Institut PYTHEAS
Observatoire des Sciences de l'Univers
Aix Marseille Université

ÉCOLE DOCTORALE SCIENCES DE L'ENVIRONNEMENT

master set
sciences de l'environnement terrestre

Spécialité : Sciences de l'eau

Parcours : HYDRO

Année : 2015-2016

MODELISATION HYDRO-ISOTOPIQUE DE L'ETANG DU VACCARES

par Ortelli Marion

Structures d'accueil : Fondation Sansouïre Tour du Valat
Réserve Naturelle Nationale de Camargue
Centre Européen de Recherche et d'Enseignement des Géosciences et de l'Environnement

Responsables de Stage : Olivier Boutron
Yves Chérain
Christine Vallet-Coulomb

GÉOSCIENCES DE L'ENVIRONNEMENT
CEREGE
CENTRE EUROPÉEN DE RECHERCHE ET D'ENSEIGNEMENT DE GÉOSCIENCES DE L'ENVIRONNEMENT

Réserve Nationale CAMARGUE

TOUR DU VALAT

Remerciements

Je tiens à remercier dans un premier temps, toute l'équipe pédagogique et les intervenants professionnels responsables de la formation *Master set, spécialité Sciences de l'eau, parcours HYDRO*, pour avoir assurés la partie théorique de celle-ci.

Je tiens à témoigner toute ma reconnaissance au Centre Européen de Recherche et d'Enseignement en Géosciences de l'Environnement, à la fondation Tour du Valat ainsi qu'à la Réserve Naturelle Nationale de Camargue. Cette première expérience sera très importante pour ma carrière et les tâches auxquelles vous m'avez associé m'ont vraiment permis de consolider mes connaissances et d'en développer de nouvelles.

Je tiens à remercier tout particulièrement les personnes suivantes :

Mes tuteurs, Messieurs *Boutron, Chérain* et Madame *Vallet-Coulomb* pour m'avoir intégré rapidement et m'avoir accordé toute leur confiance ; pour le temps qu'ils m'ont consacré tout au long de cette période, sachant répondre à toutes mes interrogations ; sans oublier leurs participations au cheminement de ce rapport.

Les stagiaires de la Tour du Valat, plus précisément Thibault, Cédric, Florent et François ainsi que l'ensemble du personnel de la Tour du Valat pour leur accueil sympathique.

Mes amis et collègues Thibaut, Marie et Lisa qui me supportent de grès ou de force et ce quasi-quotidiennement. Une attention particulière est portée à ce petit Thibaut, pour sa gentillesse, sa patiente et son soutien.

Table des matières

Résumé 1
1- Introduction 2
2- Méthodologie générale 2
2-1 Présentation du site d'étude et études antérieures 2
2-1-1 Géologie et Hydrologie 2
2-1-2 Climat et Occupation du sol 3
2-1-3 Etudes antérieures 4
2-2 Modèle hydro-isotopique 4
2-2-1 Fonctionnement global 4
2-2-2 Schémas et équations 5
3- Données 6
3-1 Données hydroclimatiques 6
3-2 Données isotopiques et de conductivité 6
4- Résultats isotopiques et de conductivité 8
4-1 Compositions isotopiques 9
4-1-1 Les canaux d'irrigation 9
4-1-1-2 Les étangs 12
4-1-2-Conductivité 14
4-1-2-1 Les canaux d'irrigation 14
4-1-2-2 Les étangs 15
4-1-3 Isotopes VS Conductivités 15
4-1-4 Discussion 17
4-1-4-1 Les canaux d'irrigation 17
4-1-4-2 Les étangs 17
4-1-4-3 Conclusion globale 17
5- Modèle de bilan hydro-isotopique 17
5-1 Estimation des flux provenant du bassin versant du Vaccarès 17
5-1-1 Description générale des écoulements 17
5-1-1-1 Artificialisation des écoulements 17
5-1-1-2 Pratiques d'irrigation 18
5-1-1-3 Débit du canal de Fumemorte 19
5-1-2-Méthodologie 19
5-1-3 Modélisation de la relation pluie-débit sur le bassin de Fumemorte 20
5-1-3-1 Méthodologie 20
5-1-3-2 Résultats et discussion 21
5-1-4 Modélisation des drainages agricoles sur le bassin de Fumemorte 21
5-1-4-1 Méthodologie 21
5-1-4-2 Estimation des surfaces irriguées entre 1993 et 2007 22
5-1-4-3 Résultats et discussion 23
5-1-5 Modélisation des écoulements sur les autres bassins versants 24

5-1-6 Simulation des écoulements vers le Vaccarès entre 2008 et 2013 25
5-1-6-1 Bassin versant Fumemorte 25
5-1-6-2 Apport des traceurs pour la quantification des excédents d'irrigation 25
5-1-6-2-1 Estimation des excédents d'irrigation à l'aide des compositions isotopiques 25
5-1-6-2-2 Estimation des excédents d'irrigation à l'aide des surfaces irriguées 26
5-1-6-2-3 Discussion des estimations des excédents d'irrigation 27
5-2 Estimation des échanges avec les étangs du sud 27
5-2-1 Présentation du système lagunaire du Vaccarès 27
5-2-2 Simulations des flux par TELEMAC-2D 27
5-2-3 Résultats et discussion 29
5-3 Simulation de la composition isotopique de l'étang 29
5-3-1 Période d'irrigation année 2011 avec données de TELEMAC-2C 29
5-3-3 Période globale années 2008 à 2013 sans données TELEMAC-2D 32
5-3-4 Tentative d'ajustement manuelle sur 2008-2013 33
6- Conclusion et perspectives 36
6-1 Conclusion 36
6-2 Perspectives 36
7- Bibliographie 37
Annexes 39

Table des figures

Figure 1: Carte de l'hydrosystème Ile de Camargue délimité par les deux branches du fleuve Rhône (Petit Rhône et Grand Rhône). SMM et SDG sont les villes de Saintes-Maries de la Mer et de Salins de Giraud, France, Source : Boutron et al (2015)..... 3

Figure 2 : Représentation schématique des données d'entrées du modèle de bilan hydro-isotopique sur l'étang du Vaccarès. 5

Figure 3: Points de prélèvements d'eau pour les échantillons d'isotopes stables et de conductivités ainsi que les stations météorologiques de la RNNC et TDV sur l'Île de Camargue. 7

Figure 4: Compositions isotopiques Oxygène-18 ($\delta^{18}O$) en fonction du Deutérium ($\delta^{2}H$) du canal d'irrigation (Aube de Bouic), de la mer Méditerranée, des étangs principaux (Vaccarès Centre, Ouest, Est et Pointe de Mornès) et du Sud (Lion et Monro), des canaux de drainage (Fumemorte et Roquemaure) et de la droite météorique locale (DML) sur la période 2008-2013. 9

Figure 5 : Composition isotopique $\delta^{18}O$ des canaux Aube de Bouic (ADB), Fumemorte(FUM), Roquemaure (ROQ) et des Précipitations (P) en fonction du temps et des précipitations sur la période allant du 1er janvier 2012 au 20 juin 2013. 10

Figure 6 : Compositions isotopiques $\delta^{18}O$ en fonction de $\delta^{2}H$ des canaux Aube de Bouic, Roquemaure et Fumemorte sur la période 2008-2013. La droite météorique locale a pour équation y=7.6x + 6.4, la droite de corrélation des canaux de drainage a pour équation y= 6.8x – 4.9. La droite de corrélation du canal d'irrigation est y= 7.7x+5.2. 11

Figure 7: Compositions isotopiques $\delta^{18}O$ en fonction de $\delta^{2}H$ des étangs sur la période 2008-2013. En jaune Vaccarès Centre, en vert Vaccarès Ouest, en violet Vaccarès Est, en gris Pointe de Mornès, en bleu Lion et en orange Monro. La droite météorique locale a pour équation y=7.6x + 6.4 et la droite de corrélation des étangs a pour équation y= 5.6x – 8.4. 12

Figure 8: Compositions isotopiques de $\delta^{18}O$ en fonction de $\delta^{2}H$ moyennes en période d'Irrigation (avril-septembre) sur 2 années (2008 en gris et 2011 en orange), de la DML et de la droite de corrélation des étangs avec pour équation y= 5.5 x - 8.4. Les carrés représentent Lion, les ronds Monro, les losanges Pointe de Mornès, les petits trait Vaccarès Centre, les triangles Vaccarès Est, les grands traits Vaccarès Ouest. 13

Figure 9: Comparaison de l'évolution de la composition isotopique en δ18O du Vaccarès Ouest en fonction du temps sur les années 2008-2009 et 2011-2012. 13

Figure 10: Compositions isotopiques en Oxygène- 18 ($\delta^{18}O$) en fonction de la conductivité électrique (σ) du canal d'irrigation (Aube de Bouic), de la mer Méditerranée, des étangs principal (Vaccarès Centre, Ouest, Est et Pointe de Mornès) et du Sud (Lion et Monro), des canaux de drainage (Fumemorte et Roquemaure) et des droites des mélange (entre Aube de Bouic 2011 et la mer Méditerranée ; Précipitations et la mer Méditerranée) sur les périodes 2008 et 2011. 16

Figure 11: Localisation des bassins versants de l'Île de Camargue. En couleurs sont représentés les bassins versants pri en compte dans le modèle de bilan hydro-isotopique. 18

Figure 12 : Précipitations (en mm) et débit (en m^3/s) en fonction du temps sur le bassin versant de Fumemorte sur la période allant du 01/01/2003 au 31/12/2004. 19

Figure 13 : Schéma simplifié du modèle Génie Rural à 4 paramètres Journalier 20

Figure 14: Carte d'occupation du sol de l'année 2010-2011, des bassins versants de l'Île de Camargue. Source : A. Guelmami,2016 22

Figure 15 : Courbe d'irrigation moyenne (Qi moyen) entre le 8 avril et le 30 septembre effectuée sur les années 1993 à 2007. 24

Figure 16 : Simulation des débits du bassins versants observés (2007) et simulés sur la périodes 2007-2013. 25

Figure 17: Représentation (enveloppe rouge) de la zone prise en compte dans le modèle conceptuel, et localisation des sites de mesure de niveau d'eau (limnigraphes) utilisés pour caler les hauteurs d'eau simulées par TELEMAC-2D sur les périodes étudiées. 27

Figure 18 : Hauteur d'eau observée (en étoile noire) et simulée (en trait vert) de l'étang du Vaccarès sur la période du 10/06/2011 au 17/10/2011. 30

Figure 19: Evolution de la composition isotopique $\delta^{18}O$ et $\delta^{2}H$ au cours du temps sur la période du 10/06/2011 au 17/10/2011. Le trait représente la simulation de l'échantillon Vaccarès Ouest, les ronds les données expérimentales. Le rond rouge représente Vaccarès Ouest ; le vert Vaccarès Centre ; le bleu Vaccarès Est, le noir Pointe de Mornès. 30

Figure 20 : Salinité observée (en trait vert) et simulées (en croix rouge) de l'étang du Vaccarès sur la période du 10/06/2011 au 17/10/2011. 31

Figure 21 : Hauteur d'eau observée (en étoile noire) et simulée (en trait vert) de l'étang du Vaccarès sur la période du 01/01/2008 au 20/06/2013. 32

Figure 22: Evolution de la composition isotopique $\delta^{18}O$ au cours du temps sur la période du 01/01/2008 au 20/06/2013. Le trait représente la simulation de l'échantillon Vaccarès Ouest, les ronds les données expérimentales. Le rond rouge représente Vaccarès Ouest ; le vert Vaccarès Centre ; le bleu Vaccarès Est, le noir Pointe de Mornès. 33

Figure 23 : Salinité observée (en trait vert) et simulées (en croix rouge) de l'étang du Vaccarès sur la période du 01/01/2008 au 20/06/2013. 33

Figure 24: Débits entrants (en orange) et sortants (en bleu) du Vaccarès estimés par hypothèses pour l'ajustement du modèle de bilan. 34

Figure 25: Hauteur d'eau observée (en étoile noire) et simulée (en trait vert) de l'étang du Vaccarès sur la période du 01/01/2008 au 20/06/2013. 34

Figure 26: Evolution de la composition isotopique $\delta^{18}O$ au cours du temps sur la période du 01/01/2008 au 20/06/2013. Le trait représente la simulation de l'échantillon Vaccarès Ouest, les ronds les données expérimentales. Le rond rouge représente Vaccarès Ouest ; le vert Vaccarès Centre ; le bleu Vaccarès Est, le noir Pointe de Mornès. 35

Figure 27: Salinité observée (en trait vert) et simulées (en croix rouge) de l'étang du Vaccarès sur la période du 01/01/2008 au 20/06/2013. 35

Tables des tableaux

Tableau 1: Ordre de grandeur des différents termes connus du bilan hydrologique sur l'étangs du Vaccarès. 4

Tableau 2: Compositions isotopiques (en ‰) et conductimétries (en mS/cm) des masses d'eau de références (Précipitations, Mer Méditerranée et Aube de Bouic2011) avec leurs incertitudes associées. 8

Tableau 3: Compositions isotopiques $\delta^{18}O$ et $\delta^{2}H$ des moyennes annuelles (2008-2009,2011-2012, 2012-2013) des 3 canaux. 10

Tableau 4: Compositions isotopiques $\delta^{18}O$ et $\delta^{2}H$ moyennes en période d'irrigation (avril-septembre) pour les années 2008,2011 et 2012 des 3 canaux. 11

Tableau 5: Compositions isotopiques $\delta^{18}O$ et δ^{2H} moyennes en période hors irrigation (octobre-mai) pour les années 2008-2009, 2011-2012,2012-2013 des 3 canaux. 11

Tableau 6: Compositions isotopiques $\delta^{18}O$ et $\delta^{2}H$ moyennes annuelles des étangs sur l'année 2008-2009. .. 12

Tableau 7: Compositions isotopiques en $\delta^{18}O$ et en $\delta^{2}H$ moyennes en période d'irrigation (avril-septembre) des étangs sur les périodes d'irrigation 2008 et 2011. 14

Tableau 8: Conductivités moyennes annuelles des 3 canaux d'irrigation sur les années 2008-2009, 2011-2012 et 2012-2013. 14

Tableau 9: Conductivités électriques moyennes des 3 canaux sur les périodes d'irrigation de 2008, 2011 et 2012. 15

Tableau 10: Conductivités électriques moyennes des 3 canaux sur les périodes Hors irrigation des années 2008-2009,2011-2012 et 2012-2013. 15

Tableau 11: Conductivités électriques moyennes sur les étangs de l'hydrosystème Vaccarès à l'échelle annuelle (2008-2009) et interannuelle (2008 et 2011). 15

Tableau 12 : Critères de performance sur les étapes de calibration, de validation et sur la période totale avec les paramètres fixes du modèle GR4J sur le bassin de Fumemorte. 21

Tableau 13 : Surfaces irriguées (m^2), Volumes d'eau d'irrigation (m^3), Ratio surfaces irriguées sur superficie du bassin versant sur les années allant de 1993 à 2007 et 2011. La superficie de Fumemorte = 6.78E+07 m^2, de Roquemaure = 1.43E+07 m^2 et Diffus= 2.21E+07 m^2. 23

Tableau 14 : Résultat de la simulation des 14 années 1993-2007 en utilisant 12 mois sur 12 (Période Hivernale + Irrigation) sur le bassin de Fumemorte 24

Tableau 15: Relations des débits sur les bassins versants à partir des compositions isotopiques sur les périodes d'irrigation de 2008-2011 et 2012. 26

Tableau 16: Ratio surfaces irriguées / surface totale du bassin versant sur les périodes d'irrigation allant de 1993 à 1999, de 2001 à 20117 et 2011. 26

Tableau 17:Somme des écarts entre les niveaux d'eau observés et simulés par TELEMAC-2D sur la période A. 29

Tableau 18: Ordre de grandeurs des termes du bilan hydrologique sur les périodes 2011 (10/06/2011-17/10/2011) et 2012-2013 (14/05/2012-20/06/2013). 31

Table des annexes

Annexe 1: Notice et carte hydrogéologique 1972 40
Annexe 2: Modèle Pluie-débit GR4J ; Calibration, Validation et Période totale 42
Annexe 3 : Critère de performance..... 43
Annexe 4 : SIG Surfaces irriguées par an de 1993 à 2007 et 2011 44
Annexe 5: SIG Surfaces irriguées / Surface totale par an 1993-2007 45
Annexe 6: Modèle TELEMAC-2D; Représentation des niveaux d'eau en 2011. A gauche modèle initial sans ajout de volume; à droite modèle initial avec réajustement de volume à chaque pas de temps sur les différents limnigraphes. 46
Annexe 7: Modèle TELEMAC-2D ; Représentation des niveaux d'eau 2012-2013 modèle initial avec réajustement de volume à chaque pas de temps sur les différents limnigraphes. 47
Annexe 8: Simulation sur la période globale du 14 mai 2012 au 20 juin 2013. Cette simulation comporte les débits des passes simulés par TELEMAC-2D. 48
Annexe 9: Simulation sur la période globale La simulation s'étend du 1er janvier 2008 au 20 juin 2013. Cette simulation comporte les débits des passes simulés par TELEMAC-2D. 49

Résumé

La Camargue est une région emblématique des deltas anthropisés dans lesquels les équilibres écologiques et hydro-salins dépendent d'une gestion hydraulique totalement artificialisée. L'étang du Vaccarès, principal plan d'eau de la Camargue, est alimenté par le drainage des eaux d'irrigation en excès dans le système rizicole et par l'eau de mer, à laquelle il est connecté au sud par l'intermédiaire d'un ensemble de petits étangs plus ou moins salés.

Nous développons un modèle de bilan hydrologique couplé avec les traceurs isotopiques dans le but de mieux comprendre le fonctionnement hydrologique de l'étang du Vaccarès dans le delta du Rhône. Le modèle est une version très simplifiée de l'hydrosystème Vaccarès. Il intègre les échanges d'eau entre les différents étangs (Nord et Sud), les compositions isotopiques de chacun ainsi que de la vapeur atmosphérique ambiante du site afin qu'il soit adapté au fonctionnement hydroclimatique du delta, qui subit les intrusions salines.

Des prélèvements d'eau ont été réalisés tous les mois sur les étangs de l'hydrosystème Vaccarès et tous les deux mois sur 3 canaux des bassins versants de l'étang du Vaccarès entre 2008 et 2013. Des analyses d'isotopes stables de l'eau Oxygène-18 et Deutérium et de conductivité électrique ont été réalisés. Le bilan hydrologique est dominé par les apports des bassins versants, de l'évaporation et des précipitations. De nombreuses incertitudes ont été mises en évidence puis réduites sur différents termes du bilan (apport de bassin versant et échanges entre étangs). Les apports d'eau des bassins versant et les flux d'échanges entre les étangs sont très variables entre la période d'irrigation (avril-septembre) et la période hivernale (octobre-mai). Ces apports ont été estimés respectivement avec un modèle de type GR4J (apports d'eau des bassins versant), et un modèle TELEMAC-2D (flux d'échanges entre les étangs).

Basé sur les données hydroclimatiques disponibles, nous proposons une simulation du niveau d'eau, de la composition isotopique et de la salinité de l'étang du Vaccarès sur trois périodes : l'été 2011 et les années 2008-2013. De ces simulations ressort une discussion autour des incertitudes des termes du bilan.

1- Introduction

Dans un contexte de changement climatique, il est important de modéliser le fonctionnement hydrologique des masses d'eau afin de comprendre leurs évolutions futures. La Camargue est une région emblématique des deltas anthropisés dans lesquels les équilibres écologiques et hydro-salins dépendent d'une gestion hydraulique totalement artificialisée. L'étang du Vaccarès est localisé dans « L'ile de Camargue » au centre du delta du Rhône délimité par le Petit Rhône à l'Ouest et le Grand Rhône à l'Est. Cet étang est un des plus grands étangs de Camargue et s'étend sur près de 10 000 hectares. Il est alimenté par le drainage des eaux d'irrigation en excès dans le système rizicole et par l'eau de mer, à laquelle il est connecté au Sud par l'intermédiaire d'étangs inférieurs plus ou moins salés. Ces deux compartiments Nord-Sud sont connectés la majeure partie de l'année.

De nombreuses études ont été réalisées sur la modélisation hydrologique couplée aux isotopes stables de l'eau. L'intérêt de cette méthode est de connaître et de quantifier les différents apports hydriques pour contraindre les bilans hydrologiques. D'après Yi et al. (2008), « Les bassins situés dans les deltas reçoivent de multiples sources d'eau, les lacs servent d'enregistreur de niveau et fournissent des connaissances ». C'est pourquoi comprendre les rôles respectifs des processus hydrologiques sur les bilans d'eau des lacs dans les grands écosystèmes est important pour leur gestion. Cependant, ceci est difficile car les études nécessitent des investissements importants et dépendent de l'instrumentation du site.

Au cours des dernières années, les traceurs isotopiques de l'eau sont devenus de plus en plus utilisés comme une approche alternative pour fournir des évaluations des bilans hydriques des lacs dans les régions éloignées. Par exemple, Gibson et Edwards (2002) ont mené au Canada une étude systématique des compositions isotopiques de l'eau d'un lac pour comprendre les variations régionales dans les pertes évaporatoires des arbres. D'autres travaux ont été réalisés sur le lac Ihotry à Madagascar par Vallet-Coulomb et al. (2006) pour contraindre l'équilibre isotopique d'un lac à partir d'un équilibre hydrologique. Plus récemment, en Patagonie de l'Argentine Mayr et al. (2007) ont utilisé des traceurs isotopiques de l'eau pour caractériser les bilans hydriques des lacs contemporains dans le but d'affiner les enquêtes paléo-limnologiques. Sur le lac Tchad, Bouchez et al. (2016) ont combinés les différentes approches (hydrologiques, géochimiques et chimiques) afin d'obtenir avec précision tous les flux qui contribuent à l'équilibre du lac.

Dans la majorité des études, les estimations quantitatives des bilans hydriques des lacs sont calculées à l'aide de la formule de Craig et Gordon (1965) modèle de résistance linéaire qui décrit l'enrichissement isotopique par évaporation. La Camargue est un lieu soumis aux stress hydriques tels qu'une diminution des ressources en eau douce avec le potentiel changement climatique et l'accroissement des périodes de sécheresse, ou encore d'une salinisation de l'eau avec la remontée du niveau marin. Les enjeux socio-économiques étant dépendant du fonctionnement hydrologique du site, la modélisation hydro-isotopique semble la méthode la plus adaptée à notre problématique.

Le but de ce travail est de modéliser le fonctionnement hydro-isotopique de l'étang du Vaccarès. Les étapes sont : (1) De comprendre le fonctionnement des bassins versants et de développer un modèle Génie Rural à 4 paramètres Journalier (Modèle GR4J) ; (2) Etablir une relation sur les paramètres d'échanges hydrauliques entre l'étang du Vaccarès et les étangs inférieurs (Modèle TELEMAC-2D); (3) Analyser le bilan hydrologique contraint à l'aide des isotopes stables de l'eau,Oxygène 18 ($\delta^{18}O$) et Deutérium ($\delta^{2}H$) et de la conductivité électrique (Modèle de bilan hydro-isotopique).

2- Méthodologie générale

2-1 Présentation du site d'étude et études antérieures

2-1-1 Géologie et Hydrologie

L'hydrosystème Vaccarès comprend trois étangs interconnectés. Ces étangs sont l'étang du Vaccarès, l'étang des Impériaux (IL), et l'étang Lion/Dame (LDL) (Figure 1). L'étang du Vaccarès reçoit les eaux de drainage de Fumemorte, du Roquemaure, ainsi que des écoulements diffus par ruissellement suite à des pluies. L'étang de la Dame peut recevoir l'eau de drainage du Versadou et l'étang des

Impériaux est le seul à échanger de l'eau avec la mer Méditerranée, à travers un ouvrage de 13 vannes au niveau de la Fourcade (Figure 1).

Dans le domaine agricole non poldérisé (112 km²) dans la partie nord-est et autour de l'étang du Vaccarès, le ruissellement des rizières est déversé directement dans le système lagunaire à travers deux canaux de drainage (Fumemorte (FUM) et Roquemaure (ROQ)). En cas de très fortes précipitations, une partie du ruissellement provenant des rizières poldérisées peut être déchargé directement dans le système de la lagune à travers le canal Rousty (ROU), voir Figure 1.

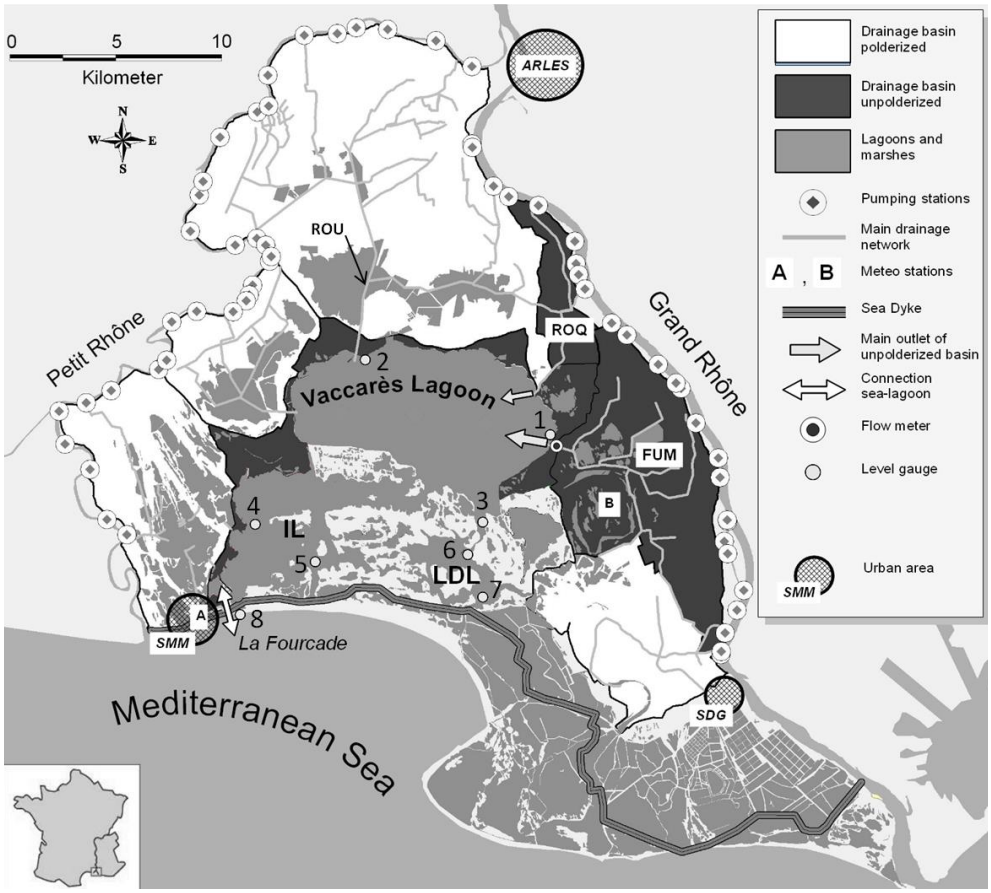


Figure 1: Carte de l'hydrosystème Ile de Camargue délimité par les deux branches du fleuve Rhône (Petit Rhône et Grand Rhône). SMM et SDG sont les villes de Saintes-Maries de la Mer et de Salins de Giraud, France, Source : Boutron et al (2015)

D'après la notice explicative et la carte hydrogéologique de décembre 1972, disponible en Annexe 1,la Camargue est une structure plane avec des bombements topographiques correspondant aux bourrelets alluviaux du Rhône et aux alignements dunaires élaborés par les courants marins.

L'épaisseur de la couverture d'alluvions limono-argileuses se situe sur l'assise caillouteuse accumulée à partir du Pléistocène et croît de l'amont vers l'aval. Au sein des cailloutis une nappe en prolongation de celle de la vallée du Rhône s'écoule vers l'aval, en charge sous les limons. Les couches sablonneuses entassées proviennent de diverses transgressions marines apportant des dépôts laguno-marins. Dans ces zones plus sableuses, circule également une nappe, s'écoulant vers le Sud, très rapidement salée au voisinage des étangs inférieurs. Les zones sableuses, permettent le ralentissement de la montée du niveau marin et donnent la formation de la plaine deltaïque.

2-1-2 Climat et Occupation du sol

Le climat méditerranéen est caractérisé par une longue période estivale chaude et sèche et des hivers doux. Les précipitations y sont faibles et sont caractérisées par une grande variabilité interannuelle et spatiale non négligeable. Les vents sont très fréquents et violents dans toutes les directions mais il y a une dominance des vents Nord/Nord-Ouest.

L'occupation du sol dépend des aménagements anthropiques qui permettent la gestion de l'eau. D'après Loubet (2012), la Camargue possède :

- Un réseau d'irrigation d'environ 110 km, avec un potentiel de débit de 56.9 m^3/s de prélèvement dans le Rhône,
- Un réseau de drainage d'environ 200 km, qui sert en majorité pour le réseau d'assainissement par refoulement au Rhône pouvant avoisiner les 30 m^3/s
- Les marais de chasses et refuge pour l'avifaune, sont estimés à environ 3000 ha

L'occupation du sol se répartit en 4 différents milieux. Les terres agricoles sont situées sur les zones de bourrelets alluviaux, les zones humides sont situées sur les milieux non artificialisés, puis les salins sont à proximité de la mer Méditerrannée, et enfin les milieux urbanisés.
La Camargue a besoin de beaucoup d'apports d'eau du fait de son occupation du sol et de son fort potentiel évaporatoire. Cette région est donc potentiellement très sensible aux changements climatiques.

2-1-3 Etudes antérieures

De nombreuses modélisations ont été réalisées sur l'hydrosystème Vaccarès. En 2003, une modélisation hydrologique a permis de simuler le cycle de l'eau au sein de l'hydrosystème Vaccarès et d'obtenir des simulations très représentatives de zones humides méditerranéenne P. Chauvelon et al. (2003). En 2010, un modèle capable de décrire le sort des substances chimiques anthropiques sur les zones humides de Camargue a été conçu P. Höhener et al. (2010).

Une thèse a été effectuée en 2012 par A. Loubet sur la « Modélisation de l'hydrosystème Vaccarès : contribution à une gestion adaptative des ressources en eau dans le delta du Rhône, France ». Durant celle-ci, dans une démarche prospective, une modélisation hydro-Saline de l'hydrosystème Vaccarès a été mise en place. Par la suite, un modèle hydrodynamique a été créé O. Boutron et al. (2015) afin d'étudier la circulation des masses d'eau provoquée par le vent.

Ces données cumulées à de nouvelles données récoltées, nous permettent d'établir les ordres de grandeurs des paramètres entrant dans le bilan hydrologique.

	Précipitations	Evaporation	Débit Fumemorte
Ordre de grandeur (m^3/s)	0.6	3.0	3.0

Tableau 1: Ordre de grandeur des différents termes connus du bilan hydrologique sur l'étangs du Vaccarès.

Le Tableau 1, permet de visualiser les composantes majoritaires du bilan hydrologique qui sont : les débits des canaux d'irrigation, l'évaporation et les précipitations. Les apports souterrains pour la façade Nord du Vaccarès ont été estimés par Vallès et al (2009) à 1500 m^3/j. Ces apports représentent seulement 4% des apports totaux, alors que les flux d'eau de surfaces en représentent 75%.

2-2 Modèle hydro-isotopique

2-2-1 Fonctionnement global

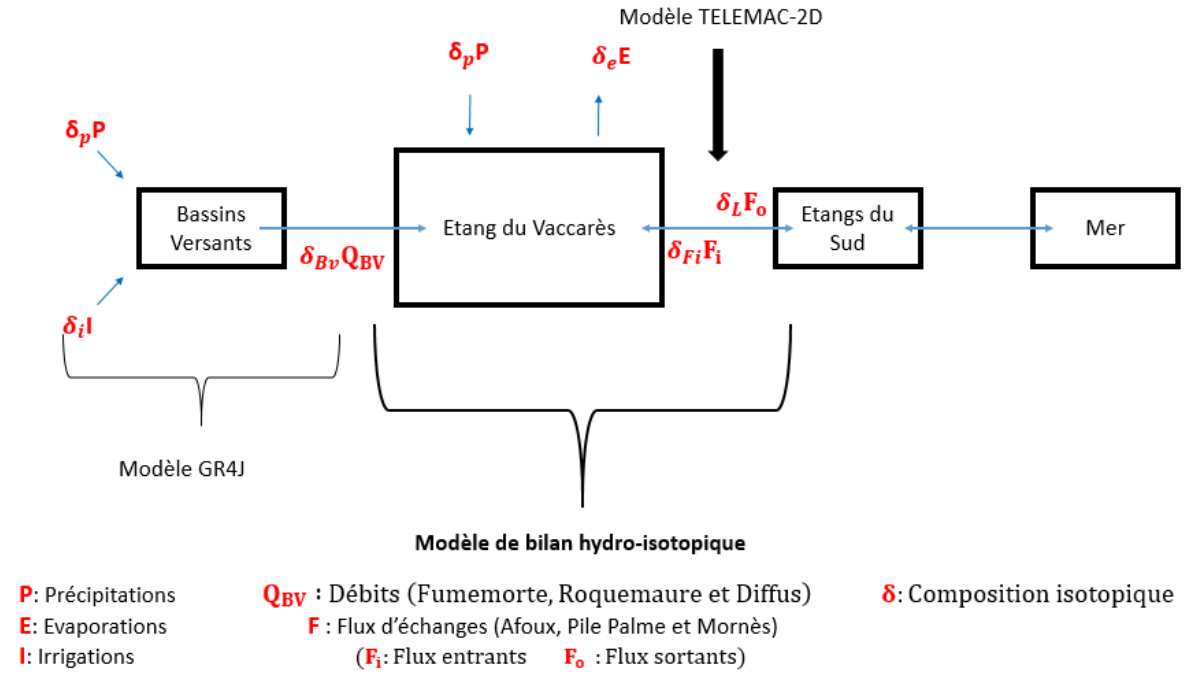


Figure 2 : Représentation schématique des données d'entrées du modèle de bilan hydro-isotopique sur l'étang du Vaccarès.

Le modèle hydro-isotopique est représenté sur la Figure 2.Il utilise des données provenant des modèles Génie Rural à 4 paramètres Journalier (GR4J), TELEMAC-2D et des données climatiques. Le modèle GR4J simule des données de débits sur le bassin versant du Fumemorte (FUM), desquels sont déduits les débits du Roquemaure (ROQ) et les volumes d'eau entrant dans l'étang du Vaccarès par ruissellement direct Diffus (DIF). Le modèle TELEMAC-2D simule des données de débit au niveau des passes entre les étangs : Afoux (AF), Pile Palme (PP) et Mornès (MO) (Figure 2).

2-2-2 Schémas et équations

Le modèle conceptuel hydro-isotopique s'étend sur les années 2008 à 2013. Deux périodes sont plus complètes, elles ont été zoomées et sont :

- La première période s'étend du 10 juin 2011 au 17 octobre 2011.
- La seconde s'étend du 14 mai 2012 au 20 juin 2013.

Un modèle est une représentation simplifiée de la réalité, il permet de simuler un processus difficile à observer sur le terrain et consiste à mettre en équation un questionnement.

Le modèle conceptuel tourne au pas de temps journalier. Pour cela, le modèle se base sur le bilan de masse, avec l'équation n°1 correspondant au bilan hydrologique global :

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = P - E + Q_{bvFUM} + Q_{bvROQ} + Qt_{bvDIF} + Fi_{AF} + Fi_{MO} + Fi_{PP} - Fo_{AF} - Fo_{MO} - Fo_{PP} \quad (1)$$

Avec P = Précipitation ; E = évaporation ; Q_{bv} = Débit provenant de bassin versant ; Fi = Débit entrant des étangs ; Fo = Débit sortant du Vaccarès

Où $Q_{bv} = Q_n + Q_i$ (2)
Avec $Q_{bv} = Q_{total}$; $Q_n = Q_{naturel}$; $Q_i = Q_{irrigué}$

Pour affiner les parts d'eau attribuées aux différents termes du bilan de masse hydrique, il faut le combiner avec le bilan de masse isotopique ou de conductivité électrique. Ceci donne les équations suivantes (3) et (4) :

Pour l'Oxygène 18 (pour le Deutérium il suffit de remplacer $\delta^{18}O$ *par* $\delta^{2}H$):

$$\frac{(\Delta V * \Delta \delta L)}{\Delta t} = \left(\delta^{18}O_{\ P} * P + \delta^{18}O_{\ QbvFUM} * Qbv_{FUM} + \delta^{18}O_{\ QbvROQ} * Qbv_{ROQ} + \delta^{18}O_{\ QbvFUM} * Qbv_{DIF} + \delta^{18}O_{\ FiAF} * Fi_{AF} + \delta^{18}O_{\ FiMO} * Fi_{MO} + \delta^{18}O_{\ FiPP} * Fi_{PP} \right) - \left(\delta^{18}O_{\ Lac} * Fo_{AF} + \delta^{18}O_{\ LAc} * Fo_{MO} + \delta^{18}O_{\ Lac} * Fo_{PP} + \delta^{18}O_{\ E} * E \right) \quad (3)$$

Avec Lac = Etangs du Vaccarès

Pour la conductivité électrique (σ):

$$\frac{(\Delta V * \Delta \delta L)}{\Delta t} = (\sigma_P * P + \sigma_{QbvFUM} * Qbv_{FUM} + \sigma_{Qbv\mathrm{ROQ}} * Qbv_{ROQ} + \sigma_{Qbv\mathrm{FUM}} * Qbv_{DIF} + \sigma_{FiAF} * Fi_{AF} + \sigma_{FiMO} * Fi_{MO} + \sigma_{Fi\mathrm{PP}} * Fi_{\mathrm{PP}}) - (\sigma_{Lac} * Fo_{AF} + \sigma_{Lac} * Fo_{\mathrm{MO}} + \sigma_{Lac} * Fo_3) \quad (4)$$

Avec σ_P négligeable car la salinité est très faible par rapport à la salinité des étangs.

Afin de connaître la composition du flux évaporée, l'équation utilisée pour déterminer δ_E dans l'équation (2) est la formule de Craig et Gordon (Craig et Gordon ,1965) :

$$\delta_E = \frac{{}^{(\delta_L - \varepsilon^*)}/_{\propto - h\delta_A - \varepsilon_k}}{1 - h + \varepsilon_k} \quad (5)$$

où ε^* correspond au fractionnement à l'équilibre ; ε_k le fractionnement cinétique ; $\propto$ le coefficient de fractionnement ; h l'humidité relative ; δ_A et $\delta_L$composition isotopique de vapeur atmosphérique et du lac.

Le fractionnement d'équilibre et la composition de vapeur d'eau sont définis par les formules définies par Horita et Wesolowski (Horita et Wesolowski ,1994).

3- Données

3-1 Données hydroclimatiques

Les données climatiques récoltées proviennent de deux sites différents. Il y a celles de la Tour Du Valat (TDV) et celles de la Réserve Naturelle Nationale de Camargue (RNNC), gérée par la Société Nationale de Protection de la Nature (SNPN). Afin de limiter les incertitudes dans le modèle, un choix des données climatiques a été effectué donnant privilège à l'homogénéité des données utilisées.

Les données climatiques comme la pluviométrie et l'évapotranspiration proviennent de la station météorologique homologuée par Météo-France (nommée Arles) basée sur le site de la TDV. Ces données sont des données exprimées en mm/j.

Les données atmosphériques comme la température et l'humidité de l'air proviennent de travaux antérieurs (Delattre et al.,2015) sur une station météorologique située à proximité de l'étang du Vaccarès appartenant à la RNNC.

Les données hydrologiques disponibles correspondent à deux parties de l'hydrosystème Vaccarès. La première partie détient les informations liées à l'étang du Vaccarès, la seconde partie recense les informations liées aux étangs du Sud :

- L'étang du Vaccarès possède 2 limnigraphes situés à Fumemorte et à Rousty.
- Les étangs du Sud possèdent 6 limnigraphes situés à La Dame, à Fourcade Nord, à Mouillot, à Cacharel et à L'Afoux Nord et Sud.

Les données hydrologiques recensent les apports d'eau de surface tels que les débits des canaux d'irrigation Fumemorte

3-2 Données isotopiques et de conductivité

Les campagnes d'échantillonnage en vue des mesures isotopiques ont été réalisées par la RNNC et Christine Vallet-Coulomb dans le cadre d'une collaboration. Ces échantillons d'eau ont été prélevés à un pas de temps mensuel ou bimensuel sur une période allant de 2008 à 2013 dans 12 lieux différents (Figure 3). A chaque prélèvement, il y a 9 échantillons provenant des étangs et 3 de canaux d'irrigation.

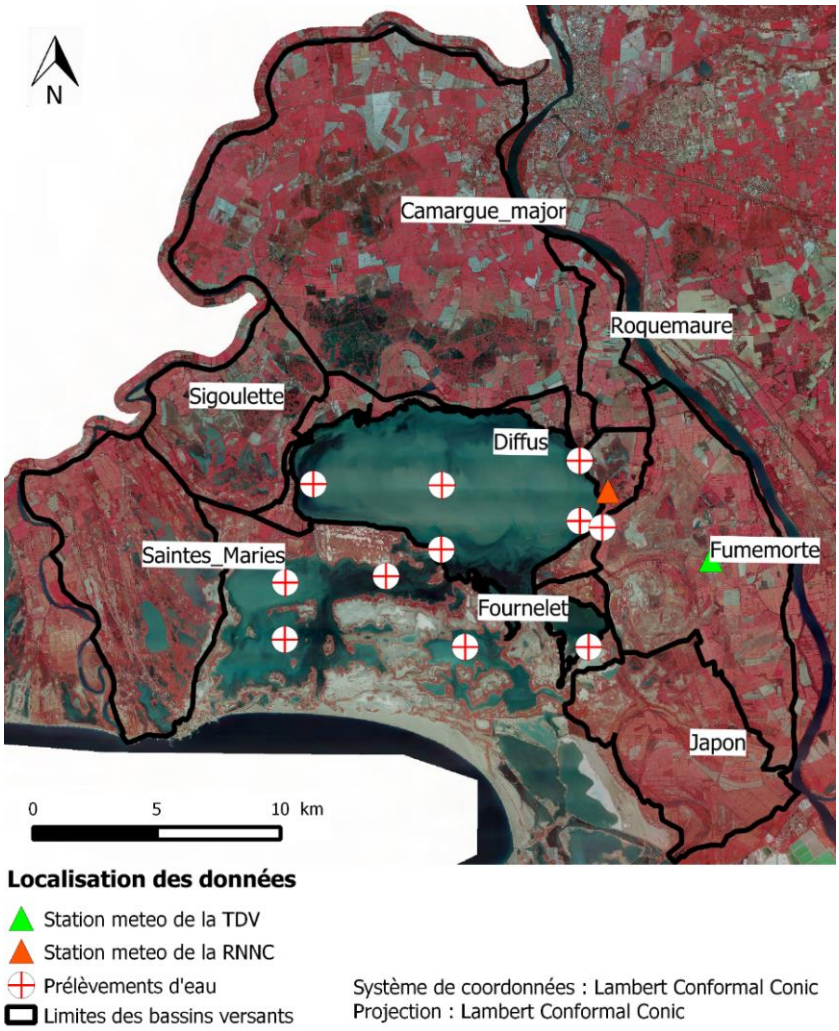


Figure 3: Points de prélèvements d'eau pour les échantillons d'isotopes stables et de conductivités ainsi que les stations météorologiques de la RNNC et TDV sur l'Île de Camargue.

Tous les échantillons ont été scellés dans des flacons ambrés afin d'éviter les échanges gazeux entre l'eau et l'air qui modifient les rapports isotopiques en Oxygène-18 et en Deutérium. Les échantillons provenant des étangs sont assimilables à des échantillons salins alors que les échantillons des canaux sont considérés comme des échantillons d'eaux douces. Tous les échantillons prélevés entre mai 2008 et mai 2009 avaient été analysés préalablement par Mme Vallet-Coulomb, par spectrométrie de masse. Dans le cadre de ce stage, des nouvelles analyses ont été réalisées par Mme Vallet-Coulomb et moi-même au CEREGE en utilisant un spectromètre laser. Un total de 100 échantillons a été analysé sur les eaux prélevées dans les canaux. Les échantillons provenant des étangs présentent des salinités importantes, et doivent être mesurés au spectromètre de masse. Cependant, en raison d'un problème technique, nous n'avons pas pu les analyser dans le cadre de ce travail.

D'après l'Agence Internationale de l'Energie Atomique (IAEA, 2001), les concentrations isotopiques se réfèrent généralement à celles d'un standard de référence. Elles sont exprimées en notation delta (δ) et définies comme l'écart relatif par rapport à une valeur standard.

Le standard internationalement reconnu pour l'hydrogène et l'oxygène est le « Vienna Standard Mean Ocean Water », V-SMOW.

$$\delta_{\frac{E}{R}} = \frac{R_{échantillon}}{R_{référence}} - 1 \qquad (6)$$

Où $R_{échantillon}$ et $R_{référence}$ représentent respectivement le rapport isotopique ($^2R = {}^2H/{}^1H$ et $^{18}R = {}^{18}O/{}^{16}O$) de l'échantillon et du standard. Les valeurs exprimées ainsi sont faibles, on les exprime donc en pour mille (‰). Une valeur δ positive signifie que l'échantillon contient plus d'isotopes lourds que le V-SMOW (il est enrichi) ; une valeur δ négative signifie que l'échantillon contient moins d'isotopes lourds que le V-SMOW (il est appauvri).

Les échantillons ont été analysés à l'aide d'un spectromètre laser Picarro WS-CRDS L1102-i en utilisant trois « standards internes » :

- Un standard très appauvri en Oxygène 18 (Prats = eau de fonte de neige),
- Un standard intermédiaire (Rob = eau de robinet)
- Un standard de composition proche de 0‰ (Carry = eau de Carry-le-Rouet).

Lors de ces mesures, les échantillons et les standards internes sont analysés avec un ordre propre au CEREGE afin de corriger la dérive de l'appareil de mesure et de calibrer tous les échantillons qui sont dupliqués. Le premier standard (Rob) va subir 20 injections dans le vaporisateur, puis chaque échantillon va être injecté 6 fois dans le vaporisateur. Seules les 3 dernières valeurs d'injection serviront aux traitements des données, les 3 premières servant à enlever l'effet mémoire de l'appareil.

Les données de conductivité électrique (σ) ont été mesurées au CEREGE par mes soins, avec un même conductimètre (WTW, TetraCon325/C). Elles sont exprimées en mS/cm.

4- Résultats isotopiques et de conductivité

Les isotopes de l'eau utilisés sont l'Oxygène-18 ($\delta^{18}O$) et le Deutérium (δ^2H). Ces espèces isotopiques sont considérés comme des traceurs conservatifs à l'exception des changements de phase (évaporation et condensation).

L'hydrologie de la Camargue est régie par les eaux provenant de l'irrigation, les précipitations, l'évaporation et les entrées/sorties d'eaux marines. Dans ce contexte 3 masses d'eau servent de référence, les eaux de la Mer Méditerranée, les eaux de pluies et l'eau du Rhône utilisée pour l'irrigation voir Tableau 2.

La composition de l'eau de mer utilisée est la moyenne de différents échantillons. La composition isotopique des pluies utilisée est la moyenne des précipitations entre 2008 et 2013 prélevées en Camargue, pondérée par les hauteurs de précipitations. L'ensemble de ces données de précipitations s'alignent le long d'une droite d'équation y= 7.6x + 6.4. Cette relation sera considérée comme la Droite Météorique Locale (DML). L'eau du canal de Aube de Bouic provient directement du Rhône et est utilisée pour l'irrigation gravitaire. Nous utiliserons les moyennes de composition isotopique en période d'irrigation allant de mai à octobre sur l'été 2011 comme référence.

Références	18O ‰	2H ‰	Conductivité mS/cm
Précipitations	-6.83 ± 3.74	-45.8 ± 30.2	0
Mer Méditerranée	1.10	8.46	56
Aube de Bouic 2011	-10.16 ± 0.32	-74.38 ± 2.8	0.59 ± 0.33

Tableau 2: Compositions isotopiques (en ‰) et conductimétries (en mS/cm) des masses d'eau de références (Précipitations, Mer Méditerranée et Aube de Bouic2011) avec leurs incertitudes associées.

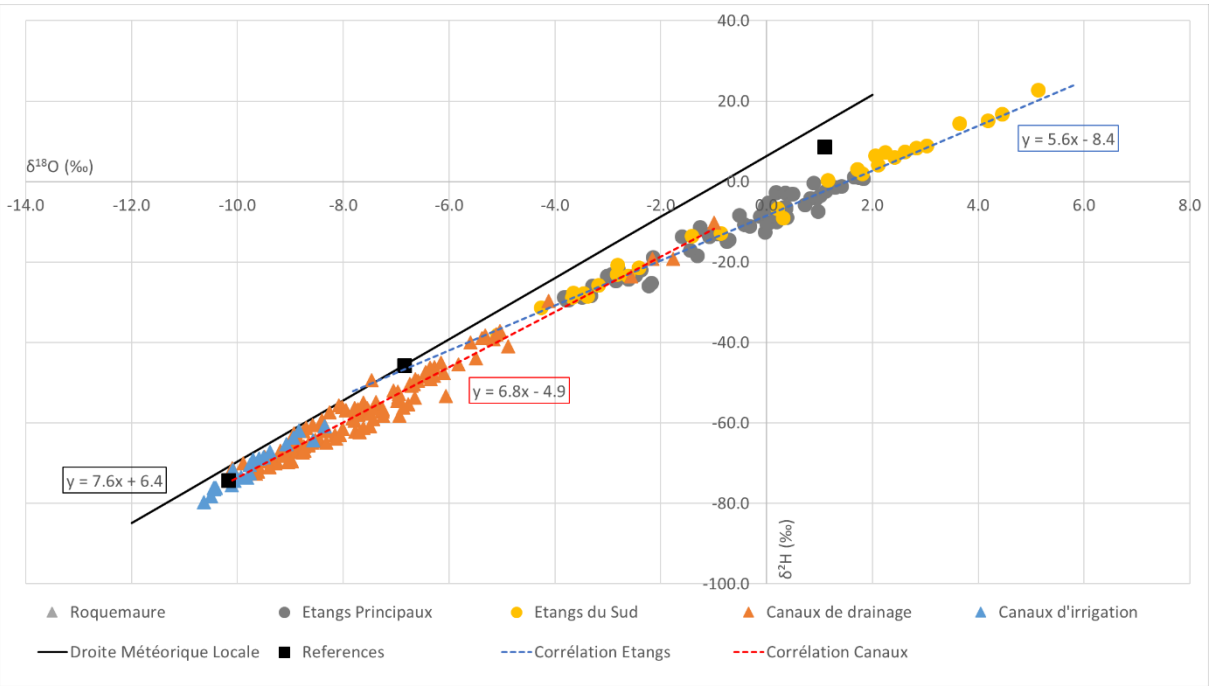


Figure 4: Compositions isotopiques Oxygène-18 ($\delta^{18}O$) en fonction du Deutérium ($\delta^{2}H$) du canal d'irrigation (Aube de Bouic), de la mer Méditerranée, des étangs principaux (Vaccarès Centre, Ouest, Est et Pointe de Mornès) et du Sud (Lion et Monro), des canaux de drainage (Fumemorte et Roquemaure) et de la droite météorique locale (DML) sur la période 2008-2013.

La Figure 4 correspond aux 4 masses d'eau qui alimente l'hydrosystème Vaccarès, le canal d'irrigation Aube de Bouic, les canaux de drainage (Fumemorte et Roquemaure), les étangs séparés en deux parties, les étangs principaux (Vaccarès Centre, Ouest, Est et Pointe de Mornès) et les étangs du Sud (Lion et Monro).

Elle permet de mettre en évidence que les deux masses canaux d'eau de drainage et étangs détiennent des compositions isotopiques distinctes l'une de l'autre. En effet, les étangs ont une composition isotopique comprises en $\delta^{18}O$ -4.0‰ et 6.0 ‰ et -35.0‰ et 25.0‰ en $\delta^{2}H$ contre -11.0‰ et -5.5‰ en $\delta^{18}O$ et -80.0‰ et -40.0‰ en $\delta^{2}H$ pour les canaux de drainage. Les étangs principaux qui ont une composition isotopique entre -4.0‰ et 2.0 ‰ en $\delta^{18}O$ et -35.0‰ et 5.0‰ en $\delta^{2}H$. Les étangs du sud avec une variabilité plus étendue allant de -4.0‰ et 6.0 ‰ en $\delta^{18}O$ et -35.0‰ et 25.0‰ en $\delta^{2}H$. Sur la Figure 4 est représentées plusieurs droites, la DML qui a pour équation y=7.6x +6.4, la corrélation des canaux y= 6.8x -4.9, la corrélation des étangs principaux y= 5.6x -8.4. La corrélation des étangs du Sud est peu différente de celle des étangs du Sud y= 5.6x -7.94.

4-1 Compositions isotopiques

Au total, 111 échantillons ont été analysés par la machine Picarro et tous ont été traités sous le logiciel R. Le résultat obtenu pour chaque échantillon est sa composition isotopique en $\delta^{18}O$ et en $\delta^{2}H$ avec leurs incertitudes associées.

L'analyse des compositions isotopiques des tableaux, est expliquée sur $\delta^{18}O$, puisque les différences observées sont identiques sur $\delta^{2}H$, puisque les deux sont corrélés.

4-1-1 Les canaux d'irrigation

Année	Type	Aube de Bouic	Roquemaure	Fumemorte
2008-2009	$\delta^{18}O$ ‰		**-8.29** ± 0.61	**-7.43** ± 1.08
	$\delta^{2}H$‰		**-60.32** ± 4.6	**-54.8** ± 7.0
	Nombre		n = 10	n = 21
2011-2012	$\delta^{18}O$ ‰	**-9.92** ± 0.40	**-8.73** ± 0.69	**-6.49** ± 1.55
	$\delta^{2}H$‰	**-72.8** ± 2.9	**-66.0** ± 4.3	**-49.9** ± 12.4
	Nombre	n = 13	n = 15	n = 23
2012-2013	$\delta^{18}O$ ‰	**-9.52** ± 0.56	**-8.44** ± 0.60	**-6.89** ± 1.50
	$\delta^{2}H$‰	**-69.5** ± 5.0	**-61.9** ± 4.7	**-53.6** ± 10.8
	Nombre	n = 17	n = 19	n = 21

Tableau 3: Compositions isotopiques $\delta^{18}O$ et $\delta^{2}H$ des moyennes annuelles (2008-2009,2011-2012, 2012-2013) des 3 canaux.

A partir du Tableau 3, on observe des compositions isotopiques moyennes peu différentes d'années en années. On observe que les canaux de drainage sont plus enrichis que le canal d'irrigation. Aussi, on remarque que le canal de Fumemorte est plus enrichi que le canal de Roquemaure. Comme observé précédemment le canal de Fumemorte détient le plus grand écart-type, ce qui peut provenir du fait du groupe de données plus proche des étangs.

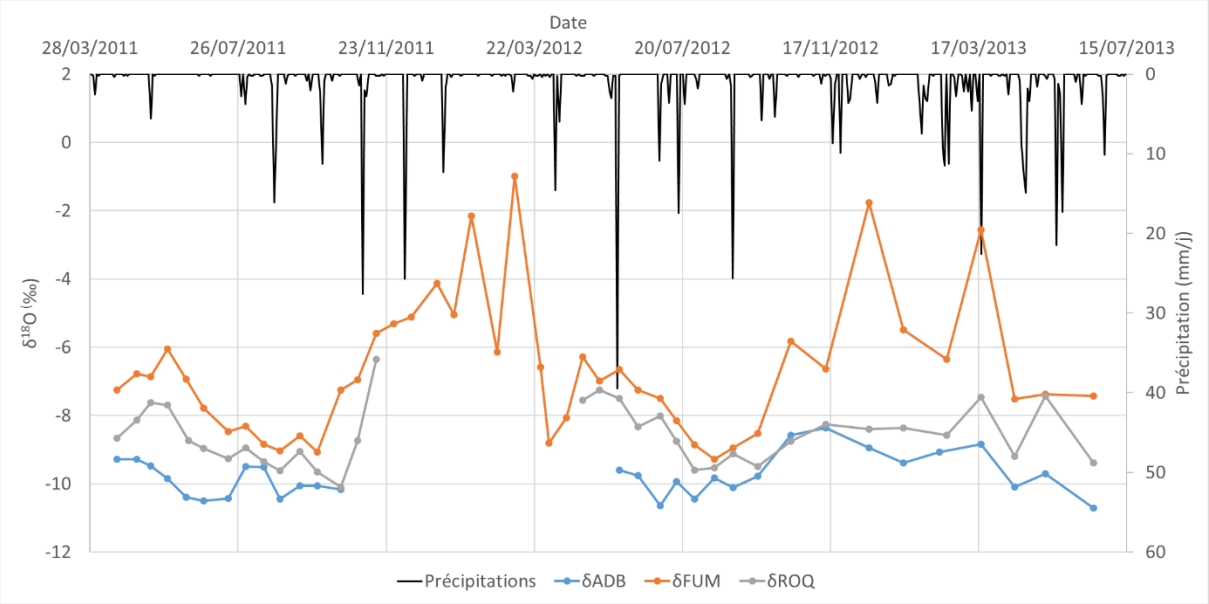


Figure 5 : Composition isotopique $\delta^{18}O$ des canaux Aube de Bouic (ADB), Fumemorte(FUM), Roquemaure (ROQ) et des Précipitations (P) en fonction du temps et des précipitations sur la période allant du 1er janvier 2012 au 20 juin 2013.

On remarque que les compositions isotopiques des canaux sont peu variables contrairement à celle des précipitations. La Figure 5 met en évidence que la variation de la composition isotopique des canaux rythmée par le cycle saisonnier. En effet, on remarque que la composition isotopique est appauvrie en été (période d'irrigation) par le mélange irrigation et enrichie en hiver avec les précipitations. Les compositions isotopiques des précipitations est également variable dans le temps.

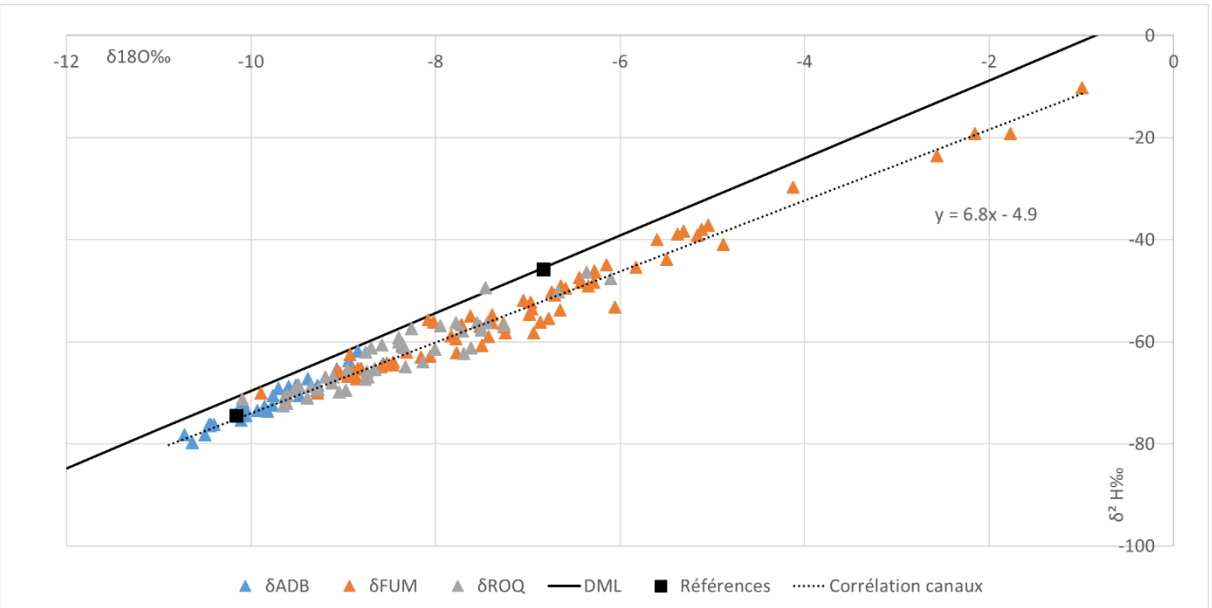


Figure 6 : Compositions isotopiques $\delta^{18}O$ en fonction de $\delta^{2}H$ des canaux Aube de Bouic, Roquemaure et Fumemorte sur la période 2008-2013. La droite météorique locale a pour équation y=7.6x + 6.4, la droite de corrélation des canaux de drainage a pour équation y= 6.8x – 4.9. La droite de corrélation du canal d'irrigation est y= 7.7x+5.2.

Sur la Figure 6, on constate un alignement des points suivants leurs points d'échantillonnage. Tous les points se situent au-dessous de la DML et ont une composition isotopique plus appauvris que les précipitations. A l'échelle interannuelle, les compositions isotopiques des canaux de drainage sont différentes d'une année à l'autre et ont une variabilité faible comme le canal d'irrigation. On observe que les échantillons Roquemaure et Fumemorte sont plus enrichis que le canal de Aube de Bouic.

Période d'irrigation	Type	Aube de Bouic	Roquemaure	Fumemorte
2008	$\delta^{18}O$ ‰		**-8.78** ± 0.60	**-7.86** ± 0.84
	$\delta^{2}H$‰		**-65.3** ± 3.7	**-58.1** ± 6.7
	Nombre		n = 4	n = 9
2011	$\delta^{18}O$ ‰	**-9.9** ± 0.42	**-8.81** ± 0.53	**-7.83** ± 0.89
	$\delta^{2}H$‰	**-72.7** ± 3.00	**-67.3** ± 3.1	**-60.9** ± 4.1
	Nombre	n = 12	n = 12	n = 12
2012	$\delta^{18}O$ ‰	**-10.01** ± 0.29	**-8.52** ± 0.79	**-7.94** ± 0.84
	$\delta^{2}H$‰	**-73.8** ± 2.5	**-64.1** ± 4.8	**-61.3** ± 5.1
	Nombre	n = 8	n = 10	n = 12

Tableau 4: Compositions isotopiques $\delta^{18}O$ et $\delta^{2}H$ moyennes en période d'irrigation (avril-septembre) pour les années 2008,2011 et 2012 des 3 canaux.

Période Hors irrigation	Type	Aube de Bouic	Roquemaure	Fumemorte
2008-2009	$\delta^{18}O$ ‰		**-7.96** ± 0.49	**-7.11** ± 1.03
	$\delta^{2}H$‰		**-57.0** ± 2.5	**-52.3** ± 6.0
	Nombre		n = 6	n = 12
2011-2012	$\delta^{18}O$ ‰	**-10.16** ± 0.0	**-8.40** ± 1.36	**-5.03** ± 1.42
	$\delta^{2}H$‰	**-74.1** ± 0.0	**-61.1** ± 9.9	**-37.9** ± 10.1
	Nombre	n = 1	n = 3	n = 11
2012-2013	$\delta^{18}O$ ‰	**-9.30** ± 06.0	**-8.43** ± 0.49	**-5.66** ± 1.59
	$\delta^{2}H$‰	**-66.9** ± 4.1	**-60.4** ± 4.2	**-44.6** ± 10.4
	Nombre	n = 9	n = 9	n = 9

Tableau 5: Compositions isotopiques $\delta^{18}O$ et δ^{2H} moyennes en période hors irrigation (octobre-mai) pour les années 2008-2009, 2011-2012,2012-2013 des 3 canaux.

A l'échelle saisonnière, Tableau 4 et Tableau 5 on observe un changement de composition isotopique entre la période d'irrigation et de non-irrigation. Le canal d'irrigation possède très peu de variation. La composition isotopique des canaux de drainage se rapproche du canal d'irrigation en période estivale. La période hors irrigation à une composition plus enrichie qui se rapproche des précipitations et à une variabilité forte. Cependant, leurs présences sous la DML montrent l'effet de l'évaporation.

4-1-1-2 Les étangs

Année	Type	Lion	Monro	Pointe Mornès	Vaccarès Centre	Vaccarès Est	Vaccarès Ouest	Etangs
2008-2009	$\delta^{18}O$ ‰	**-1.10** ± 2.46	**-0.26** ± 2.63	**-0.95** ± 1.80	**-1.19** ± 1.57	**-1.46** ± 1.33	**-0.94** ± 1.79	**-0.98** ± 0.27
	$\delta^{2}H$‰	**-14.4** ± 13.7	**-8.5** ± 15.3	**-13.2** ± 10.6	**-13.5** ± 9.5	**-16.1** ± 7.9	**-12.9** ± 10.0	**-13.1** ± 1.6
	Nombre	n= 12	n= 12	n= 12	n= 12	n= 11	n= 12	n= 6

Tableau 6: Compositions isotopiques $\delta^{18}O$ et $\delta^{2}H$ moyennes annuelles des étangs sur l'année 2008-2009.

Les étangs ont à l'échelle annuelle, des compositions isotopiques différentes suivant leur lieu de prélèvements. Les étangs sont très hétérogènes, les étangs du sud sont enrichis et les étangs principaux plus appauvris. L'étang de Monro et de Lion ont les compositions isotopiques les plus proche de la mer Méditerranée. Les étangs principaux Pointe de Mornès et Vaccarès Ouest sont proches entre eux mais différents de Vaccarès Centre et Est.

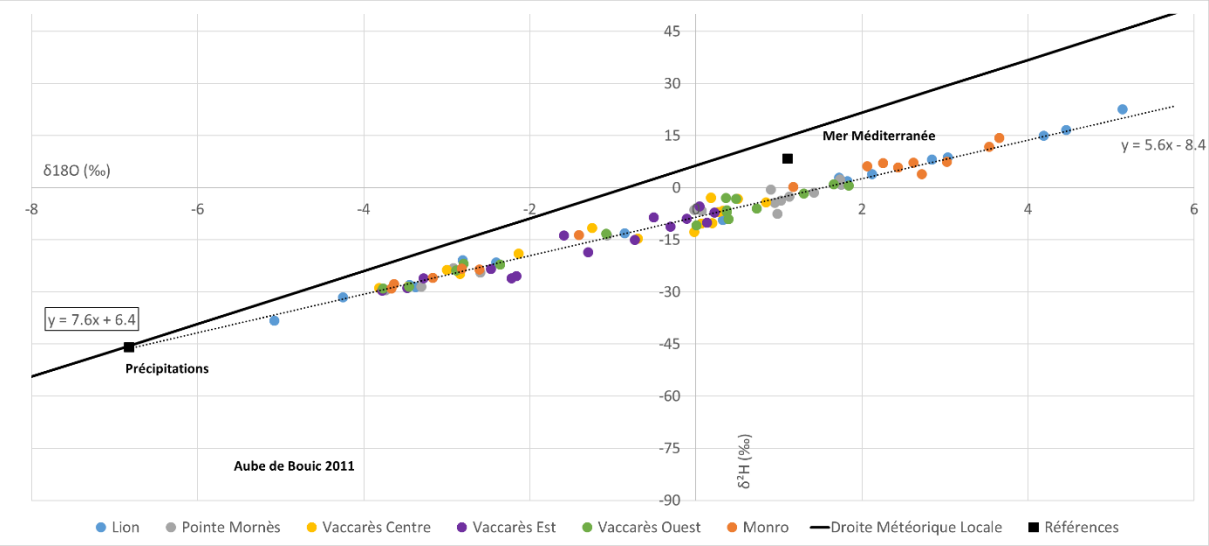


Figure 7: Compositions isotopiques $\delta^{18}O$ en fonction de $\delta^{2}H$ des étangs sur la période 2008-2013. En jaune Vaccarès Centre, en vert Vaccarès Ouest, en violet Vaccarès Est, en gris Pointe de Mornès, en bleu Lion et en orange Monro. La droite météorique locale a pour équation y=7.6x + 6.4 et la droite de corrélation des étangs a pour équation y= 5.6x – 8.4.

Sur la Figure 7, les étangs sont représentés en fonction de leurs localisations géographiques. On constate que suivant celles-ci les compositions isotopiques sont différentes. Ils prennent une large gamme de valeurs allant de -5.0‰ à 6.0‰ en $\delta^{18}O$ et de -40.0‰ à 20.0‰ en $\delta^{2}H$.

Globalement, les étangs s'alignent le long d'une droite de corrélation d'équation y= 5.6x -8.4 qui se situe sous la DML. Le point d'intersection de cette droite de corrélation se situe proche à la composition moyenne des pluies pondéré par les précipitations sur 2008-2009.

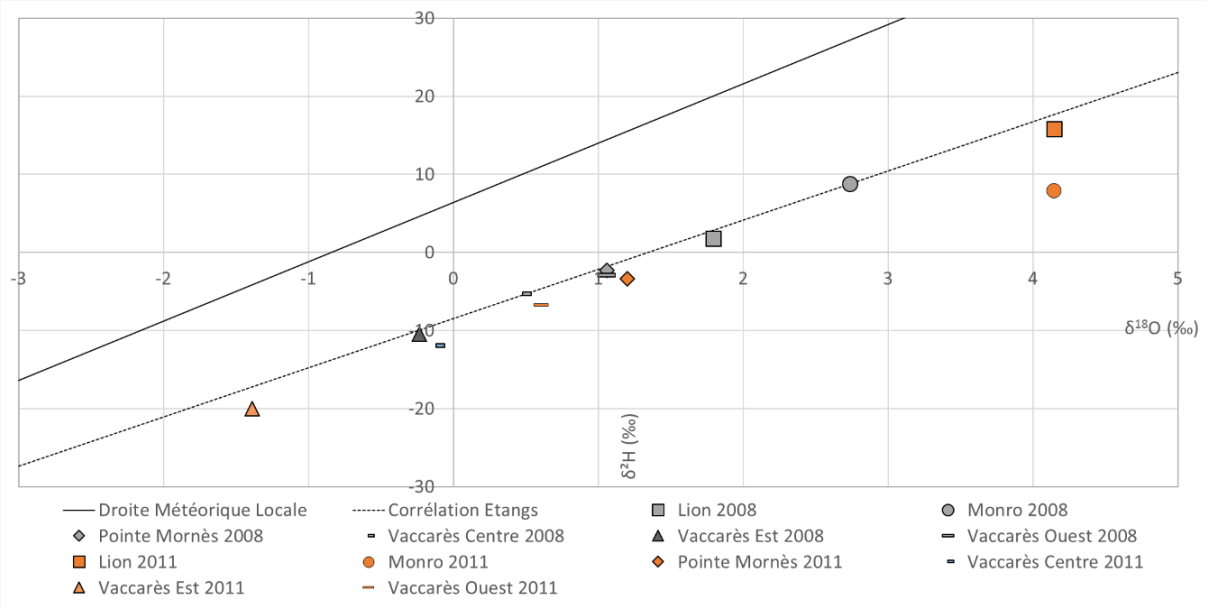


Figure 8: Compositions isotopiques de $\delta^{18}O$ en fonction de $\delta^{2}H$ moyennes en période d'Irrigation (avril-septembre) sur 2 années (2008 en gris et 2011 en orange), de la DML et de la droite de corrélation des étangs avec pour équation y= 5.5 x - 8.4. Les carrés représentent Lion, les ronds Monro, les losanges Pointe de Mornès, les petits trait Vaccarès Centre, les triangles Vaccarès Est, les grands traits Vaccarès Ouest.

La Figure 8, permet de mettre en évidence que les compositions isotopiques des étangs varient aussi à l'échelle interannuelle. Les deux périodes n'ont pas la même dispersion. La période de l'année 2008 s'étend de -2.0‰ à 4.5‰ en $\delta^{18}O$ et de -20.0‰ à 20.0‰ en $\delta^{2}H$ contre -1.0‰ à 3.5‰ en $\delta^{18}O$ et de -10.0‰ à 10.0‰ en $\delta^{2}H$ sur la période de 2011. La période d'irrigation de l'année 2008 détient 2 points avec des compositions isotopiques qui se confondent alors que sur l'année 2011 chaque étang à une composition qui lui est propre.

L'échantillon Vaccarès Ouest a une composition isotopique qui correspond à la moyenne de tous les échantillons pris sur le les étangs principaux. Il est donc pris comme référence pour l'étang Vaccarès.

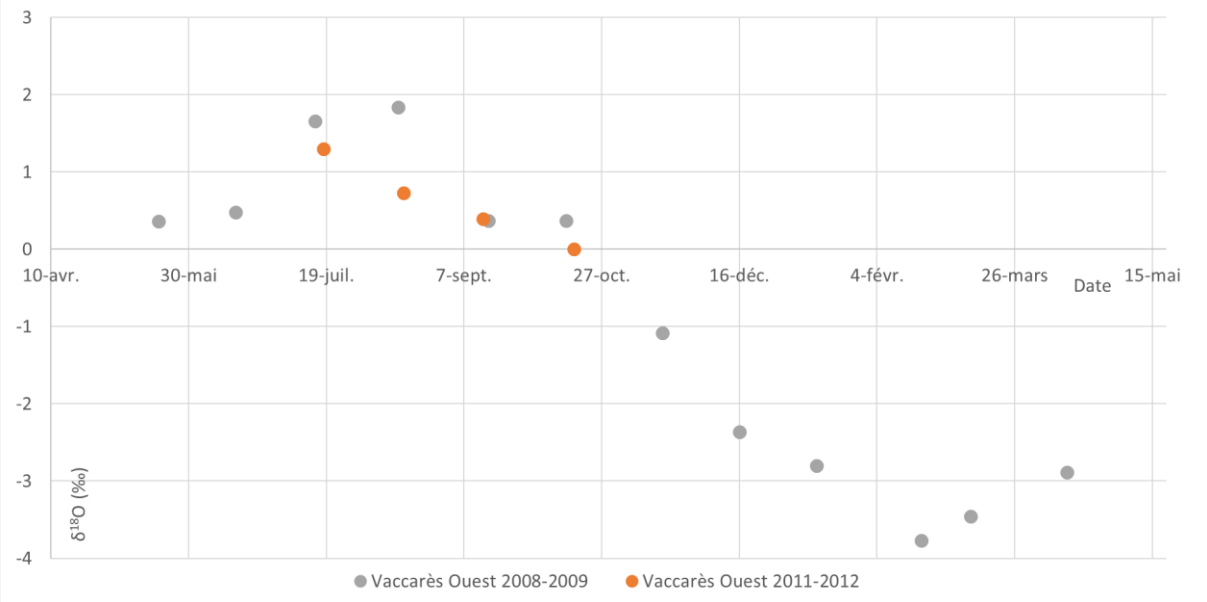


Figure 9: Comparaison de l'évolution de la composition isotopique en δ18O du Vaccarès Ouest en fonction du temps sur les années 2008-2009 et 2011-2012.

La composition en $\delta^{18}O$ évolue au cours du temps avec les processus impliquant les changements de phase. En effet, sur l'année 2008-2009 on remarque que les compositions isotopiques sont enrichies en

période d'irrigation et appauvrie en période hivernale. En plus de la variation annuelle la Figure 9 montre des variations à l'échelle interannuelle entre 2008-2009 et 2011-2012. Actuellement on ne peut comparer que sur une période de 4 mois allant de juillet à octobre où on constate que la composition est différente, l'année 2011-2012 étant plus appauvrie.

Période d'irrigation	Type	Lion	Monro	Pointe Mornès	Vaccarès Centre	Vaccarès Est	Vaccarès Ouest	Etangs
2008	$\delta^{18}O$ ‰	**1.80** ± 0.78	**2.74** ± 0.46	**1.06** ± 0.52	**0.48** ± 0.19	**-0.23** ± 0.29	**1.06** ± 0.69	**1.15** ± 0.74
	$\delta^{2}H$‰	**1.7** ± 5.4	**8.7** ± 2.9	**-2.3** ± 2.8	**-5.3** ± 1.6	**-10.5** ± 2.6	**-2.9** ± 3.8	**-1.8** ± 4.6
	Nombre	n= 4	n= 4	n= 4	n= 4	n= 4	n= 4	n= 6
2011	$\delta^{18}O$ ‰	**4.15** ± 0.66	**3.09** ± 0.29	**1.20** ± 0.28	**-0.12** ± 0.29	**-1.39** ± 0.80	**0.61** ± 0.41	**1.26** ± 1.58
	$\delta^{2}H$‰	**15.7** ± 4.0	**7.8** ± 2.7	**-3.4** ± 2.5	**-11.9** ± 1.7	**-20.0** ± 5.7	**-6.8** ± 3.1	**-3.1** ± 9.9
	Nombre	n= 4	n= 3	n= 4	n= 4	n= 4	n= 4	n= 6

Tableau 7: Compositions isotopiques en $\delta^{18}O$ et en $\delta^{2}H$ moyennes en période d'irrigation (avril-septembre) des étangs sur les périodes d'irrigation 2008 et 2011.

Le Tableau 7 concerne les périodes d'irrigation seulement. Pour l'année 2011, les échantillons Pointe de Mornès et Vaccarès Ouest ont des compositions isotopiques très différentes alors qu'en 2008, elles sont identiques. Durant les deux années, le Vaccarès Est est plus influencé par l'eau des canaux de drainage que les autres échantillons du Vaccarès et les échantillons Lion et Monro détiennent les compositions isotopiques les plus enrichies.

4-1-2-Conductivité

La conductivité électrique est très différente sur les deux types de masses d'eau. A l'échelle interannuelle, les étangs ont des conductivités variables alors que les canaux ont des conductivités plus homogènes. Pour les étangs, la conductivité peut varier entre 20 et 65 mS/cm alors que celle des canaux d'irrigation varie entre 0.3 et 7 mS/cm au cours du temps.

4-1-2-1 Les canaux d'irrigation

Année	Type	Aube de Bouic	Roquemaure	Fumemorte
2008-2009	σ mS/cm		**0.56** ± 0.02	**1.16** ± 0.61
	Nombre		n= 3	n= 12
2011-2012	σ mS/cm	**0.62** ± 0.21	**0.88** ± 0.38	**3.91** ± 3.54
	Nombre	n= 13	n= 15	n= 23
2012-2013	σ mS/cm	**0.41** ± 0.03	**0.93** ± 0.62	**3.80** ± 4.07
	Nombre	n= 17	n= 19	n= 21

Tableau 8: Conductivités moyennes annuelles des 3 canaux d'irrigation sur les années 2008-2009, 2011-2012 et 2012-2013.

La conductivité du canal d'irrigation est aux alentours de 0.5 mS/cm sur les années 2011-2012 et 2012-2013. La conductivité des canaux de drainage est plus élevée. De plus, on distingue que Fumemorte à une conductivité plus élevé que Roquemaure. Il est possible de classer les conductivités des canaux du plus faible au plus fort : Aube de Bouic, Roquemaure et Fumemorte.

Le Tableau 8 met en évidence une conductivité moyenne annuelle des canaux de drainage variable, comme dans le cas de Fumemorte où la conductivité a doublé entre 2008-2009 et 2012-2013. Ce phénomène peut être dû aux conditions météorologiques ou à l'influence de quelques échantillons très salés (remontée saline dans le canal).

Période d'irrigation	Type	Aube de Bouic	Roquemaure	Fumemorte
2008	σ mS/cm		**0.56** ± 0.02	**0.61** ± 0.15
	Nombre		n = 3	n = 6
2011	σ mS/cm	**0.63** ± 0.22	**0.73** ± 0.19	**1.17** ± 0.34
	Nombre	n = 12	n = 12	n = 12
2012	σ mS/cm	**0.42** ± 0.03	**0.78** ± 0.12	**0.51** ± 0.04
	Nombre	n = 8	n = 10	n = 12

Tableau 9: Conductivités électriques moyennes des 3 canaux sur les périodes d'irrigation de 2008, 2011 et 2012.

Période Hors irrigation	Type	Aube de Bouic	Roquemaure	Fumemorte
2008-2009	σ mS/cm			**1.72** ± 0.48
	Nombre			n= 6
2011-2012	σ mS/cm	**0.46** ± 0.00	**1.51** ± 0.59	**6.9** ± 5.34
	Nombre	n= 1	n= 3	n= 11
2012-2013	σ mS/cm	**0.41** ± 0.03	**1.33** ± 0.77	**6.98** ± 5.87
	Nombre	n= 9	n= 9	n= 9

Tableau 10: Conductivités électriques moyennes des 3 canaux sur les périodes Hors irrigation des années 2008-2009,2011-2012 et 2012-2013.

Les Tableau 9 et Tableau 10, recensent les deux périodes saisonnières des 3 canaux et leurs conductivités électriques. Si on observe le canal de Fumemorte, on constate que sur les 3 années, la conductivité électrique est plus forte en période hivernale qu'en période estivale. En 2011 et 2012, le contraste entre les canaux de drainage se distingue, Fumemorte à la plus forte conductivité. La conductivité électrique du canal d'irrigation reste constante d'année en année.

4-1-2-2 Les étangs

Année	Type	Lion	Monro	Pointe Mornès	Vaccarès Centre	Vaccarès Est	Vaccarès Ouest	Etangs
2008-2009	σ mS/cm	**42.34** ± 10.92	**49.06** ± 12.66	**38.01** ± 5.21	**36.4** ± 4.10	**35.33** ± 2.83	**37.26** ± 4.74	**39.73** ± 3.98
Période d'irrigation	**Type**	**Lion**	**Monro**	**Pointe Mornès**	**Vaccarès Centre**	**Vaccarès Est**	**Vaccarès Ouest**	**Etangs**
2008	σ mS/cm	**56.68** ± 8.83	**64.58** ± 7.81	**43.70** ± 1.35	**39.90** ± 0.60	**37.20** ± 1.65	**41.90** ± 2.80	**47.33** ± 8.87
2011	σ mS/cm	**56.50** ± 3.70	**39.60** ± 1.27	**27.08** ± 2.33	**21.97** ± 1.03	**19.29** ± 1.96	**24.30** ± 1.75	**31.46** ± 11.06

Tableau 11: Conductivités électriques moyennes sur les étangs de l'hydrosystème Vaccarès à l'échelle annuelle (2008-2009) et interannuelle (2008 et 2011).

A l'échelle annuelle, on constate des différences de conductivités suivants les étangs observés. On remarque que l'étang de Monro détient la plus forte conductivité électrique, suivi de l'étang du Lion. On observe que les secteurs Pointe de Mornès, Vaccarès Centre, Est et Ouest ont des conductivités plus faibles et proches. L'échantillon Vaccarès Est à la conductivité la plus faible.

A l'échelle interannuelle, on s'aperçoit que l'année 2011 à une conductivité plus faible. L'étang du Lion reste constant alors que les autres étangs diminuent fortement. Cette forte baisse peut s'expliquer par le fait que les canaux d'irrigation drainent plus d'eau avec des conditions météorologiques différentes. En effet, plus de précipitations sont tombés entre juillet et octobre 2011 qu'entre ces mêmes périodes en 2008.

4-1-3 Isotopes VS Conductivités

L'intérêt de coupler les compositions isotopiques avec les conductivités électriques des eaux est de différencier les phénomènes hydrologiques. Le premier phénomène est l'évaporation, le second est l'effet d'intrusion saline avec le mélange marin.

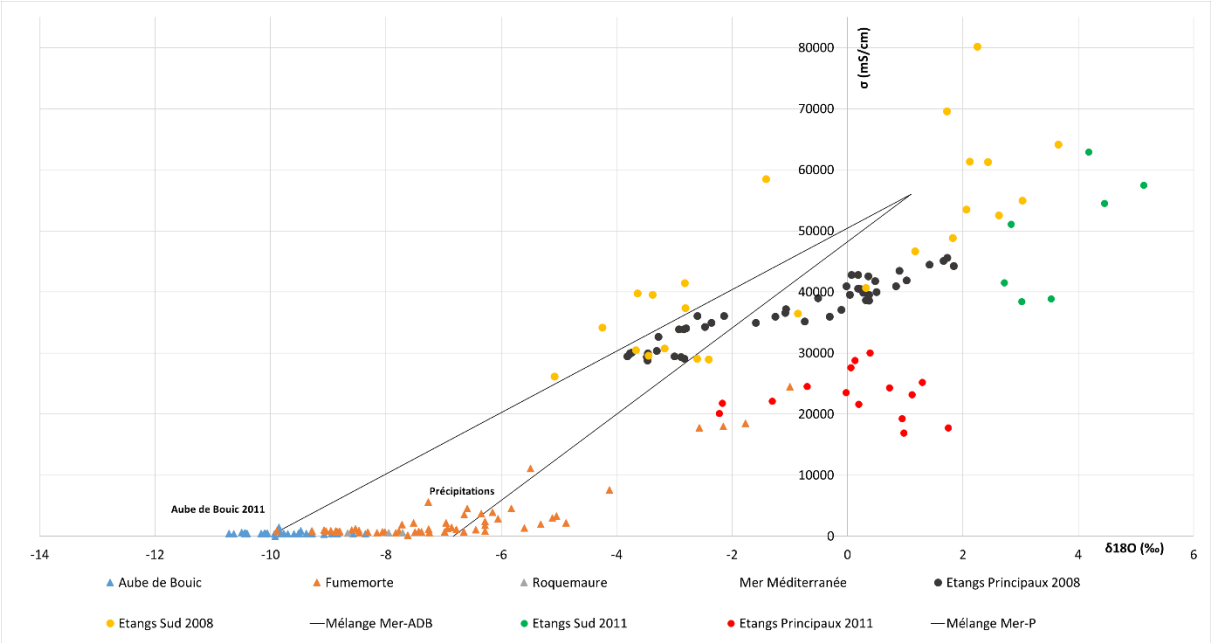


Figure 10: Compositions isotopiques en Oxygène- 18 ($\delta^{18}O$) en fonction de la conductivité électrique (σ) du canal d'irrigation (Aube de Bouic), de la mer Méditerranée, des étangs principal (Vaccarès Centre, Ouest, Est et Pointe de Mornès) et du Sud (Lion et Monro), des canaux de drainage (Fumemorte et Roquemaure) et des droites des mélange (entre Aube de Bouic 2011 et la mer Méditerranée ; Précipitations et la mer Méditerranée) sur les périodes 2008 et 2011.

L'eau des canaux d'irrigation et de drainage sont peu influencés par les précipitations. On constate que les canaux de drainage s'alignent en dessous de la droite de mélange (Aube de Bouic et Mer Méditerranée). Ils ont une grande variabilité en $\delta^{18}O$ contrairement à la conductivité qui reste constante.

L'eau des étangs correspond à un mélange d'eau plus influencée par la mer Méditerranée. Les étangs sont séparés en deux, les étangs principaux et les étangs du Sud. On constate que les étangs principaux ont deux distributions alors que les étangs du sud s'alignent raisonnablement. Les deux distributions des étangs principaux mettent en évidence la variabilité interannuelle des compositions isotopiques. En effet, en 2011 les étangs principaux sont nettement en dessous de la droite de mélange et beaucoup moins salés.

D'une manière générale, tous les échantillons en dessous de la droite de mélange mettent en évidence un enrichissement isotopique. Ceci implique une contribution de l'évaporation en plus du mélange des eaux.

Les données présentent des compositions isotopiques et des conductivités qui témoignent d'un mélange eau douce (Rhône et Précipitations) et de l'eau de mer (Figure 10). Cependant, le non-alignement des compositions isotopiques traduit l'effet évaporatoire qui enrichit isotopiquement les étangs.

Les différentes eaux des canaux s'alignent peu importe la période hydrologique. On constate que tous les points se situent près du pôle Aube de Bouic 2011 et sont tous en dessous de la droite de mélange. Cela traduit que les eaux de canaux viennent essentiellement de l'eau d'irrigation et qu'ils ne subissent pas l'influence d'une salinisation par mélange avec de l'eau de mer. Deux points font exception à 7 mS/cm durant la période de non irrigation en 2011 et 2012.

Les étangs ont un mélange d'eau différent suivant les années. En effet, l'année 2008 a une composition chimique qui indique une majorité d'eau provenant de la mer Méditerranée. Cependant, les deux périodes ont la même tendance ce qui traduit qu'elles subissent les mêmes phénomènes.

4-1-4 Discussion

4-1-4-1 Les canaux d'irrigation

Les compositions isotopiques des 2 canaux de drainage sont proches de la composition isotopique moyenne de Aube de Bouic sur l'été 2011. Il est possible tout de même possible d'effectuer un classement des canaux du plus appauvri au plus enrichi en isotopes : Aube de Bouic, Roquemaure et Fumemorte.

Globalement, les compositions géochimiques des canaux sont peu variables au cours du temps. Les canaux de l'Aube de Bouic et de Roquemaure subissent uniquement le phénomène évaporatoire. Au contraire, le canal de Fumemorte subit le phénomène évaporatoire et un mélange avec de l'eau salée provenant des étangs. En effet, des valeurs supérieures à 5 mS/cm sont observées fin 2012 période où la RNNC a constaté la rupture du barrage anti-sel.

4-1-4-2 Les étangs

Les échantillons Vaccarès Centre, Vaccarès Est, Vaccarès Ouest et Pointe de Mornès présentent des différences de compositions isotopiques allant de -2.0 à 0.5 en $\delta^{18}O$ et de -25.0 à -10 en $\delta^{2}H$. La simplification de considérer l'étang du Vaccarès comme une seule masse d'eau dans le modèle conceptuel entraine des incertitudes qui seront discutées. En effet, Vaccarès Centre, Vaccarès Est, Vaccarès Ouest et Pointe de Mornès vont réagir différemment aux apports des excédents d'irrigation provenant des bassins versants.

L'hydrologie de Lion est régie par les précipitations et ne reçoit aucune eau de drainage. L'eau présente en hiver s'évapore et donne des compositions isotopiques très variables, allant de -5.0 à 5.0 en $\delta^{18}O$ et de -40.0 à 20 en $\delta^{2}H$. L'échantillon du Lion a une conductivité très forte en période estivale qui traduit l'asséchement du fait de l'évaporation.

L'étang de Monro présente des variations de caractéristiques géochimiques plus aléatoires, c'est une zone tampon entre la mer Méditerranée et l'étang Vaccarès et subit les mouvements des masses d'eau induit par les vents.

4-1-4-3 Conclusion globale

On remarque que les outils géochimiques (isotopes stables et conductivité électrique) se complètent. Ils ne sont pas contrôlés par les mêmes facteurs. La combinaison des méthodes doit donc permettre de mettre en évidence les différents facteurs agissant sur le système. Les isotopes stables vont mettre en évidence un enrichissement de la composition isotopique mais ne permettent pas d'en définir la cause (évaporation ou échanges marins). La conductivité va combler cette incertitude et permet d'identifier les échanges marins.

Le canal Aube de Bouic correspond au canal d'irrigation associée au Rhône, Fumemorte et Roquemaure sont des eaux passées dans le système agricole et correspondent à des canaux de drainages. Plusieurs facteurs les influencent avec les précipitations et l'évaporation. Les 3 canaux ne possèdent pas la même part d'eau de pluies, le canal le plus influencée est Fumemorte. Les canaux ont un gradient d'évaporation entre le canal d'irrigation et les eaux de drainage. La conductivité électrique des 3 canaux augmente une fois la période estivale terminée. Le canal de l'Aube de Bouic est caractérisé par l'eau du Rhône, l'eau de Roquemaure par les eaux d'irrigation, l'eau du canal de Fumemorte par les eaux des précipitations.

5- Modèle de bilan hydro-isotopique

5-1 Estimation des flux provenant du bassin versant du Vaccarès

5-1-1 Description générale des écoulements

5-1-1-1 Artificialisation des écoulements

La Camargue est une région très artificialisée. L'île de Camargue possède un très grand réseau hydraulique qui lui permet de gérer les eaux de ses bassins versants. En effet, les écoulements d'eau

sont principalement dus aux systèmes d'irrigation. Les eaux d'irrigation proviennent du Rhône et alimentent les surfaces agricoles, principalement les rizières. Seuls deux canaux, Fumemorte et Roquemaure, alimentent le Vaccarès. Ces deux canaux drainent des bassins versants incluant de nombreuses rizières irriguées par les eaux du Rhône, voir Figure 11. Dans l'île de Camargue, d'autres surfaces sont drainées en direction du Rhône, et ne contribuent donc pas au bilan d'eau du Vaccarès. En dehors des bassins versants de Fumemorte et Roquemaure, il existe également des surfaces situées à proximités de l'étang et qui s'écoulent vers le Vaccarès malgré l'absence d'un drainage organisé. Ces surfaces seront désignées par le terme « bassin versant diffus ».

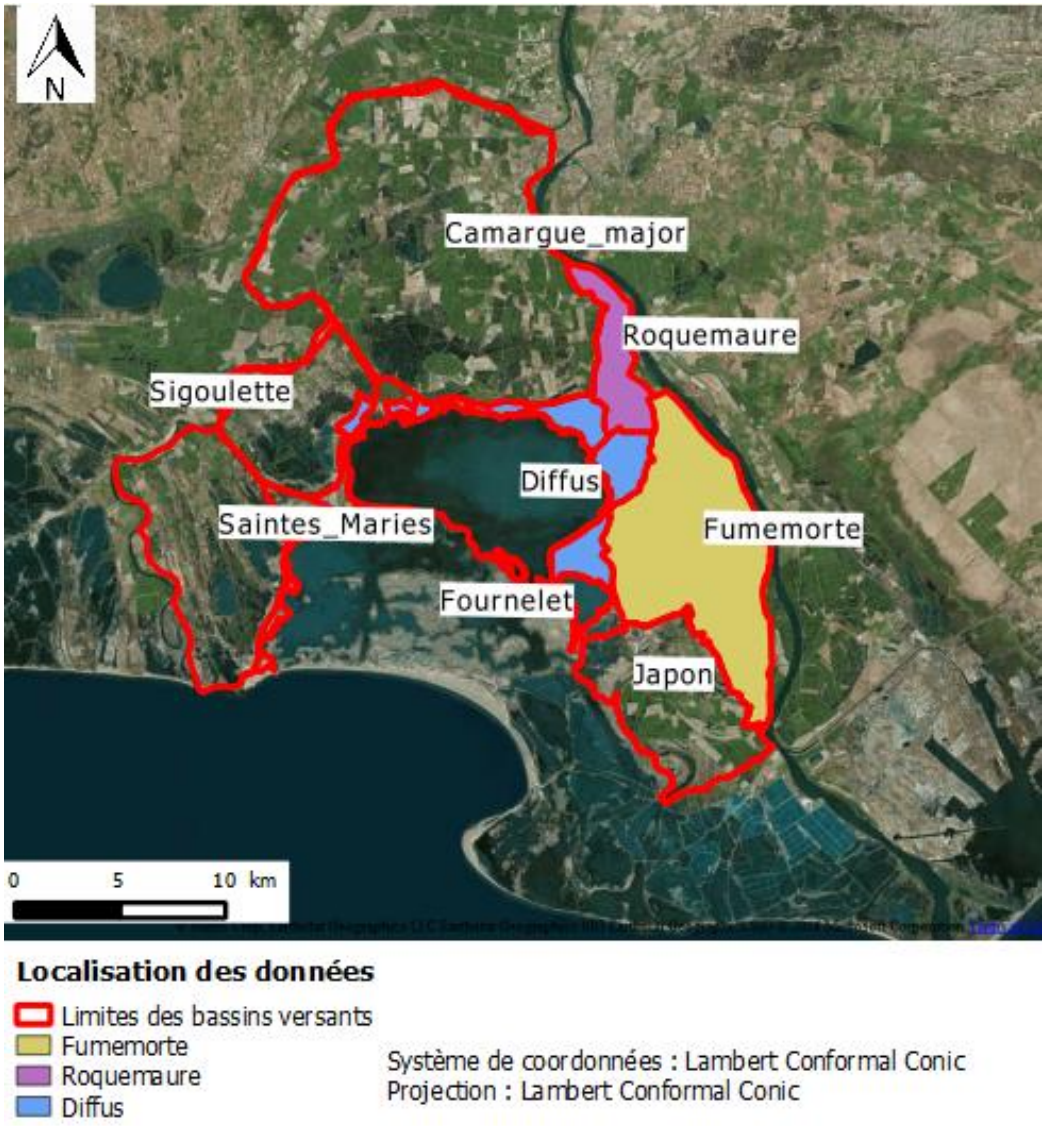


Figure 11: Localisation des bassins versants de l'Île de Camargue. En couleurs sont représentés les bassins versants pri en compte dans le modèle de bilan hydro-isotopique.

Les excédents d'irrigation importants en période estivale permettent de maintenir le niveau du Vaccarès assez haut et permettent à l'eau de s'écouler et de sortir vers les étangs du Sud. Il est donc important de déterminer ces flux, ainsi que les écoulements « naturels » dus aux précipitations, afin de contraindre le bilan hydrologique du Vaccarès.

5-1-1-2 Pratiques d'irrigation

Les pratiques agricoles de cette région sont complexes et difficiles à prévoir à une échelle globale. En effet, les pratiques agricoles ne sont pas réglementées, chaque parcelle est gérée indépendamment l'une de l'autre. Cependant, les parcelles sont reliées par des martelières, si celles-ci sont ouvertes en amont, l'eau se retrouve par écoulement gravitaire dans les parcelles en aval. La production d'eau de drainage sera différente selon la position géographique de la rizière dans le bassin versant. Elle dépend

aussi de la date de la première mise en eau. En ce qui concerne la culture du riz, les eaux d'irrigation introduites sont renouvelées plusieurs fois durant la période estivale. Ces eaux sont dues aux vidanges volontaires des agriculteurs, et vont s'écouler vers l'étang du Vaccarès.

5-1-1-3 Débit du canal de Fumemorte

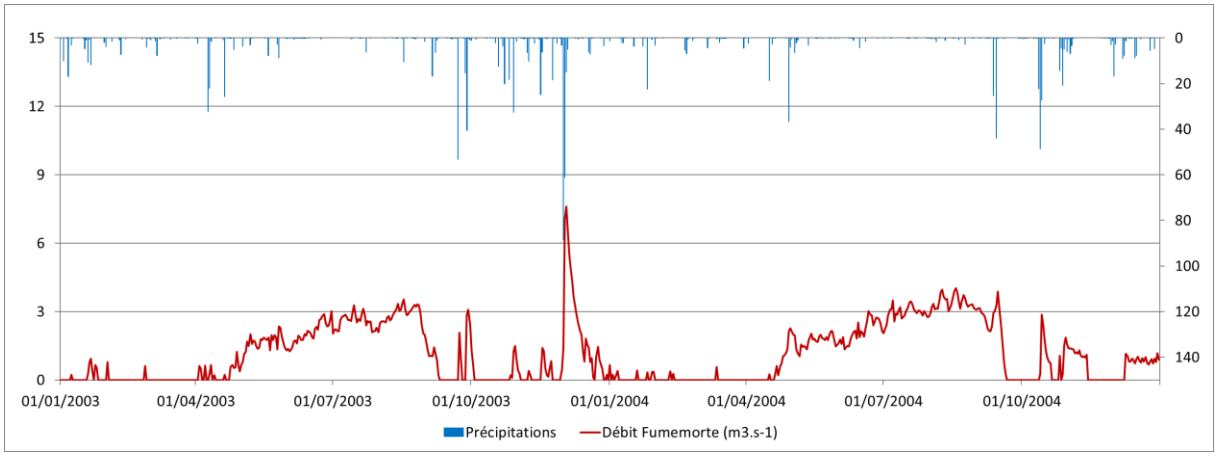


Figure 12 : Précipitations (en mm) et débit (en m^3/s) en fonction du temps sur le bassin versant de Fumemorte sur la période allant du 01/01/2003 au 31/12/2004.

Un débitmètre à ultra-sons a été mis en place et géré par la Tour du Valat sur le canal de Fumemorte, proche de son exutoire vers l'étang. Il est tombé en panne début 2008, et n'a pas pu être remplacé. Les données disponibles sur le bassin versant de Fumemorte s'étendent de 1993 à 2007. La Figure 12 est un extrait des données disponibles. Dessus, on remarque clairement que le débit possède deux périodes distinctes. La première période, correspond à un débit relativement fort de l'ordre de $2.5 m^3/s$ et s'étend sur les mois allant d'avril à octobre. La seconde période, est comprise entre octobre et avril où le débit se trouve en moyenne de $0.5\ m^3/s$ et s'intensifie lors des précipitations. On peut dire que la première période correspond à la saison estivale, qui est contrôlée par les excédents d'irrigation, et la seconde à la saison hivernale qui est contrôlée par les précipitations.

Pour pouvoir extrapoler les débits du canal après 2008, un modèle pluies-débit avait été utilisé par la TDV, combiné avec une estimation des excédents d'irrigation. Nous avons repris la démarche, afin de pouvoir reconstituer les écoulements et les intégrer à notre modèle de bilan hydrologique.

5-1-2-Méthodologie

Le premier objectif est de simuler le débit du canal de Fumemorte, en nous appuyant sur les données disponibles qui s'étendent de 1993 à 2007, afin de pouvoir grâce au modèle extrapoler les données manquantes de 2008 à 2013.

On considère que le débit qui s'écoule dans le canal de Fumemorte (Q, en m^3/s) est égal au débit « naturel », provoqué par les précipitations sur le bassin versant (Q_n, en m^3/s), plus le débit correspondant aux excédents d'irrigation (Q_i, en m^3/s). On utilisera un modèle pluie-débit pour simuler Q_n. Les excédents d'irrigation seront ensuite déterminés par différence entre le débit mesuré et Q_n simulé, et on s'appuiera sur leur variabilité durant la période instrumentale (1993-2007) pour les simuler après 2008.

Le second objectif est d'estimer les débits du canal de Roquemaure et des « bassins versants diffus » qui ne possèdent aucunes données instrumentales. Pour ce faire, on s'appuiera sur une comparaison des surfaces irriguées et des surfaces totales de chaque bassin versant.

Le troisième objectif sera d'intégrer les données sur la composition isotopiques de ces écoulements afin de mieux les contraindre.

5-1-3 Modélisation de la relation pluie-débit sur le bassin de Fumemorte

5-1-3-1 Méthodologie

Un modèle pluie-débit permet de modéliser la réponse des écoulements dans un bassin versant en réponse aux paramètres climatiques (précipitation, évapotranspiration potentielle). Nous avons utilisé le modèle empirique global GR4J (modèle du Génie Rural à 4 paramètres Journalier) décrit par Perrin et al., (2003), et dans lequel quatre paramètres sont à caler, voir Figure 13.

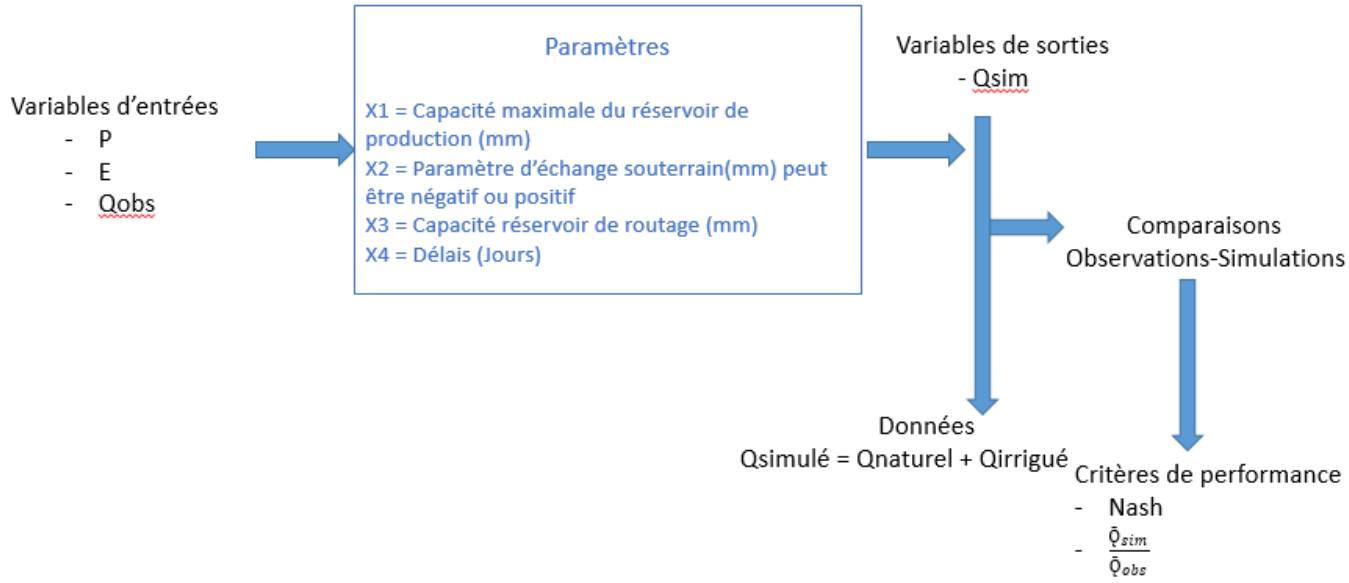


Figure 13 : Schéma simplifié du modèle Génie Rural à 4 paramètres Journalier

Pour calibrer et valider le modèle, on s'appuie sur les périodes hors irrigation, pour lesquelles on suppose que $Q=Q_n$, c'est à dire les périodes hivernales. En nous appuyant sur l'analyse des débits mesurés, et sur les informations données par Yves Chérain à la RNNC, cette période est définie comme allant du 1er octobre au 7 avril pour chaque année. Durant ces périodes, le débit du canal de Fumemorte est déterminé uniquement par les phénomènes climatiques.

Les données disponibles vont de 1993 à 2007, nous avons donc 14 années de mesures expérimentales de débit. Pour avoir des résultats les plus représentatifs possibles de l'ensemble de la période, nous avons choisi d'utiliser 7 années pour la calibration et 7 années pour la validation, réparties sur l'ensemble de la période. Les résultats des simulations sont disponibles en Annexe 2. On fabrique donc deux séries temporelles en intercalant une année sur deux pour la calibration, et pour la validation :

- Les 7 hivers de calibrations sont : 1993-1994, 1995-1996, 1997-1998, 1999-2000, 2001-2002, 2003-2004, 2005-2006.
- Les 7 hivers de validation sont : 1994-1995, 1996-1997, 1998-1999, 2000-2001,2002-2003,2004-2005,2006-2007.

La simulation est appliquée en tenant compte de la surface totale du bassin versant du Fumemorte soit $67 * 10^6 m^2$. Il faut signaler que cette surface totale comprend des zones de marais, qui peuvent constituer des zones de rétention dans lesquelles l'eau s'évapore sans rejoindre le Vaccarès. En revanche, comme ces étangs sont drainés vers le Vaccarès en période de forte pluie, il nous est apparu nécessaire de les prendre en compte dans la surface du bassin versant. Ce point sera discuté plus tard. Les critères de performances appliqués dans ce modèle sont le critère de Nash-Sutcliffe (égal à $1 - \frac{\sum(Q_{obs}-Q_{sim})^2}{\sum(Q_{obs}-\bar{Q}_{obs})^2}$) classiquement utilisé dans les modèles pluie-débit, et un critère basé sur le volume simulé, qui nous est apparu important pour notre objectif de bilan hydrologique : $\frac{\bar{Q}_{sim}}{\bar{Q}_{obs}}$. Ces deux

critères doivent être le plus proche possible de 1. Le critère Nash-Sutcliffe est compris entre -∞ et 1, où une valeur 1 correspond à une corrélation parfaite entre les valeurs observées celles simulées.

5-1-3-2 Résultats et discussion

Lors de l'exercice de calibration-validation, qui a été fait manuellement, il est apparu qu'il y avait de grandes différences de performances entre calibration et validation. J'ai donc finalement effectué la calibration en tenant compte également des critères de performances correspondant à la période de validation.

La Figure 13 récence les paramètres utilisés ainsi que leurs résultats aux différentes étapes. La première étape est celle de calibration, elle est suivie par l'étape de validation du modèle. Pour finir nous avons regardé la réaction du modèle et des performances sur les deux jeux de données combinées nommée « Période hivernale 14 ans ».

Paramètres	Modèle GR4J		
Périodes	Hors irrigation (1 octobre – 7 avril)		
X1	25		
X2	-5		
X3	300		
X4	1.7		
Etapes	« Calibration » 7 ans	« Validation » 7 ans	Période totale 14 ans
Nash	-1.813	0.989	0.987
$\frac{\bar{Q}_{sim}}{\bar{Q}_{obs}}$	1.091	0.94	1.056

Tableau 12 : Critères de performance sur les étapes de calibration, de validation et sur la période totale avec les paramètres fixes du modèle GR4J sur le bassin de Fumemorte.

Sur le Tableau 12, il est possible de constater que l'erreur du modèle sur le critère $\frac{\bar{Q}_{sim}}{\bar{Q}_{obs}}$ est inférieure à 10 %. Cette erreur est considérée comme faible pour un modèle pluie-débit représentant un système complexe tel que celui-ci. Le détail année par année des critères de performances du modèle se situe en Annexe 3.

Pour vérifier le fonctionnement du modèle, j'ai également comparé la réponse du modèle appliqué sur les périodes hivernales mises bout à bout, et sur la série continue et complète des données climatiques sur la période 1993-2007 (en incluant donc les périodes d'irrigation). Dans les deux cas, les critères de performances ne sont calculés que sur les périodes hivernales (« hors irrigation »). J'ai trouvé une réponse sensiblement différente entre les deux simulations, avec une surestimation des débits dans le cas d'un forçage par la série climatique continue.

La première simulation, qui ne prend pas en compte les saisons estivales, a été considérée comme plus représentative que la seconde, qui traduit l'influence d'un déficit hydrologique en été. En effet, l'importance des flux d'irrigation en saison estivale compense largement le déficit hydrologique et implique que le système reste saturé. Nous avons donc retenu l'hypothèse de ne calibrer le modèle que sur les périodes hivernales mises bout à bout.

5-1-4 Modélisation des drainages agricoles sur le bassin de Fumemorte

5-1-4-1 Méthodologie

Comme expliqué précédemment, la période d'irrigation, considérée comme constante d'année en année, est définie entre le 8 avril et le 30 septembre. Cette période représente la date moyenne de mise en eau des cultures sur les 14 années. Elle va nous permettre de déterminer les flux correspondants aux

drainages agricoles, pour chaque année, et d'évaluer s'il existe une relation avec les surfaces agricoles (rizicoles) de l'année considérée.

On détermine le flux d'irrigation en mettant l'hypothèse que le flux d'irrigation est égal à la différence entre le débit mesuré et le débit naturel simulé soit : $Q_i = Q_{obs} - Q_{sim}$. Le flux d'irrigation est calculé pour chaque année, pour être comparé aux surfaces de rizières présentes dans le bassin versant.

5-1-4-2 Estimation des surfaces irriguées entre 1993 et 2007

J'ai utilisé des cartes d'occupation du sol qui avaient été établies précédemment pour la période 1993-2007 réalisé à la TDV par A.Sandoz (Chauvelon et al. 2000).

Chaque carte d'occupation du sol a été réalisée sous Système d'Information Géographique (SIG) à partir de photographies aériennes retranscrites (1993 à 2007). Sous SIG, il est possible de combiner des informations sur l'occupation du sol et les périmètres des bassins versants.

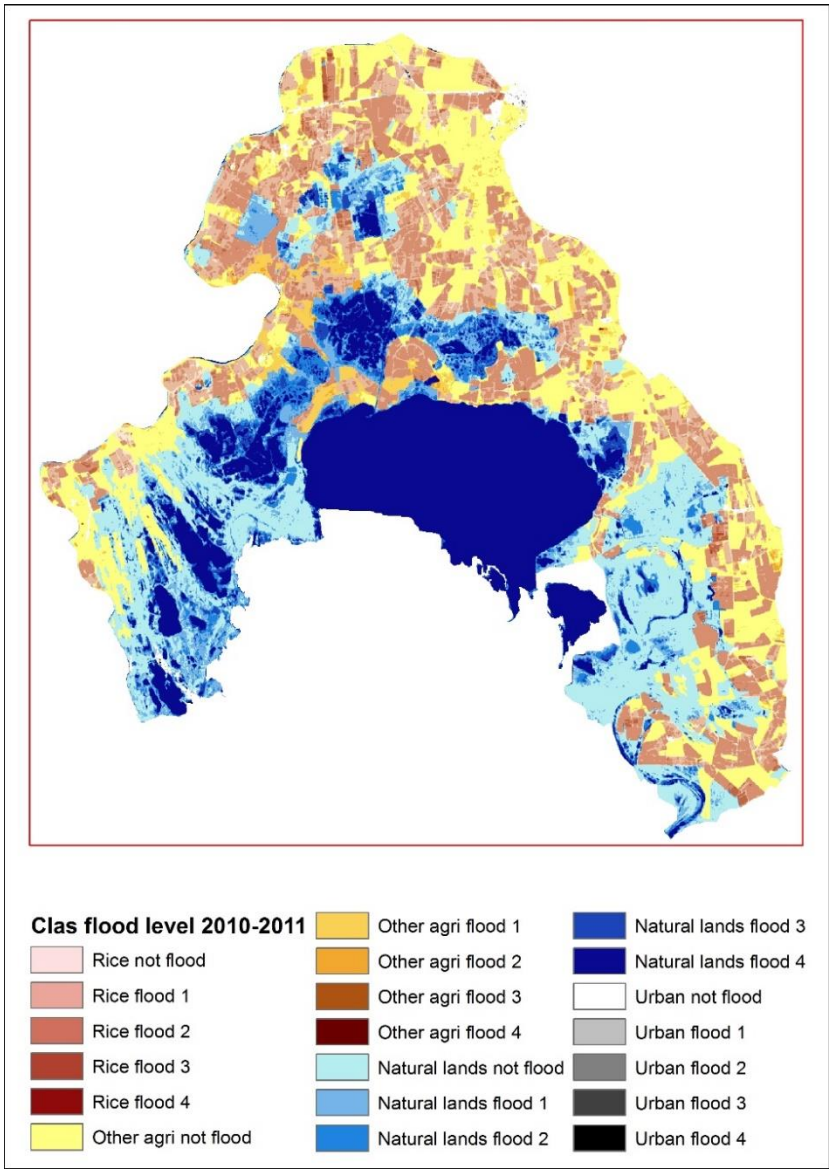


Figure 14: Carte d'occupation du sol de l'année 2010-2011, des bassins versants de l'Île de Camargue. Source : A. Guelmami,2016

A l'aide d'une nouvelle méthode, une mise à jour de la cartographie d'occupation du sol est en cours à la TDV par A.Guelmami. Pour chaque année, 4 images satellites Landsat provenant de l'United States Geological Survey (USGS) vont être traités en moyenne. Elles sont globalement réparties sur les mois de septembre, avril, juillet et septembre. Cependant, les périodes estivales sont privilégiées. Cette nouvelle méthode consiste d'extraire à partir d'images satellites des cartes d'inondation. La

méthodologie appliquée est d'extraire les pixels en eau à l'aide d'un indice d'inondation *Modified Normalized Difference Water Index* (MNDWI) (Hanquiu, 2006). L'indice d'inondation s'étend de 1 à 4, avec 4 correspondant aux marais, étangs et zones humides Une fois l'information sur l'inondation extraite pour chaque image, la deuxième étape consiste en la création d'une carte représentant l'ensemble des niveaux d'inondation pour la période analysée.

La différence entre les deux méthodologies utilisées est la contrainte temporelle. En effet, la nouvelle méthodologie appliquée est plus représentative que celle utilisée auparavant. Cependant, la mise à jour des données étant en cours nous utiliserons la première méthode pour calculer les surfaces en riz. Pour cela, à l'aide de requêtes sous SIG, j'ai extrait pour chaque année (1993 à 2007 et 2011) les surfaces en riz (en m²) sur les bassins versants Fumemorte, Roquemaure et Diffus, disponible en Annexe 4.

5-1-4-3 Résultats et discussion

Le Tableau 13, met en évidence la surface en riz annuelle de chacun des bassins versants sur les années 1993 à 2007. Contrairement aux autres bassins, Fumemorte ne détient pas de données pour l'année 2000.

	Surface en riz (m²)			Volume d'eau (m³)			(Surface en riz / Superficie)*100		
Années	Fumemorte	Roquemaure	Diffus	Fumemorte	Roquemaure	Diffus	Fumemorte	Roquemaure	Diffus
1993	1.9E+07	8.2E+06	5.5E+06	2.5E+07	4.1E+07	4.1E+07	28.7	57.5	24.8
1994	1.9E+07	7.6E+06	5.1E+06	2.4E+07	4.7E+07	4.4E+07	28.1	53.5	23.1
1995	1.8E+07	7.1E+06	4.5E+06	2.3E+07	4.3E+07	4.0E+07	26.6	49.9	20.2
1996	1.8E+07	6.1E+06	4.4E+06	3.8E+07	5.7E+07	5.4E+07	27.0	42.8	20.1
1997	1.1E+07	5.3E+06	3.7E+06	2.6E+07	3.6E+07	3.5E+07	16.0	37.3	16.7
1998	1.3E+07	6.9E+06	3.2E+06	1.3E+07	2.8E+07	2.5E+07	19.9	48.4	14.6
1999	1.2E+07	4.8E+06	2.7E+06	2.4E+07	3.7E+07	3.5E+07	18.0	33.7	12.4
2000		1.4E+06	2.1E+06	2.6E+07	3.7E+07	3.5E+07	0.0	9.5	9.7
2001	1.7E+07	6.6E+06	3.5E+06	3.4E+07	3.7E+07	3.5E+07	25.0	46.0	15.7
2002	1.5E+07	4.5E+06	2.7E+06	2.4E+07	3.7E+07	3.5E+07	22.0	31.2	12.0
2003	1.5E+07	4.8E+06	2.9E+06	2.9E+07	3.3E+07	3.2E+07	22.3	33.4	13.0
2004	1.3E+07	4.7E+06	2.3E+06	2.8E+07	3.5E+07	3.4E+07	18.6	32.9	10.2
2005	1.5E+07	3.7E+06	3.1E+06	3.4E+07	5.0E+07	4.7E+07	22.0	25.6	14.0
2006	1.4E+07	3.5E+06	3.2E+06	3.7E+07	4.3E+07	4.2E+07	20.6	24.7	14.4
2007	1.2E+07	5.2E+06	2.7E+06	3.5E+07	4.5E+07	4.3E+07	17.9	36.2	12.2
2011	2.0E+07	6.5E+06	7.3E+06				30.0	45.5	32.8
Moyenne ± écart-type	**1.43E+07** ± 3.01E+06	**2.21E+07** ± 1.76E+06	**3.4E+06** ± 1.3E+06	**2.8E+07** ± 6.6E+06	**4.0E+07** ± 7.3E+06	**3.9E+07** ± 7.0E+06	**20.9** ± 4.1	**37.5** ± 12.1	**15.5** ± 4.4

Tableau 13 : Surfaces irriguées (m²), Volumes d'eau d'irrigation (m³), Ratio surfaces irriguées sur superficie du bassin versant sur les années allant de 1993 à 2007 et 2011. La superficie de Fumemorte = 6.78E+07 m², de Roquemaure = 1.43E+07 m² et Diffus= 2.21E+07 m².

On constate que les surfaces en riz varient d'année en année sur les 3 bassins versants. Le bassin versant de Fumemorte est le plus grand, celui de Diffus est le plus petit. On constate que les deux méthodologies nous donnent le même ordre de grandeur de surface en riz.

Pour aller plus loin, on cherche à savoir s'il y a une relation entre le volume d'eau introduit et les surfaces en riz dans le bassin versant de Fumemorte.

On constate que sur les 14 ans de données la surface en riz varie entre 1.09 et 1.9 $x10^7$ m². Les volumes d'eau d'irrigation sont plus variables entre 1.4 $x10^7$ et 3.7 $x10^7$ m². L'année 1998 et l'année 2005, ont une surface en riz proche mais deux volumes irrigués opposés (le plus fort et le plus faible). Il n'y a pas relation entre ces deux paramètres.

Au final, on établit une « saison type », avec une chronique journalière des excédents d'irrigation de telle à telle date, avec l'incertitude associée.

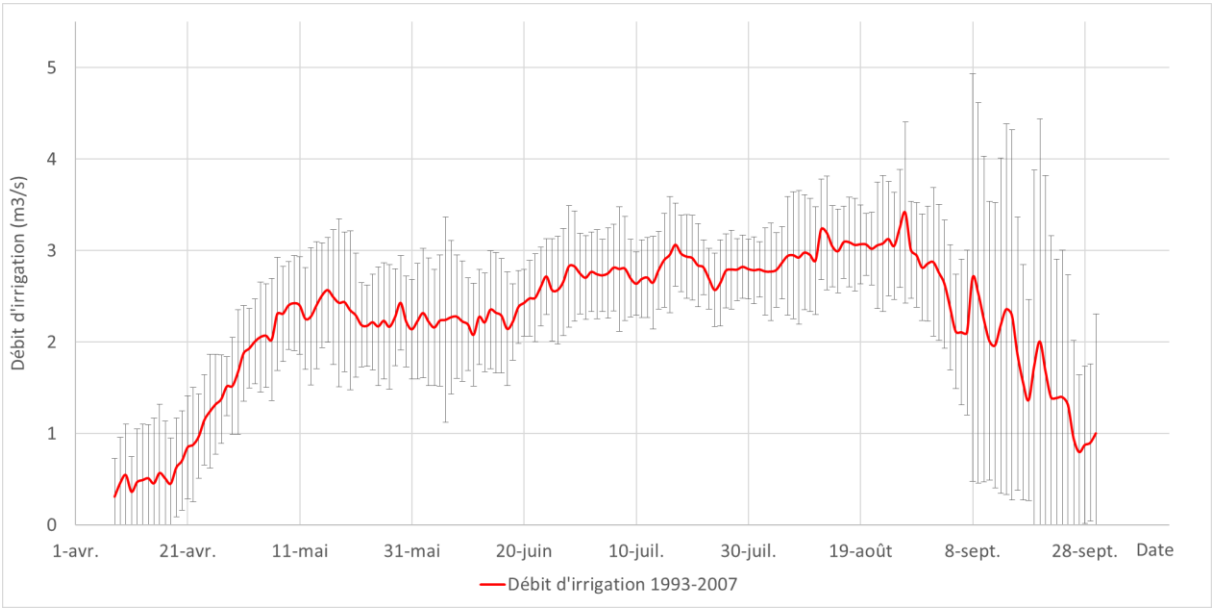


Figure 15 : Courbe d'irrigation moyenne (Qi moyen) entre le 8 avril et le 30 septembre effectuée sur les années 1993 à 2007.

On obtient donc 14 séries journalières Q_i différents, desquels on extrait une saison moyenne.

Le débit d'irrigation moyen est considéré comme la « saison type ». La Figure 15, correspond à la moyenne journalière des débits d'excédant d'irrigations sur les années 1993-2007. Cette courbe possède des incertitudes assez importantes qui peuvent s'expliquer par le fait que les périodes d'irrigations peuvent être plus ou moins différentes de la situation moyenne. En effet, les flux d'irrigation dépendent de plusieurs paramètres comme les surfaces irriguées, mais également la température ou les précipitations qui sont des phénomènes variables.

Paramètres	Modèle GR4J
Périodes	Hivernale + Irrigation moyenne
Etapes	Période totale
Nash	0.987
$\frac{\bar{Q}_{sim}}{\bar{Q}_{obs}}$	1.12

Tableau 14 : Résultat de la simulation des 14 années 1993-2007 en utilisant 12 mois sur 12 (Période Hivernale + Irrigation) sur le bassin de Fumemorte

On refait tourner le modèle GR4J en ajoutant au débit cumulé la courbe moyenne d'irrigation afin de regarder les critères de performance sur la période de mesure (14 ans). Il est possible de constater que le $\frac{\bar{Q}_{sim}}{\bar{Q}_{obs}}$ est plus élevé que lorsque l'on simule les 14 années en périodes hivernales.

5-1-5 Modélisation des écoulements sur les autres bassins versants

Le bassin versant de Roquemaure est de $14\,x10^6$m², celui de Diffus est de $22\,x10^6$m². Les bassins versant de Roquemaure et Diffus ne possèdent aucune mesure de débit).

Sur le Tableau 13, on compare la proportion surface en riz/ superficie. Le ratio est pour Fumemorte égal à 21%, pour Roquemaure à 37 % et pour Diffus à 15 %.

La relation établie sur le modèle GR4J de Fumemorte ainsi que la relation débits d'irrigation/surfaces irriguées va leur être transposée. Nous obtiendrons pour chacun des bassins versant une estimation de leurs écoulements.

Au vu des données disponibles, on utilisera pour Roquemaure, la composition isotopique du canal de Roquemaure et pour Diffus, la composition isotopique de Fumemorte.

5-1-6 Simulation des écoulements vers le Vaccarès entre 2008 et 2013

5-1-6-1 Bassin versant Fumemorte

Le modèle GR4J de Fumemorte considéré comme valable, il est possible de prédire la réponse hydrologique du système sur les années sans mesures expérimentales de 2008 à 2013. La Figure 16, correspond aux résultats schématiques globaux du débit sur la période 2007-2013.

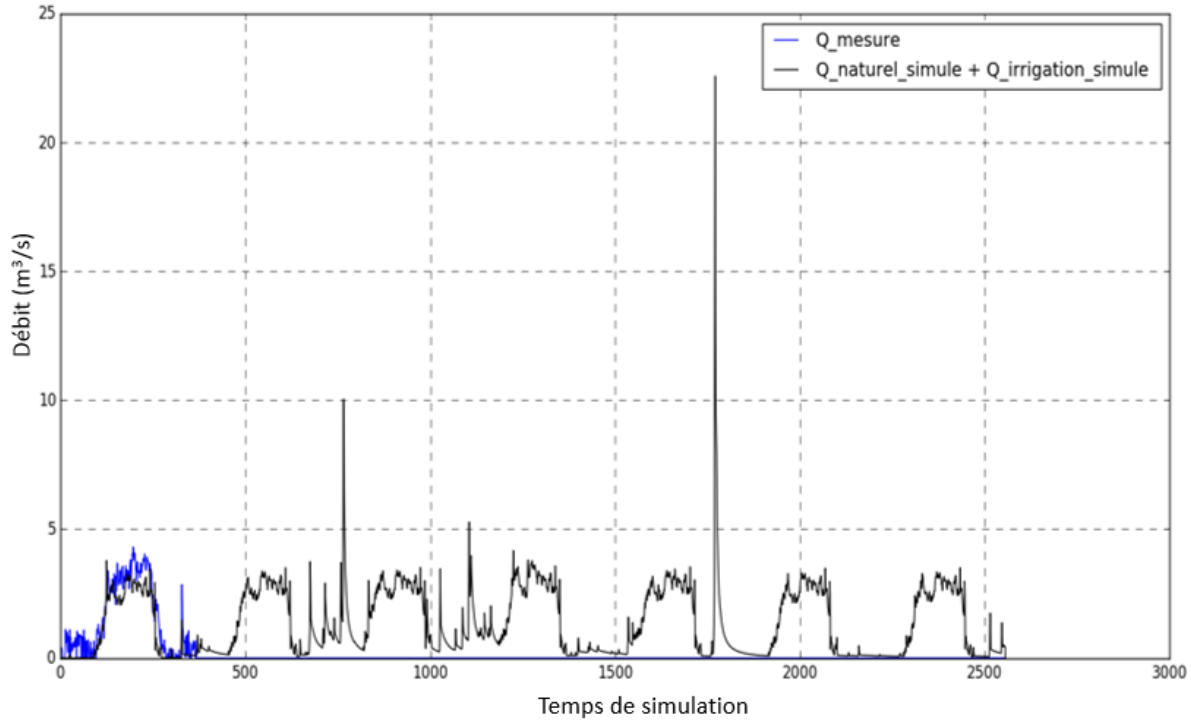


Figure 16 : Simulation des débits du bassins versants observés (2007) et simulés sur la périodes 2007-2013.

A partir de cette simulation, on obtient une estimation d'un débit naturel et d'un débit d'irrigation pour chaque année.

5-1-6-2 Apport des traceurs pour la quantification des excédents d'irrigation

Deux méthodes sont utilisées pour effectuer les estimations de la contribution des excédents d'irrigation aux débits sur les bassins versants pour lesquelles nous ne possédons pas de données (Roquemaure et Diffus). La première méthode est d'utiliser les isotopes, la seconde est d'utiliser le ratio surface irriguée sur surface totale pour chaque bassin versant afin d'estimer la part des débits d'irrigation et naturel.

5-1-6-2-1 Estimation des excédents d'irrigation à l'aide des compositions isotopiques

On fait l'hypothèse que le bilan de masse isotopique est conservatif sans influence de changements de phase. On pose :

- La composition isotopique du bassin versant correspond à la composition mesurée ;
- La composition isotopique du débit naturel d'un bassin versant est égale à la composition isotopique moyenne des précipitations pondérées par les pluies sur la période choisie ;
- La composition isotopique du débit d'irrigation est égale à la composition moyenne du canal Aube de Bouic sur la période considérée.

A partir de l'équation (2), on intègre les compositions isotopiques respectives pour chacun des termes, on obtient :

$$\delta_{mes} * Q_{bv} = Q_n * \delta_P + Q_i * \delta_i \quad (7)$$

Avec

$\delta_{mes} =$ composition isotopique mesurée ; $\delta_{i=}$ composition isotopique du canal d'irrigation

$\delta_P =$ composition isotopique des précipitations sur la période considérée

On cherche à exprimer la contribution des excédents d'irrigation au débit naturel. On obtient :

$$\frac{Q_i}{Q_n} = \frac{\delta_{mes} - \delta_P}{\delta_i - \delta_{mes}} \quad (8)$$

Les résultats des 3 années étudiées (2008-2011-2012) sont regroupées dans le Tableau 15 :

Année	Composition	QiFUM/QnFUM	QiROQ/QnROQ	(QiFUM/QnFUM)/(QiROQ/QnROQ)
2008	$\delta^{18}O$ (‰)	2.99	6.06	0.49
	$\delta^{2}H$ (‰)	3.10	6.00	0.52
2011	$\delta^{18}O$ (‰)	3.49	8.44	0.41
	$\delta^{2}H$ (‰)	4.79	12.54	0.38
2012	$\delta^{18}O$ (‰)	3.71	7.73	0.48
	$\delta^{2}H$ (‰)	4.89	8.59	0.57
Moyenne ± Ecart-type	$\delta^{18}O$ (‰)	**3.40** ± 0.37	**7.41** ± 1.22	**0.46** ± 0.04
Moyenne ± Ecart-type	$\delta^{2}H$ (‰)	**4.26** ± 1.01	**9.04** ± 3.30	**0.49** ± 0.10

Tableau 15: Relations des débits sur les bassins versants à partir des compositions isotopiques sur les périodes d'irrigation de 2008-2011 et 2012.

La composition isotopique n'est connue que pour les bassins versant Fumemorte et Roquemaure. Pour une même année, on constate que les excédents d'irrigation sont proches entre l'Oxygène-18 et le Deutérium. Pour les 3 années 2008, 2011 et 2012, on constate que le rapport $\frac{Q_i}{Q_n}$ est plus important pour le bassin versant de Roquemaure que pour celui de Fumemorte. Cela traduit une proportion plus importante d'eau irriguée dans le bassin de Fumemorte. Le ratio des rapports Fumemorte et Roquemaure oscille entre 0.38 et 0.57. La moyenne sur les 3 années traduit que le bassin de Fumemorte à un ratio de débit irrigué sur le débit total égal au bassin versant de Roquemaure fois 0.46 ± 0.04 en $\delta^{18}O$ et 0.49 ± 0.10 en $\delta^{2}H$.

5-1-6-2-2 Estimation des excédents d'irrigation à l'aide des surfaces irriguées

On considère que les débits sont proportionnels aux surfaces des bassins versants, on obtient l'équation suivante :

$$Q_{iFUM} = a * S_{iFUM} \qquad Q_{nFUM} = b * P * S_{nFUM} \qquad Q_{iROQ} = a * S_{iROQ} \qquad Q_{nROQ} = b * P * S_{nROQ}$$

$S_i =$ Surface irriguée $\qquad S_t =$ Surface totale

$$\frac{\left(\frac{Q_{iFUM}}{Q_{nFUM}}\right)}{\left(\frac{Q_{iROQ}}{Q_{nROQ}}\right)} = \frac{\left(\frac{S_{iFUM}}{S_{tFUM}}\right)}{\left(\frac{S_{iROQ}}{S_{tROQ}}\right)} \quad (9)$$

Le Tableau 16 recense la moyenne et écart-type de la méthode, les résultats détaillée année par année sont présents en Annexe 5: SIG Surfaces irriguées / Surface totale par an 1993-2007Annexe 5 :

Année	SiFUM/StFUM	SiROQ/StROQ	SiDIF/StDIF	((Si/St)FUM)/((Si/St)ROQ)	((Si/St)FUM)/((Si/St)DIF)
Moyenne ± Ecart-type	**0.23** ± 0.04	**0.40** ± 0.10	**0.17** ± 0.06	**0.59** ± 0.13	**1.41** ±0.28

Tableau 16: Ratio surfaces irriguées / surface totale du bassin versant sur les périodes d'irrigation allant de 1993 à 1999, de 2001 à 20117 et 2011.

On observe que le bassin versant de Roquemaure détient des valeurs plus fortes qui traduit une plus grande proportion de surface irriguée. Le rapport $\frac{\left(\frac{S_{iFUM}}{S_{tFUM}}\right)}{\left(\frac{S_{iROQ}}{S_{tROQ}}\right)}$ varie entre 0.41 et 0.86 suivant les années

observées. La moyenne sur les 15 années montre que le bassin de Fumemorte à un ratio de surface irriguée sur une surface total égal à 0.59 ± 0.13 fois celui du bassin de Roquemaure.

5-1-6-2-3 Discussion des estimations des excédents d'irrigation

Les jeux de données regroupent des données d'années différentes, mais possèdent 2011 comme année commune. Sur 2011, les deux méthodes employées mettent en évidence un apport d'eau d'irrigation plus important dans le bassin de Roquemaure que dans celui de Fumemorte.

L'hypothèse que l'équation n°6 est conservative n'est pas tout à fait correcte. En effet, nous avons démontré que les eaux subissent le phénomène évaporatoire. Les compositions isotopiques sont impactées par un enrichissement isotopique. On peut donc dire que l'estimation des excédents d'irrigation à l'aide des isotopes stables de l'eau sous-estime les excédents d'irrigation. Afin de comparer plus précisément les deux méthodes, il faudrait obtenir des résultats sur plus d'années communes.

5-2 Estimation des échanges avec les étangs du sud

5-2-1 Présentation du système lagunaire du Vaccarès

Les échanges mer-lagune à travers la connexion à La Fourcade sont gérés par 13 vannes manuelles. En automne et en hiver, ces vannes sont ouvertes pour diminuer le niveau de l'eau dans les lagunes. Au printemps, entre une et trois portes sont ouvertes pour permettre le renouvellement des poissons dans les lagunes. Pendant les tempêtes marines, les vannes sont fermées à La Fourcade.

Les données expérimentales indiquent que les forts vents dominants peuvent induire une décote de niveau d'eau d'environ 0,8 m (décote calculée entre la partie nord de la lagune du Vaccarès et la partie sud de la lagune Impériaux). La profondeur d'eau moyenne est de 1 m dans le Vaccarès et environ 0,5 m dans les lagunes Impériaux et Lion/Dame, le vent joue un rôle majeur dans la circulation de l'eau, dans les différentes lagunes.

5-2-2 Simulations des flux par TELEMAC-2D

On va utiliser le modèle TELEMAC-2D déjà existant du système lagunaire du Vaccarès (Boutron et al., 2015) pour estimer les volumes d'eau échangés entre les l'étangs du Vaccarès et les étangs du Sud. Ces flux seront estimés comme variables de forçage du modèle conceptuel développé pendant le stage. L'emprise spatiale du modèle est indiquée sur la Figure 17.

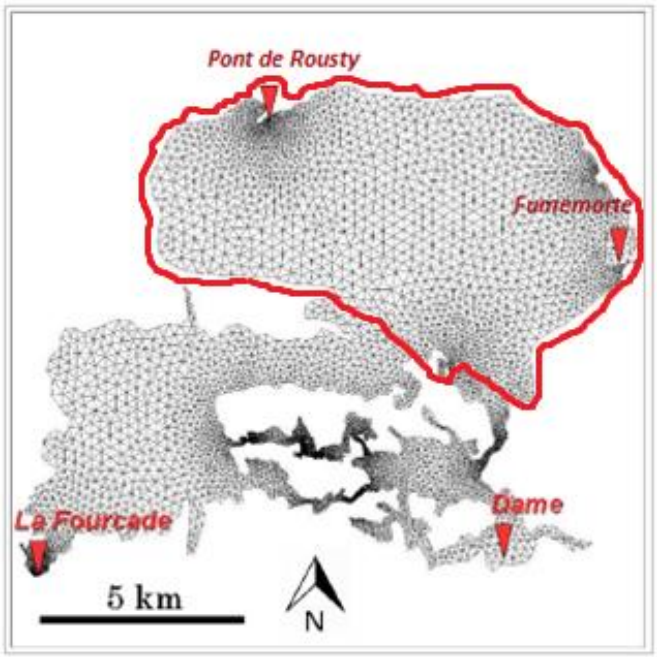


Figure 17: Représentation (enveloppe rouge) de la zone prise en compte dans le modèle conceptuel, et localisation des sites de mesure de niveau d'eau (limnigraphes) utilisés pour caler les hauteurs d'eau simulées par TELEMAC-2D sur les périodes étudiées.

Le modèle TELEMAC-2D prend en compte les forçages extérieurs suivants (voir Boutron et al., 2015 pour plus de détails) :

- Échanges d'eau avec la mer Méditerranée, au travers d'un ouvrage de 13 vannes,
- Entrées d'eau par des canaux de drainage agricole (principalement le canal du Fumemorte et de Roquemaure) ou par ruissellement sur les rives de l'étang du Vaccarès et des étangs des Impériaux. Ces entrées d'eau sont issues d'un modèle pluie-débit pour le canal du Fumemorte (Loubet, 2012). Pour estimer les entrées d'eau dues au canal du Roquemaure et au ruissellement sur les rives de l'étang du Vaccarès et des étangs des Impériaux, un ratio est appliqué au débit calculé pour le canal du Fumemorte. Ce ratio est égal à la division de l'aire du bassin versant du canal du Fumemorte par l'aire totale du bassin versant du Roquemaure et des zones de ruissellement.
- Échanges d'eau avec l'atmosphère (pluie et évaporation).
- Dynamique des masses d'eau induite par le vent.

Dans le cadre de la présente étude, deux périodes ont été simulées par O. Boutron (A: 10 Juin au 29 Octobre 2011, et B: 14 Mai 2012 au 20 Juin 2013) avec le modèle TELEMAC-2D, pour estimer les volumes d'eau échangés entre l'étang du Vaccarès et les étangs du Sud.

Le logiciel TELEMAC-2D (http://www.opentelemac.org/) résout les équations de Barré de Saint-Venant (1871) à deux dimensions d'espace horizontales. Il est développé par le Laboratoire National d'Hydraulique et Environnement (LNHE) de la Direction des Recherches et Développements d'EDF.

Le code TELEMAC-2D résout simultanément les trois équations hydrodynamiques suivantes :

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \vec{u}.\vec{\nabla}(h) + h div\left(\vec{u}\right) = S_h$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \vec{u}.\vec{\nabla}(u) = -g\frac{\partial Z}{\partial x} + S_x + \frac{1}{h} div\left(h\nu_t \vec{\nabla} u\right)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \vec{u}.\vec{\nabla}(v) = -g\frac{\partial Z}{\partial y} + S_y + \frac{1}{h} div\left(h\nu_t \vec{\nabla} v\right)$$

Avec :

- h (m) la hauteur d'eau,
- u,v (m/s) les composantes de la vitesse,
- g (m/s²) : l'accélération de la pesanteur,
- ν_t : coefficients de diffusion de la vitesse,
- Z (m) : cote de la surface libre,
- t (s) temps,
- x,y (m) : composantes d'espaces horizontales,
- Sh (m/s) : source ou puits de fluide,

S_x, S_y (m/s²) : termes source ou puits des équations dynamiques. Ce sont des termes sources représentant par exemple le vent, et le frottement sur le fond,h, u, v sont les inconnues que TELEMAC 2D calcule à chaque pas de temps.

La description théorique complète de TELEMAC-2D est présentée dans l'ouvrage : "Hydrodynamique des écoulements à surface libre - modélisation numérique avec la méthode des éléments finis", de Jean-Michel Hervouet (Presse des Ponts et Chaussées - 2003).

5-2-3 Résultats et discussion

Les résultats présentés correspondent à la première période (A). Cette période estivale de 5 mois allant du 10 juin au 29 octobre sur l'année 2011 comprend la période d'irrigation allant d'avril à septembre.

	Fumemorte	Rousty	Dame	Fourcade Nord
Simulation non corrigée	0.24	0.14	0.63	0.06
Simulation corrigée	0.05	0.17	0.07	0.06

Tableau 17:Somme des écarts entre les niveaux d'eau observés et simulés par TELEMAC-2D sur la période A.

Les simulations présentent des différences qui ne sont pas satisfaisantes au regard de l'étude menée, les graphiques correspondant aux simulations se trouvent en Annexe 6.

Ces différences proviennent des très fortes incertitudes concernant le forçage du modèle TELEMAC-2D, notamment les estimations des apports d'eau par drainage et ruissellement sur les rives des étangs. Pour remédier à ce problème, nous avons implémenté un terme "source/puit" d'eau dans les simulations : à chaque pas de calcul de TELEMAC-2D, nous injectons ou enlevons le volume nécessaire pour que le niveau moyen simulé soit égal au niveau moyen expérimental (moyenne calculée sur les niveaux d'eau expérimentaux des sites de la Fourcade, de la Dame, du Fumemorte et du Pont de Rousty). Les somme des écarts sont beaucoup plus petits ce qui signifie que les niveaux d'eau simulés sont plus proches des niveaux expérimentaux. L'objectif de ces simulations est d'obtenir pour les zones d'échanges des flux dans les zones d'échanges (passes) réalistes.

Une seconde période est disponible en Annexe 7,elle a été simulée avec un période plus longue correspondant à une année hydrologique allant du 14 mai 2012 au 20 juin 2013. Pareillement, les niveaux d'eau simulés avec le terme correctif source/puit sont proches des niveaux expérimentaux. Ces données simulées serviront comme données d'entrées au modèle conceptuel pour simuler les débits dans les passes avec les étangs du Sud.

5-3 Simulation de la composition isotopique de l'étang

Nous posons l'hypothèse que l'étang contient une masse d'eau homogène avec la composition isotopique et la salinité de l'étang est Vaccarès Ouest.

Deux simulations sont exposées dans les résultats :

- La période A (du 10 juin 2011 au 17 octobre 2011) avec les données d'échanges entre les étangs provenant de Telemac-2D
- La période globale (1er janvier 2008 au 20 juin 2013) comprenant seulement les données recueillies complètes.

Les résultats de la période B (du 14 mai 2012 au 20 juin 2013) ainsi que ceux de la période globale (1er janvier 2008 au 20 juin 2013) comprenant les données TELEMAC-2D sont en Annexe 8 et Annexe 9.

5-3-1 Période d'irrigation année 2011 avec données de TELEMAC-2C

Cette période allant du 10 juin 2011 (numéro de jours = 40704) au 17 octobre 2011 (numéro de jours = 40833) correspond à une période estivale comprenant la fin de période d'irrigation.

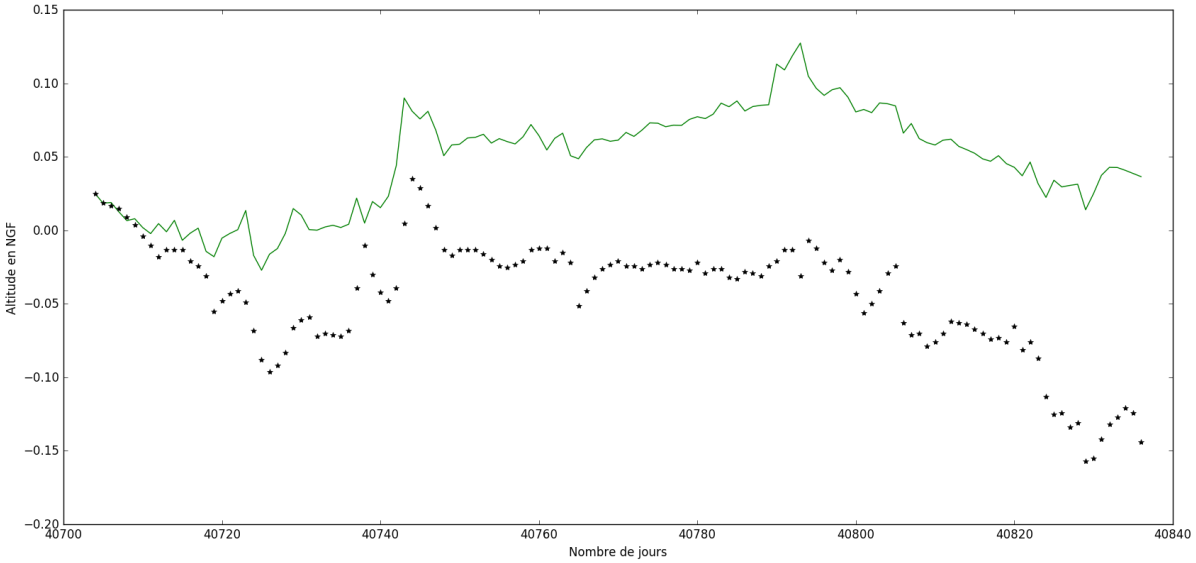


Figure 18 : Hauteur d'eau observée (en étoile noire) et simulée (en trait vert) de l'étang du Vaccarès sur la période du 10/06/2011 au 17/10/2011.

La simulation du niveau d'eau par le modèle hydro-isotopique montre une différence avec les niveaux d'eau observés. L'écart entre les deux augmente progressivement avec le temps, atteignant un peu environ 15 cm au bout de 4 mois de simulation.

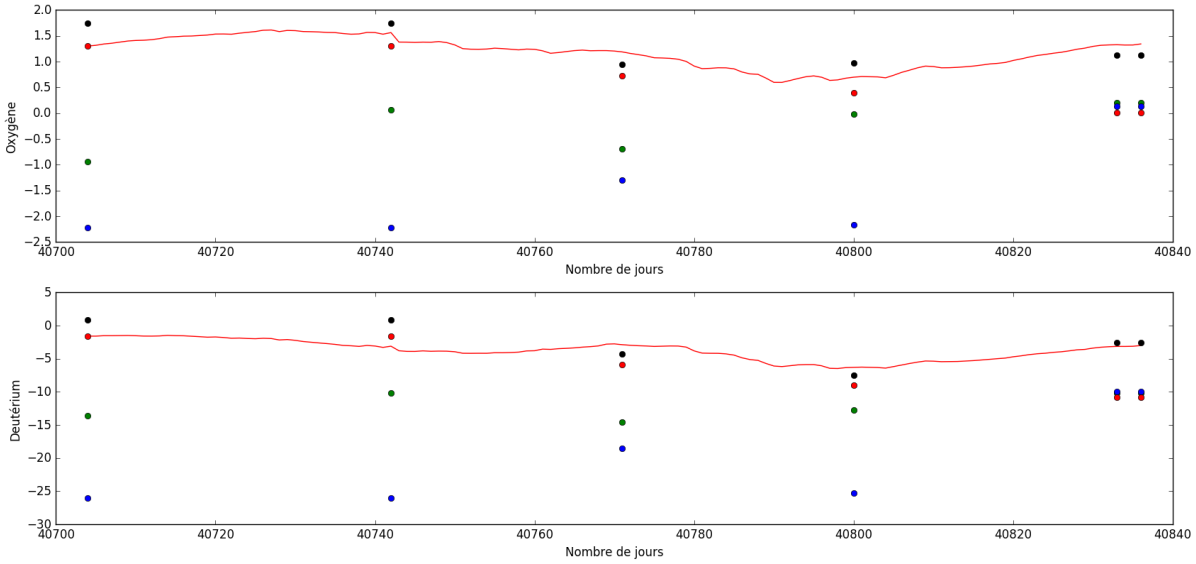


Figure 19: Evolution de la composition isotopique $\delta^{18}O$ et $\delta^{2}H$ au cours du temps sur la période du 10/06/2011 au 17/10/2011. Le trait représente la simulation de l'échantillon Vaccarès Ouest, les ronds les données expérimentales. Le rond rouge représente Vaccarès Ouest ; le vert Vaccarès Centre ; le bleu Vaccarès Est, le noir Pointe de Mornès.

La Figure 19, montre l'évolution des compositions isotopiques au cours du temps. On constate que celles-ci sont bien reproduites. La pente de corrélation $\delta^{18}O$ - $\delta^{2}H$ est elle aussi bien simulée par le modèle de bilan hydro-isotopique.

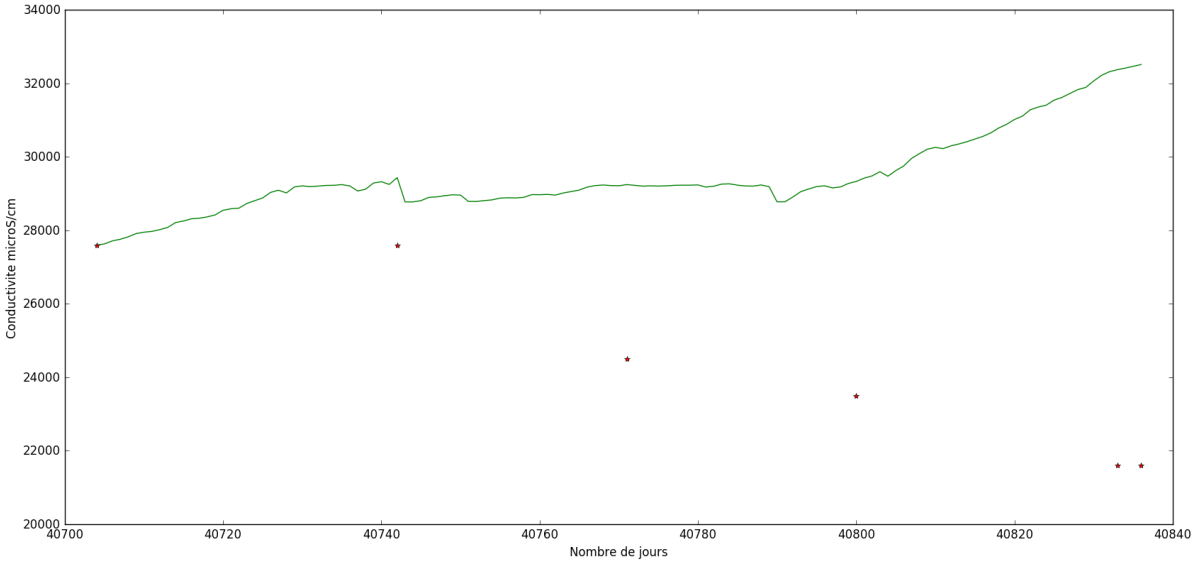


Figure 20 : Salinité observée (en trait vert) et simulées (en croix rouge) de l'étang du Vaccarès sur la période du 10/06/2011 au 17/10/2011.

On constate que la simulation de la salinité de l'étang ne reproduit pas la tendance des données observées. La simulation surestime la salinité de l'étang. Ce phénomène peut avoir deux origines. La première explication est les débits entrant dans le Vaccarès sont surestimés par TELEMAC-2D. La seconde que le modèle de bilan hydro-isotopique ne simule pas assez de flux sortant du Vaccarès.

5-3-2 Discussion

Le modèle hydro-isotopique est un modèle simplifié qui considère l'étang du Vaccarès comme une seule masse d'eau homogène sans échanges souterrains.

A l'aide des différents résultats de GR4J et de TELEMAC-2D, il est possible de visualiser Tableau 18**Erreur ! Source du renvoi introuvable.** à nouveaux les ordres de grandeurs des termes du bilan hydrologique :

Période	P (m^3/s)	E (m^3/s)	QFum(m^3/s)	QFi (m^3/s)	QFo (m^3/s)
2011	0.5	4.2	2.11	5.1	-2.4
2012-2013	0.8	2.8	5.13	2.3	-2.2

Tableau 18: Ordre de grandeurs des termes du bilan hydrologique sur les périodes 2011 (10/06/2011-17/10/2011) et 2012-2013 (14/05/2012-20/06/2013).

Le Tableau 18, permet de visualiser sur les deux paramètres mal et inconnus (Qbv et QF) que le paramètre dominant est le débit des bassins versants. On constate que les débits des passes représentent la plus petite part du bilan hydrologique.

Des hypothèses ont été posées tout au long de la démarche :

- Les données climatiques (précipitations et évaporation) proviennent de la station TDV et sont considérées similaires à celles de la RNNC. Il serait intéressant de rentrer les données de la RNNC dans le modèle hydro-isotopique afin de voir si l'évaporation impacte celui-ci.
- Les données géochimiques (conductivité et composition isotopique) ont été approximées. Les compositions isotopiques des eaux ont été extrapoler de façon linéaire entre les données mensuelles ou bi-mensuelles. La conductivité des pluies a été négligée face aux conductivités des étangs du Sud. La composition isotopique du Vaccarès Ouest a été choisi pour simuler la composition isotopique du lac.
- Les données hydrologiques
    - Les périodes d'irrigation et hors irrigation ont été posés respectivement d'avril à septembre et d'octobre à mai. Celle-ci est une période moyenne et peut varier suivant les années.

- Les débits du bassin versant Fumemorte ont été reconstitué à partir du modèle GR4J. Pour rappel, celui-ci n'a pas fait l'objet d'une calibration- validation classique. Les données de débits des bassins versants Roquemaure et Diffus ont été estimés à l'aide des deux hypothèses (rapports des surfaces et des compositions isotopiques). Toutes les surfaces irriguées proviennent des données du parcellaire de 2011 de la RNNC. La composition isotopique du bassin versant Diffus a été approximée par la composition isotopique de Fumemorte.
- Les débits des passes proviennent d'un modèle hydrodynamique. Celui-ci a été adapté afin de simuler des débits d'échanges entre les étangs du Nord et du Sud.

Les simulations des périodes 2011,2012-2013 montrent un niveau d'eau et une salinité de l'étang surestimés. Pour rappel, le modèle hydro-isotopique utilise les données de précipitations, d'évaporation, de débits de GR4J et de TELEMAC-2D (sur 2 périodes).

5-3-3 Période globale années 2008 à 2013 sans données TELEMAC-2D

Dans le but de tester la réponse du modèle hydro-isotopique seul, on ne rentre que les données hydrologiques complètes sur la période 2008-2013. C'est-à-dire, les données de précipitations, d'évaporation et de débits provenant du modèle GR4J. Pour le contraindre nous utilisons toutes les données géochimiques disponibles sur cette même période.

Cette période allant du 1er janvier 2008 (numéro de jours = 39448) au 20 juin 2013 (numéro de jours =41445) contient 5 périodes d'irrigation et 4 période hors irrigation.

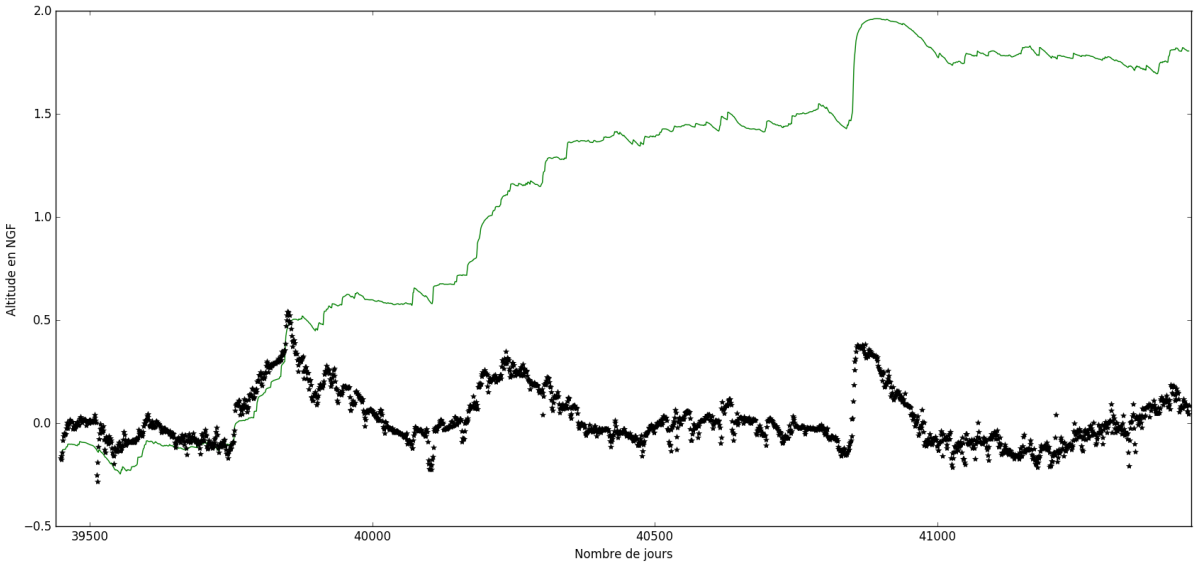


Figure 21 : Hauteur d'eau observée (en étoile noire) et simulée (en trait vert) de l'étang du Vaccarès sur la période du 01/01/2008 au 20/06/2013.

La Figure 21, montre une simulation acceptable puis présente une rupture dans la simulation est visible au niveau de février 2009. A partir de cette date, la simulation de la hauteur d'eau ne cesse de croître. Cependant, les tendances des hauteurs d'eau (augmentation fin 2011, début 2012 (Nombre de jours= 39900)) sont reproduites.

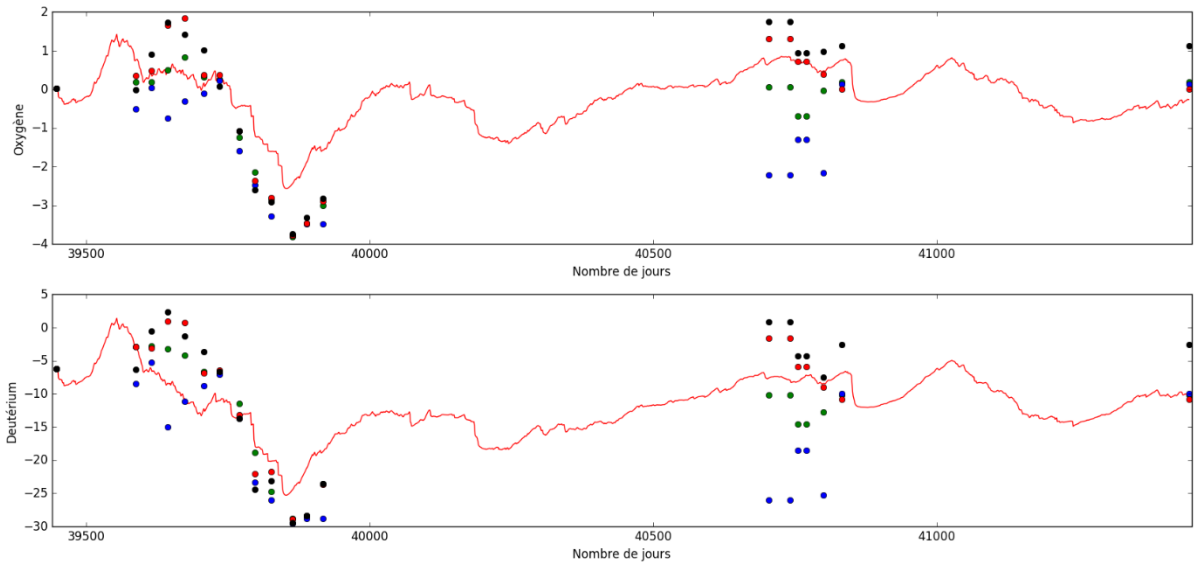


Figure 22: Evolution de la composition isotopique $\delta^{18}O$ au cours du temps sur la période du 01/01/2008 au 20/06/2013. Le trait représente la simulation de l'échantillon Vaccarès Ouest, les ronds les données expérimentales. Le rond rouge représente Vaccarès Ouest ; le vert Vaccarès Centre ; le bleu Vaccarès Est, le noir Pointe de Mornès.

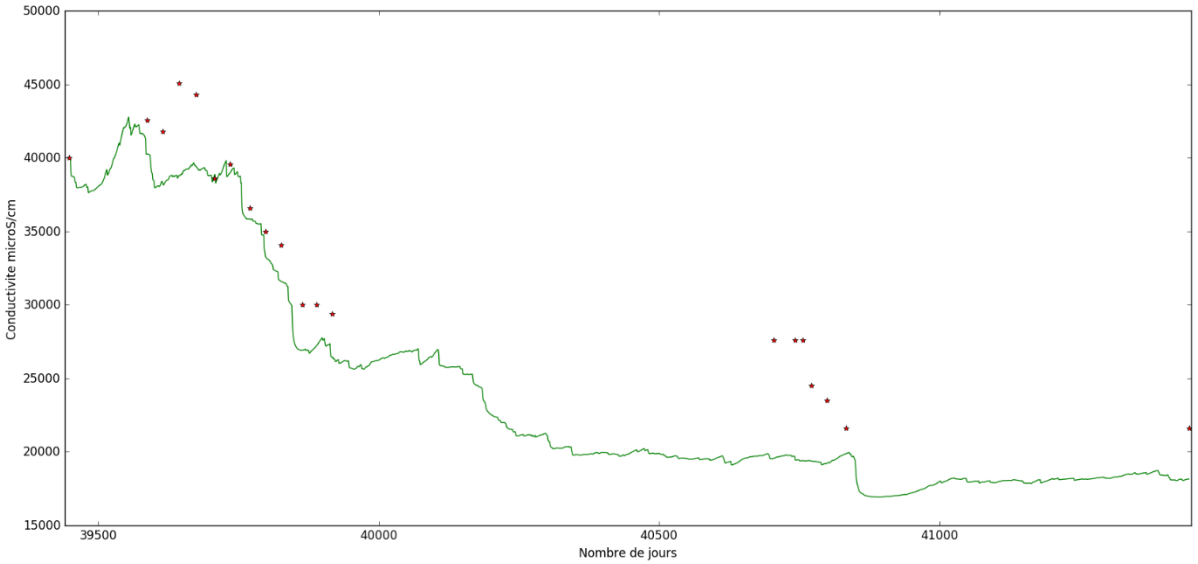


Figure 23 : Salinité observée (en trait vert) et simulées (en croix rouge) de l'étang du Vaccarès sur la période du 01/01/2008 au 20/06/2013.

L'évolution de la composition isotopique (Figure 22) et de la conductivité électrique (Figure 23) sont correctement simulée sur les deux périodes comportant des données mesurées (pour rappel l'année 2008-2009 et l'été 2011). La conductivité est sous-estimée en 2011 dû à la surestimation de la hauteur d'eau de l'étang.

5-3-4 Tentative d'ajustement manuelle sur 2008-2013

Au vu des résultats de simulation, un premier ajustement a été réalisé. Celui-ci a consisté à rajouter à trois des flux entrants (équivalent à un total de 50m^3/s) entrant dans le Vaccarès.

Deux hypothèses ont été proposées simultanément. Elles sont représentées sur la Figure 24.

- La première est de forcer le modèle en simulant des écoulements dans les passes lorsque la simulation décroche de la réalité. Pour effectuer cela, on fait sortir un volume d'eau constant jusqu'à se rapprocher au mieux des données mesurées.
- La seconde est que les précipitations importantes (>10mm) provoquent un écoulement vers les étangs du sud, d'un volume équivalent à la quantité de pluie reçue par le Vaccarès.

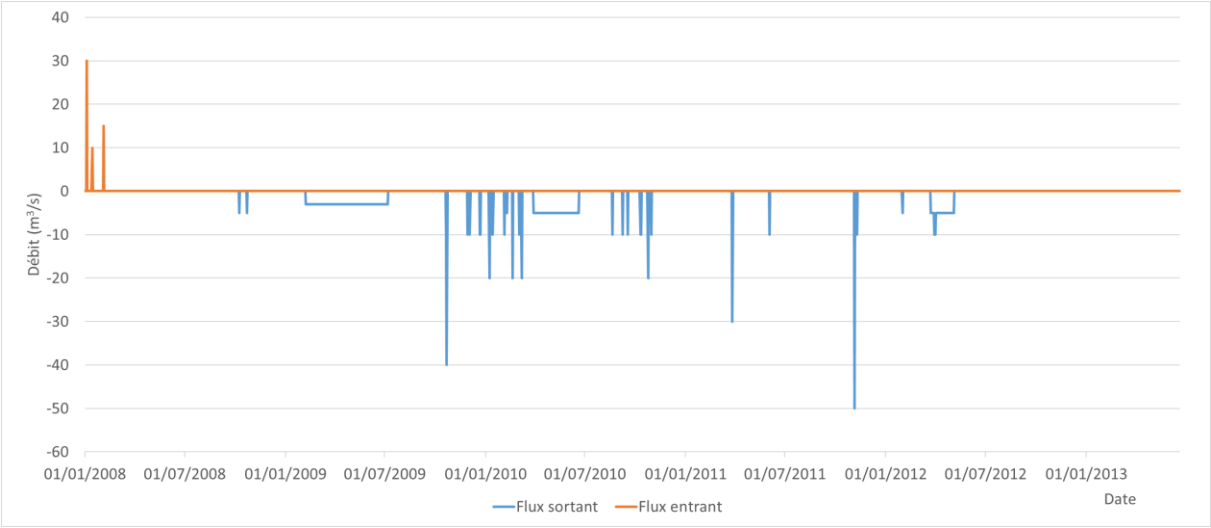


Figure 24: Débits entrants (en orange) et sortants (en bleu) du Vaccarès estimés par hypothèses pour l'ajustement du modèle de bilan.

La Figure 24, nous permet de visualiser les ajustements manuels effectués à partir des deux hypothèses citées précédemment. Les ajustements sont compris dans une gamme de 0 à -50 avec un pas de 5. Les 3 premiers pics orange permettent de caler correctement la simulation. Les pics ponctuels représentent les flux permettent de faire sortir l'eau de l'étang provenant des précipitations. Les autres permettent de rajuster le niveau de l'étang lors d'une baisse importante.

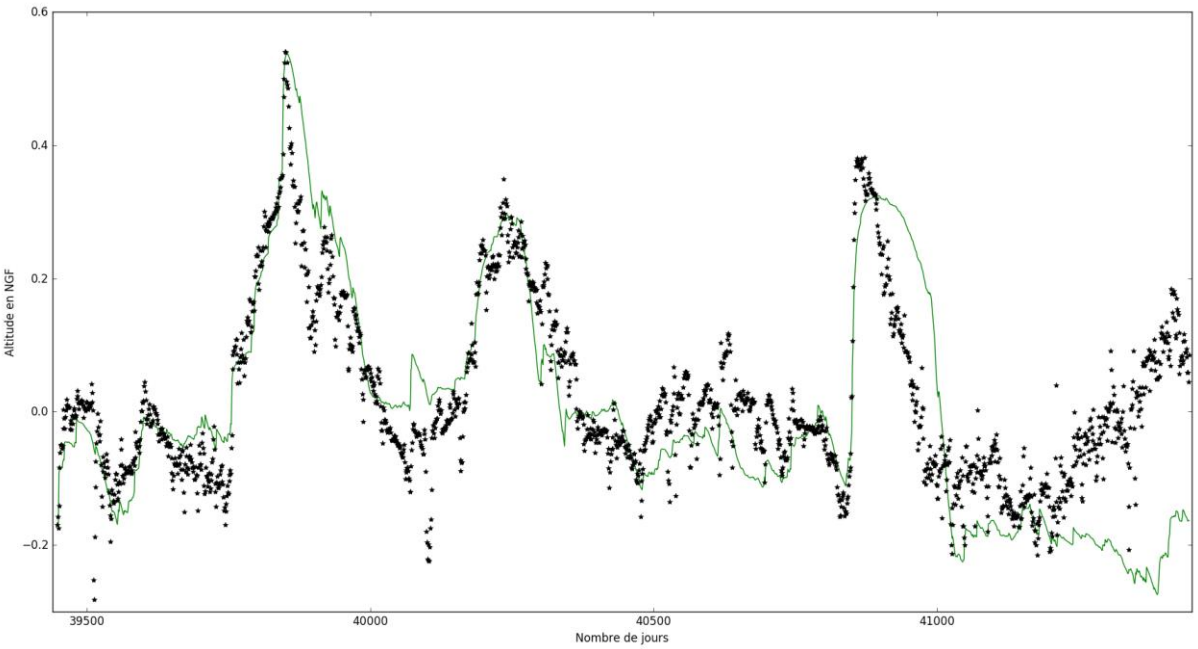


Figure 25: Hauteur d'eau observée (en étoile noire) et simulée (en trait vert) de l'étang du Vaccarès sur la période du 01/01/2008 au 20/06/2013.

La Figure 25 montre que l'ajustement réalisé permet de simuler la hauteur d'eau de l'étang correctement par rapport aux données observées. Cet ajustement grossier peut être améliorer en affinant le pas de temps.

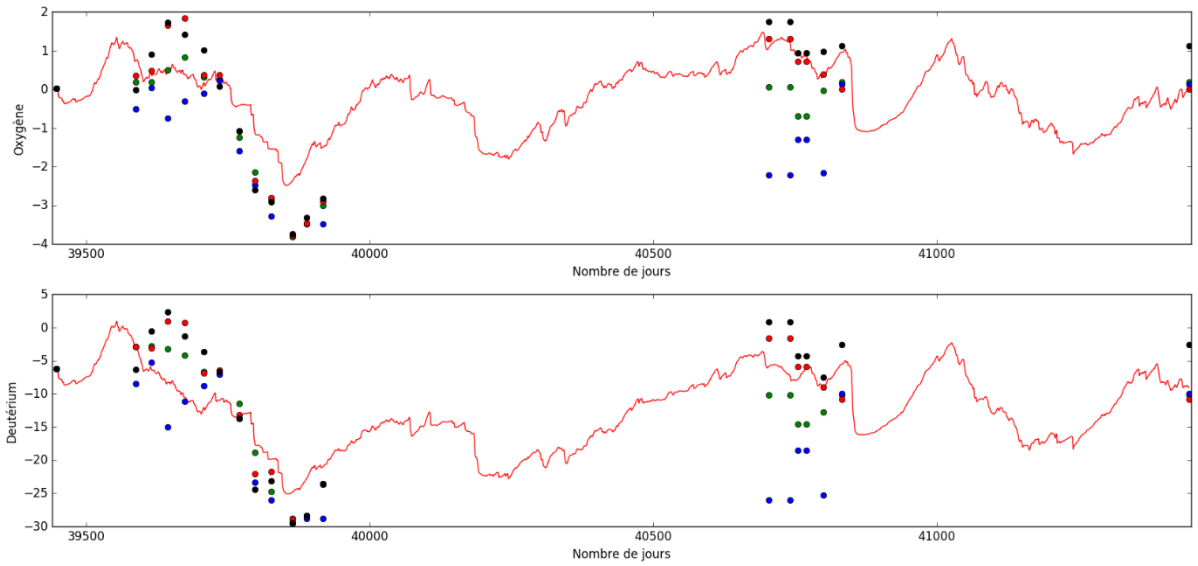


Figure 26: Evolution de la composition isotopique $\delta^{18}O$ au cours du temps sur la période du 01/01/2008 au 20/06/2013. Le trait représente la simulation de l'échantillon Vaccarès Ouest, les ronds les données expérimentales. Le rond rouge représente Vaccarès Ouest ; le vert Vaccarès Centre ; le bleu Vaccarès Est, le noir Pointe de Mornès.

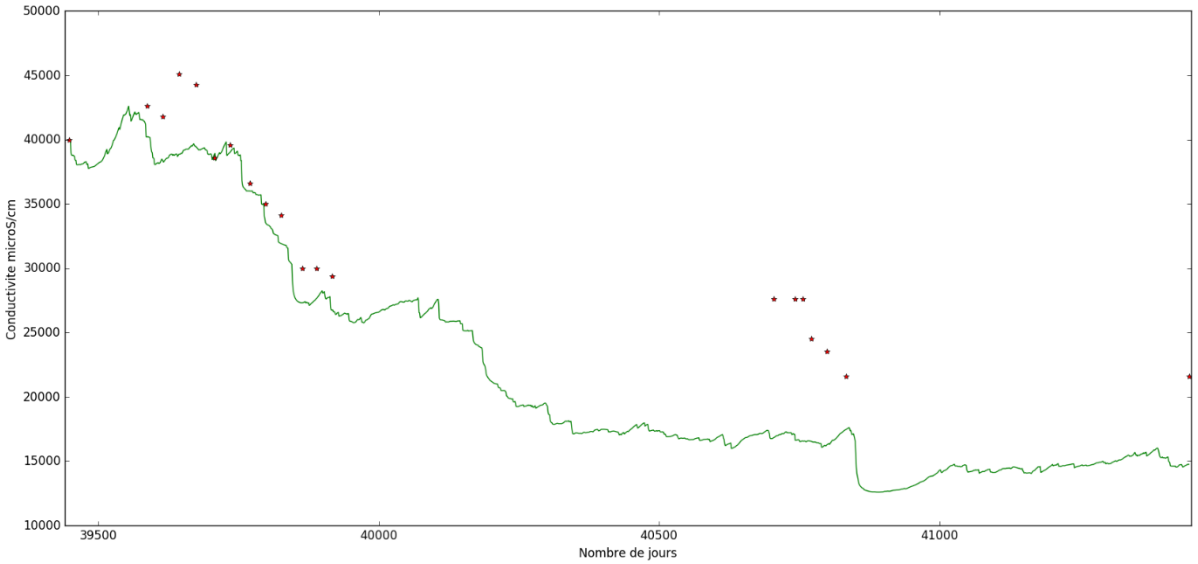


Figure 27: Salinité observée (en trait vert) et simulées (en croix rouge) de l'étang du Vaccarès sur la période du 01/01/2008 au 20/06/2013.

Cette simulation reproduit réalistement l'évolution de la composition isotopique de l'étang, la salinité de l'étang est correctement simulée sur la période 2008-2009. En revanche, sur l'année 2011 la salinité de l'étang est sous-estimé. Ce phénomène traduit que les débits d'échanges ne sont pas essentiellement sortant. Il faudrait dans cet ajustement continuer l'ajustement en insérant des débits entrants.

Ce modèle hydro-isotopique reproduit de manière réaliste les phénomènes naturels. Ces simulations ont permis de mettre en évidence que les débits d'échanges entre les étangs restent difficiles à simuler. Afin d'avoir une idée plus précise des connaissances à améliorer, il faudrait insérer dans le modèle toutes les données existantes qui n'ont pu être analysés durant la période de ce stage.

6- Conclusion et perspectives

6-1 Conclusion

Pour conclure, cette étude met en évidence la complexité de la zone d'étude. Nous avons proposé un protocole plus précis pour estimer les apports des bassins versants. En effet, nous avons estimé le débit en le décomposant en débits naturels plus débits d'irrigation. Plusieurs méthodes ont été utilisées comme la modélisation, la géochimie ou encore la télédétection. La modélisation a mis en évidence sue les débits des passes restent difficiles à simuler, la géochimie a permis de mettre en avant les proportions d'eau irriguée dans les bassins versants et la télédétection les proportions de surface irriguées. A ce jour, le modèle de bilan n'a pu être calibré. Il nous permet d'avoir une vision globale simplifiée du fonctionnement de l'étang du Vaccarès.

6-2 Perspectives

A court terme, plusieurs étapes restent à faire pour pouvoir passer à l'étape de Validation-Calibration du modèle. D'abord, il faudrait compléter les analyses géochimiques (isotope et conductivité). Puis, mettre à jour la base de données d'occupation du sol. Ensuite, pour avoir une idée des échanges entre les étangs lancer la simulation du modèle TELEMAC-2D sur la période 2008-2013. On peut imaginer améliorer les données du modèle GR4J en créant un modèle comportant plus de paramètres pour le contraindre. On peut aussi, affiner le modèle GR4J en y intégrant les compositions isotopiques. Pour terminer par effectuer l'analyse de sensibilité et la robustesse.

7- Bibliographie

Bouchez, C., Goncalves, J., Deschamps, P., Vallet-Coulomb, C., Hamelin, B., Doumnang, J-C., Sylvestre, F., 2016. Hydrological, Chemical, and Isotopic Budgets of Lake Chad: A Quantitative Assessment of Evaporation, Transpiration and Infiltration Fluxes. Hydrology and Earth System Sciences 20, nº 4,1599-1619. doi:10.5194/hess-20-1599-2016.

Boutron, O., Bertrand, O., Fiandrino, A., Höhener, P., Sandoz, A., Chérain, Y., Chauvelon, P., 2015. An Unstructured Numerical Model to Study Wind-Driven Circulation Patterns in a Managed Coastal Mediterranean Wetland: The Vaccarès Lagoon System. Water, 7(11), 5986–6016. doi : 10.3390/w7115986

BRL ingénierie, 2014. Etude de la gestion quantitative et des débits du Rhône en période de basses eaux. Phase 3 – Document C : Impact d'une baisse des débits d'étiage sur la salinisation des hydrosystèmes souterrains en Camargue. Référence document : 800420_Ph3_C_Salinisation_Nappes_Camargue.

Chauvelon, P., Sandoz, A., Heurtaux, V., Berceaux, A., 2000. Satellite remote sensing and GIS used to quantify water input for rice cultivation (Rhône delta, France). Remote Sensing and Hydrology, n°267.

Chauvelon, P., Tournoud, M.G., Sandoz, A., 2003. Integrated hydrological modelling of a managed coastal Mediterranean wetland (Rhone delta, France) : initial calibbration. Hydrology et Earth Système Scienences, n°7(1), 123-131.

Craig, H., Gordon, L.T., 1965. Isotopic oceanography : D and 18O variations in ocean and marine atmosphere Proc. Symp. Marine Geochemistry, Vol. 3, University of Rhode Island

Delattre, H., Vallet-Coulomb, C., Songozini, Songozno, C., 2015. Deuterium excess in the atmospheric water vapour of a Mediterranean coastal wetland: regional vs.local signatures. Atmospheric Chemistry and Physics, n°15, 10167-10181. doi :10.5194/acp-15-10167-2015

Durozoy, G., 1972. Evaluation des ressources hydrauliques. Carte hydrogéologique du département des Bouches-Du-Rhône. Notice explicative échelle 1/200 000. Référence document : 72 SGN 394 RC

Gibson, J. J., et T. W. D. Edwards., 2002. Regional Water Balance Trends and Evaporation-Transpiration Partitioning from a Stable Isotope Survey of Lakes in Northern Canada: REGIONAL WATER BALANCE USING STABLE ISOTOPES. Global Biogeochemical Cycles 16, no 2, 10-1-10-14. doi :10.1029/2001GB001839

Hanqiu, X., 2006. Modification of normalised difference water index (NDWI) to enhance open water features in remotely sensed imagery. International Journal of Remote Sensing, Vol. 27, No. 14, 20 July 2006, 3025–3033. doi : 10.1080/01431160600589179

Höhener, P., Comoretto, L., Housari, A., Chauvelon, P., Pichaud, M., Chérain, Y., Chiron, S., 2010. Modeling anthropogenic substances in coastal xetlands: Application to herbicides in the Camargue (France). Environmental Modeling and Software, 1837-1844.

Horita, J., Wesoloski, D., 1994. Liquid-vapor fractionation of oxygen and hydrogen isotopes of water fron the freezing to the critical temperature. Geochimica et Cosmochimica Acta, Vol.58, n° 16, 3425-3427.

IAEA, 2001. Environmental Isotopes in the Hydrological Cycle: Principles and Applications IHP-V Technical Documents in Hydrology, Nº 39.

Loubet, A. Modélisation de l'Hydrosystème Vaccarès : Contribution à une Gestion Adaptative des Ressources en eau Dans le Delta du Rhône, France., 2012. Aix-Marseille University : Marseille, France.

Mayr, C., Lücke, A., Stichler, W., Trimborn, P., Ercolano, B., Oliva, G., Ohlendorf, C., Soto, J., Fey, M., Haberzettl, T., Janssen, S., Scha¨bitz, F., Schleser, G.H., Wille, M., Zolitschka, B., 2007. Precipitation origin and evaporation of lakes in semi-arid Patagonia (Argentina) inferred from stable isotopes (d18O, d2H). Journal of Hydrology 334, 53–63. doi: 10.1016/j.jhydrol.2006.09.025.

Majoube, M., 1971. Fractionnement en oxygène-18 et en deutérium entre l'eau et sa vapeur. Journal of Chemical Physics 197, 1423–1436.

Merlivat, L., 1978. The dependance of bulk evaporation coefficients on air-water interfacial conditions as determined by the isotopic method. Journal of Geophysical Research, 83*(*C6*)*, 2977–2980, *doi:10.1029/JC083iC06p02977*.

Vallès, V., Simler, R., Daniel, M., Belkhiri, D., Trolet, E., Olioso, A. (2009). Étude des relations hydrosalines entre l'étang du Vaccarès et les nappes superficielles voisines. Impact du climat et de l'irrigation. Teneur en eau et transferts en milieux poreux : mesures et statistiques à l'échelle stationnelle (p. 59). Presented at 34. Journées scientifiques du GFHN, Aix-en-Provence, FRA (2009-11-25 - 2009-11-26). Référence document : http://prodinra.inra.fr/record/44714

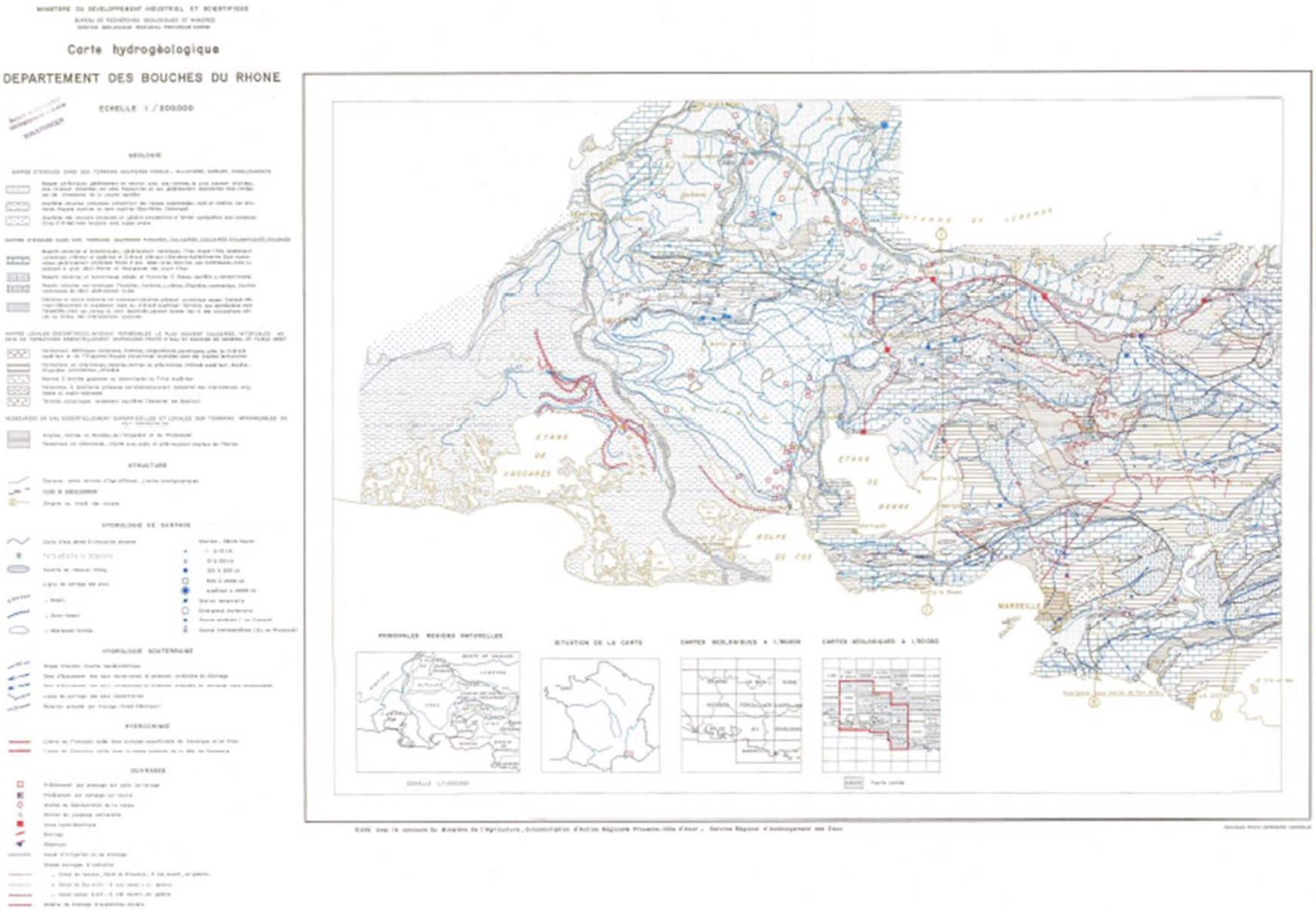
Vallet-Coulomb, C., Gasse, F., Robison, L., & Ferry, L., 2006. Simulation of the water and isotopic balance of a closed tropical lake at a daily time step (Lake Ihotry, South-West of Madagascar). Journal of Geochemical Exploration, 88(1-3), 153–156. doi : 10.1016/j.gexplo.2005.08.103

Vallet-Coulomb, C., Gasse, F., Robison, L., Ferry, L., Van Campo, E., & Chalié, F., 2006. Hydrological modeling of tropical closed Lake Ihotry (SW Madagascar): Sensitivity analysis and implications for paleohydrological reconstructions over the past 4000 years. Journal of Hydrology, 331(1-2), 257–271. doi :10.1016/j.jhydrol.2006.05.026

Yi, Y., Brock, B. E., Falcone, M. D., Wolfe, B. B., & Edwards, T. W. D., 2008. A coupled isotope tracer method to characterize input water to lakes. Journal of Hydrology, 350(1-2), 1–13. doi : 10.1016/j.jhydrol.2007.11.008

Annexes

Annexe 1: Notice et carte hydrogéologique 1972



MINISTERE DU DEVELOPPEMENT INDUSTRIEL ET SCIENTIFIQUE

BUREAU DE RECHERCHES GEOLOGIQUES ET MINIERES

Carte hydrogéologique

DEPARTEMENT DES BOUCHES DU RHONE

ECHELLE 1 / 200.000

GEOLOGIE

STRUCTURE

HYDROLOGIE DE SURFACE

HYDROLOGIE SOUTERRAINE

HYDROCHIMIE

OUVRAGES

ETANG DE VAUCARES

ETANG DE BERRE

GOLFE DE FOS

MARSEILLE

PRINCIPALES REGIONS NATURELLES

SITUATION DE LA CARTE

CARTES HYDROLOGIQUES A 1/50.000

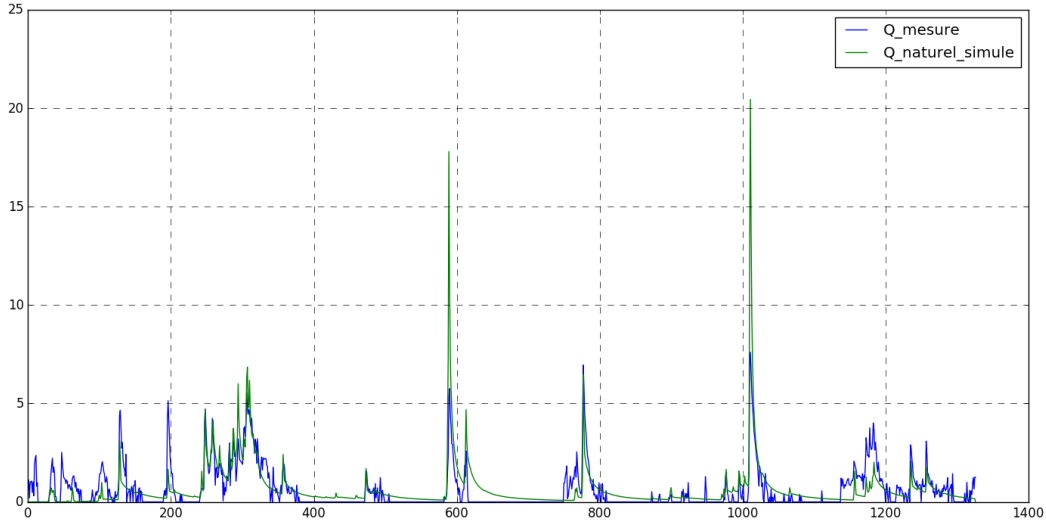
CARTES GEOLOGIQUES A 1/80.000

ECHELLE 1/1.000.000

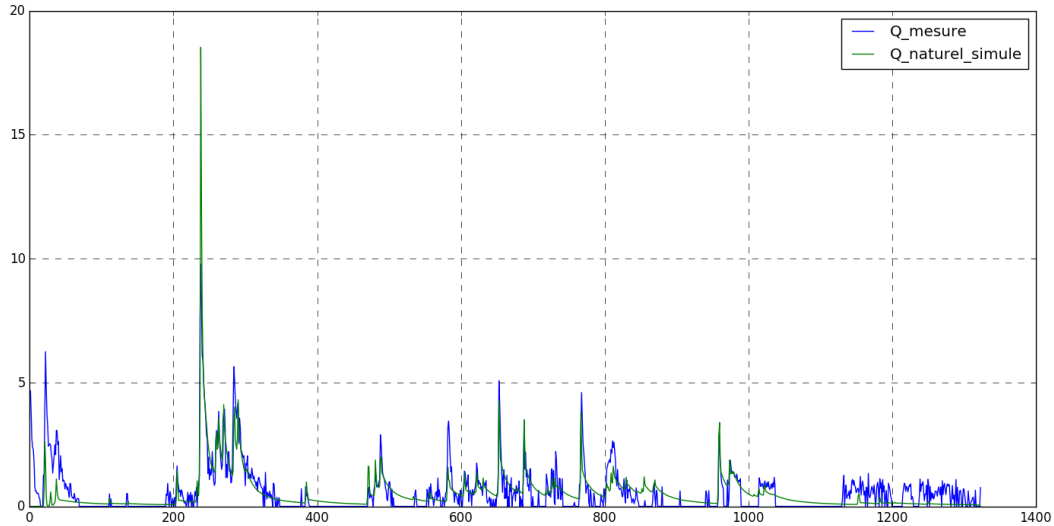
EDITE avec le concours du Ministère de l'Agriculture, Circonscription d'Action Régionale Provence-Côte d'Azur - Service Régional d'Aménagement des Eaux

Annexe 2: Modèle Pluie-débit GR4J ; Calibration, Validation et Période totale

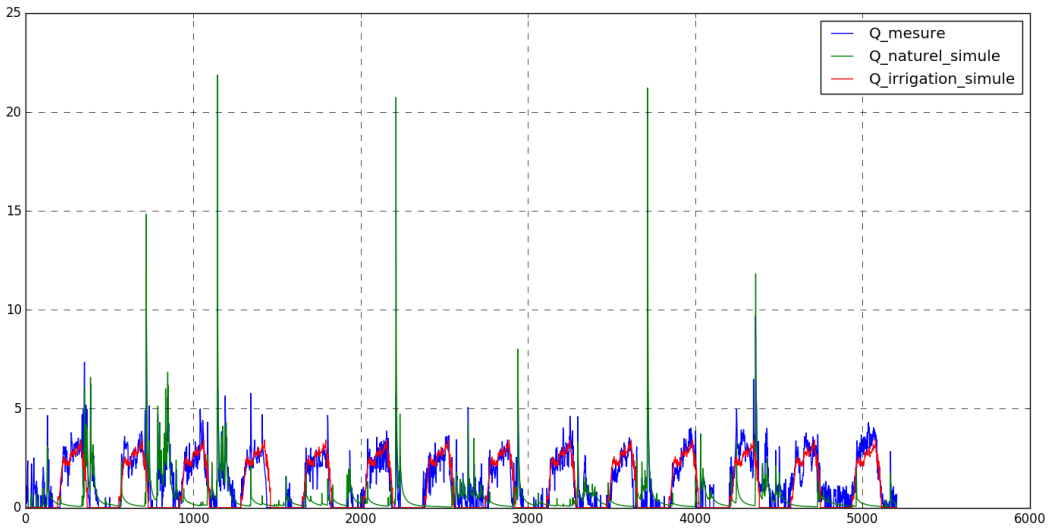
Etape de Calibration



Etape de Validation



Extrapolation sur 14 ans



Annexe 3 : Critère de performance

Récapitulatif

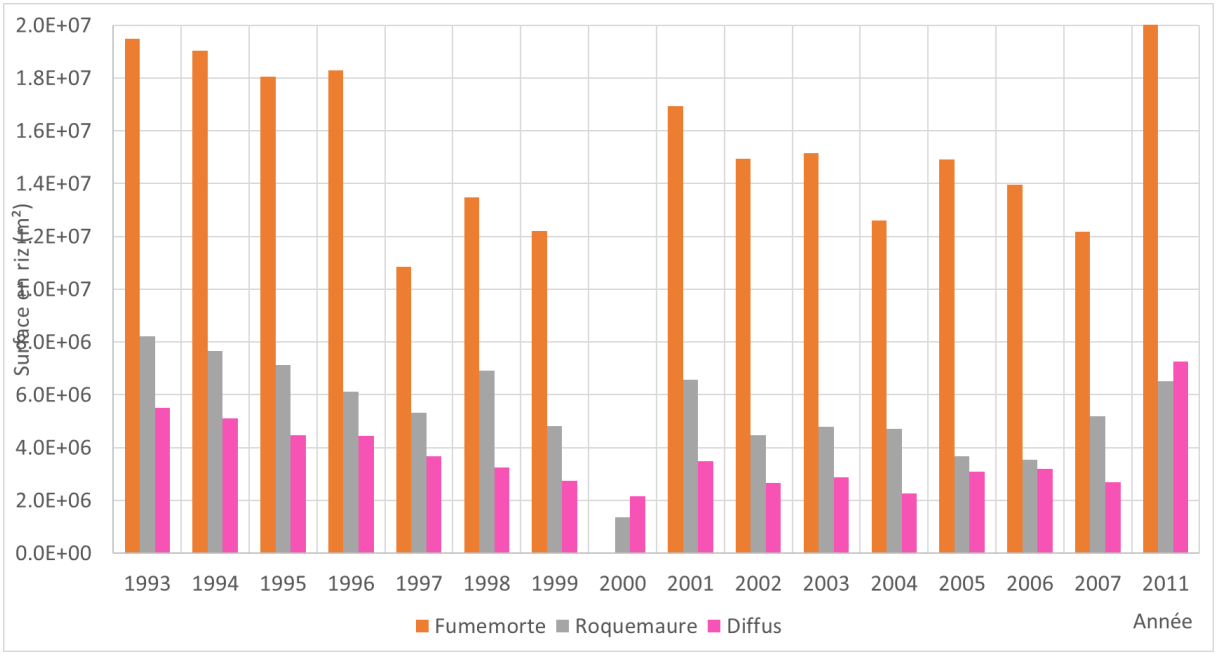
Paramètres	Modèle GR4J		
Périodes	Hors irrigation (1 octobre – 7 avril)		
X1	25		
X2	-5		
X3	300		
X4	1.7		
Etapes	« Calibration » 7 ans	« Validation » 7 ans	Période totale 14 ans
Nash	-1.813	0.989	0.987
$\frac{\bar{Q}_{sim}}{\bar{Q}_{obs}}$	1.091	0.94	1.056

Année par année

Années	Nash (Python)	Nash	python $\frac{\bar{Q}_{sim}}{\bar{Q}_{obs}}$	$\frac{\bar{Q}_{sim}}{\bar{Q}_{obs}}$	Q_{obs} Moyen En m3/s	$\lvert Q_{obs} - Q_{sim} \rvert$ en m3/s
1993-1994	0.893	0.11	0.379	0.38	0.628	0.389
1994-1995	0.984	0.55	0.278	0.83	0.551	0.397
1995-1996	0.899	0.64	0.8	0.98	1.457	0.29
1996-1997	0.986	0.55	0.768	1.07	1.292	0.299
1997-1998	0.984	0.41	0.36	2.42	0.086	0.055
1998-1999	-0.314	0.58	0.522	1.63	0.215	0.103
1999-2000	-2.559	-1.75	1.605	2.77	0.318	0.192
2000-2001	0.686	0.47	0.621	1	0.678	0.256
2001-2002	0.918	0.83	0.384	1.28	0.399	0.245
2002-2003	0.913	0.41	0.577	1.24	0.431	0.182
2003-2004	0.925	-0.17	1.399	2.07	0.443	0.177
2004-2005	-0.512	0.55	0.592	1.52	0.295	0.12
2005-2006	-10.926	0.06	0.248	0.52	0.938	0.705
2006-2007	0.999	-0.81	0.028	0.29	0.472	0.458

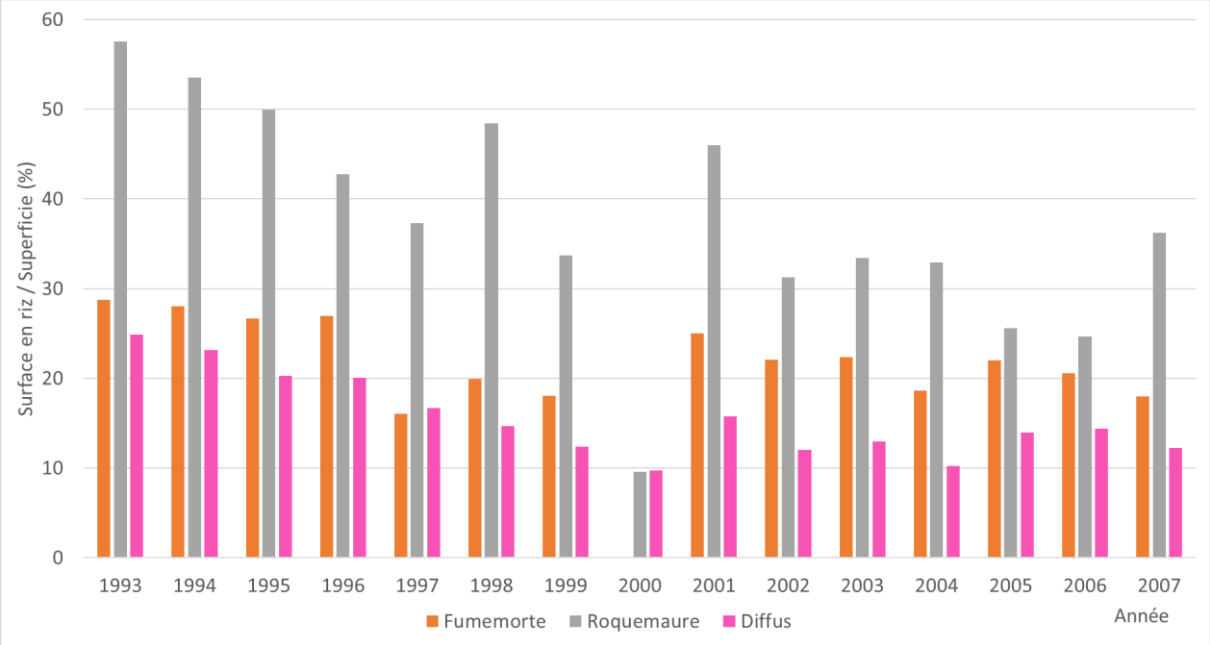
Annexe 4 : SIG Surfaces irriguées par an de 1993 à 2007 et 2011

	Surface en riz (m²)		
Années	Fumemorte	Roquemaure	Diffus
1993	1.95E+07	8.23E+06	5.49E+06
1994	1.90E+07	7.65E+06	5.11E+06
1995	1.81E+07	7.14E+06	4.48E+06
1996	1.83E+07	6.12E+06	4.44E+06
1997	1.09E+07	5.33E+06	3.68E+06
1998	1.35E+07	6.92E+06	3.24E+06
1999	1.22E+07	4.81E+06	2.74E+06
2000		1.36E+06	2.15E+06
2001	1.69E+07	6.57E+06	3.48E+06
2002	1.50E+07	4.46E+06	2.66E+06
2003	1.52E+07	4.77E+06	2.87E+06
2004	1.26E+07	4.70E+06	2.26E+06
2005	1.49E+07	3.66E+06	3.09E+06
2006	1.39E+07	3.53E+06	3.19E+06
2007	1.22E+07	5.18E+06	2.70E+06
2011	2.03E+07	6.50E+06	7.25E+06



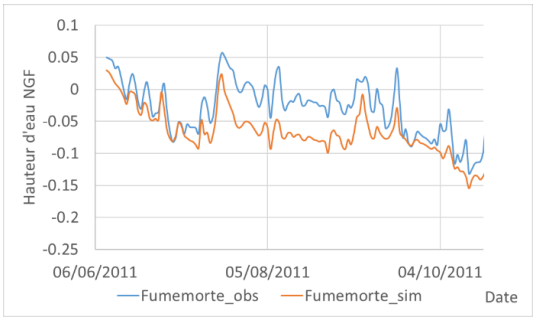
Annexe 5: SIG Surfaces irriguées / Surface totale par an 1993-2007

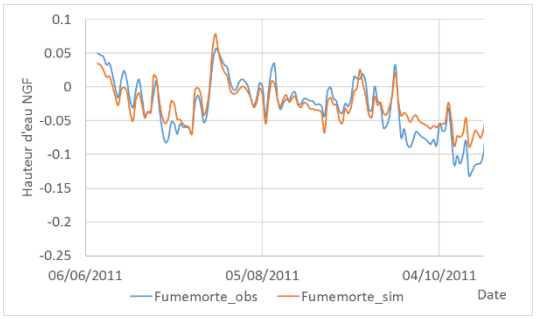
	(Surface en riz / Superficie)*100		
Années	**Fumemorte**	**Roquemaure**	**Diffus**
1993	28.7	57.5	24.8
1994	28.1	53.5	23.1
1995	26.6	49.9	20.2
1996	27.0	42.8	20.1
1997	16.0	37.3	16.7
1998	19.9	48.4	14.6
1999	18.0	33.7	12.4
2000	0.0	9.5	9.7
2001	25.0	46.0	15.7
2002	22.0	31.2	12.0
2003	22.3	33.4	13.0
2004	18.6	32.9	10.2
2005	22.0	25.6	14.0
2006	20.6	24.7	14.4
2007	17.9	36.2	12.2
Moyenne 14 ans	**20.9** ± 4.1	**37.5** ± 12.1	**15.5** ± 4.4

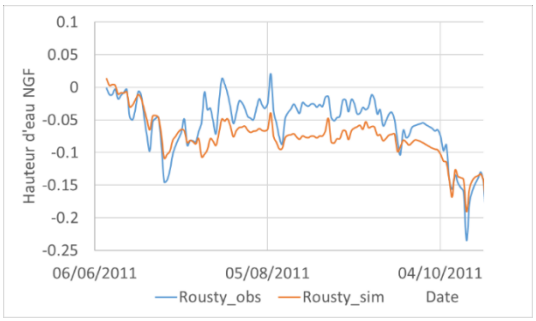


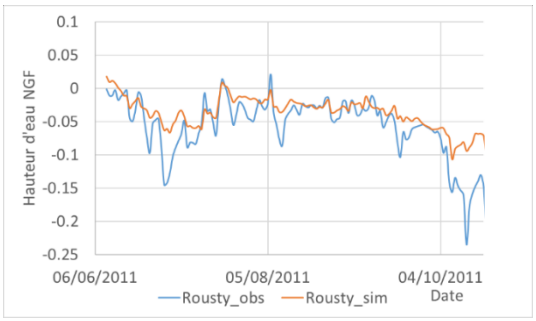
Annexe 6: Modèle TELEMAC-2D; Représentation des niveaux d'eau en 2011. A gauche modèle initial sans ajout de volume; à droite modèle initial avec réajustement de volume à chaque pas de temps sur les différents limnigraphes.

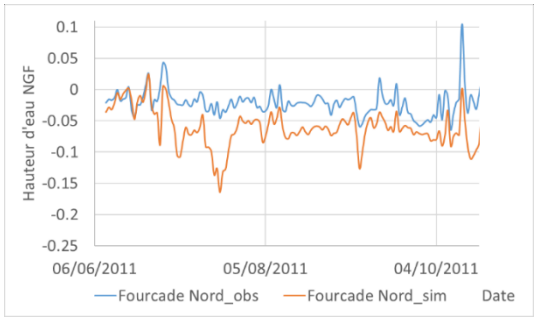
Année 2011

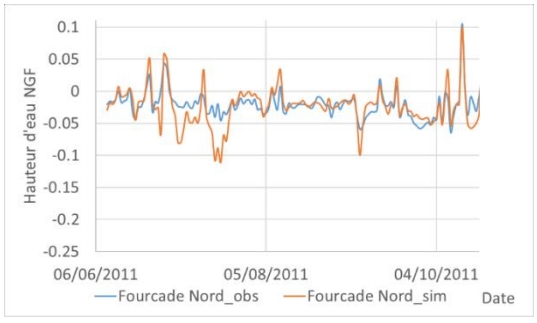


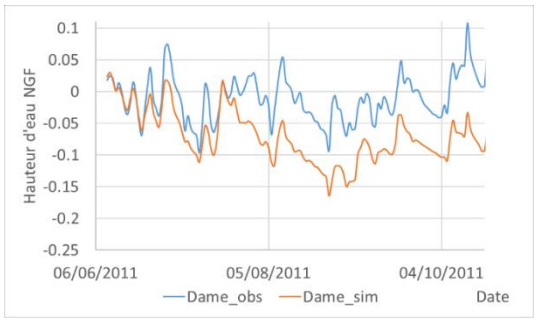


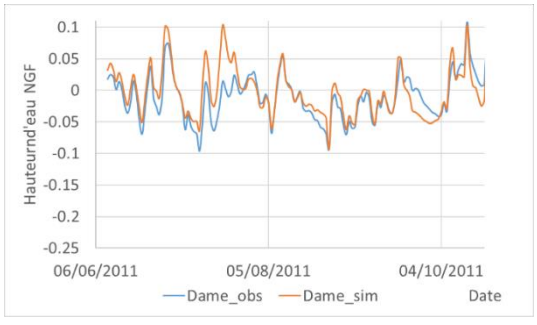




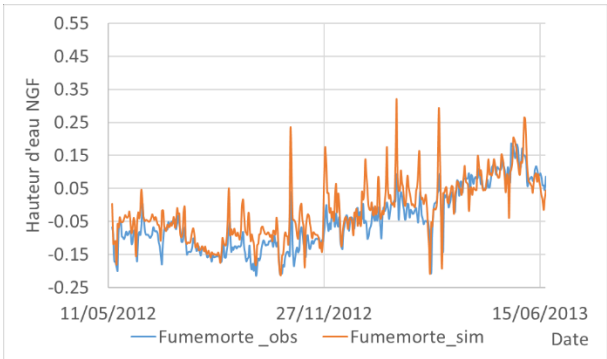


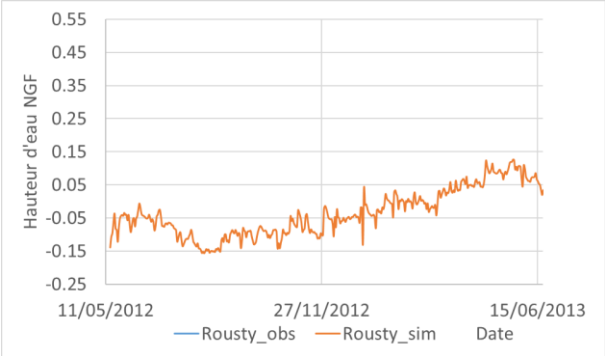


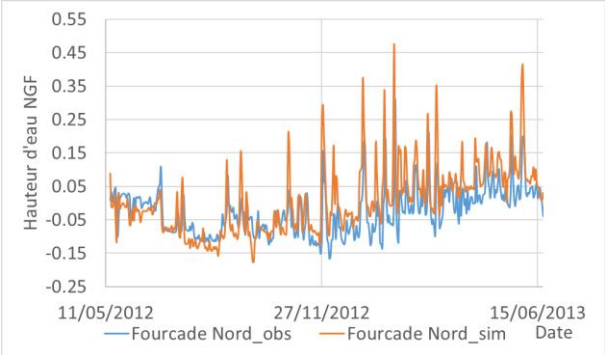


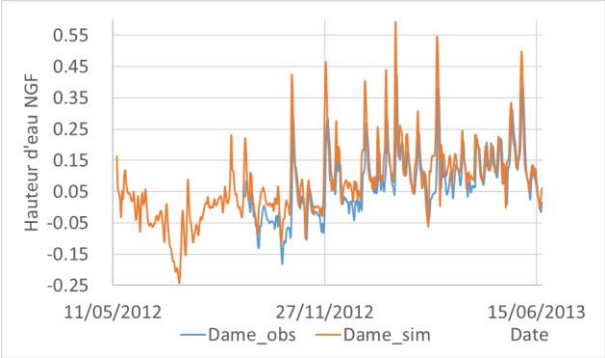


Annexe 7: Modèle TELEMAC-2D ; Représentation des niveaux d'eau 2012-2013 modèle initial avec réajustement de volume à chaque pas de temps sur les différents limnigraphes.

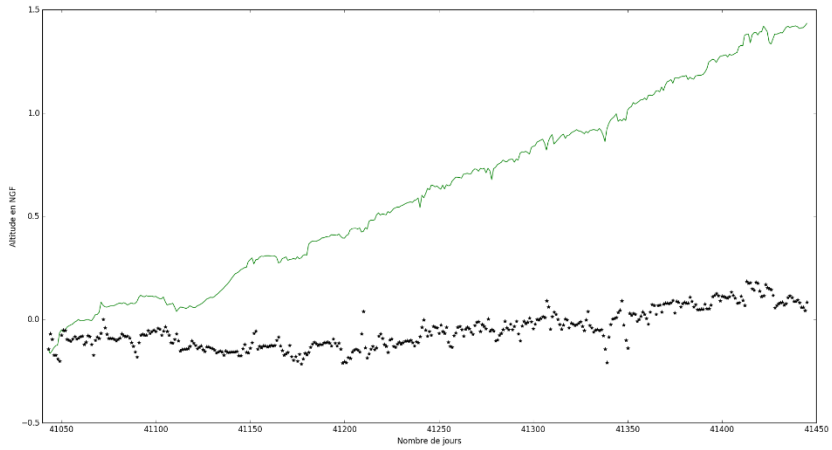




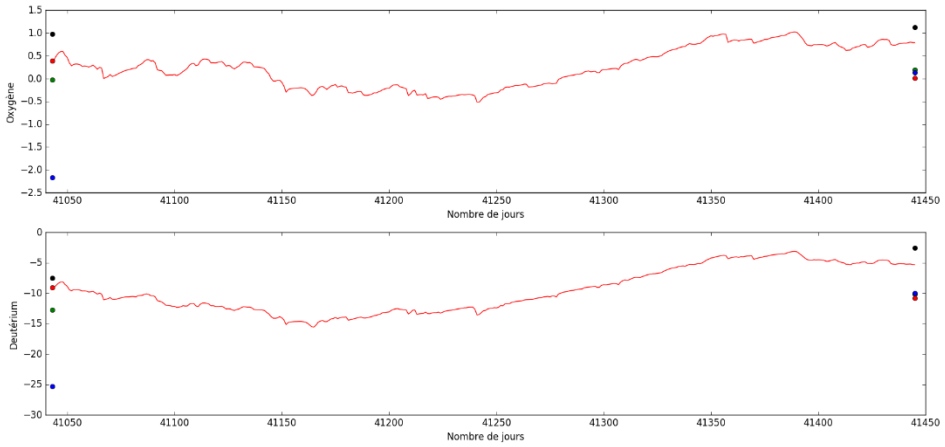




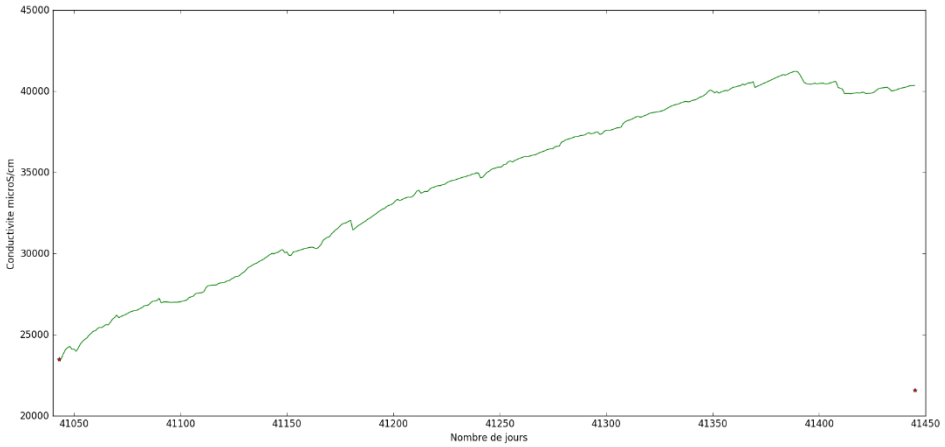
Annexe 8: Simulation sur la période globale du 14 mai 2012 au 20 juin 2013. Cette simulation comporte les débits des passes simulés par TELEMAC-2D.



Hauteur d'eau observée (en étoile noire) et simulée (en trait vert) de l'étang du Vaccarès sur la période du 14/05/2012 au 20/06/2013.

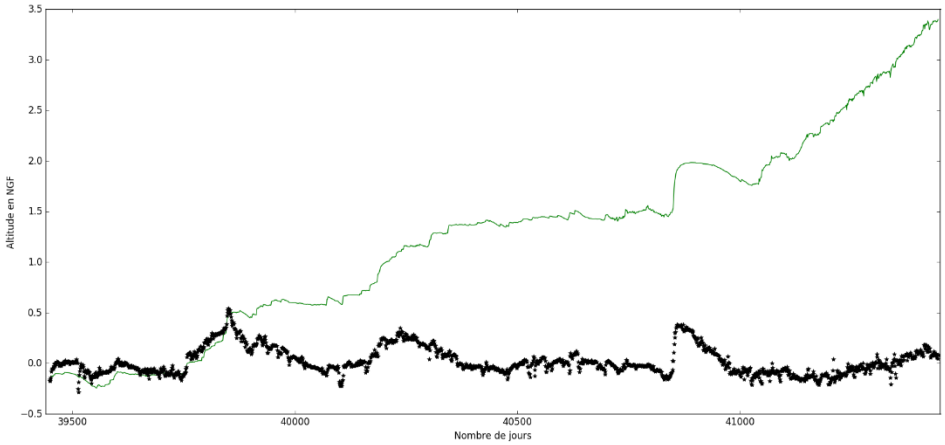


Evolution de la composition isotopique $\delta^{18}O$ au cours du temps sur la période du 14/05/2012 au 20/06/2013. Le trait représente la simulation de l'échantillon Vaccarès Ouest, les ronds les données expérimentales. Le rond rouge représente Vaccarès Ouest ; le vert Vaccarès Centre ; le bleu Vaccarès Est, le noir Pointe de Mornès.

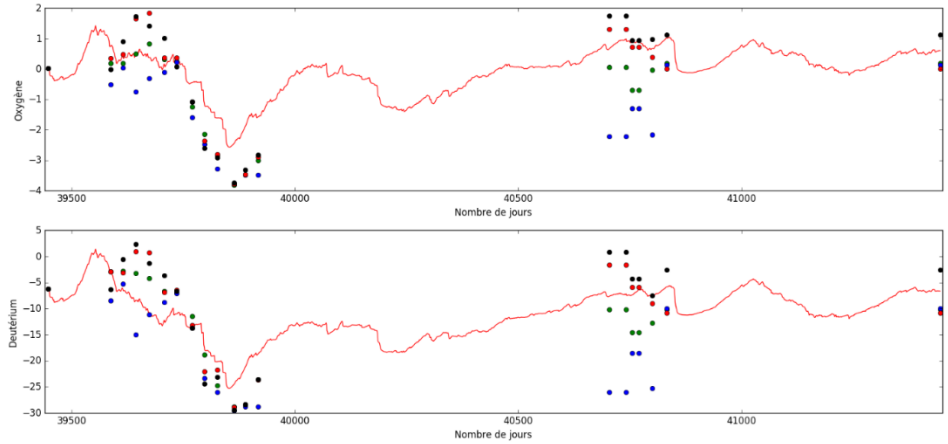


Salinité observée (en trait vert) et simulées (en croix rouge) de l'étang du Vaccarès sur la période du 14/05/2012 au 20/06/2013.

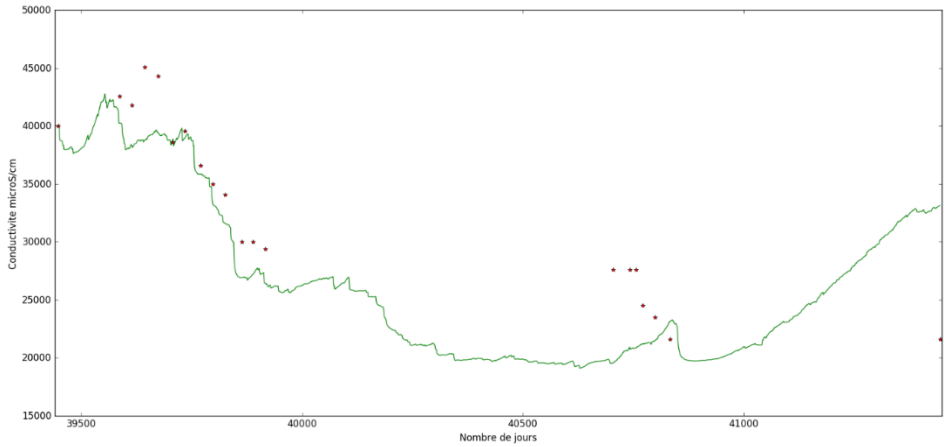
Annexe 9: Simulation sur la période globale La simulation s'étend du 1er janvier 2008 au 20 juin 2013. Cette simulation comporte les débits des passes simulés par TELEMAC-2D.



Hauteur d'eau observée (en étoile noire) et simulée (en trait vert) de l'étang du Vaccarès sur la période du 01/01/2008 au 20/06/2013.



Evolution de la composition isotopique $\delta^{18}O$ au cours du temps sur la période du 01/01/2008 au 20/06/2013. Le trait représente la simulation de l'échantillon Vaccarès Ouest, les ronds les données expérimentales. Le rond rouge représente Vaccarès Ouest ; le vert Vaccarès Centre ; le bleu Vaccarès Est, le noir Pointe de Mornès.



Salinité observée (en trait vert) et simulées (en croix rouge) de l'étang du Vaccarès sur la période du 01/01/2008 au 20/06/2013.