. La coupure du Canérou entraînerait un fonctionnement plus proche de la lagune de Salses-Leucate ou de Thau en terme de variation de salinité spatio-temporelle.

En se limitant à une coupure des apports estivaux d'eau douce par le Canérou, il y aurait une augmentation moyenne de la salinité de 0.7 à 0.9 unité dans le bassin nord et de 0.3 à 0.5 dans le bassin sud. Cette augmentation serait par contre plus prononcée durant l'été (+ 3 unités en fin d'été) et diminuerait le reste de l'année. Cette action peut finalement mariner légèrement la lagune ainsi qu'augmenter l'amplitude de variations saisonnières (entre l'hiver et l'été) de 2 unités environ.

L'autre possibilité de gestion du Canérou est d'augmenter les apports d'eau douce durant les 3 mois d'hiver. Ce scénario de gestion du canal de la Robine entraînerait une dessalure moyenne du bassin nord de 1.2 à 1.4 unités et du bassin sud de 0.8 à 1 unité de salinité. Cette diminution de salinité serait très marquée saisonnièrement puisqu'elle atteindrait près de 5 unités de salinité en hiver dans le bassin nord (notamment le secteur 3), et aurait un effet qui diminuerait par la suite, inférieur à 1 unité à partir du mois de juin. Ainsi, ce scénario augmenterait l'amplitude de la gamme de variation saisonnière de salinité entre 3 et 4 unités pour le bassin nord et d'environ 2 unités pour le bassin sud.

Enfin au niveau des apports agricoles, les volumes d'eau douce captés semblent très importants en comparaison avec ceux apportés par le Canérou à la lagune. La proximité des zones agricoles en rive droite du canal de la Robine pose la question du transfert d'une partie de ces volumes d'eau dans la lagune tant sur le plan hydrologique que trophique. L'impact sur la salinité de la lagune des volumes

d'eau captés rive droite est estimé en transférant 100% des volumes et puis 50 % des volumes d'eau. Ce taux réel de transfert est difficile à appréhender ou à estimer précisément, il dépend de l'évaporation, de l'absorption par les sols et par la biomasse. Seul un travail pointu en hydrologie pourrait estimer ce taux de transfert à la lagune.

Le scénario d'un taux de transfert de 50 % des volumes d'eau captés montre que les apports agricoles entraîneraient une diminution moyenne de la salinité de 1 à 2 unités de salinité dans le bassin nord et de 0.5 à 1 unité dans le bassin sud. Le signal traduisant les volumes d'eau douce captés au cours de l'année est fortement marqué et est « anti-phasé » avec un schéma naturel d'apports d'eau douce d'un bassin versant naturel. En effet, l'hiver les volumes captés pour l'agriculture sont nuls, ils commencent à partir du mois de mars/Avril et sont au maximum en été, pour de nouveau être interrompus en octobre. Pour un schéma d'apports d'eau douce naturel, les maximums se font en hiver et au printemps avec un minimum l'été.

Ainsi l'impact sur la salinité des eaux de la lagune sous l'effet des apports agricoles est fortement marqué saisonnièrement mais à l'inverse d'un schéma naturel. L'effet le plus fort de diminution des salinités est l'été avec 2 à 3 unités de salinité dans le bassin nord pour n'être qu'une diminution de moins d'1 unité en hiver. Ainsi, l'effet des apports agricoles diminue l'amplitude de variation de salinité entre l'hiver et l'été d'environ 2 unités car ces apports sont inversés par rapport à un fonctionnement naturel et normal d'un bassin versant.

Pour chacun des scénarii présentés, il est important dans l'analyse de l'impact de salinité de prendre en compte d'une part l'impact sur la tendance moyenne d'augmentation ou diminution sur les deux bassins existants dans la lagune, mais aussi de quantifier l'impact sur la variation des amplitudes saisonnières des salinités car ce facteur est très important sur le plan biologique.

Enfin ce travail permet aussi d'imaginer l'impact de 2 scénarii de gestion en simultanément. Pour cela il faut estimer l'impact associé en ajoutant ou retranchant leur effet moyen sur les deux bassins ainsi que leur effet au niveau saisonnier, comme par exemple estimer l'effet combiné de l'enlèvement des piles de pont SCNF avec la coupure estivale du Canérou.

V Bibliographie

- [1]. Anonyme, 1996. Bilan des apports toxiques et trophiques dans les étangs du Narbonnais, Rapport BRL, 147p.
- [2]. Anonyme, 1999. Définition d'un plan de gestion des apports trophiques du canal de la Robine dans l'étang de Bages-Sigean, Rapport BRL, 61p.
- [3]. Cesmat L., Fiandrino A., 2009. Calibration et validation du modèle hydrodynamique MARS 3Dcouplé au modèle d'entérobactéries sur la lagune de Thau, Résultats préliminaires (Episode pluvieux 1 et 2 et PNEC 2006). Rapport Ifremer, 92p
- [4]. Cesmat L., Fiandrino A., Derolez V., Serais O., Laugier T., 2009. Calibration et validation du modèle entérobactérie sur l'étang de Thau, épisode d'Octobre 2007 et de février 2008, Rapport Ifremer 56p.
- [5]. Cesmat L., Fiandrino A., Derolez V., Serais O., Laugier T., 2009. Calibration et validation du modèle entérobactérie sur l'étang de Thau, Rapport Ifremer 66p.
- [6]. Cesmat L., Fiandrino A., Derolez V., Serais O., Jeanne N., Lemarchand O., Laugier T., 2010. Calibration et validation du modèle entérobactérie sur l'étang de Thau, épisode de novembre 2008 et de janvier 2009, Rapport Final Ifremer 85p.
- [7]. Fiandrino A., Lagarde F., 2010. Développement d'une méthode d'estimation des débits dans les graus de lagunes, Ifremer contrat n°07/3211071F, 55p.
- [8]. Ifremer, 2010. Réseau de Suivi Lagunaire, Bilan des résultats 2010, 290p.
- [9]. Ifremer, 2006. Réseau de Suivi Lagunaire, Bilan des résultats 2006, 290p.
- [10]. Ifremer, 2007. Réseau de Suivi Lagunaire, Bilan des résultats 2007, 290p.
- [11]. Lazure P., Dumas F., 2007. An external-internal mode coupling for a 3D hydrodynamical model for applications at regional scale (MARS). *Advances in Water Resources* 31 :233-250.
- [12]. Le Noc S., De Wit R., 2010. Application du modèle LOICZ aux lagunes de Thau et Bages-Sigean, Ifremer et Université Montpellier II, contrat n°10/3211477, 50p.
- [13]. Raymond M., et al, 2010. Outil de management Environnemental et de gestion de l'Avertissement sur le bassin de Thau (OMEGA), Etape 1/Phase3, Modèle Bassin-Versant, rapport BRL/EGIS, 85p.
- [14]. Wilke M., 1997. Etude des phénomènes d'eutrophisation dans plusieurs lagunes du Languedoc-Roussillon : effets des facteurs abiotiques, DURS, Université de Perpignan, 162p
- [15]. Wilke M., 2002. Les fluctuations spatio-temporelles des conditions abiotiques dans les lagunes méditerranéennes : importance, origines et incidences du phénomène comme facteur limitant pour les biocénoses lagunaires. Thèse, EPHE, 430p.

VI Tables et index

VI.1 Liste des Figures :

FIGURE 1 : CARTE DES PRINCIPAUX COURS D'EAU	5
FIGURE 2 : ETAT VIS-A-VIS DE L'EUTROPHISATION DE LA COLONNE D'EAU (RESULTATS DU RSL 2002-2010)	7
FIGURE 3 : CUMUL DES PLUIES ANNUELLES SUR LA PERIODE 1995-2010	9
FIGURE 4 : BOITES A MOUSTACHES DES DISTRIBUTIONS DES INTENSITES DE PLUIES DES ANNEES 1995 A 2010 AVEC 2 ECHELLES DE REPRESENTATION, EN HAUT POUR VOIR LES PLUIES MAXIMALES ET EN BAS POUR VOIR LES PLUIES MEDIANES ET LES QUARTILES	11
FIGURE 5 : ETANG DE BAGES-SIGEAN ET SON BASSIN VERSANT (RSL, 2010).....	12
FIGURE 6 : DEBIT DE LA BERRE ENTRE JANVIER 2005 ET NOVEMBRE 2005.....	13
FIGURE 7 : EVOLUTION DES DEBITS MESURES AU NIVEAU DE LA PRISE D'EAU SUR L'AUDE A RAONEL ET DU DEVERSOIR DU CANELOU SUR LA PERIODE DE 2000 A 2005 (LE NOC ET DE WITT, 2010)	14
FIGURE 8 : DONNEES DE DEBITS AU DEVERSOIR DU CANELOU (MANDIRAC) DE 1998 A 2002 (EN HAUT) ET DE 2002 A 2005 (EN BAS)	15
FIGURE 9 : DEBIT DE LA BERRE ESTIME A PARTIR D'UN TAUX DE TRANSFERT DE 34 % SUR LA PERIODE 1995/2010	16
FIGURE 10 : VOLUMES D'EAU APPORTES PAR L'ENSEMBLE DU BASSIN VERSANT NATUREL (BERRE-FONT FROIDE, RIEU DE ROQUEFORT) ESTIMES A PARTIR DES PLUIES, BILAN PAR SAISON ET PAR ANNEE (2000-2010)	17
FIGURE 11 : SIGNAL DE HAUTEUR D'EAU MESURE DANS LE GRAU DE PORT LA NOUVELLE DE NOVEMBRE 2005 A MARS 2007, PAR RAPPORT AU ZERO HYDROGRAPHIQUE	18
FIGURE 12 : DONNEES DE DEBIT DE NOVEMBRE 2005 A MARS 2007 DANS LE GRAU DE PORT LA NOUVELLE (UN DEBIT POSITIF CORRESPOND A UN DEBIT SORTANT DE LA LAGUNE) – SOURCE : FIANDRINO, LAGARDE 201020	
FIGURE 13 : SALINITE MESUREE EN DIFFERENTES STATIONS ENTRE 1995 ET 2010, EN MER (BLEU, A SIGEAN (NOIR), A PEYRIAC (ROUGE) ET A BAGES (EN GRIS) (DONNEES RSL-FILMED).....	21
FIGURE 14 : GRILLE DE CALCUL BATHYMETRIQUE DU MODELE MARS 3D	24
FIGURE 15 : DEBIT OBSERVES (EN BLEU) ET SIMULES (EN ROUGE) DU 24 NOVEMBRE 2005 AU 03 MAI 2006	27
FIGURE 16 : DEBIT OBSERVES (EN BLEU) ET SIMULES (EN ROUGE) DU 3 MAI 2006 AU 10 OCTOBRE 2006	27
FIGURE 17 : DEBIT OBSERVES (EN BLEU) ET SIMULES (EN ROUGE) DU 10 OCTOBRE 2006 AU 1 ^{ER} AVRIL 2007	28
FIGURE 18 : VOLUMES JOURNALIERS ENTRANTS ET SORTANTS DE LA LAGUNE SIMULES (BLEU) ET OBSERVES (JAUNE) AU COURS DU MOIS DE MARS 2006.....	28
FIGURE 19 : VOLUMES JOURNALIERS ENTRANTS ET SORTANTS DE LA LAGUNE SIMULES (BLEU) ET OBSERVES (JAUNE) AU COURS DU MOIS D'AVRIL 2006	29
FIGURE 20 : COMPARAISON ET REGRESSION STATISTIQUES DES VOLUMES JOURNALIERS ENTRANTS (A GAUCHE) ET SORTANTS (A DROITE) SIMULES ET OBSERVES SUR LA PERIODE DE DECEMBRE 2005 A AVRIL 2007.....	30
FIGURE 21 : COMPARAISON ET REGRESSION STATISTIQUES DES VOLUMES JOURNALIERS ENTRANTS (A GAUCHE) ET SORTANTS (A DROITE) SIMULES ET OBSERVES SUR LA PERIODE DE MARS 2006 A AVRIL 2007 (ON ENLEVE LA PERIODE DU GROS EVENEMENT PLUVIEUX DE FEVRIER 2006).....	30

FIGURE 22 : COMPARAISON ENTRE LES HAUTEURS D'EAU OBSERVEE (EN BLEU) ET SIMULES (EN ROUGE) DU 24 NOVEMBRE 2005 AU 03 MAI 2006.....	33
FIGURE 23 : COMPARAISON ENTRE LES HAUTEURS D'EAU OBSERVEE (EN BLEU) ET SIMULES (EN ROUGE) DU 3 MAI 2006 AU 10 OCTOBRE 2006	33
FIGURE 24 : COMPARAISON ENTRE LES HAUTEURS D'EAU OBSERVEE (EN BLEU) ET SIMULES (EN ROUGE) DU 10 OCTOBRE 2006 AU 1 ^{ER} AVRIL 2007	34
FIGURE 25 : DEBIT OBSERVES (EN BLEU) ET SIMULES (EN ROUGE) DU 24 NOVEMBRE 2005 AU 03 MAI 2006	34
FIGURE 26 : DEBIT OBSERVES (EN BLEU) ET SIMULES (EN ROUGE) DU 3 MAI 2006 AU 10 OCTOBRE 2006	35
FIGURE 27 : DEBIT OBSERVES (EN BLEU) ET SIMULES (EN ROUGE) DU 10 OCTOBRE 2006 AU 1 ^{ER} AVRIL 2007	35
FIGURE 28 : COMPARAISON ET REGRESSION STATISTIQUES DES VOLUMES JOURNALIERS ENTRANTS (A GAUCHE) ET SORTANTS (A DROITE) SIMULES ET OBSERVES SUR LA PERIODE DE DECEMBRE 2005 A AVRIL 2007.....	36
FIGURE 29 : COMPARAISON ET REGRESSION STATISTIQUES DES VOLUMES JOURNALIERS ENTRANTS (A GAUCHE) ET SORTANTS (A DROITE) SIMULES ET OBSERVES SUR LA PERIODE DE MARS 2006 A AVRIL 2007 (ON ENLEVE LA PERIODE DU GROS EVENEMENT PLUVIEUX DE FEVRIER 2006).....	36
FIGURE 30 : HAUTEURS D'EAU OBSERVEES (EN BLEU) ET SIMULES (EN ROUGE) DU 24 NOVEMBRE 2005 AU 03 MAI 2006.....	38
FIGURE 31 : HAUTEURS D'EAU OBSERVEES (EN BLEU) ET SIMULES (EN ROUGE) DU 3 MAI 2006 AU 10 OCTOBRE 2006.....	38
FIGURE 32 : HAUTEURS D'EAU OBSERVEES (EN BLEU) ET SIMULES (EN ROUGE) DU 10 OCTOBRE 2006 AU 1 ^{ER} AVRIL 2007	39
FIGURE 33 : COMPARAISON ET REGRESSIONS STATISTIQUES DES VOLUMES JOURNALIERS ENTRANTS (A GAUCHE) ET SORTANTS (A DROITE) SIMULES ET OBSERVES SUR LA PERIODE DE DECEMBRE 2005 A AVRIL 2007 (HAUTEUR D'EAU THEORIQUE)	40
FIGURE 34 : COMPARAISON ET REGRESSIONS STATISTIQUES DES VOLUMES JOURNALIERS ENTRANTS (A GAUCHE) ET SORTANTS (A DROITE) SIMULES ET OBSERVES SUR LA PERIODE DE MARS 2006 A AVRIL 2007 (ON ENLEVE LA PERIODE DU GROS EVENEMENT PLUVIEUX DE FEVRIER 2006) (HAUTEUR D'EAU THEORIQUE)	40
FIGURE 35 : COMPARAISON ET REGRESSIONS STATISTIQUES DES VOLUMES JOURNALIERS ENTRANTS (A GAUCHE) ET SORTANTS (A DROITE) SIMULES ET OBSERVES SUR LA PERIODE DE DECEMBRE 2005 A AVRIL 2007 (HAUTEUR D'EAU MESUREE).....	41
FIGURE 36 : COMPARAISON ET REGRESSIONS STATISTIQUES DES VOLUMES JOURNALIERS ENTRANTS (A GAUCHE) ET SORTANTS (A DROITE) SIMULES ET OBSERVES SUR LA PERIODE DE MARS 2006 A AVRIL 2007 (ON ENLEVE LA PERIODE DU GROS EVENEMENT PLUVIEUX DE FEVRIER 2006) (HAUTEUR D'EAU MESUREE).....	41
FIGURE 37 : DEBIT OBSERVES (EN BLEU) ET SIMULES (EN ROUGE) DU 24 NOVEMBRE 2005 AU 03 MAI 2006	42
FIGURE 38 : DEBIT OBSERVES (EN BLEU) ET SIMULES (EN ROUGE) DU 3 MAI 2006 AU 10 OCTOBRE 2006	43
FIGURE 39 : DEBIT OBSERVES (EN BLEU) ET SIMULES (EN ROUGE) DU 10 OCTOBRE 2006 AU 1 ^{ER} AVRIL 2007	43
FIGURE 41 : CARTE DE LA SALINITE MOYENNE DU SCENARIO DE REFERENCE ENTRE 2000 ET 2010.....	46
FIGURE 42 : EVOLUTION DE LA SALINITE MOYENNE POUR LES 4 SECTEURS ET SOUS-BASSINS CHOISIS ENTRE 2000 ET 2010 POUR LE SCENARIO DE REFERENCE.....	47

FIGURE 43 : EVOLUTION DE LA SALINITE AUX 7 POINTS DE SUIVIS, SIGNAL ESTIME PAR LE MODELE POUR LE SCENARIO DE REFERENCE (EN VERT) ET MESURES EFFECTUEES (POINTS ROUGES) SUR LA PERIODE DE 2000 A 2010.....	48
FIGURE 44 : BOXPLOT DE LA SALINITE DE CHAQUE JOUR DE L'ANNEE POUR LES 10 ANS (SCENARIO DE REFERENCE)	49
FIGURE 45 : SALINITE MOYENNE (2004-2010) DU SCENARIO DE REFERENCE (A GAUCHE), LE SCENARIO DE « NON ENLEVEMENT DU BARRAGE A VANNES » (AU CENTRE) ET LA DIFFERENCE DES DEUX SCENARII (A DROITE)..	51
FIGURE 46 : SALINITE MOYENNE POUR LES 4 SECTEURS DEFINIS ENTRE 2000 ET 2010 POUR LE SCENARIO DE REFERENCE (EN BLEU) ET POUR LA SIMULATION DE CONSERVATION DU BARRAGE A VANNES (EN ROUGE) .	52
FIGURE 47 : SALINITE MOYENNE (2004-2010) DU SCENARIO DE REFERENCE (A GAUCHE), DU SCENARIO D'ENLEVEMENT DES ANCIENNES PILES DU PONT DE LA VOIE FERREE (100M ² DE SECTION) AU CENTRE ET LA DIFFERENCE DES DEUX SCENARII (A DROITE).....	53
FIGURE 48 : DIFFERENCE DE LA SALINITE MOYENNE POUR LES 4 SECTEURS DEFINIS ENTRE 2000 ET 2010 ENTRE LE SCENARIO DE REFERENCE ET LE SCENARIO D'ENLEVEMENT DES PILES DE PONT SNCF (100M ²).....	54
FIGURE 49 : BOXPLOT JOURNALIERES (2000-2010) POUR LES 4 SECTEURS DE LA DIFFERENCE DE SALINITE ENTRE LES SCENARIO DE REFERENCE ET L'ENLEVEMENT DES PILES DE PONT SNCF (100M ²).	54
FIGURE 50 : SALINITE MOYENNE (2000-2004) DU SCENARIO DE REFERENCE (A GAUCHE), LE SCENARIO « COUPURE DU CANELOU » (AU CENTRE) ET LA DIFFERENCE DES DEUX SCENARII (A DROITE).....	59
FIGURE 51 : DIFFERENCE DE LA SALINITE MOYENNE POUR LES 4 SECTEURS DEFINIS ENTRE 2000 ET 2010 ENTRE LE SCENARIO DE REFERENCE ET LE SCENARIO DE COUPURE TOTALE DU CANELOU	59
FIGURE 52 : COMPARAISON DES BOXPLOTS DES SALINITES DES ANNEES 2000 A 2010 POUR LES 4 SECTEURS DE LA LAGUNE ENTRE LE SCENARIO DE REFERENCE ET LE SCENARIO DE COUPURE TOTALE DU CANELOU (RAJOUT DE LA MOYENNE EN VERT).....	60
FIGURE 53 : BOXPLOT JOURNALIERES (2000-2004) POUR LE SECTEUR 4 DE LA SITUATION DE REFERENCE ET DU SCENARIO DE COUPURE DU CANELOU.....	61
FIGURE 54 : BOXPLOT JOURNALIERES (2000-2004) POUR LE SECTEUR 1 DE LA SITUATION DE REFERENCE ET DU SCENARIO DE COUPURE DU CANELOU.....	61
FIGURE 55 :COMPARAISON DES OBSERVATIONS DE SALINITE EN 7 POINTS DE LA LAGUNE REALISEES ENTRE 2000 ET 2010 AVEC LE RESULTAT DE SIMULATION POUR LE SCENARIO DE REFERENCE (EN BLEU) ET POUR LE SCENARIO DE COUPURE DU CANELOU (EN VERT).....	62
FIGURE 56 : SALINITE MOYENNE (2000-2011) DU SCENARIO DE REFERENCE (A GAUCHE), LE SCENARIO « COUPURE DES APPORTS ESTIVAUX DU CANELOU » (AU CENTRE) ET LA DIFFERENCE DES DEUX SCENARII (A DROITE)..	64
FIGURE 57 : DIFFERENCE DE LA SALINITE MOYENNE POUR LES 4 SECTEURS DEFINIS ENTRE 2000 ET 2010 ENTRE LE SCENARIO DE REFERENCE ET LE SCENARIO DE COUPURE ESTIVALE (JUN/JUILLET/AOUT) DU CANELOU	64
FIGURE 58 : BOXPLOT JOURNALIERES (2000-2010) POUR LES 4 SECTEURS 4 DES DIFFERENCES DE SALINITE MOYENNE SUR L'ANNEE ENTRE LA SITUATION DE REFERENCE ET DU SCENARIO DE COUPURE ESTIVALE DU CANELOU.	65
FIGURE 59 : SALINITE MOYENNE (2000-2010) DU SCENARIO DE REFERENCE (A GAUCHE), LE SCENARIO « D'AUGMENTATION DES APPORTS HIVERNAUX DU CANELOU (2.5 M ³ /S) » (AU CENTRE) ET LA DIFFERENCE DES DEUX SCENARII (A DROITE).....	66

FIGURE 60 : DIFFERENCE DE LA SALINITE MOYENNE POUR LES 4 SECTEURS DEFINIS ENTRE 2000 ET 2010 ENTRE LE SCENARIO DE REFERENCE ET LE SCENARIO D'APPORTS HIVERNAUX D'EAU DOUCE PAR LE CANELOU	67
FIGURE 61 : BOXPLOT JOURNALIERES (2000-2010) POUR LES 4 SECTEURS 4 DES DIFFERENCES DE SALINITE MOYENNE SUR L'ANNEE ENTRE LA SITUATION DE REFERENCE ET DU SCENARIO D'APPORTS HIVERNAUX PAR LE CANELOU.....	67
FIGURE 62 : SALINITE MOYENNE (2000-2010) DU SCENARIO DE REFERENCE (A GAUCHE), LE SCENARIO « D'APPORT DE 100% DES PRISES AGRICOLES RIVE DROITE » (AU CENTRE) ET LA DIFFERENCE DES DEUX SCENARII (A DROITE)	69
FIGURE 63 : SALINITE MOYENNE (2000-2010) DU SCENARIO DE REFERENCE (A GAUCHE), LE SCENARIO « D'APPORT DE 50% DES PRISES AGRICOLES RIVE DROITE » (AU CENTRE) ET LA DIFFERENCE DES DEUX SCENARII (A DROITE)	70
FIGURE 64 : DIFFERENCE DE LA SALINITE MOYENNE POUR LES 4 SECTEURS DEFINIS ENTRE 2000 ET 2010 ENTRE LE SCENARIO DE REFERENCE ET LE SCENARIO D'APPORTS AGRICOLES (100%)	70
FIGURE 65 : BOXPLOT JOURNALIERES (2000-2010) POUR LES 4 SECTEURS 4 DES DIFFERENCES DE SALINITE MOYENNE SUR L'ANNEE ENTRE LA SITUATION DE REFERENCE ET DU SCENARIO D'APPORTS AGRICOLES (100%)	71
FIGURE 66 : BOXPLOTS JOURNALIERES (2000-2010) POUR LES 4 SECTEURS 4 DES DIFFERENCES DE SALINITE MOYENNE SUR L'ANNEE ENTRE LA SITUATION DE REFERENCE ET DU SCENARIO D'APPORTS AGRICOLES (50%)	71
FIGURE 67 : SALINITE MOYENNE (2000-2010) DU SCENARIO DE REFERENCE (A GAUCHE), LE SCENARIO « 8.5 M3/S PAR LE CANELOU » (AU CENTRE) ET LA DIFFERENCE DES DEUX SCENARII (A DROITE).....	72
FIGURE 68 : EVOLUTION DE LA SALINITE MOYENNE POUR LES 4 SECTEURS ET SOUS-BASSINS CHOISIS ENTRE 2000 ET 2010 POUR LE SCENARIO D'APPORTS DE 8 M3/S DE LA ROBINE	73
FIGURE 69 : BOXPLOT JOURNALIERES (2000-2010) POUR LES 4 SECTEURS 4 DES DIFFERENCES DE SALINITE MOYENNE SUR L'ANNEE ENTRE LA SITUATION DE REFERENCE ET DU SCENARIO D'APPORT 8 M3/S	73
FIGURE 70 : VOLUMES JOURNALIERS ENTRANTS ET SORTANTS DE LA LAGUNE SIMULES (BLEU) ET OBSERVES (JAUNE) AU COURS DU MOIS DE DECEMBRE 2005.....	84
FIGURE 71 : VOLUMES JOURNALIERS ENTRANTS ET SORTANTS DE LA LAGUNE SIMULES (BLEU) ET OBSERVES (JAUNE) AU COURS DU MOIS DE JANVIER 2006.....	84
FIGURE 72 : VOLUMES JOURNALIERS ENTRANTS ET SORTANTS DE LA LAGUNE SIMULES (BLEU) ET OBSERVES (JAUNE) AU COURS DU MOIS DE FEVRIER 2006.....	85
FIGURE 73 : VOLUMES JOURNALIERS ENTRANTS ET SORTANTS DE LA LAGUNE SIMULES (BLEU) ET OBSERVES (JAUNE) AU COURS DU MOIS DE MAI 2006.....	85
FIGURE 74 : VOLUMES JOURNALIERS ENTRANTS ET SORTANTS DE LA LAGUNE SIMULES (BLEU) ET OBSERVES (JAUNE) AU COURS DU MOIS DE JUIN 2006.....	86
FIGURE 75 : VOLUMES JOURNALIERS ENTRANTS ET SORTANTS DE LA LAGUNE SIMULES (BLEU) ET OBSERVES (JAUNE) AU COURS DU MOIS DE JUILLET 2006	86
FIGURE 76 : VOLUMES JOURNALIERS ENTRANTS ET SORTANTS DE LA LAGUNE SIMULES (BLEU) ET OBSERVES (JAUNE) AU COURS DU MOIS DE AOUT 2006	87

FIGURE 77 : VOLUMES JOURNALIERS ENTRANTS ET SORTANTS DE LA LAGUNE SIMULES (BLEU) ET OBSERVES (JAUNE) AU COURS DU MOIS DE SEPTEMBRE 2006	87
FIGURE 78 : VOLUMES JOURNALIERS ENTRANTS ET SORTANTS DE LA LAGUNE SIMULES (BLEU) ET OBSERVES (JAUNE) AU COURS DU MOIS D'OCTOBRE 2006	88
FIGURE 79 : VOLUMES JOURNALIERS ENTRANTS ET SORTANTS DE LA LAGUNE SIMULES (BLEU) ET OBSERVES (JAUNE) AU COURS DU MOIS DE NOVEMBRE 2006	88
FIGURE 80 : VOLUMES JOURNALIERS ENTRANTS ET SORTANTS DE LA LAGUNE SIMULES (BLEU) ET OBSERVES (JAUNE) AU COURS DU MOIS DE DECEMBRE 2006.....	89
FIGURE 81 : VOLUMES JOURNALIERS ENTRANTS ET SORTANTS DE LA LAGUNE SIMULES (BLEU) ET OBSERVES (JAUNE) AU COURS DU MOIS DE JANVIER 2007.....	89
FIGURE 82 : VOLUMES JOURNALIERS ENTRANTS ET SORTANTS DE LA LAGUNE SIMULES (BLEU) ET OBSERVES (JAUNE) AU COURS DU MOIS DE FEVRIER 2007.....	90
FIGURE 83 : VOLUMES JOURNALIERS ENTRANTS ET SORTANTS DE LA LAGUNE SIMULES (BLEU) ET OBSERVES (JAUNE) AU COURS DU MOIS DE MARS 2007	90

VI.2 Listes des Tableaux

TABLEAU 1 : DISTRIBUTION DES PLUIES : VALEURS DES BOITES A MOUSTACHES (NOMBRE D'ECHANTILLONS,)	10
TABLEAU 2 : SUPERFICIE DES PRINCIPAUX SOUS BASSINS VERSANTS DE L'ETANG DE BAGES-SIGEAN.....	12
TABLEAU 3 : PLAN D'EXPERIENCE SUR LES PARAMETRES CONTROLABLES ET LES DIFFERENTES PRISES EN COMPTE DES FORÇAGES POUR LES SIMULATIONS DE CALIBRATIONS	25
TABLEAU 4 : COMPARAISON DES AMENAGEMENTS REALISES SUR LES GRAUS DES ETANGS DE SALSES-LEUCATE ET LES AMENAGEMENTS A L'ETUDE SUR LE GRAU DE BAGES-SIGEAN ET DE LEUR IMPACT SUR LA SALINITE MOYENNE LAGUNAIRE	56
TABLEAU 5 : RECAPITULATIFS DE L'EFFET SUR LA SALINITE MOYENNE PAR SECTEUR OU VARIATION SAISONNIERE ET INTER-ANNUELLE ENTRE LA SITUATION DE REFERENCE ET L'ENSEMBLE DES SCENARII ETUDIE	75

VII Annexes

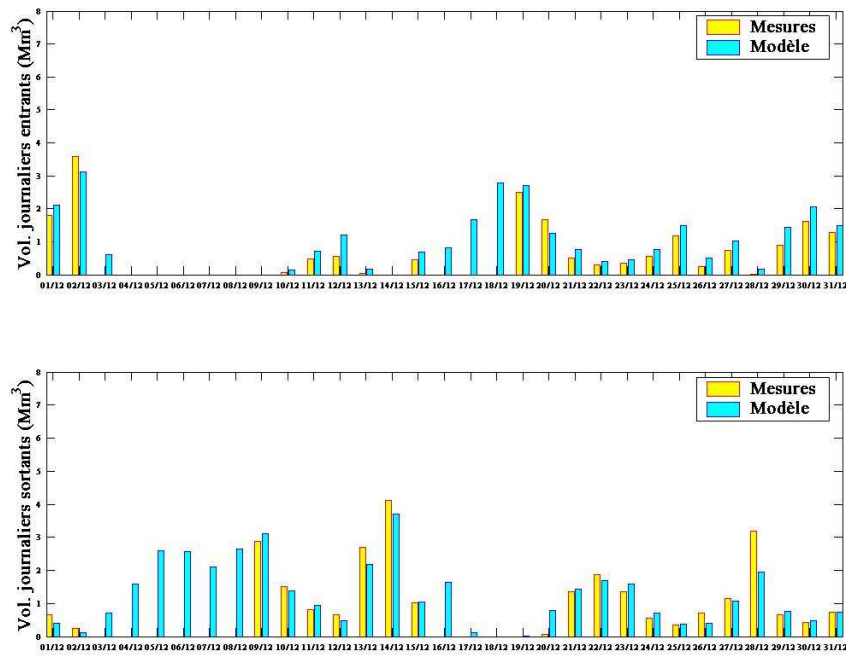


Figure 70 : Volumes journaliers entrants et sortants de la lagune simulés (bleu) et observés (jaune) au cours du mois de décembre 2005

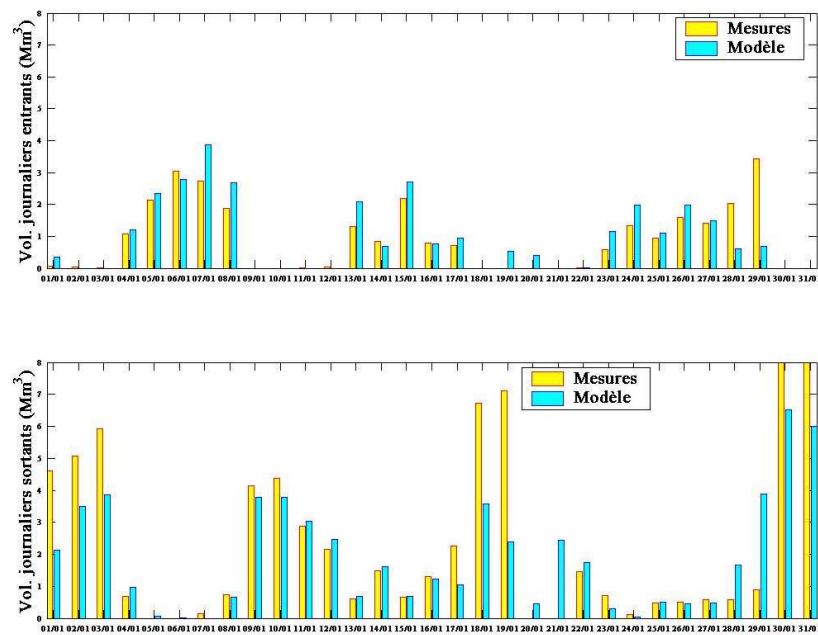


Figure 71 : Volumes journaliers entrants et sortants de la lagune simulés (bleu) et observés (jaune) au cours du mois de janvier 2006

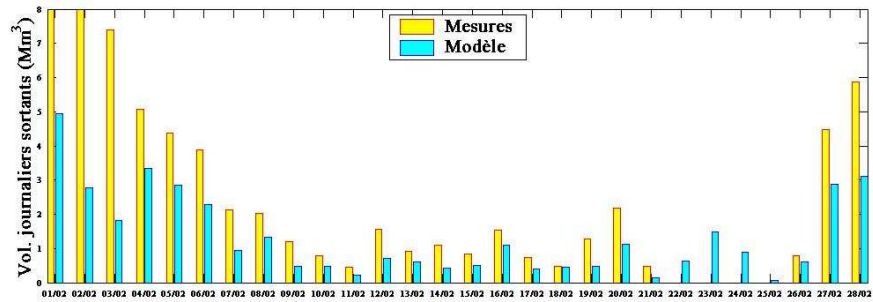
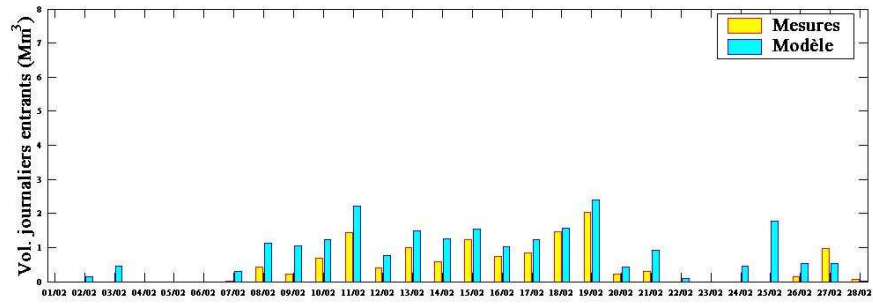


Figure 72 : Volumes journaliers entrants et sortants de la lagune simulés (bleu) et observés (jaune) au cours du mois de février 2006

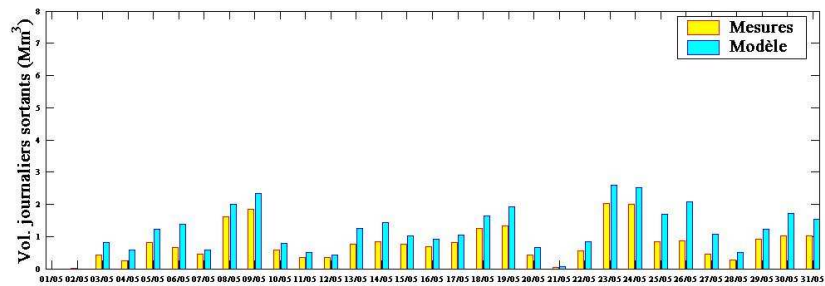
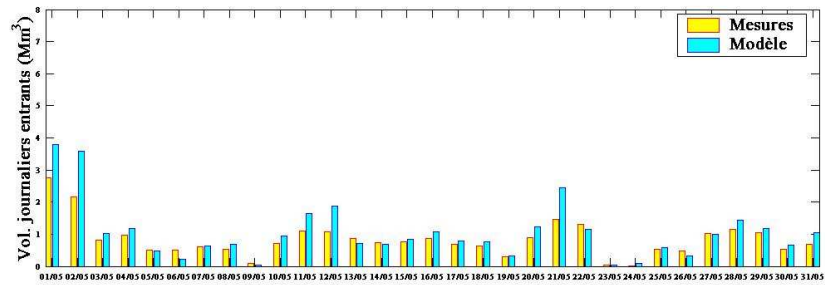


Figure 73 : Volumes journaliers entrants et sortants de la lagune simulés (bleu) et observés (jaune) au cours du mois de mai 2006

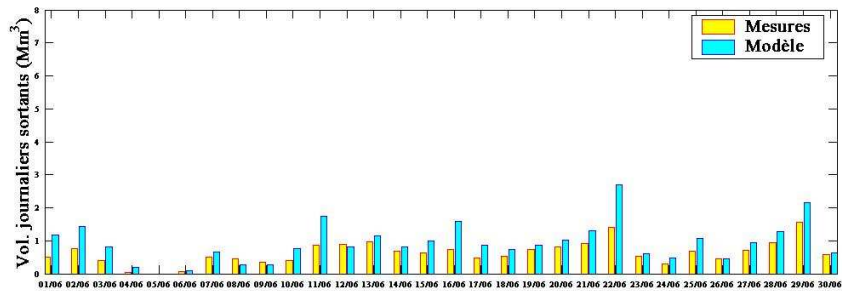
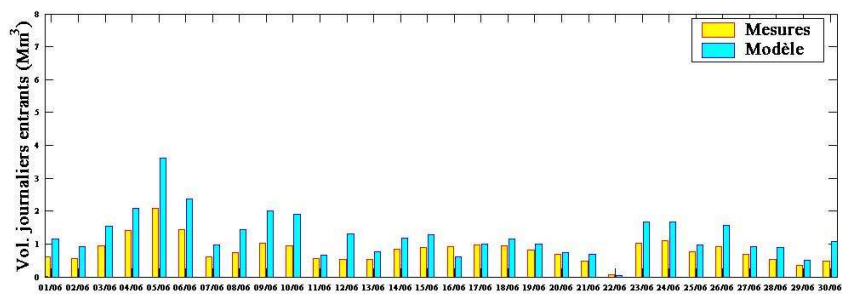


Figure 74 : Volumes journaliers entrants et sortants de la lagune simulés (bleu) et observés (jaune) au cours du mois de juin 2006

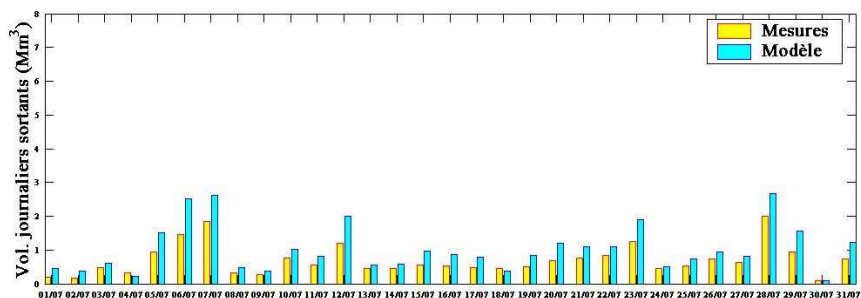
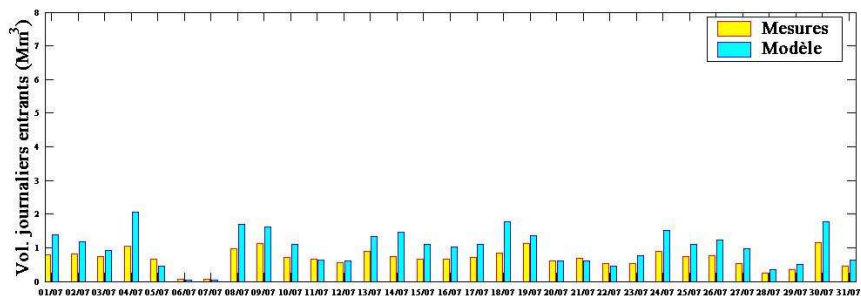


Figure 75 : Volumes journaliers entrants et sortants de la lagune simulés (bleu) et observés (jaune) au cours du mois de juillet 2006

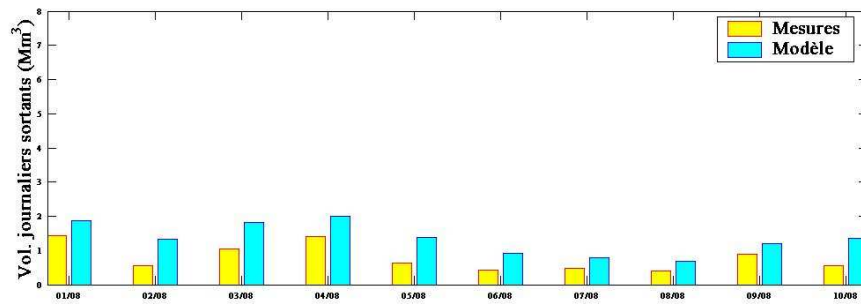
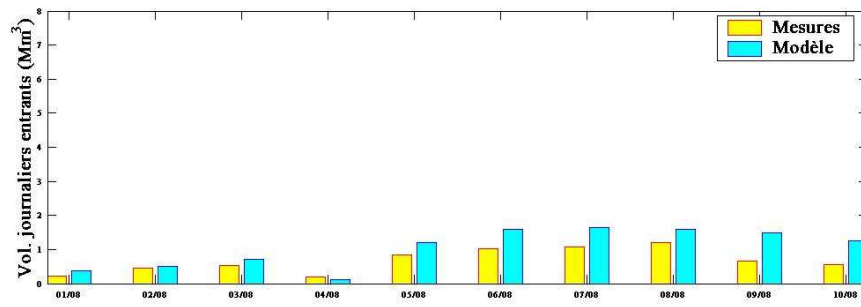


Figure 76 : Volumes journaliers entrants et sortants de la lagune simulés (bleu) et observés (jaune) au cours du mois de août 2006

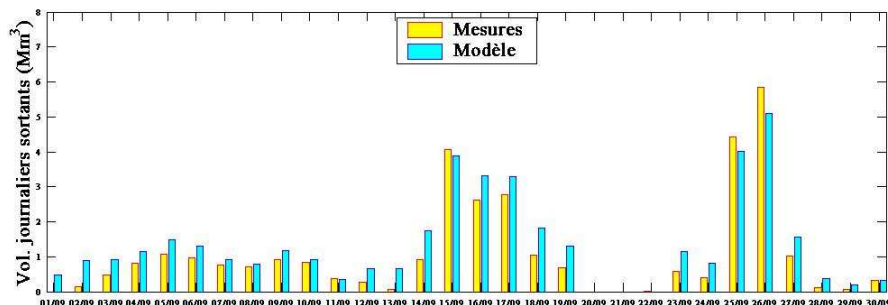
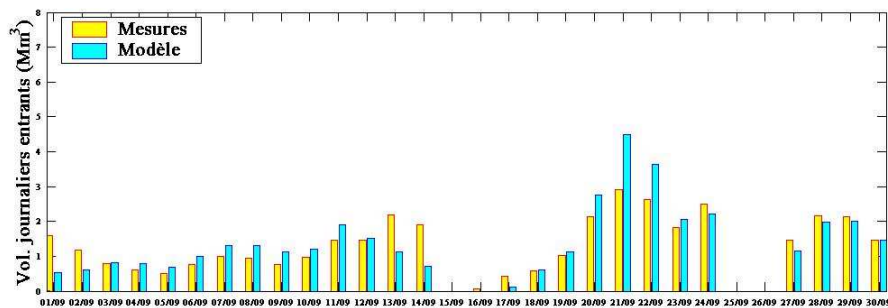


Figure 77 : Volumes journaliers entrants et sortants de la lagune simulés (bleu) et observés (jaune) au cours du mois de septembre 2006

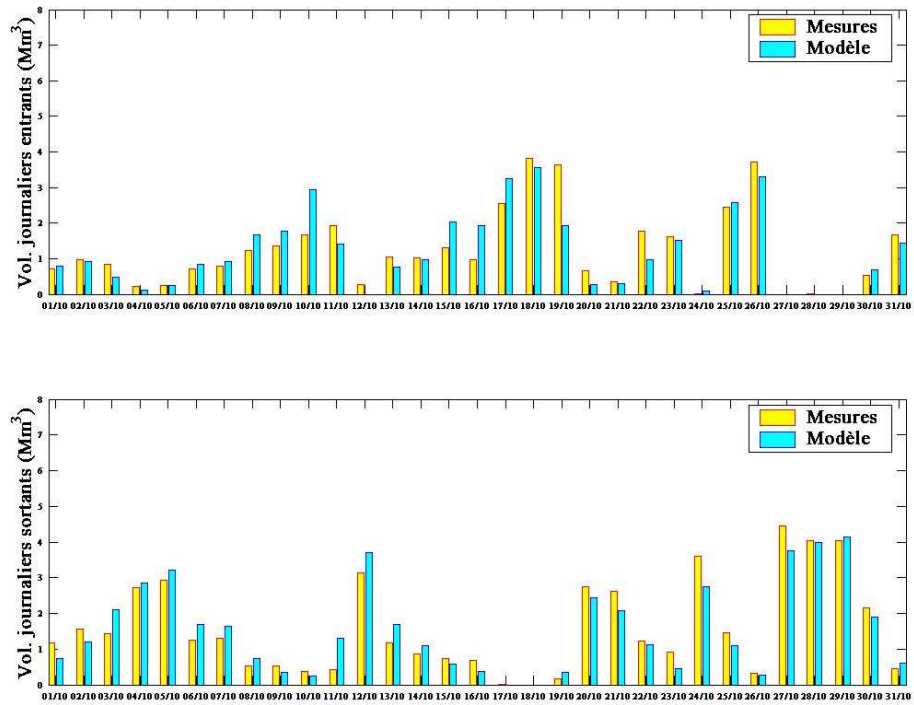


Figure 78 : Volumes journaliers entrants et sortants de la lagune simulés (bleu) et observés (jaune) au cours du mois d'octobre 2006

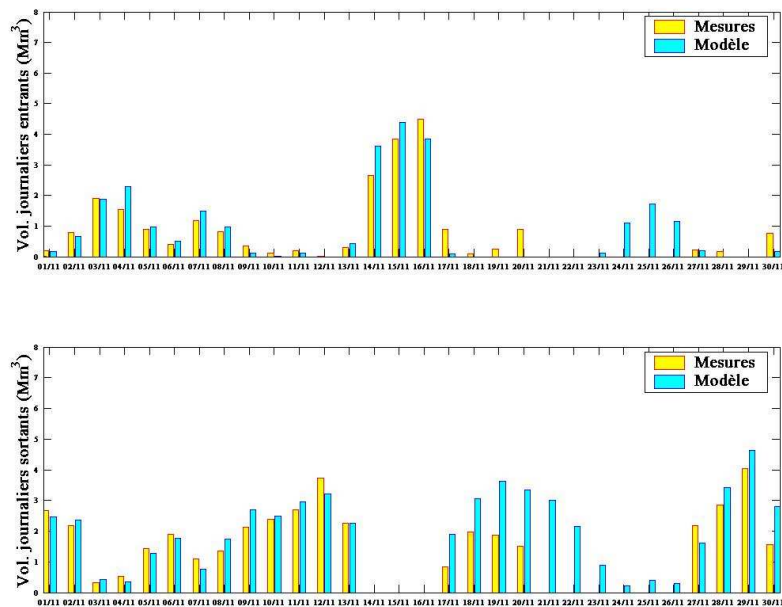


Figure 79 : Volumes journaliers entrants et sortants de la lagune simulés (bleu) et observés (jaune) au cours du mois de novembre 2006

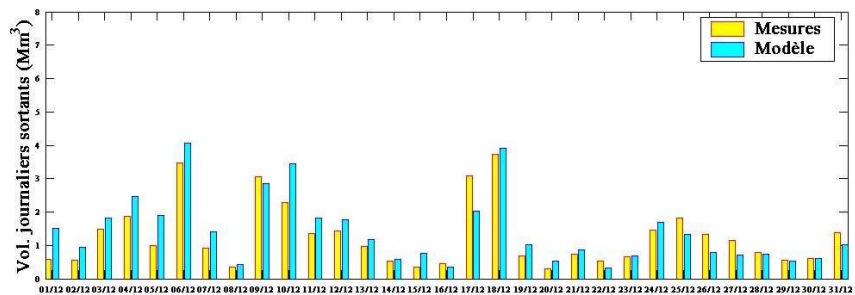
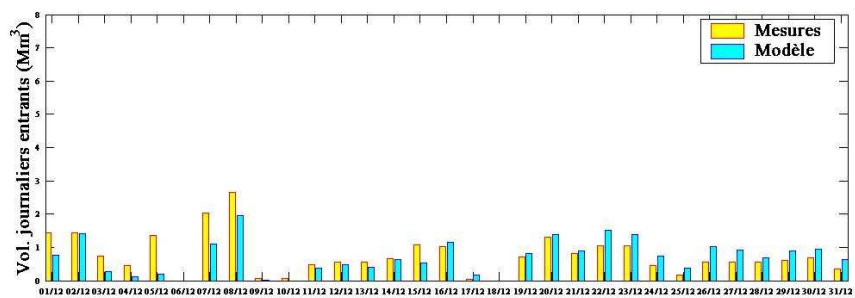


Figure 80 : Volumes journaliers entrants et sortants de la lagune simulés (bleu) et observés (jaune) au cours du mois de décembre 2006

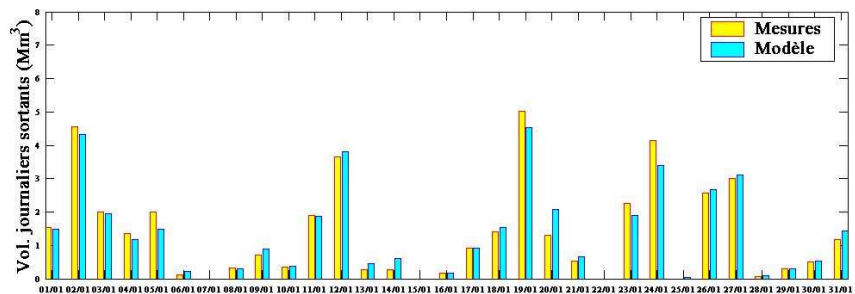
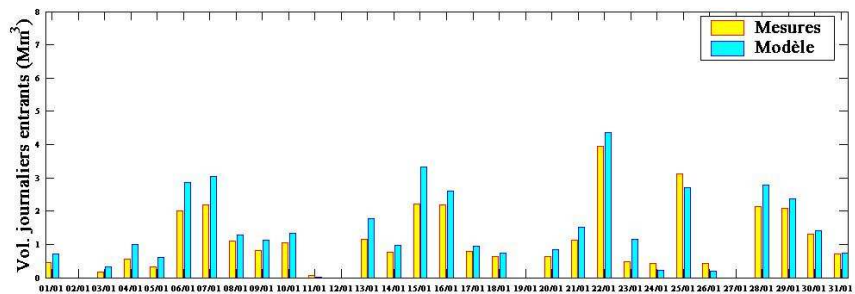


Figure 81 : Volumes journaliers entrants et sortants de la lagune simulés (bleu) et observés (jaune) au cours du mois de janvier 2007

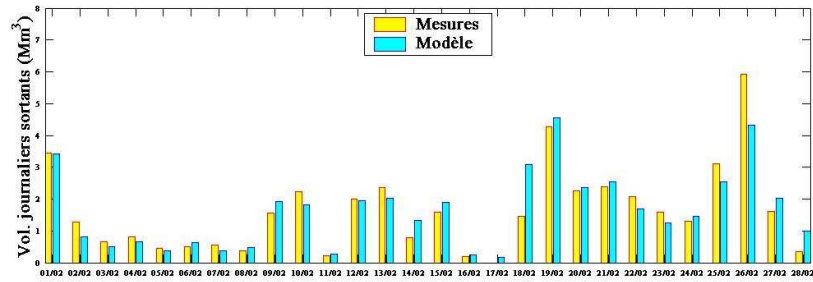
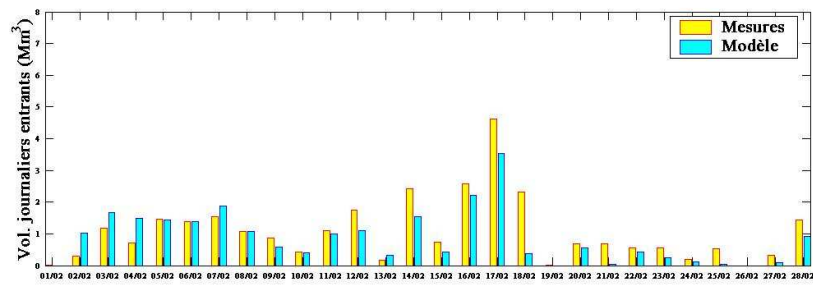


Figure 82 : Volumes journaliers entrants et sortants de la lagune simulés (bleu) et observés (jaune) au cours du mois de février 2007

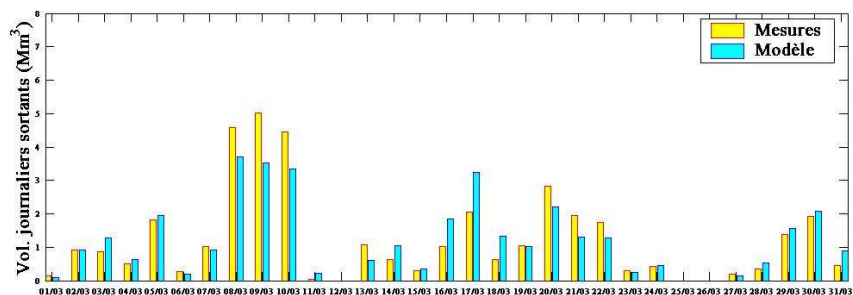
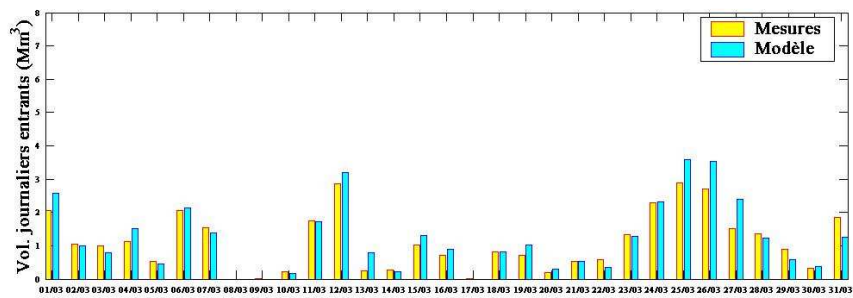


Figure 83 : Volumes journaliers entrants et sortants de la lagune simulés (bleu) et observés (jaune) au cours du mois de mars 2007