

# Géologues

REVUE OFFICIELLE DE LA SOCIÉTÉ GÉOLOGIQUE DE FRANCE  
*Géosciences appliquées*



***Les grandes perspectives  
en géosciences au XXI<sup>e</sup> siècle***

**- Tome III -**



## 4 ACTUALITÉS

### 14 LES PROBLÉMATIQUES DU FUTUR

- Les défis de la gestion quantitative  
de l'eau souterraine en France ..... 14  
*Jean-Christophe Maréchal, Josselin Rouillard,  
Nathalie Dörfliger*
- Mieux connaître les ressources en eau souterraine  
du Sahel : de la nécessité d'une approche  
innovante et inclusive ..... 19  
*Emmanuel de Romémont, Sophie Violette,  
François Bertone, Mathieu Schuster*
- Surexploitation et pollution du Continental Terminal  
dans les grandes villes côtières ouest-africaines :  
conséquences et enjeux ..... 26  
*B. Nlend, H. Celle-Jeanton, F. Huneau, S. Ngo Boum-Nkot,  
E. Garel, W. Fantong, J. Etame, B. Ketchemen-Tandia*
- Apport des legs nitrates dans la compréhension  
de la trajectoire socio-environnementale  
de l'hydrosystème de la lagune de Biguglia (Corse) ..... 32  
*M. Erostate, F. Huneau, E. Garel, V. Pasqualini*
- Compréhension de la circulation des eaux souterraines  
dans un système aquifère profond : investigations  
récentes et valorisation de 100 ans de connaissances  
et d'études des fluides dans le sud du Bassin aquitain ..... 37  
*A. Wuilleumier, O. Douez, N. Pedron, L. André, O. Serrano,  
E. Lasseur et M. Saplaïroles*

### 43 LES OUTILS SCIENTIFIQUES DE DEMAIN

- Contribution d'un index piézométrique standardisé  
à l'analyse de l'impact des sécheresses sur les ressources  
en eau souterraine ..... 43  
*Jean-Jacques Seguin, Delphine Allier et  
Jean-Charles Manceau*
- Les méthodes hydro-géophysiques  
d'aujourd'hui et demain ..... 49  
*Cyril Schamper, Cédric Champollion, Marc Dumont,  
Marine Dangeard, Cécile Finco, Damien Jougnot,  
Ludovic Bodet, Fayçal Rejiba, Roger Guérin,  
Laurent Longuevergne*

Rencontre de la géophysique et de la géochimie  
pour comprendre la dynamique des systèmes aquifères  
naturels : cas d'un bassin versant des Cévennes ..... 62  
*Marine Dangeard, Marie Kuessner, Ludovic Bodet,  
Julien Bouchez, Ludovic Oudin, Mohamed Saadi,  
Julien Thiesson*

Investigation croisée entre écologues et hydrogéologues  
sur la nappe de la Crau, pour une identification  
des écosystèmes dépendants des eaux souterraines ..... 67  
*A. Baillieux, H. Gomila, A. Verbeke, P. Fenart, E. Oules,  
M. Scarpari, K. Lombardini, G. Massez, J.-M. Pirastru,  
I. Quoniam, C. Ruiz, C. Alcazar*

Interprétation de traçages artificiels en domaine karstique  
par approche de type fonction de transfert :  
Application à l'hydrosystème karstique  
de l'Ouyse (Lot, France) ..... 73  
*Vianney Sivelse, Guillaume Lorette, Joël Tremoulet,  
Mélanie Bardeau et David Labat*

Modélisation des écoulements souterrains en zone urbaine :  
impact du franchissement souterrain des voies ferrées  
à Bonneuil-sur-Marne (94) ..... 80  
*Rémi Soave, Hugues Giroux et Philippe Guezennec*

Mécanismes hydrauliques pouvant être à l'origine  
des oscillations périodiques du débit  
de certaines sources karstiques ..... 88  
*Robert Pléat et Claude Droge*

### 91 DES STRATÉGIES D'ADAPTATION ?

Utilisation des propriétés redox et hydrodynamiques  
des eaux souterraines des aquifères  
de socles fissurés et altérés pour le contrôle  
des nitrates dans les eaux de surface ..... 91  
*Jean-Pierre Faillat et Moumtaz Razac*

Une grande perspective dans le domaine de l'Eau :  
les solutions fondées sur la nature ..... 98  
*Valérie Plagnes, Pierre Ribstein et Ghislain de Marsily*

Les barrages souterrains, une technologie peu connue  
de stockage d'eau souterraine ..... 102  
*Michel Bakalowicz*

Contribution du Comité Français d'Hydrogéologie  
aux Assises de l'Eau : pour une gestion concertée  
de la ressource ..... 105  
*Pierre Marchet, Michel Bakalowicz, Patrick Lachassagne,  
Catherine Thouin et Nathalie Jacquemain*

# Investigation croisée entre écologues et hydrogéologues sur la nappe de la Crau, pour une identification des écosystèmes dépendants des eaux souterraines

A. Baillieux<sup>1</sup>, H. Gomila<sup>2</sup>, A. Verbeke<sup>1</sup>, P. Fenart<sup>3</sup>, E. Oules<sup>4</sup>, M. Scarpari<sup>5</sup>, K. Lombardini<sup>6</sup>, G. Massez<sup>7</sup>, J.-M. Pirastru<sup>8</sup>, I. Quoniam<sup>9</sup>, C. Ruiz<sup>10</sup>, C. Alcazar<sup>1</sup>.

La directive cadre européenne sur l'eau (DCE) associe l'objectif de bon état des masses d'eaux souterraines à la préservation des écosystèmes qui en dépendent. Les politiques de gestion des ressources en eau doivent donc garantir la satisfaction du besoin de ces milieux humides, en termes de quantité et de qualité. Le contexte hydrogéologique particulier de la plaine de la Crau a favorisé l'apparition de zones humides alimentées par des eaux souterraines, contrastant avec le paysage steppique semi-aride des coussouls<sup>11</sup>, classés en réserve naturelle.

Si la question de la dépendance de ces milieux aux eaux souterraines concerne directement les gestionnaires des espaces naturels chargés de leur préservation, elle intéresse également le syndicat mixte en charge de la gestion de la nappe de la Crau (SYMCAU) qui doit tenir compte des enjeux environnementaux dans sa stratégie de gestion. Ces écosystèmes, souvent drainés artificiellement, sont également les exutoires naturels de canaux d'irrigations et sont alimentés par les précipitations locales. Leur dépendance aux eaux souterraines, peu décrite par la littérature scientifique, est donc complexe à caractériser.

Une association originale de spécialistes gestionnaires d'espaces naturels (conservateurs d'espaces naturels, animateurs Natura 2000, gestionnaires de réserves naturelles et de parc régionaux) et du gestionnaire de la nappe, appuyée par des cabinets de conseils en écologie et hydrogéologie, a été créée pour mieux qualifier cette dépendance et les enjeux de leur préservation.

## Des conditions géologiques et anthropiques favorables à la mise en place d'une ressource en eau souterraine stratégique

La nappe des cailloutis de la Crau s'étend sur 550 km<sup>2</sup> entre Arles, Salon et Fos-sur-Mer, à l'est de la Camargue. Elle se situe dans les dépôts sédimentaires du cône de déjection de la Durance, actif à partir du

Pliocène supérieur et durant tout le Pléistocène jusqu'à la subsidence relative du seuil d'Orgon par rapport au seuil de Lamanon, qui a détourné le fleuve de la plaine de la Crau vers son tracé actuel entre -75 000 et -35 000 ans (Molliex 2013). L'aquifère sédimentaire est essentiellement formé de cailloutis calcaires et siliceux, très perméables, à matrice sablo-calcaire localement cimentée en poudingue, atteignant jusqu'à 50 m de puissance (Roure *et al.*, 2004).

Plaine à l'origine steppique sous climat semi-aride sans cours d'eau naturel, la Crau renferme une nappe devenue significative à la faveur du développement de la pratique de l'irrigation gravitaire pour la culture de prairie (Fig. 1), avec un transfert d'eau par canaux de la Durance existant depuis le XVI<sup>e</sup> siècle. Avec une surface de prairie de 14 000 ha, l'irrigation représente environ 70% de la recharge de la nappe (Seraphin *et al.*, 2016). Celle-ci s'écoule dans une direction générale sud-ouest, depuis le seuil de Lamanon jusqu'à la plaine d'inondation du Rhône, où la nappe émerge le long d'une ligne de résurgence alimentant une zone de marais et devient captive en direction de la Camargue (voir figure 1). L'aquifère est la principale ressource en eau pour environ 300 000 habitants et pour les activités économiques du territoire (principalement arboriculture et industries pétrolières).

## Des milieux humides remarquables dans un contexte climatique semi-aride

Si le patrimoine naturel de la plaine de la Crau est renommé au travers de l'écosystème exceptionnel du coussoul, une steppe méditerranéenne classée Réserve Naturelle Nationale couvrant plus de 7000 ha (Tatin *et al.*, 2013), le territoire présente une très grande richesse écologique de milieux humides liés pour partie à la présence de la nappe.

En bordure ouest de la plaine de la Crau, se localisent les marais de Chanoines et de Meyrannes, les marais de la Crau humide (ou marais de Coustière) et du Vigueirat (réserve naturelle nationale), et plus au nord les marais

<sup>1</sup>: Syndicat mixte de gestion de la nappe phréatique de la Crau SYMCAU. Courriel : antoine.baillieux@symcrau.com

<sup>2</sup>: Bureau de conseil et d'ingénierie ECOSPHERE.

<sup>3</sup>: Bureau d'étude HYDROFIS.

<sup>4</sup>: Conservatoire des Espaces Naturels CEN PACA.

<sup>5</sup>: Animatrice NATURA 2000 Crau sèche – Crau centrale.

<sup>6</sup>: Animatrice NATURA 2000 Trois Marais.

<sup>7</sup>: Réserve Naturelle des marais du Vigueirat.

<sup>8</sup>: Parc Naturel Régional des Alpilles.

<sup>9</sup>: Chargée de mission Biodiversité Grand Port Maritime de Marseille.

<sup>10</sup>: Garde gestionnaire des Espaces Naturels Mairie de Port-St-Louis-du-Rhône.

<sup>11</sup>: Pâturage semi-aride développé sur un terrain isolé de la nappe phréatique.



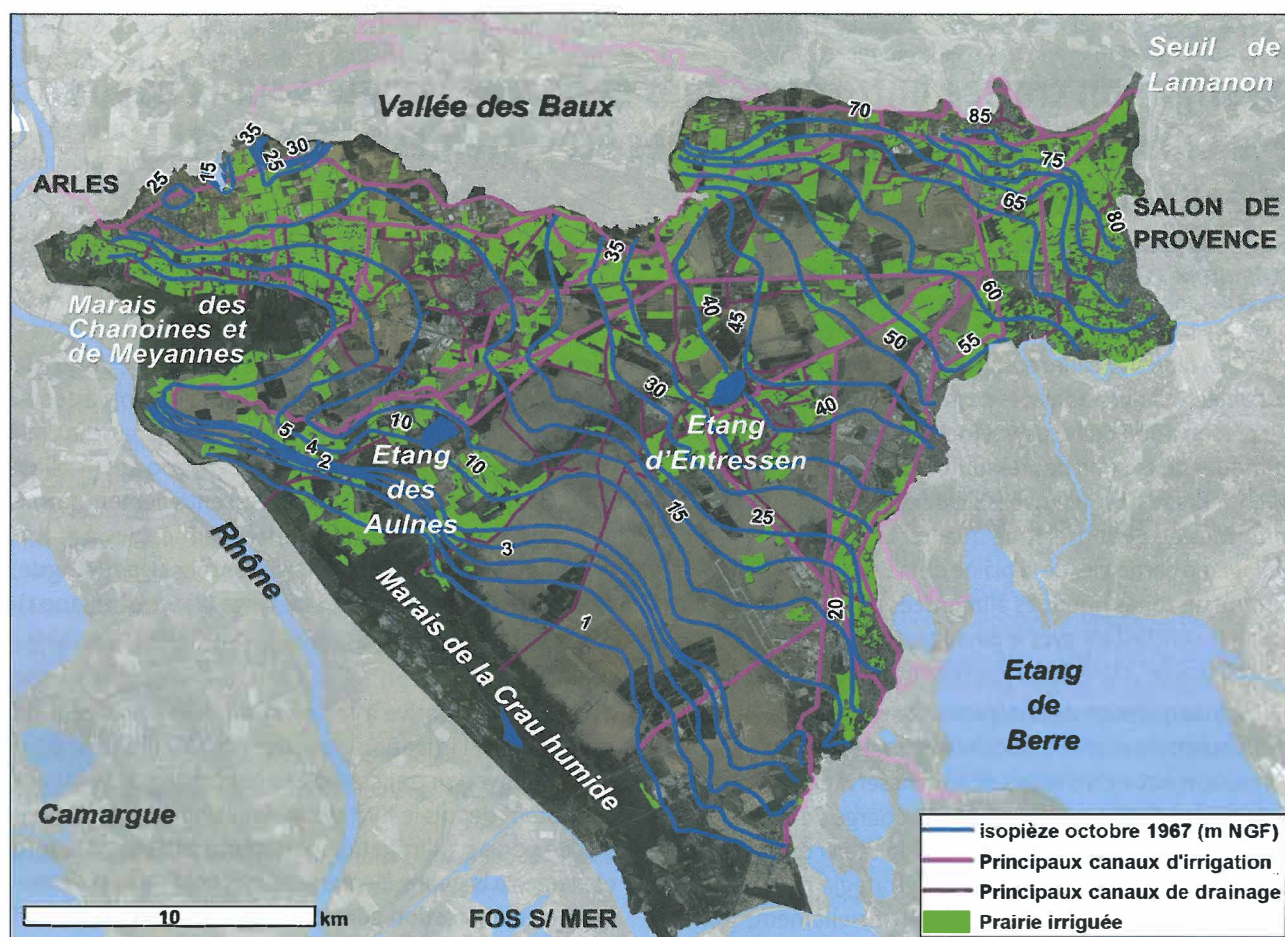


Figure 1. Contexte hydrogéologique de la plaine de la Crau montrant les zones de recharge par irrigation gravitaire et le réseau des canaux. Les isopièzes sont issus de la carte hydrogéologique de la Crau (BRGM 1969). Source : document original des auteurs.

de la vallée des Baux (réserve naturelle régionale) et les marais de Beauchamps aux portes d'Arles. Ces marais sont majoritairement alimentés par des résurgences de la nappe de la Crau (Bonnet 2017), participant au maintien d'écosystèmes à la biodiversité exceptionnelle dont plus de 900 hectares de marais à marisque (Photo 1). Ils constituent également des lieux de nidification pour plusieurs espèces rares d'oiseaux et un habitat pour des communautés d'invertébrés d'intérêt (Chambre d'Agriculture des Bouches du Rhône 2009), notamment des libellules comme *Agrion de mercure* et *Sympetrum depressiusculum*.

L'une des principales curiosités de ces marais réside dans la présence de « laurons » (voir photo 1), une dénomination locale de résurgences de la nappe apparaissant sous la forme de puits naturels ouverts ou fermés, où remonte par drainance ascendante une eau fraîche oligotrophe toute l'année (Ros, 2016). C'est ainsi que l'on retrouve, malgré le climat méditerranéen et le contexte maritime, des plantes boréo-alpines, qualifiées par cer-

tains auteurs de « reliques glaciaires » (Molinier et Tallon 1950), telles que la Parnassie des marais, la Fougère des marais ou encore la Gentiane des marais (Photo 2). Par ailleurs, ces zones humides en bordure de Crau sont également alimentées par les canaux d'irrigation et de drainage (voir figure 1), complexifiant l'équilibre écolo-hydrologique qui s'y est instauré.

Dans les parties centrales de la plaine de Crau, se trouvent également des milieux humides remarquables mais isolés, tels que des plans d'eau, des forêts alluviales, des prairies humides, des roselières et des mares temporaires méditerranéennes de fort intérêt patrimonial (Rugari, 2016). Tous ces milieux constituent de véritables oasis, dans ce territoire dominé par les coussouls. Sur une plaine présentant un réseau dense de canaux d'irrigation et de drainage, participant à l'alimentation des zones humides, la dépendance de ces écosystèmes aux eaux souterraines ne peut être systématiquement établie et nécessite une analyse au cas par cas.





Photo 1. Laurons dans une cladiaie à marisque, habitat caractéristique de marais alimentés par la nappe. Crédit photo : SYMCRAU.

## Identification des milieux dépendants des apports en eaux souterraines par investigations hydrogéologiques et écologiques

Sur la base des connaissances de terrain des gestionnaires d'espaces naturels et à l'occasion de l'inventaire départemental des zones humides menée par le CEN PACA (Oulès 2019), 15 sites d'intérêt patrimonial ont fait l'objet d'investigations floristiques pour rechercher les espèces caractéristiques d'une alimentation par des eaux souterraines (ECOSPHERE 2018). En parallèle, une étude du potentiel d'interaction avec la nappe a été menée par analyse de la carte piézométrique hautes eaux établie en octobre 1962 (BRGM 1964), vérifiant au préalable la représentativité de cette carte ancienne avec la situation actuelle (HYDROFIS 2018), et par observation de terrain de la turbidité des eaux (les eaux ruisselantes étant généralement plus turbides que les eaux souterraines).

Les relevés de terrain montrent que l'expression des habitats naturels et de la flore est très cohérente avec le potentiel d'interaction avec la nappe (Fig. 2), permettant de préciser les modes d'alimentation en eau des zones humides (Tabl. 1).

Cette analyse hydrogéologique et écologique croisée permet d'identifier quatre situations éco-hydrologiques sur la plaine de la Crau en fonction de conditions hydrogéologiques mais également d'apport et de drainage des eaux superficielles : (1) des habitats humides fortement dépendants des eaux souterraines, généralement de fort intérêt écologique (voir figure 2 : secteur striés en bleu) ; (2) des habitats humides plus communs alimentés exclusivement par les eaux de



Photo 2. Gentiane des marais, une des espèces qualifiées de « relique glaciaire » associées à la présence de la nappe. Crédit photo : Parc Naturel Régional de Camargue.

surface (voir figure 2 : secteur striés en vert en dehors des secteurs de faible profondeur de nappe) ; (3) des habitats humides alimentés par un mélange d'eau de surface et d'eau souterraine, dont l'expression écologique est indicatrice d'une alimentation dominée par les eaux de surface (voir figure 2 : secteur striés en vert dans les zones de faible profondeur de nappe) ; (4) une absence d'habitats humides dans des secteurs de faible profondeur de nappe.

La distribution des cladiaies à Marisque (*Cladium mariscus*, voir photo 1) et le cortège des espèces qui lui sont associées sont ainsi très représentatifs en Crau des milieux froids connectés avec des remontées verticales d'eaux souterraines (« laurons »). La présence de prairies humides fraîches est également un indicateur pertinent de connexions avec la nappe, même lorsque la végétation de marais froids est absente.

À l'inverse, la prédominance des roselières à roseau commun traduit plutôt une alimentation par des eaux



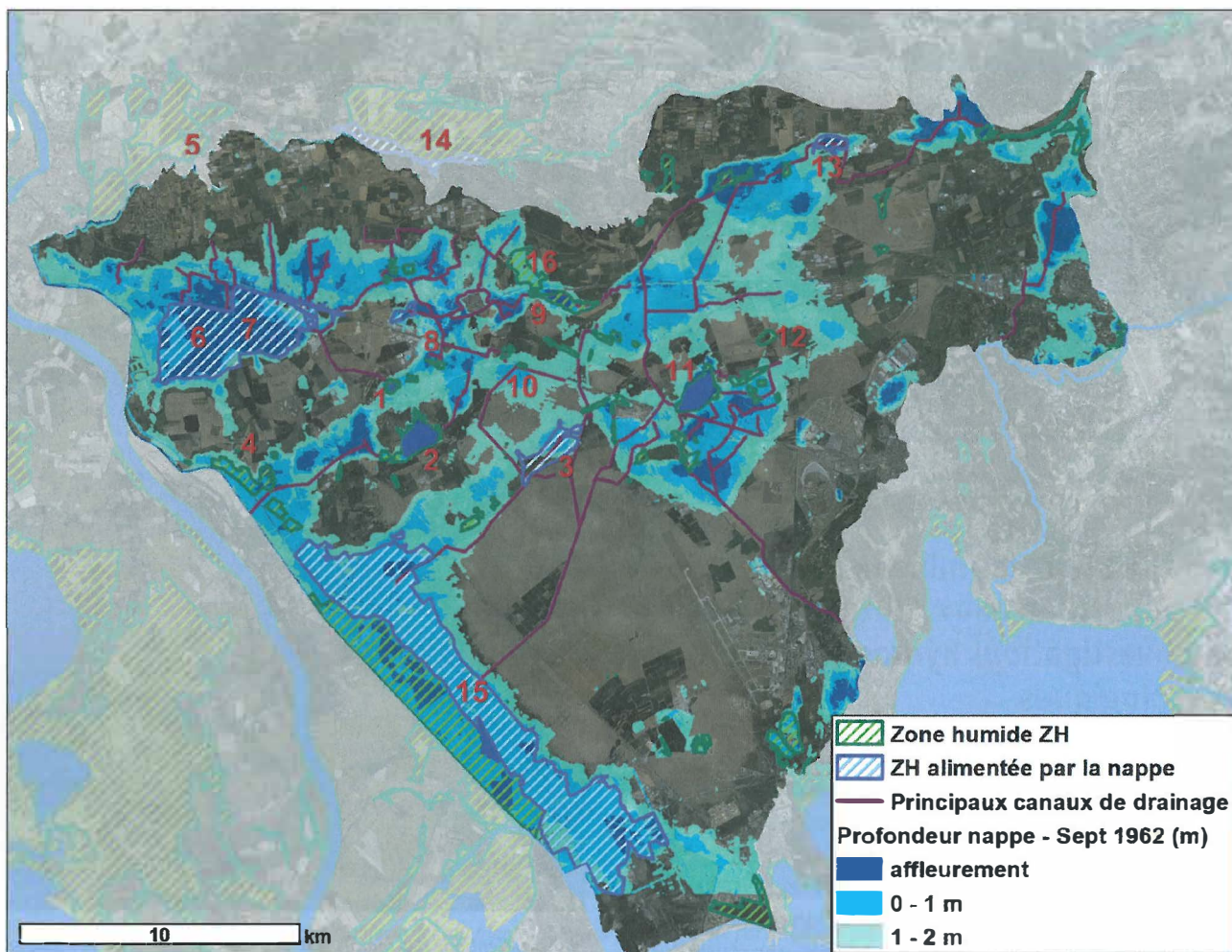


Figure 2. Zones humides sur la plaine de la Crau (secteurs investigués numérotés), profondeur de la nappe et milieux humides dépendants des eaux souterraines. Source : document original des auteurs.

Site prospecté	Principaux habitats humides et espèces	Dépendance à la nappe
1 Etang de la Dynamite	Phragmitaies	Non significative
2 Etang des Aulnes	Phragmitaies	Non significative
3 Mas de Lignon (Bausseng)	Mares temporaires	Forte dépendance à une nappe émergente
4 Mare de Lanau	Prairies humides	A priori sans dépendance, mais données historiques ambiguës
5 Petit Clar et Gravière	Mare temporaire	Sans objet
6 Marais de Meyranne	Phragmitaies	Dépendance au moins partielle à une nappe émergente
7 Marais des Chanoines	Cladiaies et laurons	Forte dépendance à une nappe émergente
8 Baisse de Raillon	Prairies humides	Locale
9 Mares temporaires de Terrusse	Reliques glaciaires	Sans objet
10 Mare et canal de Vergière	Phragmitaies	Forte dépendance à une nappe émergente
11 Etang d'Entressen	Cladiaies	Non significative
12 Etang du Luquier	Phragmitaies	Non significative
13 Bois de Brahis	Ripisylves, humides, prairies, phragmitaies, Fougère des marais (reliques glaciaires)	Forte dépendance à une nappe peu profonde
14 Marais de l'Ilon et des Quatre Platanes	Cladiaies	Forte dépendance à une nappe émergente
15 Crau humide (Coustière)	Reliques glaciaires	Forte dépendance à une nappe émergente
16 Bois de St-Hubert	Cladiaies	Pas de liens avec la nappe

Tableau 1. Synthèse des habitats et espèces remarquables et qualification de la dépendance aux eaux souterraines (source : modifié par les auteurs d'après ECOSPHERE 2018). Les numéros permettent de localiser les sites sur la figure 2.



turbides et chaudes de surface, apportées par les précipitations mais surtout par l'irrigation. Les mares temporaires, qui figurent parmi les principaux enjeux de conservation du patrimoine floristique de la plaine de Crau (fort endémisme, notamment pour la Germandrée de la Crau), ne semblent pas dépendantes des apports d'eau de la nappe.

La juxtaposition de la carte de la profondeur de la nappe, des zones humides et du réseau de canaux de drainage révèle l'influence majeure de ce dernier réseau qui, en jouant un double rôle de collecteur des eaux d'irrigation et d'assainissement des remontées de nappe (BRGM 1971), limite la mise en place de zones humides sur une grande partie du territoire de la Crau.

## Discussion et perspective

La complémentarité des compétences en hydrogéologie et écologie permet une qualification précise de la dépendance des zones humides de la Crau à la présence de la nappe.

La cohérence dans l'organisation des marais froids et des prairies humides de transition, ainsi que la grande constance des cortèges floristiques caractérisés par l'abondance d'espèces boréoalpines, laisse supposer que la mise en place de ces habitats est ancienne, potentiellement au moins depuis le dernier âge glaciaire. Certains auteurs estiment cette survivance plus récente, invoquant l'hypothèse d'un transport de graines et diaspores par des oiseaux dont les zones humides seraient le gîte (Triat 1975).

Qu'ils soient récents ou anciens, les écosystèmes dépendants des eaux souterraines, ayant survécu dans des conditions de recharge et de drainage fortement anthropisées, pourraient être menacés par l'impact des changements globaux sur la nappe de la Crau (Baillieux *et al.*, 2015). Les changements climatiques appellent en effet à revoir à moyen terme le partage de la ressource durancienne entre les usagers, le transfert d'eau bénéficiant à la Crau n'est pour le moment reconnu qu'à travers l'usage non prioritaire de l'irrigation agricole et la pérennité du modèle économique de la production du foin de Crau n'est pas garantie. Une des conséquences serait une réduction des apports d'eau souterraine aux milieux naturels qui serait préjudiciable à la conservation des espèces et à l'organisation des habitats. Les secteurs de plus grande vulnérabilité se situent dans les contextes où se maintiennent des milieux dépendants de la présence d'eau froide dans des conditions de ressource limitée (zone d'émergence réduite).

**Cette nouvelle carte de répartition des milieux humides** dépendants des eaux souterraines est un préalable indispensable à la mise en œuvre d'une gestion de la nappe répondant aux besoins des milieux naturels. La quantification de cette dépendance est par ailleurs un des éléments de connaissance nécessaire à l'élaboration des plans de gestion des milieux humides et des documents d'objectifs (DOCOB) des sites Natura 2000. Les canaux de surface (apport ou drainage) sont également une des clés de la protection des zones humides (PNRC<sup>12</sup> 2017). Dans la perspective de ces différents objectifs, les gestionnaires envisagent de poursuivre ce partenariat pour quantifier précisément les besoins en eaux de ces milieux naturels en termes de qualité physico-chimique, de flux, de niveau piézométrique et de cyclicité saisonnière.

**Étude financée par l'Agence de l'Eau, la Région Sud-PACA et le SYMCRAU dans le cadre du projet SINERGI inscrit au programme d'actions du Contrat de Nappe de la Crau.**

## Bibliographie

- BRGM, 1964. Étude hydrogéologique de la Crau - BRGM/RP-DSGR.64.A49 375 p.
- BRGM, 1969. Carte Hydrogéologique de la France - Istres Eyguères Plaine de la Crau 1:50 000 + Notice 38pp.
- BRGM, 1971. Zones périodiquement inondées de Raphèle-Mou-lès (commune d'Arles). Étude de la nappe et de l'influence des irrigations par Audibert et Putallaz Marseille 1971, Rapport BRGM RP-71-SGN-189-PRC.
- Baillieux A., Oliosio A., Trolard F., Chanzy A., Lecerf R., Lecharpentier P., Banton O., Ruget F. et Ruy S., 2015. Changements globaux : quels impacts sur l'aquifère de la Crau ? *Géologues* 184 déc. 2015 p. 85-92.
- Bonnet A., 2017. Étude du fonctionnement hydrologique d'une zone humide en contexte méditerranéen : le site natura 2000 « Trois marais » Mémoire de master Université de Montpellier 79 p.
- Chambre d'agriculture des Bouches-du-Rhône, 2009. Document d'objectifs des sites Natura 2000 : FR 9301596 : Marais de la vallée des Baux et marais d'Arles FR 9312001 : Marais entre Crau et Grand Rhône Tome 1 : Diagnostic, enjeux et objectifs de conservation et de développement durable, version 2004 actualisé en 2008.
- ECOSPHERE, 2018. Sensibilité de la nappe aux conditions de prélèvements et de recharge & gestion de crise - Dépendance des zones humides avec la profondeur de la nappe Rapport interne SYMCRAU non publié décembre 2018, 24 p.
- HYDROFIS, 2018. Zones humides et profondeur de nappe. Rapport interne SYMCRAU non publié septembre 2018 23 p.
- Molinier R. et Tallon G., 1950. La végétation de la Crau. Extrait de la Revue générale de Botanique Tome 56-57 - 1949-50, 111 p.

12. PNRC : Parc Naturel Régional de Corse.

- Molliex S., Siame L., Bourlès D., Bellier O., Braucher R. et Clauzon G., 2013. Quaternary evolution of a large alluvial fan in a periglacial setting (Crau Plain, SE France) constrained by terrestrial cosmogenic nuclide ( $^{10}\text{Be}$ ). *Geomorphology* 195, 45-52.
- Oulès E., 2019. Rapport d'expertise. Inventaire des zones humides du département des Bouches-du-Rhône 2017-2018. Conservatoire d'espaces naturels de Provence-Alpes-Côte d'Azur. Département des Bouches-du-Rhône. Avril 2019.
- PNRC, 2017. Guide canaux et roubines - Vers une amélioration des pratiques d'entretien. Parc naturel régional de Camargue 2017 ISBN : 2-906632-58-9, 32 p.
- Ros L., 2016. Interactions eaux souterraines - Eaux de surfaces des milieux humides naturels : étude des résurgences de la nappe de la Crau sur le site Natura 2000 des « trois marais » Mémoires de Master Université de Franche Comté 56 p.
- Roure S., Duvail C., Aunay B. et Le Strat P., 2004. Géodynamique des systèmes plio-quaternaires des nappes alluviales de la plaine de la Crau. Rapport BRGM/RP-53088-FR 69 p.
- Rugari C., 2016. Document d'objectifs des sites natura 2000 FR 9301595FR 9301595 « Crau centrale - Crau sèche » & FR 9310064 « Crau » - Directive Habitats - Directive Oiseaux - Document définitif fin 2015 - Tome 1 « Diagnostic, enjeux et objectifs de conservation » 319 p.
- Seraphin P., Vallet-Coulomb C. et Gonçalves J., 2016. Partitioning groundwater recharge between rainfall infiltration and irrigation return flow using stable isotopes : The Crau aquifer. *J. Hydrol.* 542 241-253.
- Tatin L., Wolff A., Boutin J., Colliot E. et Dutoit T., 2013. Écologie et conservation d'une steppe méditerranéenne La plaine de Crau Écologie et conservation d'une steppe méditerranéenne. Éditions Quæ ISBN 978-2-7592-2082-3 ; 352 p.
- Triat H., 1975. L'analyse pollinique de la tourbière de Fos-sur-Mer (B. du Rh.). *Ecologia mediterranea* T1-1975, 109-121.