

Mémoire technique de 1^{ère} année

INTERACTIONS EAUX SOUTERRAINES - EAUX DE
SURFACES DES MILIEUX HUMIDES NATURELS :
ETUDE DES RESURGENCES DE LA NAPPE DE LA
CRAU SUR LE SITE NATURA 2000 DES « TROIS
MARAIS »

UNIVERSITE DE FRANCHE-COMTE
UFR SCIENCES ET TECHNIQUES DE BESANCON
MASTER DE GEOLOGIE APPLIQUEE
Année 2015-2016

Léa ROS



INTRODUCTION	2
CHAPITRE 1 : PRESENTATION DU SITE D'ETUDE	4
1.1 LA CAMARGUE : UNE VISION GLOBALE DU SITE D'ETUDE	4
A) GENERALITES SUR LA CAMARGUE	4
B) LE CLIMAT	5
C) CONTEXTE SOCIO-ECONOMIQUE DE LA CAMARGUE	5
1.2 LA NAPPE DE LA CRAU : L'ORIGINE DES MILIEUX HUMIDES ETUDIES	5
A) HISTOIRE GEOLOGIQUE DE LA CRAU	5
B) HYDROGEOLOGIE ET CYCLE DE L'EAU EN CRAU	7
C) BILAN ENTREES-SORTIES	9
1.3 LES MARAIS DE RAPHELE : DES MARAIS TRES PARTICULIERS AU SEIN DE LA CAMARGUE ET DEPENDANTS DE LA NAPPE DE LA CRAU	10
A) LES PARTICULARITES DES MARAIS	10
B) LA MORPHOLOGIE DES MARAIS	11
C) BILAN HYDROLOGIQUE	12
1.4 L'HYDROLOGIE	13
CHAPITRE 2 : INVESTIGATION HYDROLOGIQUE ET PEDOLOGIQUE	15
2.1 METHODES	15
A) LE JAUGEAGE AU SEL	15
B) LE SUIVI PIEZOMETRIQUE	17
C) LA PEDOLOGIE ET LES LAURONS	18
2.2 RESULTATS	19
A) LES DEBITS	19
B) LE SUIVI PIEZOMETRIQUE	20
C) LA PEDOLOGIE ET LES LAURONS	24
CHAPITRE 3 : INVESTIGATION GEOCHIMIQUE	27
3.1 METHODES	27
A) LA PHYSICO-CHIMIE	27
B) LES TRACEURS ENVIRONNEMENTAUX : ISOTOPES STABLES DE L'EAU ET RADON 222	28
3.2 RESULTATS	30
A) LA PHYSICO-CHIMIE	30
B) LE RADON 222	35
CHAPITRE 4 : COMPREHENSION DU SYSTEME	39
4.1 SYNTHESE DES RESULTATS ET CRITIQUE DES METHODES	39
4.2 CROISEMENT DES RESULTATS	41
CONCLUSION ET PERSPECTIVES	44
BIBLIOGRAPHIE	46
ANNEXES	48
ANNEXE 1 : LE SITE NATURA 2000 DES « TROIS MARAIS » ET SES DIRECTIVES AINSI QUE LES ACTEURS DE L'ETUDE	48
ANNEXE 2 : RESULTATS DES SONDAGES	50
ANNEXE 3 : LE RADON 222	51
ANNEXE 4 : RESULTATS DE LA CHIMIE	54

INTRODUCTION

Les milieux humides ont été, depuis très longtemps, investis par les hommes, notamment pour la richesse de leurs sols. Ils ont surtout été utilisés en tant que lieu de chasse, de pêche, d'élevage et de cultures. Les milieux humides ont aussi été prisés pour leurs matériaux, tels que la tourbe qui était extraite pour fabriquer du charbon de tourbe.

Les milieux humides sont des systèmes complexes. Ils influent notamment sur le régime des eaux, dans le stockage à long et court terme des eaux de crue par exemple ; sur la qualité des eaux, de par leur rôle de rétention des matières en suspension dans ces milieux ; et jouent aussi un rôle clef dans la conservation de la biodiversité de par la richesse des espèces animales et végétales qu'ils abritent. En effet, sur ce dernier point les observations montrent qu'en France les zones humides abritent 30 % des espèces végétales remarquables et protégées, et environ 50 % des espèces d'oiseaux (BARNAUD et FUSTEC, 2007). C'est pourquoi, plusieurs programmes de mesures, de réglementation et d'action ont été mis en place pour garantir le maintien et la protection de ces écosystèmes.

Il y a eu une prise de conscience concernant le devenir de ces milieux, lorsque l'Homme a découvert que 67 % des milieux humides avaient disparu en 30 ans en France, avec des observations similaires réalisées à l'échelle mondiale (Direction générale de l'aménagement du logement et de la nature, 2013). Des mesures réglementaires ont alors vu le jour, tel que la loi sur l'eau de 1992 et le Plan d'action pour les zones humides de 1995 (BARNAUD et FUSTEC, 2007). Dans ce cadre et à l'échelle européenne, la Directive Cadre Européenne (DCE) sur l'Eau¹ a pour but de préserver l'état des masses d'eaux (notamment souterraines) et des milieux naturels associés. Au titre de cette directive et de sa transcription dans le droit français, la nappe de la Crau et ces écosystèmes associés doivent être protégés car ils rentrent dans le cadre des objectifs de cette directive. Localement, ceci se traduit par la nécessité d'assurer une bonne gestion de la nappe de la Crau, afin de garantir un bon état des écosystèmes associés, comme sur le site NATURA 2000 des « trois marais ».

Or, la protection des écosystèmes de cette zone nécessite d'améliorer la compréhension de ces milieux, en amont de cette protection. C'est cette dynamique qui a motivé la mise en place d'études centrées autour des marais présents entre la Crau et le Grand-Rhône.

La nappe de la Crau alimente ces zones humides qui constituent un patrimoine écologique exceptionnel, en particulier la zone Natura 2000 des « Trois marais » (Annexe 1 sur le site Natura 2000 des « Trois marais »). Ces espaces naturels sont classés comme habitat prioritaire par l'Union Européenne sous l'appellation « Marais calcaires à marisques » car ils présentent de forts enjeux de conservation pour le patrimoine naturel. Ils abritent des espèces végétales protégées ou rares et représentent un habitat de nidification pour plusieurs espèces d'oiseaux listées sur la Directive Oiseaux comme le Butor étoilé, le Blongios nain, le Héron pourpré et la Locustelle luscinoïde (Annexe 1 sur les directives). La gestion hydraulique de ces marais est déterminante pour le maintien de la biodiversité, car ces espaces sont aussi en partie dépendants du niveau des canaux de drainage qui les traversent ou les bordent.

La dépendance de ces écosystèmes aux flux d'eau est malheureusement peu décrite par la littérature scientifique. En 2015, la DREAL PACA a lancé une étude sur le fonctionnement hydrogéologique des laurons dans le cadre du contournement autoroutier de la ville d'Arles. Cette étude, réalisée par le CEREMA (Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement) constitue la base de l'étude actuelle sur les résurgences de la Crau et l'hydrologie des marais.

¹ Directive n° 2000/60/CE du 23 octobre 2000

C'est dans ce cadre que s'inscrit le présent rapport consacré aux marais de Raphèle. Cette étude vise un premier objectif d'amélioration de la connaissance sur le fonctionnement du système de résurgences particulier de la nappe de la Crau, dont dépend un écosystème de marais.

Par ailleurs, derrière cet objectif général se cachent plusieurs axes d'études. En effet, nous avons cherché ici à déterminer le mode de fonctionnement des milieux alimentés par la nappe, ainsi que le degré de dépendance de la nappe vis-à-vis des apports d'eau souterraine et de surface. Enfin, nous avons également cherché à déterminer la sensibilité des écosystèmes à la qualité et à la quantité des apports en eau reçus par ceux-ci.

A ce titre, un protocole de suivi quantitatif et qualitatif du système de circulation d'eau de surface et souterraine a été défini et mis en place sur le site des marais de Raphèle. Il comprend des suivis hydrologiques, piézométriques, pédologiques et l'emploi de méthodes géochimiques. Ces premières investigations permettront aux différents gestionnaires du site (Annexe 1 sur les acteurs de l'étude) de travailler à un programme d'actions pour définir les conditions d'une gestion de la nappe et des canaux compatible avec les impératifs de préservation des milieux naturels.

CHAPITRE 1 : Présentation du site d'étude

Cette étude a pour objet les **marais de Raphèle** qui comprennent à l'Est les marais des Chanoines et à l'Ouest les marais de Meyranne. Ils se situent à l'interface de la **Camargue** et de la plaine steppique de la **Crau**. Les sols semi-tourbeux alimentés par une nappe souterraine dépourvue de sel font de cette zone une entité originale en zone méditerranéenne.

1.1 La Camargue : une vision globale du site d'étude

a) Généralités sur la Camargue

La Camargue, depuis Arles jusqu'à la mer Méditerranée, forme un delta de 145 300 hectares (*figure 1*). Les paysages camarguais issus des divagations du Rhône, sont marqués par des dépressions topographiques où se sont mis en place des marais, comme par exemple les marais du Vigueirat présents au Sud-Est de la Camargue. Mais ce paysage est également très artificialisé par l'Homme depuis l'endiguement du Rhône et du petit Rhône pour l'irrigation des terres (DERVIEUX, 2005).

La Camargue peut être séparée en 2 parties (*figure 1*) : une partie fluvio-lacustre « terrestre » et une partie laguno-marine « littorale ». La première se situe globalement au Nord et à l'Est de la Camargue, elle correspond aux milieux cultivés et aux grandes zones humides. C'est dans cette partie de la Camargue que se situe le secteur d'étude, au niveau des marais de Chanoines et de Meyranne aussi appelés les marais de Raphèle.

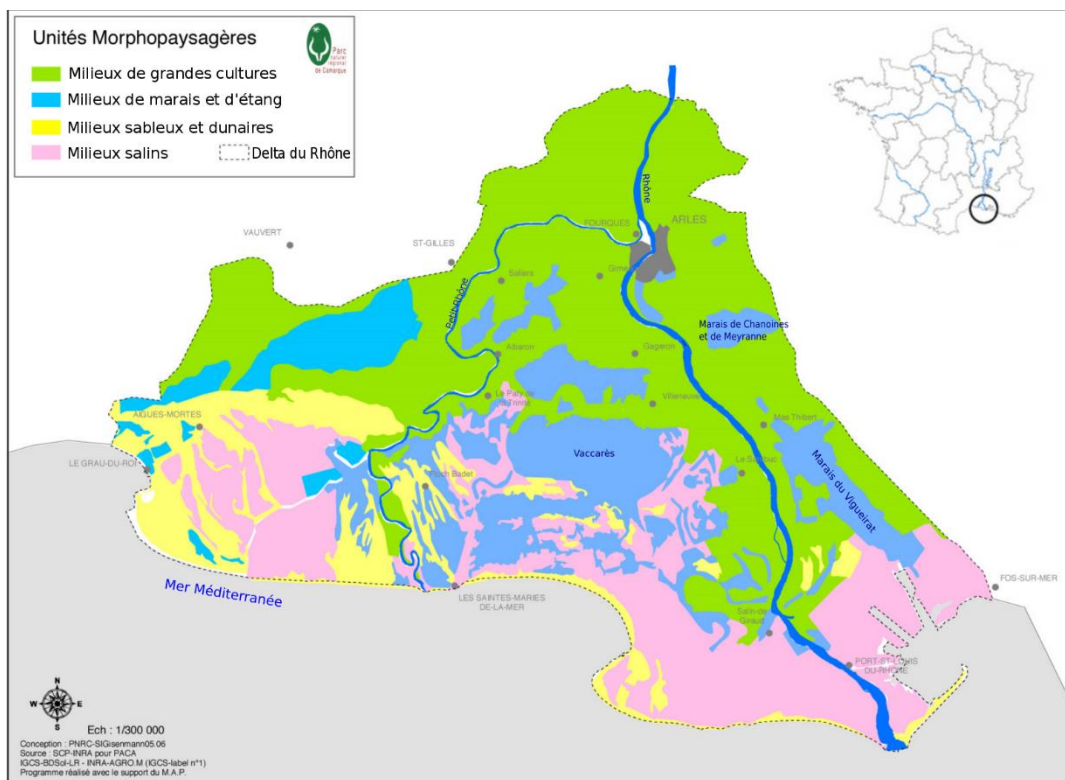


Figure 1 : Unités morphopaysagères de la Camargue (source : modifié d'après parc-camargue.fr)

La partie laguno-marine de la Camargue est plus au Sud, on y trouve des étangs, comme l'étang de Vaccarès, des marais et des salins. Une grande partie de ces zones humides et de ces étangs,

localisées au Sud de la Camargue, sont saumâtres du fait des échanges hydrauliques avec la mer Méditerranée.

b) Le climat

Le climat de Camargue est typiquement méditerranéen. Les faibles précipitations, 652 mm par an (pour l'année 2015 d'après Météo France), se concentrent en automne. Les températures sont, quant à elles, douces en hiver et chaudes en été. La Camargue est soumise également à des vents tels que le mistral et tramontane qui apportent une fraîcheur et une humidité ambiante. L'ensoleillement est important avec 200 jours de soleil par an environ, contre 50 jours de temps couverts.

Toutes ces caractéristiques climatiques ont une forte influence sur la végétation, la faune et les activités humaines telles que l'agriculture, l'élevage, la chasse, la pêche, le tourisme et la conservation de la nature.

c) Contexte socio-économique de la Camargue

A l'origine, la Camargue est une terre salée qui a été réaménagée par l'Homme pour la rendre exploitable (DERVIEUX, 2005). En effet l'endiguement du Rhône et du petit Rhône a permis l'irrigation des terres agricoles et le développement de la riziculture. L'agriculture est d'ailleurs le secteur d'activité qui s'est le plus développé en Camargue avec une prédominance pour les rizières.

L'exploitation de sel en Camargue est une activité économique qui s'est développée à l'international en Camargue (EDATER, 2006). L'activité occupe toute la partie sud de la Camargue, voir *figure 1*. Même si elle s'est très bien développée, l'activité n'est pas jugée comme industrielle. La production étant adaptée et dépendante des conditions géographiques et climatiques locales, elle est considérée comme une production agricole : la saliculture.

L'élevage extensif est l'autre activité dominante en Camargue. Les deux tiers du territoire camarguais sont destinés à cette activité qui est soit saisonnière sur certaines parcelles, soit permanente sur d'autres. Deux races de taureaux sont élevées, la « raço di biòu » (originaire du delta) et la race de combat (originaire d'Espagne). Elles sont sélectionnées rigoureusement au fil des années pour leur bravoure (aptitude à combattre), qui se manifeste dans des jeux taurins : la course à la cocarde pour la première, et la corrida pour la seconde. Les animaux qui répondent aux critères de sélection sont gardés comme cocardiers (pour la « raço di biòu »), ou comme reproducteurs, les autres étant destinés aux abattoirs.

L'utilisation du cheval est indissociable de l'existence des troupeaux de taureaux. Le cheval représente en effet, l'outil de travail du gardian, pour la surveillance et le tri des bêtes.

1.2 La nappe de la Crau : l'origine des milieux humides étudiés

a) Histoire géologique de la Crau

Le territoire de la Crau s'étend sur 550 km² depuis Lamanon, puis forme un delta ouvert vers Arles et Fos sur Mer. Il s'agit de l'ancien cône de déjection de la Durance qui se jetait à l'époque directement dans la mer Méditerranée (cf carte géologique en *figure 2*).

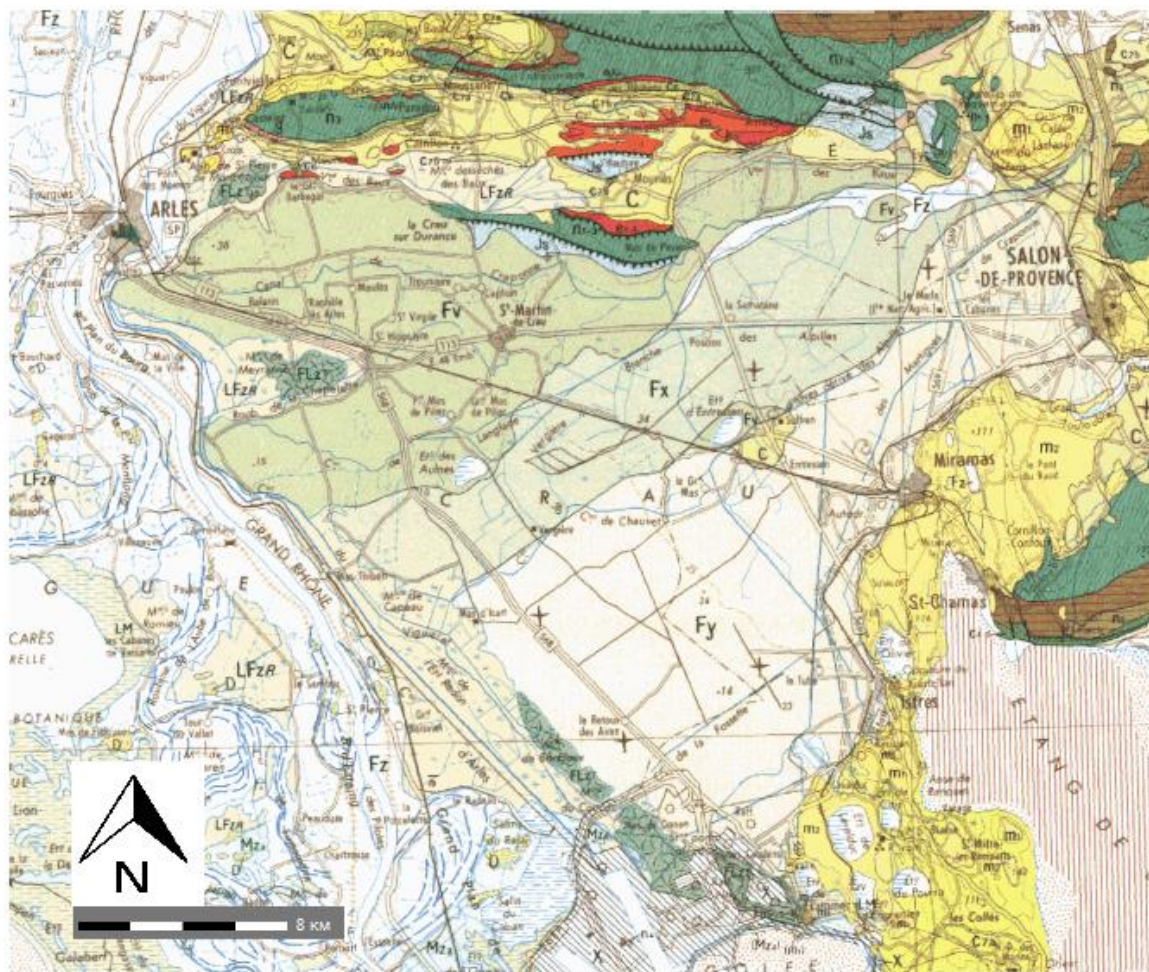


Figure 2 : Carte géologique de la Crau et des marais ainsi que le log lithologique associé (source : modifié d'après InfoTerre)

Le substratum profond de la plaine de la Crau est constitué, à la base, du calcaire Crétacé plissé par la phase orogénique pyrénéenne (cf log lithologique de la *figure 2*). Puis, durant la transgression marine miocène, de la molasse et des marnes gréseuses se sont déposées de façon non homogène sur la plaine. Lors de la régression marine qui suivie, le niveau marin a baissé considérablement, à cause de la crise de salinité Messinienne (Clauzon, 1979), ce qui a engendré la formation du canyon messinien de la Durance à travers le substratum en place. Un nouvel épisode marin a eu lieu en Provence à la fin du Pliocène, cela a provoqué le comblement du canyon de la Durance et d'une partie de la Crau par des marnes bleues. La suite de l'histoire géologique a été marquée par l'alluvionnement important de la Durance sur la Crau et par l'accumulation de cailloutis cryoclastiques (COLOMB et al., 1979). Sur la Crau, deux systèmes d'alluvionnement ont pu être distingués :

- la Crau d'Arles ou la « vieille Crau », Villafranchienne, caractérisée par un remaniement de calcaires subalpins contenus dans une matrice fine de limon et d'argile de type montmorillonite (COLOMB et al., 1977). Elle s'étend du Nord-Est, au niveau du seuil de Saint-Pierre-de-Vence, vers l'Ouest en direction de la dépression des marais de Chanoines et de Meyranne.
- la Crau de Luquier et de Miramas ou la « jeune Crau », Rissienne et Wurmienne, constituée de galets siliceux issus de roches endogènes alpines (quartzites, granites et microgranites) et de quelques galets calcaires, contenus dans une matrice peu présente sableuse et argileuse plutôt riche en illite (COLOMB et al., 1977). 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.

La Durance a ensuite repris son cours actuel après l'abaissement du seuil d'Orgon par néotectonique, pour rejoindre le Rhône, en passant par le Nord des Alpilles.

b) Hydrogéologie et cycle de l'eau en Crau

La Crau (*figure 3*) constitue aujourd'hui un aquifère libre et poreux d'eau douce important à l'échelle régionale. Il est constitué d'une épaisseur de quelques mètres à une cinquantaine de mètres de cailloutis au droit des paléochenaux durancien (BELTRANDO, 2015). La pente de ces cailloutis est importante au niveau du seuil de Lamanon : environ 7 ‰, puis diminue vers le Sud-Ouest aux alentours de 3 ‰ (COLOMB et ROUX, 1989). Cela représente une ressource en eau estimée à 550 millions de m³ (BERARD, DAUM, MARTIN, 1995). De plus, l'aquifère devient captif et saumâtre puis salé lorsqu'il plonge sous les dépôts limoneux imperméables du Rhône. Ce qui engendre des échanges entre l'eau douce qui arrive de l'Est et l'eau saumâtre qui arrive du Sud-Ouest (SYMCAU). La zone de transition entre l'eau saumâtre et l'eau douce se fait appelé le biseau salé.

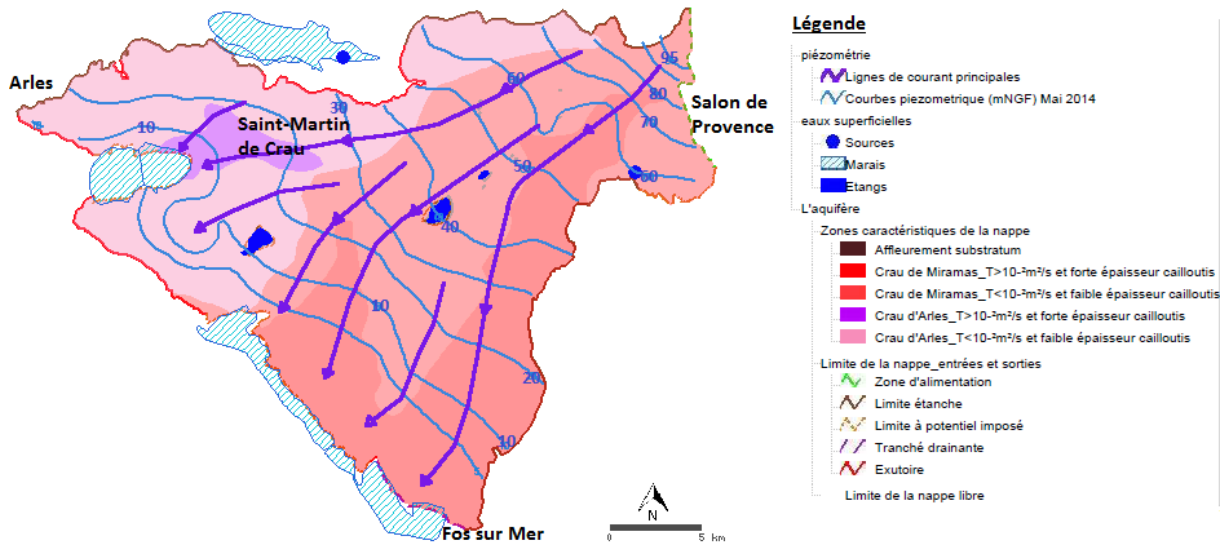


Figure 3 : Carte hydrogéologique de la Crau (source : réalisé à partir de CARMEN avec les données du SYMCRAU)

La nappe de la Crau est caractérisée par deux axes de drainage principaux, comme on peut le voir sur la carte hydrogéologique en *figure 3* : un premier partant du Nord-Est puis qui s'écoule en direction de Saint-Martin de Crau et des marais de Raphèle ; un second partant du même point mais qui se dirige vers le Sud et les marais du Vigueirat. Ce sont des directions d'écoulement qui suivent la géologie des « deux Crau » énoncées précédemment. Ces circulations d'eau et plus précisément, le battement de la nappe dans les cailloutis, provoquent la cimentation des galets entre eux et forme un ensemble de poudingue réparti de façon très hétérogène au sommet des cailloutis.

Les périodes de hautes eaux et de basses eaux en Crau sont inversées par rapport à un aquifère alluvial classique. En effet, l'alimentation de la nappe se faisant lors des périodes d'irrigation des prairies sur la plaine de la Crau, c'est-à-dire de fin mars à fin septembre, la période de hautes eaux a lieu en été alors que la période d'étiage se déroule en hiver. Cela est dû au système hydraulique répandu sur la plaine de Crau. Ce système comprend d'importants canaux d'irrigation, tels que le canal de Craponne et le canal de la vallée des Baux, qui sont alimentés par les eaux de la Durance. De petits canaux, appelés filioles, acheminent ensuite l'eau jusqu'aux prairies de foin. Ces prairies sont alors inondées pour la culture du foin et c'est par ce processus que l'eau recharge la nappe phréatique (*figure 4*). 70 % de la recharge de la nappe se fait par l'infiltration du surplus d'irrigation des prairies de foin et les 30 % restant viennent des précipitations (OLIOSO et al., 2013).

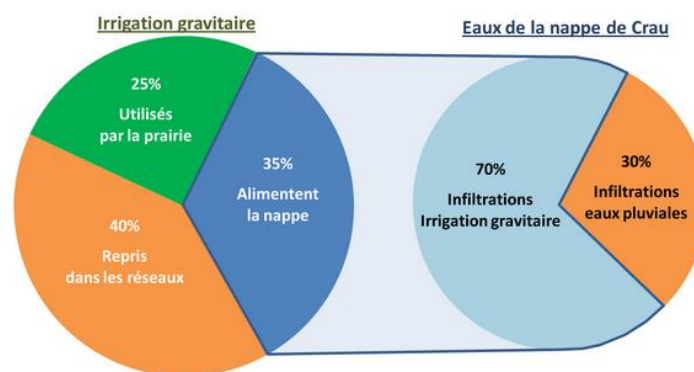


Figure 4 : Relation entre l'irrigation gravitaire et l'alimentation de la nappe de la Crau (Source : Contrat de canal Crau sud Alpilles, 2014)

Ce processus de recharge semble simple mais il met en avant surtout l'équilibre fragile qui existe entre l'irrigation et la ressource en eau. En effet, la nappe représente une ressource indispensable pour la vie du territoire et pour les différentes zones humides qui en dépendent. Elle approvisionne 13 communes de la Crau, soit environ 270 000 habitants. L'eau est aussi utilisée à des fins industrielles principalement pour la zone industrialo-portuaire de Fos-sur-Mer. Le pompage agricole est également présent en Crau pour les vergers et pour le maraîchage sous serre (BALLIHAUT, 2009). Cette eau est également à l'origine des résurgences qui alimentent les différents marais présents entre la Crau et la Camargue, une diminution de ces apports en eau pourrait avoir un impact significatif sur le maintien de ces milieux humides.

c) Bilan entrées-sorties

Un bilan hydrique de la nappe de Crau a été actualisé par le SYMCRAU en 2013. Le voici dans le *tableau 1* ci-dessous :

Tableau 1 : Bilan hydrique de la Crau (Source : SYMCRAU, 2015, Charte d'objectifs nappe de la Crau)

ENTREES	Flux souterrains (entrées naturelles)	Pluies	Infiltrations issues de l'irrigation des prairies	
<i>Entre 260 et 310 millions de m3/an</i>	20 à 30 millions de m3/an	70 millions de m3/an	Entre 170 et 210 millions de m3/an	

SORTIES	Prélèvements à usage industriel	Prélèvement pour l'alimentation en eau potable	Prélèvements à usage agricole	Exutoires naturels et artificiels
<i>Entre 250 et 310 millions de m3/an</i>	18 millions de m3/an	29 millions de m3/an	Entre 22 millions m3/an déclarés à l'Agence de l'Eau et 52 millions m3/an déclarés à l'OUGC en 2013 *	180 à 210 millions de m3/an

(* OUGC = Organisme Unique de Gestion de Collecte. A noter que les chiffres disponibles ne permettent pas de connaître précisément le volume prélevé pour l'usage agricole)

L'activité sur la Crau et les nombreux prélèvements qui en découlent, contrebalancent presque entièrement sa recharge par l'irrigation. Une partie des sorties est destinées aux exutoires naturels et artificiels tels que les marais de Raphèle, les marais de la Vallée des Baux, les marais du Vigueirat, l'étang d'Entressen et l'étang des Aulnes. Les volumes aux exutoires ne sont qu'une estimation mais représentent une grande part des sorties de la nappe. Les milieux humides sont donc dépendants de la nappe de la Crau. Ils sont aussi liés aux différents prélèvements réalisés dans la nappe. C'est pourquoi, estimer le volume d'eau nécessaire au bon fonctionnement des milieux humides est indispensable pour avoir une bonne gestion de la ressource en eau.

1.3 Les marais de Raphèle : des marais très particuliers au sein de la Camargue et dépendants de la nappe de la Crau

a) Les particularités des marais

Les marais de Raphèle font partis du réseau Natura 2000, ils sont classés au titre de la directive « Habitats » et de la directive « Oiseaux » pour leur richesse floristique et faunistique. Ces marais s'étendent sur environ 1 800 ha et comprennent les marais de Meyranne à l'Ouest et les marais des Chanoines à l'Est (figure 5).

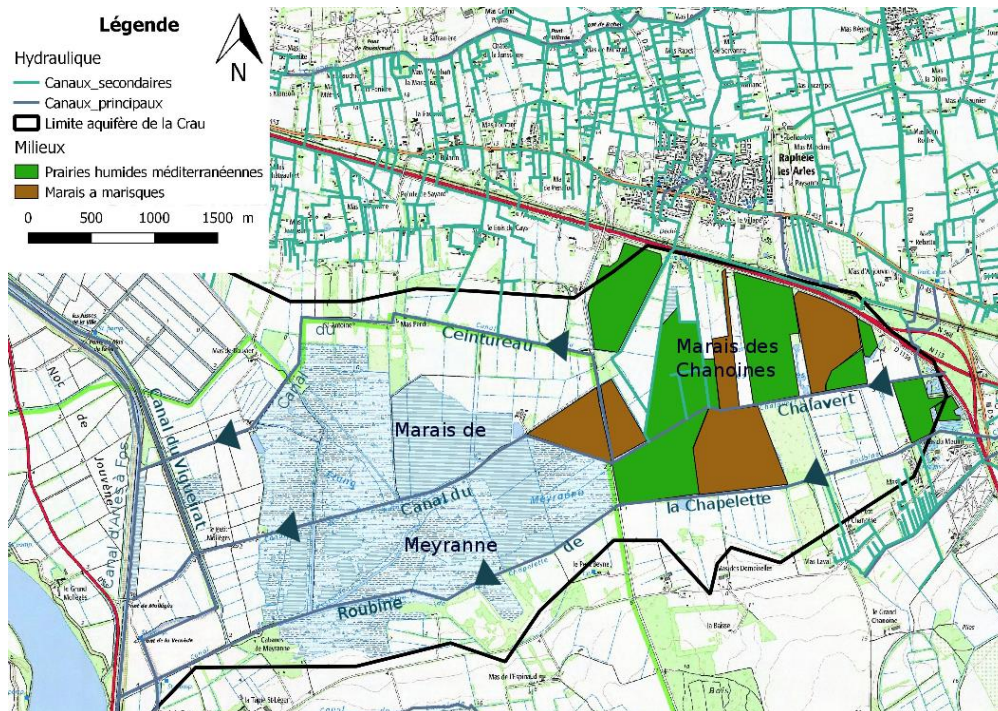


Figure 5 : Carte des marais de Raphèle, des milieux patrimoniaux et des canaux principaux

La particularité de ces marais est qu'ils sont alimentés par les résurgences de la nappe de Crau, localement appelés « laurons ». Etymologiquement, ce terme vient du provençal « lauroun » qui signifie surgenon d'eau (GUIDICELLI et al, 1980). Ces résurgences ont une morphologie singulière : ce sont des puits naturels à travers les limons et les tourbes et ouverts sur les cailloutis de la Crau. Le débit au niveau de ces sources est faible, mais suffisant pour que l'eau se renouvelle et évite de former de l'eau stagnante. Certains de ces laurons sont drainés par des canaux, aménagés par les propriétaires, car sans drainage certains laurons peuvent inonder les parcelles.

Les laurons apportent donc l'eau de la nappe de Crau en continue dans ces marais. C'est une eau douce, claire et qui reste plutôt fraîche toute l'année (entre 12 et 16°C, CEREMA 2015). Ce sont ces caractéristiques qui ont permis le développement d'espèces végétales au sein des marais. Le Marisque *Cladium mariscus* est une plante typique des marais de Raphèle. Il peut former de grands ensembles (figure 5), ce qui rend le marais impénétrable et pauvre en espèces végétales mais riches en espèces d'araignées (CEEP, 1999). Cette espèce est dépendante des laurons car elle pousse sur un sol avec un niveau d'eau qui ne doit pas descendre en dessous de 40 cm sous le niveau du sol (CORTOT et MAUCHAMP, 2003).

Lorsque la densité de marisques est plus faible, le marais peut renfermer des plantes qualifiées de « reliques glaciaires » (MOLINIER et TALLON, 1949). Il s'agit d'espèces boréoalpines qui sont

habituellement signalées en montagne au-delà de 800 mètres d'altitude. Leur présence serait le résultat de migrations récentes d'oiseaux (TRIAT-LAVAL, 1978). Ces espèces se sont adaptées et se sont maintenues au marais en raison de la fraîcheur des eaux qui crée un micro-climat. Ce sont la Parnassie des marais (*Parnassia palustris*), la Fougère des marais (*Thelypteris palustris*) et la Gentiane pneumonanthe (*Gentiana pneumonanthe*) (GUIDICELLI et al, 1980). Le marais à marisque représente aussi un habitat de nidification pour plusieurs espèces d'oiseaux comme le Butor étoilé, le Blongios nain, le Héron pourpré et la Locustelle luscinioloïde. On peut y trouver également le castor, qui se reproduit dans le canal de la Chapelette et du Chalavert, la Cistude, l'Agrion de Mercure...

Les prairies humides méditerranéennes forment une mosaïque avec le marisque dans les marais de Raphèle (*figure 5*). Elles poussent sur des sols hydromorphes, parfois submergés et abritent de nombreux insectes, reptiles, oiseaux et mammifères.

Ces espaces naturels présentent de forts enjeux de conservation pour le patrimoine naturel, d'où la nécessité de compréhension des interactions entre les eaux de surface, les eaux souterraines et les écosystèmes.

b) La morphologie des marais

La dépression des marais se trouve dans l'alignement de la Crau d'Arles et d'un axe de drainage de la nappe de la Crau. Sa formation serait liée au canyon Messinien de la Durance qui suivait l'axe de passage de la Crau d'Arles et qui a laissé un gouffre dans les terrains miocène et crétacé (CLAUZON, 1979). Les argiles pliocènes ont ensuite comblé le canyon lors de la transgression marine. Par la suite, la régression marine a été très érosive (COLOMB, 1977) et l'hypothèse est qu'elle l'ait été plus particulièrement au niveau des marais. Cela a alors engendré un plongement important des cailloutis et/ou une épaisseur importante de cailloutis pour combler la dépression. C'est d'ailleurs ce que l'on observe en amont des marais, voir la *figure 3 : carte hydrogéologique*. L'apparition des résurgences dans la dépression a permis le développement de tourbière et de marais. En tout cas l'hypothèse d'un ancien méandre du Rhône est exclue, comme en atteste l'observation morphologique des marais qui forment un couloir trop étroit pour le développement d'un méandre. Néanmoins, ces marais sont marqués par les débordements de crues du Rhône (VELLA, 2005), au Sud-Ouest des marais de Raphèle.

La coupe suivante (*figure 6*) résume les différents dépôts rencontrés dans les marais et montre le fonctionnement des laurons. Les cailloutis de la Crau sont recouverts de limons et de tourbe entrecoupés de dépôts un peu plus sableux correspondant aux dépôts de débordement du Rhône. La tourbe est formée par l'accumulation et la fossilisation de débris végétaux dans un contexte très humide car en contact avec la nappe de la Crau. L'épaisseur importante de tourbe, jusqu'à 5 m en aval des marais, constamment gorgée d'eau et donc avec peu d'activité bactérienne (KALAYDJIAN et CORNOT-GANDOLPHE, 2008) catégorisent les marais de Raphèle en zone de tourbières.

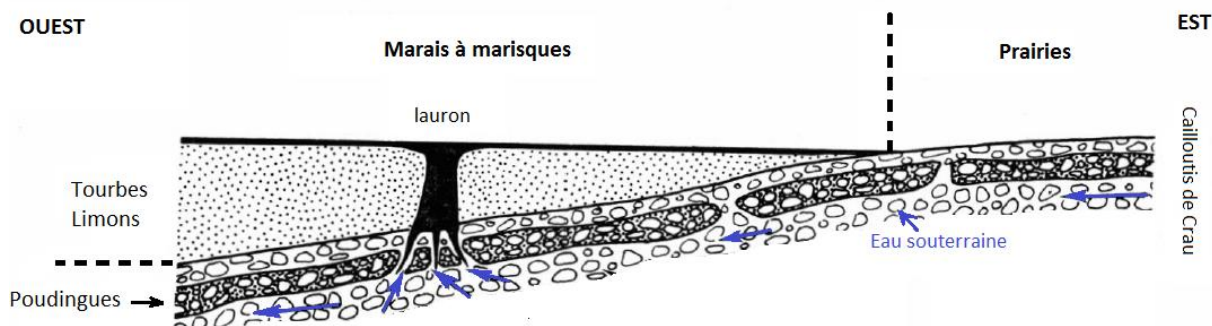


Figure 6 : Coupe au travers des marais et un lauron (Source : modifié d'après GUIDICELLI et al, 1980)

Les laurons se forment lorsque l'eau trouve un passage privilégié à travers les cailloutis, les fissures, ou la dissolution de la matrice calcaire du poudingue, pour monter « per ascensum » dans les marais. Ces eaux souterraines circulent sous pression dans la couche de limons et de tourbes puis forment des puits en surface.

Au fond de certains laurons, une fraction de sables fins de couleur clairs est observée, elle est issue de la matrice fine des cailloutis qui sont transportés par les circulations d'eau. Dans ce cas, les laurons sont qualifiés de « laurons ouverts » (GUIDICELLI et al, 1980). Lors de débit important dans le lauron, surtout au printemps et en été, les circulations d'eaux peuvent être observées car le sable clair effectue un mouvement de saltation vers le haut au fond du puit.

Lorsque le lauron ne présente pas un flux suffisant pour s'opposer au dépôt de végétaux morts et de débris, les sables ne sont pas observables au fond du puit. Le fond est alors limoneux tourbeux de couleur brune et il n'y a pas de mouvement de saltation. Ce sont les « laurons colmatés » (GUIDICELLI et al, 1980).

c) Bilan hydrologique

Le bilan hydrologique ci-dessous (Tableau 2) a été réalisé à partir des données météo France de l'année 2015. Il permet de voir les échanges d'eau dans un sol en fonction du flux entrant : les précipitations et du flux sortant : l'évapotranspiration potentielle (ETP). En faisant la différence de ces deux flux on obtient les précipitations efficaces (PE = P – ETP). Ce sont les précipitations qui

	Janv	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	Sept	Oct	Nov	Déc	Année
Température (°C)	7,4	6,2	11,1	13,8	18,4	22,7	25,6	22,8	18,7	13,9	11,8	10,7	15
Précipitations (mm)	90	34	54	123	2	79	13	85	48	83	25	18	653
ETP Penman (mm)	22	45	81	108	168	188	208	156	108	54	31	11	1179
Précipitations Efficaces (mm)	68	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	68
RFU (mm)	150	140	112	127	0	0	0	0	0	30	23	29	611

Tableau 2 : Bilan hydrologique estimé sur l'année 2015

atteignent le sol et qui s'infiltrent pour alimenter la RFU.

L'évapotranspiration potentielle (ETP) a été calculée par la méthode de Penman car d'après DELAROZIERE-BOUILLIN (BRGM, 1971) il s'agit de la méthode la plus fiable pour les latitudes inférieures à 47°N².

² En effet, en comparant les méthodes de Thornthwaite et Penman entre elles, il a été mis en évidence qu'au Nord du 47ème parallèle de latitude nord, l'utilisation de l'une ou l'autre formule donne des résultats

La réserve facilement utilisable (RFU) représente l'eau retenue par le sol et donc facilement utilisable pour les cultures. La RFU d'entrée de cycle a été fixée à 150 mm pour une tourbe limoneuse (EL MANSOURI, 2004). Dans le bilan hydrologique proposé, la RFU est alimentée uniquement avec les précipitations efficaces, c'est pourquoi elle se tarie en période estivale jusqu'à être nulle. En réalité, la RFU n'est jamais nulle dans la zone d'étude car ce sont des tourbières où le sol est toujours saturé en eau. Cela est dû aux arrivées d'eau des canaux de drainage et aux arrivées d'eaux souterraines qui gorgent le sol d'eau. Le bilan hydrologique met en avant que sans ces arrivées d'eau, les marais ne seraient pas ce qu'ils sont aujourd'hui, surtout en période sèche c'est-à-dire en été, où les apports d'eau de nappe sont plus importants.

1.4 L'hydrologie

Le secteur d'étude allant de la Crau jusqu'à la Camargue est "anthropisé" par des systèmes de canaux. Ils permettent soit l'acheminement de l'eau de la Durance vers les prairies de foin situées sur la Plaine de la Crau, soit l'acheminement de l'eau du Rhône vers les rizières de Camargue. Les canaux d'irrigation sont ceux en lien direct avec les fleuves alors que les canaux de drainage sont ceux qui récupèrent le surplus d'irrigation des champs, drainent les marais et potentiellement aussi les eaux de la nappe de la Crau.

Les marais de Raphèle sont structurés par six ouvrages hydrauliques de drainage (cf *figure 5*) : les canaux du Ceintureau et du Chalavert au nord, le canal de la Chapelette au sud et les canaux du Viage, du Vigueirat et d'Arles à Fos à l'ouest. Ces canaux sont principalement alimentés par les eaux résiduelles gravitaires du système d'irrigation des prairies de foin répandu sur une grande partie de la plaine de la Crau. Cela entraîne un régime particulier des canaux : des niveaux d'étiage en hiver et des niveaux de hautes eaux en été.

Les canaux du Ceintureau et du Viage drainent les terres agricoles situées au nord. Le canal du Viage est utilisé pour alimenter les marais de Meyranne (Association Les Amis des marais du Vigueirat, 2009) et est géré par les Amis du marais du Vigueirat. Le canal du Ceintureau passe au Nord des marais puis se jette dans le canal d'Arles à Fos.

Le canal du Chalavert débute à la limite est des marais de Raphèle. Il récupère les eaux d'assainissement de Moulès et de Raphèle mais également les eaux des laurons drainés par de petits canaux présents dans les marais de Chanoines. Les amis du marais du Vigueirat, gestionnaire des marais de Meyranne, utilisent l'eau du canal pour alimenter les marais de Meyranne par un système de martelière. Le canal du Chalavert termine sa course en se jetant dans le canal d'Arles à Fos à l'Ouest des marais.

Le canal de la Chapelette prend naissance au niveau de plusieurs résurgences de la nappe de la Crau : quatre sources au lieu-dit du Mas de Paul (au sud de Saint-Martin-de-Crau) et la roubine de la Gardiole qui draine une zone marécageuse (CEEP, 1995). Ces sources sont difficilement observables car elles correspondent à des suintements sur plusieurs mètres de distances, de plus leur emplacement change selon les années. En effet, cela dépend de la charge de la nappe qui varie selon son alimentation. Le canal de la Chapelette est donc fortement influencé par les fluctuations du niveau de la nappe. De plus, lors de la période d'irrigation des prairies d'irrigation la Chapelette est alimentée par des canaux de drainage (canaux qui récupèrent le surplus d'irrigation d'une prairie). Ce

similaires. Néanmoins, au Sud du parallèle 47°N, la méthode de Thorthwaite sous-estime l'évapotranspiration potentielle, il est alors préférable d'utiliser la méthode de Penman.

canal présente donc des hautes eaux (environ $1 \text{ m}^3/\text{s}$) de fin avril à fin octobre et des basses eaux (environ $0,1 \text{ m}^3/\text{s}$) en hiver. Il termine sa course dans le canal d'Arles à Fos à l'ouest des marais.

CHAPITRE 2 : Investigation hydrologique et pédologique

Les marais de Raphèle ont été peu étudiés vis-à-vis des circulations d'eau souterraine et des relations qui peuvent exister entre les eaux de surface et les eaux souterraines. La mise en place de suivis hydrologiques et piézométriques sur une période de 5 mois a permis de montrer les échanges entre les différentes masses d'eau. La campagne pédologique a aussi été lancée afin d'étudier les caractéristiques pédologiques des marais et de mieux connaître le substrat dans lequel se forme les laurons.

Ce chapitre détaille les moyens mis en œuvre pour l'investigation hydrologique et pédologique et présente leurs résultats.

2.1 Méthodes

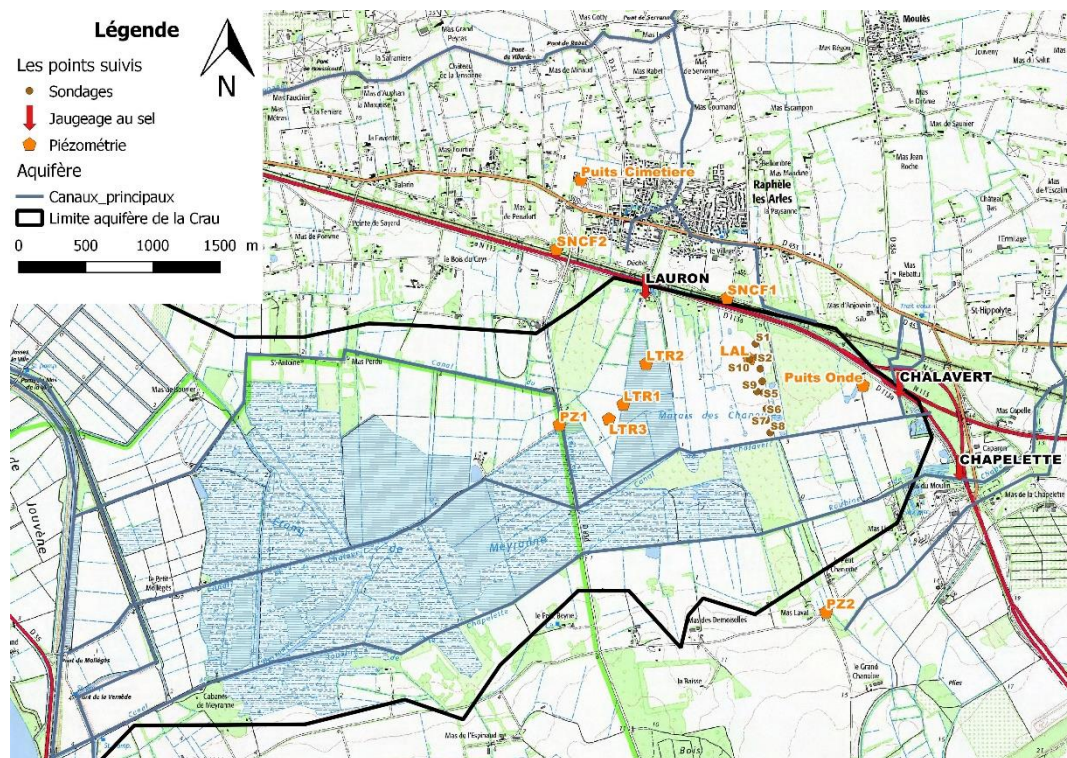


Figure 7 : Carte de localisation des différents points de mesures sur l'investigation hydrologique et pédologique

a) Le jaugeage au sel

Afin de suivre l'évolution des conditions hydrologiques des eaux de surface et de quantifier les arrivées d'eau à l'amont des marais, des campagnes de débit-métrie ont été réalisées. Deux points de mesures (figure 7) ont été choisis dans les canaux de drainage principaux des marais :

- « Chalavert » : mesure dans le canal du Chalavert à l'Est des marais.
- « Chapelette » : mesure dans la roubine de la Chapelette à l'est des marais. Pour ce point, une station de mesure du débit automatique est présente. Les chroniques journalières et mensuelles sont disponibles sur le site de la BANQUE HYDRO. La présence de cette station permettra de comparer les résultats obtenus avec ceux de la station et ainsi de vérifier la qualité des résultats de la méthode au jaugeage au sel.

Une troisième mesure a été réalisée dans un lauron afin de quantifier l'importance des arrivées d'eau souterraine dans le marais :

- « Lauron » : mesure dans un lauron au Nord des marais.

La méthode utilisée a été celle du jaugeage au sel car il s'agit d'une méthode simple d'application. Une mesure par mois a été réalisée de mars à juillet 2016.

Le principe de la méthode est d'injecter une solution concentrée de sel de masse m connue et de rechercher dans quelle proportion cette solution a été diluée par la rivière. La masse de sel injectée est dépendante de la largeur du cours d'eau et de sa vitesse d'écoulement : plus ces paramètres sont grands, plus la masse de sel doit être importante. Le *tableau 3* suivant indique les masses de sel injectées pour chaque point de mesure.

Tableau 3 : Masse de sel injectée pour la mesure de débit

	Masse de sel injectée (g)
Canal du Chalavert	2000
Roubine de la Chapelette	3000
Lauron TRAZIC	300

Le passage du nuage salin dans le cours d'eau a été enregistré par une sonde conductimétrique (DIVER Schlumberger Water Services), placée en aval de la zone d'injection.

Pour obtenir la mesure de débit, il est nécessaire de tracer la droite d'étalonnage reliant la conductivité à la concentration (*figure 8*).

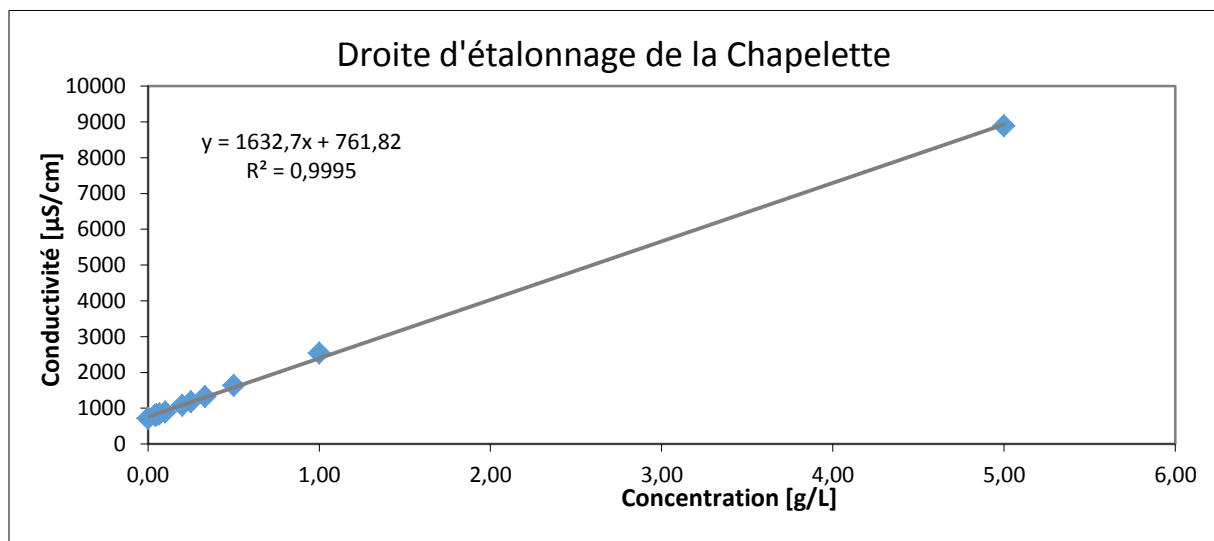


Figure 8 : Droite d'étalonnage de la Chapelette : Conductivité en fonction de la concentration

A partir de l'équation de la droite, il est possible de passer de la variable mesurée, c'est-à-dire la conductivité, à la variable souhaitée, c'est-à-dire la concentration. En considérant que la masse de sel est conservée entre le point d'injection et le point de mesure (loi de conservation de masse) la formule suivante peut être utilisée pour obtenir le débit en L/s :

$$Q = \frac{m}{c_m * tps} \quad c_m = \frac{1}{tps} * \int_0^{tps} c dt$$

Q : débit en L/s – m : masse en g – tps : temps d'acquisition de la donnée en s – c_m : concentration moyenne en g/L – c : concentration à un temps t en g/L

b) Le suivi piézométrique

Le but du suivi piézométrique est d'établir un état actuel de la nappe dans les marais. Cet état des lieux étant une première base sur la définition des apports en eau nécessaires au maintien des marais. Il permet aussi d'observer la dynamique de la nappe en lien avec la gestion de l'eau en surface.

Le suivi piézométrique a été réalisé sur la même base de points que l'étude du CEREMA qui avait aussi mis en place des piézomètres spécialement pour l'étude. Six points de mesures ont été retenus (*figure 7*) et suivis de façon hebdomadaire à l'aide d'une sonde piézométrique :

- « puits cimetièrre » : localisé au Nord des marais, dans la nappe de la Crau
- « SNCF2 » : localisé au Nord des marais, dans la nappe de la Crau mais plus proche de la limite avec les marais
- « SNCF1 » : localisé au Nord des marais à la limite, dans la nappe de la Crau mais plus proche de la limite avec les marais
- « Puits onde » : localisé dans les marais, à l'Est
- « PZ1 » : localisé dans les marais, au centre
- « PZ2 » : localisé au Sud des marais, dans la nappe

Le piézomètre SNCF1 a été équipé d'une sonde pressiométrique et conductimétrique, afin d'avoir une mesure continue des variations du niveau d'eau (*figure 9*). Cette sonde a été mise en place le 22 avril 2016 à 18h avec un pas de temps de mesure de 2h. La même sonde DIVER a été utilisée pour le jaugeage au sel, ce qui explique l'absence de données lorsque la sonde a été récupérée pour réaliser une mesure de débit. En parallèle des enregistrements de la pression d'eau, il a été nécessaire d'enregistrer la pression barométrique pour corriger les pressions d'eau mesurée avec la pression atmosphérique afin d'avoir une mesure correcte du niveau d'eau. En effet, la pression atmosphérique a une influence sur les hauteurs d'eau car selon la pression qu'elle exerce elle peut soit augmenter, soit diminuer le niveau d'eau mesuré.



Figure 9 : A gauche : sonde DIVER et puits SNCF1. A droite : sonde piézométrique et piézomètre PZ1

Le suivi piézométrique s'est également fait au niveau de laurons. Quatre d'entre eux, choisis pour leur localisation (*figure 7*) et leur rapport aux canaux (non drainé), ont été équipés d'une échelle limnimétrique et un relevé hebdomadaire des niveaux d'eau a été effectué :

- « LAL » : lauron localisé sur la propriété de M ALEXANDRE à l'Est du marais des Chanoines
- « LTR2 » : lauron localisé sur la propriété de M TRAZIC à l'Ouest du marais des Chanoines, au Nord de la propriété
- « LTR1 » : lauron localisé sur la propriété de M TRAZIC au sud du précédent, au centre de la propriété
- « LTR3 » : lauron localisé sur la propriété de M TRAZIC au sud du précédent, au Sud de la propriété

Le lauron « LAL » a également été équipé d'une sonde pressiométrique (le 29 avril 2016, début des mesures à 16h) ce qui a permis d'avoir une mesure continue du niveau d'eau dans le lauron. Dans ce cas, une sonde OTT mini a été utilisée pour enregistrer la pression d'eau et la température. Cette sonde corrige directement la pression d'eau mesurée avec la pression atmosphérique.

Afin d'exploiter au mieux ces points de mesures, une campagne de nivellement, en partenariat avec le CEREGE, a été réalisée sur chaque point suivi : puits, piézomètres et échelles limnimétriques confondus. Le GPS Différentiel a été le système utilisé pour le nivellement. Le GPS de terrain était un Trimble R8 et le logiciel consacré aux corrections différentielles était le Trimble Business Center (TBC). Cette méthode permet d'avoir une précision de l'ordre du centimètre : 0,8 cm en moyenne. La précision était très importante à atteindre afin de réaliser une carte piézométrique fine des marais.

c) La pédologie et les laurons



Figure 10 : Le carottier russe et le lauron en formation

La campagne de carottage au carottier russe s'est déroulée sur deux journées. Un transect Nord-Sud a été réalisé sur la propriété de M. ALEXANDRE, à l'Est du marais des Chanoines (figure 7). Ce secteur a été choisi car de nombreux laurons se sont formés sur la propriété. Il peut potentiellement mettre en évidence une variation de l'hétérogénéité du sol qui favorise la mise en place de laurons.

Dans le but d'avoir une cartographie des cailloutis, le carottier ne pénétrant pas dans ces derniers, huit points de forage à 100 mètres d'intervalle entre eux ont été réalisés.

Afin d'étudier la lithologie sous-jacente des laurons, deux points ont été réalisés dans des laurons dont un en formation (Figure 10). Celui-ci désigne une dépression où le puit du lauron ne s'est pas ouvert jusqu'à la surface du sol.

Comme il s'agissait d'une tarière manuelle, il a fallu être au minimum deux pour permettre l'enfoncement du carottier et le prélèvement de la carotte. Le carottier a permis de prélever des échantillons de 50 cm de long. Une description granulométrique, colorimétrique et des éléments organiques a été faite sur chaque prélèvement.

2.2 Résultats

a) Les débits

Les résultats montrent globalement une augmentation des débits en fonction du temps, entre mars 2016 et août 2016 (*tableau 4* et *figure 11*). Une stabilisation du débit est remarquable sur la Chapelette à la mi-mai. Le débit est 10 fois plus important pour les canaux en juillet qu'en mars, ce qui représente une variation élevée des arrivées d'eau au cours de l'été. Cette augmentation pourrait être due à l'irrigation des prairies de foin en amont des marais qui débute dès la fin mars. Les eaux résiduelles de l'irrigation étant récupérées par les canaux du Chalavert et de la Chapelette.

Tableau 4 : Résultats du jaugeage au sel

Roubine de la Chapelette - Débit (L/s)					
	14-mars	13-avr	18-mai	14-juin	21-juil
BANQUE HYDRO	195	404	974	896	1100
Jaugeage au sel	-	-	1175	1007	1224

Canal du Chalavert - Débit (L/s)					
	14-mars	13-avr	18-mai	14-juin	21-juil
	42	127	243	313	447

Lauron TRAZIC - Débit (L/s)					
	14-mars	13-avr	19-mai	14-juin	21-juil
	3	9	7	8	7

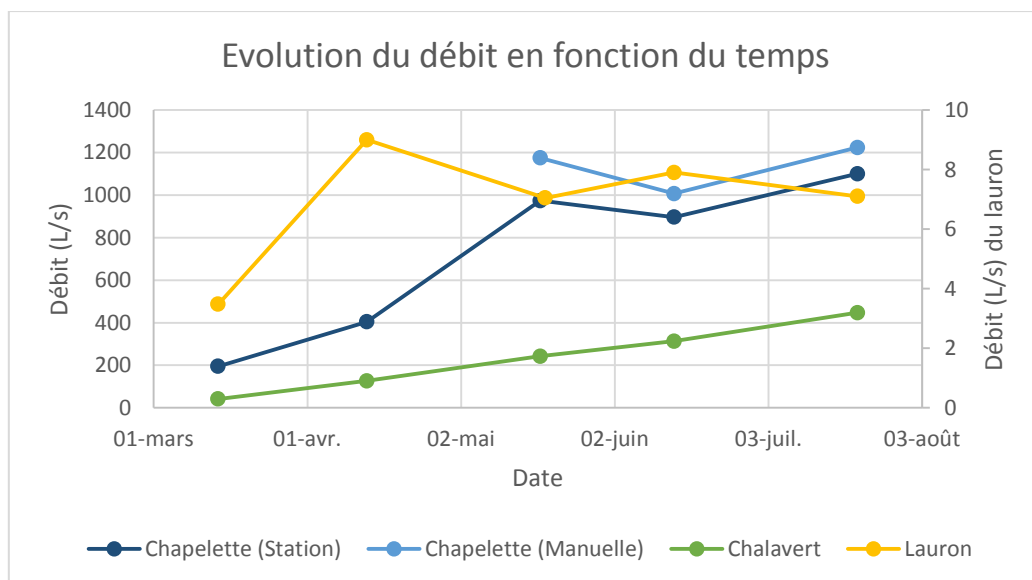


Figure 11 : Graphique représentant l'évolution du débit en fonction du temps
L'axe secondaire s'applique au débit du lauron uniquement

Le débit du lauron augmente aussi au début puis se stabilise à partir de mai. Cela pourrait mettre en évidence la réponse des laurons et de la nappe vis-à-vis de l'irrigation. Ce lauron présente un débit plus important que les autres laurons présents sur le site d'étude. Sa localisation en bordure de la nappe de la Crau pourrait avoir un rôle. Cette observation est corrélée dans un autre lauron qui

présente un fort débit (observation visuelle) et qui est localisé également en bordure de la nappe mais à l'Est des marais, sur la propriété de Mme ONDE.

b) Le suivi piézométrique

Mesures ponctuelles

Le graphique (*figure 12*) suivant montre les variations du niveau piézométrique en fonction du temps dans les piézomètres et les puits. Globalement le niveau d'eau de la nappe est stable au cours de l'été. Une légère augmentation est visible entre mi-mai et mi-juin et une diminution est décelable à partir de mi-juin. Les précipitations n'ont pas d'influence nettement visible sur le niveau piézométrique.

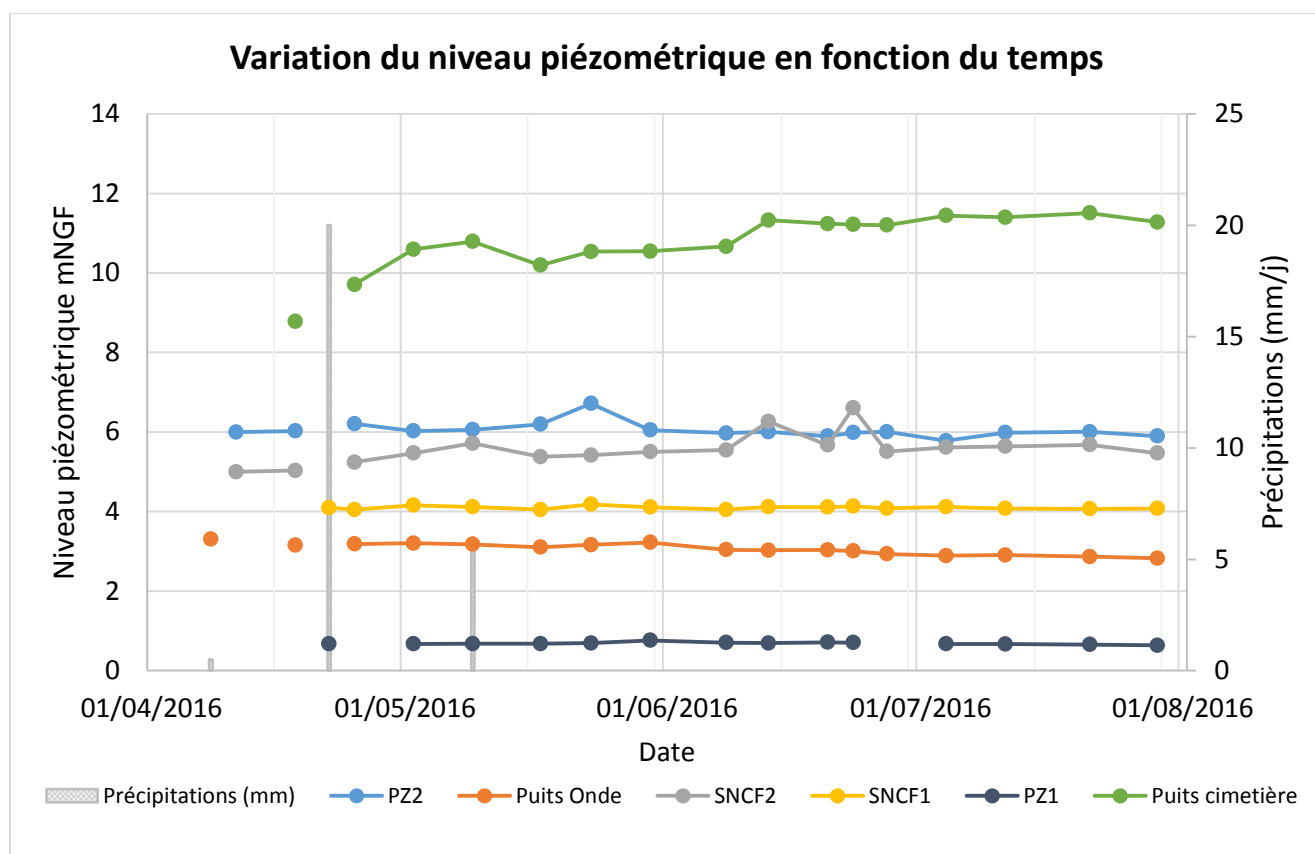


Figure 12 : Variations du niveau piézométrique mNGF et des précipitations [mm/j] en fonction du temps

Le battement de la nappe entre le 1 avril 2016 et le 31 juillet 2016, à chaque point de mesure est indiqué dans le *tableau 5* suivant :

Tableau 5 : Battement de la nappe d'avril à août dans les piézomètres et les puits

	PZ2	Puits Onde	SNCF2	Puits cimetièrre	SNCF1	PZ1
Battement de la nappe (cm)	93,5	48	160,5	272,5	13,5	12,5

Les variations les plus importantes sont observées sur les points SNCF2 et puits cimetièrre qui sont localisés dans la plaine de la Crau et non dans la dépression des marais. De plus, on peut aussi noter que plus un point est au centre des marais, plus son battement est faible.

Concernant les laurons équipés d'une échelle limnimétrique, on observe que les variations du niveau d'eau sont très fines au cours du temps (*figure 13 et tableau 6*). Une diminution du niveau d'eau apparaît début juillet.

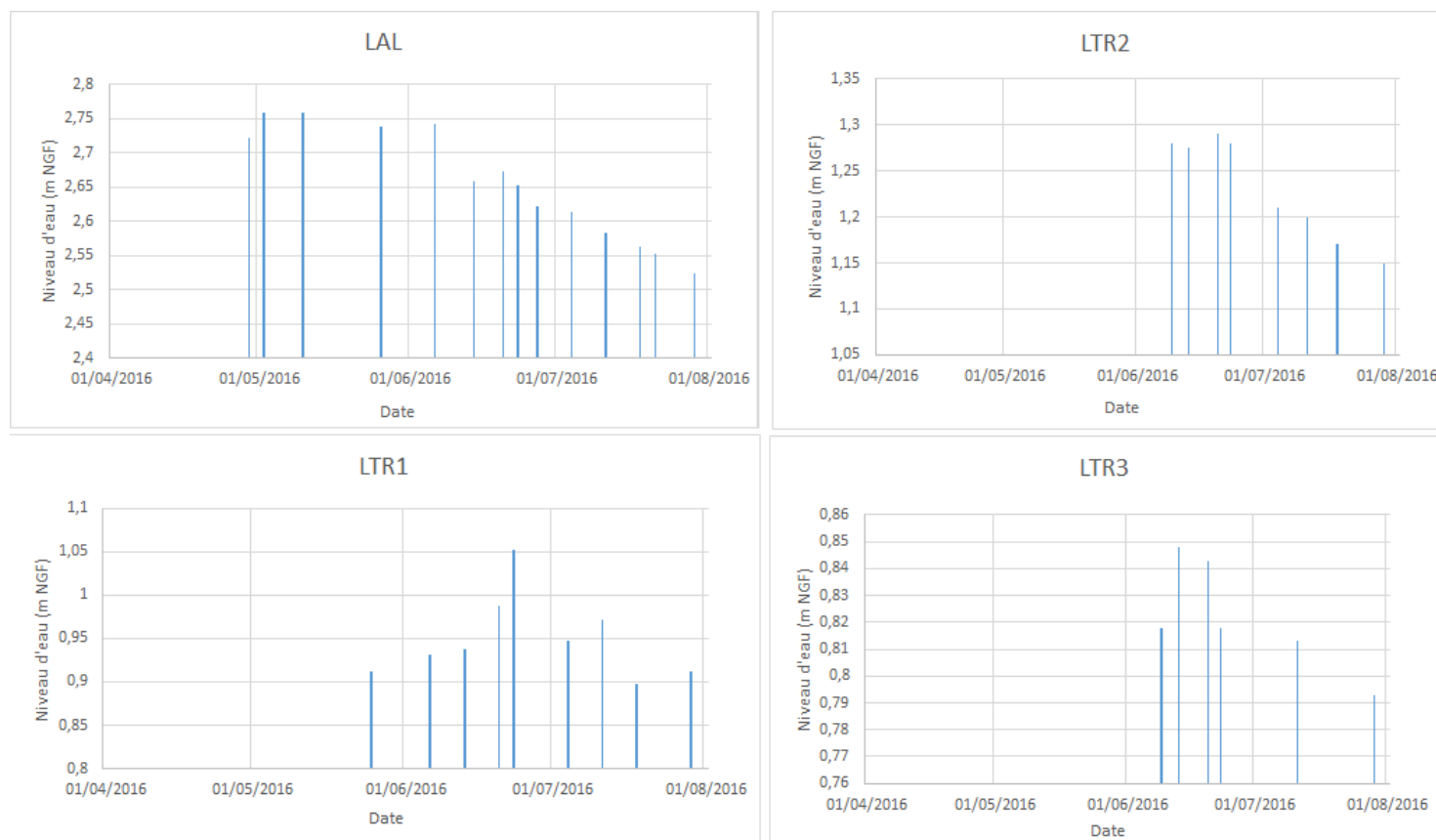


Figure 13 : Niveau piézométrique dans les 4 laurons équipés d'une échelle limnimétrique

Pour le battement de la nappe dans les laurons (*tableau 6*), il peut être mis en évidence qu'il est plus important au Nord-Est qu'au Sud-Ouest des marais. LAL étant le point le plus au Nord-Est et LTR3 le plus au Sud-Ouest.

Tableau 6 : Battement de la nappe d'avril à août dans les laurons

	LAL	LTR2	LTR1	LTR3
Battement de la nappe (cm)	23,5	14	15,5	5,5

Mesures continues

Les mesures continues dans le puits SNCF1 en amont des marais et dans le lauron LAL situé à l'Est du marais des Chanoines sont représentées sur les graphiques suivants (*figure 14 et figure 15*) avec aussi les données de précipitations (Météo France).

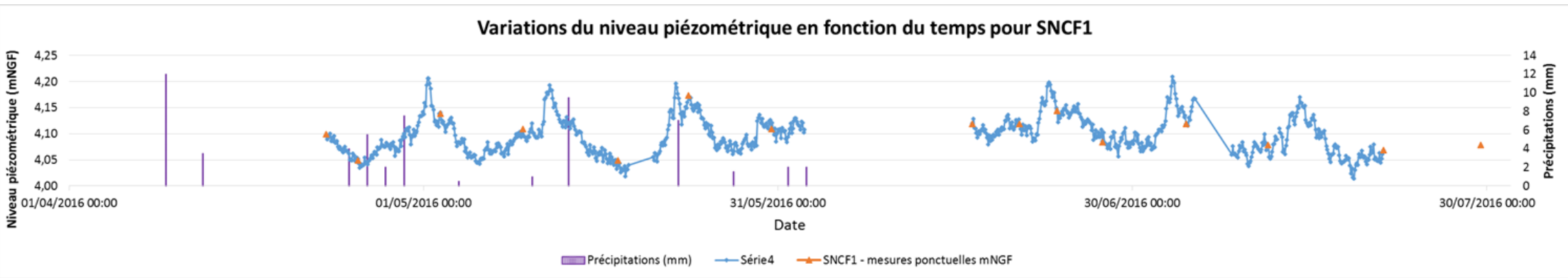


Figure 14 : Variations du niveau piézométrique (m NGF) en continu et en fonction du temps pour le puits SNCF1

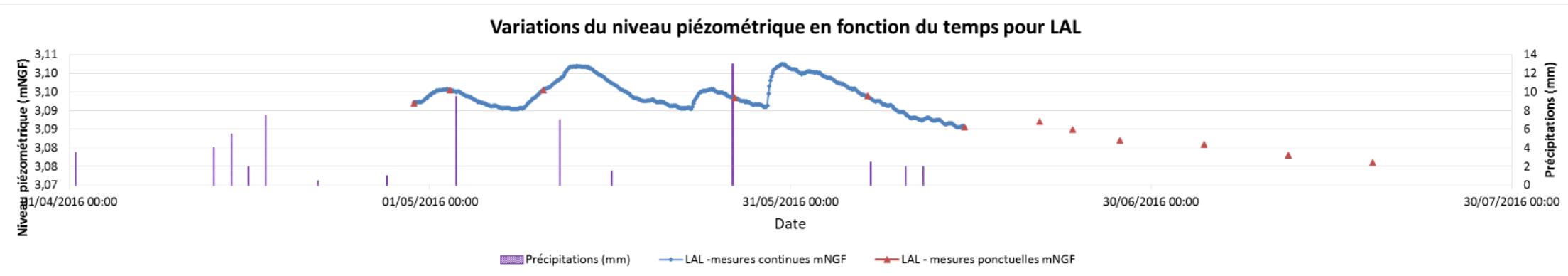


Figure 15 : Variations du niveau piézométrique (m NGF) en continu et en fonction du temps pour le lauron LAL

Les variations observées sont plus précises que celles obtenues manuellement. Tous les 10 ou 15 jours environ, il y a une augmentation du niveau piézométrique dans le puits et dans le lauron. Ils présentent donc tous deux un comportement piézométrique similaire. L'amplitude des variations est de l'ordre du centimètre pour le lauron et de l'ordre d'une dizaine de centimètres pour le puits. Ces variations sont dues au calendrier des arrosants des prairies de foin qui inondent leurs prairies selon un pas de temps régulier pour favoriser la pousse du foin. Les submersions ont lieu généralement tous les 10 à 15 jours. C'est cette même fréquence qui est observée sur ces graphiques. De plus, on peut noter que les précipitations ne jouent pas un rôle significatif sur les variations du niveau piézométrique.

Ces mesures piézométriques ont également permis de créer une carte piézométrique de la nappe dans les marais de Chanoines (*figure 16*). Pour créer la carte, seuls les niveaux dans les laurons, les puits et les piézomètres ont été considérés. Les isopièzes reflètent le niveau d'eau de la nappe en mètre NGF du 23 juin 2016.

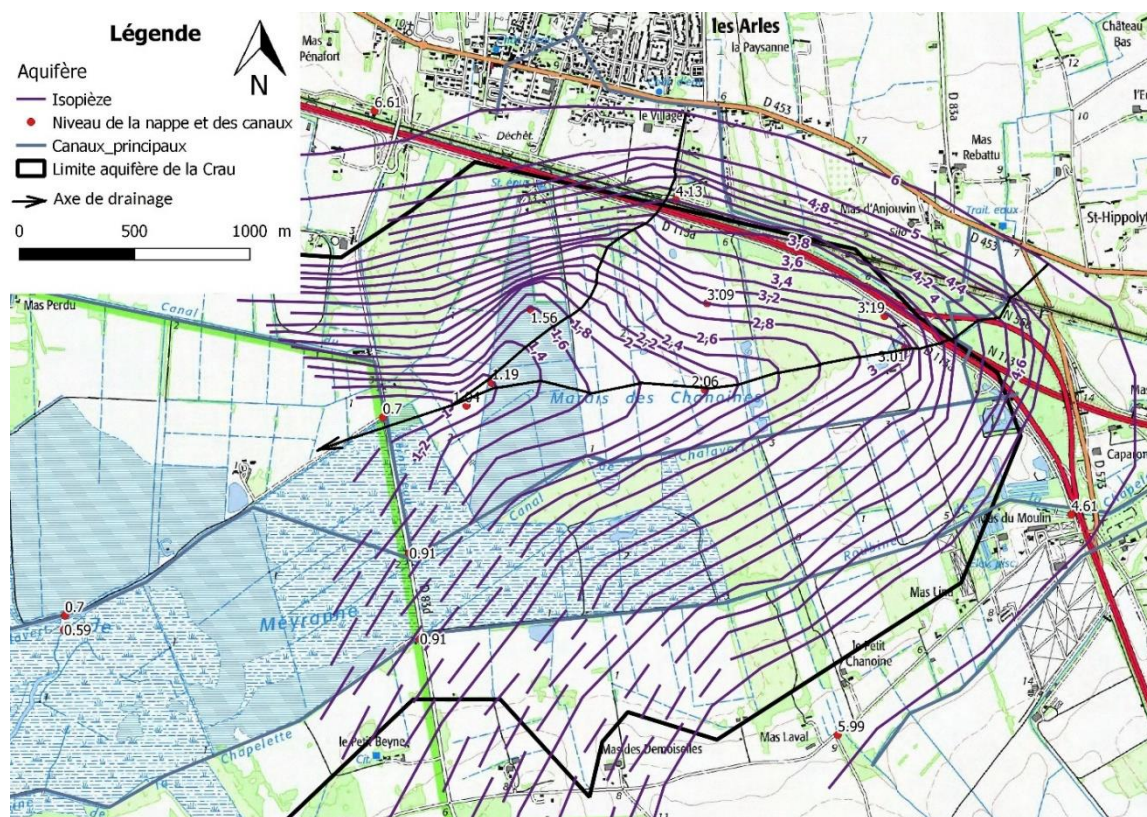


Figure 16 : Carte piézométrique dans le marais des Chanoines (juin 2016)

La carte piézométrique met en avant un axe de drainage de l'Est vers l'Ouest et un second axe Nord Sud qui rejoint le premier. Les isopièzes ne font pas ressortir de relation entre les canaux et la nappe. Cependant, la hauteur du niveau d'eau en amont de la roubine de la Chapelette (à l'Est de la carte en *figure 16*, valeur : 4,61 m NGF) est comprise entre les isopièzes 6 et 5 m NGF de la nappe et en aval de la Chapelette, la hauteur d'eau est de 0,91 m (à l'Ouest de la carte) et celle de la nappe est à 2,2 m. Cela montre que le niveau de la nappe est plus haut que le niveau d'eau du canal. On peut en déduire que les eaux souterraines alimentent le canal à ces endroits. Le même phénomène est observé sur le canal du Chalavert.

c) La pédologie et les laurons

Comme le montre la carte ci-dessous (*figure 17*), de nombreux laurons ont été cartographiés dans les marais des Chanoines. Cependant cet inventaire n'est pas exhaustif car certains laurons sont dissimulés dans la végétation dense de marisques et donc non observable ni à porter.

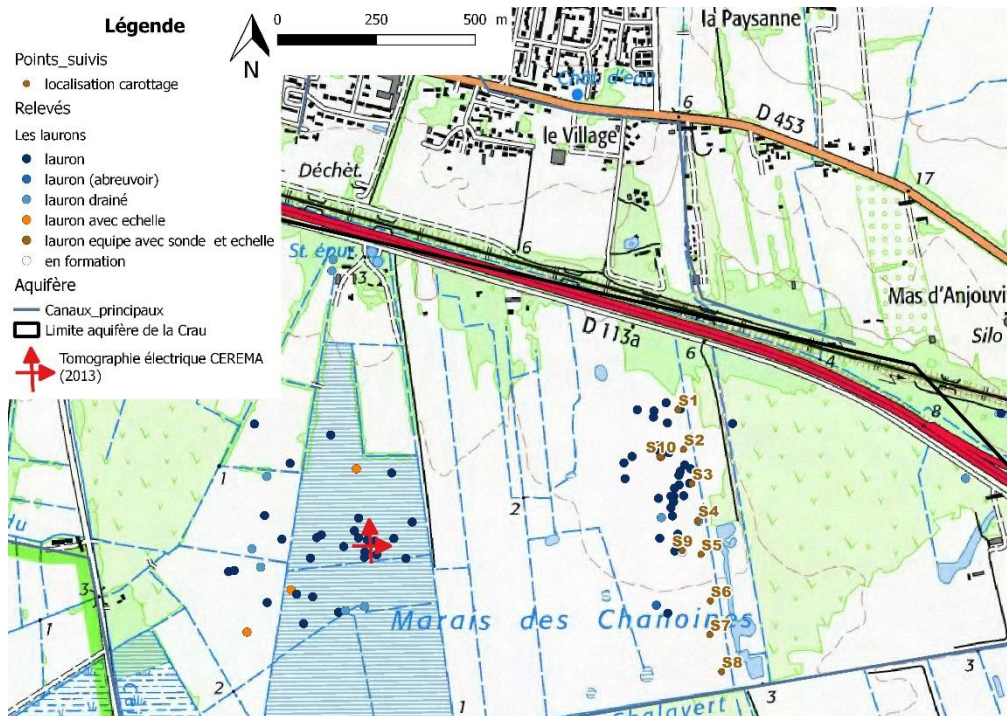


Figure 17 : Carte de localisation des laurons et de points de carottage manuel

Les sondages réalisés pour la campagne pédologique sont également indiqués sur la carte (*figure 17*). Les sondages S1 à S8 ont été réalisés sur la prairie, le sondage S9 a été fait au niveau d'un lauron en formation (dépression grillagée par le propriétaire) et le sondage S10 au droit du lauron « LAL » équipé d'une échelle limnimétrique et d'une sonde pressiométrique.

Lors de cette campagne de carottage, 3 faciès principaux sont ressortis. De haut en bas il y a (*figure 18*) :

- **(1)** De la tourbe calcaire brune à texture fine contenant des racines, des fibres et des coquilles de petits gastéropodes (0 à 5 mm).
- **(2)** Des argiles grises considérées comme étant la forme minéralisée de la tourbe : la tourbe par un processus de réduction et de compaction se minéralise pour donner de l'argile. Cette argile est riche en fibres et contient quelques coquilles.
- **(3)** Des argiles sableuses jaune-ocre contenant des concrétions sableuses pouvant atteindre 5 mm et des cailloutis pouvant atteindre 1 cm. Cette partie plus sableuse de couleur ocre est issue du lessivage des cailloutis par l'eau de la nappe.

Dès que le carottier atteignait le cailloutis, cela terminait le sondage, le carottier russe ne pouvant pas traverser cette base dure.

Le carottage du lauron en formation a montré que sous 60cm de tourbe il y avait un vide (le carottier est descendu par lui-même) de 2m avant de retomber dans un peu de tourbe. C'est aussi dans ce sondage qu'ont été le plus trouvés de concrétions sableuses et de cailloutis issus du lessivage des cailloutis de la Crau. Le fait qu'il ne s'ouvre pas jusqu'à la surface a peut-être favorisé le transport de

particules plus grossières par les flux d'eau car le fond du lauron n'a pas subi de compaction par l'accumulation de matière organique venant de l'extérieur. La *figure 18* suivante représente le phénomène de transport de particules grossières au fond du lauron :

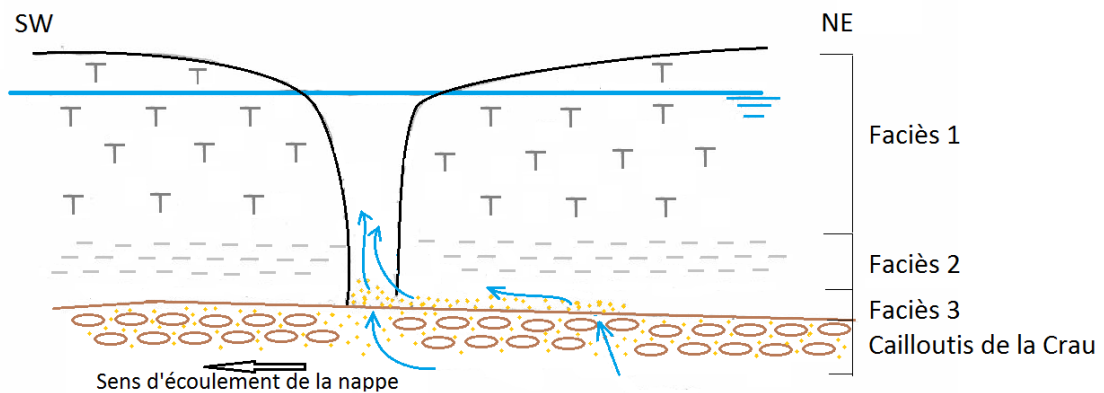


Figure 18 : Coupe au travers d'un lauron avec les différents faciès rencontrés

Sur ce transect réalisé, l'épaisseur de chaque faciès ainsi que la profondeur des cailloutis ont donc été déterminées. Les résultats sont présentés dans le *tableau 7* suivant et sont illustrées sur la coupe en *figure 18*. Les logs des sondages sont présentés en annexe 2.

Tableau 7 : Epaisseur de la tourbe et sommet des cailloutis (sous TN)

Faciès	Description	Epaisseur (m)									
		S1	S2	S3	S4	S5	S6	S7	S8	S9	S10
1	Tourbe	2,35	1,5	2,75	2,3	2,9	3	2,8	2,65	0,6	0,55
2	Argile grise	0,25	1,8	0,55	0,9	0,3	0,25	0,85	0,5	0,35	0,8
3	Argile sableuse	-	-	-	-	0,5	-	-	-	0,85	-
Profondeur cailloutis (sous le TN)		-2,6	-3,3	-3,3	-3,2	-3,7	-3,25	-3,65	-3,15	-3,9	-2,85

L'étude du CEREMA (2015) sur les laurons a apporté des résultats de tomographie électrique à proximité de laurons en période de hautes eaux et de basses eaux, la *figure 17* localise leurs tronçons. Seuls les résultats de la campagne des hautes eaux ont été utilisés (*figure 19*).

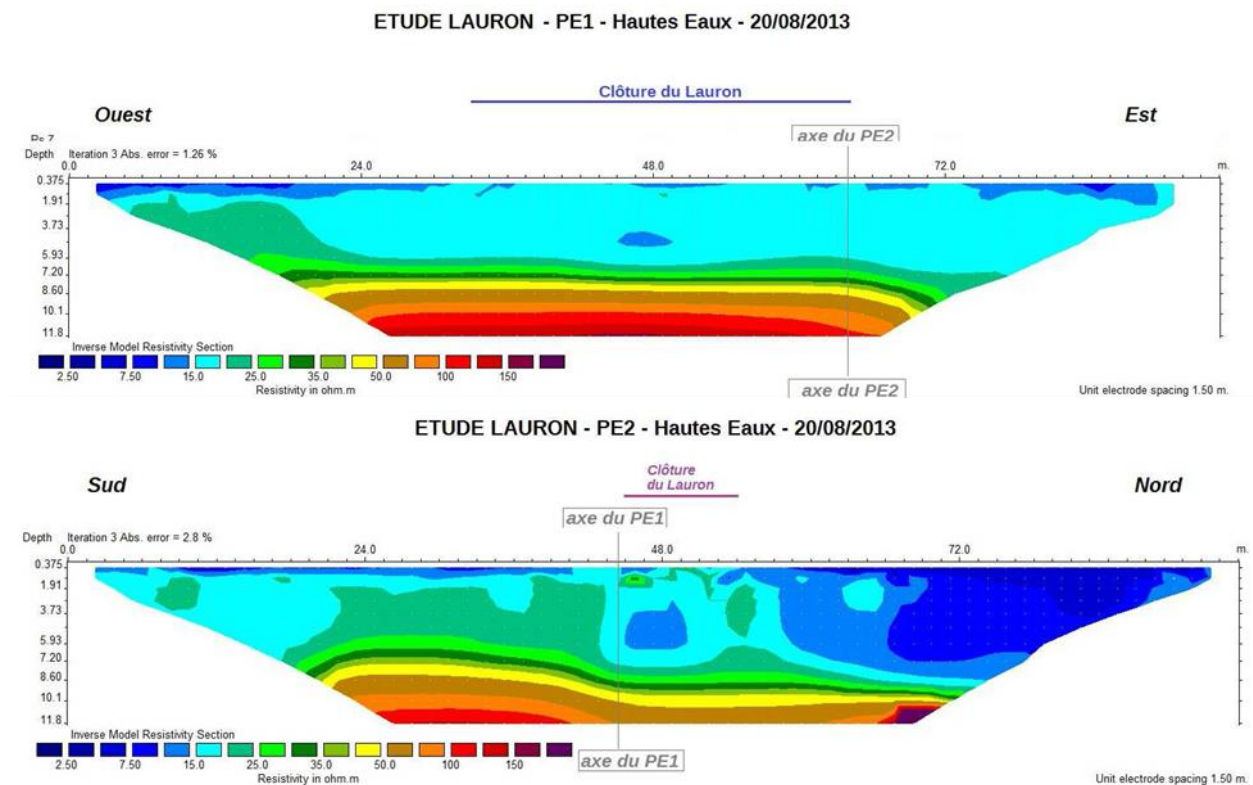


Figure 19 : Résultats de la tomographie électrique en période de hautes eaux (CEREMA)

La méthode de tomographie électrique montre la résistivité de différents matériaux grâce à un courant électrique qui les traversent. La résistivité est la capacité d'un matériau à ne pas faire passer le courant électrique. Elle varie beaucoup selon la teneur en eau du matériau (eau = augmente résistivité) et de la concentration en ions de cette eau (eau chargée = diminue résistivité) que de la nature du matériau.

Sur les profils, la zone entre 0 et 6 m est peu résistive, elle peut correspondre à l'horizon tourbeux riche en particules fines. A partir de 6 m, la résistivité augmente jusqu'à 150 ohm.m, cette zone décrit potentiellement la présence des cailloutis de la Crau où l'eau de la nappe circule. L'augmentation de résistivité au Sud du lauron, par rapport à ces alentours, peut montrer une circulation d'eau plus importante à cet endroit et peut correspondre à l'emplacement d'un futur lauron. Cette méthode corrobore les résultats du carottage, cependant elle pourrait apporter plus de précision sur les circulations d'eau autour d'un lauron, par rapport à la méthode du carottage qui ne peut pas fournir cette information.

CHAPITRE 3 : Investigation géochimique

Afin de caractériser au mieux les apports en eau de surface et en eau souterraine dans les marais, ainsi que leurs mélanges, des investigations géochimiques ont été réalisées. Elles s'articulent autour de trois méthodes : la chimie des ions majeurs, les isotopes stables de l'eau et les activités du radon dans l'eau.

Dans ce chapitre ces trois méthodes sont détaillées et leurs résultats présentés.

3.1 Méthodes

a) La physico-chimie

L'investigation physico-chimique a été utilisée afin de : caractériser la chimie des eaux souterraines et des eaux de surface ; de déterminer quels sont les ions marquants de chaque eau et ainsi essayer de calculer un mélange des eaux. Cette investigation a aussi permis de mettre en avant les phénomènes de drainage de la nappe par les canaux.

Protocole d'échantillonnage et pas de temps de mesure

Pour le prélèvement des eaux de surface, c'est-à-dire dans les canaux, l'accès aux abords des canaux était assez simple et ne nécessitait pas de pompe pour prélever les eaux. Les prélèvements ont été faits dans des flaconnages en plastique ou en verre, rincés trois fois puis fermés hermétiquement par un double bouchon. L'échantillon ne doit pas contenir de bulles afin d'éviter tout échange chimique avec l'air et doit être conservé au frais. Un prélèvement mensuel a été réalisé jusqu'à juillet pour pouvoir lancer les analyses par la suite, voir le *tableau 8* ci-dessus. Malheureusement, certains échantillonnages ont été perdus (bouteille cassée), d'où l'absence de données sur certains mois. Ce pas de temps a été choisi afin d'observer les variations chimiques de l'eau au cours du temps et ainsi, voir des éventuels changements au cours de la période d'irrigation.

Le prélèvement des eaux souterraines au niveau des sources, les laurons, était assez simple également et pouvait se faire sans pompe. La méthode de prélèvement était la même que celle énoncée précédemment. Seul, pour le prélèvement du puits SNCF1 il a fallu utiliser une pompe. Lorsqu'un prélèvement se fait dans un puits ou dans un forage il faut au préalable prélever trois fois son volume d'eau afin de renouveler l'eau contenue dans le puits et pour éviter de prélever de l'eau qui serait non représentative de la nappe car potentiellement stagnante. Le pas de temps de mesure était également mensuel à partir de mai jusqu'au mois de juillet.

Le *tableau 8* récapitule les noms des échantillonnages, les périodes de campagne de prélèvement ainsi que le lieu du prélèvement qui complète la carte montrant leur localisation (*figure 20*).

Tableau 8 : Tableau récapitulatif des dates et lieux de prélèvement pour les paramètres physico-chimiques

NOM	Campagne 1	Campagne 2	Campagne 3	Campagne 4
	du 25/02 au 14/03	du 18/05 au 19/05	du 06/06 au 21/06	le 04/07
Canal du Chalavert	CC1	CC2	P14 (CC3)	CC4
Roubine de la Chapelette		RC2	P13 (RC3)	RC4
Lauron TRAZIC		LT2	P16 (LT3)	LT4
Puits SNCF1		SNCF1	SNCF1b	
Lauron ONDE	L02		L03	
Lauron ALEXANDRE			LAL	
Canal du Chalavert aval			P12 (CCav)	
Roubine de la Chapelette aval			P11 (RCav)	

Choix des points de mesures et localisation

Les prélèvements dans les laurons ont été effectués uniquement dans les laurons drainés. Ceux-ci ont en effet, un débit assez important pour renouveler l'eau présente, ce qui évite le prélèvement d'eau stagnante.

Le prélèvement dans le puits SNCF permet la comparaison entre les eaux souterraines de la nappe de la Crau et les eaux souterraines au niveau des laurons.

L'eau dans les canaux a été prélevé en amont des marais afin d'évaluer les mélanges entre les eaux de surface et les eaux souterraines qui arrivent dans les marais. L'échantillonnage provenant du canal Les Aubes (« CLesAubes »), localisé au niveau de salon de Provence, permet de créer un "pôle" qui représente les eaux d'irrigation. Ce pôle nous permettra de mieux comparer les eaux entre elles.

Méthode analytique

La chimie des eaux, cations et anions majeurs, a été analysée par le laboratoire Chrono-environnement de l'Université Bourgogne Franche-Comté. Pour traiter les données il a été utilisé le logiciel Diagramme. Le diagramme de Piper a permis de déterminer les faciès des eaux alors que les graphiques binaires ont servis pour analyser l'origine des eaux. Par la suite, une analyse statistique des données, l'analyse en composante principale, a été réalisée. Cette analyse met en avant les corrélations entre les variables chimiques et les points de mesure.

b) Les traceurs environnementaux : isotopes stables de l'eau et radon 222

L'analyse des isotopes stables de l'eau permet de différencier les origines des eaux (eaux de surface, eaux souterraines jeune ou ancienne) et de détecter les processus influençant la composition isotopique de l'eau (évaporation, mélange). L'intérêt ici a été de caractériser en un point, le mélange eau de surface et eau souterraine de façon plus précise que la méthode physico-chimique et de voir les variations au cours de l'été. Le radon 222 a été utilisé afin d'observer à un temps donné les arrivées d'eau souterraine sur différents points. A partir de cela, il est possible de quantifier le flux de radon, qui caractérise les eaux souterraines, sur un point.

Protocole d'échantillonnage et pas de temps de mesure

Pour le prélèvement des isotopes stables de l'eau, le protocole était le même que pour la physico-chimie, excepté le flaconnage qui était en verre opaque. Le nombre de flaconnage étant limité lors de l'étude, 25 prélèvements ont pu être réalisés. Il y a eu un prélèvement par point de mesure.

La méthode d'échantillonnage pour les radons est différente de celles énoncées précédemment. En effet, comme le radon est un gaz il faut prendre en compte certaines précautions. Ce gaz radioactif, d'origine naturelle présente un temps de demi-vie court de 3,824 jours (MAYER et al., 2016) et est soumis au dégazage, ce qui diminue aussi son temps de demi-vie. Le prélèvement se fait à l'aide

d'une pompe à eau et représente un volume de 2,5 L. Pour l'étude, les prélèvements ont été réalisés en sub-surface, à environ 30 cm de la surface. Lors de la manipulation le remplissage de la bouteille d'échantillonnage doit se faire jusqu'à renouveler 2 fois le volume de la bouteille. En retirant l'embout de la pompe de la bouteille, tous remous doivent être évités afin de ne pas provoquer le phénomène de dégazage qui risque de fausser la donnée.

La mesure du radon s'est faite sur une campagne de prélèvement de deux jours : le 21 et 22 juin 2016.

Choix des points de mesures et localisation

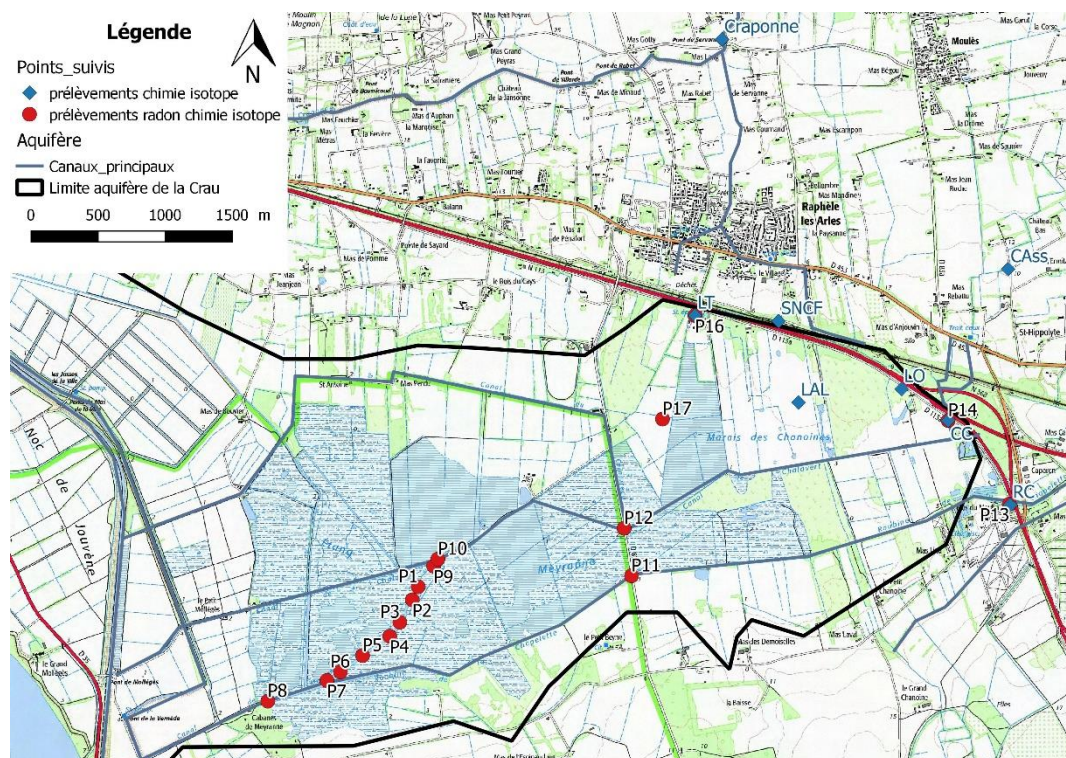


Figure 20 : Carte de localisation des différents points de mesures géochimiques

La figure 20 localise les différents points de prélèvements pour les isotopes et les radons.

Le choix des points de mesure des isotopes était dépendant de ceux de la chimie, car il a été voulu de réaliser une comparaison entre les données. Les prélèvements isotopiques ont aussi été en cohérence avec la campagne au radon par souci de comparaison des données.

La mesure des radons a été utilisée afin de déterminer l'apport en eau souterraine dans les marais. Ces mesures ont été réalisées dans les canaux en amont des marais, au milieu et à la fin de ces derniers. Ce sont les points marqués d'un P sur la carte (figure 20). Les prélèvements dans les laurons ont permis de caractériser l'activité en radon des eaux souterraines issues de la nappe de la Crau. Alors que ceux dans les canaux mettent en avant le drainage de la nappe par les canaux. Dans le but de comprendre les apports en eaux souterraines par drainance dans les marais, une campagne de mesure au radon a été mise en place sur l'ancien canal du Chalavert qui alimente les marais Est de Meyranne. La localisation des points de mesures a été choisie sur la base d'un témoignage.

Méthode analytique

Les isotopes stables de l'eau ont été analysés par le laboratoire du Centre d'Hydrogéologie et de Géothermie de la Faculté des sciences de l'Université de Neuchâtel. Au moment de la rédaction de ce rapport les échantillons sont toujours en attente d'analyse.

L'activité du radon a été mesurée au laboratoire d'hydrogéologie de l'Université d'Avignon. La méthode d'analyse est la même que celle utilisée dans l'étude sur les eaux souterraines côtières et les eaux de surface dans les marais du Vigueirat (MAYER et al., 2016). L'analyse a été réalisée le lendemain et le surlendemain de l'échantillonnage au vu de l'activité du radon qui varie rapidement au cours du temps.

3.2 Résultats

a) La physico-chimie

Diagramme de Piper

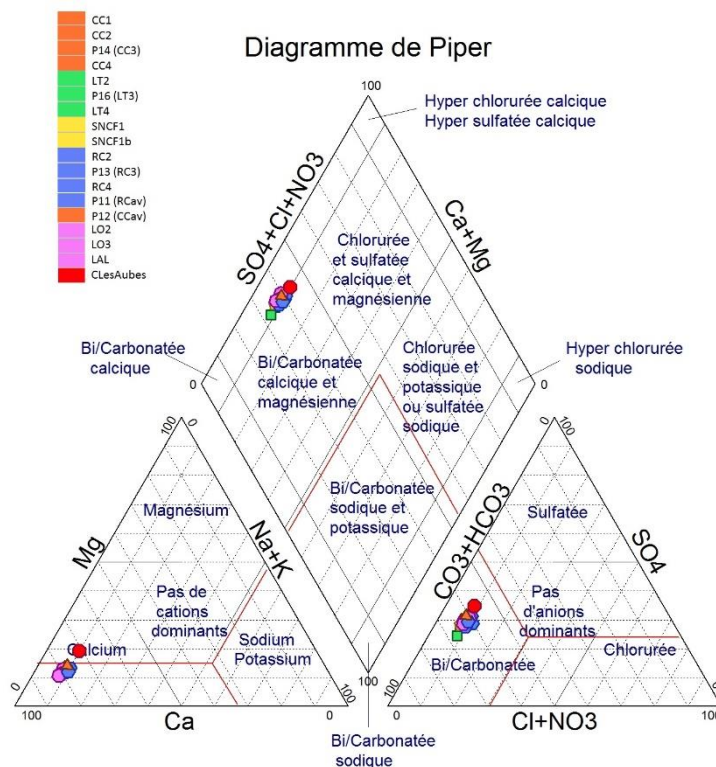


Figure 21 : Diagramme de Piper

Le diagramme de Piper, en *figure 21*, permet de différencier les faciès d'eau rencontrés sur cette étude. Il montre que les eaux prélevées forment un seul et même groupe d'origine chimique. Il s'agit du faciès bicarbonaté calcique. Le *tableau 9* suivant définit les ions majeurs qui caractérisent le faciès bicarbonaté calcique rencontré dans cette étude.

Tableau 9 : Caractéristiques chimiques du faciès bicarbonaté calcique

	TDS mg/L	HCO ₃ mg/L	Ca mg/L
Bicarbonaté calcique	386<TDS<655	181<HCO3<329	73<Ca<135

Concernant la qualité de l'eau, l'eau est de plutôt bonne qualité par rapport aux normes de potabilité. Il n'y a que la concentration en sulfate qui est supérieure aux normes : 100 mg/L (annexe 4) pour 50 mg/L (norme).

Graphiques binaires

La réalisation de graphiques binaires (*figure 22 et 23*) permet de mettre en avant les origines lithologiques des eaux. Lorsqu'un groupe de points se rassemble sur le graphique cela signifie qu'ils ont plus ou moins la même origine.

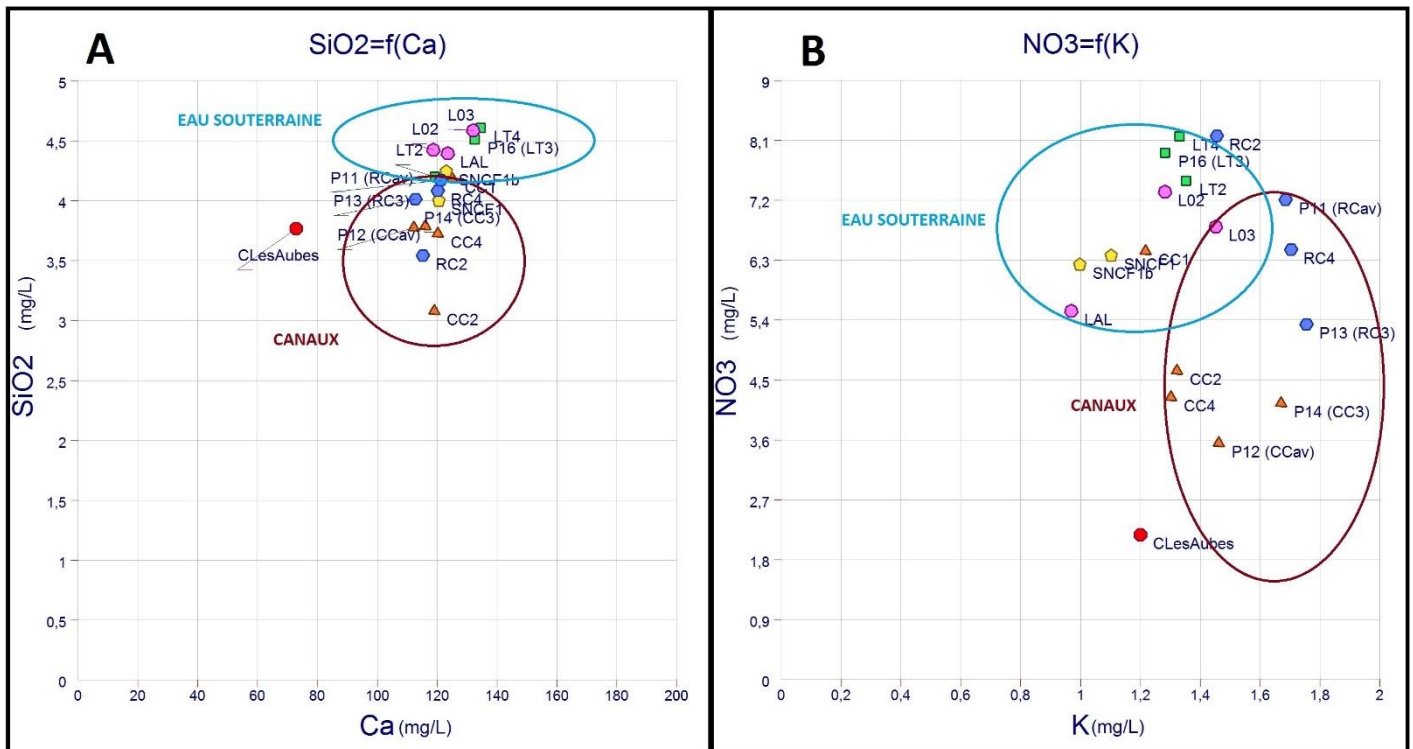


Figure 22 : Graphiques binaires A et B

Le **graphique A** (SiO_2/Ca) de la *figure 22* met en avant trois groupes que l'on peut distinguer comme suit :

- Les eaux souterraines : avec les eaux des laurons et les eaux du puits. Elles sont riches en calcium et un peu plus riches en silice que le second groupe. Cela peut être dû à l'altération des cailloutis d'origine siliceuse de la nappe de la Crau.
- Les eaux du canal les Aubes : elles sont exclues des deux autres groupes mais en étant quand même proche du groupe des canaux. Elles caractérisent les eaux d'irrigation qui proviennent de la Durance.
- Les eaux des canaux : Roubine de la Chapelette et canal du Chalavert. Comme ces eaux sont entre les deux groupes précédents, on peut en déduire que le groupe canaux est un mélange entre le canal les Aubes et les eaux souterraines.

Les points CC1 (canal du Chalavert de février) et P11 (Roubine de la Chapelette aval de juin) sont à la limite entre les deux groupes. Cela peut être dû à des arrivées d'eau souterraines dans ces canaux.

Le **graphique B** (NO_3/K) de la *figure 22* permet de voir la relation qui lie les nitrates et le potassium, en effet, en traçant une droite de tendance des points, on observe que lorsque la concentration en nitrate augmente, celle du potassium augmente aussi. Cela pourrait être potentiellement dû à un apport de nitrate de potassium (KNO_3) qui est un engrais potentiellement utilisé sur les zones agricoles de la plaine de la Crau.

On peut également distinguer deux groupes :

- Les eaux souterraines qui sont marquées par une concentration en NO_3 globalement supérieure au second groupe. Les variations au cours des mois ne sont pas significatives. La concentration en nitrates augmente au cours du temps pour les points LT (lauron à l'Ouest des marais), alors qu'elle diminue pour les points LO (lauron à l'Est des marais). Et inversement pour la concentration en potassium.

- Les eaux des canaux sont caractérisées par une concentration plus importante en potassium que le groupe précédent. De même que précédemment, les variations mensuelles des points ne sont pas significatives. Sauf pour les campagnes sur le canal du Chalavert où l'on observe une augmentation de la concentration en K entre CC1 et CC2 puis une stabilisation de la concentration pour les points CC3 et CC4.

Les points CC1 (canal du Chalavert de février) et RC2 (Roubine de la Chapelette de mai) font partis du groupe eau souterraine. Cela peut être dû à des arrivées d'eau souterraines dans ces canaux.

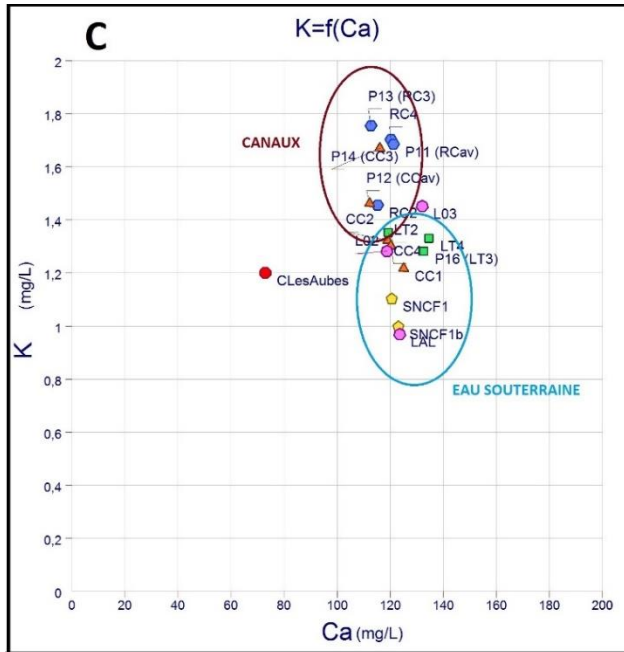
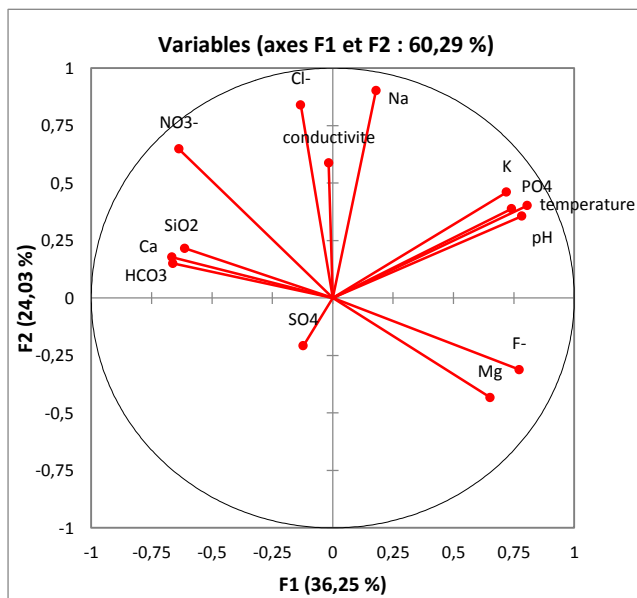


Figure 23 : Graphique binaire C

Le **graphique C** (K/Ca) de la *figure 25* permet de distinguer deux groupes :

- Les eaux des canaux qui sont caractérisées par une teneur importante en K.
- Les eaux souterraines qui sont moins marquées par la présence de K et présente une concentration un plus peu élevée en Ca.

Les points CC1 (canal du Chalavert de février) et CC4 (canal du Chalavert de juillet) font partis du groupe eau souterraine. Cela peut être dû à des arrivées d'eau souterraines dans ces canaux.



Analyse en composante principale

L'analyse en composante principale permet de visualiser les interactions eaux de surface-eaux souterraines à partir des variables chimiques. Le diagramme ci-contre (*figure 25*) montre les corrélations et les anti-corrélations entre ces paramètres chimiques. Par exemple, ici nous voyons que le Mg est anti-corrélé au SiO₂, alors que le K et le PO₄ sont plutôt bien corrélés entre eux. Les ions NO₃, SiO₂, Ca et HCO₃ sont anti-corrélés aux ions Mg, PO₄, F et K. Les premiers marquent une eau plutôt souterraine comme précédemment (voir graphiques binaires) alors que les seconds marquent des eaux plutôt de surface.

Figure 24 : Diagramme (ACP) des variables chimiques

Sur le graphique ci-dessous (*Figure 26*), les droites des ions prédominants (NO_3 et K) des deux groupes d'eaux distingués précédemment ont été tracées. Les points qui suivent l'alignement de la droite correspondent à des eaux de mélange entre les pôles d'eau positionnés aux extrémités de chaque droite. Sur la droite de l'anion NO_3 , les points CC2 et CC1 sont des eaux de mélange entre l'eau du lauron TRAZIC (eau souterraine) et les eaux du canal du Chalavert. Sur la droite du cation K, les points RC2 et P11 (RCav) sont des eaux de mélange entre l'eau du puits SNCF1 (eau souterraine) et l'eau de la roubine de la Chapelette (eau de surface). En soit, nous avons la relation suivante : plus les points sont proches d'un pôle, plus ces eaux sont composées d'un fort pourcentage des eaux de ce pôle.

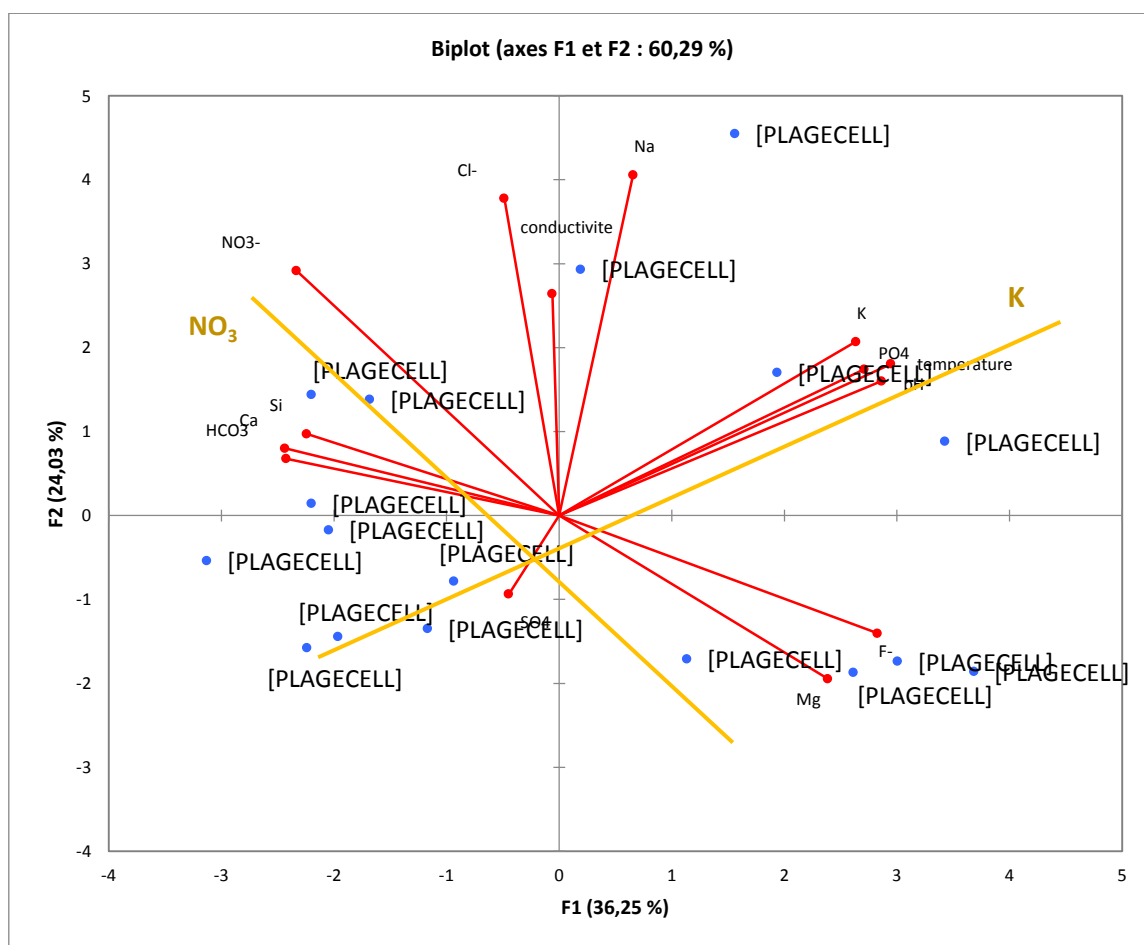


Figure 25 : Graphique Biplot (ACP)

Grâce à cette relation observée, nous avons pu calculer le taux de mélange de tous les prélèvements se situant sur les droites avec la formule suivante :

$$x = \frac{[NO3]_{CC1} - [NO3]_{CCmoy}}{[NO3]_{LTmoy} - [NO3]_{CCmoy}}$$

Les résultats sont présentés dans le *Tableau 10* ci-contre :

Tableau 10 : Résultats des calculs des eaux de mélange

[NO ₃]		[K]	
CC3/4 moy	4,20	RC3/4 moy	1,73
LT3/4 moy	8,04	SNCF1 moy	1,05
CC1	6,44	RC2	1,45
CC2	4,63	P11 (RCav)	1,69
	Mélange (% de CC)		Mélange (% de RC)
	42		59
	89		94

Le canal du Chalavert CC1 (prélevé en mars 2016) constitue un mélange de 42% des eaux du canal du Chalavert et de 58 % des eaux du lauron TRAZIC (eaux souterraines). Pour la roubine de la Chapelette RC2 (prélevé en mai 2016), 59 % de ces eaux viennent de la roubine de la Chapelette et 41 % des eaux ont pour origine l'eau du puits SNCF1 (eaux souterraines). Ces pourcentages sont des valeurs relatives car il a été considéré que la moyenne de la concentration en NO₃ des points CC3 et CC4 correspond à 100 % des eaux du canal du Chalavert. Alors qu'il est possible que les points CC3 et CC4 du canal du Chalavert constitue une part de mélange avec les eaux souterraines, cette part de mélange étant inconnue, il a été fait l'hypothèse qu'elle était nulle. Les analyses isotopiques pourraient apporter ce pourcentage manquant à l'équation.

b) Le radon 222

Pendant la période d'échantillonnage le système était sous un régime de hautes eaux. Au Nord des marais de Raphèle, le niveau de la nappe de la Crau se situait entre 15 et 20 m de profondeur NGF, au Sud des marais, les piézomètres indiquaient une profondeur entre 1 et 6 m NGF. Les précipitations du mois de juin ont été assez faibles, elles ont apporté 19,5 mm de pluies sur tout le mois et elles ont été nulles les jours d'échantillonnage. Les débits de la Chapelette et du Chalavert du 14 juin ont été respectivement de 1029 L/s et de 312 L/s, leur vitesse d'écoulement associée étant d'environ 1 m/s et 0,2 m/s. Le vent n'a presque pas été présent le jour de l'échantillonnage : 6,5 m/s à la station de Fourques. Au niveau des marais de Meyranne, toutes les martelières avaient été fermées depuis le 20 juin 2016.

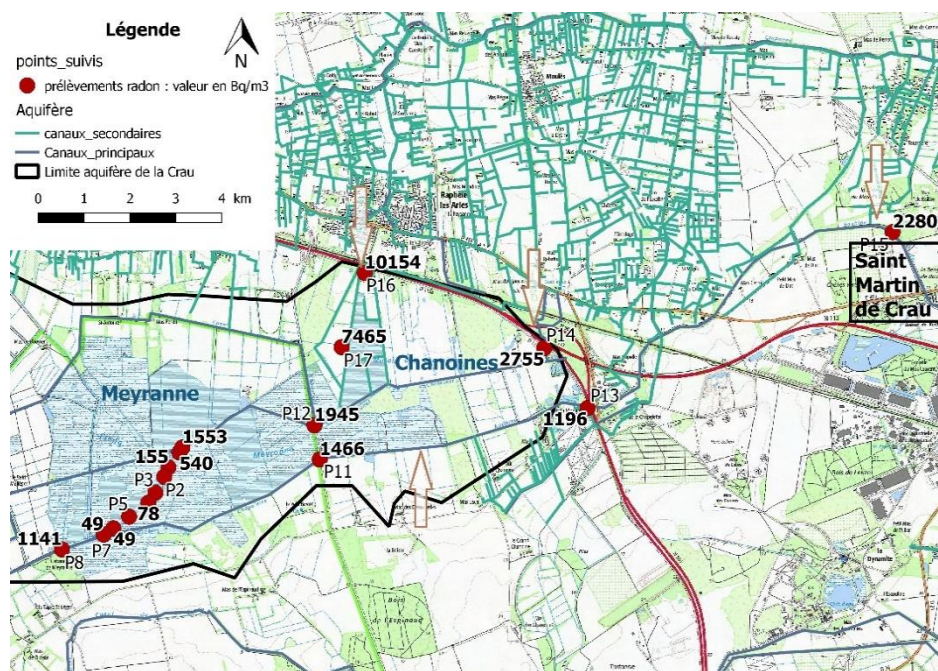


Figure 26 : Carte de localisation des points de prélèvements du radon et les valeurs associées

La figure 27 montre les résultats de l'activité du radon 222 selon la localisation des points de mesure. Les flèches indiquent les zones d'arrivées de flux de radon et donc d'eau souterraine. Les prélèvements dans les laurons sont marqués par une forte activité du radon : 7 465 et 10 154 Bq/m³. Ces résultats sont cohérents avec les valeurs typiques de radon à l'équilibre dans l'aquifère des cailloutis de la Crau qui sont de 10 000 Bq/m³ (MAYER et al, 2016). Les résultats bruts sont annexés dans l'annexe 3, figure 33.

Le canal du Chalavert présente une activité significative de radon. Son activité diminue de l'amont vers l'aval. La valeur la plus haute étant en amont du canal il est probable que celui-ci récupère des eaux de la nappe qui ont subi en partie la décroissance radioactive et le phénomène de dégazage. Entre les points P14 et P12, l'activité diminue alors que, à partir du fonctionnement hydrologique des marais, on sait que les laurons des marais des Chanoines sont drainés et que ces eaux se retrouvent ensuite dans le canal du Chalavert, ce qui devrait provoquer une augmentation de l'activité du radon. Deux hypothèses peuvent expliquer la différence entre la concentration attendue et celle observée : un dégazage significatif du radon dans les eaux drainées du lauron avant d'atteindre le canal et ou une dilution trop importante des radons dans les eaux du canal, ce qui fait que l'augmentation n'est pas observée. Une combinaison des deux phénomènes est aussi probable.

Un taux de dégazage standard du radon vers l'atmosphère peut être estimé (cf annexe 3, figure 35). L'activité initiale de 2755 Bq/m³ (en P14), nous donne une valeur du flux de désintégration radioactive de 21 Bq/m²/heure (en estimant une hauteur d'eau moyenne de 1 m dans le canal). La perte due au dégazage peut se calculer entre 161 et 185 Bq/m²/h selon les modèles respectivement de MacIntyre (1995) et Cockenpot et al (2015), en estimant une vitesse du vent de 20 km/h et une température de l'eau de 20°C ainsi qu'une salinité de 1 psu.

A partir de ces hypothèses posées, le flux d'eau souterrain peut être calculé. L'eau de la Chapelette transite dans le secteur P14-P12 en environ 4 heures, la perte d'activité calculée devrait être entre 744 et 842 Bq/m³. On observe une différence d'activité de 810 Bq/m³ entre P14 et P12. Cette valeur observée est proche de la valeur calculée. Cela confirmerait dans le secteur P14-P12 qu'il n'y a pas d'arrivée d'eau de nappe à travers le fond du canal. Le phénomène de dilution avec les eaux de surface n'est tout de même pas à exclure.

La roubine de la Chapelette a aussi une activité significative de radon. En amont de la roubine, au niveau de Saint Martin de Crau, l'activité du radon est la plus importante. Comme précédemment il est possible que ce canal draine les eaux souterraines un peu plus en amont. Ce résultat est cohérent avec l'origine de la Chapelette qui prend naissance au niveau de résurgences de la nappe. A l'amont des marais, son activité diminue jusqu'à la fin des marais de Meyranne, sûrement par l'action du dégazage. Néanmoins, entre les points P13 et P11, l'activité du radon augmente, cela signifie qu'il y a des apports d'eau souterraines entre ces deux points par drainage de la nappe. L'apport semble faible d'après la différence d'activité mais la décroissance radioactive du radon et le dégazage ont pu entraîner une diminution de l'activité de l'eau de nappe.

Si on estime que la perte de radon vers l'atmosphère et que la perte due à la désintégration radioactive suivent la même allure de l'amont vers l'aval du canal, on peut estimer les flux de radon dus à l'apport d'eau souterraine. Cet apport représente dans le secteur environ 750 Bq/m³ en moins de 2 km entre P11 et P13 (cf annexe 3, figure 34).

Comme précédemment, on peut calculer la variation d'activité de radon en considérant la désintégration radioactive et le dégazage pendant le transit de l'eau entre les points P11 et P13 (cf

annexe 3, *figure 35*). Entre ces points, la perte de radon par radioactivité devrait être de 9,1 Bq/m³/heure. La perte par dégazage devrait être entre 70 et 80 Bq/m³/heure. Comme le temps de transit de l'eau est de 1h entre ces deux points, l'activité finale devrait être entre 1105 et 1116 Bq/m³. L'apport en eau souterraine dans les canaux contribue donc à environ 350 Bq/m³. L'apport d'eau de nappe calculée ci-contre est probablement sous-estimé, à cause d'autres facteurs qui peuvent diminuer le signal du radon, notamment la dilution avec les eaux de surface dépourvues en radon.

L'augmentation de l'activité du radon peut être quantifiée en flux grâce à l'activité type des eaux souterraines (10 000 Bq/m³). Entre P11 et P13 l'activité varie entre 350 et 750 Bq/m³ en 1 heure. Cela correspondrait à un apport d'eau de nappe ayant une vitesse verticale de l'eau de 35-75 mm/heure, c'est-à-dire de 35-75 litres/heure/m² de canal. Sur le parcours du canal (2 km, largeur de 3 m) l'augmentation du débit due aux arrivées d'eaux souterraines devrait être de l'ordre de **0,06 à 0,13** m³/s.

Les mesures faites dans le canal de Meyranne, les points P7 à P10, montrent une activité faible en radon. Ce canal reçoit les eaux du Chalavert au Nord, au niveau du point P10, le jour des prélèvements et depuis le 20 juin 2016, la martelière qui sépare le canal du Chalavert, de celui de Meyranne était fermée. Au sud, ce canal n'est pas lié avec la roubine de la Chapelette. Cette faible activité en radon est synonyme d'une eau stagnante qui est soumise de façon importante au dégazage. Les résidus d'activité peuvent être le résultat de la dissolution du radon présent dans les tourbes et les limons. La diminution du Nord au Sud est possiblement causée par « le reste » des arrivées d'eau du Chalavert présent dans le canal de Meyranne.

Les graphiques suivants (*figure 28*) représentent l'activité du radon en fonction de la conductivité. La majorité des points ont à peu près la même conductivité, comprise entre 696 et 779 µS/cm. Cependant les points prélevés dans l'ancien canal de Meyranne montrent une conductivité de plus en plus élevée depuis le Nord vers le Sud du canal alors que l'activité du radon diminue du Nord au Sud. Ce phénomène peut potentiellement s'expliquer par l'évaporation du canal qui rend l'eau plus minéralisée et en même temps provoque la désintégration du radon.

Toutefois, même si l'eau tend à augmenter la conductivité, la teneur en radon semble atteindre un plateau d'environ 49 Bq/m³. On peut donc estimer que cette valeur correspond à l'activité à l'état stationnaire, ce qui peut permettre de calculer le flux (faible) à travers le fond du canal de Meyranne.

En estimant une colonne d'eau de 1m, on obtient une perte de radon par désintégration de 0,4 Bq/m²/h et des flux atmosphériques qui varient entre 2,8 et 3,2 Bq/m²/h. Le flux de radon à travers le fond pour permettre la condition d'état stationnaire est donc entre 3 et 4 Bq/m²/h. En estimant toujours que l'eau de la nappe a une activité de 10 000 Bq/m³, la vitesse de l'eau de nappe pour soutenir la condition d'équilibre varie entre **0,3 et 0,4 mm/h**.

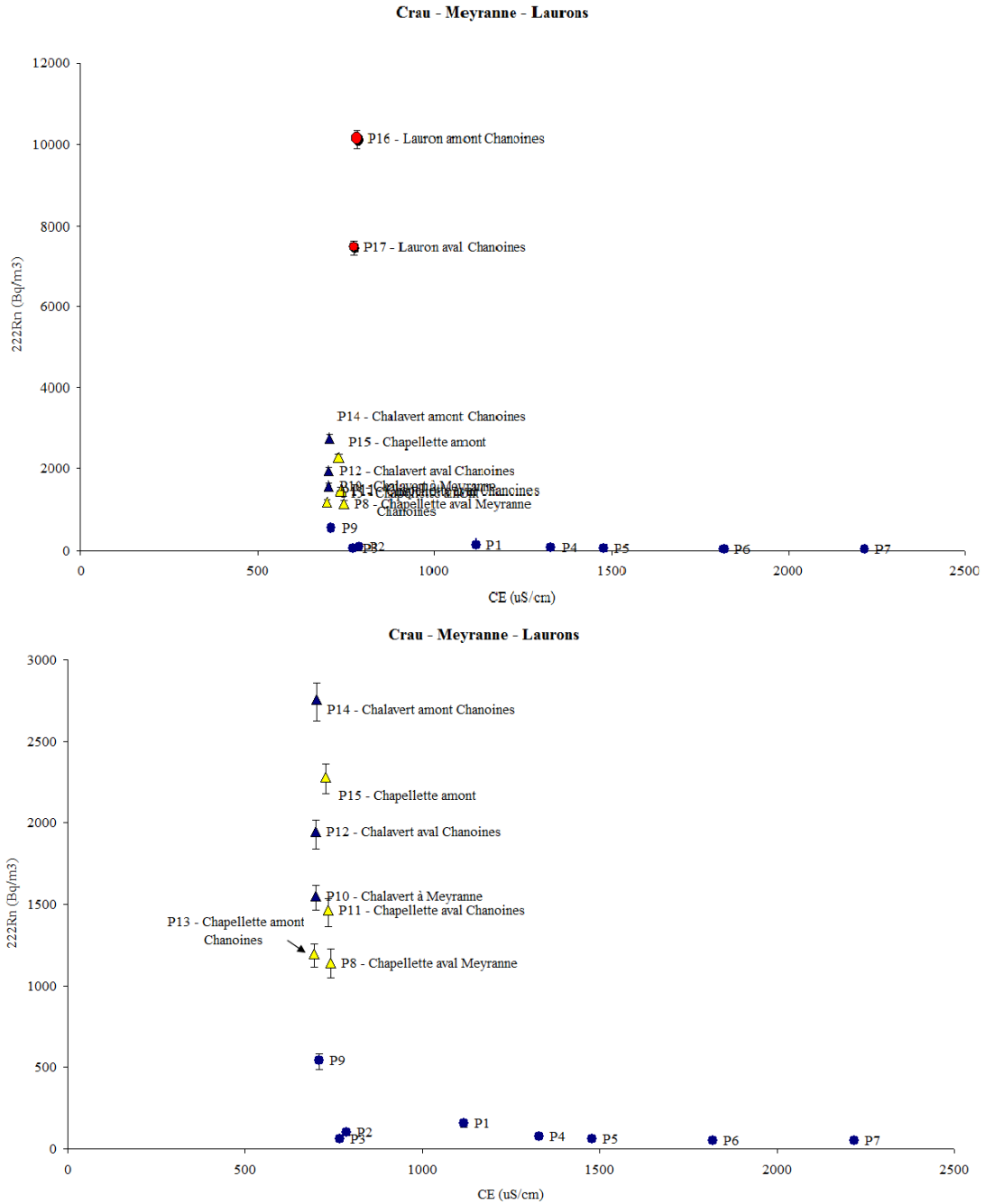


Figure 27 : Graphiques représentant l'activité du Radon 222 en fonction de la conductivité

Pour résumer les laurons présentent une forte activité en radon. Les canaux du Chalavert et de la Chapelette sont marqués par un flux de radon non nul ce qui peut signifier un drainage de la nappe par les canaux surtout en amont. Le long de la Chapelette, un apport en eau souterraine a pu être quantifié : il est de l'ordre de **0,06 à 0,13** m³/s. L'ancien canal de Meyranne est, quant à lui, marqué par une forte évaporation qui engendre une faible activité de radon dans ce canal et une augmentation de la conductivité.

CHAPITRE 4 : Compréhension du système

Plusieurs méthodes ont été utilisées lors de l'étude afin de caractériser au mieux le fonctionnement des résurgences de la Crau et leurs interactions avec les eaux de surface dans les marais de Raphèle.

Dans ce chapitre une synthèse de ces résultats ainsi qu'une critique des méthodes utilisées sont proposées. Une partie croisement des résultats est détaillée afin de mettre en avant les interactions entre les milieux, à savoir les eaux souterraines et les eaux de surface.

4.1 Synthèse des résultats et critique des méthodes

La méthode de jaugeage au sel a montré une augmentation des débits sur tous les points de mesures puis une stabilisation au cours de l'été. La cause identifiée de ces variations est le surplus des irrigations des prairies de foin récupéré par les canaux. En comparant les données issues de la Banque Hydro avec celles obtenues sur la roubine de la Chapelette, il a été observé que les valeurs de la Banque Hydro sont moins élevées que celles de la méthode du jaugeage au sel. Cependant, les valeurs obtenues suivent une même tendance. Ainsi, à titre comparatif, on peut conclure que la méthode de jaugeage au sel utilisée ici est fiable pour décrire les variations des débits.

Cette méthode, simple d'application, permet de voir l'évolution du débit au cours du temps, mais elle engendre une plus grande imprécision de mesure par rapport à une station de jaugeage, et ce n'est pas toujours la méthode la mieux adaptée selon la largeur et la vitesse d'écoulement du cours d'eau.

En effet, afin d'obtenir une bonne réception du signal, il est nécessaire d'injecter une quantité importante de NaCl dans les cours d'eau où la vitesse d'écoulement est élevée. Dans les cours d'eau où la vitesse d'écoulement est faible et/ou la largeur est grande, le signal d'injection est difficilement détectable car il subit une forte dilution dans la masse d'eau. Dans la présente étude, ces problèmes n'ont pas été rencontrés. Cette méthode est donc adaptée au terrain.

L'irrigation gravitaire des prairies de foin de Crau entraîne un régime particulier de la nappe avec des hautes eaux au printemps et en été. Les mesures piézométriques montrent en effet, une stabilité du niveau d'eau dans les marais au cours de l'été avec des hauteurs d'eau mesurées qui peuvent être considérées comme des hauteurs maximales. Les variations du niveau d'eau au sein des marais sont cohérentes avec les variations du niveau d'eau de la nappe de la Crau, comme le montre le graphique ci-dessous (figure 29) :

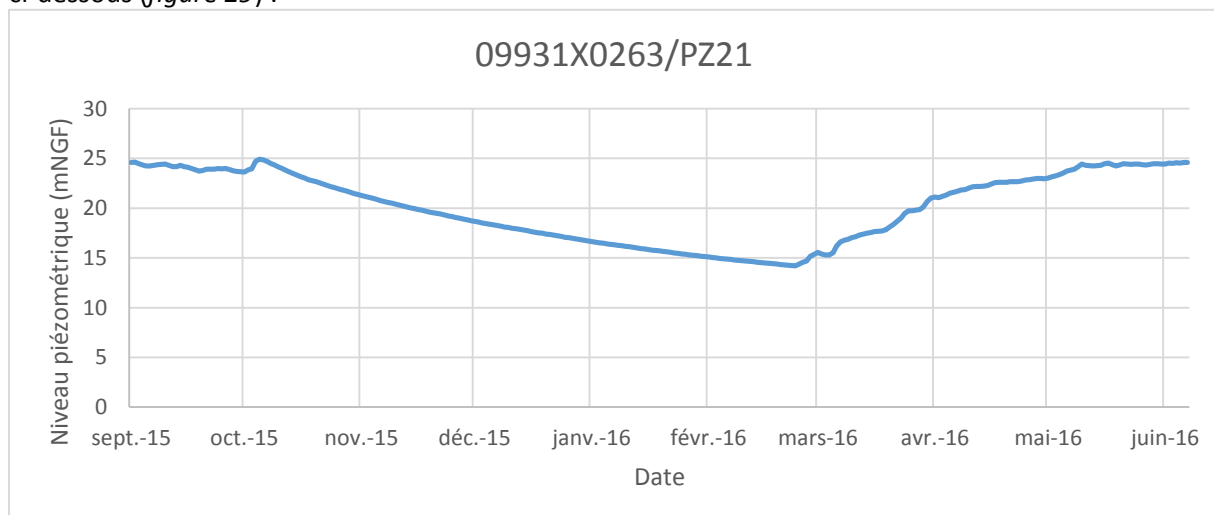


Figure 28 : Variation du niveau piézométrique dans la nappe de la Crau de septembre 2015 à juin 2016 (source : ADES)

Ce piézomètre est situé au Nord des marais de Raphèle, dans les cailloutis de la Crau. Il met en avant la période de hautes eaux qui débute en mai et qui se termine en octobre.

Par ailleurs, le battement de la nappe de la Crau est plus important au sein des cailloutis que dans les marais. Cette atténuation en bordure de la nappe libre montre d'une part l'absence de recharge saisonnière au-delà de cette limite et d'autre part suggère la présence d'une limite à charge constante qui viendrait drainer la nappe dans sa partie captive. Les travaux de Mayer et al. (2016) tendent à montrer que le canal d'Arles à Fos pourrait jouer ce rôle de drainage de la nappe et imposer une limite à charge constante au système aquifère.

Le suivi du niveau piézométrique dans les laurons montre une diminution des niveaux d'eau au cours de l'été. Cela s'explique par l'importante évapotranspiration. En juillet 2016 l'évapotranspiration potentielle représentait environ 200 mm ce qui correspond à la différence de niveau observée au niveau du lauron « LAL », au Nord-Est des marais, entre juin et juillet.

Ajouter de nouveaux points de mesures au Sud des marais, entre les deux canaux, apporterait une meilleure précision pour la réalisation de la carte piézométrique dans ce secteur. Cette carte (figure 16) montre globalement la circulation des eaux souterraines. L'écoulement se fait du Nord-Est vers le Sud-Ouest comme l'écoulement de la nappe de la Crau. Les courbes piézométriques ne montrent pas de relation directe avec les canaux alors que lorsqu'on compare le niveau du canal avec celui de la nappe, on peut remarquer que la nappe est drainée par les canaux. Cette absence apparente de relation est vraisemblablement causée par le manque de précision de la carte piézométrique dans cette zone.

La pédologie a permis de décrire les couches superficielles qui recouvrent les cailloutis de la Crau (figure 30). Elle a permis de mettre en évidence 3 faciès : la tourbe calcaire sur une épaisseur de 3 m, de l'argile grise issue de la minéralisation de la tourbe et de l'argile sableuse (jaune ocre avec concrétions et cailloutis) issue du lessivage des cailloutis par les eaux de la nappe. La présence de ces argiles sableuses montre que le flux souterrain est assez important pour transporter ces particules mais qu'il est moins au sein des laurons, permettant ainsi leur dépôt.

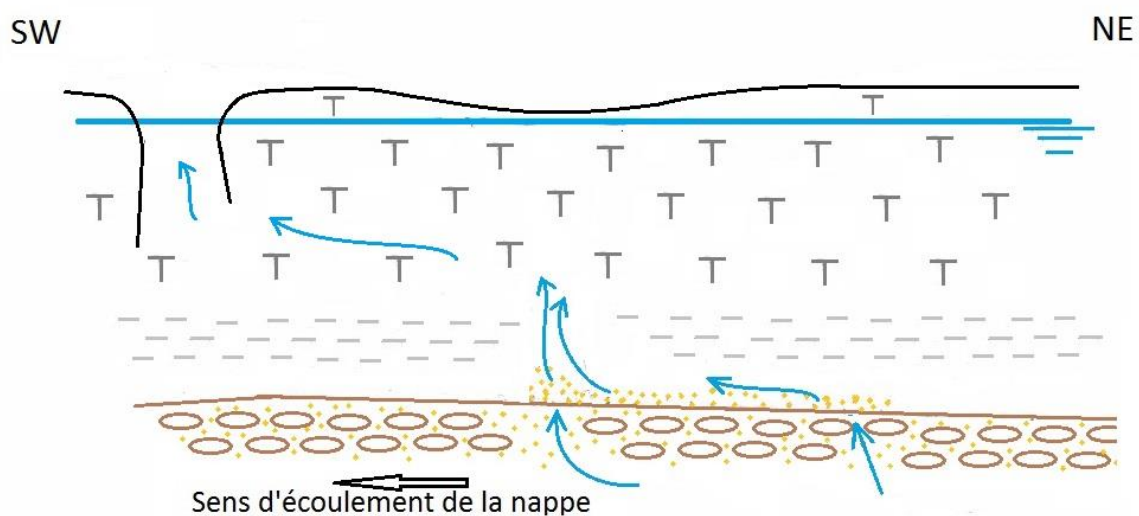


Figure 29 : Coupe au droit d'un lauron et schéma de circulation des eaux dans les cailloutis et la tourbe

Une superposition d'aquifère peut aussi être évoquée (figure 30) : un aquifère perméable dans les cailloutis et un semi-perméable dans la tourbe. Une hypothèse peut être avancée sur les interactions

entre les deux aquifères : la nappe, par les hétérogénéités des poudingues, sort du lit de cailloutis par pression hydrostatique et circule dans la tourbe, où une dépression en surface peut se former sans pour autant créer de laurion. La circulation des eaux dans la tourbe en direction du Sud-Ouest peut favoriser la formation d'un laurion qui ne serait pas au droit de la remontée de nappe.

D'après la chimie, les eaux des canaux et de la nappe ont été caractérisées par le faciès bicarbonaté-calcique. On distingue ainsi les eaux de surface, marquées par le potassium (K^+) et les eaux souterraines, marquées par le nitrate (NO_3^-). L'évolution de la chimie des eaux du Canal du Chalavert de mars à juillet, a mis en avant des résultats intéressants. Sur les graphiques comparatifs réalisés (graphique binaire et ACP), le point CC1 (Canal du Chalavert de mars) fait partie du groupe "eau souterraine". On peut en déduire qu'en mars le canal du Chalavert a été alimenté par les eaux souterraines. CC2 (mai), CC3 (juin) et CC4 (juillet) font quant à eux partie du groupe "eau de canal", ce qui nous laisse penser à une progression du groupe "eau souterraine" vers le groupe "eau de canal". Cela souligne la présence de mélange dans ce canal et la dilution des eaux souterraines, au cours de temps par les eaux de surface. Pour le prélèvement de mars 58% des eaux sont d'origine souterraine alors que pour le mois de mai, ces eaux ne représentent que 11%.

Les résultats du radon ont permis de caractériser les eaux souterraines avec une activité de radon aux alentours de $10\,000\text{ Bq/m}^3$. Ces valeurs sont comparables à l'étude réalisée par A. MAYER (MAYER et al., 2016). Cette méthode du radon a aussi permis de révéler la dynamique de drainage de la nappe par les canaux au mois de juin. Même si la dilution des eaux souterraines avec les eaux de surface, issues de l'irrigation, et le phénomène de dégazage diminue l'activité mesurée dans les canaux, l'activité du radon mesurée (entre $1\,500$ et $2\,500\text{ Bq/m}^3$) est caractéristique d'un apport en eau souterraine. Cependant, l'activité observée dans les canaux est peut être aussi partiellement due au fond limoneux et caillouteux des canaux. En effet, la circulation des eaux dans les limons et les cailloutis peuvent augmenter l'activité du radon par la dissolution de celui-ci présent dans le fond du canal. Ces valeurs sont néanmoins négligeables par rapport aux apports d'eau souterraine. On peut estimer que l'activité du radon, provoquée par la circulation d'eau dans le fond d'un canal, vaut environ 100 Bq/m^3 , comme dans l'ancien canal de Meyranne où l'apport en eau souterraine n'a pas été démontré.

Les essais de quantification des flux de dégazage du radon vers l'atmosphère et des flux d'eau souterraine dans les canaux ont mis en avant l'importance du processus de dégazage vis-à-vis de l'activité en radon mesurée. Cependant, dans la roubine de la Chapelette, au niveau des marais de Meyranne, les arrivées d'eau de nappe ont pu être quantifiées : elles représentent un flux variant entre $0,06$ et $0,13\text{ m}^3/\text{s}$. Ces calculs de flux ne constituent qu'un ordre de grandeur des flux d'eau souterraine drainés par les canaux car il est considéré, pour simplifier le calcul, que le flux est constant au cours du temps, alors que l'activité du radon varie le long des canaux. Le flux devrait donc être évalué en prenant compte les variations d'activités en continu et dans le temps. Les résultats de cette étude (annexe 3) constituent un premier aperçu des variations de l'activité du radon dans les marais de Raphèle. Ils peuvent être précisés mais ils fournissent déjà l'allure générale des variations de radon. Cette méthode peut donc être à nouveau utilisée à des fins comparatives.

4.2 Croisement des résultats

L'ensemble des résultats obtenus met en avant la complexité des interactions entre les eaux souterraines, les eaux de surface et les milieux. Ils permettent cependant d'établir un premier diagnostic sur la dépendance des milieux humides aux eaux de la nappe.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Ainsi, les marais de Raphèle sont soumis à des échanges hydrodynamiques entre les eaux de surface et les eaux souterraines.

La chimie a montré que l'eau de la nappe et l'eau des canaux sont caractérisées par le même faciès d'eau bicarbonaté calcique. Ce sont les ions mineurs qui différencient les eaux : le potassium (K^+) caractérise les eaux des canaux et les nitrates (NO_3^-) celles de la nappe. Même si les eaux de la nappe sont marquées par les nitrates, la concentration reste inférieure aux normes de potabilité (<25mg/L). Les eaux de la nappe sont d'ailleurs de plutôt bonne qualité, hormis la présence de sulfate à une concentration d'environ 100 mg/L (norme <50 mg/L).

L'analyse en composante principale a montré un mélange dans les canaux entre les eaux de surface et les eaux souterraines. Cela souligne le drainage de la nappe par les canaux. En mars, les canaux sont en eau grâce à 58% d'eau souterraine alors qu'en mai, les eaux souterraines ne représentent que 11%. Cette diminution s'explique par l'influence des eaux du surplus d'irrigation qui commencent à circuler dans le canal dès la fin mars, ce qui provoque une dilution des eaux souterraines dans les eaux de surface.

Ce résultat est confirmé par la méthode du radon. En effet, les résultats du radon ont montré une activité représentative d'arrivées d'eau souterraine dans les canaux. Cette méthode a aussi permis de quantifier les flux d'eaux souterraines drainées par les canaux. Pour la roubine de la Chapelette cela représente un débit de 0,06 à 0,13 m³/s.

Les analyses des isotopes stables de l'eau étant en cours d'analyse lors de la rédaction du rapport, ils n'ont pas pu être interprétés. Toutefois, elles permettront dans un avenir proche d'apporter des connaissances sur le mélange des eaux ainsi que sur le temps de résidence des eaux dans l'aquifère.

Le suivi piézométrique réalisé sur la période printemps-été a montré une stabilité du niveau de la nappe dans les marais. Cette stabilité pourrait être due au drainage de la nappe par les canaux, conduisant à un équilibre des charges hydrauliques. Les niveaux d'eau relevés lors de l'étude représentent les niveaux d'eau actuels au sein des marais. Ainsi ils constituent une base comparative pour les études futures sur la détermination des niveaux d'eau nécessaires au maintien des marais.

Par conséquent, il serait nécessaire pour la suite de l'étude de continuer les suivis piézométriques et physico-chimiques sur au moins une année hydrologique complète. De plus, afin de préciser les mesures obtenues, il est souhaitable de réaliser à l'avenir une interprétation isotopique des résultats. L'observation des changements des variables au cours du temps, peut nous renseigner sur des niveaux d'eau qui peuvent être critiques et/ou favorables au maintien des milieux humides.

En conclusion, l'étude des interactions eaux de surface – eaux souterraines dans les zones humides peut s'avérer être un exercice délicat pour plusieurs raisons. D'une part ces zones humides ne bénéficient généralement pas d'un suivi sur le long terme des variables hydrologiques ce qui rend complexe l'interprétation d'observations effectuées sur une courte période. D'autre part les méthodes d'investigations sont multiples mais bien souvent indirectes. Ainsi on ne dispose souvent que d'un faisceau d'indices complémentaires nous permettant de caractériser ces interactions. Afin d'élaborer un programme d'action répondant au défi imposé par la DCE aux gestionnaires territoriaux pour la protection des milieux humides, il est nécessaire de mettre en place un suivi adapté de ces milieux.

Enfin, les investigations réalisées dans cette étude, associant suivi quantitatif et qualitatif, permettent d'avoir une meilleure appréhension des outils mobilisables pour satisfaire l'objectif de maintien des écosystèmes associés aux masses d'eau souterraine.

BIBLIOGRAPHIE

- ADES.** Accès aux données [en ligne]. Disponible sur : <http://www.ades.eaufrance.fr/LienLocalisation.aspx>
- Association Les amis des marais du Vigueirat**, 2009, *Plan de gestion des marais de Meyranne*, 197p
- 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, 54p
- BARNAUD et FUSTEC**, 2007, *Conserver les zones humides : pourquoi ? comment ?*, Educagri éditions/Quae éditions, 296p
- BELTRANDO**, 2015, *La plaine de la Crau (ouest de la Provence), un territoire aux enjeux socio-économiques et écologiques en mutation*. In *Cybergeo : European Journal of Geography* [En ligne], Espace, Société, Territoire, document 755, mis en ligne le 17 décembre 2015. Disponible sur : <http://cybergeo.revues.org/27356>
- BERARD, DAUM, MARTIN**, 1995, « MARTCRAU » : *Actualisation du modèle de la nappe de la Crau*, rapport BRGM R 38199, 18p
- BOULARD, COLLIOT, THIBAUT**, 2007, *Lettre d'information n°2 – Natura 2000*
- Carmen.** Fonctionnement hydrogéologique de la nappe [en ligne]. Disponible sur : http://carmen.carmencarto.fr/190/carte_fonctionnement_hydro_L93_2.map#
- CEEP**, 1995, *Plan de gestion de la Chapelette 1^{ère} partie : inventaire et 2^{ème} partie : contraintes, potentialités et objectifs de gestion*, 300p
- CEEP**, 1999, *Les cahiers de l'Ecomusée de la Crau n°4 : Les marais de Crau*, 19p
- CEREMA**, 2015, *Projet de contournement autoroutier d'Arles : Étude hydrogéologique du fonctionnement des laurons et interactions avec le projet*, 43p
- CLAUZON**, 1979, *Le canyon messinien de la Durance (Provence, France): une preuve paléogéographique du bassin profond de dessiccation. (The Messinian Durance Canyon (Provence, France): palaeogeographic evidence for a desiccated deep basin.)* In *Palaeogeogr., Palaeoclimatol., Palaeoecol.*, 29: 15--40
- COLOMB et al.**, 1977, *Notice de la carte géologique de la France à 1/50 000 d'Eyguières*, 31p
- COLOMB et al.**, 1979, *Notice de la carte géologique de la France à 1/50 000 de Châteaurenard*, 25p
- COLOMB et ROUX**, 1986, *La Crau, histoire Plio-Pléistocène*. In *Méditerranée*, troisième série, tome 58, 3-1986. pp.31-42
- Conseil général de l'environnement et du développement durable**, 2011, *Les enjeux écologiques et fonciers en Camargue*. Disponible sur : <http://www.ladocumentationfrançaise.fr/var/storage/rapports-publics/114000572.pdf>
- Contrat de canal Crau sud Alpilles**, 2014, *L'alimentation de la nappe de Crau* [en ligne]. Disponible sur : <http://contratdecanaalcrausudalpillles.over-blog.com/2014/06/l-alimentation-de-la-nappe-de-crau.html>
- COCKENPOT et al.**, 2015, *Estimation of air-water gas exchange coefficient in a shallow lagoon based on 222Rn mass balance*. In *J Environ Radioact*
- CORTOT et MAUCHAMP**, 2003, *Les cladiaies : écologie et gestion*, 32p
- DELAROZIERE-BOUILLIN**, 1971, *Evaluation des ressources hydrauliques : Utilisation comparée des formules de THORNTHWAITTE, 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
- DERVIEUX**, 2005, *La difficile gestion globale de l'eau en Camargue (France) : le Contrat de delta, VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement* [En ligne], Volume 6 Numéro 3 | décembre 2005. Disponible sur : <http://vertigo.revues.org/2411>

Direction générale de l'aménagement du logement et de la nature, 2013, *Les zones humides : un enjeu national* [en ligne], 95p. Disponible sur : http://www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/les_zones_humides_un_enjeu_national.pdf

DOCOB, 2008, *Document d'objectifs des sites Natura 2000 : FR 9301596 : MARAIS DE LA VALLEE DES BAUX ET MARAIS D'ARLES, FR 9312001 : Marais entre Crau et Grand Rhône*, 140p

EDATER, 2006, *Étude diagnostique et prospective des activités économiques en Camargue*, 85p

EL MANSOURI, 2004, *Calcul de la réserve utile des sols pour une gestion rationnelle des eaux de l'irrigation*, Conférence internationale.

GUIDICELLI et al, 1980, *Un biotope hydrobiologique remarquable : les laurons de la Crau (Bouches-du-Rhône, France). La communauté animale et ses relations avec le peuplement des biotopes aquatiques voisins*, 27p

INFOTERRE. Visualiseurs [en ligne]. Disponible sur : <http://infoterre.brgm.fr/viewer/MainTileForward.do#>

KALAYDJIAN et CORNOT-GANDOLPHE, 2008, *La nouvelle donne du charbon*, Editions TECHNIP, 206p

MACINTYRE, WANNINKHOF and CHANTON, 1995, *Trace gas exchange across the air-sea interface in freshwater and coastal marine environments*. In *Biogenic Trace Gases: Measuring Emissions From Soil and Water*, edited by P. A. Matson and R. C. Harris, pp. 52–97, Blackwell Sci. Malden, Mass.

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

METEO FRANCE. Données publiques [en ligne]. Disponible sur : <https://donneespubliques.meteofrance.fr/>

MOLINIER et TALLON, 1949, *La végétation de la Crau (Basse Provence)*. *Rev. gen. Bot.*, 56 : 1-130.

OLIOSO et al., 2013, *Modelling of drainage and hay production over the Crau aquifer for analysing impact of global change on aquifer recharge*. In *Procedia environmental Sciences* 19

Parc Naturel Régional de Camargue. Unités Morphopaysagères. [Image en ligne]. Disponible sur : <http://www.parc-camargue.fr/Local/parc-camargue/files/134/MORPHOPAYSAGE.jpg>

RABEMANJARA, PIRASTRU, *Plaquette Natura 2000 des « Trois marais »*

SYMCAU. *Les cailloutis de la Crau, un aquifère littoral* [en ligne]. Disponible sur : http://symcrau.com/index.php?option=com_content&view=article&id=23:les-cailloutis-de-la-crau-un-aquifere-littoral&catid=22&Itemid=159

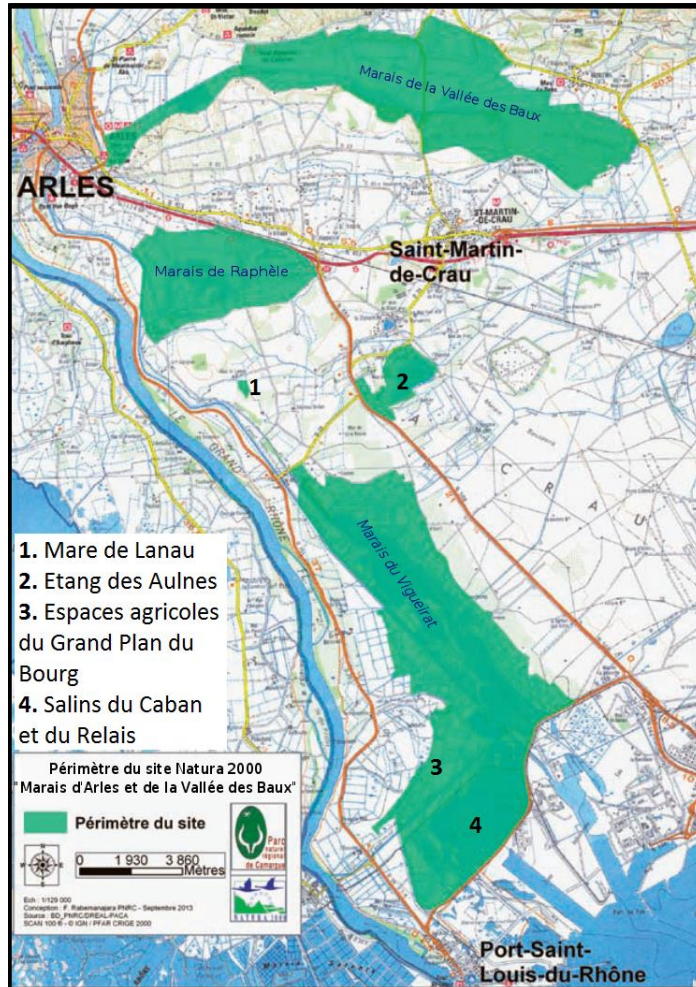
TRIAT-LAVAL H., 1978. Contribution pollenanalytique à l'histoire tardi- et post-glaciaire de la végétation de la basse vallée du Rhône. Rapport de Thèse, Université Aix-Marseille III, 343 p.

VERNOUX, LLONS, PETELET-GIRAUD, SEGUIN, STOLLSTEINER, LALOT, 2010, *Contribution à la caractérisation des relations entre eau souterrain, eau de surface et écosystèmes terrestres associés en lien avec la DCE*, rapport BRGM/RP-57044-FR, 207p

ANNEXES

ANNEXE 1 : Le site Natura 2000 des « Trois marais » et ses directives ainsi que les acteurs de l'étude

Le site Natura 2000 des « Trois marais »



Le secteur d'étude se situe sur le site Natura 2000 des « Trois marais ». Il comprend du Nord au Sud : les marais de la Vallée des Baux, les marais de Raphèle (Chanoines et Meyranne), l'étang des Aulnes, la mare de Lanau, les marais du Vigueirat, du Landre et des Coustières de Crau au sud de Mas-Thibert, les espaces agricoles du Grand Plan du Bourg, l'étang de l'Oiseau et les anciens salins du Caban et du Relais (figure 1).

Le parc naturel régional de Camargue est la structure animatrice du site (plus de 13 000 hectares au total). Un partenariat conventionné pour l'animation sur le secteur « Marais de la Vallée des Baux » est en place entre le PNRCamargue et le PNRApilles.

Figure 31 : Site Natura 2000 (Modifié d'après la plaquette Natura 2000 des "Trois marais")

Sur ce site, il a donc été établi un DOCOB qui définit un diagnostic du site puis les enjeux et les objectifs de conservation et de développement durable du site Natura 2000 (DOCOB du site des « trois marais », 2008).

Chaque marais présente sa particularité, tant au niveau morphologique, hydrologique, qu'écologique. Ils présentent tous des milieux à fort enjeu patrimonial et c'est pourquoi ils ont été classés Natura 2000 au sein du PNRCamargue. La démarche Natura 2000 n'étant pas de former des zones d'exclusion de toute activité humaine, mais de trouver des solutions concrètes avec les acteurs du territoire pour qu'ils puissent intégrer les forts enjeux écologiques du site dans leurs diverses pratiques.

Les principaux acteurs du projet d'étude

Le **Parc naturel régional de Camargue**, l'organisme d'accueil et financeur de l'étude, est un syndicat mixte de gestion qui s'étend géographiquement sur le delta du Rhône, principalement entre les deux bras du fleuve sur une superficie de 101 200 ha. Il comprend trois communes sur son territoire : une partie de la commune d'Arles et de Port-Saint-Louis-du-Rhône et toute la commune des Saintes-Maries-de-la-Mer. Il est inscrit sur la liste des zones humides d'importance internationale de la convention de Ramsar et classé Réserve de Biosphère par l'Unesco. Une partie du territoire est protégée par les directives européennes oiseaux et habitats, ce qui se traduit par des zones de protection spéciale (ZPS) et des zones spéciales de conservation (ZSC), rassemblées au sein du réseau Natura 2000. L'objectif du PNR Camargue est de mettre en place un développement économique et social sur son territoire, tout en y préservant et en y valorisant son patrimoine naturel, culturel et paysager. Il doit donc intégrer des enjeux de biodiversité et d'aménagement du territoire dans ses objectifs de missions. Il doit également savoir s'ouvrir au monde en mettant en place des actions de sensibilisation, d'éducation et d'information.

La directive « Habitats » et la directive « Oiseaux »

La directive « Habitats, Faune, Flore » et la directive « Oiseaux » sont des directives européennes créées lors de la Convention sur la diversité biologique. Elles ont permis d'établir une liste d'habitats et d'espèces animales et végétales vulnérables au niveau européen.

Le réseau Natura 2000 a été créé sur la base de ces deux directives. Il a pour objectif de préserver la biodiversité d'un milieu ou d'un site en particulier en assurant le maintien ou le rétablissement du site, tout en tenant compte du contexte socio-économique du territoire (BOULARD, COLLIOT, THIBAUT, 2007).

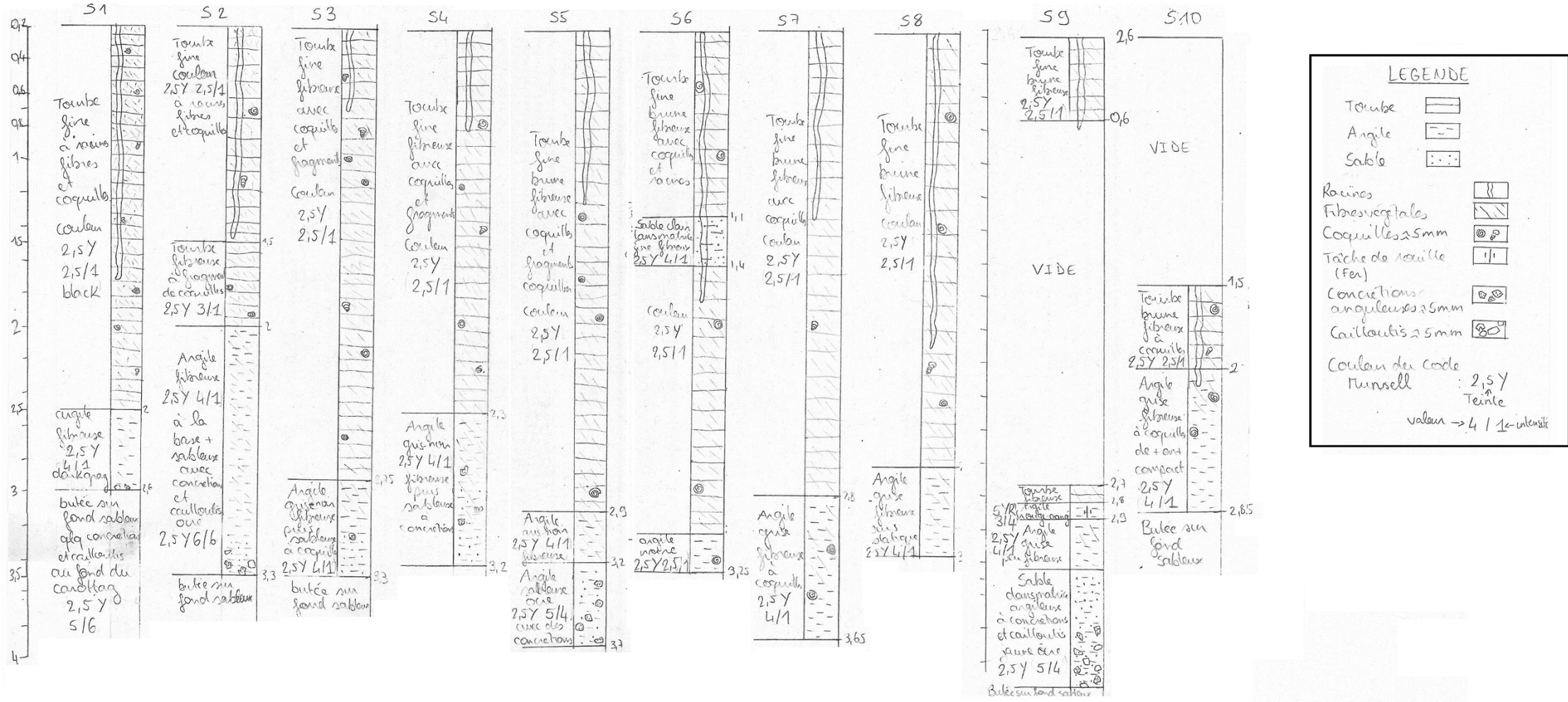
En France, il a été choisi d'élaborer un document d'objectif (DOCOB du site des « trois marais », 2008) pour répondre aux objectifs de Natura 2000. Il définit les objectifs et les actions de préservation des habitats et des espèces. Ce document est réalisé en concertation avec les acteurs locaux (collectivités, propriétaires, agriculteurs, représentants de l'Etat).

Grâce à une convention de partenariat, le **Syndicat mixte de gestion de la nappe de la Crau** (SYMCAU) a assuré avec le PNR Camargue l'encadrement technique de l'étude et mis à disposition le matériel d'investigation nécessaire. Le SYMCAU est une petite collectivité territoriale qui va fêter ces 10 ans d'existence, qui a pour mission exclusive la gestion de la nappe de la Crau. Pour ce faire, l'équipe veille à ce que les objectifs de préservation des milieux soient respectés par les différents acteurs présents sur la Crau. Ils ont aussi comme mission, la mise en place d'une bonne gestion des prélèvements d'eau souterraine, que ce soit pour l'alimentation en eau potable, les industries et l'agriculture. Ils assurent aussi une coordination entre les différents acteurs du bassin versant à travers un « Contrat de nappe Crau » qui vise à promouvoir une gestion globale et concertée de la nappe. Le « Contrat de nappe Crau » est d'ailleurs important dans l'étude car il participe à la préservation des milieux humides dont le maintien dépend des arrivées d'eau souterraine de la nappe de la Crau.

Une partie du site d'étude se trouve sur le territoire du **Conservatoire du Littoral**, dont la gestion a été confiée à l'association des **Amis des Marais du Vigueirat** (les marais de Meyranne). Leur participation (accessibilité au terrain et fourniture des données hydrauliques du site) a été essentielle pour le bon déroulement de l'étude.

Le conservatoire du littoral est une structure publique française qui a pour but de préserver les zones littorales menacées en faisant de l'acquisition foncière sur ces zones. Le conservatoire est très présent en Camargue, il l'est également sur le secteur d'étude des marais de Raphèle. En effet, ces marais sont des zones de semi-tourbière, où l'accumulation de tourbe y est localement importante du fait de l'ancienneté des marais. Cette tourbe a d'ailleurs été exploitée jusqu'au début du siècle et servait de combustible. Considérant cette zone comme un espace naturel sensible, le Conservatoire du littoral pour la délégation de rivages Provence-Alpes-Côte-d'Azur (PACA), a acheté en 2006 plusieurs hectares de marais afin de conserver les marais restants et les écosystèmes rares et menacés qui y vivent.

ANNEXE 2 : Résultats des sondages



ANNEXE 3 : Le radon 222

Le radon (^{222}Rn) est un gaz radioactif issu de la désintégration du Radium 226, lui-même issu de l'Uranium 238. La désintégration de l' ^{238}U engendre la précipitation du ^{230}Th dans l'eau qui est insoluble ($t_{1/2} = 40\,000$ ans), en se désintégrant il précipite le ^{226}Ra ($t_{1/2} = 1\,600$ ans) qui libère le ^{222}Rn ($t_{1/2} = 3,8$ jours) dans l'eau. Le radon se retrouve donc dans les eaux naturelles de surface et souterraines par décroissance radioactive du ^{226}Ra dans l'eau. Sa courbe d'évolution en fonction du temps est de type exponentielle : elle augmente de façon exponentielle lorsque l'eau circule dans un aquifère granitique et diminue de façon exponentielle lorsque l'eau circule dans un aquifère sédimentaire. Au niveau d'une source, le radon dissous dans l'eau est en contact avec l'atmosphère et devient volatil, il en résulte un dégazage rapide et une diminution de l'activité du radon de type exponentielle en aval de la source.

Résultats bruts (*figure 32*) et graphique du radon en fonction de la distance (*figure 33*)

				CE	Bq/m3	incert 2sigma
P1	21/06/2016 10:35		Ancien canal de Meyranne	1118	155	25
P2	21/06/2016 10:50		Ancien canal de Meyranne	787	101	20
P3	21/06/2016 11:15		Ancien canal de Meyranne	768	60	16
P4	21/06/2016 11:25		Ancien canal de Meyranne	1330	78	18
P5	21/06/2016 11:45		Ancien canal de Meyranne	1478	58	15
P6	21/06/2016 12:15		Ancien canal de Meyranne	1818	49	14
P7	21/06/2016 12:25		Ancien canal de Meyranne	2217	49	14
P8	22/06/2016 16:20	re-échantillon	Canal Chapelette aval de Meyranne	742	1141	91
P9	21/06/2016 14:20		Ancien canal de Meyranne, point de départ proche du canal de Chalavert	708	540	53
P10	21/06/2016 14:30		Chalavert amont de l'ancien canal de Meyranne	700	1553	88
P11	21/06/2016 15:00		Chapelette amont Meyranne	735	1466	101
P12	21/06/2016 15:15		Chalavert amont de Meyranne	700	1945	104
P13	22/06/2016 09:30		Chapelette amont Chanoines	696	1196	82
P14	22/06/2016 17:00	re-échantillon	Chalavert amont Chanoines	702	2755	130
P15	22/06/2016 17:30		Chapelette amont	728	2280	102
P16	22/06/2016 14:15		Lauron drainé amont dans Chanoines	779	10154	255
P17	22/06/2016 15:10		Lauron drainé aval dans Chanoines	771	7465	213

Figure 32 : Résultats bruts des radons

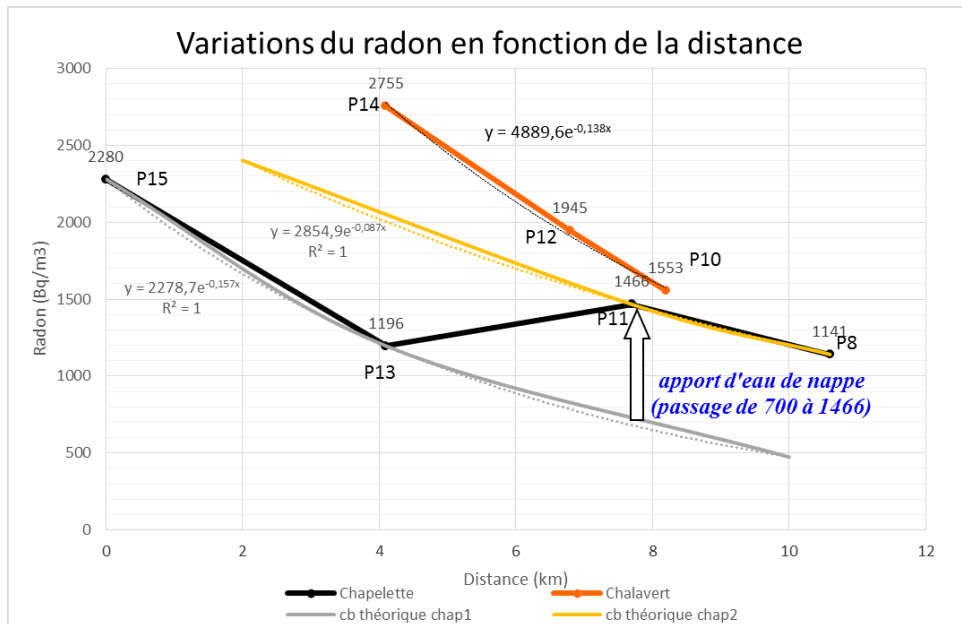


Figure 33 : Graphique radon 222 en fonction de la distance

Canal de la Chapelette

Estimation de la diminution d'activité du à desintégration et dégazage entre P13 et P11

Activité initiale au point P13 1196 Bq/m³
hauteur d'eau 1 m

Diminution du à radioactivité

T2 radon 3,8 j
lambdaradon 0,182 j⁻¹
F desintégration 9,1 Bq/m²/h

Estimation Flux atmospherique

Flux atmospherique minimum 70 Bq/m²/h
Flux atmospherique maximum 80 Bq/m²/h

Estimation flux total de radon en sortie

Flux total minimum en sortie 79 Bq/m²/h
Flux total maximum en sortie 89 Bq/m²/h

Perte totale de radon attendue entre P13 et P11

Temps de transit 1,02 h
Perte d'activité minimale 80 Bq/m³
Perte d'activité maximale 91 Bq/m³

Activité attendue minimale 1105 Bq/m³
Activité attendue maximale 1116 Bq/m³

Activité mesurée en P11 1466 Bq/m³
+/- 2s 101 Bq/m³

Minimum apport d'eau de nappe : 350 Bq/m³
Max apport d'eau de nappe : 361 Bq/m³

Minimum flux d'eau de nappe 344 Bq/m²/h
Maximum flux d'eau de nappe 354 Bq/m²/h
Flux à partir du graphique Rn vs temps 750 Bq/m²/h

activité d'eau de nappe estimée 10000 Bq/m³

Vitesse de l'eau de nappe à travers le fond
min 34,37 mm/h = l/h/m²
max 35,41 mm/h = l/h/m²
à partir du graphique 75,00 mm/h = l/h/m²

Integration sur la surface

largeur du canal 3 m
longueur du canal 2000 m
surface du canal 6000 m²
min flux total d'eau de nappe 206214 l/h
0,06 m³/s
max flux total d'eau de nappe 450000 l/h
0,13 m³/s

Figure 34 : Estimation de la diminution de l'activité du radon due à la désintégration et au dégazage entre P13 et P11 sur la Chapelette

ANNEXE 4 : Résultats de la chimie

																					HCO3-		
NOM	date	c25°C	Eh	Ox dissous (%)	pH	T°C	Ca	K	Mg	Na	SiO2	F-	Cl-	NO3-	PO4	SO4	HCO3-	erreur (mg/L)	erreur (mg/L)				
CC1	14/03/2016	717	13,4	105	7,13	16,28	124,95	1,22	11,48	14,46	4,18	0,1	20,98	6,44		115,98	289,93	21,1	-22,1				
CC2	18/05/2016	863	3,5	93	7,06	17,23	119,05	1,32	11,80	14,71	3,08	0,11	19,31	4,63		116,7	287,92	-4,9	4,9				
P14 (CC3)	21/06/2016	702	-32,54		7,47	15,77	116,1	1,67	12,40	14,00	3,79	0,14	17,68	4,15	0,49	113,06	305,00	-4,9	4,9				
CC4	04/07/2016	725	-98		7,9	18,5	120,28	1,30	12,45	14,13	3,72	0,13	17,1	4,24	0,25	99,22	278,16	-4,9	4,9				
LT2	19/05/2016	930	155,4	67	6,82	15,84	119,2	1,35	10,95	14,58	4,20	0,06	20,15	7,49		109,02	329,40	-4,9	4,9				
P16 (LT3)	21/06/2016	779,6	-98		7,38	16,16	132,55	1,28	11,42	16,14	4,51	0,07	21,14	7,91	0,19	110,26	312,32	-4,9	4,9				
LT4	04/07/2016	777	-13		7,01	16	134,62	1,33	11,51	16,40	4,60	0,07	19,75	8,16	0,19	94,49	329,40	-4,9	4,9				
SNCF1	18/05/2016	934		26		14,49	120,62	1,10	11,89	14,00	4,00	0,06	19,26	6,37		112,01	322,75	-6,5	6,5				
SNCF1b	16/06/2016	944	145,1	32	6,45	15,66	123,1	1,00	11,57	14,09	4,24	0,06	19,03	6,23		111,76	292,32	20,8	-21,8				
RC2	18/05/2016	879	-8,3	12	7,41	17,32	115,19	1,45	10,81	16,34	3,54	0,04	25,39	8,17	0,28	107,06	285,48	-4,9	4,9				
P13 (RC3)	21/06/2016	696,5	-72		7,6	18,74	112,84	1,75	11,75	15,93	4,01	0,09	20,23	5,33	0,47	103,71	251,32	-4,9	4,9				
RC4	04/07/2016	717,7	-46		7,73	17,5	120,15	1,70	11,59	16,24	4,08	0,09	21,26	6,46	0,39	97,14	280,60	-4,9	4,9				
L02	25/02/2016	738	-25,5	33	6,85	15,83	118,75	1,28	11,73	13,30	4,43	0,08	19,98	7,32		110,27	277,40	20,2	-21,1				
L03	06/06/2016	753,4	-50,8		7,02	15,94	131,96	1,45	11,17	14,67	4,59	0,07	19,39	6,81		113,07	305,00	-4,9	4,9				
LAL	06/06/2016	732,8	-8		7,22	15	123,62	0,97	9,79	13,28	4,39		20,17	5,53	0,18	109,75	307,44	-4,9	4,9				
CLesAubes	2015	480,5		121	8,22		72,92	1,20	11,94	10,90	3,77	0,078	14,63	2,17		87,67	181,00						
P1	21/06/2016	1118	-52		7,4	21,5	132,98	3,46	18,60	60,62	6,44	0,12	90,96	0,09	0,1	107,48	373,34	29,3	-30,7				
P2	21/06/2016	787	-38		7,98	23	106,98	2,23	14,80	30,31	4,73	0,1	42,66	0	0,16	110,89	278,16	-4,9	4,9				
P3	21/06/2016	768,3	-15,7		7,77	22,8	99,762	2,20	15,30	37,47	3,80	0,1	51,78	0	0,12	111,4	248,88	-4,9	4,9				
P4	21/06/2016	1330	-49		8,1	23	92,07	3,65	25,16	143,55	5,61	0,12	206,88	0		107,53	303,00	35,0	-36,6				
P5	21/06/2016	1478	-49		8,25	24,3	91,823	4,08	27,16	168,47	6,06	0,13	248,81	0		106,92	314,76	-4,9	4,9				
P6	21/06/2016	1818	-44,06		8,14	25,3	91,511	4,64	32,14	217,13	6,49	0,13	323,64	0		101,63	340,34	45,1	-47,2				
P7	21/06/2016	2217	-55		8,1	24,7	81,302	5,47	37,88	290,20	2,35	0,15	429,88	0		101,47	348,92	-4,9	4,9				
P8	21/06/2016	735,2	-135		7,84	20,5	121,83	1,96	11,70	18,15	4,02	0,08	24,18	7,07	0,47	115,3	265,96	-4,9	4,9				
P9	21/06/2016	708,3	-149		7,4	20,2	114,32	2,14	13,03	15,59	5,20	0,11	19,88	0,48	0,7	108,83	273,28	-4,9	4,9				
P10	21/06/2016	700	-112,68		7,67	18,78	116,73	1,61	12,36	14,33	3,83	0,11	18,65	4,03	0,35	113,79	283,04	-4,9	4,9				
P11 (RCav)	21/06/2016	1735	-57		7,89	19,5	121,34	1,69	11,26	17,29	4,17	0,09	23,48	7,21	0,4	116,5	309,88	-4,9	4,9				
P12 (CCav)	21/06/2016	699,7	-58		7,75	18,59	112,33	1,46	12,51	13,87	3,77	0,13	18,45	3,55	0,35	111,92	275,72	-4,9	4,9				
P15	21/06/2016	728,3	-78,1		7,68	21	116,79	2,26	11,82	16,84	3,98	0,11	24,54	6,62	0,74	114,13	270,78	20,4	-21,4				
P17	21/06/2016	771	-67		6,68	19,6	139,59	2,05	12,35	18,01	4,91	0,06	27,25	5,82	0,2	129,78	314,76	-4,9	4,9				

INTERACTIONS EAUX SOUTERRAINES - EAUX DE SURFACES DES MILIEUX HUMIDES NATURELS : ETUDE DES RESURGENCES DE LA NAPPE DE LA CRAU SUR LE SITE NATURA 2000 DES « TROIS MARAIS »

Résumé :

La nappe de la Crau est alimentée par une recharge en partie artificielle. En effet, la recharge de cette nappe est majoritairement due aux apports issus de l'excédent d'irrigation gravitaire (sur les prairies de foin) et est seulement secondairement due aux précipitations. Son écoulement se fait du Nord-Est au Sud-Ouest, où la nappe est drainée par les marais situés entre le Grand-Rhône et la Crau. Ces marais font partis du réseau Natura 2000 des « Trois marais » et sont classés sous la directive « Habitat » et la directive « Oiseaux » pour leur richesse floristique et faunistique. Ces écosystèmes sont dépendants des résurgences de la nappe de la Crau appelées localement laurons et de l'hydrologie présente dans ces marais. Qu'elle soit souterraine ou de surface, l'eau est nécessaire au maintien des milieux et des écosystèmes qui y vivent.

Le but de l'étude présentée ici est donc d'apporter une première description des interactions entre les marais et les circulations d'eau de surface et souterraine de la zone.

Plusieurs méthodes de suivis qualitatif et quantitatif ont ainsi été mises en place dans les marais sur une période de 5 mois. Ce sont des suivis hydrologique, piézométrique, pédologique et géochimique qui ont été réalisés ici.

Grâce à ces méthodes, nous avons réalisé une première visualisation de l'évolution des différentes variables hydrologique, piézométrique et géochimique en fonction du temps. Les résultats obtenus ont rendu possible la détermination des relations qui lient les variations du niveau piézométrique dans la nappe, dans les laurons et dans les canaux. La campagne pédologique a quant à elle permis de mieux définir morphologiquement la formation d'un lauron. Tandis que la géochimie a rendu possible la caractérisation des apports en eau de surface et en eau souterraine dans les marais, ainsi que la quantification de leur mélange relatif. Cette étude a aussi montré la possibilité d'utiliser les radionucléides (Rn^{222}) pour quantifier les flux d'eaux souterraines.

Cette étude servira pour un intérêt commun les gestionnaires territoriaux des espaces naturels et de la nappe de la Crau afin de mettre en place une gestion durable des milieux et de la ressource en eau pour favoriser le maintien des milieux humides.

Léa ROS

Mots clés : Milieux humides, résurgence, nappe de la Crau, Camargue, laurons, hydrologie, eaux souterraines, Natura 2000

