



Université de Montpellier - Année Universitaire 2016-2017

Département des Sciences de la Terre et de l'Eau et de l'Environnement de Montpellier

Master 2 Eau – Spécialité Gestion des Littoraux et des Mers

Rapport de stage de BONNET Anaïs :

## ÉTUDE DU FONCTIONNEMENT HYDROLOGIQUE D'UNE ZONE HUMIDE EN CONTEXTE MÉDITERRANÉEN : LE SITE NATURA 2000 « TROIS MARAIS »

Stage effectué avec le « Parc Naturel Régional de  
Camargue »

Mas du Pont de Rousty

13200 Arles

En partenariat avec le « Syndicat Mixte de  
Gestion de la Nappe phréatique de la Crau »

20, Cité des Entreprises, Z.I du Tubé

13800 Istres

Du 01/03/2017 au 31/08/2017

Maîtres de stages : Lombardini Katia, Chargée de mission Natura 2000 (PNRC)

Et : Villesseche David, Chargé de mission Réseaux,  
Observatoire et Connaissances (SYMCRAU)

Responsables de la formation : S. PISTRE,  
S. PIOCH, H. REY-VALETTE,  
C.BAZART, B. DEVILLERS



# Remerciements

---

Je tiens tout d'abord à remercier Katia Lombardini pour m'avoir donné l'opportunité de réaliser ce stage auprès du Parc Naturel Régional de Camargue. Grâce à elle, j'ai pu travailler dans d'excellentes conditions sur un sujet particulièrement intéressant, captivant et dont j'ai pris beaucoup de plaisir à traiter. Merci également pour sa disponibilité et son aide mais également pour avoir mis à ma disposition les documents et les outils nécessaires à l'avancement de ce stage. Je tiens également à la remercier pour le soutien, l'intérêt et la gentillesse dont elle a fait preuve envers moi durant toute la durée de ce stage.

Je tiens également à remercier David Villesseche pour sa patience et sa disponibilité tout au long de ce stage. Il a su répondre à toutes mes questions avec précision et m'expliquer clairement les choses avec pédagogie. Il a également su me guider sur toutes les démarches scientifiques à suivre, et m'a permis de réussir à travailler efficacement et dans d'excellentes conditions.

Je leur suis reconnaissante de leurs qualités pédagogiques et scientifiques, leur encadrement et leurs nombreux conseils tout au long de ce stage.

Ce travail ayant nécessité de nombreuses journées de terrain, je remercie donc les propriétaires et éleveurs qui m'ont permis d'accéder au domaine et m'ont toujours accueilli avec patience et gentillesse : Michel Gallon, Florent Lupi, Tony Amtlia, Charlotte Thibault...

Je tiens également à remercier tout le personnel du SYMCRAU pour leur accueil et leur disponibilité tout au long de mon stage, Charlotte Alcazar, Antoine Bailleux et Christelle Polycarpe. Ainsi que le personnel du Parc Naturel Régional de Camargue, qui a fait preuve d'un accueil très chaleureux à chacune de mes visites.

Je remercie également les Amis des marais du Vigueirat (Gregoire Massez, Leila Debiesse) pour leur connaissance du système et pour nous avoir prêté le bateau qui nous a permis de faire les mesures au courantomètre. Une belle expédition !

Je remercie aussi Adriano Mayer de l'Université d'Avignon pour son aide dans la définition des objectifs et dans la compréhension du système au démarrage de l'étude. Ainsi que Stéphanie Bertrand du CDG13 pour nous avoir permis d'utiliser le courantomètre. Mais aussi, Christine Vallet-Coulomb et Hélène Miche pour leur accueil au CEREGE pour la réalisation des analyses chimiques et isotopiques.



## Table des matières

---

Introduction	1
1 – <u>Présentation du site d'étude</u>	2
1.1 L'aquifère de la Crau	2
1.1.1 Contexte général	
1.1.2 Histoire géologique	
1.1.3 Contexte hydrogéologique	
1.2 Le site d'étude	6
1.2.1 Le site Natura 2000 « Trois marais »	
1.2.2 Description de la biodiversité des marais de Bondoux et du Retour	
2 – <u>Le Plan de gestion des marais de Port-St-Louis-du-Rhône</u>	8
2.1 Contexte et mise en place du Plan de gestion	8
2.2 L'intérêt de la détermination du bilan hydrologique	9
2.3 Les objectifs de l'étude	9
3 – <u>Matériels et Méthodes</u>	10
3.1 La démarche de la réalisation du bilan hydrologique/hydraulique	10
3.2 Conceptualisation de la zone d'étude et approche méthodologique	11
3.3 Hydrologique de surface	12
3.4 Hydrogéologie	13
3.5 Données climatiques : le suivi pluviométrique	15
3.6 Estimation de l'Evapotranspiration	15
4 – <u>Résultats et discussions</u>	17
4.1 Synthèse des résultats obtenus	17
4.1.1 Données climatiques	
4.1.2 Hydrologie de surface	
4.1.3 Hydrogéologie	
4.2 Compréhension du système et discussions	30
Conclusion générale	41
Bibliographie	43
Annexes	47



# Liste des figures

---

Figure 1. Cladiaie dans les marais de Port-Saint-Louis	3
Figure 2. Carte géologique de la Crau, d'après Infoterre	4
Figure 3. Irrigation d'une prairie de foin (Crau humide)	5
Figure 4. Localisation de l'aquifère de la Crau, du site « Trois-Marais », et du site d'études	7
Figure 5. Marais à marisques dans le marais du retour	7
Figure 6. Fonctionnement des marais à marisques, d'après Beck N. et al, 2004	8
Figure 7. Modèle conceptuel au départ de l'étude	11
Figure 8. Echelle limnimétrique dans le canal du Colmatage	12
Figure 9. Carte de la localisation des échelles du site d'après QGIS	12
Figure 10. Le canal du Centre-Crau et sa martelière	13
Figure 11. Creusement à la tarière des piézomètres	14
Figure 12. Graphique représentant les cumuls de précipitations (mars-juillet 2017)	17
Figure 13. Bilan pluviométrique pour les années 2016-2017	17
Figure 14. Volumes d'eau reçus sur le site par mois	18
Figure 15. Représentation graphique de l'évolution des échelles limnimétriques au cours du temps	19
Figure 16. Evolution du niveau d'eau entre le canal Centre-Crau et la buse au canal du Retour	22
Figure 17. Représentation graphique de l'évolution du niveau piézométrique en x20bis	23
Figure 18. Représentation graphique de l'évolution des échelles et de la sonde x20bis	24
Figure 19. Représentation graphique de l'évolution du niveau d'eau dans les piézomètres creusés	25
Figure 20. Carte piézométrique du mois de mars pour notre site, d'après Surfer et QGIS	26
Figure 21. Diagramme de Piper pour les analyses chimiques	27
Figure 22. Représentation graphique des résultats de l'analyse isotopique	29
Figure 23. Evolution des échelles limnimétriques et de la pluviométrie	31
Figure 24. Estimation des variations de volumes d'eau sur les marais (Bondoux et Retour)	32
Figure 25. Evolution du niveau piézométrique en x20bis et pluviométrie	34
Figure 26. Zoom sur la carte piézométrique	35
Figure 27. Coupe représentant le niveau du sol et le niveau piézométrique	36
Figure 28. Modèle conceptuel en fin de l'étude	38





# Liste des tableaux

---

Tableau 1. Récapitulatif des dates et lieux de prélèvements	15
Tableau 2. Bilan hydrique estimé sur l'année 2016 et début 2017	19
Tableau 3. Liste des abréviations pour les points du site	20
Tableau 4. Analyse statistique par corrélation sur les points du site	20
Tableau 5. Récapitulatif des mesures au courantomètre	21
Tableau 6. Analyse statistique de la corrélation entre les échelles et la sonde automatique	24
Tableau 7. Récapitulatif des analyses chimiques (chlorures, sulfates, nitrates)	28



# Table des abréviations

---

**AOC** : L'appellation d'origine contrôlée (AOC) est un label officiel français identifiant un produit dont les étapes de fabrication (production et transformation) sont réalisées dans une même zone géographique et selon un savoir-faire reconnu.

**cad** : C'est-à-dire.

**CC** : Canal du Centre-Crau.

**DMM** : Droite météorique mondiale.

**ETP** : Evapotranspiration potentielle.

**ETR** : Evapotranspiration réelle.

**Exut CL** : Exutoire du Canal du Colmatage vers l'étang du Landre.

**i** : gradient hydraulique.

**K** : Perméabilité ou conductivité hydraulique.

**M1** : Echelle limnimétrique placée à la buse dans le canal du Retour.

**M2** : Echelle limnimétrique placée dans le Canal du Colmatage.

**M3** : Echelle limnimétrique placée à l'exutoire du canal du Colmatage vers l'étang du Landre.

**M4** : Echelle limnimétrique placée dans le marais amont.

**M5** : Echelle limnimétrique placée dans le marais aval.

**M6** : Echelle limnimétrique placée à la fin du canal du Retour.

**M7** : Echelle limnimétrique placée à la fin du canal du Colmatage, au niveau du pont.

**np** : Niveau piézométrique.

**P** : Précipitations.

**PE** : Pluie efficace.

**Q** : débit.

**QSIN** : Débit de débordement de la nappe de la Crau.

**QSMAR** : Débit de résurgence de la nappe qui alimente les marais.

**Ru** : Réserve utile.

**S1** : Sonde automatique de pression et de température placée dans le piézomètre x20bis.

**SDAGE** : Le Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE) est une définition du dictionnaire environnement et développement durable. Le Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE) a été institué par la loi sur l'eau de 1992.



# Glossaire

---

**Aquifère** : Un aquifère est une formation géologique ou une roche, suffisamment poreuse et/ou fissurée (pour stocker de grandes quantités d'eau) tout en étant suffisamment perméable pour que l'eau puisse y circuler librement.

**Bassin d'effondrement** : En géologie, un graben (terme d'origine allemande signifiant « fossé ») est un fossé tectonique d'effondrement entre des failles normales.

**Biodiversité** : La biodiversité désigne la diversité du monde vivant à tous les niveaux : diversité des milieux (écosystèmes), diversité des espèces, diversité génétique au sein d'une même espèce.

**Biosphère** : La biosphère est l'ensemble des organismes vivants et leurs milieux de vie (englobe l'atmosphère, l'hydrosphère et la lithosphère).

**Biseau salé** : Partie d'un aquifère côtier envahi par l'eau salée (généralement marine), comprise entre la base de l'aquifère et une interface de séparation eau douce / eau salée.

**Canaux d'assainissement** : Ce dit des canaux drainant l'eau issue des prairies d'irrigations de foin.

**Cladiaie** : *Cladium mariscus* (ou marisque) est une plante. Une formation végétale dominée par la marisque est appelée cladiaie.

**Cône de déjection** : Un cône de déjection ou cône alluvial est un amas de débris transportés par un torrent au débouché d'une vallée ou en contrebas d'un versant ; il a une forme triangulaire.

**Coustière** : Intervalle qui, dans la Camargue, sépare les marais des pâturages.

**Coussoul** : Le coussoul est un écosystème unique de la plaine de la Crau, résultant des conditions climatiques particulières du milieu. La présence d'un poudingue dans le sous-sol, isole le terrain superficiel de la nappe phréatique, empêchant ainsi la végétation de se développer, de plus, le mistral particulièrement présent contribue également à la sécheresse du milieu.

**Crétacé** : Le Crétacé est une période géologique qui s'étend de  $\approx 145,0$  à  $66,0$  Ma. Elle se termine avec la disparition des dinosaures, des ammonites et de nombreuses autres formes de vie.

**Cryoclastique** : Relatif à la cryoclastie, fragmentation des roches par brusques variations de températures, par alternances de gel et de dégel.

**Delta** : Un delta est un type d'embouchure qu'un cours d'eau peut former à l'endroit où il se jette dans un océan, une mer ou un lac.

**Drainage** : Évacuation, spontanée ou facilitée par un réseau de drains ou de fossés, de l'eau en excès dans un sol trop humide.

**Ecobuage** : Mode de préparation à la culture d'un terrain engazonné, consistant à en détacher, sécher puis brûler la couche herbue (avec la terre adhérant aux racines), pour y répandre ensuite les cendres (à distinguer du brûlis).

**Ecosystème** : Un écosystème est un ensemble dynamique constitué d'un milieu naturel ou biotope (eau, sol, climat, lumière...), caractérisé par des conditions écologiques particulières et des êtres vivants ou biocénose (animaux, plantes, microorganismes) qui l'occupent.

**Ecrêtement des crues** : Action consistant à abaisser le débit de pointe d'une crue, soit par stockage dans un ouvrage spécifique, soit par extension des zones d'expansion des crues.

**Endémique** : Ce qui est particulier à une localité ou une région donnée.

**Endogène** : L'adjectif endogène qualifie ce dont la cause est interne, ce qui est produit, ce qui émane de l'intérieur d'un organisme ou d'une structure.

**Erosion** : En géomorphologie, l'érosion est le processus de dégradation et de transformation du relief, et donc des roches, qui est causé par tout agent externe (donc autre que la tectonique) tel que la pluie ou le vent par exemple.

**Etang** : Un étang est une étendue d'eau stagnante, naturelle ou artificielle, généralement de petite taille et de faible profondeur (plus faible qu'un lac).

**Evapotranspiration** : Une évapotranspiration est un phénomène par lequel les êtres vivants (végétaux surtout) perdent de l'eau sous forme de vapeur. C'est donc une perte d'eau due à deux phénomènes : l'évaporation de l'eau, du sol, des plantes, et la transpiration des plantes.

**Exutoire** : L'exutoire hydrologique est le passage par lequel s'écoule le débit sortant d'un réservoir ou d'un cours d'eau.

**Granulométrie** : La granulométrie a pour objet la mesure de la taille des particules élémentaires qui constituent les ensembles de grains de substances diverses.

**Hydrocarbure** : Un hydrocarbure (HC) est un composé organique constitué exclusivement d'atomes de carbone (C) et d'hydrogène (H). Leur formule brute est donc de la forme :  $C_nH_m$ , sachant que n et m sont deux entiers naturels.

**Illite** : Minéral argileux de structure et de composition proches de celles des micas, abondant dans les sols des régions tempérées.

**Intrusion saline** : Phénomène au cours duquel une masse d'eau salée pénètre à l'intérieur d'une masse d'eau douce.

**Jurassique** : Le Jurassique est une période géologique qui s'étend de - 201,3 à - 145 millions d'années (Ma). Le Jurassique constitue la période ou le système intermédiaire de l'ère Mésozoïque laquelle est aussi connue sous le nom d'« ère des reptiles ».

**Lagune** : Une lagune est une étendue d'eau à salinité variable, séparée de la mer par un cordon littoral ouvert par un grau et résultant de la fermeture de baie ennoyée par une transgression marine récente.

**Lauron** : Le mot lauron vient du provençal « lauroun », qui signifie surgeon d'eau. Ce sont des puits naturels, ouverts dans les alluvions récentes de la Crau d'où jaillit une eau claire, douce et fraîche qui se répand le plus souvent dans les marais.

**Limon** : Ensemble de particules de terre mêlées de débris organiques déposées au fond des étangs, des fossés ou entraînées par les eaux courantes dans les parties déclives des terrains.

**Manadier** : Eleveur de troupeaux de chevaux et de taureaux en Camargue.

**Marais tourbeux** : Marais contenant de la tourbe, c'est-à-dire, de la matière combustible d'origine végétale qui se forme par fermentation et carbonisation partielle.

**Marisque** : C'est une plante des marais, à haute et forte tige et aux feuilles raides et coriaces.

**Martelière** : Une martelière est un ouvrage qui permet la distribution des eaux d'irrigation à partir d'un chenal d'amenée de cette eau.

**Matrice** : En géologie, la matrice est le matériau d'une roche composite, constitué de petits grains englobant des grains de plus grosse taille.

**Molasse** : Formation sédimentaire détritique correspondant à un grès calcaire friable.

**Nappe alluviale** : Les nappes alluviales sont des nappes qui circulent dans les sédiments des rivières. Elles se trouvent à faible profondeur et sont donc relativement faciles d'accès pour des prélèvements d'eau.

**Nappe phréatique** : La nappe phréatique est une nappe d'eau que l'on rencontre à faible profondeur. Elle alimente traditionnellement les puits et les sources en eau potable. C'est la nappe la plus exposée à la pollution en provenance de la surface.

**Niche écologique** : La niche écologique est un des concepts théoriques de l'écologie. Il traduit à la fois la « position » occupée par un organisme, une population ou plus généralement une espèce dans un écosystème, la somme des conditions nécessaires à une population viable de cet organisme.

**Phytosanitaire** : Les produits phytosanitaires désignent les produits utilisés pour protéger ou soigner les végétaux.

**Pléistocène** : C'est la plus ancienne époque géologique du Quaternaire et l'avant-dernière sur l'échelle des temps géologiques. Elle s'étend de 2,58 millions d'années à 11 700 ans avant le présent.

**Pliocène** : Sur l'échelle des temps géologiques, le Pliocène est la plus récente époque géologique du Néogène. S'étendant de  $5,332 \pm 0,005$  à  $2,588 \pm 0,005$  millions d'années.

**Poudingue** : Roche sédimentaire détritique de la classe des rudites, composée de galets arrondis réunis par un ciment.

**Prairie humide** : Ce sont des surfaces herbeuses situées en zone alluviale. L'alimentation en eau de ces terrains est essentiellement assurée par une nappe libre plus ou moins proche de la surface. Ces prairies se développent sur des sols riches en alluvions et sont souvent inondées une partie de l'année.

**Pression anthropique** : Pression relative à l'activité humaine. Qualifie tout élément provoque directement ou indirectement par l'action de l'homme : érosion des sols, pollution par les pesticides,...

**Quaternaire** : L'ère quaternaire caractérise l'ère géologique la plus récente, postérieure au Tertiaire avec lequel elle forme le cénozoïque. Elle est marquée par l'apparition de l'Homme.

**Résurgence** : Réapparition à l'air libre, sous forme de grosse source, de l'eau absorbée par des cavités souterraines.

**Résurgence de type vaclusienne** : Se dit d'une résurgence d'une rivière souterraine (telle la fontaine de Vaucluse) qui, à l'aval d'un karst barré par un compartiment imperméable, comporte la branche ascendante d'un siphon.

**Saumâtre** : Qualifiant l'eau d'une lagune, d'un estuaire, d'une mer fermée, qui est composé d'un mélange d'eau douce et d'eau de mer.

**Sédimentation** : La sédimentation est un processus dans lequel des particules de matière quelconque cessent progressivement de se déplacer et se réunissent en couches.

**Siliceux** : Qui contient de la silice, formé de silice.

**Source de débordement** : Une source est à la fois le phénomène et le lieu d'apparition et d'écoulement d'une eau souterraine à la surface du sol. On parle de source de débordement dans le cas de nappes souterraines libres.

**Steppe** : La steppe est un paysage végétal caractéristique des régions de climat tropical à longue saison sèche et des semi-déserts (en particulier les bordures désertiques).

**Substratum** : Le substrat rocheux ou substratum est un terme général qui fait référence à la roche qui repose sous la surface.

**Sylvicole** : La sylviculture est l'activité et l'ensemble des méthodes et pratiques par lesquelles le « sylviculteur » agit sur le développement, la gestion et la mise en valeur d'une forêt ou d'un boisement pour en obtenir un bénéfice économique et/ou certains services profitables à la société.

**Villafranchien** : Le Villafranchien est une subdivision de l'échelle des temps géologiques, qui regroupe le Plaisancien, le Gélasien et le Calabrien. Également dénommé Plio-Quaternaire, le Villafranchien couvre la fin du Tertiaire (Pliocène final) et le début du Quaternaire (Pléistocène initial).

**Würm** : Quatrième et dernière glaciation du quaternaire dans les régions alpines, entre – 80000 et – 10000 avant J.-C.

**Zone humide** : Selon le code de l'environnement, les zones humides sont des « terrains, exploités ou non, habituellement inondés ou gorgés d'eau douce, salée ou saumâtre de façon permanente ou temporaire; la végétation, quand elle existe, y est dominée par des plantes hygrophiles pendant au moins une partie de l'année».



## Introduction

---

Les zones humides constituent depuis longtemps l'objet d'études privilégiées des écosystèmes. Ces milieux ont la capacité d'héberger des eaux de débordement de cours d'eau, des apports d'eaux de ruissellement pendant de courtes périodes de crues ou des entrées d'eaux soumises à l'influence des marées. Elles sont généralement situées dans les vallées fluviales et sont des zones favorables à l'expansion et l'écêtement des crues des fleuves. Elles occupent 3% du territoire français mais hébergent environ 30% des espèces végétales remarquables à forte valeur patrimoniale et environ 50% des espèces d'oiseaux. De plus, certaines zones humides jouent un rôle primordial à l'échelle européenne, car elles sont situées sur les principaux couloirs migratoires. De ce fait, les recherches sur ces milieux se sont multipliées, depuis la prise de conscience de leurs rôles fonctionnels dans les cycles biogéochimiques mais également leur disparition progressive face aux actions anthropiques. Ces zones humides sont des systèmes écologiques complexes, plus ou moins artificialisés et ils font aujourd'hui l'objet des politiques de conservation ou de restauration. Dans ce cadre, un lien fort existe entre les chercheurs qui tentent de comprendre le fonctionnement de ces systèmes et les gestionnaires qui souhaitent en mesurer et modifier les tendances d'évolution. C'est le cas, par exemple du Parc Naturel Régional de Camargue et du Syndicat Mixte de Gestion de la nappe Phréatique de la Crau, qui travaillent ensemble sur les zones humides du site Natura 2000 « Trois marais », et plus particulièrement sur les marais de Coustières de Crau.

Parmi les zones humides littorales du sud de la France, les marais des Coustières de Crau constituent un ensemble écologique remarquable tant par la richesse biologique de ses communautés végétales et animales que par sa superficie : 600 hectares de marais à marisques. L'importance de la préservation des cladiaies a été reconnue au niveau européen. Cet habitat est en effet cité dans la Directive 92/43/CEE comme habitat prioritaire. Sa richesse écologique revêt plusieurs aspects : les cladiaies sont tout d'abord essentiellement constituées de *Cladium mariscus*, une espèce en régression en Europe (Hauguel et al, 2001). Elles abritent de nombreuses espèces végétales et animales à forte valeur patrimoniale. Enfin, son fonctionnement de tourbière lui confère notamment un rôle important dans le fonctionnement hydrologique des sites (Cortot et Mauchamps 2003).

Ces marais constituent une zone humide particulière en Méditerranée, car la source principale d'alimentation provient quasi-exclusivement d'un réseau de résurgences (laurons) qui permettent la remontée d'eau fraîche et pure, de la nappe de la Crau. La plaine de la Crau renferme en effet, une nappe phréatique de type alluvial de 550 millions de m<sup>3</sup> qui constitue la principale ressource en eau pour les besoins humains de la région. Cette nappe est alimentée principalement (70%) par les surplus d'eau de l'irrigation gravitaire issue de la Durance, qui offrent une eau de bonne qualité, indispensable au maintien de l'écosystème actuellement en place.

Ces écosystèmes sont entièrement dépendants des flux d'eaux souterraines, et il existe encore peu de données dans la littérature sur la description et le fonctionnement de ces milieux particuliers.

La thèse de Nguyen B. a permis de mieux comprendre le fonctionnement de la partie aval de la nappe de la Crau au travers de la modélisation des écoulements souterrains, grâce à des investigations géochimiques et isotopiques. Ros L. (2016), a réalisé un rapport sur le fonctionnement des résurgences de la nappe de la Crau et l'hydrologie des marais de Raphèle, au sud d'Arles sur le site Natura 2000 « 3 marais ».

Ce rapport s'inscrit donc dans la continuité de ces recherches et vise à améliorer les connaissances sur le fonctionnement des résurgences de la nappe de la Crau et leur lien avec les marais qui en dépendent. Nous nous demandons donc quel est l'impact des apports d'eaux exogènes sur le fonctionnement et la dynamique d'une zone humide dont l'équilibre écologique dépend des résurgences de la nappe phréatique des cailloutis de la Crau ? En effet, une modification hydrologique de ces écosystèmes pourrait entraîner une perturbation, voir une dégradation qui pourrait s'avérer inéluctable. De ce fait, une meilleure connaissance de l'hydrologie du site peut nous aider à mieux aborder la gestion de l'eau et de rechercher des solutions qui permettent de respecter les besoins des activités socio-économiques tout en respectant les conditions de développement optimal des marais à marisques.

A ce titre, on a mis en place un suivi hydrologique et hydrogéologique au niveau des marais de Bondoux et du Retour de manière à acquérir une meilleure connaissance des variations des niveaux d'eau dans ces habitats. Des échelles limnimétriques ont été installées sur le site, mais aussi des mesures au courantomètre. Des campagnes de suivis piézométriques mensuels ont également permis de suivre l'évolution de la nappe de la Crau vis-à-vis du site d'étude. A ces mesures, ce sont également rajoutées des analyses chimiques et isotopiques. Ces investigations permettront aux différents gestionnaires du site d'améliorer le protocole de gestion des niveaux d'eau (de la nappe et des canaux) avec des impératifs de préservation des milieux naturels.

## 1 – Présentation du site d'étude

### 1.1 L'aquifère de la Crau

#### 1.1.1 Contexte général

La plaine de la Crau se situe à l'est de la Camargue, dans le département des Bouches-du-Rhône et recouvre un vaste réservoir d'eau souterraine d'environ 550 km<sup>2</sup>. Sur le territoire de la Crau, on retrouve une quinzaine de villes et villages dont les villes d'Arles, de Salon-de-Provence ou encore le golfe de Fos, générant ainsi une forte activité économique dans ce secteur (industrie, artisanat, pratiques militaires, etc.) (symcrau.com). Aujourd'hui, on distingue deux zones : la Crau sèche au sud, et la Crau humide au nord. La Crau sèche est constituée d'une pelouse pastorale aride (steppe) nommée « coussoul », et elle constitue le dernier habitat de type steppique d'Europe occidentale. Quant à la partie nord de la Crau, celle-ci est irriguée et mise en culture et forme la Crau humide, qui

constitue une zone préférentielle pour la production du « foin de Crau », qui est réputé pour l'alimentation des animaux et qui possède le label AOC. (Séraphin P., 2016). Commencée il y a environ 5 siècles, la mise en culture des prairies irriguées est encore pratiquée selon une technique d'irrigation par submersion. Celle-ci consiste en un arrosage qui équivaut à une lame d'eau d'environ 120mm en quelques heures selon des « tours d'eau », permettant ainsi de répartir l'eau d'irrigation gravitaire sur tout le territoire. L'eau est stoppée par une « martelière », faisant ainsi déborder le surplus et submergeant les cultures. Les excédents non infiltrés sont drainés dans des canaux d'assainissement. Ainsi, l'irrigation par submersion alimente à 60% la nappe phréatique de la Crau en eau de qualité et d'origine alpine (foindecrau.com).

Cette nappe s'écoule dans des cailloutis, via un réseau de karstification et constitue un réservoir d'eau potable, qui est globalement de bonne qualité, et qui alimente près de 270 000 habitants. Cependant, certains signes de dégradation restent à surveiller, tels que l'augmentation de la minéralisation de la nappe ou des traces ponctuelles de phytosanitaires, d'hydrocarbures et de métaux. De plus, cette nappe est vulnérable de part sa faible profondeur (entre 0 et 10m), mais aussi par sa proximité avec la mer : c'est un aquifère littoral, vulnérable aux intrusions salines. (Symcrau, 2016).

Cet aquifère alimente directement des zones humides (Figure 1) par un réseau de résurgences. Ces zones humides sont situées à l'interface entre milieu terrestre et aquatique et, jouent un rôle important dans la préservation de la diversité animale et végétale (PNRC, 2013).



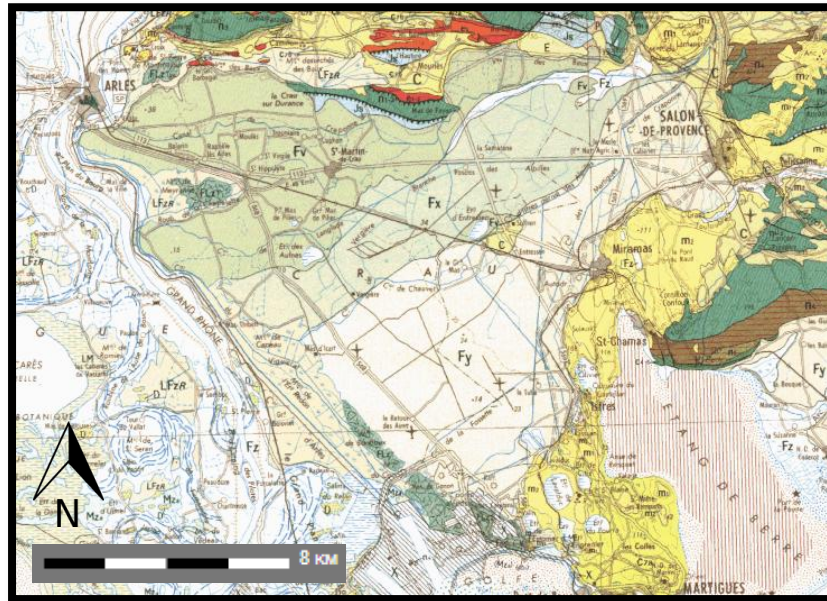
**Figure 1.** Cladiaie dans les marais de Port-Saint-Louis

En ce qui concerne le climat, la plaine de la Crau est soumise à un climat de type méditerranéen semi-aride influencé par un vent de NW, le mistral. Ce vent, combiné à environ 300 jours d'ensoleillement annuel, assèche les terres, ce qui oblige à d'importants apports d'eau durant l'été pour alimenter les cultures locales. Les précipitations sont principalement réparties durant les périodes de septembre-octobre et mars-avril et séparent deux saisons sèches. (Séraphin P., 2016.)

### 1.1.2 Histoire géologique

Le territoire de la Crau (Figure 2) a été formé au Quaternaire par l'apport d'alluvions et s'étend depuis Lamanon, puis forme un delta ouvert vers Arles et Fos sur Mer. Ce territoire constitue

l'ancien cône de déjection de la Durance qui se jetait à l'époque directement dans la mer Méditerranée (symcrau.com).



**Figure 2.** Carte géologique de la Crau, d'après Infoterre

Il y a environ 150 millions d'années, au Crétacé, alors que la mer recouvre encore la région, une longue période de sédimentation dépose le socle calcaire des cailloutis. A l'issue de quoi, plusieurs séries de déformations interviennent, entraînant la formation de bassins d'effondrement. Par la suite, la mer pénètre dans les bassins déposant de la molasse et des marnes gréseuses de façon non homogène sur la plaine. Lorsque la mer régressa jusqu'à 30 mètre en dessous de son niveau actuel, la Durance forme un vaste cône de déjection de cailloutis, qui constitue la plus ancienne formation de l'aquifère (la Crau d'Arles). A la fin du Pliocène, et durant le Pléistocène, la succession de périodes glaciaires et interglaciaires s'est traduit par l'alternance de séries de creusement des vallées et de remblaiement de la Durance qui ont permis l'accumulation de cailloutis cryoclastiques d'épaisseur variable. Ainsi, la Crau est divisée en deux ensembles distincts :

- Au sud-est, la « Crau de Miramas » ou de « Salon », qualifiée de « Jeune Crau » : constituée de galets siliceux et de quelques galets calcaires, contenus dans une matrice peu présente sableuse et argileuse. Elle s'étend depuis le seuil de Lamanon vers le Sud-Ouest en direction de la dépression des marais du Vigueirat et de Fos-sur-Mer.

- Au nord-ouest, la « Crau d'Eyguières » ou « d'Arles », qualifiée de « Vieille Crau » : d'âge villafranchien, caractérisée par un remaniement de calcaires sub-alpins contenus dans une matrice de limon et d'argile. Dans cette paléo-vallée, la Durance a déposé une première nappe de cailloutis sous forme de terrasses successives. Elle s'étend du Nord-Est, au niveau du seuil de St-Pierre-de-Vence, vers l'Ouest en direction de la dépression des marais de Chanoines et de Meyranne (Séraphin P., 2016).



La fin du Villafranchien est marquée par une brusque modification de la topographie. Le jeu de la faille de l'Anellier, au nord, provoque un affaissement de grande amplitude de la bordure orientale de la Crau, entraînant un approfondissement du seuil de Lamanon. La Durance abandonne alors son lit d'Eyguières et emprunte le col de Lamanon qu'elle atteint. Par la suite, au Würm, une faille normale orientée nord-sur aurait provoqué l'affaissement du seuil d'Orgon. La Durance va donc abandonner le pertuis de Lamanon, pour être capturée par le Rhône en empruntant le seuil d'Orgon et ainsi assécher la plaine de Crau. La plaine de la Crau est née, renfermant dans ses cailloutis, la nappe phréatique de la Crau (Ros L., 2016).

### 1.1.3 Contexte hydrogéologique

La plaine de la Crau est dénuée de réseau hydrographique naturel. Cette absence de rivières vient notamment du fait que la topographie du site est relativement plate (avec une pente moyenne allant de 0.5% à 2%), et cela est combiné à une forte capacité d'infiltration des cailloutis affleurant (Séraphin, 2016). Les eaux de la nappe de la Crau s'écoulent donc principalement en direction du sud-ouest jusqu'à une ligne d'émergence constituée de marais entre Arles et Fos-sur-Mer, présentant d'importantes remontées d'eaux douces notamment via les systèmes de laurons. Cet aquifère littoral devient ensuite captif et saumâtre puis salé lorsqu'il plonge sous les dépôts limoneux imperméables du Rhône au niveau de Fos-sur-Mer, ce qui engendre des échanges entre eau douce et eau salée, formant ainsi une interface de transition que l'on appelle « le biseau salé ».

En ce qui concerne la recharge en eau de la nappe, celle-ci est soumise à une recharge de surface par l'infiltration des précipitations, mais elle est également alimentée par les importants surplus d'eau apportés aux prairies pendant les périodes d'irrigation (figure). Ainsi, les principaux transferts d'eau se font via un réseau de canaux d'irrigation. Les irrigations débutent mi-mars pour se terminer fin-octobre, à plus ou moins deux semaines, selon l'importance des précipitations.



**Figure 3.** Irrigation d'une prairie de foin (Crau humide)

Cette nappe libre d'eau douce entre en contact avec le sol sur une large zone allant de Mas Thibert, aux marais de l'Audience, au travers d'un vaste réseau de laurons («Le mot lauron vient du provençal « lauroun » qui signifie surgen d'eau. Ce sont des puits naturels, ouverts dans les alluvions

*récentes de la Crau d'où jaillit une eau claire, douce et fraîche qui se répand le plus souvent dans les marais.*» (Giudicelli et al. 1980)). La présence de cette zone de contact produit certaines conditions particulières sur le site, et notamment le développement de l'habitat des marais à marisques, qui est un habitat à forts enjeux.

## 1.2 Le site d'étude

### 1.2.1 Le site Natura 2000 « Trois-Marais »

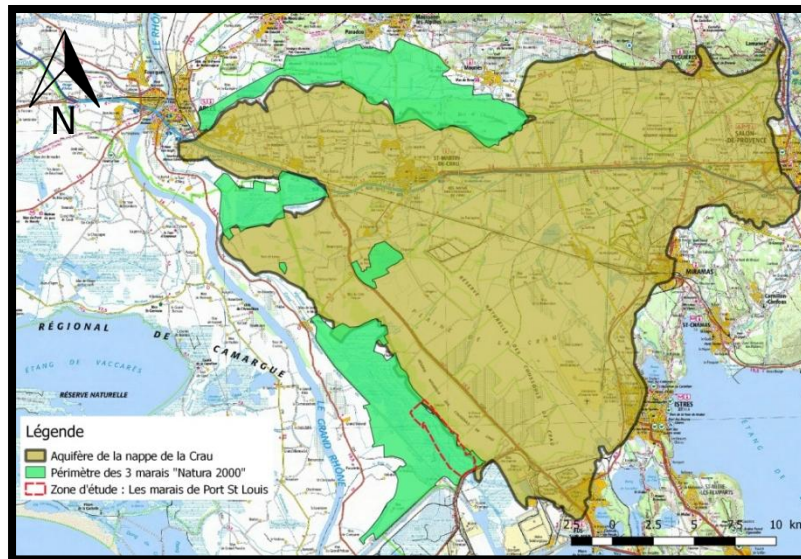
Notre site d'étude, les marais de Bondoux et du Retour, font partie site Natura 2000 « Trois-Marais », qui englobe les zones humides situées entre les Alpilles, la Crau et le grand Rhône. Depuis 2010, le parc naturel régional de Camargue assure l'animation nécessaire à la mise en œuvre des programmes d'actions qui est désignée au titre de la Directive « Habitat-Faune-Flore » et de la Directive « Oiseaux ». Ces deux zonages (plus de 13 000 hectares au total) ont été définis au regard de l'exceptionnelle biodiversité présente. Cette richesse est due à l'originalité du site, qui réside à la fois dans la proximité des zones humides et des zones sèches, mais aussi dans la présence de résurgences de la nappe de Crau (PNRC, 2013).

Le réseau Natura 2000 a pour objectif de contribuer à la préservation de la diversité biologique sur le territoire des 27 pays de l'Union Européenne. Ce réseau est composé de sites désignés par chacun des pays en application de deux directives européennes :

- Les Zones de Protection Spéciale (ZPS) désignées au titre de la Directive « Oiseaux » ;
- Les Zones Spéciales de Conservation (ZSC) désignées au titre de la directive « Habitats Faune et Flore ».

L'ambition de Natura 2000 est de concilier les activités humaines et les engagements pour la biodiversité dans une approche faisant appel aux principes du développement durable.

Les marais de Bondoux et du Retour (Figure 4) se situent à l'Est du Grand Rhône, entre la coustière de Crau et le canal du Colmatage, à l'interface entre la plaine de Crau et le Rhône. Ces marais bénéficient, de ce fait, de conditions de milieu assez particulières puisque la partie sud des marais est alimentée par les résurgences et les écoulements de la nappe de Crau. Ces marais sont exceptionnels de par la biodiversité qu'ils accueillent : certains habitats sont même très rares à l'échelle nationale ou de la Méditerranée, comme les marais à marisques et les mares temporaires (habitats prioritaires au titre de la Directive Habitat Flore Faune) (PNRC, 2016).



**Figure 4.** Localisation de l'aquifère de la Crau, du site « Trois-Marais », et du site d'études

### 1.2.2 Description de la biodiversité des marais de Bondoux et du Retour

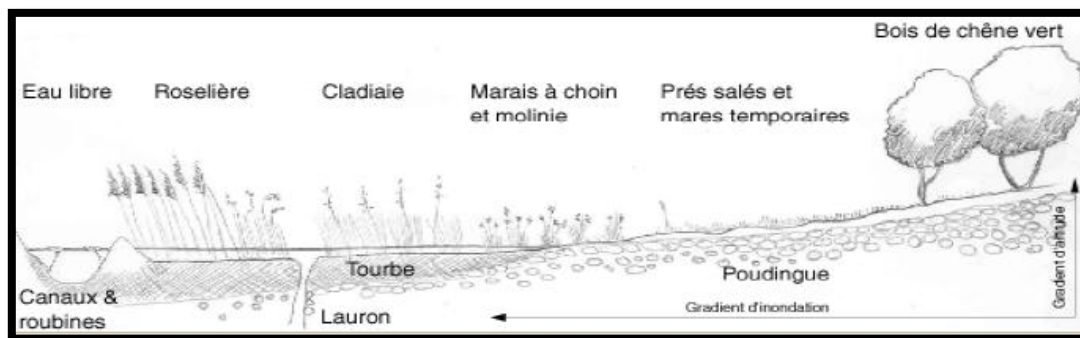
Les marais de Bondoux et du Retour abritent un écosystème d'eau douce, alimenté par les résurgences fraîches de la nappe de la Crau, qui détermine ainsi un micro-climat favorable au maintien de certaines espèces particulières telles que le marisque (**Figure 5**). En Région PACA, le marais calcaire à *Cladiummariscus* (ou marais à marisques) est présent le long de la vallée du Rhône jusqu'en Camargue, mais également dans la vallée de la Durance et plus ponctuellement autour des résurgences de type vaclusiennes (Sorgues, Argens). Il est également présent dans les marais tourbeux de Crau et dans certains étangs littoraux (Camargue et Etang de Berre), ou encore le long de petits cours d'eau dans les zones de suintements permanents (Estérel). Enfin, on le retrouve de façon ponctuelle en Haute-Durance (Hautes-Alpes) et sur le Haut-Verdon (Alpes de Haute-Provence).



**Figure 5.** Marais à marisques dans le marais du retour

Le marais à marisque ou *Cladiummariscus* est une espèce végétale qui se développe principalement sur des substrats tourbeux alimentés par des eaux douces (**Figure 6**). Pour son bon

développement, il est nécessaire qu'il y ait une inondation prolongée du milieu ainsi que de faibles fluctuations du niveau d'eau (-10cm/+40cm), puisqu'il ne supporte pas un déficit en eau prolongé (Beck N. et al, 2004).



**Figure 6.** Fonctionnement des marais à marisques, d'après Beck N. et al, 2004

Les caractéristiques d'engorgement de ces habitats en font des milieux non propices à des productions agricoles ou sylvicoles. Par ailleurs, leur grande valeur patrimoniale nécessite leur conservation et donc le maintien du réseau hydrographique et du niveau de la nappe auxquels ils sont liés. En effet, de vastes surfaces de ces habitats ont déjà disparus suite à des actions d'assainissement et de drainage. De plus, le marisque figure sur la liste régionale des espèces protégées. En effet, cette espèce est rare du fait de l'étroitesse de ses habitats potentiels et de la pression anthropique sur ces habitats (drainage à des fins agricoles). Les formations à marisques hébergent de nombreuses espèces d'animaux, d'insectes et d'araignées, en lien avec la structuration très particulière de cet habitat (PNRC, 2013). Ainsi, au sein des marais à marisques on retrouve certaines espèces animales telles que le Butor étoilé, une espèce non coloniale et vulnérable selon la liste rouge de la Faune Menacée de France, ou encore le Héron pourpré, une espèce coloniale qui niche occasionnellement dans les cladiaies où il vient s'alimenter mais également le Busard des roseaux qui est présent toute l'année sur le site d'étude d'où l'importance de la conservation de ce milieu. On retrouve également la Cistude d'Europe, une tortue d'eau douce, elle est aussi classée en tant qu'espèce vulnérable sur la liste rouge de la Faune Menacée de France.

## 2 – Le Plan de gestion des marais de Port-St-Louis-du-Rhône

### 2.1 Contexte et mise en place du Plan de gestion

Depuis 2013, les marais du Retour, de Bondoux et du Coucou entre Crau et Grand Rhône sont dotés d'un plan de gestion. Ce plan de gestion a été validé le 15 novembre 2013 à Port-Saint-Louis-du-Rhône, où l'ensemble des acteurs se sont engagés, à la mise en œuvre et au respect de ce plan de gestion. Afin d'organiser et de planifier les interventions de gestion sur le site, le Parc naturel régional de Camargue et la commune de Port-St-Louis-du-Rhône ont travaillé ensemble pour la réalisation de



ce plan de gestion des marais. Ce plan a pour objectif principal de définir une stratégie de gestion des marais et d'identifier les moyens nécessaires à cette gestion, tout en conservant la pratique des activités locales déjà en place. Il est établi en lien avec le document d'objectifs (DOCOB) du site Natura 2000 sur le périmètre duquel se situent les marais (Chambre d'agriculture des Bouches-du-Rhône, 2004). Désormais, 68 actions et mesures organisent et encadrent les diverses pratiques d'entretien du marais et permettent de maintenir ou d'améliorer la qualité biologique du site, tout en maintenant les pratiques existantes.

## 2.2 L'intérêt de la détermination du bilan hydrologique

L'une des mesures du plan de gestion est la mise en place d'un protocole de suivi des niveaux d'eau de la nappe et des eaux de surface. En effet, les mares temporaires et les marais à marisques sont deux habitats d'intérêt communautaire, qui accueillent de nombreuses espèces patrimoniales. Le fonctionnement de ces habitats est dépendant des remontées de la nappe de la Crau, qui constitue la principale source d'alimentation du site. Ainsi, une connaissance pointue des variations de niveaux d'eau dans ces habitats va permettre de mieux comprendre leur fonctionnement et potentiellement les modalités de présence et de répartition des espèces sur ce site.

Le but de ce suivi des niveaux d'eau est donc de comprendre le fonctionnement hydraulique du site à deux échelles : d'abord à l'échelle du site, en visant à mieux connaître la part réelle de chaque source d'alimentation, puis à l'échelle des marais de Bondoux et du Retour, où l'eau du canal Centre-Crau est a priori amenée. Pour ce dernier point, l'objectif est notamment de déterminer si l'eau prélevée dans le canal du Centre-Crau alimente de façon conséquente les marais de Bondoux et du Retour. A terme, cette meilleure compréhension d'améliorer le protocole de gestion des ouvrages hydrauliques (Chambre d'agriculture des Bouches-du-Rhône, 2004).

## 2.3 Les objectifs de l'étude

Notre système se définit de la manière suivante : les marais de Bondoux et du Retour sont des zones humides qui comprennent des Cladiaies, des prairies humides et des mares temporaires méditerranéennes, autour desquelles se retrouvent plusieurs enjeux prioritaires de conservation avec notamment la Directive Habitat-Faune-Flore. Ce caractère prioritaire est d'autant plus marqué que la plupart des enjeux de gestion concernent la quasi-totalité du site et qu'il est le support d'activités socio-économiques. De plus, ces milieux sont menacés par l'uniformisation et la fermeture du milieu, ainsi que la modification des conditions hydrologiques (**Annexe 2**) nécessaires au bon développement du marisque, ce qui tendrait à faire disparaître ces espèces végétales, au profit d'habitats moins patrimoniaux.

L'intérêt principal et primordial en cohérence avec les objectifs du document d'objectifs du site Natura 2000 est donc de maintenir ces milieux d'intérêt communautaire dans un bon état de conservation et de mettre en place d'une gestion adaptée, favorisant ainsi leur bon développement. A ce titre, la réalisation d'un bilan hydraulique est nécessaire de manière à mettre en évidence toutes les eaux qui transitent dans le système, leurs relations, et leurs propriétés mais également de comprendre les interactions entre la nappe de la Crau et les eaux de surface.

Plus en détail, les objectifs de cette étude sont donc :

- La réalisation d'un bilan hydrologique à l'échelle du site
- La caractérisation de la typologie des eaux qui composent les milieux
- La production d'un modèle conceptuel
- La proposition d'un protocole de suivi, à la fois quantitatif et qualitatif, sur le long terme.

### 3 – Matériels et Méthodes

#### 3.1 La démarche de la réalisation du bilan hydrologique/hydraulique

Le cycle de l'eau peut être analysé schématiquement selon trois éléments essentiels : les précipitations, le ruissellement ou écoulement de surface et souterrain, et l'évaporation. Dans chacune de ces phases, on a respectivement un transport d'eau, un emmagasinement temporaire et un changement d'état. Ainsi, l'estimation des quantités d'eau passant par chacune de ces étapes peut être réalisée à l'aide d'une équation bilan appelée « bilan hydrologique » qui représente le bilan des quantités d'eau entrant et sortant d'un système défini dans l'espace et dans le temps. Dans sa formule la plus générale, et considérant un système fermé, le bilan hydrologique s'écrit de la forme suivante :

$$P = Q + ETR + \Delta R$$

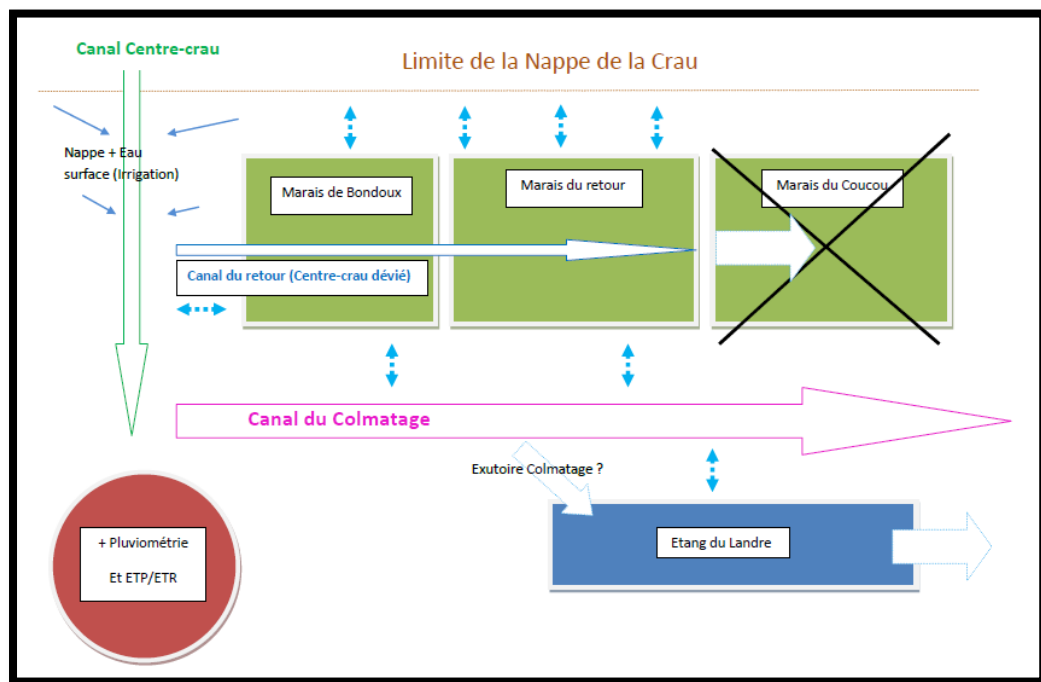
Tout ce qui tombe (P, précipitations) dans un espace hydrologique et dans un laps de temps donné, soit s'écoule (Q), soit repart dans l'atmosphère par évapotranspiration (ETR), soit participe à la recharge des réserves en eau du sol ou du sous-sol  $\Delta R$ . Suivant le schéma auquel on s'attache et l'échelle considérée, on parlera de bilan hydrique (en général à l'échelle d'une zone de végétation) ou de bilan hydrologique (à l'échelle d'un bassin versant). Les pluies et les débits sont le plus souvent mesurés, mais les choses sont plus complexes en ce qui concerne le terme  $\Delta R$  de variation des réserves en eau. En effet, ce terme peut être soit positif, soit négatif et peut cumuler les variations de stocks sur la tranche superficielle du sol (réserve hydrique, ou réserve utile,  $R_u$ ) et dans le sous-sol (réserve hydrologique,  $R_h$ ).

Quant à l'ETR, il demeure souvent inconnu, et reste souvent la valeur à déduire par soustraction à partir de l'équation de bilan.

### 3.2 Conceptualisation de la zone d'étude et approche méthodologique

Les marais de Bondoux et du Retour ont été peu étudiés vis-à-vis des circulations en eaux souterraines et des relations qui peuvent exister entre les eaux de surfaces et les eaux souterraines. Ainsi, la mise en place d'un réseau de suivi sur une période de 5 mois allant de mars 2017 à juillet 2017, a permis de mieux comprendre les échanges entre les différentes masses d'eau.

La première étape de cette étude a été la réalisation d'un modèle conceptuel (Figure 7) permettant de pouvoir identifier toutes les composantes du système : les entrées, les sorties et la dynamique du site.



**Figure 7.** Modèle conceptuel au départ de l'étude

Une fois ce modèle réalisé, il a été important d'équiper rapidement le site avant que celui-ci soit alimenté par les eaux du canal Centre-Crau (pour rappel, le canal Centre-Crau draine les eaux issues de l'arrosage des prairies de foin de la Crau et est donc normalement en eau durant cette période d'irrigation). Nous avons donc installé 7 échelles limnimétriques sur des points stratégiques de manière à suivre l'évolution des niveaux d'eaux en entrée, en sortie et au sein du système. L'intérêt étant de coupler ces données à des mesures au courantmètre afin d'estimer les débits au niveau des stations et de réaliser des courbes de tarages dans certains canaux. Une sonde de pression-température (à pression relative) a également été placée dans un piézomètre en amont du site d'étude pour réaliser un suivi en continu des niveaux piézométriques au niveau de la limite de la nappe libre (en amont immédiat de la zone de résurgences). A cela, nous avons ajouté deux piézomètres superficiels crépinés que nous avons creusés à la tarière et positionnés dans les marais, en bordure des zones de résurgences de la nappe. De plus, pour mieux comprendre l'influence de la nappe de la Crau sur la zone des marais

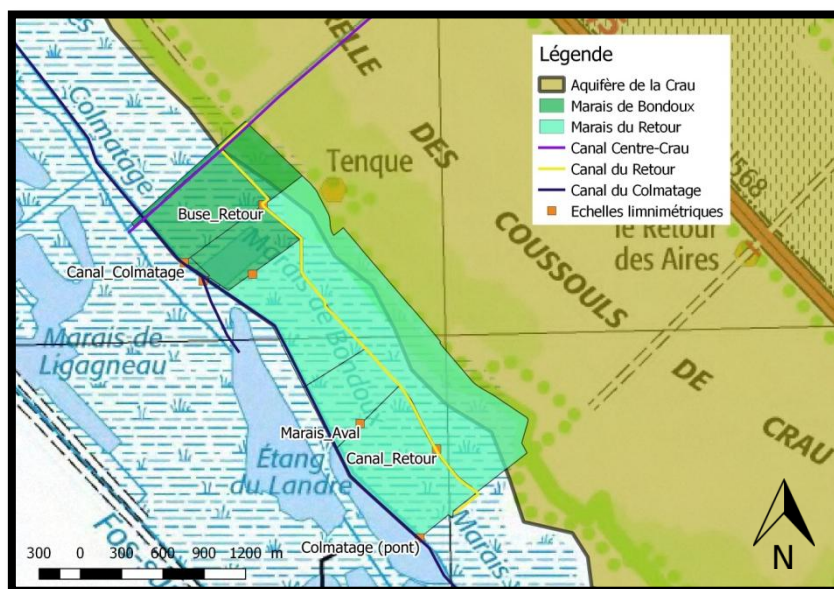
de Port-St-Louis, nous avons réalisé un suivi des piézomètres et des puits présents sur un large périmètre autour de notre site. Enfin, nous avons également réalisé une campagne d'échantillonnages des eaux pour identifier la typologie des eaux du milieu. Ce suivi a été réalisé en 7 points différents.

### 3.3 L'hydrologie de surface

**Les échelles limnimétriques :** Sur le site d'étude, 7 échelles limnimétriques ont été placées en différents points stratégiques : au début du canal du Retour, dans le marais, au niveau du canal du Colmatage, au niveau de l'exutoire supposé du canal du Colmatage vers l'étang du Landre, deux échelles dans des roubines qui traversent les marais, vers la fin du canal du Colmatage et vers la fin du canal du Retour (Fig. 8 et 9).



**Figure 8.** Echelle limnimétrique dans le canal du Colmatage



**Figure 9.** Carte de la localisation des échelles du site d'après QGIS

Les campagnes de mesures pour les échelles limnimétriques sont prévues toutes les semaines, les lundis ou les mardis.

**Le jaugeage au courantomètre :** Au début de notre étude, il était prévu de faire des jaugeages au sel pour estimer les débits. Cependant après réflexion, cette technique n'a pas été retenue puisque le milieu ne semble pas propice à la réalisation de cette méthode (faibles débits, absence de seuils). Nous avons donc opté pour des jaugeages au courantomètre.

Lors de la période de réflexion sur l'installation du matériel de suivi pour l'étude, plusieurs questions sont ressorties et notamment le fait qu'il était important d'identifier l'exutoire principal de

notre site d'étude. Au départ de notre réflexion nous pensions qu'il était possible d'y avoir deux exutoires : l'un se situant au niveau de la déviation du canal du Colmatage vers l'étang du Landre, l'autre plus bas sur le tracé du canal du Colmatage, en direction du marais du Coucou. Pour répondre à cette question, nous avons choisi de réaliser des mesures au courantomètre qui permettent d'identifier les directions et sens d'écoulement des flux de surface.

Une courbe de tarage permet, par simple lecture d'un niveau d'eau sur une échelle limnimétrique, d'estimer le débit d'un cours d'eau à un instant donné. La réalisation d'une courbe de tarage passe par une série de mesures à différentes périodes de l'année, de façon à prendre en compte les variations de régimes hydrologiques. A l'issue de ces mesures, il suffit de reporter les résultats selon un graphique représentant les variations de débits ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) en fonction des hauteurs d'eau (cm).

**Quantification des apports d'eau du canal Centre-Crau :** Suite à un relevé de niveau d'eau relativement inhabituel sur le site d'étude, nous avons décidé de mettre en place un test d'entrée d'eau du canal Centre-Crau. Pour bien comprendre le principe de cette manipulation, il est important de replacer certains éléments : le canal du Retour est un canal dévié du canal Centre-Crau, et principalement contrôlé par une martelière (Fig. 10) qui est gérée par les manadiers et les usagers.



**Figure 10.** Le canal du Centre-Crau et sa martelière

Nous avons installé deux sondes automatiques de mesure de pression, l'une au niveau de la martelière du canal Centre-Crau et l'autre à l'entrée du canal du Retour dans les marais durant une courte période où nous avons suivi l'ouverture et la fermeture de la martelière à plusieurs reprises. Il nous a donc été possible de suivre l'évolution du niveau d'eau de surface.

### 3.4 L'hydrogéologie

**La sonde automatique de pression-température :** Une sonde automatique de mesure de pression et de la température a été installée dans le piézomètre x20bis, qui se situe en bordure de notre système de marais. Cette sonde mesure en continu, avec un pas de temps de 2heures, les fluctuations



des niveaux d'eau de la nappe. Les relevés de ces mesures sont effectués tous les mois, en même temps que le suivi piézométrique de la nappe de la Crau.

**Les piézomètres de surface :** Afin de densifier les observations sur le niveau piézométrique en amont immédiat de la zone de résurgence, nous avons creusé deux piézomètres à la tarière (le 10/06/2017). Ces piézomètres (Figure 11) ont été creusés à 50cm de profondeur et crépinés. En ce qui concerne la période de suivi, les mesures sont réalisées en même temps que la campagne de mesure des échelles limnimétriques, c'est-à-dire toutes les semaines, les lundis ou les mardis.



**Figure 11 :** Creusement à la tarière des piézomètres

**La campagne de mesure piézométrique :** Pour mieux comprendre l'influence de la nappe phréatique sur la zone d'étude, nous réalisons un suivi piézométrique mensuel de différents points proches des marais. Ces points (**Annexe 3**) comprennent des piézomètres mais également des puits privés. A ce point de suivi, nous ajoutons les mesures fournies par la banque de données ADES. A terme, l'intérêt est de réaliser une carte piézométrique qui permettra notamment de caractériser les écoulements souterrains qui pourraient être en lien avec le site d'étude.

**Les analyses chimiques et isotopiques :** De manière à caractériser les différents apports en eau de surface et souterraines qui transitent dans les marais ainsi que leurs mélanges, une analyse chimique et une analyse isotopique des eaux est réalisée. L'analyse de la chimie des eaux permet de déterminer les ions majoritaires présents de manière à identifier le faciès géochimique prédominant. De plus, cela peut également permettre de mettre en avant le phénomène de drainage de la nappe par les canaux, grâce notamment à l'analyse des isotopes stables de l'eau (dD et d18O). A terme, ces analyses permettent de différencier les origines des eaux et ainsi d'identifier le processus majoritaire influençant la composition isotopique.

Pour ces analyses, 7 points (**Annexe 4**) ont été sélectionnées pour effectuer les prélèvements : 4 points se situent dans le marais (Au début du canal du Retour, dans le marais, à l'exutoire du Colmatage vers l'étang du Landre, et au pont vers la fin du canal du Colmatage), 1 point est prélevé dans le canal du Centre-Crau et 2 points dans la nappe (dans un puits, au dans le piézomètre x26bis). Chaque début de mois, les échantillons sont prélevés et lors de ces échantillonnages, des mesures de la conductivité, du pH, de la température ainsi que du potentiel rédox sont effectuées.

Ces 7 points sont reportés dans le tableau suivant :

NOM	Campagne du 15/03	Campagne du 10/04	Campagne du 09/05	Campagne du 22/05	Campagne du 06/06	Campagne du 04/07
Buse_retour	BR1	BR2	BR3			BR4
Exut_Colm_L	ECL1	ECL2	ECL3			ECL4
Marais_amont	MA1	MA2	MA3			MA4
Pont_Colmatage	PC1	PC2	PC3			PC4
Centre-crau				CC1	CC2	CC3
Puits_Bergerie	PB1	PB2	PB3			PB4
X26bis	X26Bis1		X26Bis2			

**Tableau 1.** Récapitulatif des dates et lieux de prélèvements

### 3.4 Données climatiques : le suivi pluviométrique

L'un des termes importants pour la réalisation de notre bilan hydraulique, est la pluviométrie. Pour cela, nous nous sommes référés au site infoclimat.fr qui nous fournissait toutes les informations nécessaires concernant la pluviométrie proche du site, ainsi que certaines données climatiques (température, vitesse du vent).

### 3.5 Estimation de l'Evapotranspiration

L'estimation de l'Evapotranspiration constitue un phénomène par lequel les végétaux perdent de l'eau sous forme de vapeur. L'Evapotranspiration potentielle ou ETP se définit comme l'évapotranspiration d'un couvert végétal bas, continu, et homogène, dont l'alimentation en eau n'est pas limitante et qui n'est soumis à aucune limitation d'ordre nutritionnel, physiologique ou pathologique. Ainsi, c'est la valeur d'évapotranspiration maximale de référence pouvant représenter la demande climatique. Pour cette étude, l'évapotranspiration potentielle a été déterminée grâce à l'équation de Penman-Monteith selon l'équation suivante :

$$ETP \text{ ou } ET0 = \frac{0,408 \times \Delta \times (Rn - G) + \gamma \left( \frac{900}{T + 273} \right) \times u_2 (es - ea)}{\Delta + \gamma \times (1 + (0,34 + u_2))}$$

Où **ET0** est l'évapotranspiration de référence (mm/h), **Rn** est le rayonnement net ( $W.m^{-2}$ ), **G** est le flux de chaleur du sol ( $W.m^{-2}$ ), **Δ** est la pente de la courbe de tension de vapeur saturante ( $kPa.°C^{-1}$ ), **γ** est une constante psychrométrique ( $kPa.°C^{-1}$ ), **T** est la température ( $°C$ ), **u<sub>2</sub>** est la vitesse moyenne du vent à 2m ( $m.s^{-1}$ ), **es** est la tension de vapeur saturante à la température *t* (kPa) et **ea** est la tension de vapeur à la température *t* (kPa).

Le choix de l'utilisation de l'équation de Penman-Monteith a été déterminé d'après une étude de Delarozière-Bouillin, (BRGM, 1971). Ce rapport a pour objectif de critiquer les méthodes de calcul de l'évapotranspiration potentielle et réelle avec les formules de Thornthwaite, Turc et Penman. En comparant ces méthodes, les résultats montrent une grande ressemblance, cependant selon la répartition géographique de la zone d'étude à l'échelle de la France, quelques variations sont remarquables. Ainsi, pour des latitudes allant de 50°N à 47°N, il est possible d'utiliser indifféremment les méthodes, cependant, pour des latitudes inférieures à 47°N, la méthode de Thornthwaite fournit des valeurs nettement inférieures.

L'estimation de l'ETP est essentielle pour la détermination de l'Evapotranspiration réelle ou ETR. L'ETR correspond à la quantité d'eau réellement perdue sous forme de vapeur par une surface ou un couvert végétal. Pour notre étude, il est déterminé à partir d'un bilan hydrique à l'aide des valeurs de l'ETP. Ainsi, le bilan hydrique est établi pour un lieu et une période donnée par comparaison entre les apports et les pertes en eau. Les apports d'eau sont effectués par les précipitations, tandis que les pertes sont essentiellement l'évapotranspiration. Ces deux grandeurs étant homogènes, on peut les comparer en calculant leur différence ( $PE$  (pluie efficace) =  $P - ETP$ ). De ce fait, il suffit de comparer les précipitations  $P$  et l'évapotranspiration potentielle  $ETP$ , ce qui permet de distinguer des situations différentes en fonction de seuils :

- **Si  $P < ETP$** , l'évaporation réelle sera égale à  $P$  ; il y aura prélèvement sur les réserves du mois précédent, absence d'écoulement et la période sera dite déficitaire avec une mise en réserve égale à 0 et une valeur de l'ETR qui sera égale à celle de l'ETP si la valeur dans la  $Ru$  est différente de 0.
- **Si  $P > ETP$** , l'évaporation réelle sera égale à l'ETP, il y aura écoulement et constitution de réserves (avec la réserve utile,  $Ru$  (mois) =  $Ru$  (mois-1) +  $PE$ ) et la période sera dite excédentaire.

En suivant ce principe, il suffit donc de remplir toutes les données mois par mois dans le bilan hydrique pour ensuite déterminer les valeurs de l'ETR pour une année hydrologique.

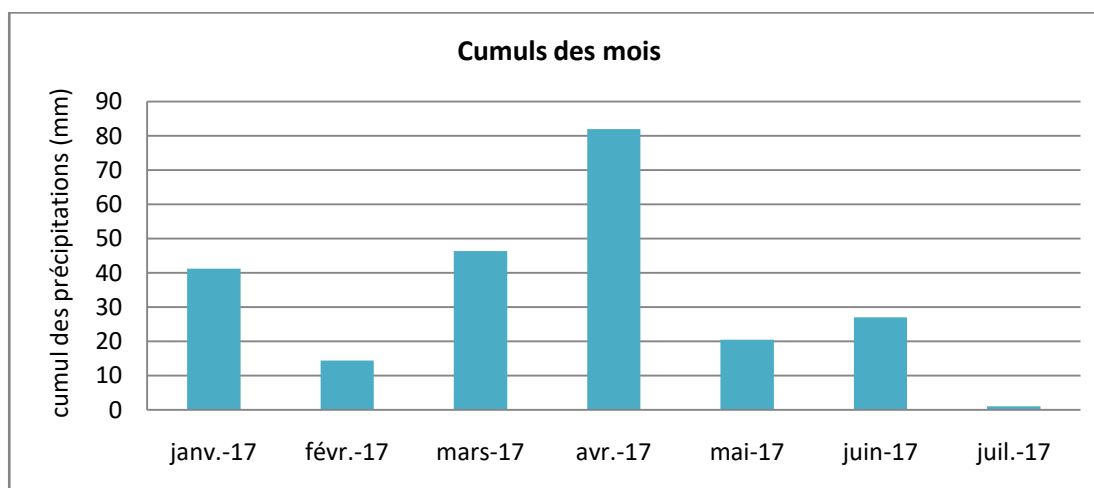


## 4 – Résultats et discussions

### 4.1 Synthèse des résultats obtenus

#### 4.1.1 Données climatiques

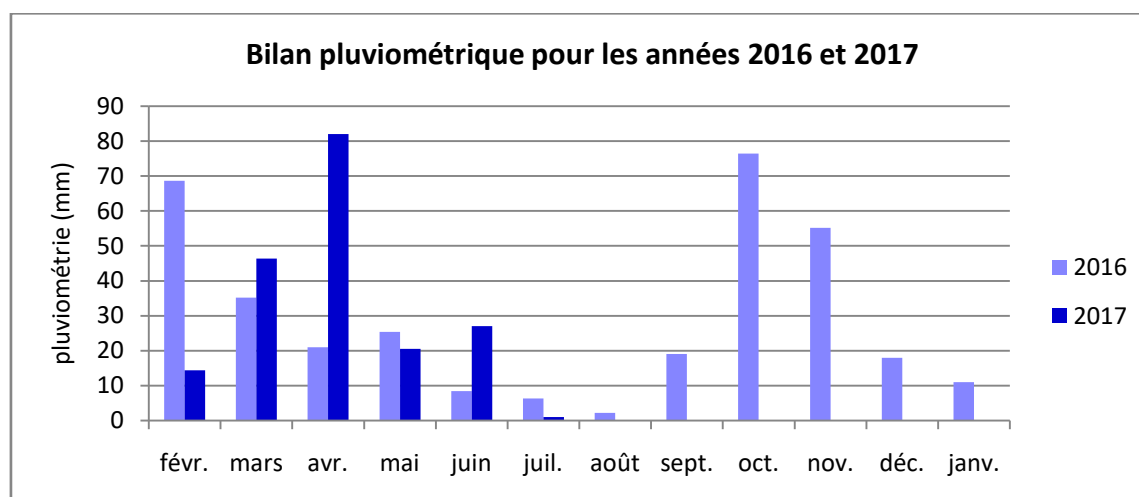
**Le bilan pluviométrique :** La réalisation du bilan pluviométrique permet de mettre en évidence les phénomènes pluvieux et les quantités d'eau reçues. Pour les périodes allant de mars à juillet, le cumul des précipitations (Figure 12) est présenté dans le graphique suivant :



**Figure 12.** Graphique représentant les cumuls de précipitations (mars-juillet 2017)

On observe que les mois de janvier et février sont relativement secs, avec respectivement, 41 et 14mm de pluie. Les mois de mars et avril sont plus pluvieux, avec 47 et 82 mm de pluie, puis les mois de mai et juin sont relativement secs également, avec 20 et 27mm de pluie.

Nous avons comparé ces données aux données précédentes (Figure 13) :

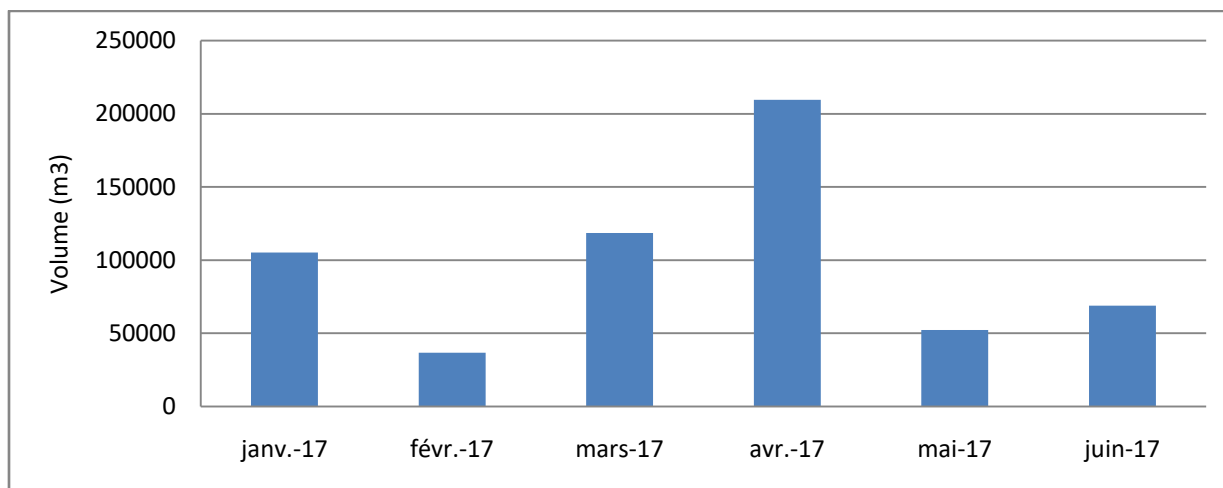


**Figure 13.** Bilan pluviométrique pour les années 2016-2017

Si l'on observe les mois les uns après les autres, le mois de février a été plus pluvieux en 2016 (68,8mm) qu'en 2017 (14,4 mm). Pour le mois de mars, c'est l'année 2017 (46,4 mm) qui a été plus

pluvieux que celle de 2016 (35,2 mm). Le mois d'avril a été particulièrement pluvieux cette année avec 82 mm de pluie contre 21 mm pour l'année 2016. Pour le mois de mai, les deux valeurs sont relativement proches avec 25,4 mm en 2016 et 20,5 mm en 2017. Le mois de juin a été relativement pluvieux avec 27 mm en 2017 contre 8,4 en 2016. Concernant le mois de juillet, celui-ci a été particulièrement sec en 2017 avec seulement 0,4 mm de pluie contre 6,3 en 2016.

De plus, la pluviométrie constitue l'une des entrées de notre système. Ainsi, la surface du marais est multipliée à la pluviométrie, de manière à aboutir des valeurs de volumes d'eaux (Fig. 14) reçues sur le site.



**Figure 14.** Volumes d'eau reçus sur le site par mois

Comme pour le bilan pluviométrique, les mois de janvier, mars et avril ont été ceux où le site a reçu les plus grandes quantités d'eaux.

**L'Évapotranspiration** : Pour déterminer l'évapotranspiration de notre site, nous avons décidé de réaliser un bilan hydrique (Tableau 2). Ce bilan permet d'identifier les changes d'eau dans un sol en fonction du flux entrant qu'est la pluie, et du flux sortant qu'est l'évapotranspiration potentielle (ETP).

Pour déterminer l'ETP, nous avons utilisé la formule de Penman-Monteith. De plus, en faisant la différence entre les précipitations (P) en mm et l'ETP en mm, il nous est possible de déterminer la pluie efficace (PE). Ces données nous sont utiles pour déterminer l'Évapotranspiration réelle (ETR) en mm mais également la Réserve Utile (RU), qui constitue la part d'eau qui s'infiltre dans le sol et constitue un stock d'eau réutilisable pour les cultures ou alimente la nappe.

	janv-16	févr-16	mars-16	avr-16	mai-16	juin-16	juil-16	août-16	sept-16	oct-16	nov-16	déc-16	janv-17	févr-17	mars-17	avr-17	mai-17	juin-17
P (mm)	11	68,6	35,2	21	25,4	8,4	6,3	2,2	19,1	76,4	55,2	18	41,2	14,4	46,4	82	20,5	27
ETP (mm)	17,7	38,3	76,7	103,1	152	176	197,7	169,5	113,9	59,8	26,3	16	33,1	42,3	75,1	130,3	150,5	189,1
PE (mm)	0	30,3	0	0	0	0	0	0	0	16,6	28,9	2	8,1	0	0	0	0	0
ETR (mm)	11	38,3	76,7	103,1	25,4	8,4	6,3	2,2	19,1	59,8	26,3	16	33,1	42,3	75,1	82	20,5	27
Ru (mm)	0	68,6	68,6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Tableau 2. Bilan hydrique estimé sur l'année 2016 et début 2017

Pour cette étude, nous avons pris en compte les données de l'année 2016 de manière à avoir un plus grand jeu de données. Cependant ce sont les valeurs de l'année 2017 qui nous intéressent. Ainsi, pour le mois de janvier 2017, la pluie est supérieure à l'ETR en effet la pluviométrie est de 41,2 mm, tandis que l'ETR est de 33,1, mais pour les mois suivants, l'ETR est supérieur ou égal à la pluie.

#### 4.1.2 Hydrologie de surface

**Suivi hydrologique des marais :** Pour réaliser le suivi hydrologique des marais nous utilisons les résultats obtenus grâce à la campagne de mesure des échelles limnimétriques. La synthèse des résultats bruts est donnée dans l'**annexe 5**. Pour analyser ces résultats, nous avons décidé de traiter les données en normalisant date par date. C'est-à-dire que nous avons fixé notre première mesure comme étant notre référence, et nous avons observé comment chaque échelle bougeait d'une semaine par rapport à l'autre. Le graphique (Figure 15) ainsi obtenu est proposé ci-dessous (et en **Annexe 6**) :

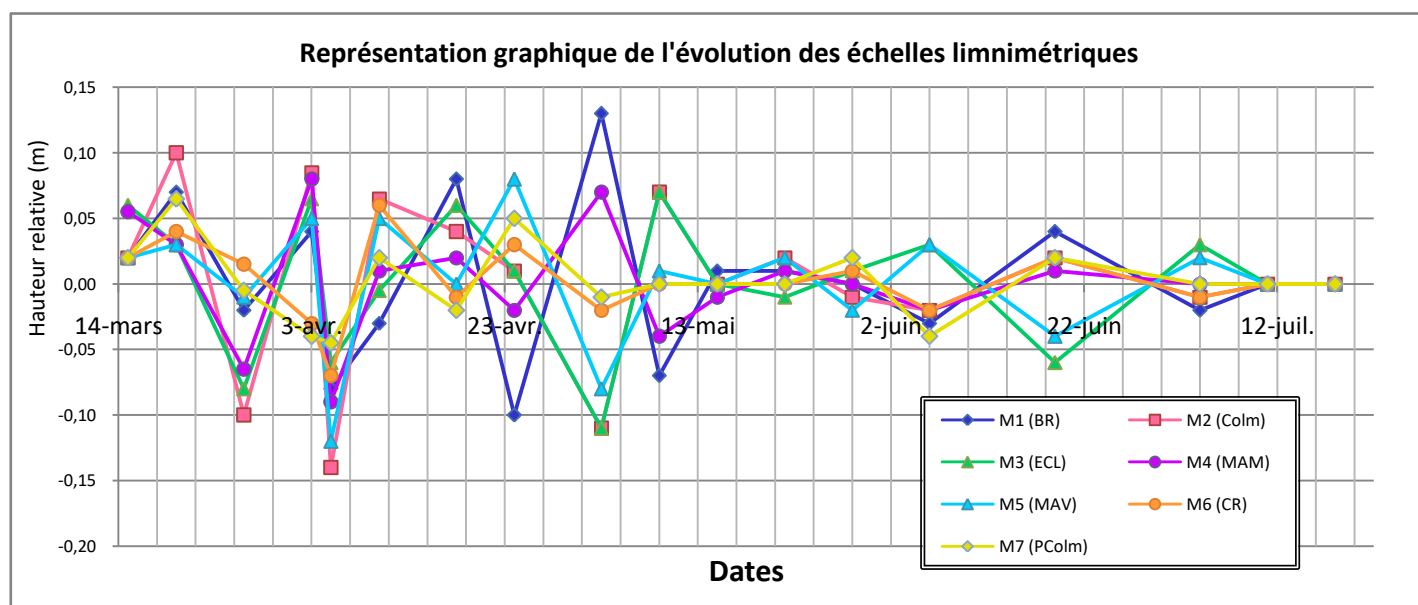


Figure 15. Représentation graphique de l'évolution des échelles limnimétriques au cours du temps

Abréviations	Nom de l'échelle
M1	Buse Retour
M2	Colmatage
M3	Exutoire Colmatage vers Landre
M4	Marais amont
M5	Marais aval
M6	Canal du Retour
M7	Pont Colmatage

**Tableau 3.** Liste des abréviations pour les points du site

Les résultats montrent globalement une forte variation des valeurs des échelles limnimétriques allant de +0,15m à -0,15m pendant la période de suivi. Pour la période qui s'étend de début mars à début mai, toutes les échelles limnimétriques semblent varier de manière homogène, avec quelques divergences des tendances pour les échelles M6 (Tableau 3) et M7 (notamment au début du mois d'avril). Cependant, une légère stabilisation des variations est remarquable sur la période allant du 15 mai au 2 juin, pour toutes les échelles limnimétriques. Pour la période allant de début juin à début juillet, les résultats montrent de faibles variations du niveau de l'eau sur les échelles, avec notamment une forte diminution des valeurs des échelles M3 et M5. Si l'on regarde plus dans le détail, certaines échelles limnimétriques semblent varier ensemble : les points M6 et M7 suivent les mêmes augmentations et les mêmes diminutions au cours du temps. De la même manière, M2 et M3 se superposent parfois (entre le 23 avril et le 13 mai), ainsi que M5 qui semble suivre les mêmes variations que celles appliquées aux points M2 et M3. De plus, les points M1 et M4 fluctuent ensemble sur la courbe et suivent les mêmes tendances d'augmentation et de diminution.

A ces données traitées, nous avons également appliqué une corrélation et un classement que l'on présente dans le tableau suivant :

	M1 (BR)	M2 (Colm)	M3 (ECL)	M4 (MAM)	M5 (MAV)	M6 (CR)	M7 (Pcolm)
M1 (BR)	1						
M2 (Colm)	0,2500	1					
M3 (ECL)	-0,0099	0,7879	1				
M4 (MAM)	0,7684	0,4487	0,2715	1			
M5 (MAV)	0,0867	0,6927	0,5944	0,3588	1		
M6 (CR)	0,3469	0,5939	0,2496	0,3715	0,6619	1	
M7 (Pcolm)	0,3909	0,5033	0,2249	0,4515	0,4684	0,8390	1

**Tableau 4.** Analyse statistique par corrélation sur les points du site

Les résultats (Tableau 4) de l'analyse corrélatrice s'interprètent de la manière suivante : Une bonne corrélation s'observe par des valeurs proches de 1, une mauvaise corrélation est décrite par des valeurs autour de 0, tandis que des valeurs proches de -1 traduisent une anti-corrélation. Ainsi, pour

les résultats proposés, les points M1 (Buse retour) et M4 (Marais amont) ont une bonne corrélation (de 0,77), ce qui induit qu'une perturbation au niveau de M1 sera visible au niveau de M4. De la même manière, les points M2 (Colmatage) et M3 (Exutoire Colmatage vers Landre) sont fortement corrélés (avec 0,79), on suppose donc que ces deux points vont réagir de la même manière face à une perturbation hydrologique. On peut également observer une très bonne corrélation (de 0,84) entre les points M6 (Canal du Retour) et M7 (Pont du Colmatage) ; ces deux points se trouvent à l'extrémité du marais, en direction du marais du Coucou, on pourra donc supposer qu'une hausse ou une baisse de niveau d'eau observable au niveau du Canal du Retour, sera également observable au niveau du Pont du Colmatage. A l'opposé, les points M1 et M3 ont une mauvaise corrélation, proche de zéro, avec une valeur établie à -0,009, ce qui implique qu'on ne peut pas lier ces deux points si une modification hydrologique intervient. Nous n'avons pas pris en compte les observations concernant le point M5 (Marais aval) puisque cette échelle a bougé au cours de cette étude. Ainsi, pour la suite de l'analyse, nous allons ignorer ce point, qui risquerait d'introduire un biais dans les données.

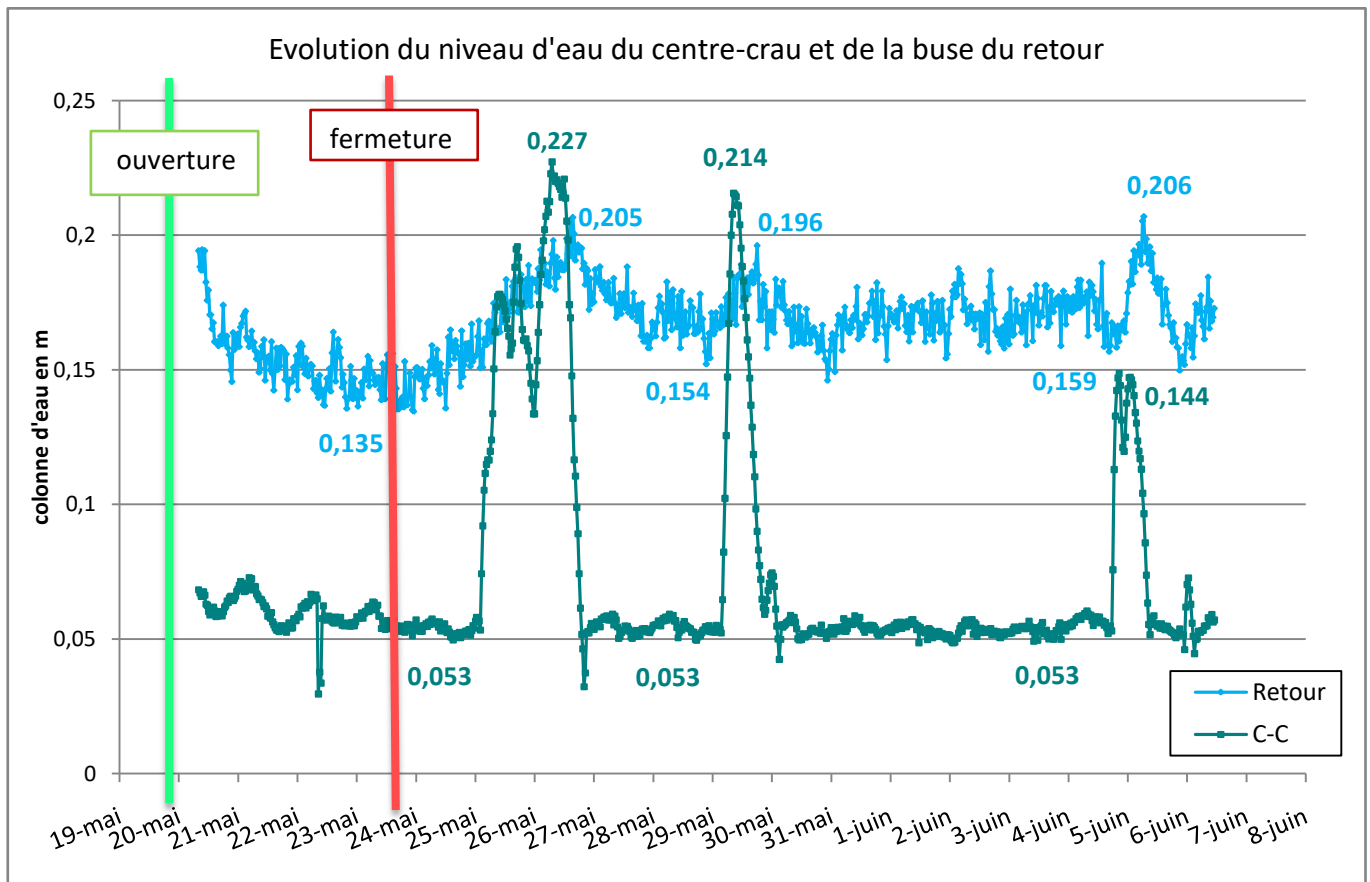
**Le jaugeage au courantomètre** : Des mesures au courantomètre ont été réalisées en différents points dans le marais et dans les canaux proches du marais (canal du Colmatage et canal du Centre-Crau) dans l'optique de réaliser des courbes de tarages sur le site d'étude. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau suivant (**Tableau 5**) :

Identifiant	Date	Hauteur (m/ref)	Débit (L/s)	Débit (m <sup>3</sup> /s)
Buse_Retour	05/04/2017	0,66	15,76	0,01576
Canal_Colmatage	05/04/2017	0,53	789	0,789
Exut_Colm_Landre	05/04/2017	0,56	932,4	0,9324
Vigueirat	05/04/2017		1922	1,922
Buse_Retour	23/05/2017	0,70	0	0
Exut_C_Landre	23/05/2017	0,50	72,7	0,0727
Marais amont	23/05/2017	0,45	0,4	0,0004
Canal retour	23/05/2017	0,79	4,793	0,004793
Pont colmatage	23/05/2017	0,33	4,924	0,004924
Centre-crau	23/05/2017	prof = 0,21 m	5,287	0,005287

**Tableau 5. Récapitulatif des mesures au courantomètre**

Suite aux mesures effectuées, seulement deux points sont comparables en termes de débits : le point réalisé à la buse au retour et le point à l'exutoire du canal du Colmatage vers le Landre. Pour la mesure du 05 avril, le débit à la buse au Retour était de l'ordre de 0,01576 m<sup>3</sup>/s et de 0 m<sup>3</sup>/s pour le 23 mai. En ce qui concerne les mesures effectuées à l'exutoire du canal du colmatage vers l'étang du Landre, le 05 avril nous avons déterminé un débit de 0,9324 m<sup>3</sup>/s et de 0,0727 m<sup>3</sup>/s le 23 mai.

**Quantification des apports d'eau du Centre-Crau :** De manière à comprendre l'influence du Centre-Crau sur le site d'étude, nous avons équipé notre site de deux sondes automatiques de pressions et températures. Les données reportées dans le graphique suivant :

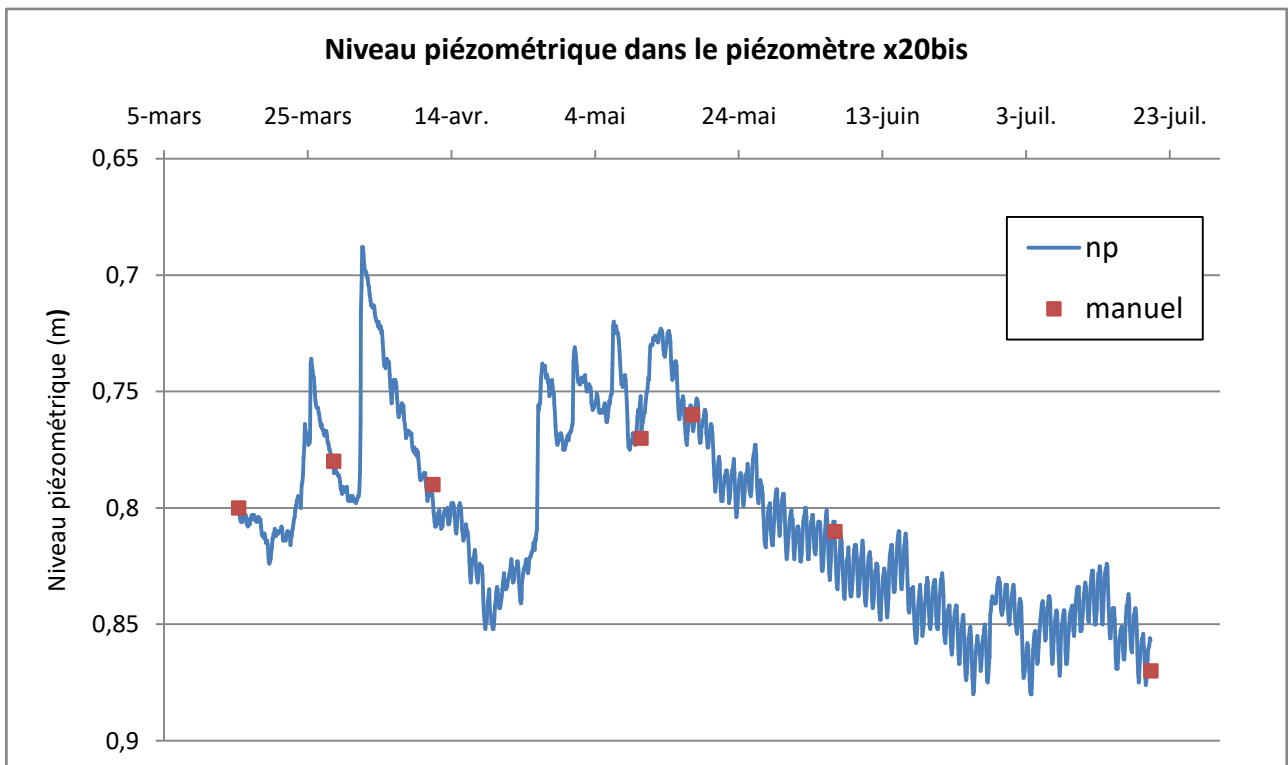


**Figure 16.** Evolution du niveau d'eau entre le canal Centre-Crau et la buse au canal du Retour

Si l'on observe la Figure 16, le premier pic mis en évidence sur le canal du Centre-Crau correspond à la première fermeture des martelières du canal, ce qui implique que l'eau est stoppée dans le canal Centre-Crau et déviée vers le canal du Retour. On observe une hausse rapide du niveau d'eau, passant ainsi d'une colonne d'eau de 0,05m à 0,23m en 2 jours (augmentation de 0,18m). Cette hausse s'observe également sur le canal du Retour, mais de manière moins marquée : on passe de 0,135m de colonne d'eau à 0,205m en 2 jours également (augmentation de 0,07m). Le deuxième pic correspond probablement à la deuxième période de fermeture de la martelière. Pour le canal du Centre-Crau, on voit une augmentation de 0,05m à 0,21m en 1 jour (augmentation de 0,16m), tandis que le canal du Retour augmente de 0,15m à 0,20m (augmentation de 0,05m) en 1 jour également. Le dernier pic correspond probablement à une troisième période de fermeture. Pour le canal du Centre-Crau, on observe une augmentation de 0,05m à 0,14m en une journée, tandis que pour le canal du Retour, on observe une variation de 0,16m à 0,21m (augmentation de 0,04m).

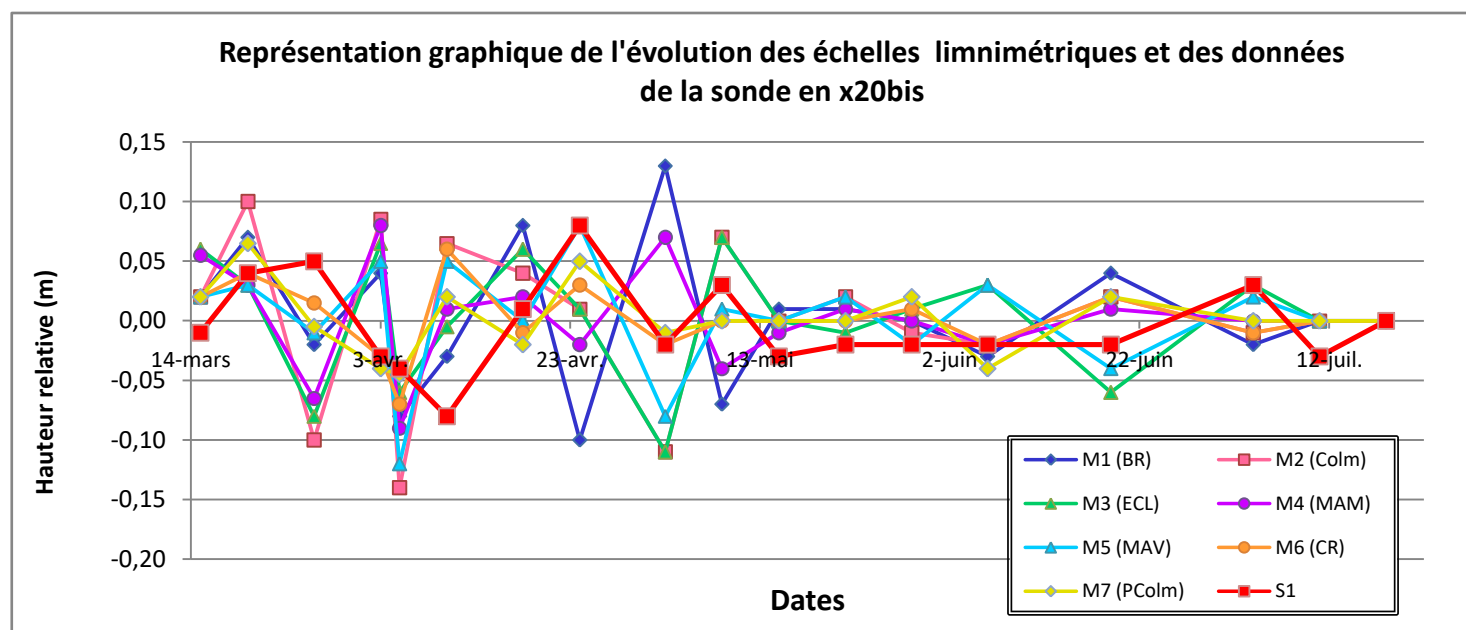
#### 4.1.3 Hydrogéologie

**Suivi à haute fréquence sur x20bis** : La sonde de mesure de la pression et de la température installée dans le piézomètre x20bis, permet de suivre en continu le niveau de la colonne d'eau dans le tube piézométrique. Ainsi, après 4 mois de suivi, s'étalant de mars à juillet, les données suivantes ont été extraites et traitées (Figure 17) :



**Figure 17.** Représentation graphique de l'évolution du niveau piézométrique en x20bis

Si l'on observe les résultats de la courbe, on note des variations importantes dans les données, notamment entre mars et début mai. Ensuite, de mai à juillet, on observe une diminution constante des valeurs, jusqu'à environ 0,87 m. Les mesures ponctuelles effectuées dans le piézomètre x20bis se trouvent sur la courbe du niveau piézométrique, ce qui affirme l'exactitude des données effectuées sur ce piézomètre. De plus, nous avons essayé de comparer les évolutions des hauteurs d'eau des échelles limnimétriques et les données obtenues grâce à la sonde automatique de pression et température mise en place dans le piézomètre x20bis. Nous avons réalisé un graphique (Figure 18 et Annexe 7) de manière à comparer ces évolutions au courant du temps.



**Figure 18.** Représentation graphique de l'évolution des échelles et de la sonde x20bis

La courbe représentant les données de la sonde automatique est visible en rouge sur le graphique (Figure 18). De manière générale, on observe une augmentation des valeurs au mois de mars, puis une baisse au mois d'avril et une autre augmentation à partir de fin avril, jusqu'à mi-mai. A partir de mi-mai, on observe un palier où la courbe semble se stabiliser autour de la même valeur, avant d'augmenter légèrement au début du mois de juin. A certains moments, la courbe S1 semble suivre les valeurs des points M2, M3 et notamment entre mi-avril et début-juin. De plus, de la même manière que pour les échelles limnimétriques, nous avons déterminé le coefficient de corrélation en prenant en compte les valeurs des échelles limnimétriques mais également des valeurs de la sonde dans x20bis aux mêmes dates. Ainsi, nous obtenus le tableau suivant :

	M1 (BR)	M2 (Colm)	M3 (ECL)	M4 (MAM)	M6 (CR)	M7 (PColm)	S1
M1 (BR)	1						
M2 (Colm)	0,1067	1					
M3 (ECL)	-0,1410	0,7552	1				
M4 (MAM)	0,7494	0,4584	0,2440	1			
M6 (CR)	0,0216	0,5342	0,1186	0,2004	1		
M7 (PColm)	0,0162	0,4210	0,0666	0,1566	0,8372	1	
S1	-0,1874	0,0433	0,1444	-0,2073	0,1828	0,4130	1

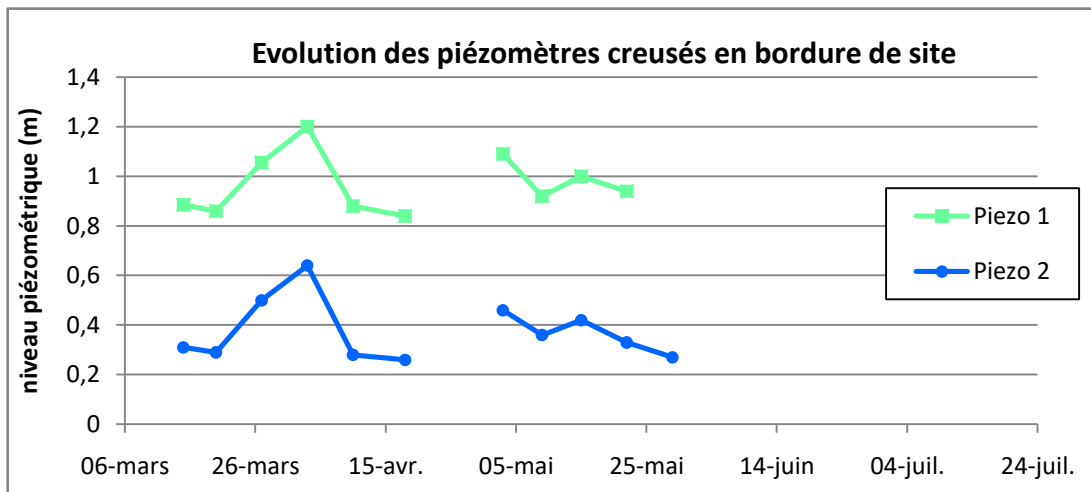
**Tableau 6.** Analyse statistique de la corrélation entre les échelles et la sonde automatique

La sonde de mesure est appelée S1 dans le tableau. Les résultats de l'analyse corrélatrice s'interprètent de la même manière que précédemment. Nous nous intéressons principalement aux résultats des corrélations de S1 avec les échelles limnimétriques. Cependant, les valeurs des



corrélations ne semblent pas fortes : en effet, la meilleure corrélation est de 0,41 avec l'échelle M7. Pour les autres échelles, les valeurs varient entre -0,20 et 0,18.

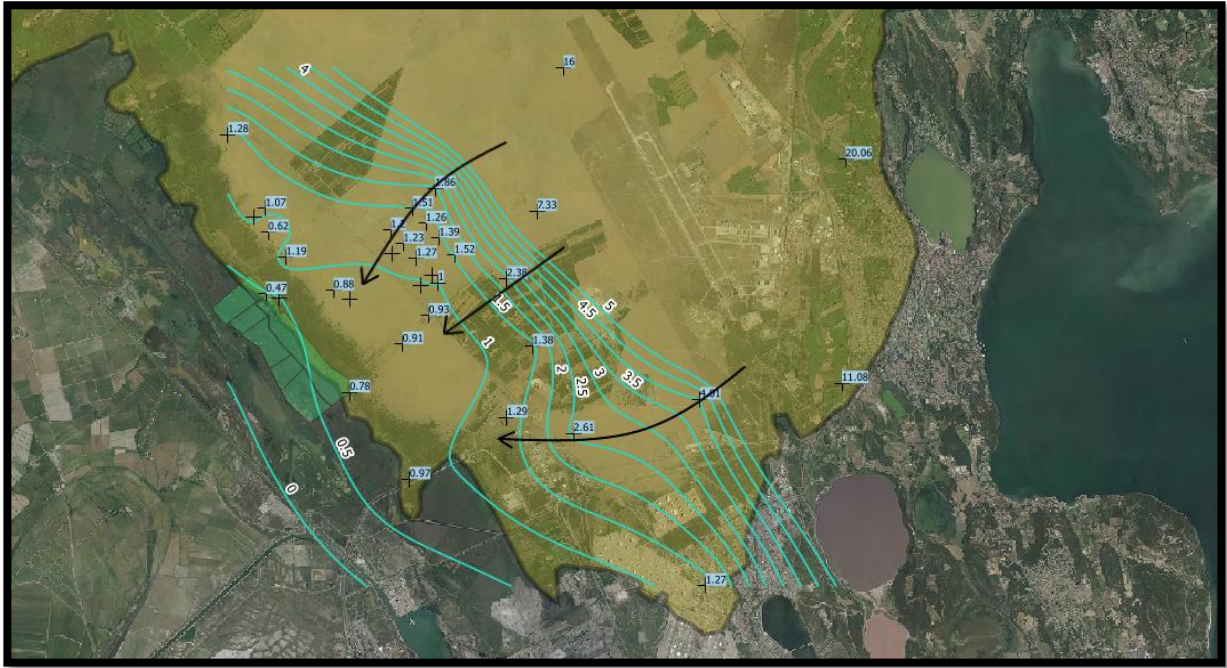
**Les piézomètres creusés à la tarière :** Le suivi des piézomètres creusés à la tarière s'est fait de mars à juillet, toutes les semaines, en même temps que le suivi des échelles limnimétriques. Les données obtenues sont reportées dans le graphique suivant (Figure 19):



**Figure 19.** Représentation graphique de l'évolution du niveau d'eau dans les piézomètres creusés

On observe quelques lacunes dans les données, cependant on peut rapidement observer que ces deux piézomètres varient ensemble au cours du temps. En effet, le 24 mars, les piézomètres 1 et 2 sont respectivement à des valeurs de 0,82 m et 0,24 m et augmentent ensemble jusqu'au 8 avril pour arriver à des valeurs de 1,2m et 0,62m. De plus, lorsque l'on observe des lacunes dans les données, quand les piézomètres sont à sec, cela s'observe sur les deux : entre le 15 avril et le 05 mai et à partir du 29 mai.

**Le suivi de la nappe :** Le suivi piézométrique mensuel nous permet de réaliser une carte piézométrique représentant la dynamique de la nappe. Nous présentons ici (Figure 20) une carte piézométrique du mois de mars du site d'étude avec les sens d'écoulements :



**Figure 20.** Carte piézométrique du mois de mars pour le site, d'après Surfer et QGIS

Cette carte piézométrique nous permet d'identifier les sens d'écoulements des eaux, ces courbes sont tracées à partir des courbes isopièzes. Ce sont des courbes équipotentielles qui correspondent à des courbes d'égales côtes de la surface piézométrique. Ces lignes vont des niveaux hauts aux niveaux bas, perpendiculairement aux lignes piézométriques. On observe un gradient hydraulique fort, qui se traduit par des lignes serrées pour les valeurs allant de 2 à 5 m. Cependant pour les valeurs entre 0,5 m et 1,5 m environ, le gradient hydraulique est plutôt faible, avec une rupture de pente entre 0,5 et 1 m dans une zone proche de notre site d'étude. La réalisation de cette carte piézométrique nous permet également de déterminer le gradient hydraulique  $i$  au niveau de notre système de marais. La détermination de ce gradient hydraulique  $i$  est indispensable pour la détermination du débit  $Q$  de la nappe dans la zone de débordement des marais. Ainsi, on détermine ce débit grâce à la loi de Darcy :

$$Q = K \times A \times i$$

Avec  $Q$  le débit en  $m^3/s$ ,  $A$  la géométrie de l'aquifère et  $i$  le gradient hydraulique avec  $i = \Delta H / L$  où  $\Delta H$  est la différence de hauteur piézométrique et  $L$  la longueur.

$K$  est la perméabilité des cailloutis dans la zone de convergence des écoulements, elle est estimée entre  $1 \times 10^{-3}$  et  $5 \times 10^{-3}$  selon Séraphin, 2016.  $A$  est déterminée en prenant la moyenne de l'épaisseur de cailloutis dans la zone de résurgence et est fixée à 13m. On estime donc  $Q_{SIN}$ , le débit en sortie de la nappe, avec cette formule, et on détermine :  $Q_{SIN} = 1,57 \times 10^6$  à  $7,88 \times 10^6 m^3/an$ .

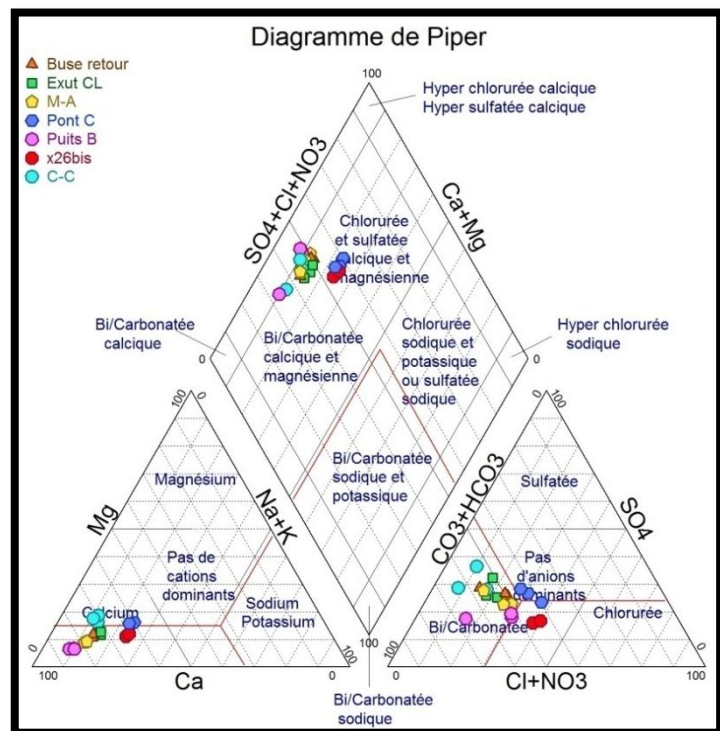
Ce débit de la nappe au niveau des résurgences va alimenter le débit dans les marais, que l'on appelle **QSMAR** et que l'on exprime selon la relation flux-potentiel (De Marsely, 2004) avec l'équation suivante :

$$Q_{smar} = K' \times \frac{(h_{mar} - h_s)}{e'}$$

Avec **Qsmar** le débit en m<sup>3</sup>/s, **K'** la conductivité hydraulique pour les limons en m/s, **hs** et **hmar** respectivement la charge dans la nappe et dans les marais et, **e'** l'épaisseur de limons.

La conductivité hydraulique **K'** est estimée entre 4,0x10<sup>-5</sup> et 10<sup>-6</sup> selon Mayer, 2016. La charge de la nappe est estimée selon une moyenne déterminée à partir des valeurs de la sonde de pression et température qui se trouve dans le piézomètre x20bis. La charge dans les marais est estimée à partir des valeurs des échelles limnimétriques placées dans les marais. L'épaisseur des limons est estimée selon une moyenne déterminée à partir des valeurs des logs géologiques disponibles dans la BSS et est de 1,01m. Grâce à ces valeurs, on estime donc **QSMAR** entre 1,84 x 10<sup>6</sup> et 76,68 x 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/an.

**Analyses chimiques :** Pour l'analyse chimique, nous avons utilisé le logiciel DIAGRAMMES de manière à réaliser un diagramme de Piper (Figure 21). Celui-ci nous permet de différencier les faciès chimiques en eau rencontrés pour notre étude. A l'aide de ce graphique nous pouvons déterminer que toutes nos eaux entrent dans le faciès de type bi-carbonaté calcique, un faciès typique des aquifères en roche calcaire.



**Fig. 21.** Diagramme de Piper pour les analyses chimiques

Pour la compréhension des analyses chimiques, nous allons faire un focus sur les données chlorures, sulfates et nitrates, dont les résultats sont présentés dans le tableau suivant (Tableau 7) :

	Date	Chlorures (mg/L)	Sulfates (mg/L)	Nitrates (mg/L)
Buse retour	14-mars	28,31	88,04	60,67
	10-avr.	31,22		
	8-mai	29,17	93,50	56,25
	4-juil.	30,25	110,54	5,36
Exutoire CL	14-mars	42,31	105,31	44,72
	10-avr.	43,51		
	8-mai	35,97	105,45	33,02
	4-juil.	40,17	110,54	5,36
Marais amont	14-mars	26,41	78,14	77,08
	10-avr.	28,31		
	8-mai	26,84	75,23	61,79
	4-juil.	28,30	81,18	12,41
Pont Colm	14-mars	68,42	96,54	77,12
	10-avr.	29,02		
	8-mai	68,46	93,43	20,12
	4-juil.	72,25	102,67	4,36
Puits Berg	14-mars	18,21	54,93	85,48
	10-avr.	20,29		
	8-mai	20,24	58,57	79,55
	4-juil.	20,46	60,69	34,60
x26bis	14-mars	83,64	60,31	38,84
	8-mai	94,00	66,58	42,00
Centre-crau	8-mai	26,94	103,05	33,73
	6-juin	25,98	127,99	
	4-juil.	22,19	115,73	1,72

Tableau 7. Récapitulatif des analyses chimiques (chlorures, sulfates, nitrates)

En termes de concentration en chlorures, on ne voit pas l'évolution marquée sur les points d'observations. Tous nos points de mesures se situent dans des gammes allant de 22 à 43 mg/L, sauf pour le point de mesure au pont du Colmatage : les valeurs des chlorures passent de 68,42 à 29,02 puis de nouveau à 68,46 mg/L. Le point x26bis sort du lot également, puisque les valeurs des chlorures sont de 83,64 et mg/L et 94,00 mg/L.

Les résultats pour les sulfates varient de 54mg/L à 127mg/L. Les points de mesures qui semblent contenir le plus de sulfates sont : le canal du Centre-Crau, le pont du Colmatage, la buse du canal du Retour ainsi que l'exutoire du Colmatage au Landre, avec des valeurs dépassant les 100mg/L.

Si l'on observe les concentrations en nitrates, certaines données sortent du lot. Tout d'abord il est important de savoir que la norme de potabilité pour les nitrates est de 50 mg/L. Or, beaucoup des points dépassent cette valeur : la buse dans le canal du Retour, le point dans le marais, le pont du canal du Colmatage, mais également le puits à la bergerie (qui contient l'eau de la nappe).

**Analyses isotopiques :** Des analyses isotopiques ont été réalisées sur les différents points d'échantillonnage. Les résultats sont présentés sur le graphique suivant (Figure 22) :

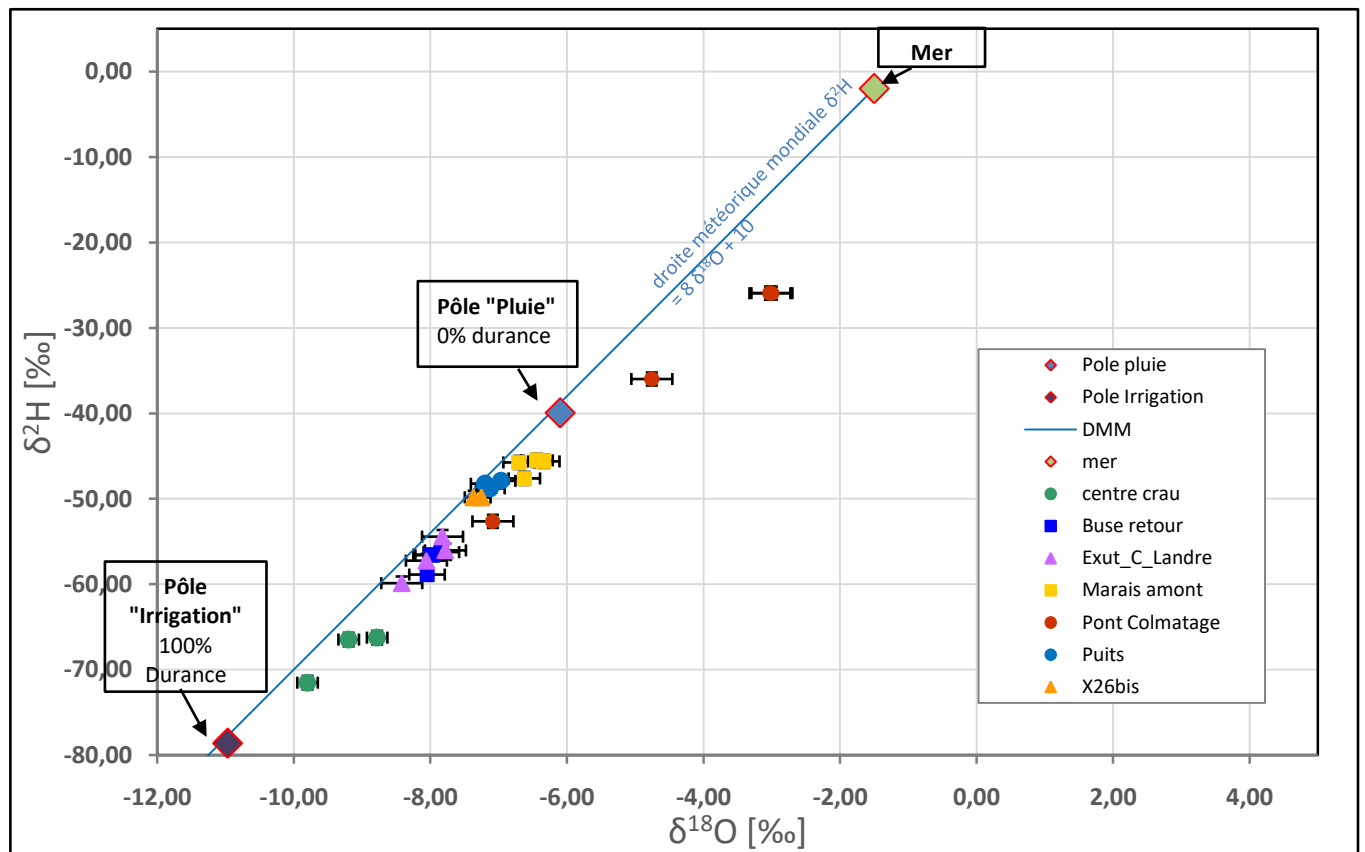


Figure 22. Représentation graphique des résultats de l'analyse isotopique

Les points s'alignent sur la droite météorologique mondiale (DMM) et se rapprochent de leur pôle d'enrichissement. Ainsi, une eau proche de la composition isotopique de l'eau de la Durance a une tendance à se décaler vers la gauche sur la droite. De ce fait, on voit que les points d'observation du canal Centre-Crau semblent avoir une forte proportion d'eau de la Durance dans sa composition (avec 65 % d'irrigation et 35% d'eau de pluie). Les points x26bis et puits bergerie représentent la composition isotopique de la nappe, ces points ont des pourcentages de 25% irrigation et 75% pluie. L'eau prélevée dans le marais se trouve proche de ces valeurs mais est plus enrichie en eau de pluie, avec des valeurs de 10% irrigation et 90% de pluie. En ce qui concerne les points buse Retour et exutoire du Colmatage vers le Landre, ceux-ci semblent être des mélanges « parfaits » d'eau de pluie et d'eau d'irrigation. Pour ces deux points, les valeurs sont de l'ordre de 40% d'irrigation et 60% d'eau de pluie. Enfin, pour le point pont Colmatage, celui-ci semble s'éloigner de la droite DMM. De plus, les valeurs dépassent le pôle eau et semblent se décaler vers le pôle eau de mer.

## 4.2 Compréhension du système et discussions

### 4.2.1 Climatologie : données pluviométriques et ETR

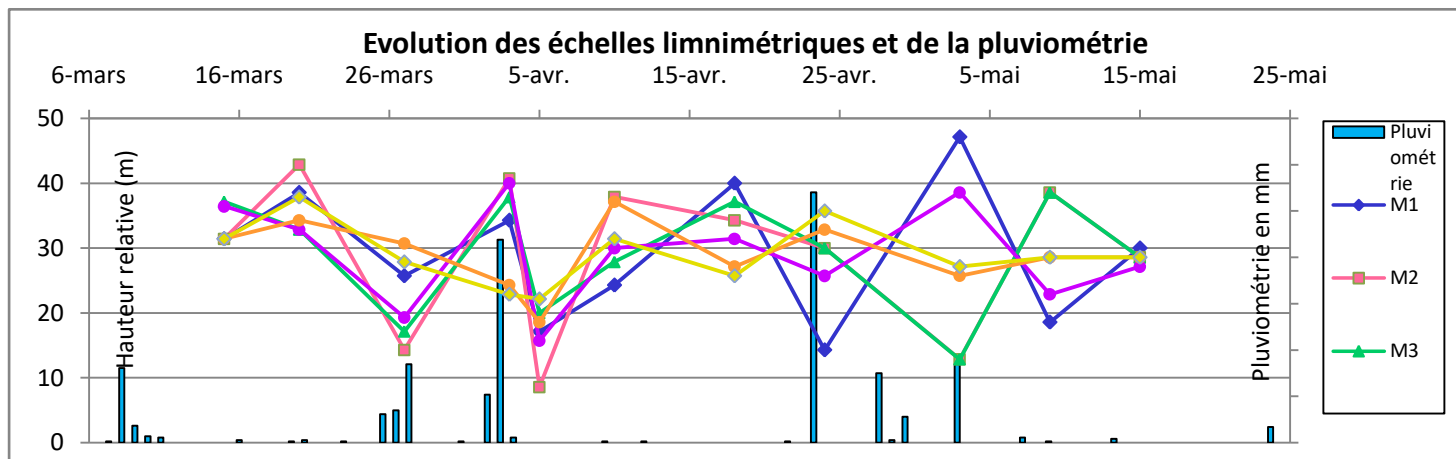
**Bilan pluviométrique :** Grâce au bilan pluviométrique (Figure 13), il est rapidement observable que les mois de janvier, mars et avril ont été les plus pluvieux avec respectivement 41.2, 46.4 et 82 mm de pluies mesurés. A ce bilan pluviométrique de 2017, nous avons choisi de comparer les données à celle de l'année précédente, ce qui nous a permis de mettre en évidence que le mois de février de 2017 a été moins pluvieux que celui de 2016. Et que le mois d'avril a été particulièrement pluvieux comparé à celui de 2016. Associé à ces bilans hydrologiques, nous avons réalisé une graphique qui représente le volume d'eau reçu sur notre site d'étude. Etant donné que ce graphique est basé sur la pluviométrie, il est normal de retrouver les mêmes informations selon lesquelles les mois de janvier, mars et avril ont été ceux où les quantités de pluies ont été les plus importantes sur le site. Les précipitations constituent une entrée de notre système, celles-ci sont de l'ordre de  $1,5 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{an}$ .

**L'Évapotranspiration :** La détermination de l'évapotranspiration se fait grâce à un bilan hydrique (Tableau 2) qui prend en compte les valeurs de la pluviométrie. Pour cette étude, la Réserve utile (Ru) est nulle pour une grande période, cependant ce n'est pas le cas sur le terrain puisque le sol est constamment saturé en eau. Ceci est dû à l'arrivée d'eau constante par les canaux et l'alimentation par la nappe de la Crau, qui ne sont pas pris en compte pour ce bilan hydrique (ROS L., 2016). Ainsi, il faut se rendre compte de l'importance des ces arrivées d'eaux pour les marais : Sans ces apports, le milieu ne serait pas capable de subvenir aux besoins en eau. De plus, pour les périodes de février à juillet 2017, l'ETR est supérieur ou égale à la pluviométrie, ce qui implique un fort pouvoir évaporatoire sur notre site d'étude. La plupart de la pluviométrie repart par évapotranspiration, ce qui ne permet pas de mise en réserve de cette eau. L'ETR constitue une sortie de notre système, celui-ci est de l'ordre de  $4,5 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{an}$ .

### 4.2.2 Hydrologie de surface

**Echelles limnimétriques :** Les résultats de ces données (Figure 15) montrent des variations significatives au cours du temps. Pour la période allant de début mars à début mai, toutes les échelles limnimétriques montrent des variations significatives, qui peuvent être dues aux apports d'eau par les précipitations, qui sont relativement importantes au printemps. Pour vérifier cette hypothèse de travail, nous avons réalisé un graphique confrontant les données pluviométriques aux valeurs des échelles (Figure 23 et Annexe 9).





**Figure 23.** Evolution des échelles limnimétriques et de la pluviométrie

Pour la réalisation de ce graphique, nous avons fait un focus sur les données entre début mars et mi-mai. Le niveau d'eau dans le marais semble être influencé par la pluviométrie seulement pour des pluies supérieure à 10mm. Ainsi, le 26 mars, suite à une pluie de 12mm, le niveau d'eau sur les échelles M1, M2, M3, M4 a augmenté de manière significative. A cela, des pluies ont été relevées le 02 et le 04 avril, ce qui a continué de faire augmenter le niveau d'eau dans ces échelles. Cependant, les échelles M6 et M7 ne semblent pas affectées par ces pluies.

Suite à la forte pluie du 24 avril, visible sur le graphique, on voit que la pluviométrie semble avoir une influence sur certains points de mesure uniquement : les échelles M1, et M4 augmentent, tandis que les échelles M2, M3, M6 et M7 semblent peu affectées par cette pluie, voir diminuent. M2 et M3 diminuent fortement suite à cette précipitation. On peut expliquer cela par le fait que le niveau d'eau dans le canal du Colmatage est contrôlé par les niveaux d'eaux de l'ouvrage du Galejon. Cet est couplé à un barrage anti-sel et est contrôlé par le GPM (Grand Port Maritime de Marseille). Ces ouvrages sont soumis à une régulation automatique des niveaux d'eau selon une cote réglementaire.

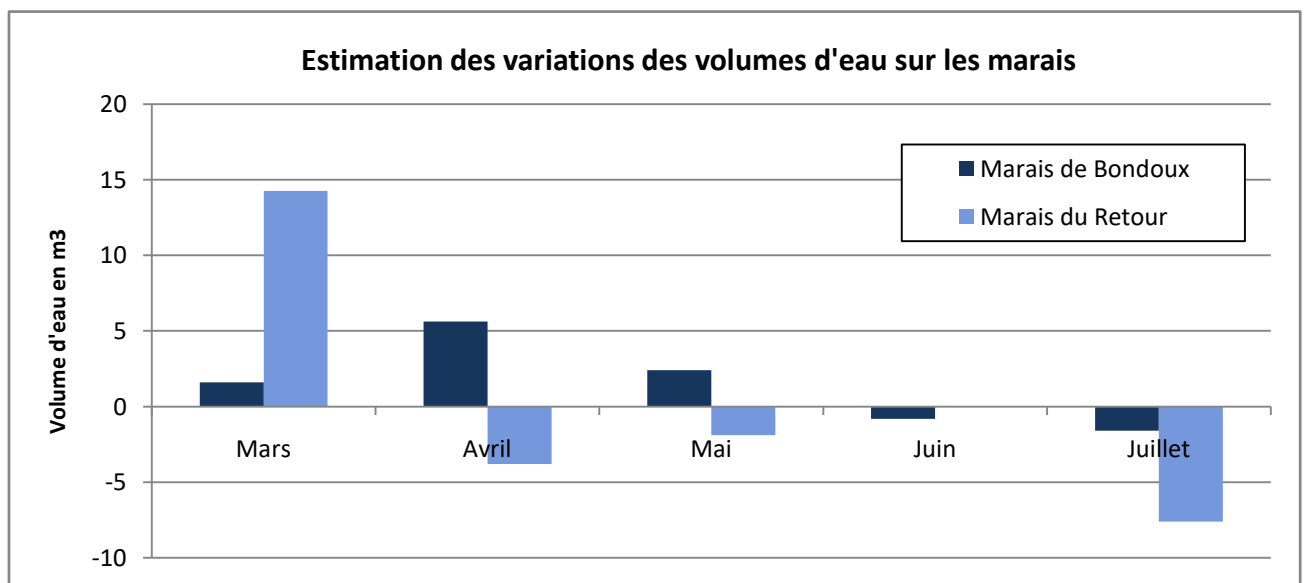
Pour la période allant de début juin à début juillet, les résultats montrent de faibles variations des échelles limnimétriques. On explique cela par le fait que nous sommes en été, avec un fort ensoleillement et de faibles précipitations, donc une faible contribution de la part des précipitations dans les variations de hauteurs d'eau. Cependant, à cette période, le canal du Centre-Crau se met en eau de manière ponctuelle. Il est donc possible qu'il contribue aux variations de hauteurs d'eau et soit donc majoritairement responsable des quelques variations observées. Ainsi, pour la fin du mois de juillet, lorsque les valeurs de variations sont de 0, on peut lier cela au fait que ce soit une période où le Canal du Centre-Crau est relativement bas, voir à sec et où les précipitations sont nulles.

En combinant ces résultats et les analyses corrélatoires réalisées (Tableau 4), on peut constituer trois groupes distincts : les points M1 et M4, qui semblent augmenter selon les données pluviométriques, les points M2 et M3, qui semblent réagir à l'inverse des précipitations, lorsqu'une pluie intense est mesurée, les niveaux d'eaux de ces échelles semblent diminuer : on suppose donc que

cela est dû à la régulation du niveau d'eau dans le canal du Colmatage par les ouvrages du GPMM, et enfin, les points M6 et M7 qui semblent eux aussi varier indépendamment des autres points.

Pour notre étude, la dynamique des marais semble être la suivante : l'échelle limnimétrique qui nous intéresse est M4, celle qui est posée dans le marais de Bondoux. Cette échelle évolue de manière semblable à l'échelle M1 (échelle à l'entrée du canal du Retour), et semble être indépendante des autres échelles du site. Ainsi, le Canal du Colmatage ne semble pas corrélés aux phénomènes hydrologiques qui peuvent se produire dans le marais de Bondoux. De la même manière, le marais du Retour ne semble pas être corrélé au marais de Bondoux puisque l'échelle M4 n'est pas corrélée aux échelles M6 et M7, ou en tout cas, ce phénomène n'est pas mesurable par cette approche.

Il est également intéressant d'essayer d'observer les variations en terme de volumes d'eau pour chaque marais : ainsi, il nous faut prendre en compte les variations des échelles limnimétriques sur la surface du marais de Bondoux et du marais du Retour. Etant donné que nous avons mis en évidence des groupes distincts dans le marais, nous utilisons les échelles M4 et M6 pour ce traitement de données (Figure 24).



**Figure 24.** Estimation des variations de volumes d'eau sur les marais (Bondoux et Retour)

Précédemment nous avons mis en évidence que les mois les plus pluvieux étaient ceux de janvier, de mars et d'avril. Pour le marais de Bondoux, cela semble correspondre puisque le volume d'eau dans le marais augmente en mars, en avril et en mai, sous l'influence des précipitations. Cependant pour les mois de juin et juillet, les volumes sont négatifs, ce qui peut s'expliquer par le fait que l'évapotranspiration est importante en cette saison, que la pluie est faible et que les apports de la nappe ne suffisent pas à garder le système à l'équilibre. Pour le marais du Retour, on observe un grand volume au mois de mars, et des diminutions pour les mois d'avril, mai et juillet. En juin, la valeur est de zéro, ce qui peut s'expliquer par un bon équilibre entre apport et perte dans le système. Cependant,



le marais du Retour semble fortement soumis à l'évapotranspiration ou au drainage des eaux puisque les volumes d'eaux sont négatifs. De ce fait, on se trouve dans un secteur où les pluies ne semblent pas négligeables pour le bon fonctionnement des marais.

**Jaugeages au courantomètre :** Les mesures au courantomètre (Tableau 5) ont été déterminées afin d'estimer les débits en différents points et de réaliser des courbes de tarages dans des canaux du marais. Cependant, pour réaliser les courbes de tarages, il faut prendre des mesures de débits à différentes hauteurs. Mais le manque de fluctuation des hauteurs d'eau dans le marais ne nous a pas permis d'obtenir des valeurs significatives pour la réalisation des courbes de tarages. Néanmoins, les mesures nous ont permis de mettre en évidence certaines informations importantes et notamment le fait que les débits au niveau du marais (buse Retour, marais amont, marais aval, canal du Retour et pont Colmatage) sont très faibles, ce qui met bien en évidence que la dynamique du marais est relativement lente. De plus, en comparant les débits au canal du Colmatage (0,789 m<sup>3</sup>/s) et à l'exutoire du Colmatage au Landre (0,93 m<sup>3</sup>/s), on peut déterminer que la majorité du débit qui s'écoule au niveau du canal du Colmatage s'écoule également à cet exutoire. Les différences de débits entre ces points étant certainement dues à la part d'eau qui est drainée par les roubines des marais et qui s'écoule également par cet exutoire. Concernant les variations significatives des débits observables d'une mesure à l'autre, il est important de prendre en compte un paramètre dans l'interprétation de ces mesures : le vent a une influence sur les débits mesurés dans les canaux. Le 05 avril, un fort Mistral était présent lors des mesures, ce qui a probablement apporté des variations de débits et notamment dans les petits canaux et les roubines qui sont fortement influencés par les variations de surfaces.

Les mesures au courantomètre nous permettent également d'observer que le débit relevé le 23 avril au niveau du pont du colmatage, est faible, de l'ordre de 0,0049 m<sup>3</sup>/s, ce qui nous permet d'avancer l'hypothèse selon laquelle la dynamique des marais en ce point est relativement petite et que ces points ne semblent pas varier en fonction des apports d'eau des roubines.

**Quantification des apports d'eau du Centre-Crau :** En se fiant aux observations graphiques (Figure 16), on voit que le canal du Centre-Crau semble avoir une influence sur la réponse hydrologique du canal du Retour. En effet, les deux courbes semblent varier ensemble sous l'influence d'apports d'eau, cependant le canal du Retour réagit moins rapidement que le canal du Centre-Crau aux variations. Les pics du canal Centre-Crau sont rapides et le retour à un état initial est tout aussi rapide. Ce n'est pas le cas pour le canal du Retour, où les variations sont moins marquées, et plus lentes et on ne retrouve pas de retour à un état initial, mais seulement un lissage de la courbe avant d'accuser la nouvelle augmentation du niveau d'eau.

Il ne nous a pas été possible de comparer ces valeurs avec les mesures des échelles limnimétriques. En effet, la collecte des données étant les lundis et mardis, et il semblerait que les apports d'eau dans le marais se produisent en dehors de la période de suivi des échelles

limnimétriques. Cela ne nous permet pas d'étendre nos observations à toutes les échelles du marais. Cependant, nous avons mis en évidence le fait que les échelles M1 (de la buse au canal du retour) et M4 (dans le marais amont), varient de la même manière aux perturbations hydrologiques, ce qui nous permet de dire qu'une perturbation au niveau de M1 sera observable sur M4.

#### 4.2.3 Hydrogéologie

**Sonde automatique** : Selon les observations de la courbe de traitement des données de la sonde de pression-température du piézomètre x20bis (Figure 17, localisation en Annexe 3), on observe des variations importantes, notamment entre mars et début mai, ce qui peut s'expliquer par la présence d'événements pluvieux, qui alimentent la nappe, avec une certaine inertie. Ces pluies vont donc mettre en charge le système et faire augmenter le niveau d'eau dans la colonne d'eau.

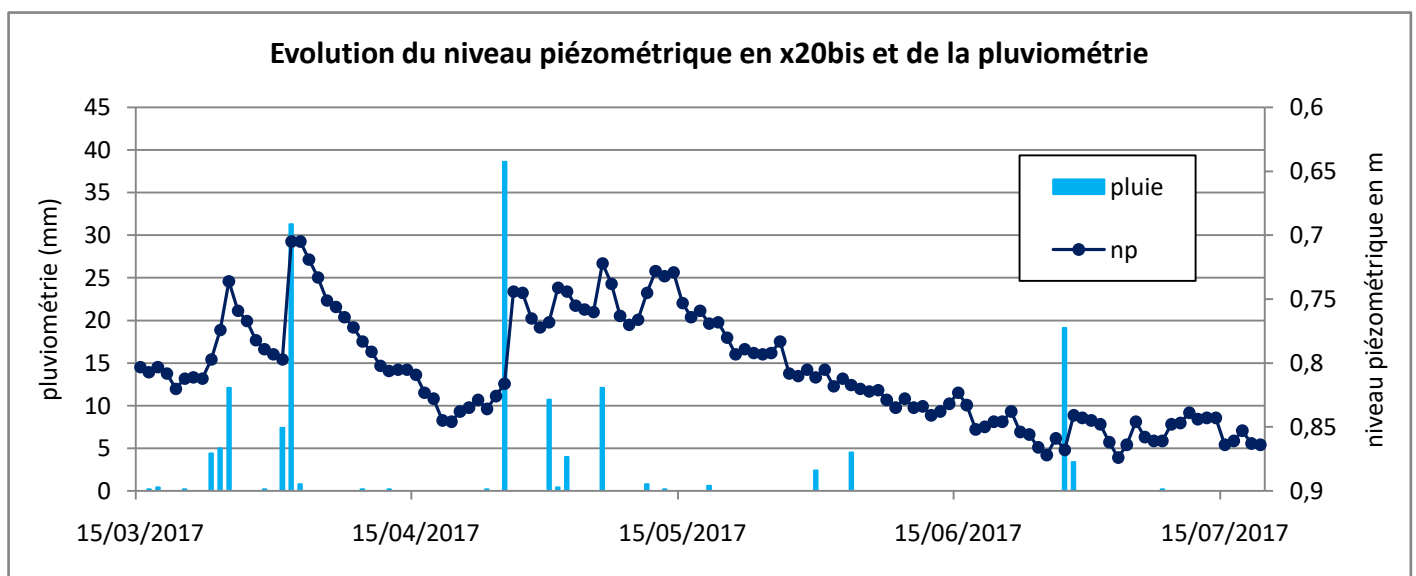


Figure 25. Evolution du niveau piézométrique en x20bis et pluviométrie

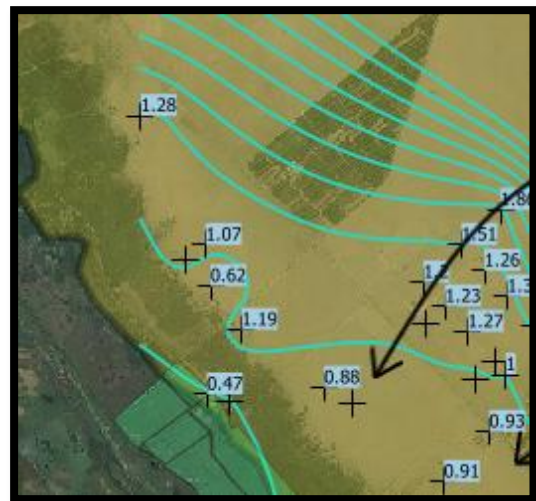
Pour répondre à cet argument concernant la relation entre la pluviométrie et l'évolution des niveaux piézométriques en x20bis (qui est placé à l'amont de notre système de marais), nous avons réalisé une représentation graphique (Figure 25) qui confronte ces deux données. Ainsi, suite à une pluie significative de plus de 10 mm, on observe une réponse de la part de la nappe. En effet, suite à la pluie du 03 avril, le niveau piézométrique augmente rapidement, de 0,85 à 0,7. De la même manière, suite à la pluie du 24 avril, le niveau piézométrique va augmenter sensiblement. Ensuite, de mai à juillet, on observe une diminution constante des valeurs, avec quelques légères variations, qui traduisent des apports d'eau issus de l'irrigation des prairies de foin et de quelques petits épisodes pluvieux.

Suite à l'analyse corrélatrice effectuée entre S1 et les échelles limnimétriques (Tableau 6), les résultats obtenus ne sont pas très concluants : les points d'observations ne sont pas très corrélés, ni

anti-corrélés. Etant donné que l'on essaie de comparer deux systèmes différents avec des temps de réponses variables, on peut se poser la question de l'exactitude des résultats de comparaisons. En effet, il est probable que la nappe ait un temps d'inertie à prendre en compte pour que les valeurs soient comparables. De ce fait, il est difficile d'avancer une interprétation cohérente concernant l'analyse statistique de ces données.

**Les piézomètres creusés à la tarière :** Selon les observations du graphique (Figure 19), les deux piézomètres semblent varier ensemble au cours du temps. Une augmentation sur l'un des piézomètres est également visible sur les données de l'autre et, il en est de même pour les diminutions. En effet, lorsque les piézomètres sont à sec pendant la saison, cela est visible sur les deux. Cependant, on note une différence entre les deux ouvrages : le piézomètre 1 a un niveau d'eau plus haut que le piézomètre 2, généralement, la hauteur d'eau observée au piézomètre 1 est 3 à 4 fois plus grande que celle observées au piézomètre 2. Les données sur ces deux ouvrages ne nous permettent pas de dégager d'autres informations pertinentes dans la compréhension du système de marais et son interaction avec la nappe.

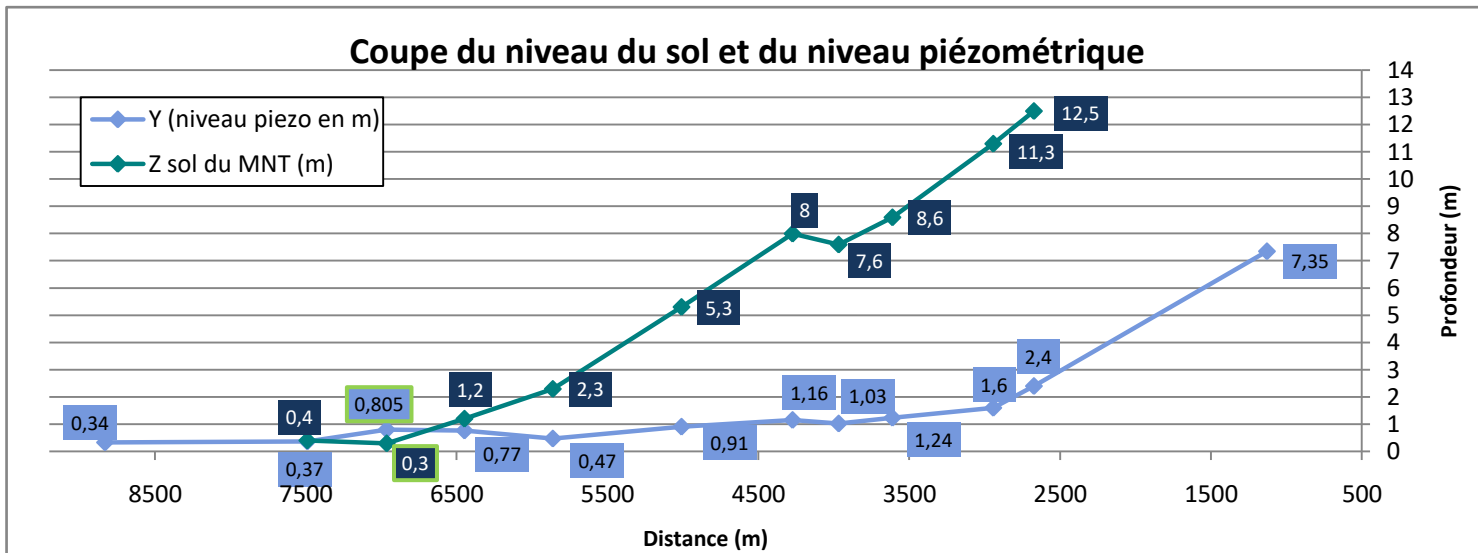
**Le suivi de la nappe :** La carte piézométrique proposée (Figure 20) nous permet d'observer que certains écoulements semblent converger vers notre zone d'étude. Cependant certaines incertitudes sont à prendre en compte dans la détermination de la carte piézométrique. En effet, selon la méthode d'extrapolation utilisée pour la carte piézométrique, on peut observer quelques variations dans le lissage des courbes piézométriques. De plus, il faut tenir compte du fait que certains points d'observations sont des puits privés qui sont donc utilisés par les propriétaires. Ce qui peut produire des dépressions sur les cartes comme présenté dans la Figure 26.



**Figure 26.** Zoom sur la carte piézométrique

De plus, la densité des points sur la carte peut faire varier la réponse donnée par le logiciel d'extrapolation. Certains points de mesures au-delà des 5m ont été retirés de l'interprétation car le manque de points d'observations engendrait quelques modifications dans les données.

Pour mettre en relation le niveau piézométrique de la nappe et le marais, nous avons réalisé une coupe, qui passe par le coussoul et le marais (au niveau de la bordure avec le marais du coucou). Nous avons donc représenté sur ce graphique (Figure 27) le niveau du sol, et le niveau piézométrique :



**Figure 27.** Coupe représentant le niveau du sol et le niveau piézométrique

On observe que le niveau piézométrique recoupe le niveau du sol (en rouge) en un endroit : cet endroit correspond à la zone des marais. Cette représentation nous permet d'affirmer notre hypothèse selon laquelle la nappe de la Crau alimente notre marais par des résurgences d'eau souterraines. Il nous faut maintenant arriver à quantifier ces relations. Pour cela, nous avons donc calculé QSIN, qui est estimé entre  $1,57 \times 10^6$  à  $7,88 \times 10^6$  m<sup>3</sup>/an, ce qui équivaut à des valeurs de l'ordre de 0,04 m<sup>3</sup>/s à 0,25 m<sup>3</sup>/s pour une perméabilité de  $5 \times 10^{-3}$ . Cette valeur est comparée à la valeur déterminée par Séraphin en 2016, celle-ci était de 3,1 m<sup>3</sup>/s, de plus le SYMCRAU dispose d'un logiciel de modélisation numérique qui nous permet également de confronter ces données. Suite au fonctionnement de ce modèle, nous avons pu obtenir une valeur de 1,35 m<sup>3</sup>/s pour le débit QSIN. Ainsi, la valeur que nous avons calculée sous-estime les débits en comparaison des valeurs extraites des modèles numériques. Cependant, cela reste dans le même ordre de grandeur, et il nous faut prendre en compte certaines incertitudes dans nos calculs : la perméabilité n'a pas été mesurée localement sur notre site, elle est extraite des données bibliographiques. De plus l'épaisseur des cailloutis est également une variable importante à prendre en compte, et c'est une donnée qu'il faudra affiner, ainsi que la perméabilité pour obtenir une valeur plus exacte du débit QSIN.

QSIN se divise en deux parties, QSMAR qui alimente le marais et QSOUT qui est le débit souterrain naturel qui continue sous la Camargue. Ce débit a été estimé entre 3 et  $6 \times 10^6$  m<sup>3</sup>/an par Durozoy en 1966, mais il est souvent négligé dans la littérature.

D'après le calcul, nous avons estimé QSMAR entre  $1,84 \times 10^6$  et  $76,68 \times 10^6$  m<sup>3</sup>/an, ce qui équivaut à des valeurs comprises entre 0,05 m<sup>3</sup>/s et 2,43 m<sup>3</sup>/s. Comme expliqué précédemment, le débit QSMAR dépend du débit QSIN, il ne peut donc pas être supérieur à l'apport d'eau de la nappe. De ce fait, cela nous permet de restreindre les données entre  $1,84 \times 10^6$  et  $7,88 \times 10^6$  m<sup>3</sup>/an, ce qui nous donne des débits de l'ordre de 0,05 m<sup>3</sup>/s et 0,25 m<sup>3</sup>/s. Cependant, concernant les valeurs de débits de QSMAR, beaucoup d'incertitudes entrent en considération : la perméabilité a été estimée, l'épaisseur des limons également, et la charge dans le marais n'est peut être pas exacte du manque du

nivellement sur notre site d'étude. Ainsi, les valeurs obtenues pour QSMAR restent valables, mais avec une incertitude non négligeable à prendre en compte.

**Analyses chimiques :** Les chlorures peuvent être utilisés comme traceur chimique naturel, en effet ce sont des traceurs conservatifs, qui ne sont pas soumis à l'adsorption ni à la désorption au cours du transport des eaux. En conséquence, la concentration en chlorures reflète l'effet de processus variés comme par exemple, le mélange des eaux souterraines, le mélange avec les eaux salées, ou encore la dissolution de roches telles que la halite. Pour notre étude, le taux de chlorure (**Tableau 7**) relevé dans le piézomètre x26bis (localisation en **Annexe 3**) n'est pas surprenant car la présence du biseau salé est avérée dans ce piézomètre. Cependant les variations au niveau du pont du colmatage sont élevées comparées aux autres valeurs des points de mesures (si l'on s'appuie sur les valeurs dans le puits bergerie, qui représente l'eau de la nappe, on se trouve à 20mg/L, on est donc trois fois plus élevé au niveau du pont Colmatage avec des valeurs allant jusqu'à 72mg/L). On peut supposer que cela est dû à des intrusions salines dans la zone.

Pour l'analyse des sulfates, on voit que certains points de mesures ont des valeurs de sulfates supérieures à 100 mg/L, cependant une forte concentration en sulfate n'est pas nocive. Certaines eaux minérales ont des concentrations en supérieures à 1500 mg/L. Ainsi, les sulfates existent dans les eaux à des concentrations variables, selon la nature géologiques des terrains traversés.

Enfin, pour l'étude des nitrates, certains de nos points ont une concentration supérieure à la norme de potabilité. Certes, l'eau que nous étudions n'est pas propre à la consommation mais des quantités de nitrates élevées doivent nous faire réfléchir... La concentration naturelle en nitrates des eaux souterraines en l'absence de fertilisation va de 5 à 15 mg/L. Nous avons donc un apport extérieur de nitrates qu'il faut mettre en évidence. Le plus souvent les apports de nitrates se font par les engrais azotés, mais cela peut également résulter des lisiers d'élevages, ce qui peut sembler l'approche la plus exacte vu la pratique de l'élevage dans les marais.

**Analyses isotopiques :** Tracer les eaux souterraines en utilisant les isotopes de l'environnement nous permet d'obtenir des informations supplémentaires sur l'origine des eaux et leur déplacement. Ces analyses permettent également une évaluation quantitative des mélanges, et des processus physiques (évaporation, échanges isotopiques, etc). Les variations en  $\delta^{18}\text{O}$  et  $\delta^2\text{H}$  sont associées à la droite météorique mondiale (DMM), ainsi, les valeurs vont varier sur cette droite, selon leur pourcentage en eau de pluie et en eau d'irrigation. Ainsi, un point qui sera proche du pôle irrigation, aura une faible proportion en eau de pluie et inversement. Lorsque les points sont alignés sur la droite, ceux-ci ne subissent pas de processus particuliers, cependant si les points s'éloignent fortement de la DMM, on peut supposer qu'un processus physique entre en jeu, tel que l'évaporation.

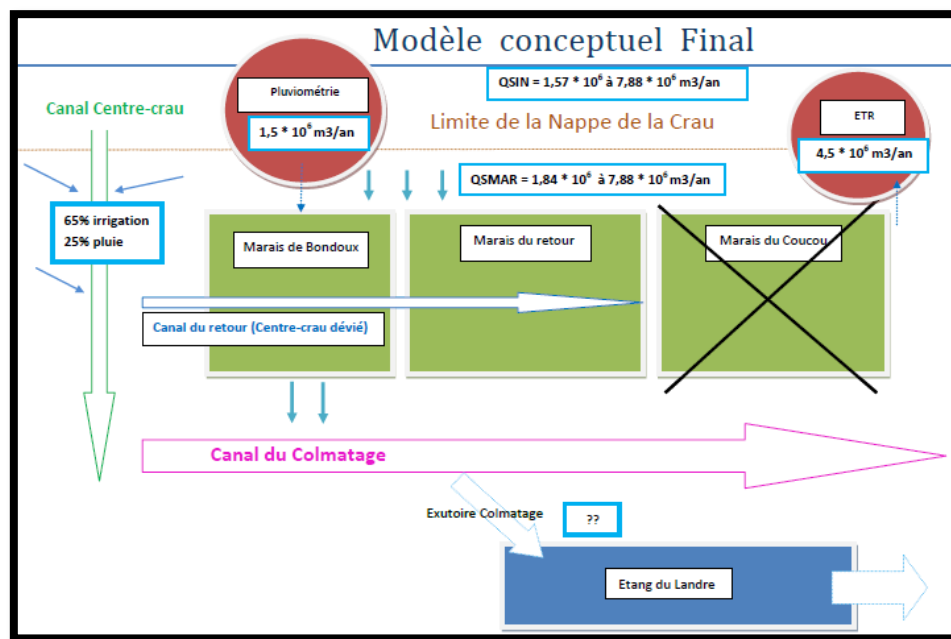
De manière générale, les points semblent s'aligner sur la droite météorique mondiale (DMM) et se rapprochent de leur pôle d'enrichissements respectifs. Les points d'observation du canal Centre-

Crau semblent avoir une forte proportion d'eau de la Durance dans sa composition. Cela nous permet de mettre en évidence le fait que ce canal sert principalement de canaux de drainage aux eaux issues de l'irrigation. Les points x26bis et puits bergerie représentent la composition isotopique de la nappe de Crau, ces points ont des valeurs de l'ordre de 25% d'irrigation et 75% de pluie. L'eau prélevée dans le marais se trouve proche de ces valeurs mais est plus enrichie en eau de pluie, avec des valeurs de 10% d'irrigation et 90% de pluie, ce qui montre que dans ce secteur il semblerait que l'on ait majoritairement des eaux de pluies qui se soient infiltrées. On se trouve donc dans un secteur où les pluies sont non négligeables puisque les points de mesures dans la nappe et ceux dans le marais ont de forts pourcentages en eau de pluie. En ce qui concerne les points Buse retour et exutoire du Colmatage vers le Landre, ceux-ci semblent être des mélanges « parfaits » d'eau de pluie et d'eau d'irrigation. Pour ces deux points, les valeurs sont de l'ordre de 40% d'irrigation et 60% d'eau de pluie.

Enfin, pour le point pont Colmatage, celui-ci semble s'éloigner de la droite DMM, ce qui s'explique par le fait que l'évaporation a une influence sur ce point. Ces valeurs viennent confirmer notre argument selon lequel ce point n'est pas trop soumis à la dynamique des marais. Les mesures aux courantomètre étaient relativement basses, et l'évaporation semble dominer sur ce point d'étude : il est possible qu'il y ait relativement peu de transferts d'eau vers ce point d'observation. De plus, les valeurs sont au-dessus du pôle eau et on tendance à migrer vers le pôle mer. Si l'on se fie aux données précédentes, ce point avait des teneurs en chlorure élevées, ce qui rejoint notre analyse. On peut supposer que sur ce point, certaines intrusions salines viennent perturber le milieu.

#### 4.2.4 Modèle conceptuel final

**Modèle Conceptuel Final :** Toutes ces investigations nous permettent donc de chiffrer quelques données dans notre modèle conceptuel. Ces données sont présentées dans la [Figure 28](#) :



**Figure 28.** Modèle conceptuel en fin de l'étude



L'analyse des données sur les échelles limnimétriques a permis de mettre en évidence plusieurs groupes distincts avec des dynamiques propres : les échelles M1 et M4 qui correspondent à la buse à l'entrée du canal du Retour et au marais amont semblent avoir des dynamiques très proches et réagissent de la même manière à une modification hydrologique, que cela vienne de la pluie, des eaux de surfaces ou des eaux souterraines. En ce qui concerne les échelles M2 et M3 celles-ci semblent avoir des dynamiques propres qui sont indépendantes des perturbations qui se produisent dans le marais. En effet, ces échelles se situent au niveau du canal du Colmatage, qui est lui-même géré par un ouvrage hydraulique par le GPMM. La dynamique de ces points d'observations semble donc être dépendante de ces ouvrages. Enfin, les échelles M6 et M7, au niveau du canal du Retour et du pont au canal du Colmatage semblent également varier ensemble. Cependant, les perturbations hydrologiques semblent moins influencer ces échelles : en effet, grâce aux analyses isotopiques, aux mesures au courantomètre et au suivi des échelles limnimétriques, il a été mis en évidence que ce secteur ne réagit pas beaucoup, et manque particulièrement de dynamique. Il semblerait que ces points d'observations soient surtout soumis au phénomène d'évaporation, qui a été mis en évidence par l'analyse isotopique.

De plus, les analyses isotopiques ont également permises de mettre en évidence le phénomène de remontée des intrusions salines. Il est possible que dans le secteur proche du point d'observation du pont du Colmatage, certaines intrusions salines soient présentes : en effet, ce point semble migrer vers le pôle mer sur la Droite Météorique Mondiale. De plus, selon les analyses chimiques, ce point semble avoir des taux de chlorures plus élevés que la normale et relativement proches des valeurs du point x26bis, dont la présence du biseau salée a été déterminée.

Ces analyses chimiques ont également permis de mettre en évidence que le taux de nitrate est relativement élevé dans le secteur, en plusieurs points du site, autant sur le marais de Bondoux que le marais du Retour. Cela étant probablement dû à l'élevage des taureaux qui se pratique sur le secteur puisque les lisiers d'élevages peuvent faire augmenter le taux de nitrates du sol.

Le suivi piézométrique a permis de mettre en évidence la dynamique de la nappe proche de notre secteur d'étude et d'identifier les sens d'écoulements. Plusieurs cartes piézométriques ont été réalisées, cependant la dynamique de la nappe ne semble pas beaucoup évoluer au cours du temps : quelques modifications locales sont identifiables mais il est important de prendre en compte le fait que dans notre suivi nous avons pris en considération des puits privés qui sont utilisés par les particuliers, ce qui apporte un biais dans la lecture de ces cartes qu'il faut prendre en compte. Cependant, on observe une certaine stabilité dans les données mesurées. De plus, nous avons mis évidence le fait que la nappe influence fortement les marais puisque le niveau piézométrique de la nappe recoupe le niveau du sol dans notre secteur d'étude. Ainsi, cela a permis de mettre en évidence que le niveau actuel d'eau dans les marais est fortement influencé par les résurgences de la nappe dans ce secteur. Le tout étant également fortement influencé par la pluviométrie puisque la nappe réagit aux pluies, avec une certaine inertie, et le marais de Bondoux également.



Enfin, les observations au niveau du canal du Centre-Crau ont permis de mettre en évidence le fait que les apports d'eau par ce canal influencent fortement les niveaux d'eaux dans le marais de Bondoux. En effet, suite à la mise en place des sondes automatiques sur deux points d'observations, au niveau du canal Centre-Crau et au niveau de l'entrée du canal du Retour dans le marais, nous avons mis en évidence que les apports d'eau par le canal Centre-Crau n'étaient pas négligeables. Ce canal fait entrer une quantité d'eau importante au niveau du canal du Retour qui traverse le marais de Bondoux et le marais du Retour, ce qui peut avoir une influence sur la dynamique des marais et l'écosystème environnant.

Pour cette étude, de nombreuses données ont été récoltées et mises en relation. Cependant le suivi s'est étalé sur 5 mois seulement, de mars à juillet, il serait donc judicieux de continuer le suivi hydrologique et hydrogéologique sur au moins une année complète pour prendre en compte toutes les dynamiques du système. De plus, le maintien du suivi chimique et isotopique peut permettre de relier certaines informations importantes dans la compréhension du système. Ces observations nous permettraient de mieux comprendre les changements dans le site, et de proposer une analyse plus précise sur la qualité de l'eau et la quantité d'eau qui transite dans les marais de Bondoux et du Retour. Il peut également être intéressant d'étendre ce suivi au marais du Coucou, qui borde le marais du Retour, puisque celui-ci semble également recevoir des eaux de la nappe de la Crau et il draine probablement certaines eaux du marais du Retour. Cela pourrait nous permettre de répondre à certaines interrogations qui restent sur le fonctionnement du canal du Retour.

## 5 – Conclusion générale

En conclusion, on peut affirmer que les marais de Bondoux et du Retour sont soumis à des échanges hydrodynamiques entre les eaux souterraines et les eaux souterraines, dans un secteur particulièrement influencé par les eaux de pluies. Le marais du Bondoux est majoritairement influencé par les résurgences de la nappe phréatique de la Crau, mais également par la pluviométrie ainsi que les apports d'eau du canal Centre-Crau. Ces apports du canal Centre-Crau ont des propriétés isotopiques et chimiques différentes de celles apportées par la nappe phréatique de la Crau, ce qui implique une modification hydrologique du milieu. Cette entrée d'eau dans le système peut apporter des éléments qui favorisent la colonisation d'un habitat au dépend de celui qui a justifié la désignation du site en Natura 2000. Ou bien la quantité d'eau reçue en excès peut perturber le milieu au détriment des espèces déjà existantes. En ce qui concerne le marais du Retour, celui-ci a une dynamique relativement faible et semble fortement influencé par l'évapotranspiration. De plus, certaines intrusions salines ont été mises en évidence sur deux points de ce secteur d'étude. Cet élément est à surveiller, car les intrusions salines sont irréversibles et vont perturber le milieu.

Ainsi, l'étude des entrées et sorties d'eau dans les marais, bien qu'elle nous renseigne sur les flux, peut permettre d'identifier des conditions favorables ou non au maintien des habitats prioritaires existants sur le site. L'étude des interactions entre les eaux de surfaces et les eaux souterraines dans un système de marais reste tout de même un exercice complexe pour plusieurs raisons : ces zones humides sont encore peu connues et les données dans la littérature sur ces écosystèmes ne sont pas nombreuses. De plus, le suivi sur ces milieux est souvent ponctuel.

L'interprétation des résultats reste complexe car certaines inconnues perdurent, certainement car le suivi a été relativement court et que certains points n'ont pas pu être abordés, tels que le nivellement du site, la détermination de la perméabilité des limons, ou encore le sondage des cailloutis. De plus, cette année a été particulière puisque le canal Centre-Crau a souvent été à sec, il a donc été difficile de réaliser un suivi à long terme sur ce point d'observation et de quantifier les apports de ce canal. De ce fait, afin d'élaborer une meilleure gestion des pratiques dans ce site, il sera nécessaire de mettre en place un suivi plus adapté à ces milieux, qui semblent particulièrement sensibles aux variations et sur une durée plus importante, avec par exemple la mise en place de sondes automatiques de pression et température, sur au moins une année.



# Bibliographie

---

- ADES. Accès aux données [en ligne]. Disponible sur : <http://www.ades.eaufrance.fr>
- Agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse, **2006**. Délimitation de l'espace fonctionnel par fonction et par zone des zones humides du bassin Rhône-Méditerranée.
- Agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse, **2016**. Zones humides, zones utiles : restaurons leurs fonctionnement.
- BALLIHAUT, **2009**. Caractérisation de la pratique de l'irrigation en plaine de la Crau : de la parcelle à l'échelle de la plaine. Rapport de stage INRA.
- Beck N., Thibault M., Poulin B., **2004**. Les marais à marisques en Crau. La Tour du Valat.
- Berard, Daum, Martin, **1995**. « MARTCRAU » : Actualisation du modèle de la nappe de la Crau. Rapport BRGM R 38199.
- Biarais A. et al, **1973**. Guide pour l'échantillonnage de l'eau souterraine en vue de son analyse isotopique, BRGM.
- Borel N., **2014**. Cartographie des habitats humides du site Natura 2000 « Marais d'Arles et de la Vallée des Baux ».
- Borrell Estupina V., **2014-2015**. Le bassin versant, UE d'Hydrologie Général, L3 Sciences de la Terre et de l'eau. Université de Montpellier.
- Borrell Estupina V., **2014-2015**. Le cycle et le bilan hydrologique, UE d'Hydrologie Général, L3 Sciences de la Terre et de l'eau. Université de Montpellier.
- Borrell Estupina V., **2014-2015**. Le débit, UE d'Hydrologie Général, L3 Sciences de la Terre et de l'eau. Université de Montpellier.
- Borrell Estupina V., **2014-2015**. L'évapotranspiration », UE d'Hydrologie Général, L3 Sciences de la Terre et de l'eau. Université de Montpellier.
- Borrell Estupina V., **2014-2015**. L'infiltration et les écoulements souterrains, UE d'Hydrologie Général, L3 Sciences de la Terre et de l'eau. Université de Montpellier.
- Broder J. et al, **2005**. A practical guide to modeling of naturel and contaminated aquatic systems. Groundwater Geochemistry.
- Castany G., 1970. Conditions hydrogéologiques de l'alimentation artificielle des nappes d'eaux souterraines. BRGM.
- Castany G., Hydrogéologie, Principes et méthodes [en ligne]. Disponible sur : [www.biblio-scientifique.net](http://www.biblio-scientifique.net)
- Chambre d'agriculture des Bouches-du-Rhône, Documents d'objectifs des sites Natura 2000 : « FR9312001 : Marais entre Crau et Grand Rhône » et « FR9301596 : Marais de la Vallée des Baux et Marais d'Arles », Mise en œuvre d'un protocole de suivi du niveau des eaux de surface sur le site, Plan de Gestion des marais de Port St Louis 2013-2018.
- Chambre d'agriculture des Bouches-du-Rhône, Documents d'objectifs des sites Natura 2000 : « FR9312001 : Marais entre Crau et Grand Rhône » et « FR9301596 : Marais de la Vallée des Baux et Marais

d'Arles », tome 1 : « Diagnostic, enjeux et objectifs de conservation et de développement durable », octobre 2004 / actualisation partielle juillet 2009, 142 pages.

Colomb et Roux, **1978**. Géologie de la méditerranée », Editions de l'Université de Provence.

Colomb et Roux, **1986**. La Crau, histoire Plio-Pléistocène. In Méditerranée, troisième série, tome 58.

Cortot et Mauchamp, **2003**. Les cladiaies : écologie et gestion.

De Montety V., **2008**. Salinisation d'un aquifère captif côtier en contexte deltaïque – cas de la Camargue. Thèse pour obtenir le grade de docteur de l'Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse.

Delarozière-Bouillin, **1971**, Evaluation des ressources hydrauliques : Utilisation comparée des formules de THORNTHWAITE, TURC mensuelle, TURC annuelle et PENMAN, pour le calcul de l'évapotranspiration potentielle et de l'évapotranspiration réelle moyenne. Application Au territoire français. Rapport BRGM 71 SGN 173 HYD, 22p.

De Marsely G., **2004**. Cours d'hydrogéologie. Université de Paris.

Durazoy G., Margat J., **1966**. Un exemple de bilan annuel d'une nappe libre : La nappe de la Crau.

Eau France, **2002**. Les zones humides et la ressource en eau : suivi d'actions.

Foin de Crau [en ligne]. Disponible sur : <http://foindecrau.com/savoir-faire/>

FRAPNA, **2016**. Comprendre et protéger les zones humides.

Le Port Euroméditerranéen, Marseille-Fos. **2012**. Plan de Gestion des espaces naturels, PGEN 2, Section A.

GPPM, **2013**. Arrêté portant prescriptions spécifiques relatives à la gestion et à l'exploitation du barrage anti-sel et de l'ouvrage du Galéjon gérés par le Grand Port Maritime de Marseille.

Infoterre. Visualiseurs [en ligne]. Disponible sur : <http://infoterre.brgm.fr/>

Lamachere J.M, **1971**. « Mesure in situ de la perméabilité d'un sol non saturé ». Rapport du BRGM.

Leibundgut C. et al, **2009**. Tracers in hydrology.

Mayer A., et al. **2016**. Using radon-222 to study coastal groundwater/surface-water interaction in the Crau coastal aquifer (southeastern France), Hydrogeology Journal.

Medwet, **2017**. L'initiative pour les zones humides méditerranéennes [en ligne]. Disponible sur : <http://medwet.org/fr/aboutwetlands/>

Molliex S., **2009**. Caractérisation de la déformation tectonique récente en Provence (Sud-Est France), Thèse pour obtenir le grade de docteur.

Natura 2000, **2016**. FR9312001 - Marais entre Crau et Grand Rhône. Formulaire standard des données.

Natura 2000 dans le delta du Rhône, **2011**. Lettre d'information – Natura 2000, ou la gestion du fleuve abordée en long et en large.

Nguyen B., **2015**. Coupling geophysical and isotopic approaches to better simulate saltwater intrusion into coastal aquifers : A case study in the Crau aquifer. Thèse pour obtenir le diplôme de Doctorat.

Parc Naturel régionaux. Définition d'un Parc Naturel Régional [en ligne]. Disponible sur : <http://www.parcs-naturels-regionaux.fr/article/quest-ce-quun-parc-naturel-regional-definition>

Parc Naturel Régional de Camargue, **2010**. Le Parc Naturel Régional de Camargue.

Parc Naturel Régional de Camargue, **2012**. Le Parc : Mode d'emploi, modes de vie.

Parc Naturel Régional de Camargue, **2013**. Evolution de l'occupation du sol en Camargue en 20 ans (1991-2011)

- Parc Naturel Régional de Camargue, Septembre **2013**. Natura 2000 : Trois Marais.
- Parc Naturel Régional de Camargue, Janvier **2015**. Natura 2000 dans le delta du Rhône.
- Parc Naturel Régional de Camargue, **2015**. Le Parc de Camargue en chiffres.
- Parc Naturel Régional de Camargue, Juillet **2016**. Natura 2000 sur les sites de la basse vallée du Rhône.
- Parc Naturel Régional de Camargue, **2016**. LIFE + MC-SALT en Camargue.
- Pimienta N., **2009**. Etude préliminaire de l'évaluation de la part de recharge d'une nappe phréatique par irrigation gravitaire.
- Pôle de Recherche Agro-environnementale de la Martinique, Juin **2009**. Courbes des courbes de tarages.
- Rabemananjara F., Delannoy J. et Marcolin E., **2013**. Plan de gestion des Marais de Port-Saint-Louis-du-Rhône - Section A. Diagnostic et enjeux du site. Parc naturel régional de Camargue - Mairie de Port-Saint-Louis-du-Rhône.
- Rapport du BRGM, Septembre **2004**. Géodynamique des systèmes plio-quaternaires des nappes alluviales de la plaine de la Crau. RP-53088-FR.
- Rey T., **2006**. Dynamiques hydro-sédimentaires en Petit Camargue à l'Holocène. Thèse pour obtenir le grade de docteur.
- Ros L., **2016**. Mémoire technique de 1<sup>ère</sup> année : Interactions eaux souterraines – eaux de surfaces des milieux humides naturels : Etude des résurgences de la nappe de la Crau sur le site Natura 2000 des « Trois-Marais ». Université de Franche-Comté.
- Séraphin P., **2016**. Contribution du traçage isotopique à la compréhension et à la modélisation hydrogéologique de la nappe de la Crau. Thèse pour obtenir le grade de docteur de l'Université d'Aix-Marseille.
- Service d'Animation pour la Gestion de l'Espace Rivière (SAGER), **2013**. Surveillance des cours d'eau Landais.
- Symcrau, **2016**. Tome 1 : Diagnostic, enjeux et stratégie du contrat, Dossier définitif de contrat de nappe.
- Symcrau. Les cailloutis de la Crau, un aquifère littoral [en ligne]. Disponible sur : <http://symcrau.com>
- Taupin J.D., Septembre **1994**. Utilisation des méthodes isotopiques dans l'étude de différentes parties du cycle de l'eau dans le cadre d'Hapex-Sahel. Xe journées hydrologiques – Osrstom.
- Wuilleumier A., Seguin J.J., **2008**. Réalimentation artificielle des aquifères en France. Une synthèse. Rapport final. BRGM/RP-55063-FR
- Zones humides. Découvrir les zones humides, les acteurs, les projets [en ligne]. Disponible sur : <http://www.zones-humides.eaufrance.fr/>





## Table des Annexes

---

Annexe 1. Echelle des temps géologiques	48
Annexe 2. Cartographie de l'état de conservation des marais à <i>Cladium mariscus</i> au sein du site Natura 2000 « Marais d'Arles et Vallée des Baux », d'après N.Borel, 2014	50
Annexe 3. Carte de la localisation des points de suivi de la nappe	51
Annexe 4. Carte de la localisation des points d'échantillonnage	52
Annexe 5. Récapitulatif des données de la campagne de suivi des échelles limnimétriques	53
Annexe 6. Représentation graphique de l'évolution des échelles limnimétriques	54
Annexe 7. Représentation graphique de l'évolution des échelles limnimétriques et des données de la sonde en X20bis	55
Annexe 8. Evolution des échelles limnimétriques et de la pluviométrie en fonction du temps	56

---

# Annexes

Annexe 1. Echelle des temps géologiques

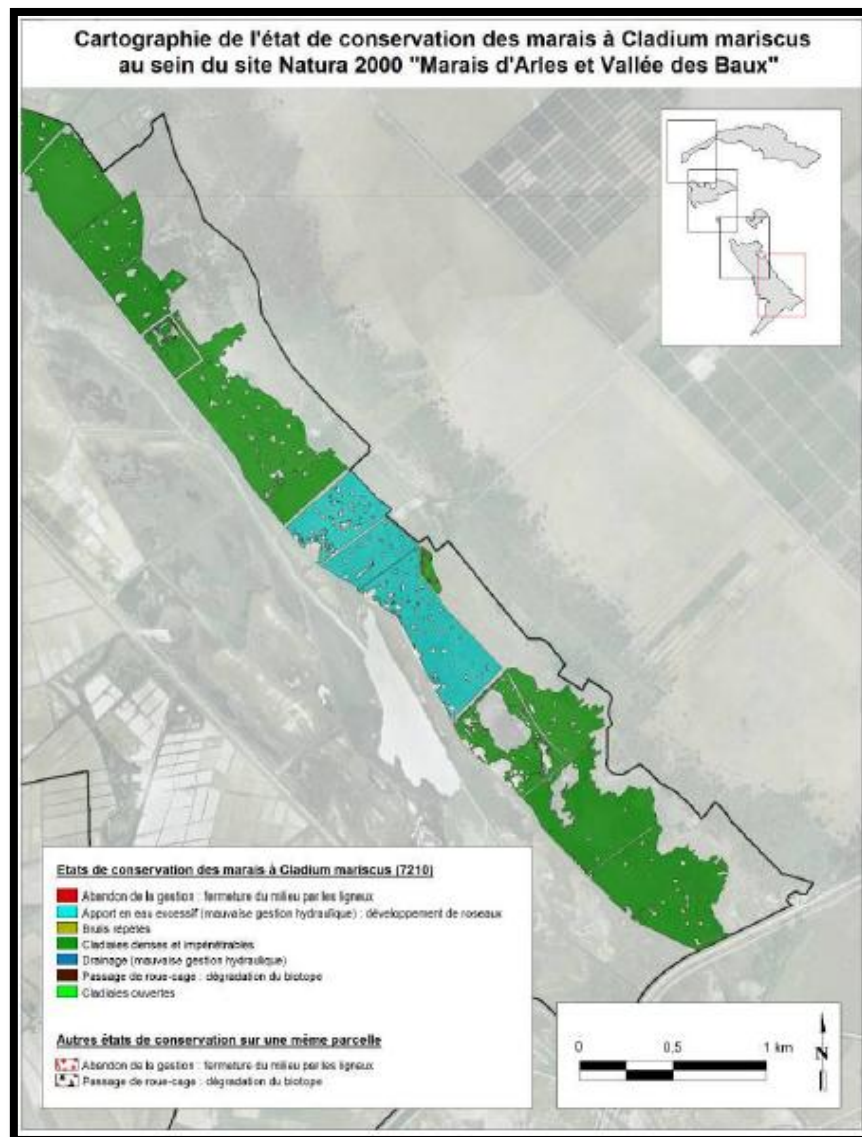
Ère	Période		Epoque		Etage	Age (en Ma)
Cénozoïque	Quaternaire		Holocène			0
			Pléistocène			-0,01
	Tertiaire	Néogène	Pliocène	Sup.	Gélacien	-1,8
				Moy.	Plaisancien	-3,4
				Inf.	Zancléen	-5,3
			Miocène	Sup.	Messinien	-6,5
					Tortonien	-11
				Moy.	Serravallien	-14,5
		Langhien			-16	
		Inf.			Burdigalien	-20
					Aquitanien	-23,5
		Paléogène	Oligocène		Chattien	-28
					Rupélien	-34
			Eocène	Sup.	Priabonien	-37
				Moy.	Bartonien	-40
				Lutétien	-46	
	Paléocène		Yprésien	-53		
		Thanétien	-59			
	Mésozoïque ou secondaire	Crétacé		Supérieur	Danien	-65
					Maastrichien	-72
Campanien					-83	
Santonien					-87	
Coniacien					-88	
Turonien					-91	
Inférieur				Cénomaniien	-96	
				Albien	-108	
				Aptien	-114	
				Barrémien	-116	
Jurassique		Supérieur	Hauterivien	-122		
			Valanginien	-130		
			Berriasien	-135		
		Moyen	Tithonien	-141		
			Kimméridgien	-146		
			Oxfordien	-154		
			Callovien	-160		
			Bathonien	-167		
		Inférieur	Bajocien	-176		
			Aalénien	-180		
Toarcien	-187					
Pliensbachien	-194					
Sinemurien	-201					
Trias	Supérieur	Hettangien	-205			
		Rhétien	-220			
		Norien	-230			
	Moyen	Carnien	-235			
		Ladinien	-240			
	Inférieur	Anisien	-245			
		Scythien				

Cycle orogénique alpin

Cycle orogénique alpin

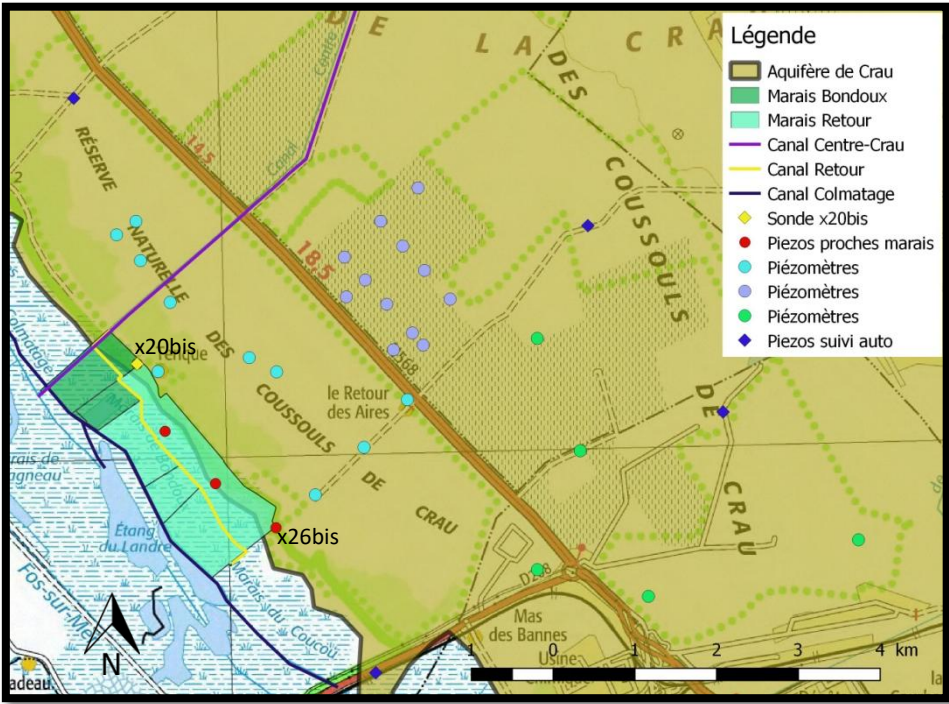
Ère	Période	Epoque	Etage	Age (en Ma)	
Paléozoïque ou primaire	Permien	Supérieur	Thuringien	-245	Cycle orogénique hercynien
		Inférieur	Saxonien	-258	
			Autunien	-265	
	Carbonifère	Silésien	Stéphanien	-295	
			Westphalien	-305	
			Namurien	-315	
		Dinantien	Viséen	-350	
			Tournaisien	-360	
	Dévonien	Supérieur	Franennien	-365	
		Moyen	Frasnien	-375	
			Givétien	-380	
			Eifélien	-385	
		Inférieur	Emsien	-390	
			Praguien	-390	
			Lochkovien	-410	
		Supérieur	Pridolien	-415	
			Ludfordien	-425	
	Gorstien		-425		
	Silurien	Inférieur	Homerien	-430	
			Scheinwoodien	-430	
			Telychien	-435	
			Aeronien	-435	
			Rhuddanien	-445	
			Ashgillien	-455	
	Ordovicien	Supérieur	Caradocien	-455	
		Inférieur	Llandeïlien	-470	
			Llanvirmien	-485	
Arénigien			-485		
Trémadocien			-500		
Cambrien	Supérieur	Trempéaléauvien	-530		
		Franconien	-540		
		Dresbachien	-540		
	Moyen	Mayaïen	-1000		
		Amgaïen	-2500		
		Lénien	-2900		
	Inférieur	Atdabatien	-3500		
		Tommotien	-3800		
		Nemakit - Daldynien	-4560		
Précambrien	Protérozoïque	Briovérien	-1000		
		Pentévrien	-2500		
	Archéen	Sup. Icartien	-2900		
		Moyen	-3500		
		Inférieur	-3800		
Hadéen				-4560	Plusieurs cycles orogéniques

**Annexe 2.** Cartographie de l'état de conservation des marais à *Cladium mariscus* au sein du site Natura 2000 « Marais d'Arles et Vallée des Baux », d'après N.Borel, 2014

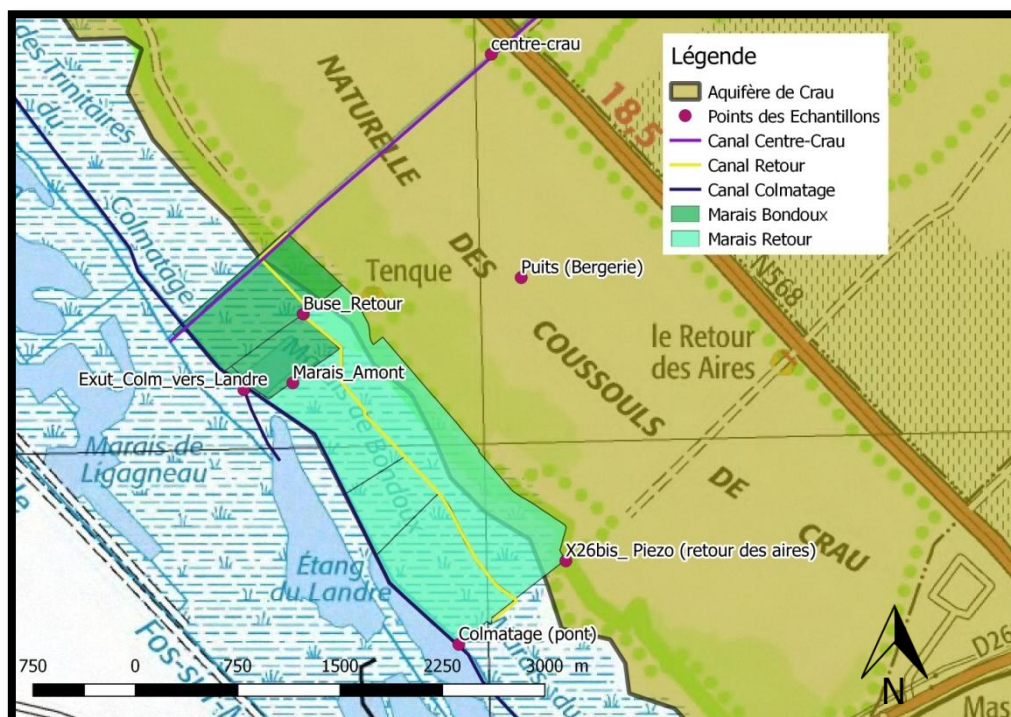




### Annexe 3. Carte de la localisation des points de suivi de la nappe



**Annexe 4.** Carte de la localisation des points d'échantillonnage

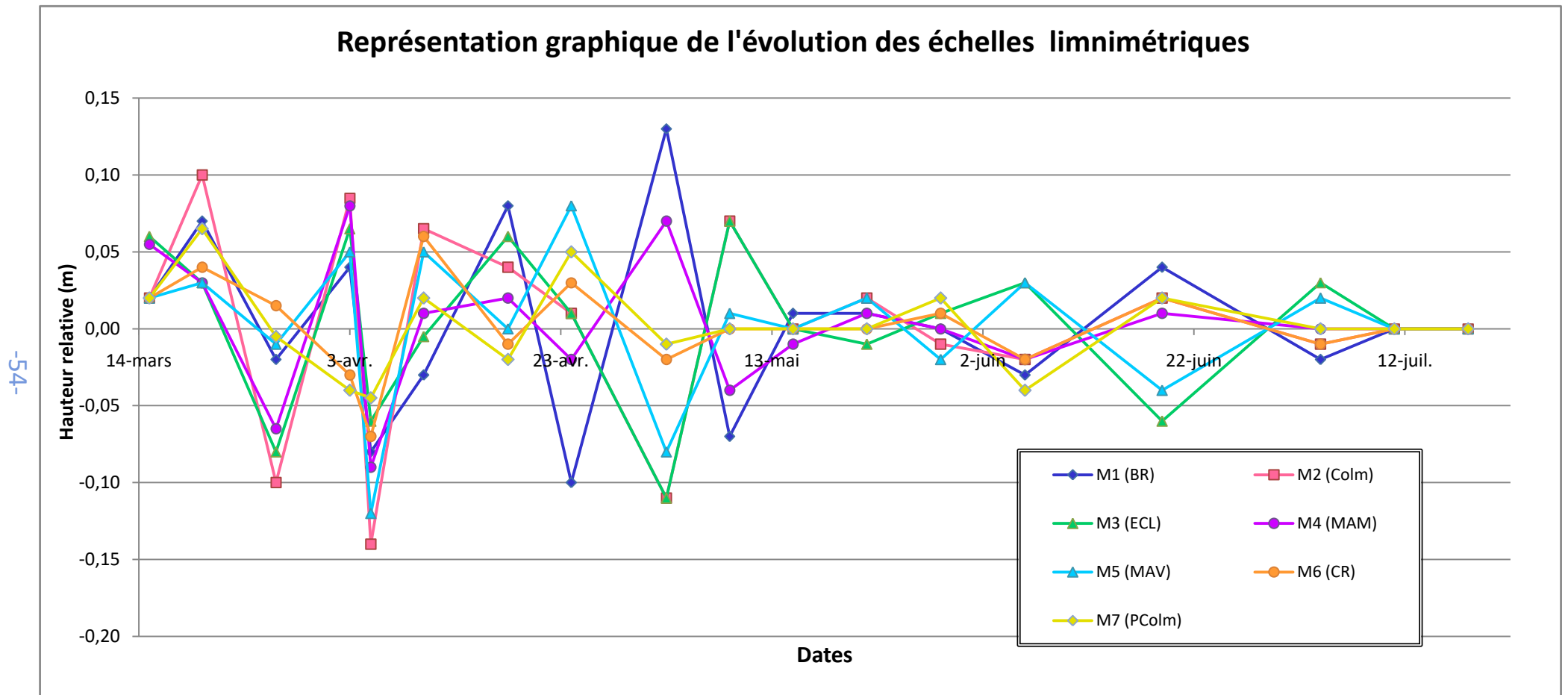


**Annexe 5.** Récapitulatif des données de la campagne de suivi des échelles limnimétriques

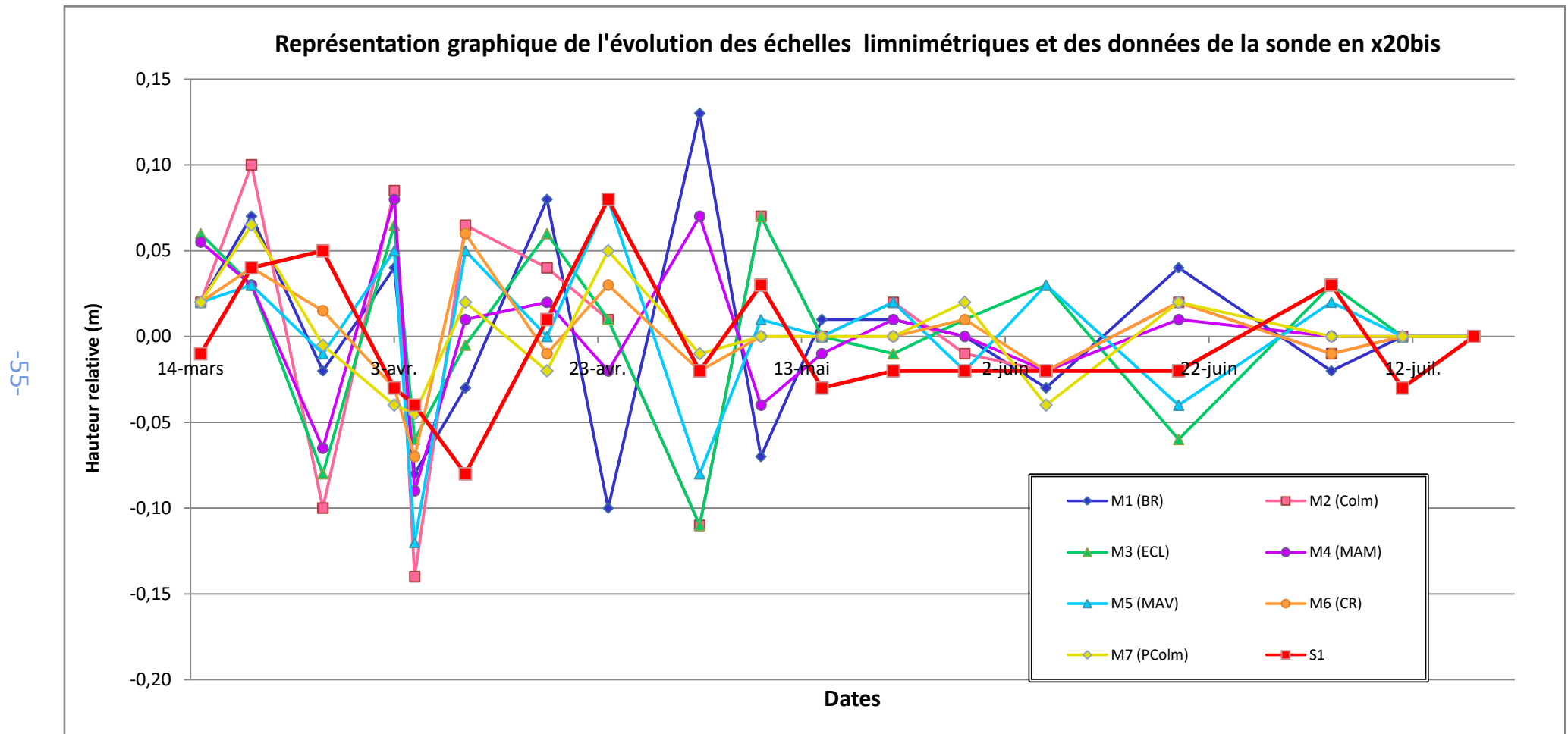
Date	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7
09/03/2017	0,70	0,54	0,55	0,42	0,62	0,81	0,40
15/03/2017	0,69	0,505	0,525	0,4	0,62	0,805	0,37
20/03/2017	0,70	0,51	0,53	0,4	0,61	0,815	0,37
27/03/2017	0,65	0,47	0,49	0,36	0,57	0,78	0,335
03/04/2017	0,62	0,45	0,51	0,375	0,55	0,765	0,32
05/04/2017	0,66	0,53	0,56	0,42	0,56	0,79	0,37
10/04/2017	0,68	0,51	0,53	0,40	0,56	0,83	0,415
18/04/2017	0,74	0,575	0,565	0,46	0,61	0,84	0,42
24/04/2017	0,72	0,5	0,54	0,43	0,54	0,78	0,38
03/05/2017	0,67	0,49	0,51	0,41	0,52	0,78	0,36
09/05/2017	0,7	0,52	0,54	0,41	0,5	0,77	0,32
15/05/2017	0,63	0,56	0,58	0,39	0,56	0,79	0,33
22/05/2017	0,69	0,49	0,51	0,44	0,54	0,79	0,33
29/05/2017	0,68	0,49	0,51	0,45	0,53	0,79	0,33
06/06/2017	0,68	0,49	0,51	0,45	0,52	0,79	0,33
19/06/2017	0,69	0,51	0,5	0,46	0,53	0,79	0,33
04/07/2017	0,7	0,52	0,5	0,47	0,52	0,8	0,35
11/07/2017	0,68	0,51	0,53	0,46	0,54	0,79	0,33
18/07/2017	0,7	0,52	0,5	0,46	0,52	0,8	0,33



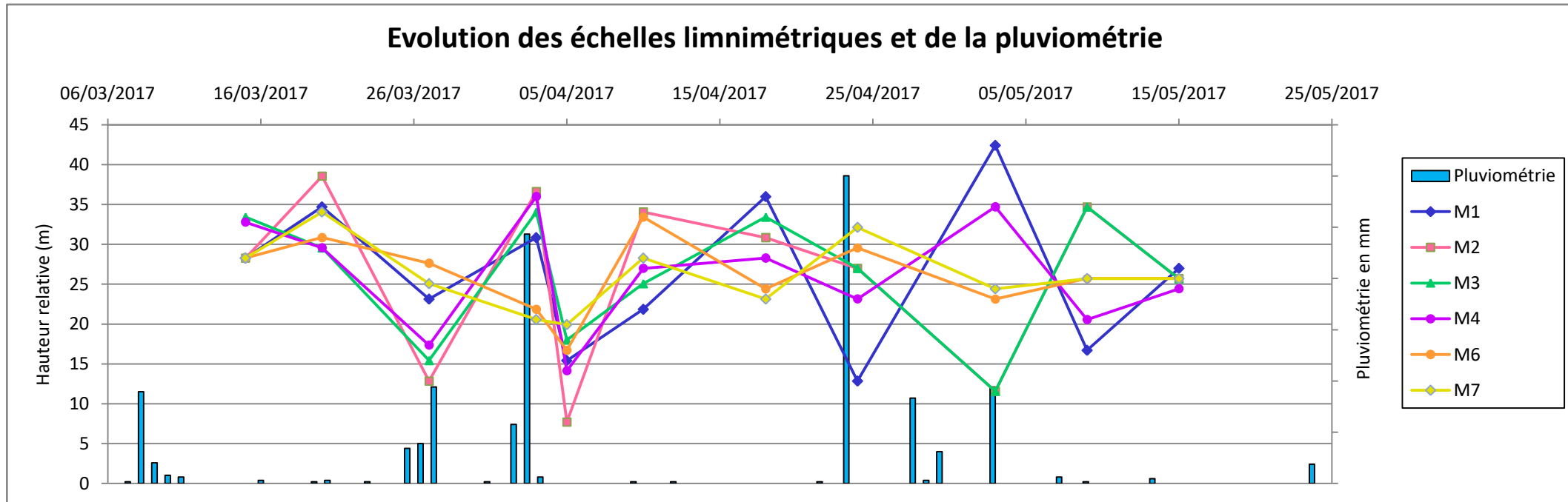
**Annexe 6.** Représentation graphique de l'évolution des échelles limnimétriques



**Annexe 7.** Représentation graphique de l'évolution des échelles limnimétriques et des données de la sonde en X20bis



**Annexe 8.** Evolution des échelles limnimétriques et de la pluviométrie en fonction du temps





## Résumé

---

Ce mémoire a pour objet l'étude du fonctionnement hydrologique d'une zone humide en contexte méditerranéen et plus particulièrement sur le site Natura 2000 « Trois-marais ». Cette zone humide abrite un habitat d'intérêt communautaire qui dépend des résurgences de la nappe phréatique de la Crau. Il est important de maintenir le bon état écologique de ce milieu. L'intérêt de ce mémoire est d'améliorer les connaissances du fonctionnement des résurgences de la nappe de la Crau et leur lien, avec les marais à marisques qui en dépendant. Cette étude passe par des investigations de terrain et notamment des suivis hydrologiques, hydrogéologiques ainsi que des analyses chimiques et isotopiques. L'interprétation de ces données nous permet de mettre en évidence le fait que le marais de Bondoux est fortement influencé par les résurgences de la nappe de la Crau ainsi que les apports pluviométriques mais également les apports d'eau du canal Centre-Crau. En ce qui concerne le marais du Retour, celui-ci semble influencé par le phénomène d'évapotranspiration, très présent sur le site et la dynamique du marais semble faible. Cependant, certaines interrogations perdurent, c'est pourquoi il serait nécessaire de faire des investigations plus poussées et d'étendre le suivi mis en place afin de l'appliquer au marais du Coucou, pour prendre en considération tous les paramètres qui nous permettent d'identifier le fonctionnement hydrologique de cette zone humide.

## Abstract

---

The aim of this internship report is to study the hydrological functioning of a wetland in the Mediterranean context and more particularly in the « Trois-Marais » Natura 2000 site. This wetland shelters a habitat of community interest which depends on the water table resurgences of Crau aquifer. It's important to maintain the good ecological status of this environment. The interest of this document is to improve the knowledge of the functioning of the resurgences of Crau aquifer and their links, with the marsh that depends on it. This study involved field investigations, including hydrological, hydrogeological, chemical and isotopic analyzes. The data interpretation highlight the fact that the Bondoux marsh is influenced by the Crau aquifer resurgences, by the rainfall amounts as well as the water supplies from the Centre-Crau canal. As for the Retour marsh, it seems to be influenced by the evapotranspiration phenomenon, which is very present on this site and the dynamics of the marsh seems to be low. However, some questions remain, which are why it would be necessary to carry out further investigations and extend the follow-up at the Coucou marsh, to take into consideration all the parameters that allows us to identify the hydrological functioning of this wetland.

**Mots clés :** Hydrologie, Hydrogéologie, Zones humides, Nappe phréatique

