



SYMCRAU

Syndicat mixte de gestion de  
la nappe phréatique de la  
Crau

Etude  
**Sinergi**

Sensibilité de la nappe  
aux conditions de prélèvements  
et de recharge & gestion de crise

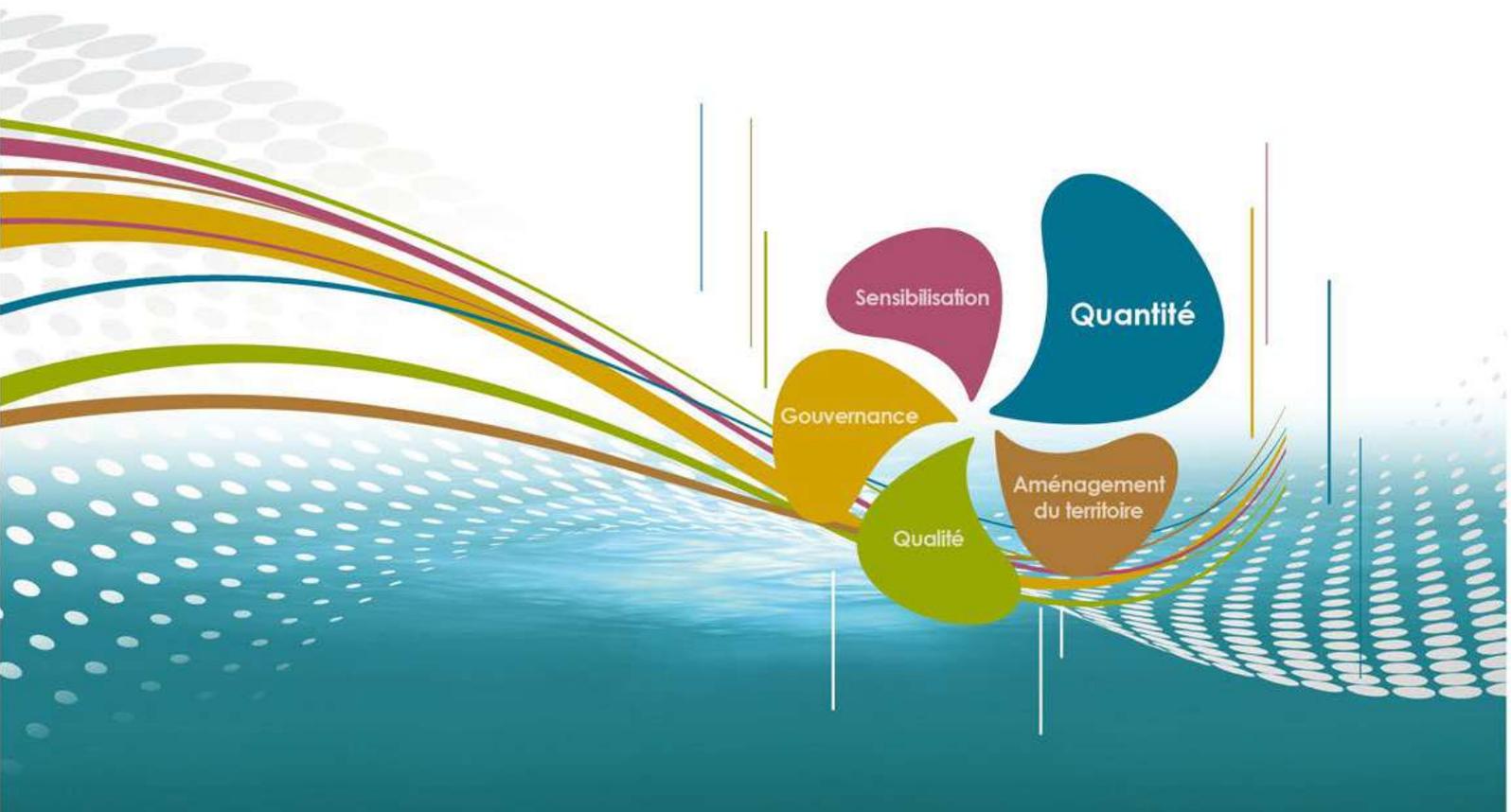
Opération inscrite au

Contrat  
de nappe Crau

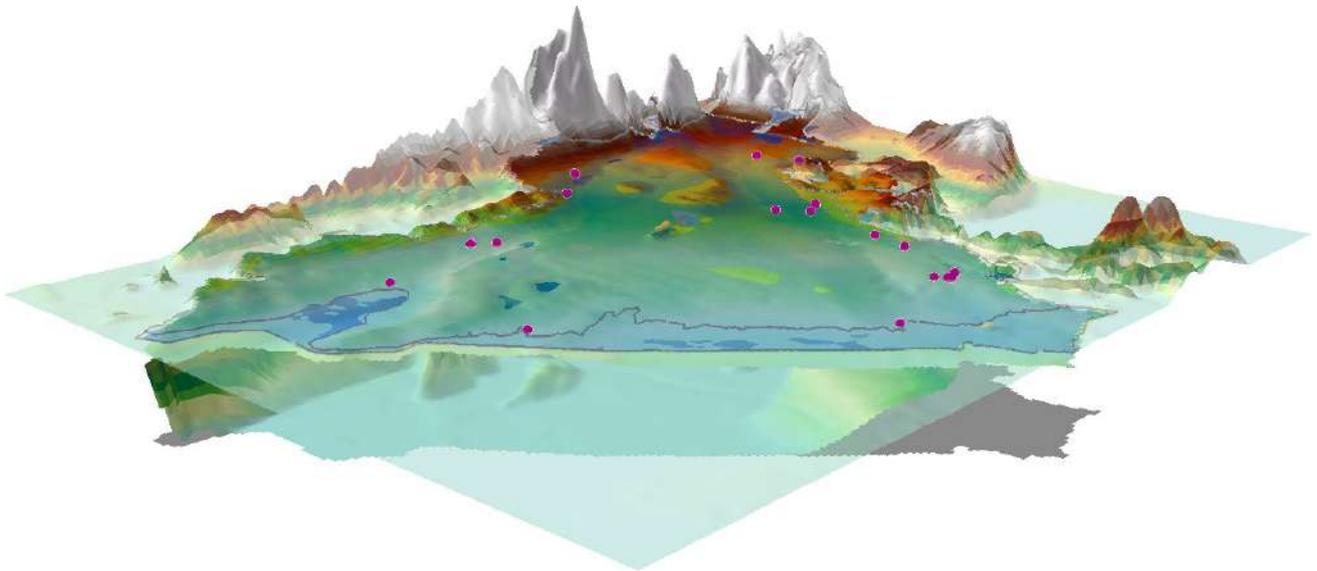
Analyse prospective de la sensibilité de la  
nappe de la Crau aux conditions de recharge  
et de prélèvements pour définir les termes  
quantitatifs d'une gestion durable de la res-  
source à l'horizon 2050

## Rapport technique

Septembre 2020







Modèle du système aquifère de la Crau appliqué à l'étude SINERGI

*Analyse prospective de la sensibilité de la nappe de la Crau aux conditions de recharge et de prélèvements pour définir les termes quantitatifs d'une gestion durable de la ressource à l'horizon 2050 - Rapport de l'étude SINERGI - Août 2020 - SYMCRAU*

Auteur :	Antoine BAILLIEUX (SYMCRAU)
Collaboration technique :	Pascal FENART (HYDROFIS)
Collaboration graphique et appui à la concertation :	Rachel VINDRY (AUTREMENT DIT)
Validation :	Charlotte ALCAZAR (SYMCRAU)
Version :	20200907_vf
Date :	7 septembre 2020



# TABLE DES MATIERES

<b>1</b>	<b>INTRODUCTION .....</b>	<b>7</b>
<b>1.1</b>	<b>Contexte et objectifs de l'étude.....</b>	<b>7</b>
1.1.1	Contexte.....	7
1.1.2	Objectifs .....	8
1.1.3	Partenariats et effets attendus .....	8
<b>1.2</b>	<b>Méthodologie .....</b>	<b>10</b>
1.2.1	Phase 1 – Définition d'une stratégie de modélisation .....	10
1.2.2	Phase 2 – Simulations exploratoires et prévisionnelles .....	12
1.2.3	Phase 3 – Perspectives stratégiques pour les gestions des eaux.....	12
<b>2</b>	<b>STRATEGIE DE MODELISATION.....</b>	<b>13</b>
<b>2.1</b>	<b>Synthèse des connaissances sur le fonctionnement de la nappe de la Crau .....</b>	<b>13</b>
2.1.1	Etat initial des connaissances .....	13
2.1.2	Actualisation 2016 de la carte d'occupation des sols.....	19
2.1.3	Nouvelles données sur l'influence des aquifères bordiers sur la nappe de la Crau.....	20
2.1.4	Actualisation de la géométrie du système aquifère de la Crau.....	22
2.1.5	Identification des écosystèmes dépendants des eaux souterraines.....	28
2.1.6	Actualisation de l'estimation des prélèvements en nappe .....	32
2.1.7	Analyse de représentativité du réseau d'observation pluviométrique de la Crau.....	38
2.1.8	Analyse spatiale des dynamiques piézométriques de la nappe.....	40
<b>2.2</b>	<b>Le modèle MHYCRAU.....</b>	<b>45</b>
2.2.1	Description générale .....	45
2.2.2	Méthodologie de calcul de la recharge .....	49
2.2.3	Paramétrisation du modèle de surface .....	49
2.2.4	Paramétrisation du modèle de nappe .....	59
2.2.5	Calage des paramètres hydrodynamiques .....	64
2.2.6	Qualité du modèle.....	68
2.2.7	Simulation d'une période dite de référence (2013-2018) .....	72
2.2.8	Avis sur le degré de représentativité du modèle .....	80
<b>2.3</b>	<b>Indicateurs d'état de la ressource .....</b>	<b>82</b>
2.3.1	Identification des indicateurs par enjeux.....	82
2.3.2	Méthodologie de classement des indicateurs.....	93
2.3.3	Modélisation de référence 2013 – 2018 des indicateurs d'usages et d'alimentation des milieux naturels .....	97
<b>3</b>	<b>SIMULATIONS EXPLORATOIRE ET PREVISIONNELLES .....</b>	<b>100</b>

<b>3.1</b>	<b>Etude systématique de la sensibilité de la nappe aux conditions de recharge et de prélèvements .....</b>	<b>101</b>
3.1.1	<i>Objectifs et méthode .....</i>	101
3.1.2	<i>Analyse des résultats.....</i>	102
3.1.3	<i>Discussion sur l'impact des variations du couple recharge/prélèvements sur les usages et les marges de manoeuvre disponibles actuellement .....</i>	107
<b>3.2</b>	<b>Simulations prospectives à l'horizon 2050.....</b>	<b>116</b>
3.2.1	<i>Objectifs et méthodes .....</i>	116
3.2.2	<i>Etablissement des scénarios prospectifs sur l'état de la ressource .....</i>	116
3.2.3	<i>Analyse des résultats.....</i>	120
3.2.4	<i>Discussion : les évolutions potentielles de la ressource et de ses usages à l'horizon 2050</i>	128
<b>3.3</b>	<b>Simulations des modalités de gestion d'un épisode secheresse.....</b>	<b>131</b>
3.3.1	<i>Objectifs et méthode .....</i>	131
3.3.2	<i>Description des scénarios simulés.....</i>	131
3.3.3	<i>Analyse des résultats par scenarios .....</i>	132
3.3.4	<i>Conclusions sur la gestion des crises hydriques .....</i>	138
<b>4</b>	<b>ENSEIGNEMENTS ET DISCUSSION .....</b>	<b>140</b>
<b>4.1</b>	<b>Qu'est-ce que nous apprend SINERGI ?.....</b>	<b>140</b>
4.1.1	<i>Une réduction des incertitudes sur le fonctionnement d'un système aquifère .....</i>	140
4.1.2	<i>Analyse prospectives de l'évolution de la ressource en eau souterraine et de ses usages</i>	147
<b>4.2</b>	<b>Quelles stratégies pour l'avenir de la ressource en eau ?.....</b>	<b>152</b>
4.2.1	<i>Comment évolueront les usages et les bénéfices actuels ? .....</i>	152
4.2.2	<i>Quels sont les leviers pour accompagner ces éventuelles évolutions ? .....</i>	154
4.2.3	<i>Les arbitrage à considérer pour concevoir la gestion de l'eau.....</i>	159
<b>5</b>	<b>CONCLUSION.....</b>	<b>160</b>
<b>6</b>	<b>BIBLIOGRAPHIE.....</b>	<b>163</b>
<b>7</b>	<b>LISTE DES ANNEXES .....</b>	<b>166</b>



# 1 INTRODUCTION

## 1.1 CONTEXTE ET OBJECTIFS DE L'ETUDE

### 1.1.1 CONTEXTE

La plaine de la Crau se caractérise par un paysage très contrasté, originellement marqué par une steppe sèche méditerranéenne bordée par des zones humides et qui a vu le développement d'une agriculture irriguée à la faveur du transfert d'eau par canaux depuis la Durance. Ce territoire est également caractérisé par le développement de zones urbaines établies autour de secteurs économiques majeurs, notamment la zone industrialo-portuaire de Fos-sur-Mer s'accompagnant d'un important réseau de transport routier et ferroviaire.

La structuration de cet espace, son développement socio-économique et la richesse de sa biodiversité sont intimement liés au grand cycle de l'eau, qui est sur ce territoire fortement influencé par l'activité séculaire de l'irrigation gravitaire. Le transfert massif d'eau depuis le bassin versant de la Durance pour des besoins agricoles, au printemps et à l'été, a nécessité le développement d'un important réseau de canaux et de filioles, aux bénéfices des espaces agricoles mais également certaines zones naturelles humides exutoires du trop-plein des canaux.

Cette eau, s'infiltrant dans le sous-sol, compose une grande partie de la recharge de la nappe phréatique de la Crau, classées stratégiques dans le SDAGE pour l'alimentation de près de 300 000 habitants et dont dépendent des activités agricoles et industrielles majeures. Exerçant une pression d'eau douce sur la nappe captive salée située sous les alluvions du Rhône, les écoulements souterrains limitent les remontées d'eau saline qui pourraient altérer la qualité des eaux captées. Enfin, les résurgences de la nappe principalement au centre et à l'ouest du territoire, à la faveur parfois de réseaux de drainage de remontée de nappe, permettent l'expression d'un habitat naturel à la biodiversité remarquable.

La part des eaux provenant de la Durance allouée à la Crau est cependant en compétition avec les autres usages de l'eau sur le bassin versant : allocations pour l'agriculture sur les autres territoires de la vallée de la Durance, maintien du débit réservé de la Durance, usages énergétiques, industriels et touristiques. Selon une étude prospective (Sauquet, 2016), les changements climatiques à l'horizon 2050 auraient pour conséquence une diminution des volumes disponibles durant la pleine période d'irrigation, augmentant la fréquence d'apparition de crises hydriques et les pénuries d'eau. Ceci accentuerait la fragilité du secteur de l'irrigation gravitaire, avec un impact direct sur la recharge de la nappe phréatique en années de restriction d'eau pour l'irrigation.

En parallèle, l'activité de l'irrigation gravitaire, maillon essentiel du cycle de l'eau, est fragilisée par d'importantes mutations économiques, sociales et environnementales. Les producteurs de foin de Crau se heurtent à des difficultés économiques, menaçant la rentabilité des exploitations agricoles. Les charges opérationnelles des associations syndicales s'accroissent et leur mission de transport d'eau brute se complexifie, alors que le nombre d'agriculteurs irrigants et leurs capacités financières s'amenuisent. Une partie des terres dédiées à la culture du foin de Crau pourrait ainsi être exploitée pour d'autres cultures jugées plus rentables mais également plus consommatrices d'eau.

De même, la pression foncière a entraîné la conversion de surfaces agricoles en zone urbaine. Si la récente grenellisation des PLU a permis de rationaliser les projets d'étalement urbain, les prairies irriguées situées dans le pourtour des enveloppes urbaines pourraient à terme être significativement consommées.

La nappe de la Crau joue ainsi un rôle essentiel pour l'alimentation des populations, les activités économiques et pour certains habitats humides remarquables du territoire. Plusieurs analyses ont confirmé la sensibilité de cette ressource aux conditions d'aménagement du territoire, d'apports en eau durancienne, de prélèvements et, de manière indirecte, aux conditions climatiques (Oliosio 2013, Seraphin 2016). Cependant, le territoire s'interroge encore sur les conditions précises dans lesquelles bâtir le développement du territoire tout en préservant les services essentiels rendus par la nappe.

### 1.1.2 OBJECTIFS

Afin d'anticiper les évolutions en cours ou à venir, le territoire souhaite se doter d'un cadre quantitatif pour élaborer une stratégie de gestion de l'eau organisant une plus grande résilience du territoire face aux évolutions en cours, en premier lieu les changements climatiques, et aux risques de pénuries en eau.

Les collectivités territoriales ont donc inscrit, dans le contrat de nappe de la Crau, l'étude SINERGI pour :

- 1. Déterminer les contraintes qui vont s'imposer au territoire dans les années à venir et les impacts à prévoir sur la ressource en eau.**
- 2. Anticiper les mesures à prendre pour concilier le développement du territoire avec une gestion de la ressource équilibrée satisfaisant les usages socio-économiques et les besoins des écosystèmes.**
- 3. Analyser l'impact sur les usages des mesures pouvant s'appliquer dans le cadre d'un plan de gestion des ressources en eau, en cas de sécheresse affectant la plaine de la Crau et le bassin versant de la Durance.**

### 1.1.3 PARTENARIATS ET EFFETS ATTENDUS

L'objectif de SINERGI est de produire de la connaissance sur la sensibilité de la nappe, et des usages qui lui sont associés, aux changements globaux pour établir un cadre de gestion conciliant les activités du territoire et la préservation de la ressource, en tenant compte des évolutions climatiques. Cet objectif répond au volet B des actions du contrat de nappe de la Crau visant à « maintenir durablement l'équilibre quantitatif (recharge/prélèvements) de la nappe de la Crau au regard des usages socio-économiques et des milieux »<sup>1</sup>

L'étude s'inscrit également dans les missions statutaires confiées aux SYMCRAU. Le syndicat, doté de compétences techniques nécessaires à l'élaboration du projet, est donc naturellement contributeur financier à l'étude SINERGI et principal porteur technique.

SINERGI répond aux dispositions de l'orientation fondamentale N° 7 du SDAGE Rhône Méditerranée 2016-2021 "Atteindre l'équilibre quantitatif en améliorant le partage de la ressource en eau et en anticipant l'avenir". Il correspond directement à la mesure RES0303 « Mettre en place les modalités de partage de la ressource en eau » et à la mesure RES0101 « Réaliser une étude globale ou un schéma directeur visant à préserver la ressource en eau ». Répondant aux objectifs du SDAGE, il reçoit le soutien technique et financier de l'Agence de l'Eau.

SINERGI entre également dans le cadre d'intervention de la Région Sud Provence Alpes Côte d'Azur, en terme d'animation et de coordination de la gestion des ressources en eau, dont il reçoit également un soutien technique et financier.

L'étude SINERGI, qui vise une amélioration de la connaissance, n'a pas de portée réglementaire. Il s'agit d'une volonté du territoire de s'organiser pour faire face à des problématiques de gestion quantitative dans un contexte de changements globaux. Cette étude se distingue donc d'une Etude Volume Prélevable Globale (EVPG) au sens réglementaire du fait que l'aquifère de la Crau, n'étant pas en déséquilibre quantitatif, n'est pas classé en zone de répartition des eaux (ZRE). SINERGI ne revêt donc pas le caractère obligatoire d'une EVPG et ses conclusions n'ont pas de portée réglementaire ou de valeur juridique intrinsèque.

Les conclusions de SINERGI apporteront cependant des connaissances intéressantes les services de l'Etat en charge des missions régaliennes de police et de politique de l'Eau, notamment dans les

---

<sup>1</sup> Contrat de nappe de la Crau Tome 2 Cahier de fiches actions Juillet 2016

domaines des restrictions liées au plan d'action sécheresse, des arbitrages inter-usages économiques et de l'instruction des autorisations de prélèvements.

Porté par l'équipe technique du SYMCRAU, la réalisation de l'étude a nécessité un renforcement de certaines compétences mobilisées auprès de trois cabinets d'expertise :

- Le bureau d'étude HYDROFIS qui a conduit une étude de connaissance sur les interactions de la nappe avec les aquifères bordiers et qui a apporté un conseil technique sur la méthodologie et l'analyse des résultats durant toute l'étude (mission d'assistance technique).
- Le bureau d'étude ECOSPHERE qui a conduit, avec HYDROFIS, une étude de caractérisation de la dépendance de certaines zones humides à la nappe de la Crau
- Le cabinet de conseil AUTREMENT DIT qui a apporté une aide dans la concertation, le graphisme et la communication des résultats du projet

## 1.2 METHODOLOGIE

Les conclusions de l'étude SINERGI visent à établir un cadre stratégique de gestion du territoire, des eaux d'irrigation et des prélèvements pour assurer une préservation de la ressource, de ses usages et ses fonctions dans la perspective des changements. Elles ont été établies à l'issue d'un travail en 6 étapes inscrites dans deux grandes phases (tableau 1).

Phase	Étapes
<b>Phase 1 – Définition d'une stratégie de modélisation</b>	1-1 Elaboration d'un modèle de nappe. 1-2 Définition d'indicateurs décrivant l'état de tension sur les usages et l'alimentation des milieux naturels. 1-3 Simulation d'un état de référence des indicateurs.
<b>Phase 2 – Simulations exploratoires et prévisionnelles</b>	2-1 Analyse de sensibilité des indicateurs aux variations du couple recharge/ prélèvements. 2-2 Analyse d'impact de scénarios d'évolution structurelle de l'hydro système à l'horizon 2050. 2-3 Analyse d'impact de scénarios de gestion d'une sécheresse conjoncturelle dans les conditions actuelles de fonctionnement de l'hydro système.
<b>Phase 3 – Enseignements et perspectives</b>	Cadre stratégique de gestion du territoire, des eaux d'irrigation et des prélèvements pour assurer une préservation de la ressource, de ses usages et ses fonctions dans la perspective des changements globaux.

**Tableau 1** Etapes méthodologiques de l'étude SINERGI

### 1.2.1 PHASE 1 – DEFINITION D'UNE STRATEGIE DE MODELISATION

Cette phase consiste à produire les connaissances et l'outillage nécessaire pour conduire les analyses prévues en phase 2 sur la sensibilité de la ressource à différents forçages anthropiques et naturels.

La démarche méthodologique est la suivante :

- 1. Elaborer un outil de modélisation de l'hydro système de la Crau,**
- 2. Définir des indicateurs renseignant sur l'état de tension exercée sur les usages de la ressource et l'alimentation des milieux naturels**
- 3. Simuler un état de référence de ces indicateurs permettant une évaluation des impacts analysés en phase 2.**

#### ETAPE 1-1 ELABORATION DU MODELE DE NAPPE MHYCRAU

Un modèle numérique de nappe est l'outil incontournable pour répondre aux objectifs de SINERGI. Il permet de tester l'impact de différentes stratégies de gestion du territoire sur la ressource en eau. Le SYMCRAU dispose par convention avec l'UMR EMMAH un modèle de simulation des recharges et des écoulements souterrains de la plaine de la Crau. Cette chaîne de modélisation a été développée à l'UMR EMMAH d'Avignon afin de simuler l'impact des changements globaux sur la nappe de la Crau, dans le cadre du projet ASTUCE&TIC (De Mordant de Massiac et al. 2011) et SIRRIMED (INRA 2012a, 2013a, 2013b) entre 2010 et 2014. Ce modèle est utilisé depuis 2015 par le SYMCRAU dans le cadre de ses missions d'expertises (étude d'impact, délimitation d'aire d'alimentation de captage).

L'évolution d'usage des sols, des prélèvements et du climat, ainsi que l'acquisition de nouvelles connaissances (occupation des sols, prélèvements en nappe, géométrie de l'aquifère, climat...), détaillées au chapitre 3, entraînent la nécessité d'une réévaluation du modèle pour garantir une représentation fidèle des flux d'eau en jeu sur le territoire de la Crau et garantir la robustesse des approches prospectives.

Afin de garantir la qualité du modèle, une première version du modèle a été soumise à évaluation du BRGM, expert en la matière, au début de l'année 2018. Les pistes d'amélioration proposées à l'issue de cette expertise (Wuilleumier 2018) ont permis de le faire évoluer dans la version, décrite au chapitre 2 du présent rapport, répondant aux objectifs de SINERGI.

#### **ETAPE 1-2 DEFINITION D'INDICATEURS DECRIVANT L'ETAT DE TENSION SUR LES USAGES ET L'ALIMENTATION DES MILIEUX NATURELS**

Les principaux enjeux de la gestion de l'eau à l'échelle de la Crau consistent à maintenir les conditions d'équilibre quantitatif et de qualité des eaux pour préserver les usages de la ressource, pour l'approvisionnement en eau potable des populations et des secteurs économiques (agricoles et industriels), et le maintien du bon état des milieux naturels alimentés par la nappe. Si l'étude SINERGI ne concerne pas l'évaluation des pollutions liées aux activités humaines, elle s'intéresse à la dégradation potentielle des eaux par les intrusions salines, liées aux conditions de gestion quantitative de la ressource.

Cette étape du projet consiste donc à identifier, pour chacun de ces usages et services, les d'indicateurs adéquats, permettant d'évaluer la capacité de la ressource à y répondre.

Si les prélèvements AEP et industriels sont bien identifiés, il est conduit une estimation de la localisation des captages agricoles et des volumes associés consommés, puisqu'une partie de ces captages ne sont pas identifiés dans les registres déclaratifs. Le détail de cette évaluation est donné au chapitre 3.

Il s'agit également d'identifier les indicateurs renseignant sur l'état d'alimentation des zones humides. Bien que le SYMCRAU ait mené certaines études sur les émergences de nappe dans les milieux naturels en bordures de Crau, peu de connaissances sont réunies sur la localisation des zones humides, leur fonctionnalité et sur les relations hydrodynamiques existantes entre la nappe et ces écosystèmes. Une étude spécifique, détaillée au chapitre 3, a donc été conduite pour déterminer, d'une part, la relation hydrodynamique entre la nappe et les milieux naturels et, d'autre part, l'influence des apports de la nappe sur l'état écologique de ces milieux.

Concernant les risques liés au biseau salé, l'étude SINERGI peut s'appuyer sur les conclusions de l'étude SIMBA conduite entre 2017 et 2018, pour identifier les facteurs contrôlant l'évolution spatiale et temporelle de la salinité et évaluer les critères de risques de dégradation de la qualité des eaux captées en fonction des charges hydrauliques de la nappe. Ces critères conduisent à l'établissement des indicateurs spécifiques au risque de remontée d'eau saline.

Les méthodes d'identification des indicateurs sont détaillées au chapitre 5 de ce rapport.

Pour chaque indicateur relatif à un enjeu d'usage ou d'alimentation des milieux, l'étude établit des seuils piézométriques ou de flux et tient compte des fréquences d'apparition, pour établir des critères reflétant l'état de tension exercée sur chaque usage de la ressource et services écologiques rendus par la nappe.

Les détails sur la classification des indicateurs sont donnés au chapitre 5

#### **ETAPE 1-3 SIMULATION D'UN ETAT DE REFERENCE DES INDICATEURS EN CONDITIONS ACTUELLES**

Dans cette étape il est établi un état de référence des indicateurs durant une période couvrant les chroniques piézométriques observées de la nappe de la Crau, soit les années 2013 à 2018. Pour cela il sera employé le modèle de nappe MHYCRAU décrit au chapitre 2.2.

L'objectif est double :

- 1) Démontrer la capacité du modèle à simuler les variables indicatrices, par comparaison avec des données observées, et quantifier l'incertitude des sorties du modèle
- 2) Définir une simulation de référence qui puisse servir de comparaison pour analyser les impacts sur la ressource des scénarios prévus dans les phases 2 de SINERGI

### 1.2.2 PHASE 2 – SIMULATIONS EXPLORATOIRES ET PREVISIONNELLES

Cette phase vise à déterminer les conséquences de changements de conditions de recharge ou de prélèvements dans la nappe, liées à des choix de territoire ou à des variations conjoncturelles ou structurelles du climat, sur les services aujourd'hui rendus par la nappe. L'objectif est d'en déduire les dispositions permettant une réduction de l'exposition aux risques induits par ces évolutions.

#### ETAPE 2-1 ANALYSE DE SENSIBILITE DES INDICATEURS AUX VARIATIONS DU COUPLE RECHARGE/ PRELEVEMENTS

A partir du modèle MHYCRAU actualisé et des indicateurs d'état de la ressource, il est conduit une analyse de sensibilité des indicateurs aux baisses de volumes d'eau pour l'irrigation gravitaire et aux variations sur les prélèvements agricoles (à la hausse et à la baisse). Cette analyse permet de quantifier, d'une part, les conséquences de ces variations sur les indicateurs d'état de la ressource et, d'autre part, les marges de manœuvre existantes pour conserver tout ou partie des services rendus par la nappe.

#### ETAPE 2-2 ANALYSE D'IMPACT DE SCENARIOS D'EVOLUTIONS STRUCTURELLES DE L'HYDRO SYSTEME A L'HORIZON 2050

Cette étape consiste à définir dans un premier temps des scénarios d'évolution du territoire à l'horizon 2050, en s'appuyant sur un temps de concertation menée auprès des acteurs du territoire. Dans un second temps il est testé l'impact de ces scénarios sur les indicateurs d'état de la ressource. Ceci conduit à dessiner le champ des possibles de l'état de la ressource, et sa capacité à rendre les services aujourd'hui rendus, à l'horizon 2050 en fonction des choix pris dans la gestion du territoire et des flux d'eau.

#### ETAPE 2-3 ANALYSE D'IMPACT DE SCENARIOS DE GESTION D'UNE SECHERESSE CONJONCTURELLE DANS LES CONDITIONS ACTUELLE DE FONCTIONNEMENT DE L'HYDRO SYSTEME

L'objectif est de connaître l'impact sur la ressource d'un évènement exceptionnel de sécheresse, ici une diminution de 50% des précipitations durant deux années consécutives. Il est simulé les différentes mesures correctives qui pourraient s'appliquer sur le territoire de la Crau et de la Durance. L'objectif est de mieux connaître la sensibilité du système à un tel évènement, n'ayant jamais eu lieu sur la Crau mais dont le risque d'apparition aurait tendance à augmenter avec les évolutions climatiques. Cela permet également de mesurer l'impact de différentes stratégies de gestion de pénurie en eau pour orienter l'élaboration des plans de gestion des risques sécheresse.

### 1.2.3 PHASE 3 – PERSPECTIVES STRATEGIQUES POUR LES GESTIONS DES EAUX

Dans cette dernière phase conclusive, l'étude s'appuie sur les analyses prospectives menées en phase 2 pour d'une part dessiner une vision de l'avenir de la ressource et des services qui lui sont associés, en fonction des choix de développement territorial qui seront pris dans les prochaines années à l'aune des changements climatiques. D'autre part il s'agit de définir une stratégie à la fois adaptative et limitative des risques pour permettre de continuer, au cours des prochaines décennies, à bénéficier des services rendus par la nappe

## 2 STRATEGIE DE MODELISATION

La méthodologie de l'étude repose sur la capacité de simuler le fonctionnement du système aquifère de la Crau à l'aide d'un modèle numérique des flux de recharge et d'eaux souterraines. Cette modélisation requiert d'avoir une très bonne compréhension du système avec un travail préalable de récolte et d'analyse des données de terrains.

### 2.1 SYNTHÈSE DES CONNAISSANCES SUR LE FONCTIONNEMENT DE LA NAPPE DE LA CRAU

#### 2.1.1 ETAT INITIAL DES CONNAISSANCES

##### CARACTERISTIQUES HYDROGÉOLOGIQUES DE LA NAPPE DE LA CRAU

La nappe phréatique de la Crau se situe dans les dépôts sédimentaires de l'ancien delta de la Durance d'époque Plio-quadernaire. Elle est identifiée comme la masse d'eau souterraine "Cailloutis de la Crau" (FRDG104) dans le SDAGE Rhône-Méditerranée 2016-2021. L'aquifère constitue un vaste plan incliné caillouteux, s'abaissant du nord-est au sud-ouest. Les cailloutis, d'âge villafranchien et quaternaire, sont constitués de galets roulés, mêlés de graviers localement fins et sableux et cimentés à des profondeurs diverses par des carbonates englobant des sables siliceux, en formant des poudingues.

L'épaisseur des alluvions varie fortement. Elle oscille entre 0 m en bordure est et nord, autour de l'étang des Aulnes et de l'étang d'Entressen, et peut atteindre plus de 40 m à l'ouest de St-Martin-de-Crau ou dans le secteur de Fos-sur-Mer. La morphologie de l'aquifère est marquée par un creusement du substratum selon un axe nord-sud à l'est de la zone (sillon de Miramas) et selon un axe est-ouest passant par St-Martin de Crau (sillon d'Arles). Le substratum des cailloutis est constitué pour la plus grande part, par le Pliocène argileux (plaisancien) et grés-marneux (Astien) et, dans la partie orientale, par le Miocène (marnes sableuses et grès argileux du Tortonien, molasse blanche du Burdigalien). Le Miocène présente localement un caractère aquifère exploitable pour les prélèvements agricoles.

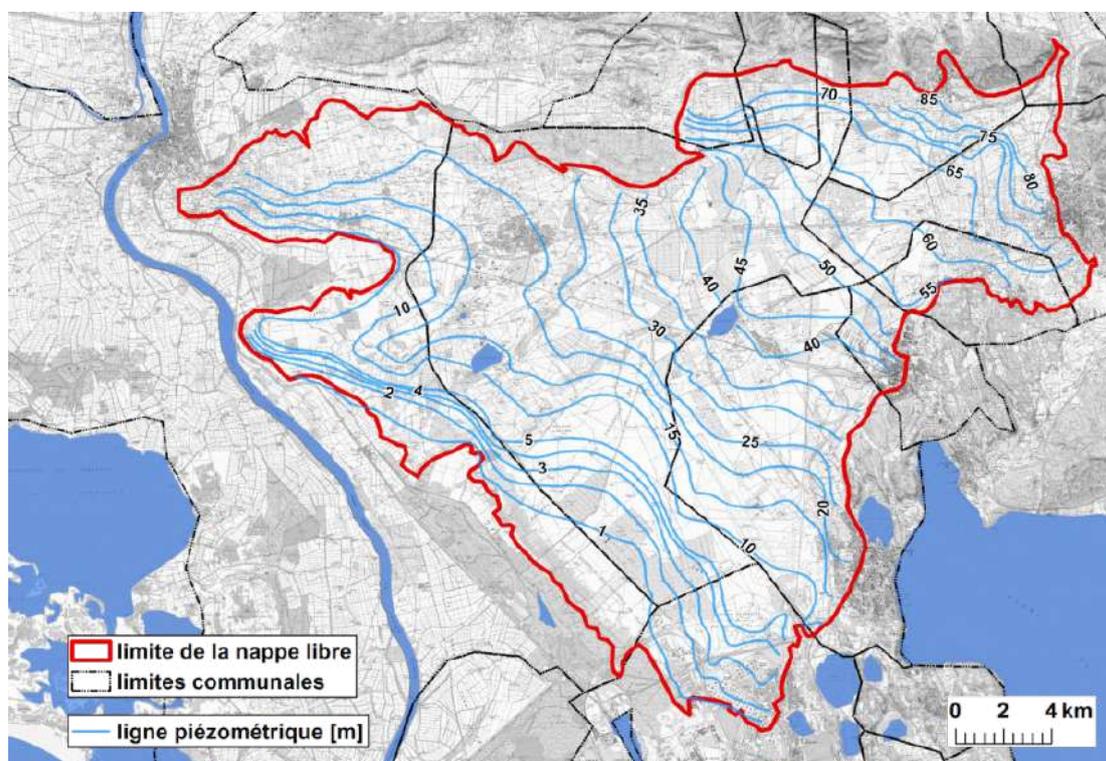
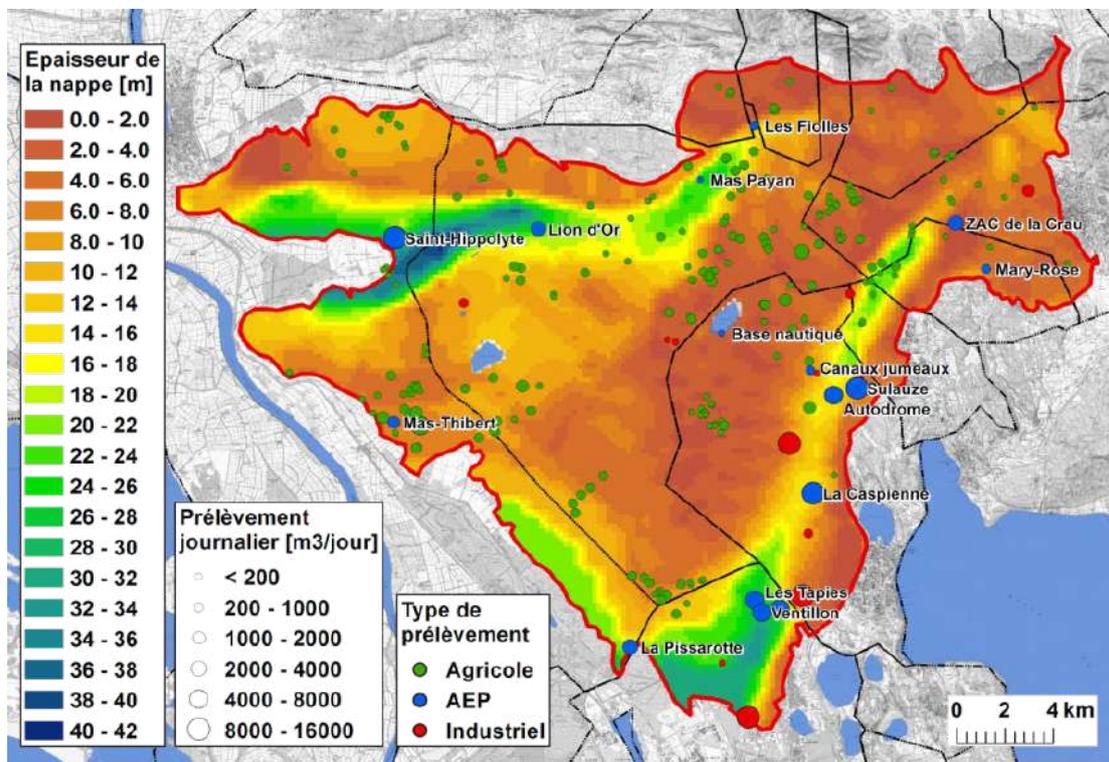


Figure 1 Limites et piézométrie de la nappe de la Crau

Les cailloutis de la Crau renferment une nappe phréatique d'environ 550 Mm<sup>3</sup> (2) dont les écoulements s'effectuent principalement dans la direction du plan des cailloutis, c'est-à-dire du nord-est vers le sud-ouest (Figure 1). La profondeur moyenne annuelle de la surface de la nappe est très variable dans l'espace. Elle est très proche de la surface dans certains secteurs, St-Martin-de-Crau et bordure ouest, et se situe à une profondeur de l'ordre de 10 m dans la majeure partie du territoire.

L'exutoire naturel de la nappe de la Crau se situe principalement sur sa bordure ouest où, entrant en contact avec la nappe captive rejoignant la Camargue, elle est drainée par la vaste zone de marais étendue en longueur entre Arles et Fos-sur-Mer. D'autres exutoires se matérialisent sur la limite nord, le long de la vallée des Baux, et à l'est vers la rivière Touloubre. On estime que les échanges hydrauliques entre la nappe de la Crau et la nappe de la Durance via le seuil de Lamanon sont négligeables.

Les points de prélèvements les plus importants concernent les captages pour l'Alimentation en Eau Potable (AEP), avec un prélèvement total d'environ 28 Mm<sup>3</sup>/an réparti sur 15 forages et une source drainée (Mary-Rose). Ceux-ci se situent dans les zones de plus forte perméabilité et de plus grande épaisseur saturée de l'aquifère, c'est-à-dire dans le sillon de Miramas ou dans celui d'Arles (Figure 2). Les forages agricoles sont répartis sur le territoire plus en fonction des opportunités agronomiques que des potentialités aquifères. L'agriculture représente cependant le premier usage de l'eau de la nappe en Crau, avec un prélèvement total estimé entre 22 et 52 Mm<sup>3</sup>/an.

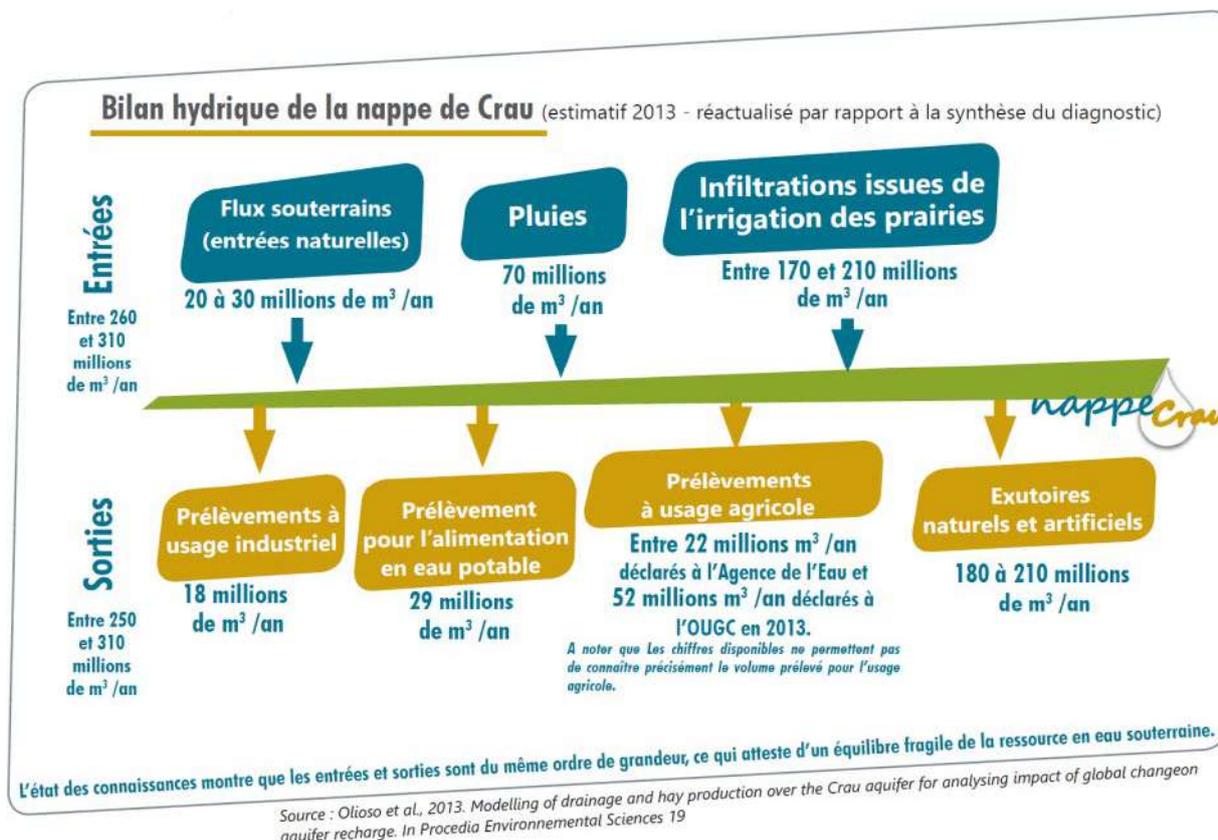


La recharge de la nappe est assurée à environ 70% par l'infiltration des eaux destinées à l'irrigation du foin de Crau dont la période s'étend de mars à octobre. Un hectare de foin de Crau contribue à la recharge de la nappe pour environ 19 000 m<sup>3</sup>/an. Etant donné le cahier des charges de l'AOP Foin de Crau, limitant l'ajout d'engrais et de produits phytosanitaires, la recharge issue des prairies irriguées contribue en grande partie à la bonne qualité généralement observée de l'eau souterraine. L'infiltration des eaux de pluie complète l'essentiel de la recharge (autour de 25 %), avec un faible apport en

<sup>2</sup> Mm<sup>3</sup> = millions de m<sup>3</sup>

provenance des collines du pays salonais. La Figure 3 reprend les différents termes du bilan hydrique de la nappe.

Les perméabilités de l'aquifère sont élevées, généralement entre  $10^{-3}$  et  $10^{-2}$  m/s. Cette caractéristique, alliée aux apports massifs durant les périodes d'irrigation, confère à la nappe un régime hautement dynamique, où les niveaux piézométriques observés sont activement soutenus par la recharge épisodique en provenance des prairies irriguées. Celle-ci crée notamment un battement de la nappe de plus de 6 mètres dans certains secteurs irrigués, avec une période de hautes eaux en été.



**Figure 3 - Bilan hydrique de la nappe de la Crau avant l'étude SINERGI (Source : Diagnostic du contrat de nappe, SYMCRAU 2016a).**

### PATRIMOINE NATUREL, ACTIVITES HUMAINES ET EVOLUTION DU TERRITOIRE

Le territoire accueille de nombreuses activités économiques (notamment zone industrialo-portuaire de Fos, activités logistiques, transport de produits dangereux par canalisations enterrées, arboriculture fruitière, foin de Crau, pastoralisme) mais aussi un patrimoine naturel riche (zones humides, prairies humides et sèches) qui font l'objet de protections et classements particuliers (Natura 2000, Réserves naturelles), tout en avoisinant deux Parcs naturels régionaux (les Alpilles et la Camargue).

Cette nappe fait l'objet de nombreux prélèvements pour l'alimentation en eau potable ou pour les activités industrielles ainsi qu'agricoles. Elle est utilisée pour l'AEP des principales villes de Crau et du pourtour (Salon-de-Provence, Miramas, Istres, Saint-Martin-de-Crau... environ 270 000 habitants), pour des industries, et pour certaines cultures (irrigation au goutte-à-goutte notamment en centre- et sud-Crau pour l'arboriculture fruitière). Il est à préciser l'absence de réseau hydrographique naturel en Crau qui confère à la ressource en eau souterraine son importance stratégique. Ainsi, la nappe de la Crau est-elle identifiée comme ressource stratégique dans le SDAGE Rhône-Méditerranée 2016-2021.

En limite de la partie libre, la nappe de la Crau alimente, sous forme de résurgences ou par exfiltration diffuse, des zones humides qui constituent un patrimoine écologique exceptionnel, en particulier les sites Natura 2000 des « Trois marais » incluant la Réserve naturelle nationale des Marais du Vigueirat, et ceux de la vallée des Baux. Ces espaces naturels sont classés comme habitat prioritaire par l'Union

Européenne. Ils abritent des espèces végétales protégées ou rares et représentent un habitat de nidification pour plusieurs espèces d'oiseaux listées sur la Directive Oiseaux. 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 qui les bordent.

A l'intérieur de la zone libre, des zones humides, telles des forêts alluviales ou ripisylve, des plans d'eau (notamment étang des Aulnes et d'Entressen) sont probablement liées à des affleurements ou à une faible profondeur de la nappe. Si les liens entre les zones humides et la nappe sont identifiés, le fonctionnement hydraulique de ces connections et les besoins de ces milieux naturels en eaux souterraines n'ont pas été pleinement caractérisés.

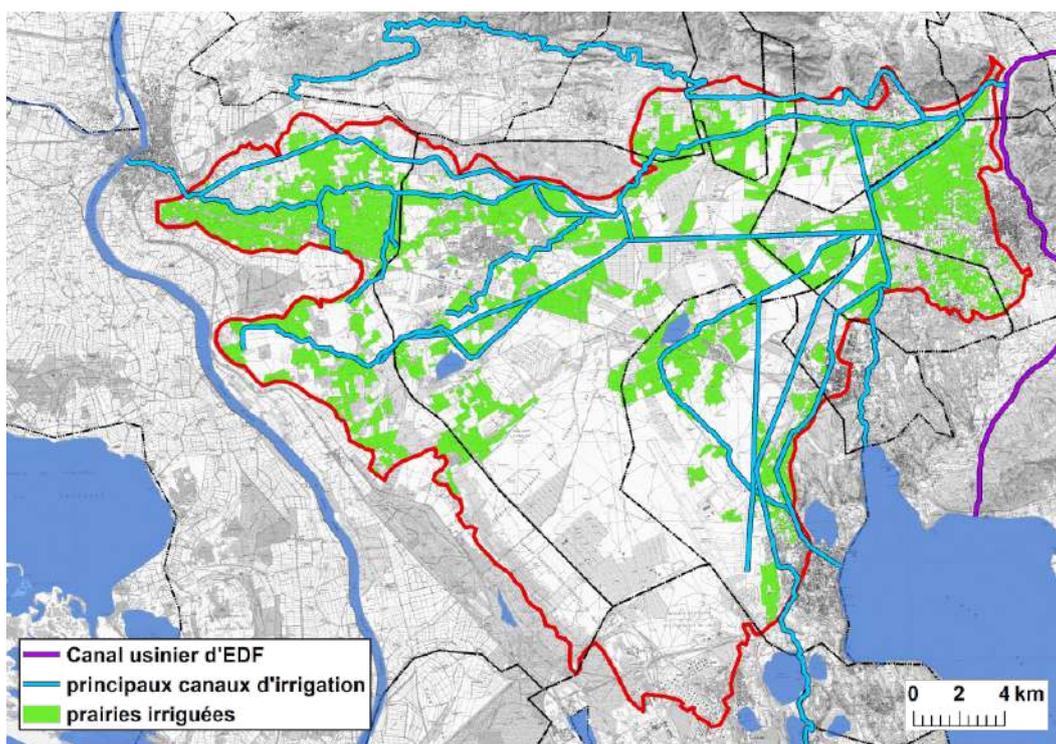


Figure 4 - Réseau des canaux d'irrigation et localisation des prairies irriguées

L'aménagement du territoire de la Crau évolue rapidement, avec une pression urbaine importante autour des grandes agglomérations où les projets de ZAC et de zones d'habitat se multiplient. Entre 1997 et 2009, l'urbanisation a détruit irréversiblement 1 600 ha de terres agricoles et d'espaces naturels. Des grands projets d'infrastructures autoroutières sont prévus dans les prochaines années : contournement d'Arles et liaison entre Salon-de-Provence et Fos-sur-Mer. Des évolutions sont à prévoir autour des pôles industriels liés au Grand Port Maritime de Marseille (GPMM).

La filière Foin de Crau représente 14 000 ha de prairies irriguées alimentées par les eaux de la Durance via un réseau de 2 000 km de canaux et de filioles (Figure 4). Ce secteur se heurte à certaines difficultés socio-économiques. La pression foncière a entraîné la conversion de surfaces agricoles en zones urbaines (835 ha convertis entre 1997 et 2009). La part des eaux provenant de la Durance allouée à la Crau est en compétition avec les autres usages de l'eau (énergie, industrie, tourisme et agriculture sur d'autres territoires). Les débits réservés de la Durance, en cours de révision, tendraient à augmenter alors que les changements climatiques pourraient accentuer la baisse des volumes disponibles en période d'irrigation gravitaire. Cette activité qui est un élément primordial de l'équilibre quantitatif de la nappe et qui contribue à son bon état qualitatif, est donc fragilisée par d'importantes mutations économiques, sociales ou environnementales.

## ETAT DE LA RESSOURCE EN EAU SOUTERRAINE

Le SYMCRAU a installé entre avril 2012 et mars 2013 un réseau de 23 piézomètres permettant de suivre en continu le niveau de la nappe phréatique (Figure 5). Celui-ci vient compléter le réseau de la base de données nationale des eaux souterraine ADES, qui comporte 8 piézomètres en Crau (gestion BRGM). En outre le SYMCRAU effectue depuis octobre 2011 un suivi patrimonial de la qualité de la nappe sur 17 points avec une périodicité semestrielle (hautes eaux - basses eaux).

D'un point de vue quantitatif, il est observé un équilibre général des niveaux piézométriques depuis plusieurs décennies. Certaines années présentent cependant des déséquilibres quantitatifs marqués.

Selon certains témoignages, il y a un assèchement de plus en plus récurrent des puits traditionnels dans des secteurs en bordure de nappe (Istres, Mouries) ou en ligne de partage des eaux (Entressen). En 2007, un arrêt brutal de l'irrigation dû à une consommation trop précoce de la réserve agricole de Serre-Ponçon, a provoqué une baisse significative des niveaux piézométriques par rapport à la normale saisonnière. Même si la dynamique rapide de la nappe masque ce phénomène d'une année sur l'autre, ceci est révélateur d'un état d'équilibre quantitatif précaire.

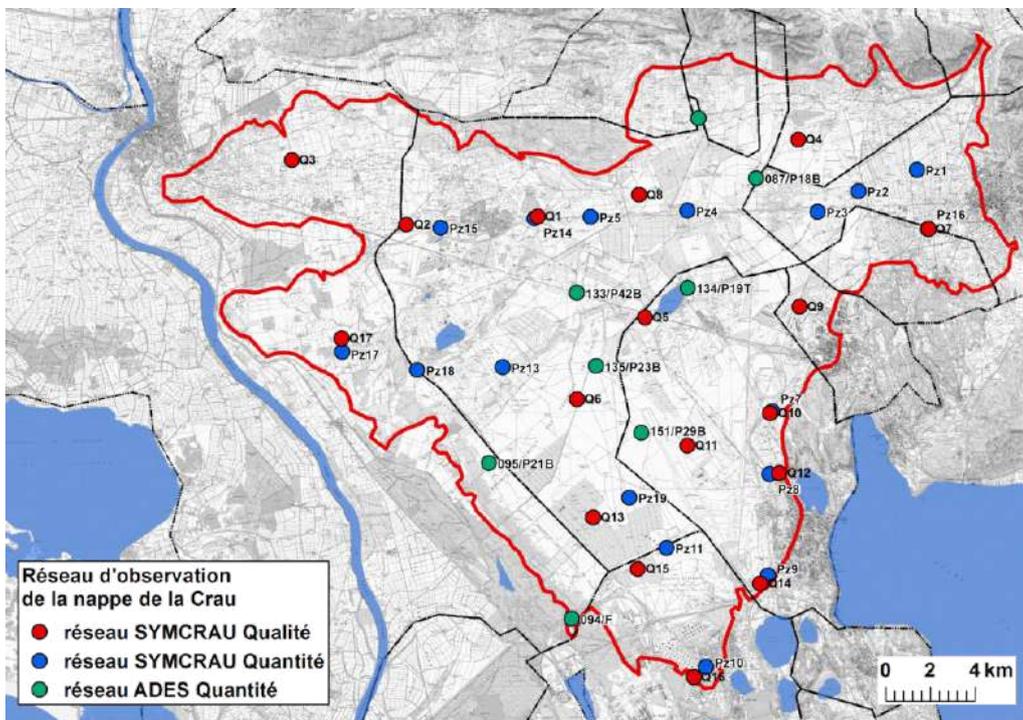


Figure 5 Localisation des réseaux de surveillance de l'état de la nappe

D'un point de vue qualitatif, la qualité globale de la nappe est bonne dans son ensemble.

Certains secteurs font néanmoins l'objet de préoccupations et d'une surveillance accrue. Il s'agit notamment de la bordure sud-ouest, entre Mas-Thibert et Fos-sur-Mer, où la nappe présente une intrusion saline depuis l'aquifère de la Camargue. Des contaminations locales de l'eau souterraine sont aussi relevées en aval de sources de pollutions isolées à l'échelle de la nappe. Les intrusions salines en Crau ont fait l'objet de nombreux rapports et de suivis depuis les années 60 dans le cadre de l'aménagement du Grand Port Maritime de Marseille à Fos-sur-Mer.

Le SYMCRAU a récemment porté avec le BRGM l'étude SIMBA pour mieux comprendre les mécanismes de contrôle des intrusions salines et mettre en place un réseau de surveillance de ce phénomène (Bailly-Comte et Rivet, 2019). L'étude a confirmé la présence du biseau à l'interface entre la partie captive et la partie libre en bordure ouest de la nappe de la Crau, avec une prolongation au nord sous l'étang de Meyrannes. La charge d'eau douce semble être le principal facteur influençant l'évolution du biseau salé avec la topographie du substratum comme élément limitant des remontées salines.

La nappe de la Crau est classée en bon état qualitatif et quantitatif dans le SDAGE Rhône-Méditerranée 2016-2021. Le SDAGE fixe donc comme objectif le maintien de ce bon état avec un certain nombre de mesures à mettre en place, notamment au vu de la dépendance de la ressource à une masse d'eau superficielle en déficit quantitatif, la Durance. Le Contrat de Nappe (SYMCRAU 2016b), en cours de mise en œuvre sur le territoire, est le principal outil pour la mise en œuvre du programme de mesure du SDAGE 2016-2021.

#### **VULNERABILITE DE LA NAPPE PHREATIQUE**

La vulnérabilité de la ressource est d'ordre quantitatif et qualitatif. Les enjeux sont également synthétisés dans le diagnostic réalisé pour le contrat de nappe (SYMCRAU 2016a).

D'un point de vue quantitatif :

- une recharge annuelle fortement dépendante de la pratique de l'irrigation agricole à travers plusieurs facteurs : l'économie agricole du foin de Crau, la disponibilité de la ressource en eau des canaux d'irrigation dans un cadre de conflits d'usages forts pour le partage de l'eau de la Durance (hydroélectricité, alimentation en eau potable (AEP) et agricole sur toute la vallée de la Durance, écologie de la Durance, activités touristiques...) ;
- une culture de l'agriculture traditionnelle et du paysage en perte de vitesse qui rend plus difficile la préservation des prairies face à une forte pression foncière liée aux activités industrielles, agricoles ou tertiaires, à une importante croissance démographique et aux aménagements notamment urbains sur un territoire qui cumule de nombreuses protections naturelles ;
- des usages en forte augmentation tant pour les besoins en eau potable que pour les activités économiques ;
- le changement climatique annoncé qui risque d'amputer une partie de la recharge annuelle.

D'un point de vue qualitatif :

- une nappe libre donc naturellement vulnérable aux pollutions ;
- de nombreuses activités anthropiques susceptibles d'engendrer des pollutions diffuses ou accidentelles (dépassements ponctuels du seuil de potabilité sur les nitrates et certains autres paramètres, pollution accidentelle aux hydrocarbures...) ;
- présence du littoral méditerranéen qui induit une problématique de biseau salé (intrusion saline constatée localement et ponctuellement en plusieurs endroits) et dont la fréquence et l'ampleur risquent d'augmenter avec les problèmes quantitatifs évoqués ci-dessus ;
- de même, il est probable que l'effet des pollutions diffuses, relativement atténué par la forte capacité de dilution actuelle de la nappe, soit davantage visible en cas de surexploitation.

Ainsi, malgré son bon état général actuel, l'aquifère de la Crau n'est pas à l'abri de problèmes de surexploitation et de pollutions diffuses ou ponctuelles, dont des indices sont déjà présents aujourd'hui.

Or, la préservation de cette ressource en eau souterraine est un enjeu majeur à la fois d'un point de vue patrimonial, écologique (préservation des milieux humides associés) et paysager mais aussi pour l'alimentation en eau du territoire et des villes voisines (270 000 habitants), puisqu'aucun réseau hydrographique naturel ne traverse la plaine de la Crau.

### 2.1.2 ACTUALISATION 2016 DE LA CARTE D'OCCUPATION DES SOLS

L'occupation des sols (OS) a été réalisée pour le compte du SYMCRAU en 2016, résultant de l'agrégation d'informations cartographiques issues du CRIGE PACA<sup>3</sup>, d'images satellitaires SPOT et photo-aériennes (GeographR 2016). Les détails sur la méthode sont donnés en Annexe 1.

21 classes d'OS ont ainsi été identifiées (figure 6). La répartition spatiale de l'occupation des sols sur l'aire de la nappe phréatique de la Crau, totalisant 50 000 ha, montre que la surface est occupée pour moitié de zones agricoles, dont 14200 ha de prairies irriguées. Les espaces naturels représentent 40% de la surface, dont 14200 ha de coussouls. Enfin les zones urbanisées représentent 10% de la surface (tableau 1).

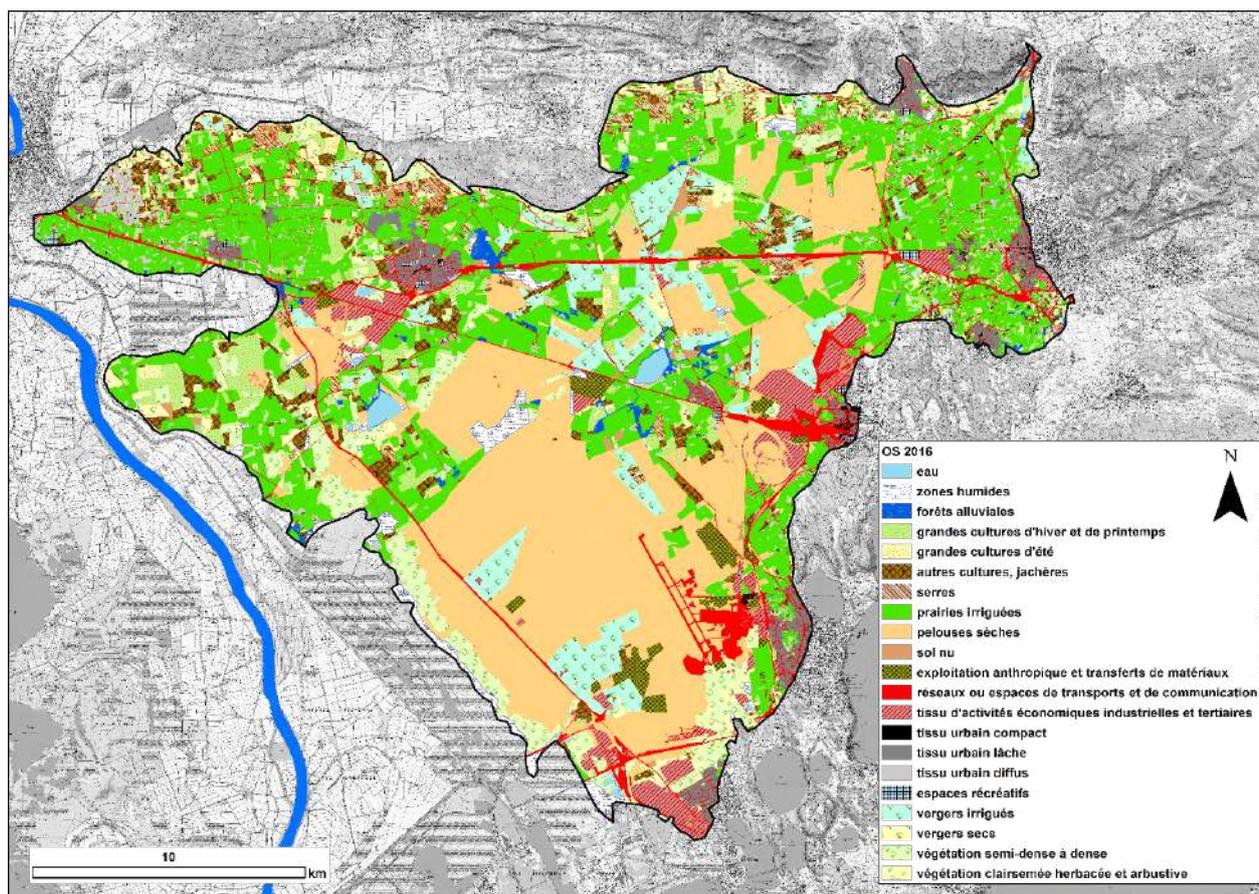


Figure 6 Occupation des sols 2016

	Surface			
	ha	%		
<b>Zones urbanisées</b>	5200	10%		
<b>Zones agricoles</b>	prairies	14200	28%	50%
	autres cultures	11100	22%	
<b>Zones naturelles</b>	coussouls	14200	28%	40%
	autres	5900	12%	

Tableau 1 Occupation des sols sur l'aire de la nappe phréatique

<sup>3</sup> Centre régional de l'information géographique de la Région Provence-Alpes-Côte d'Azur.

### 2.1.3 NOUVELLES DONNEES SUR L'INFLUENCE DES AQUIFERES BORDIERS SUR LA NAPPE DE LA CRAU

La nappe de la Crau est hydrauliquement connectée à des aquifères bordiers (figure 7), qui contribuent à son alimentation (massifs karstiques au nord-est) ou constituent des zones exutoires des eaux souterraines (bordure nord de la vallée des Baux, miocène de Grans drainé par la dépression de la Touloubre). Pour autant l'influence de ces systèmes bordiers sur l'hydrodynamique des eaux souterraines demeure mal connue et les flux proposés dans la littérature scientifique et technique relèvent d'estimations qui mériteraient d'être retravaillées. Il a donc été confié au bureau d'étude HYDROFIS, une mission d'analyse de l'état de la littérature à ce sujet, une identification des aquifères en interaction avec la nappe de la Crau et une estimation des conditions flux entrant et sortant.

Le rapport complet de cette analyse (HYDROFIS 2018a) est fourni en Annexe 2.

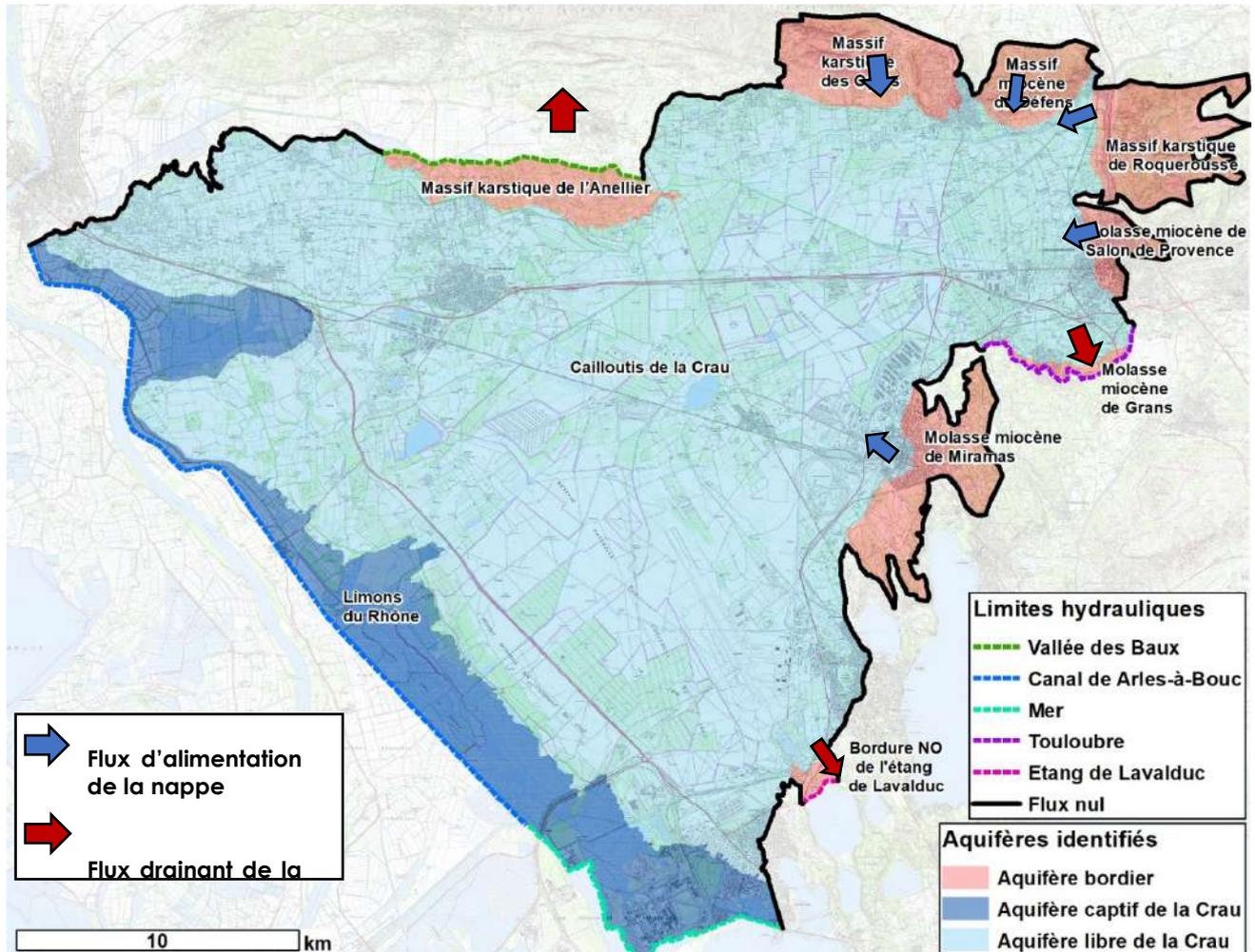


Figure 7 - Aquifères bordiers alimentant ou drainant la nappe de la Crau

Une analyse géomorphologique, structurale et pétrographique des aquifères bordiers conduit à une estimation de la part du ruissellement dans les eaux de pluies, ne participant pas aux volumes d'eau infiltrés dans le sous-sol, et à une estimation de la part des eaux souterraines effectivement drainées vers la nappe de la Crau. Ces coefficients sont indiqués dans le tableau 2.

Aquifère bordier	Cr – Coefficient de ruissellement	P - Contribution des eaux souterraines à la nappe
<b>Massif karstique des Opiès</b>	20%	50%
<b>Massif karstique du Défens</b>	40%	50%
<b>Massif karstique de Roquerousse</b>	10%	80%
<b>Miocène de Salon de Provence</b>	70%	100%
<b>Miocène de Miramas</b>	30%	100%

**Tableau 2 Coefficient hydrologiques estimés dans les aquifères bordiers**

Une analyse combinant les flux de résurgences locales et une estimation des précipitations efficaces a permis une estimation des échanges potentiels entre nappe de Crau et aquifères bordiers, présentés dans le tableau 3.

Massif	Nature des flux pour la nappe de la Crau	Estimation des flux « actuels » (débit fictif continu) Mm3 = millions de m <sup>3</sup>
<b>Partie occidentale de la Dépression des Baux</b>	Drainants mais faibles et localisés	Négligeables dans le processus de modélisation
<b>Massif karstique de l'Anellier</b>	Drainant	De l'ordre de 30 Mm <sup>3</sup> /an (estimation peu fiable)
<b>Partie orientale de la Dépression des Baux</b>	Drainants mais faibles et localisés	Négligeables dans le processus de modélisation
<b>Massif karstique des Opiès</b>	Alimentant	De l'ordre de 1 à 1,5Mm <sup>3</sup> /an
<b>Massif miocène du Défens</b>	Alimentant	De l'ordre de 0.5 Mm <sup>3</sup> /an
<b>Massif karstique de Roquerousse</b>	Alimentant	Entre 2,5 et 3 Mm <sup>3</sup> /an
<b>Molasse miocène de Salon de Provence</b>	Alimentant	Entre 1 et 1,5 Mm <sup>3</sup> /an
<b>Molasse miocène de Grans</b>	Drainant	Environ 1 Mm <sup>3</sup> /an pour la source Marie-Rose, inconnus pour les venues sous-alluviales
<b>Molasse miocène de Miramas</b>	Alimentant	Environ 2 Mm <sup>3</sup> /an
<b>Bordure Nord-Ouest de l'étang de Lavalduc</b>	Drainant	Estimation peu fiable d'environ 3 Mm <sup>3</sup> /an

**Tableau 3 Synthèse des échanges entre nappe de Crau et aquifères bordiers**

D'un point de vue plus général, les flux « perdants » de la nappe de la Crau au profit d'aquifères bordiers seraient comprises entre 30 et 40 Mm<sup>3</sup>/an (fortes incertitudes sur les pertes au profit de l'appareil alluvial de la Touloubre). Les flux « gagnants » pour la nappe sont plus faibles (compris entre 7 et 10 Mm<sup>3</sup>/an selon les estimations).

En comparaison avec les flux totaux de recharge évalués sur la nappe de la Crau, l'étude conclut notamment que « au vu de ces ordres de grandeur, on peut donc considérer comme secondaires, voire anecdotique, la représentation des flux d'alimentation de la nappe de Crau par les aquifères bordiers dans les conditions hydrauliques actuelles. Il nous semble cependant essentiel de bien représenter les flux drainants, notamment ceux du massif de l'Anellier. » L'étude conseille de conserver une représentation explicite des aquifères bordiers alimentant la nappe afin de « contrôler les flux entrants

*dans le domaine modélisé et d'éviter les artefacts de suralimentation en cas de baisse importante de piézométrie dans une configuration hydrodynamique défavorable (nappe sur-sollicitée). »*

#### 2.1.4 ACTUALISATION DE LA GEOMETRIE DU SYSTEME AQUIFERE DE LA CRAU

Depuis les premières études sur la géologie de la Crau, les grandes unités stratigraphiques du sous-sol de la Crau sont assez bien documentées. La géométrie du système, en particulier celle de l'aquifère des cailloutis a fait l'objet de nombreuses analyses et interprétation. Une première cartographie est proposée par le BRGM dans la carte hydrogéologique locale (BRGM 1969). Cette information est utilisée pour produire plusieurs modèles numériques de la nappe de la Crau, par exemple MARTCRAU (BRGM, 1995). Le BRGM reprend en 2004, l'ensemble des données BSS (Banque du Sous-Sol) et étudie les faciès des épanchements de cailloutis rencontrés, pour proposer une carte des isohypses du substratum (BRGM 2004). Une nouvelle interprétation a été donnée par Séraphin (2016a).

L'existence de nouvelles données géologiques renseignées dans la BSS depuis 2004 ou issues des déclarations d'exploitations de forages domestiques à l'ARS a conduit à affiner les connaissances sur la géométrie de l'aquifère de cailloutis de la Crau. Une interprétation récente des campagnes géophysiques, conduites par le secteur pétrolier depuis les années 50, ont également apporté de nouvelles connaissances sur la géométrie des formations anté-pliocènes, notamment la morphologie de l'incision messienne ayant fortement affecté les formations profondes de la Crau et les dépôts constituant le substratum des cailloutis (Depons, 2007).

Une description litho-stratigraphique et tectonique des formations en présence, réalisée par Guiral (2018), est fournie en annexe 3.

Ce chapitre propose une nouvelle interprétation de la géométrie et de la nature des couches constitutives du système aquifère de la Crau, notamment :

- Les limons fluviatiles du Rhône, très perméables
- Les cailloutis plio-quadernaires reconnus comme très aquifère
- Les argiles et sables du Pliocène faiblement perméables comblant les incisions messiniennes et formant un aquitard
- Le soubassement pré-pliocène, largement représenté par les molasses du Miocène, à la perméabilité variable

#### FORMATIONS HOLOCENES

La géométrie du mur des limons du Rhône est renseignée sur les cartes géologiques<sup>4</sup> comme les isohypses du mur des cailloutis plio-quadernaires (figure 8). Cette couche de limons superficiels, atteignant plusieurs dizaines de mètres d'épaisseur en Camargue, marque le passage de la partie libre de la nappe de la Crau (cailloutis affleurants) à sa partie captive (cailloutis sous couverture peu perméable).

---

<sup>4</sup> Cartes géologiques 1/50000 993 Nord Crau, 992 Arles Ouest, 1018 Camargues sud et 1019 Port St Louis

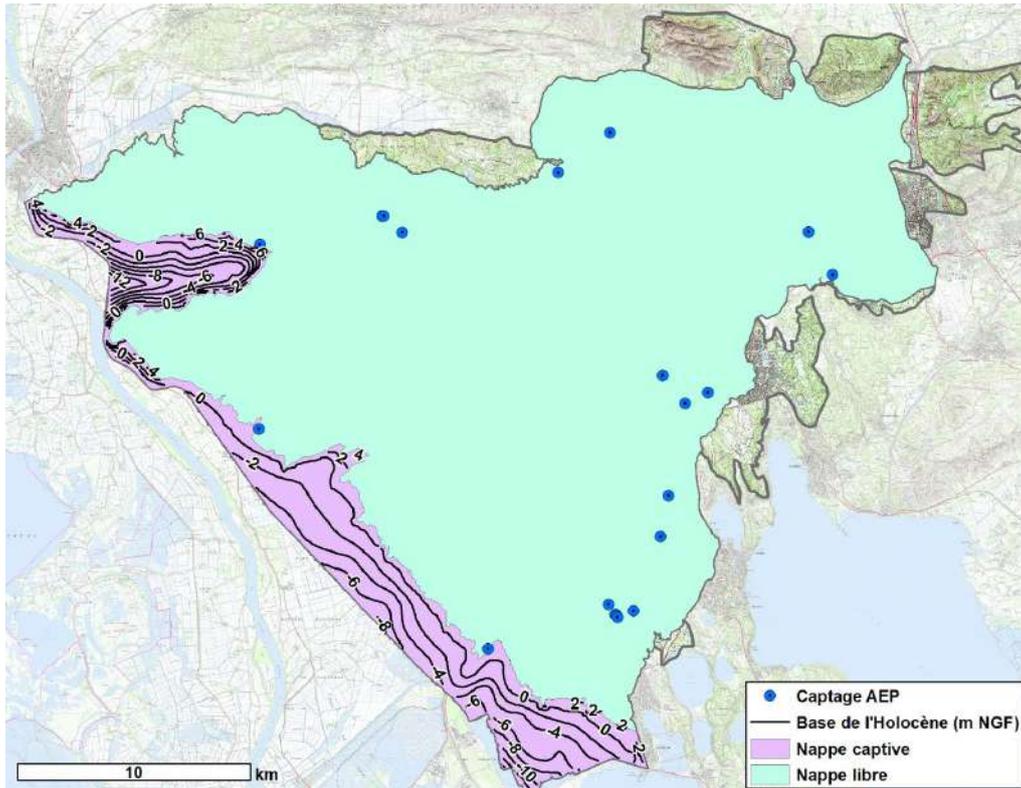


Figure 8 Topographie de la base des limons du Rhône

#### FORMATION DES CAILLOUTIS PLIO-QUATÉNAIRES

Les dépôts cailloutis constitutifs de l'aquifère de la Crau sont constitués de galets roulés, mêlés de graviers localement fins et sableux et cimentés à des profondeurs diverses par des carbonates englobant des sables siliceux, en formant des poudingues. Les principales études sur cette formation sont celles menées par Colomb et Roure (1978, 1986) et l'analyse lithochronologique de Molliex (2013). Le contexte de ces dépôts s'inscrit dans la succession de phases glaciaires et interglaciaires chaudes (ou tempérées) du Pléistocène (2.5 Ma<sup>5</sup>. à environ 50 000 ans) qui alternent les phases de creusement de vallées avec des phases de remblaiement par des épandages alluviaux, en lien avec les évolutions du niveau eustatique (Miller et al. 2005).

Les « cailloutis » formant la nappe de la Crau sont ainsi mis en place durant toute cette période. Les descriptions sont données par Guiral (2018).

#### « Vieille Crau » (Crau de St Pierre de Vence et Crau d'Arles)

« La première période d'épandage de cailloutis de Crau commence au Villafranchien inférieur (environ 2.5 à 1.8 Ma., selon la limite Pliocène-Quaternaire). La zone occupée par ces Cailloutis de Vieille Crau concerne les parties Nord et N-E de la plaine actuelle avec une orientation E-O. Les dépôts qui la caractérisent sont de forme assez complexe. Ces dépôts Durancien sont mis en place dans cette zone du fait du passage de la Durance par de seuil de Saint-Pierre-De-Vence. La Crau d'Arles est séparée en deux unités (inférieure et supérieure) séparées par des marnes lacustres intercalaires. La partie supérieure, Crau de Saint-Pierre-de-Vence, forme la partie supérieure altérée de la Crau d'Arles.

<sup>5</sup> Ma = millions d'années

Une période de transition entre le cycle de « Vieille Crau » et le cycle de « Jeune Crau », daté de la fin du Villafranchien inférieur. La terrasse des Glauges est composée de Quartzites et de roches vertes provenant des massifs cristallins, ses galets ont une taille de 40 à 50 cm. Cette terrasse est le témoin du passage de la Durance par la cluse de Roquemartine. La terrasse d'Entressen est composée de cailloutis à ciment argilo-sableux gris. Cette terrasse est le témoin du passage de la Durance par le pertuis d'Eyguières. »

#### **Terrasses intermédiaires des Glauges, d'Entressen et de Bray.**

« Il s'agit d'une période de transition entre le cycle de « Vieille Crau » et le cycle de « Jeune Crau », daté de la fin du Villafranchien inférieur. La terrasse des Glauges est composée de Quartzites et de roches vertes provenant des massifs cristallins, ses galets ont une taille de 40 à 50 cm. Cette terrasse est le témoin du passage de la Durance par la cluse de Roquemartine. La terrasse d'Entressen est composée de cailloutis à ciment argilo-sableux gris. Cette terrasse est le témoin du passage de la Durance par le pertuis d'Eyguières. »

#### **« Jeune Crau » (Crau du Luquier et Crau de Miramas)**

« Le deuxième cycle d'épandage des cailloutis de Crau se déroule durant les périodes glaciaires du Pléistocène supérieur (130 000 à 12 000 ans), à savoir le Riss et le Würm. Les dépôts sont composés de quartzites et calcaires subalpins avec des galets supérieurs à 15 cm de teinte grise-verdâtre. Ces épandages se mettent en place durant passage de la Durance à cette époque par le seuil de Lamanon après l'abandon du seuil de Saint-Pierre-De-Vence dû au soulèvement des Opies (point culminant du massif des Alpilles).

La jeune Crau est subdivisée en deux grandes zones aux périodes d'épandages successives. La Crau du Luquier et la Crau de Miramas. D'abord la Crau du Luquier, zone de démarcation et d'âge intermédiaire, entre la Crau de Miramas et la Crau d'Arles, d'orientation Nord-Est-Sud-Ouest. Elle couvre une partie de la Crau d'Arles au Nord et disparaissant sous la Crau de Miramas dans sa partie Sud. Ces dépôts sont datés fin de la Glaciation du Riss (130 000 ans), ont une granulométrie plus importante (environ 40 cm) et une altération plus importante que la Crau de Miramas. L'épaisseur maximum de cette formation est de 10 mètres. Ensuite vient se mettre en place la Crau de Miramas (partie la plus récente et le plus à l'Est de la Crau) d'orientation N/NE-S/SO, selon un thalweg entaillé dans les collines d'Istres et de Miramas lors des différentes glaciations du quaternaire. Cette partie s'est mise en place durant Würm (80 000 ans) composée de graviers libres avec parfois des lits sableux ou limoneux gris.

Le passage de la Durance sur la Crau est permanent sur la totalité de la période (2.5 Millions d'années à 50 000 ans) du fait de la présence de dépôts intermédiaire à ces deux grandes phases. (Colomb & Roux, 1978). La vieille Crau a utilisé le seuil de Saint-Pierre-de-Vence avec également la formation des terrasses des Glauges, de Bray et d'Entressen. Puis, lors du décalage vers l'Est, la Durance est passée par le seuil de Lamanon au pléistocène pour former les dépôts de jeune Crau (0.8 à 0.1 Million d'années). Cet épisode est dû à une brusque modification de la topographie à la fin du Villafranchien par un jeu de la faille de l'Anellier. À la fin du maximum glaciaire du Würm (environ 20 000 ans), le jeu dextre de la faille de Salon-Cavaillon crée une rotation des Alpilles et une subsidence du seuil d'Orgon. Cet abaissement du seuil d'Orgon fait dériver la Durance vers le Nord et elle prend alors son tracé actuel d'orientation Sud-Est-Nord-Ouest (Colomb & Roux, 1978). »

En se fondant sur l'analyse du BRGM en 2004 (Roure 2004) et des travaux de Séraphin (2016), complétés d'une analyse de nouvelles données lithologiques, il est proposé une actualisation de l'interprétation du substratum des cailloutis de la Crau (figure 9). Le résultat confirme la structuration géométrique de l'aquifère des cailloutis autour des sillons de Miramas et d'Arles, déjà décrites dans la littérature. Elle ne permet pas de mettre en évidence un troisième sillon parfois évoqué (Séraphin, 2016), même si on peut observer une relative lacune de données dans un secteur au Nord du Mas Thibert.

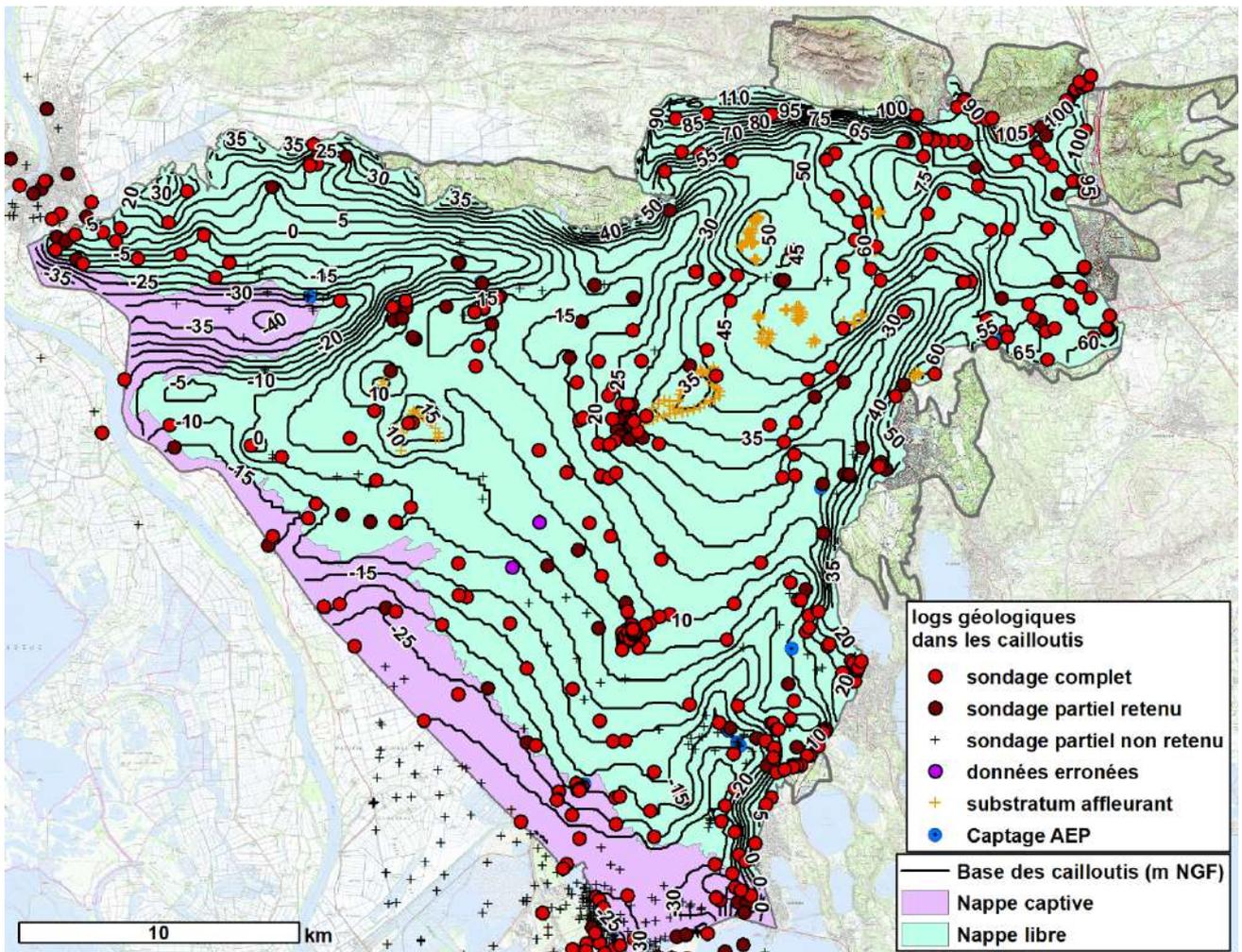


Figure 9 Topographie du substratum des cailloutis de la Crau

#### SERIE ASTIENNE ET PLAISANCIENNE

À la fin du Miocène (5.3 Ma.), une phase tectonique entraîne une surrection des massifs miocènes et un affaissement de la Crau, puis une ouverture de la vallée de la Durance vers la Méditerranée. Durant la crise Messinienne, avec l'abaissement brutal du niveau marin, un surcreusement de la paléo-vallée ainsi qu'une canalisation de la Durance se produit (Terrier 2007). En se basant sur l'analyse de campagne de reconnaissance géophysique par sismique réfraction, Depons (2007) fournit une cartographie des isohypses de l'incision messinienne (-5.3 Ma). Les études montrent que le canyon messinien de la paléo-Durance devait rejoindre le canyon rhodanien à travers la Crau par le col de St-Pierre-de-Vence (Roure 2004). Il représente un creusement des couches géologiques pré pliocène, atteignant 600 m au droit de la Crau (Depons 2007).

C'est au Plaisancien (3.6-2.6 Ma.) qu'une forte transgression marine combinée à la subsidence de la zone engendre un colmatage des vallées par des dépôts marins. Cette série pliocène, constituée d'une épaisse série d'argiles bleues (Plaisancien) à la base et par les sables jaunes (Astien) au sommet (Denizot 1952) met en place le substratum très peu perméable de la nappe de la Crau, dont l'épaisseur pourrait atteindre localement 500 à 600 m (figure 10).

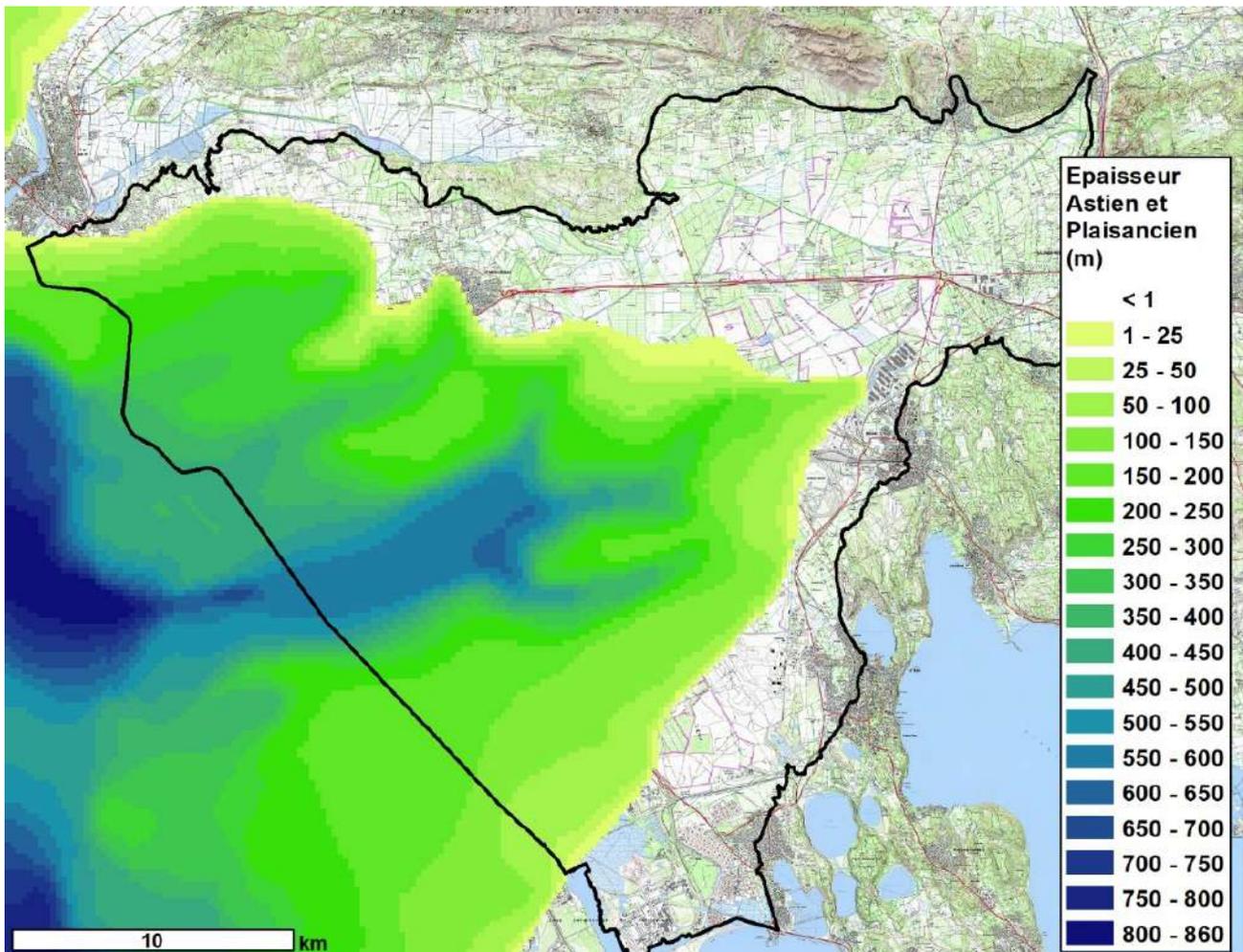


Figure 10 Epaisseur de la série astienne et plaisancienne.

#### NATURE DU SUBSTRATUM DE L'AQUIFERE DES CAILLOUTIS

La localisation des dépôts pré-villafranchiens permet d'approcher une cartographie générale de la nature des séries constitutives du substratum des cailloutis de la Crau (figure 11).

On distingue dans la partie orientale un substratum argileux (Plaisancien), localement sableux (Astien), représenté par la série pliocène pré-villafranchienne. Ce substratum peut être considéré comme très faiblement perméable à localement perméable dans les séries sableuses astiennes. Plus à l'est et au nord, le substratum est constitué par les roches carbonatées pré-pliocène, dominées par la série marine du miocène (marnes sableuses et grès argileux du Tortonien, molasse blanche du Burdigalien). La capacité aquifère de cette série est très variable et généralement plutôt faible. Cette première interprétation de la nature du substratum mériterait d'être confrontée à une analyse plus approfondie des descriptions lithologiques disponibles en Crau.

La comparaison entre le toit de la nappe décrite sur la carte hydrogéologique de référence (BRGM 1969) et la surface du substratum indique qu'une partie de la nappe se situe sous l'aquifère de cailloutis (figure 12). Cet écoulement sous alluvionnaire se situe en particulier au nord-est du territoire où l'épaisseur des alluvions plio-quadernaire diminue. Les couches concernées sont en grande partie les roches carbonatées pré-pliocènes, représentées dans ce secteur par la molasse miocène, semi-perméable. Dans la partie sud-ouest, concernée par un substratum argilo-sableux pliocène, les eaux souterraines s'écoulent dans les cailloutis plio-quadernaire, avec quelques passages dans le substratum au niveau des étangs intérieurs (Entressen et Aulnes) et dans la Crau sèche.

La comparaison entre l'altitude naturelle du sol et le toit de la nappe, estimée en 1969, met également en évidence des secteurs où la nappe émerge, en particulier dans les zones de marais de Meyranne, Chanoines et de la dépression du Vigueirat, mais également dans le secteur des étangs intérieurs (Aulnes, Entressen), dans le secteur de St Martin de Crau, au nord de Salon et au sud d'Eyguières et d'Aureille. Ces zones, généralement drainées, peuvent favoriser l'apparition d'habitats humides, comme décrit au chapitre 2.1.5.

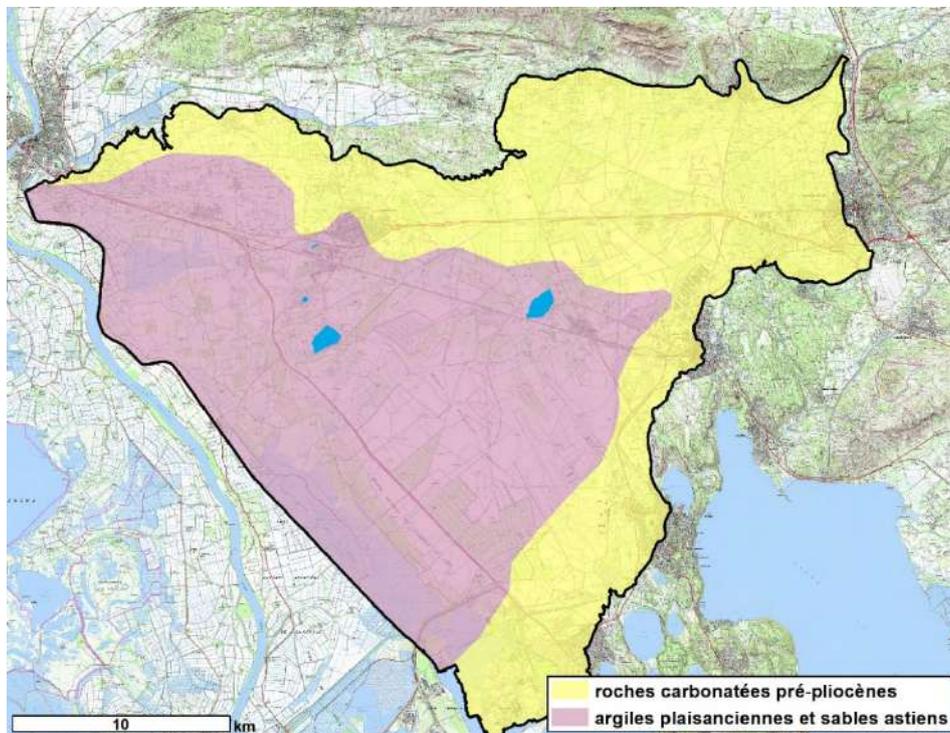


Figure 11 Substratum des cailloutis

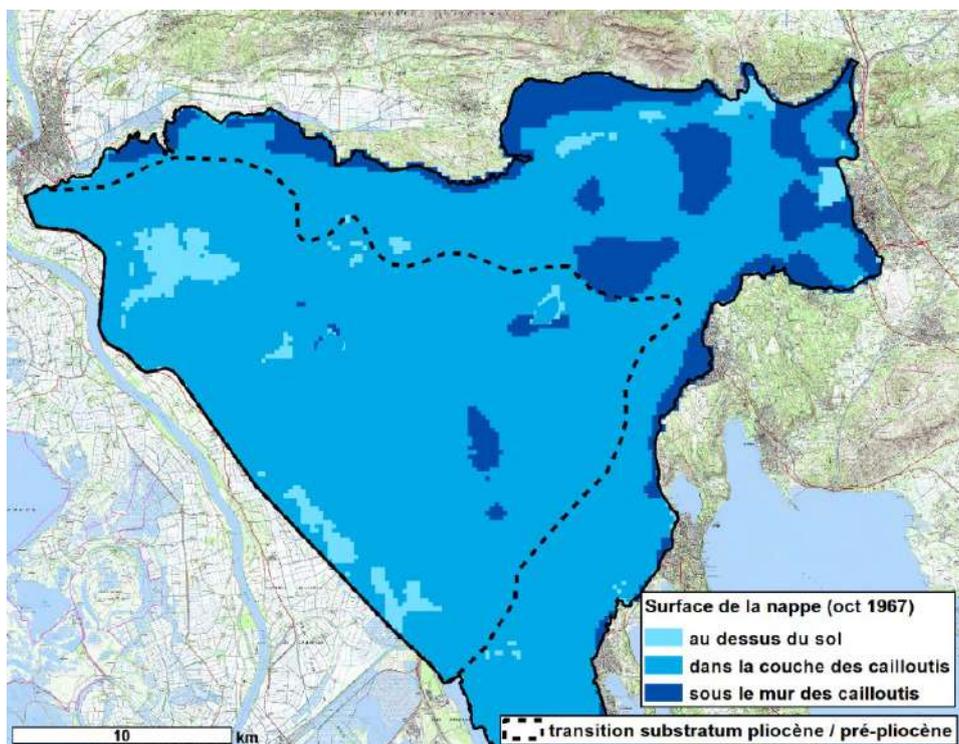


Figure 12 Position du toit de la nappe par rapport au substratum

### 2.1.5 IDENTIFICATION DES ECOSYSTEMES DEPENDANTS DES EAUX SOUTERRAINES

Hormis quelques plans de gestion des zones humides protégées, les études sur le fonctionnement des milieux humides alimentés par la nappe sont incomplètes et ne permettent pas de statuer sur leurs dépendances aux eaux souterraines. Des premières investigations ont été menées par le SYMCRAU dans le cadre de stages de fin d'études universitaires, caractérisant l'influence de la nappe dans les marais de Port-St-Louis (Bonnet 2017), de Meyrannes et de Chanoines (Ros 2016), ainsi que des résurgences de Mouriès, en bordure sud de la Vallée-des-Baux (SYMCRAU 2017).

Il a donc été confié au bureau d'étude ECOSPHERE une étude sur l'identification des zones humides d'intérêt patrimonial susceptibles d'être influencées par l'état quantitatif des eaux souterraines et sur une première caractérisation de leur dépendance aux eaux souterraines.

Le présent chapitre est extrait d'un article publié dans le numéro 202 de la revue *Géologues*, en septembre 2019 (Baillieux et al 2019).

Une grande partie des résultats sont issues du rapport d'étude produit par ECOSPHERE et HYDROFIS (Ecosphère 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* » donné en Annexe 4.

#### 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 de la vallée des Baux (réserve naturelle régionale) et les marais de Beau-champs 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 certains 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 le coussoul. 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 SYMCRAU)



Photo 2 Gentiane des marais, une des espèces qualifiées de « relique glaciaire » associées à la présence de la nappe (crédit Parc Naturel Régional de Camargue)

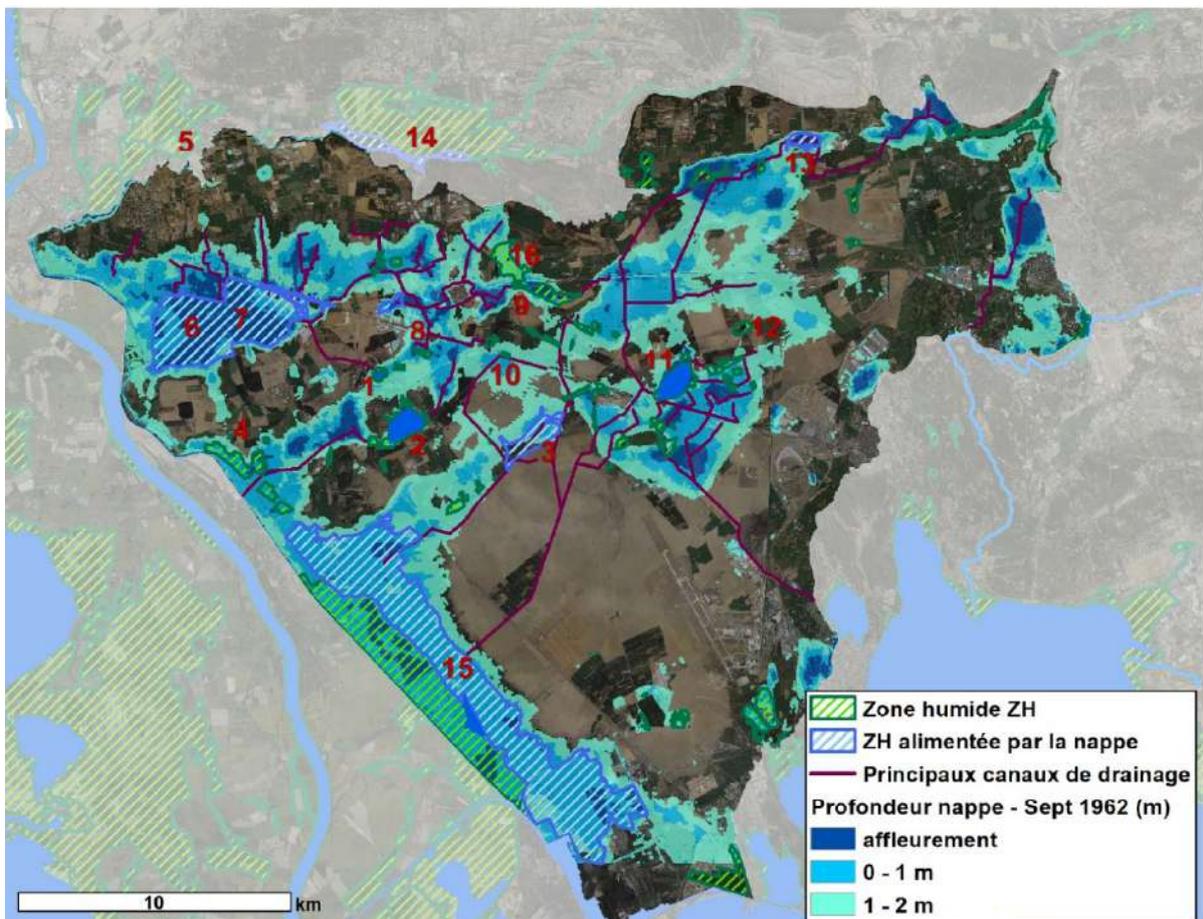


Figure 13 Zones humides sur la plaine de la Crau (secteurs investigués numérotés), profondeur de la nappe et milieux humides dépendants des eaux souterraines

## IDENTIFICATION LES MILIEUX DEPENDANTS DES APPORTS EN EAUX SOUTERRAINES PAR INVESTIGATIONS HYDROGEOLOGIQUES ET ECOLOGIQUES

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 (Ecosphère 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 2018b), et par observation de terrain de la turbidité des eaux (les eaux ruisselantes étant généralement plus turbides que les eaux souterraines).

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

**Tableau 4 Synthèse des habitats et espèces remarquables et qualification de la dépendance aux eaux souterraines (ECOSPHERE 2018). Les numéros permettent de localiser les sites sur la figure 13.**

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 (figure 13), permettant de préciser les modes d'alimentation en eau des zones humides (Tableau 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 13 : secteur striés en bleu) ; (2)

des habitats humides plus communs alimentés exclusivement par les eaux de 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.

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

## 2.1.6 ACTUALISATION DE L'ESTIMATION DES PRELEVEMENTS EN NAPPE

La définition d'un état de référence de la ressource rend nécessaire de réactualiser l'estimation des volumes d'eau actuellement prélevés dans la nappe.

Différents types de prélèvements peuvent être distingués :

- **captages domestiques collectifs (collectivités ou assimilés).**
- **captages domestiques privés.**
- **captages industriels ou secteur tertiaire.**
- **captages agricoles pour les cultures irriguées.**

Les milieux naturels peuvent également exercer un prélèvement racinaire d'eau souterraine, afin de répondre aux besoins des plantes non satisfaits par les pluies. Néanmoins, les méthodes mobilisées en Crau ne permettent pas de quantifier la consommation d'eau par les plantes, l'évaluation de ce flux n'est donc pas traitée dans cette étude.

### CAPTAGES PRIVÉS

Les dernières estimations effectuées sur les prélèvements domestiques individuels ont été réalisées par le bureau d'étude GINGER en 2009 dans le cadre du bilan quantitatif de la nappe de la Crau<sup>6</sup>.

A partir d'une analyse des données d'assainissement autonome et d'un ratio de consommation appliqué à chaque unité, il est estimé que les prélèvements domestiques individuels sont d'environ 1,5 Mm<sup>3</sup> sur la Crau. A ce chiffre il faut ajouter les déclarations à l'ARS des prélèvements pour les logements privés collectifs, qui s'élèverait à 860 000 m<sup>3</sup>/an.

En conclusion, les prélèvements privés pour des usages domestiques peuvent être évalués à environ 2.5 Mm<sup>3</sup>/an.

### ALIMENTATION EN EAU POTABLE PUBLIQUE

Les prélèvements AEP sont regroupés autour de 17 captages alimentant les populations de la Crau, y compris la base militaire BA125 et la zone portuaire GPMM. La base de données de l'Agence de l'eau indique un prélèvement moyen de 24 Mm<sup>3</sup>/an entre 2012 et 2016, avec une variation interannuelle relativement faible établie autour de 1 Mm<sup>3</sup> (figure 14). Les plus gros prélèvements se situent au captage de St Hippolyte avec près de 12 000 m<sup>3</sup>/jour, pour la commune d'Arles (figure 15).

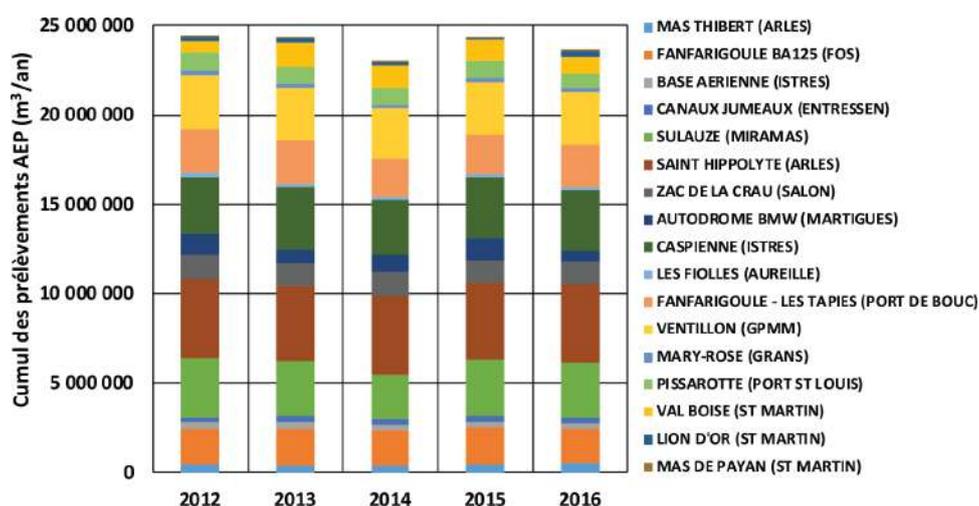


Figure 14 Prélèvements annuels des captages AEP.

<sup>6</sup> GINGER 2009 Diagnostic qualitatif / quantitatif de l'évolution des risques sur la nappe de la Crau – Phase 1 : Diagnostic général de la Crau – Bilan quantitatif

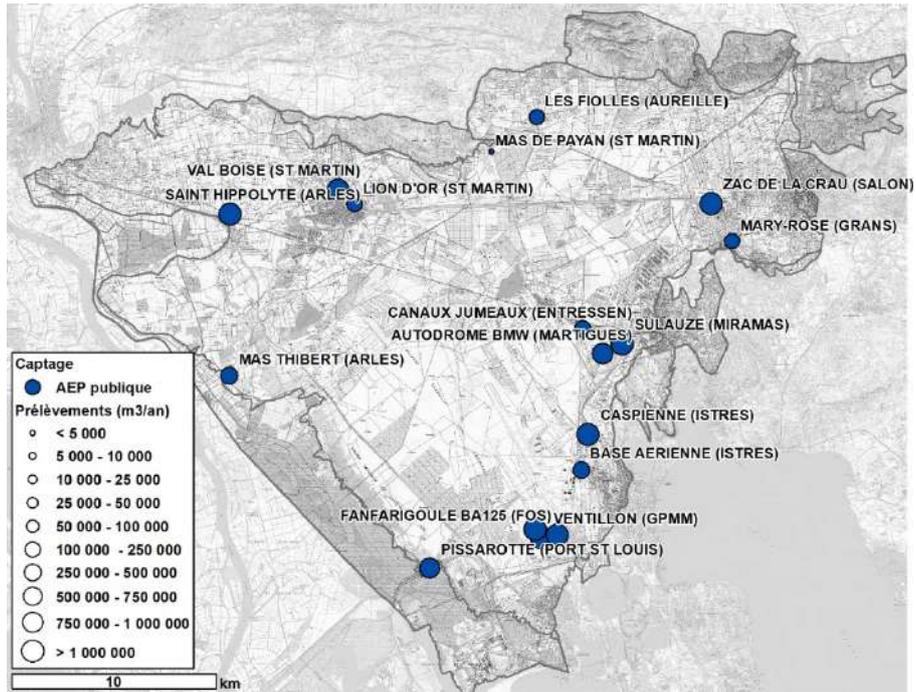


Figure 15 localisation des captages AEP collectifs.

### PRELEVEMENTS INDUSTRIELS

La base de données de l'Agence de l'eau indique que les prélèvements industriels représentent 11 captages pour un volume annuel moyen s'établissant autour de 12 Mm<sup>3</sup> entre 2012 et 2016. Les volumes prélevés sont largement dominés par le captage de la raffinerie ESSO (45%), le captage de la raffinerie TOTAL (32%) et le captage industriel du GPMM (16%)

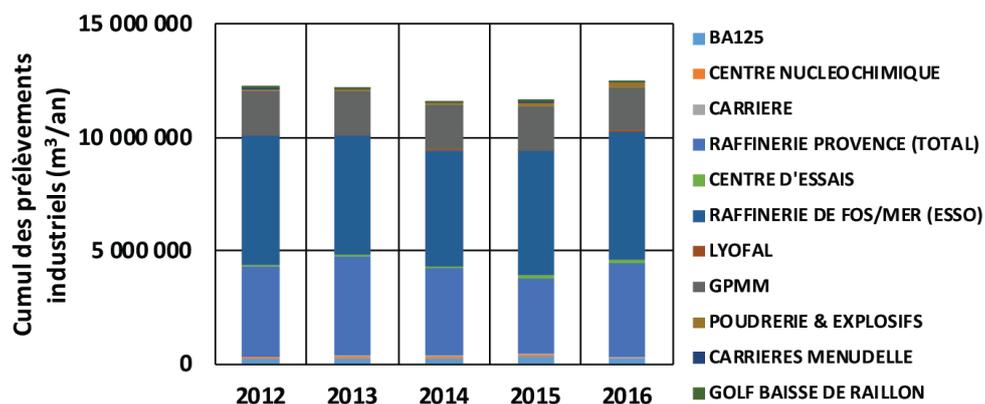


Figure 16 Prélèvements annuels des captages industriels

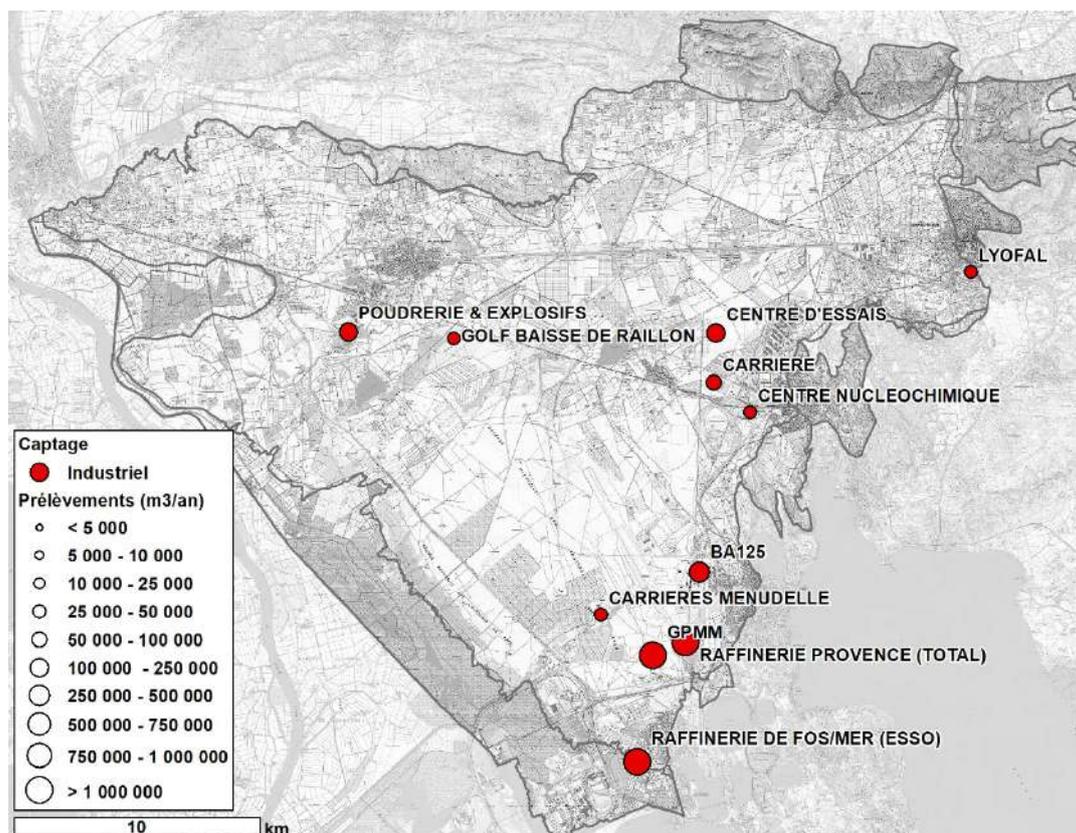


Figure 17 Localisation des captages industriels

### PRELEVEMENTS AGRICOLES

Les prélèvements agricoles en Crau sont partiellement connus. Un OUGC<sup>7</sup> permet aux irrigants de s'enregistrer. Si les mécanismes financiers, actuellement mis en place, et législatifs<sup>8</sup> incitent les agriculteurs à déclarer au plus juste leurs consommations dans la base de données de l'OUGC, les moyens de contrôles ne permettent pas de vérifier efficacement l'exactitude et l'exhaustivité des données renseignées.

Une estimation des prélèvements agricoles a été mise en œuvre en rapportant les prélèvements renseignés dans la base de données de l'OUGC, en fonction du type de culture et des surfaces irriguées, aux occupations agricoles relevées dans la carte d'occupation des sols (cf. chapitre 2.1.2).

#### Consommation surfacique moyenne basée sur les déclarations à l'OUGC :

En se basant sur les déclarations fournies par l'OUGC pour l'année 2016, il a été procédé à un premier tri des données, en ne conservant que les déclarations détaillant : les coordonnées géographiques des forages, les types de cultures, les surfaces irriguées, les volumes prélevés en 2016. Soit 183 déclarations sur un total de 389 (figure 17).

Les prélèvements moyens par type de culture sont calculés comme étant la somme des prélèvements rapportée à la somme des surfaces déclarées. L'écart type montre une forte variabilité des consommations à l'hectare au sein des mêmes types de cultures (tableau 5)

<sup>7</sup> OUGC : Organisme Unique de Gestion Collective des prélèvements agricoles, en charge de faire une demande d'autorisation pluriannuelle au service de la Police de l'Eau, porté en Crau par la Chambre d'Agriculture 13.

<sup>8</sup> L'article L214-8 du code de l'environnement rend obligatoire un comptage des volumes prélevés pour des forages non domestiques soumis à autorisation ou déclaration (L2014-6 du CE), un entretien du dispositif et une conservation des données durant 3 ans.

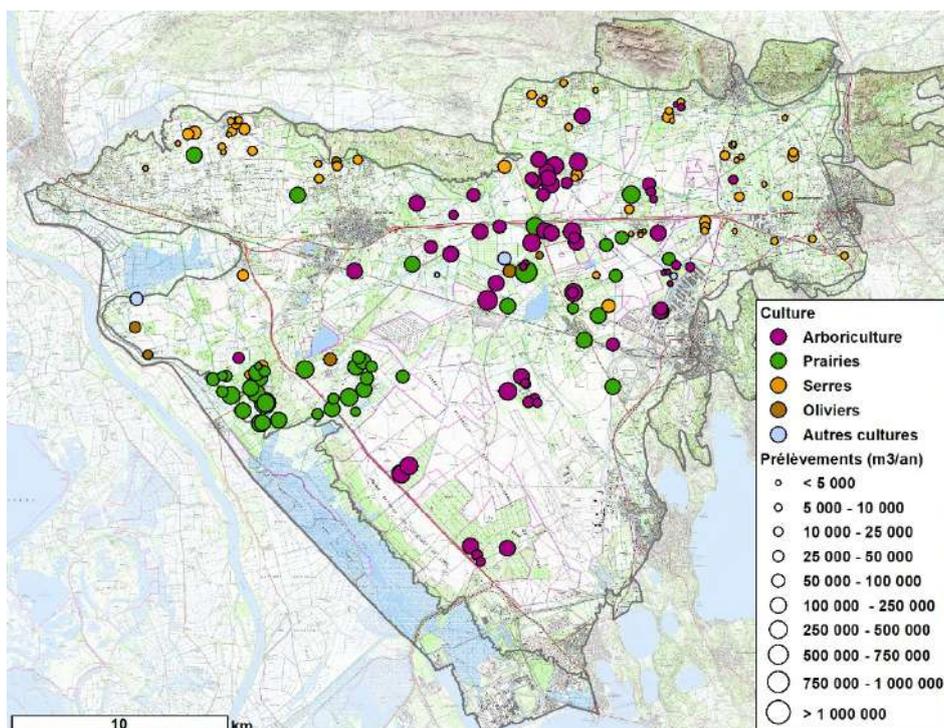


Figure 17 Localisation des captages agricoles déclarés à l'OUGC en 2016

Culture	Nombre de forages	Surface irriguée	Volume consommé en 2016	Consommation minimale [m <sup>3</sup> /ha/an]	Consommation maximale [m <sup>3</sup> /ha/an]	Écart type consommation [m <sup>3</sup> /ha/an]	Consommation moyenne [m <sup>3</sup> /ha/an]	Consommation moyenne [mm/an]
Arboriculture	63	1 760	8 350 449	10	33 583	5 776	4 745	475
Foin	45	1 252	8 892 542	915	266 667	38 931	7 106	711
Grandes cultures	2	35	159 570	3 730	6 368	1 865	4 559	456
Marai-chage	63	183	941 726	100	150 000	19 713	5 134	513
Vergers secs	7	221	200 156	87	3 045	1 294	906	91
Autres cultures	3	16	12 197	663	5 000	2 226	785	78
<b>Total</b>	<b>183</b>	<b>3 466</b>	<b>18 556 640</b>					

Tableau 5 Analyses statistiques des déclarations de prélèvements agricoles à l'OUGC en 2016

Agrégation des données statistiques sur les surfaces agricoles identifiées :

Il est procédé à une estimation de la répartition spatiale des prélèvements agricoles en croisant la répartition des surfaces agricoles avec les statistiques de prélèvements à la surface (tableau 6). Les points de prélèvements sont ensuite appliqués au barycentre de chaque parcelle agricole. Afin de limiter le nombre de points de prélèvement, pour chaque catégorie de culture l'ensemble des prélèvements sur une maille de 1 km<sup>2</sup> est agrégé en un seul point en position moyenne.

Il en résulte 760 forages simulés auxquels s'ajoutent 30 forages de prairies irriguées déclarés à l'OUGC en dehors du secteur de Mas-Thibert, soit un total de 790 captages agricoles (figure 18).

	Prélèvements annuel (m <sup>3</sup> )	Surface (ha)	Prélèvement (m <sup>3</sup> /ha)	Méthode de calcul
<b>Arboriculture</b>	15 266 863	3 217	4 745	Déclaration OUGC 2016
<b>Prairies hors secteur Mas-Thibert</b>	6 718 260	931	7 216	Déclaration OUGC 2016
<b>Prairies secteur Mas-Thibert</b>	5 439 307	363	15 000	Dire d'expert
<b>Serres</b>	3 946 892	769	5 134	Déclaration OUGC 2016
<b>Oliviers secteur Crau</b>	542 191	598	906	Déclaration OUGC 2016
<b>Oliviers AOC Baux-de-Provence</b>	133 005	734	181	20% déclaration OUGC 2016
<b>TOTAL</b>	32 046 517	6 612		
<b>Irrigation moyenne</b>	4 846 m <sup>3</sup> /ha			

Tableau 6 Prélèvements agricoles annuels moyens à l'hectare et totaux appliqués estimés sur la nappe

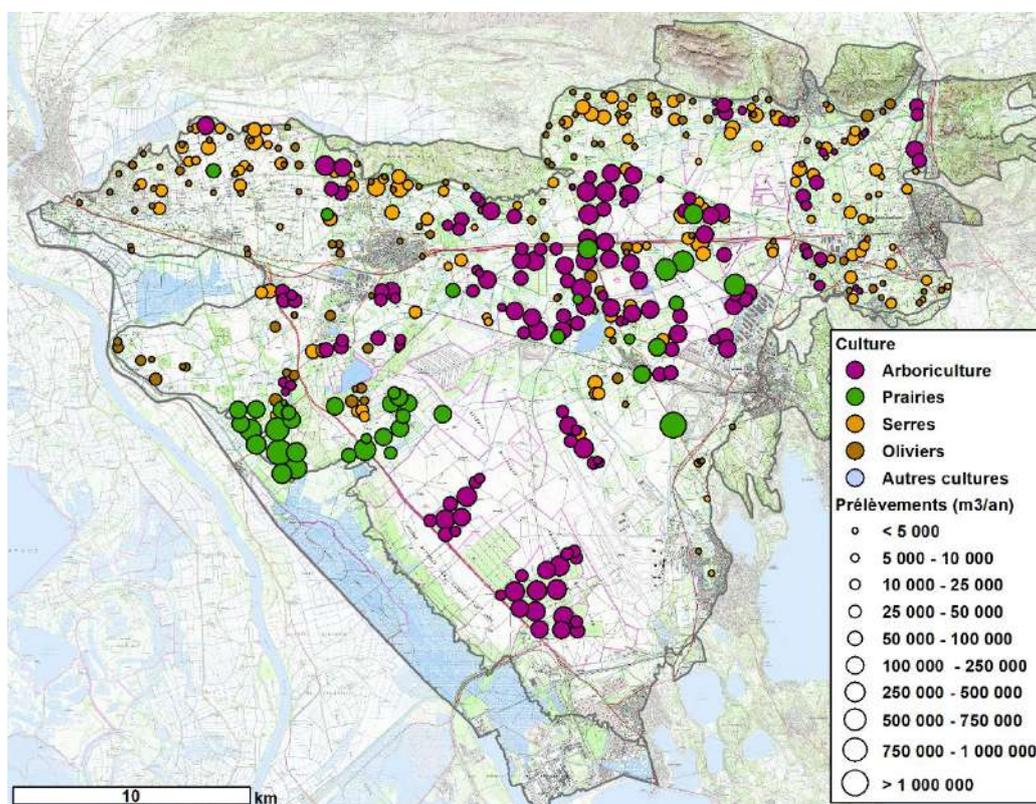


Figure 18 Localisation des points de prélèvements estimés

## BILAN DES PRELEVEMENTS EN CRAU

On peut estimer un prélèvement actuel total dans la nappe d'environ 71 Mm<sup>3</sup>/an (figure 19), avec l'agriculture comme principale catégorie d'activités consommatrice d'eau (32 Mm<sup>3</sup>/an), suivi de l'alimentation en eau potable publique (24 Mm<sup>3</sup>/an), les activités industrielles (12 Mm<sup>3</sup>/an) et enfin les besoins domestiques privés (2.5 Mm<sup>3</sup>/an). La figure 20 illustre la localisation des prélèvements estimés en Crau.

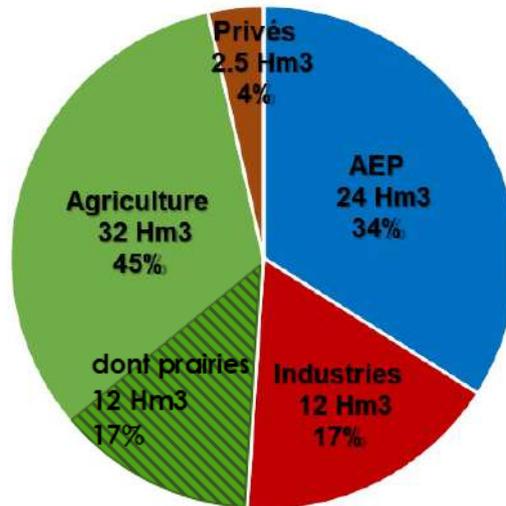


Figure 19 Répartition statistique des différentes catégories de prélèvements en Crau

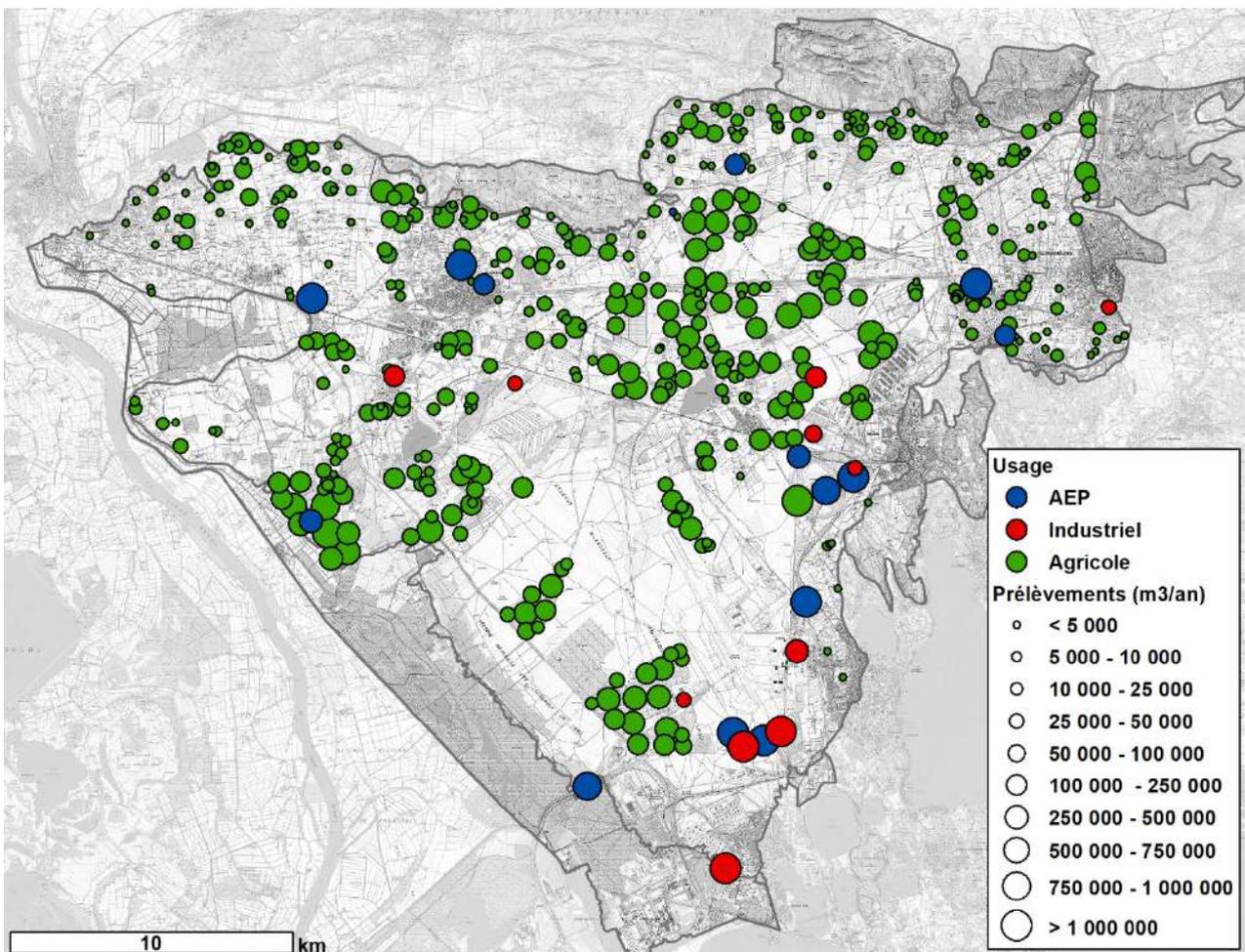


Figure 20 Prélèvements estimés dans la nappe de la Crau.

### 2.1.7 ANALYSE DE REPRESENTATIVITE DU RESEAU D'OBSERVATION PLUVIOMETRIQUE DE LA CRAU

La plaine de la Crau est caractérisée par une distribution contrastée des pluies, probablement favorisée par le contexte géomorphologique (relief au nord) et littoral. Nous proposons ici une description de cette distribution à travers une analyse des données disponibles sur le territoire.

#### DISTRIBUTION SPATIALE DES PLUIES SUR LA CRAU

Les mesures climatiques sont issues des stations climatiques présentes sur le territoire, gérées par le CIRAM (St Martin de Crau, Arles Mas Rey, Arles Mas Thibert, Eyguières Mas Chaud, Port de Bouc), l'INRAE (Salon Domaine du Merle, Fourques) et METEO-France (Istres, Salon). Les moyennes mensuelles entre 2011 et 2018, récoltées sur la plateforme Infoclimat ou auprès des gestionnaires de station, sont présentées au tableau 7. Les résultats confirment la variabilité spatiale des pluies variant de 495 à 672 mm/an (moyenne entre 2011 et 2018).

Une cartographie de ce cumul annuel à l'aide de la méthode des polygones de Thiessen (figure 21) ne permet pas de dégager de tendances très nettes. Les cumuls les plus importants se situent au nord, sur le massif des Alpilles et à l'Ouest, dans la partie septentrionale de la Camargue (> 640 mm/an). Dans le secteur nord de la Crau (secteur St Martin de Crau et Salon de Provence), les cumuls sont médians entre 580 et 620 mm/an. Dans le secteur de la Crau sèche, aux alentours de la base aérienne d'Istres, les cumuls moyens sont inférieurs à 500 mm/an. Sur le pourtour de la Crau, la situation est assez contrastée avec des cumuls variant de 530 mm/an dans le secteur de Marignane à 600 mm/an à Port de Bouc.

STATION	SURFACE SUR NAPPE (KM <sup>2</sup> )	JANV	FEVR	MARS	AVR	MAI	JUIN	JUIL	AOUT	SEPT	OCT	NOV	DEC	CUMUL ANNUEL
ISTRES	143	51.5	40.2	49.6	61	30.6	12.7	17.6	23.7	26.7	59.5	93.4	28.7	495.3
MARIGNANE	0	47.1	39	45.3	41.2	33	35.6	22.2	28.8	33.3	78.7	93.4	29.4	527.1
SALON	14	54.7	43.4	57.4	46.3	31.8	36.9	24.9	35	30.8	80.7	102.2	31.9	575.8
SALON MERLE	82	55.6	43.3	58.1	55.7	34.8	36.1	24.6	31.9	34.4	91.2	96.6	29.7	592.1
FOURQUES	0	55.8	31.9	59.6	66.6	38.8	34.4	31.4	27.3	44.8	67.9	115.4	24	597.9
SMC S	140	57.4	44.7	55	67.1	41.5	31.2	25.8	28.3	39.7	79.6	103.1	27.9	601.2
PORT DE BOUC SJ	2	65.7	45	55.6	58	29.6	28.6	17.3	38.7	29.6	74.3	124.3	37.6	604.2
ARLES MAS REY	19	56.7	41.9	61.3	66.1	41	37.7	31.8	33.2	43	74.1	131.5	27.3	645.6
ARLES MAS THIBERT	120	71	62	58.2	69.9	43.7	34	15.5	49.1	26.9	97.1	100.5	34.9	662.9
EYGUIERE MAS CHAUD	15	69.9	50.8	63.5	67	39.3	34.2	29.9	26.4	28.6	92.8	137.8	32.8	672.9
MOYENNE PONDEREE	535 (cumul)	58.9	47.2	55.3	63.7	37.7	28.1	21.4	32.6	32.1	80.1	101.0	30.2	588.3

**Tableau 7 Moyenne des cumuls mensuels et annuels des pluies entre 2011 et 2018 par station et selon la moyenne pondérée par l'aire des polygones de Thiessen**

#### REPRESENTATIVITE DE LA STATION SALON – DOMAINE DU MERLE

De nombreuses stations climatiques couvrent le territoire, mais seulement les stations Météo France et INRA fournissent les données d'entrées essentielles au modèle MHYCRAU (cf chapitre 3) : températures minimales et maximales, précipitations, vent moyen, rayonnement solaire et pression de vapeur au pas de temps journalier (cf chapitre 2.2). La précédente version du modèle s'appuie sur les données fournies par la station climatique « Salon Domaine du Merle ». Il convient d'en vérifier la représentativité sur la période de référence du modèle, soit entre 2011 et 2018.

Le cumul annuel moyen de la station du domaine du Merle, s'établissant à 592 mm/an, est la plus proche de la moyenne pondérée des cumuls annuels, qui est de 588 mm/an (tableau 7).

La figure 22 présente les coefficients de corrélation calculés entre les cumuls mensuels sur chacune des stations et la moyenne pondérée par mois. Selon ce calcul, la station du domaine du Merle est la plus proche des moyennes pondérées sur la Crau (coefficient de corrélation de 0,95).

Il peut donc être conclu que la station du Domaine du Merle est représentative des conditions de précipitations moyennes sur la plaine de la Crau. Concernant les conditions climatiques s'établissant sur les massifs karstiques alimentant la nappe de la Crau, réputées différentes des conditions en plaine, le chapitre 2.2.3 propose des facteurs correctifs.

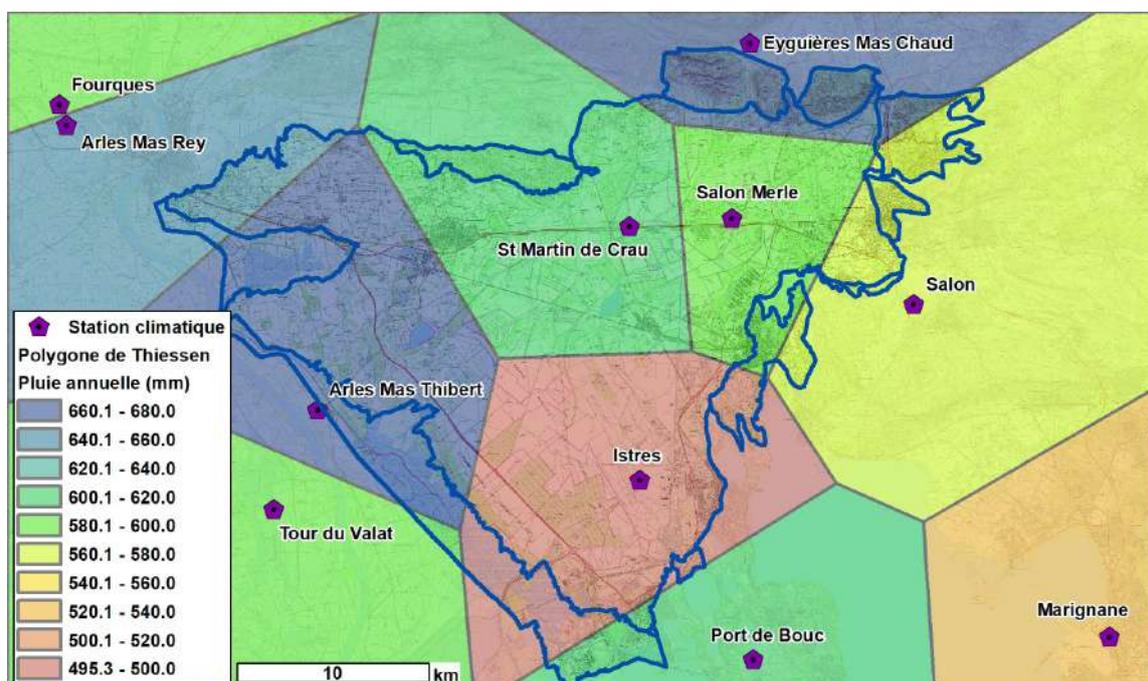


Figure 21 Localisation des stations climatiques dans le secteur de la plaine de la Crau et distribution des polygones d'influence (méthode de Thiessen)

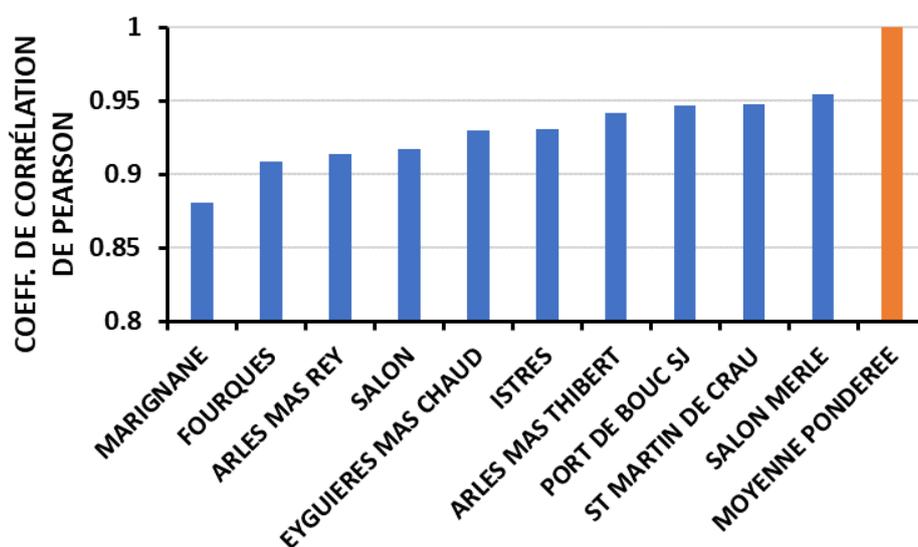


Figure 22 Coefficient de corrélation des chroniques de pluies 2011 - 2018 entre chaque station climatique et la moyenne pondérée par la surface d'influence

## 2.1.8 ANALYSE SPATIALE DES DYNAMIQUES PIEZOMETRIQUES DE LA NAPPE

### OBJECTIFS

Le projet SINERGI s'intéresse à mieux comprendre les facteurs influençant l'état de la ressource en eau, à travers des indicateurs localisés. En fonction des conditions hydrogéologiques (géométrie, perméabilité, emmagasinement) et de forçage externe évoluant lentement (occupation des sols, prélèvements), la réponse piézométrique à des changements de conditions de recharge, peut être spatialement très contrastée ou homogène dans certains secteurs.

La cartographie des espaces où la ressource évolue de manière cohérente permet d'optimiser la sélection des indicateurs et leur nombre. Cette note s'intéresse à analyser spatialement la cohérence des chroniques piézométriques observées sur la nappe de la Crau sur des temps longs pour dégager les secteurs de comportement homogène.

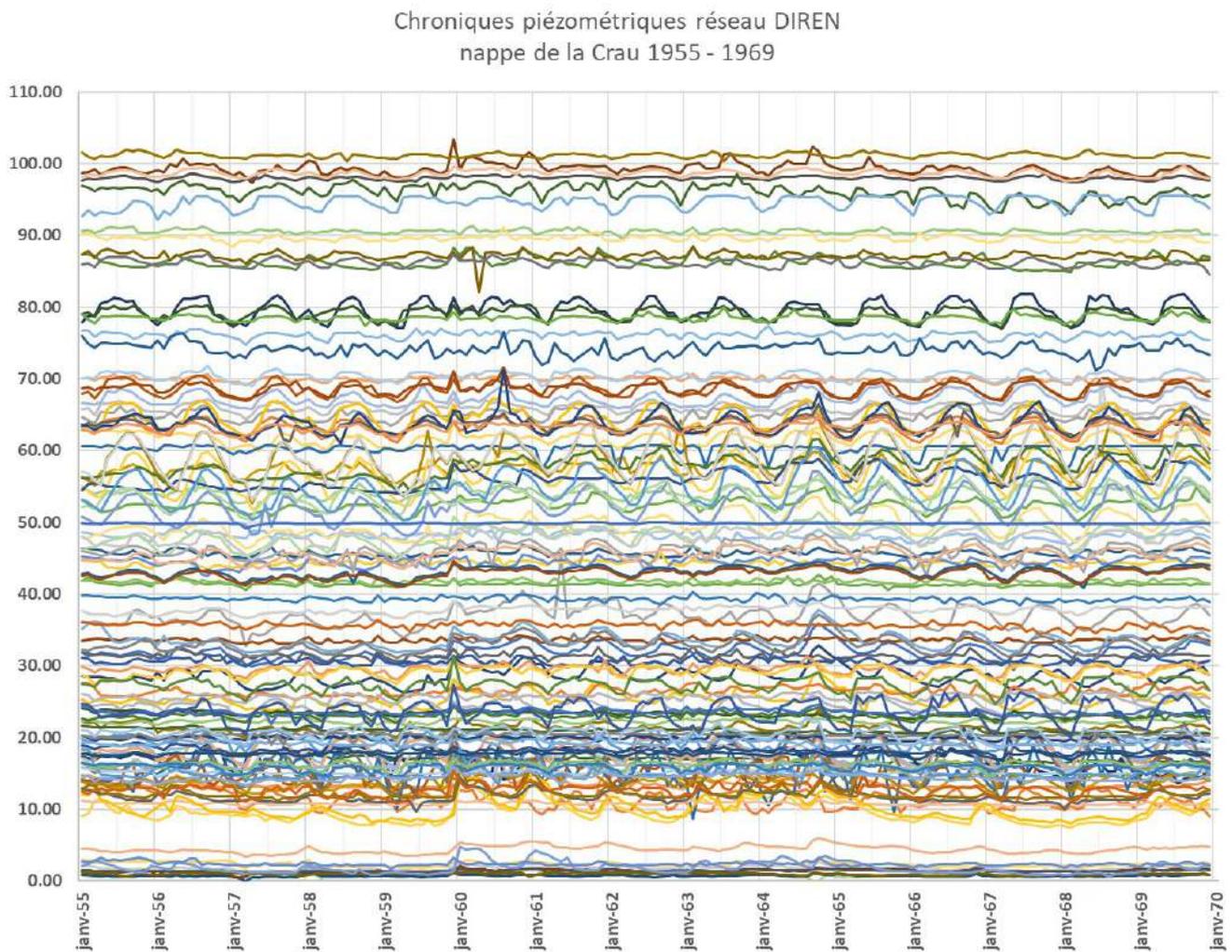


Figure 23 Chroniques piézométriques 1955-1969

### METHODE

L'analyse de corrélation permet de délimiter des secteurs ayant une dynamique piézométrique similaire (Prinos, Scott T., 2005). Il est analysé la corrélation existante entre les données piézométriques recueillies entre 1955 et 1969 (122 points, figure 23), puis entre 2013 et 2018 (32 points). La corrélation est calculée sur les données piézométriques au pas de temps mensuel. L'indice de similarité est estimé par le calcul du coefficient de corrélation de Pearson (recherche de la corrélation linéaire entre les variables) et celui de Spearman (recherche d'une corrélation non linéaire).

Une fois la matrice de similarité produite, il est effectué une classification ascendante hiérarchique<sup>9</sup> (CAH) des données en fonction de la matrice similarité des individus calculée selon la méthode précédente. La CAH est représenté sous la forme d'un dendrogramme.

## RESULTATS ET INTERPRETATION

La figure 24 montre que les différentes analyses statistiques proposent des regroupements assez cohérents, variant légèrement d'une méthode à l'autre (Pearson/Spearman) et de manière légèrement plus significative d'une période à l'autre (1955-1969 / 2013-2018).

Les variations entre méthodes sont explicables par la nature du lien de corrélation estimé : pour Pearson il est recherché une relation linéaire, c'est-à-dire, des variations piézométriques qui évoluent dans le même sens avec un coefficient de corrélation linéaire. Dans le cas de Spearman, il est recherché les piézomètres qui ont tendances à se trouvé dans la même fréquence d'apparition des évènements. Les deux méthodes sont donc complémentaires.

Les variations d'une période à l'autre peuvent s'expliquer d'une part par la différence entre la taille de l'échantillon (nombre d'individus et variables piézométriques plus longues), et d'autre part par les conditions de recharge et de prélèvements qui ont pu évoluer entre ces deux périodes.

Cependant, en cumulant les groupes constitués (figure 25), on retrouve une certaine cohérence des résultats, permettant de distinguer 10 zones à l'intérieur desquelles les variations piézométriques présentent une cohérence significative (Figure 26).

Le regroupement de ces zones, tenant compte de la proximité des groupes, permet de mettre en évidence 5 grandes zones (Figure 27). En tenant compte des connaissances du terrain nous pouvant proposer les interprétations suivantes :

- Une zone amont (vert) caractérisée par la présence des prairies irriguées et dont la recharge est principalement contrôlée par la pratique de l'irrigation gravitaire
- Une zone de transition (violet) correspondant au sillon de Miramas, dont la piézométrie est influencée par la fonction de drain exercé par ce sillon
- Une zone aval (bleu) dont la dynamique piézométrique semble assez dissociée des pratiques d'irrigation et semble contrôlé par les précipitations efficaces
- Une zone intermédiaire (orange) caractérisé par un substratum proche de la surface. Cette zone a une dynamique piézométrique plus inhomogène, contrôlée à la fois par les pluies, l'irrigation et des phénomènes de drainage (canaux et étangs).
- Une zone à l'est (jaune), avec un comportement piézométrique plus inhomogène influencé par des effets de bordure. Le piézomètre PZ23, en bordure de l'aquifère au nord de Salon et présentant un comportement singulier, peut être rattaché à cette zone.

En tenant compte de l'hétérogénéité des réponses au sein de la zone de hauts fonds et de la zone de bordure, par ailleurs de taille très modeste, on peut retenir 3 zones significatives avec une cohérence de dynamique piézométrique marquée sur la nappe de la Crau : zone de recharge contrôlée par l'irrigation (vert), zone de recharge contrôlée par les pluies (bleu) et la zone de drainage (violet).

---

<sup>9</sup> Cf : <https://perso.univ-rennes1.fr/valerie.monbet/ExposesM2/2013/Classification2.pdf>

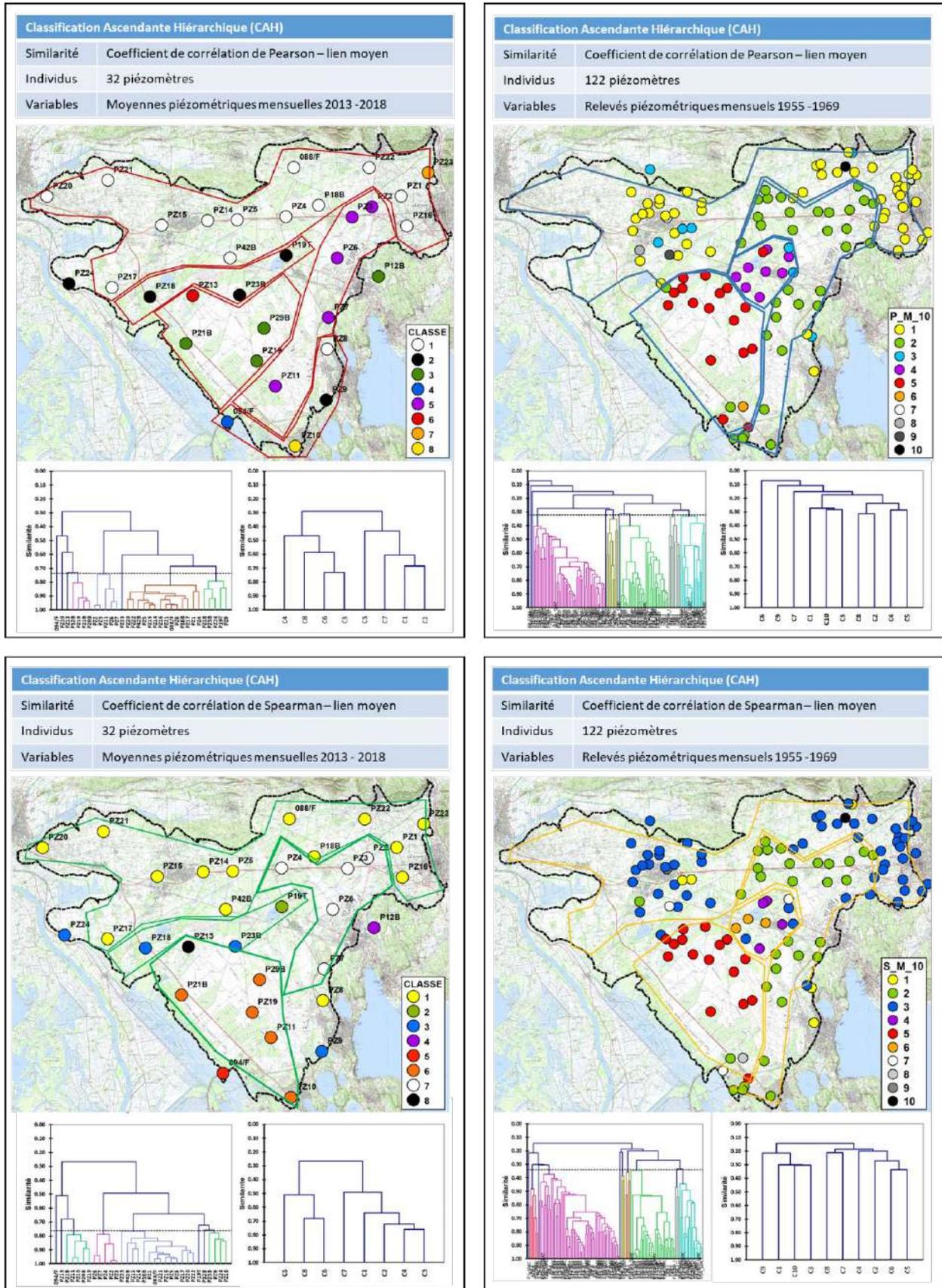


Figure 24 Répartition spatiale des groupes constitués par l'analyse ascendante hiérarchique

## CONCLUSION

Le calcul de corrélation statistique sur les variations piézométriques, appliquée au réseau de surveillance 1955-1969 et 2013-2018, permet de distinguer trois grandes zones en termes de variabilité des niveaux de nappe. Le fait de travailler sur différentes échelles temporelles permet de consolider le résultat. Les grands facteurs influençant la répartition spatiale de la réponse piézométrique sont les conditions hydrogéologiques (perméabilité, géométrie, emmagasinement) et les conditions de recharge, la présence de prairies irriguées qui conditionne les flux de recharge.

Pour SINERGI, cette caractérisation permet de minimiser le nombre d'indicateurs décrivant l'état piézométrique au sein de ces zones, notamment les captages agricoles très nombreux sur le territoire.

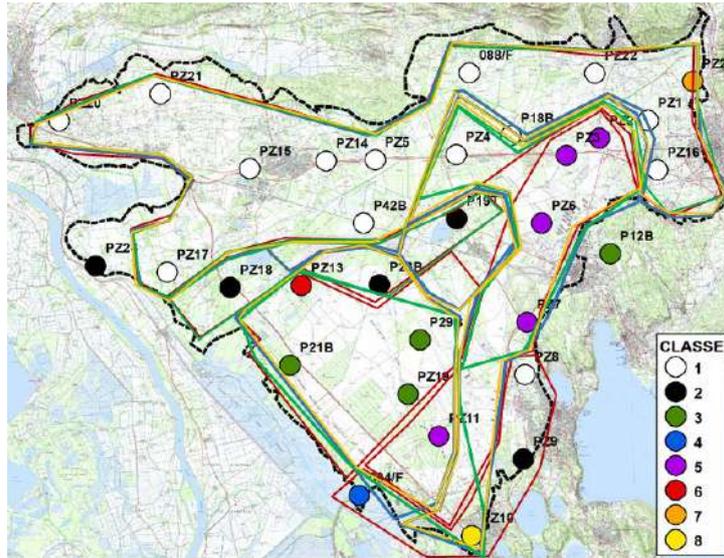


Figure 25 Cumul des groupes constitués par les CAH

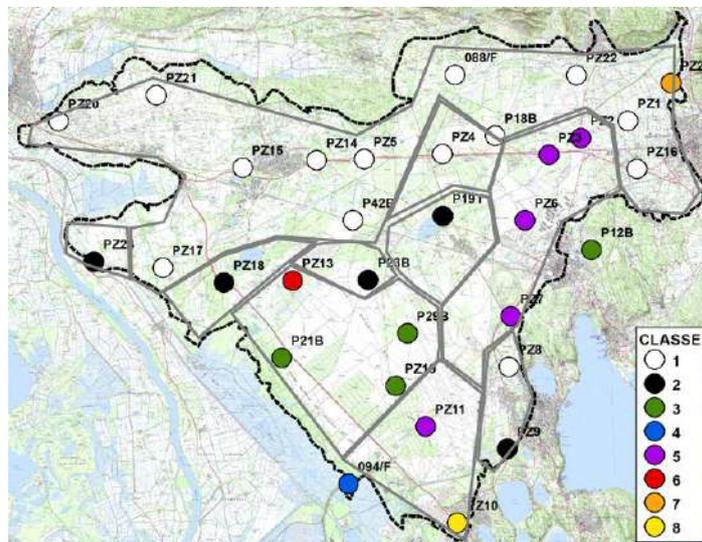


Figure 26 Zones se distinguant après analyses statistiques

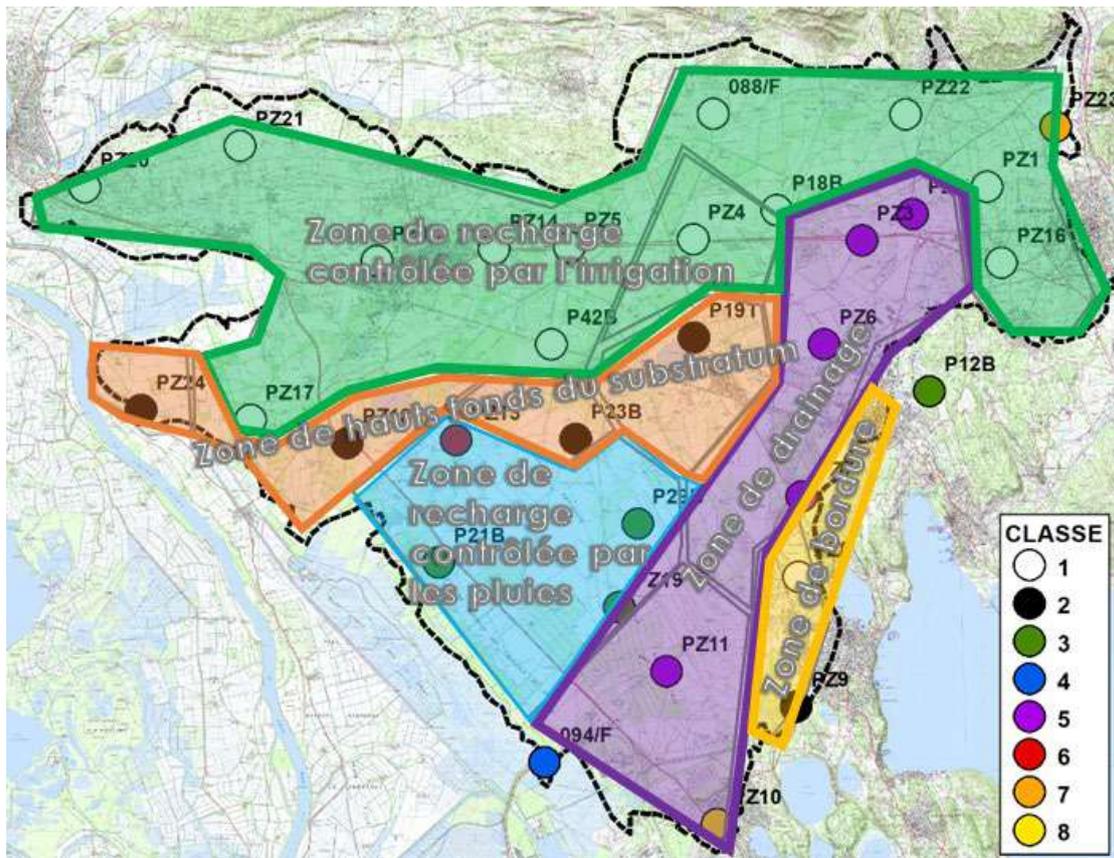


Figure 27 Grandes zones de cohérence piézométriques

## 2.2 LE MODELE MHYCRAU

### 2.2.1 DESCRIPTION GENERALE

#### MODELES PRE-EXISTANTS

Dès 1972, une première simulation mathématique des écoulements souterrains en régime transitoire a été élaborée par le BRGM puis actualisée en 1984. Le modèle numérique MARTCRAU de gestion de la nappe a été développé en 1995 en prenant en compte des données plus détaillées. Dans ce dernier modèle la recharge par irrigation est calculée à l'aide d'un ratio de 30% des volumes transitant dans les canaux répartis sur les surfaces de prairies irriguées. Ce modèle a mis en évidence certaines incohérences entre la piézométrie constatée et la côte du substratum. Ceci a conduit le BRGM à actualiser en 2004 les connaissances sur la géodynamique des dépôts alluviaux de la plaine de la Crau et proposer une nouvelle géométrie du substratum.

L'UMR EMMAH (INRA/Université d'Avignon) a développé en 2014 une chaîne de modélisation destinée à simuler l'impact des changements globaux sur la ressource en eau souterraine. Cette chaîne de modélisation est devenue le modèle de nappe MHYCRAU, actuellement utilisé au SYMCRAU comme outils d'analyse des écoulements et du transport souterrains. Le principal apport de cette approche était de mieux représenter les phénomènes de recharge par excès d'irrigation liés à la culture du foin de Crau.

En 2016, le CEREGE a développé un nouveau modèle porté sur la gestion, actualisant les données sur la géométrie de l'aquifère et introduisant une géométrie multicouche (Séraphin 2016). Il établit par analyse stochastique en nouvelle répartition spatiale des perméabilités et établit une nouvelle estimation du flux de recharge liée à la pratique de l'irrigation gravitaire

Afin de nous doter d'un outil numérique le plus abouti possible, nous avons choisi d'intégrer les apports de ces deux approches récentes en créant une chaîne de modélisation qui reprend le modèle MHYDRAU en l'améliorant sur les points suivants : géométrie du réservoir et intégration de nouvelles conditions aux limites, prise en compte de l'estimation de la part des eaux souterraines issues de l'irrigation gravitaire.

#### LA CHAINE DE MODELISATION UTILISEE

Le modèle MHYCRAU a été développé dans le cadre des projets de recherche ASTUCE&TIC<sup>10</sup> (2008-2011) (De Mordant de Massiac *et al.*, 2011) et SIRRIMED<sup>11</sup> (2011-2013) (INRA 2012, 2013). L'approche consiste à distribuer spatialement des modèles numériques décrivant le fonctionnement des couverts végétaux et des sols sur le territoire de la Crau et à transférer les drainages simulés à un modèle de nappe.

MHYCRAU forme ainsi une chaîne de modélisation (Figure 28) composée :

- d'un **modèle de surface** calculant le drainage des eaux sous parcelles et le prélèvement des plantes (naturel ou par irrigation) en fonction des variations climatiques ou des changements d'occupation des sols.

---

<sup>10</sup> ASTUCE&TIC : anticipation sécurisée des territoires urbanisés, des campagnes et de leur environnement fondée sur les technologies de l'information et de la communication, projet visant à développer un système d'aide à la décision fournissant aux décideurs une évaluation environnementale prospective du développement territorial.

<sup>11</sup> SIRRIMED : *Sustainable Use of Irrigation Water in the Mediterranean Region*, projet visant à développer des outils pour optimiser l'irrigation vis-à-vis de la ressource en eau sur le pourtour méditerranéen. Programme spécifique Coopération du 7FP - Commission européenne . Rapports complets disponibles sur [www.sirrimed.eu](http://www.sirrimed.eu).

- d'un **modèle de nappe** capable de simuler les écoulements souterrains en fonction des conditions de recharges et de prélèvements calculés par le modèle de surface (modèle hydrodynamique géré par la suite logiciel VisualModflow).

Un partenariat de diffusion de cet outil entre l'UMR EMMAH et le SYMCRAU permet au syndicat de pouvoir l'employer dans ces missions de gestionnaires tout en assurant son actualisation. Le modèle a été réactualisé entre 2018 et 2019 à la suite d'une évaluation conduite par le BRGM sur la capacité du modèle à répondre aux objectifs de SINERGI (Wuilleumier et Rivet, 2018)

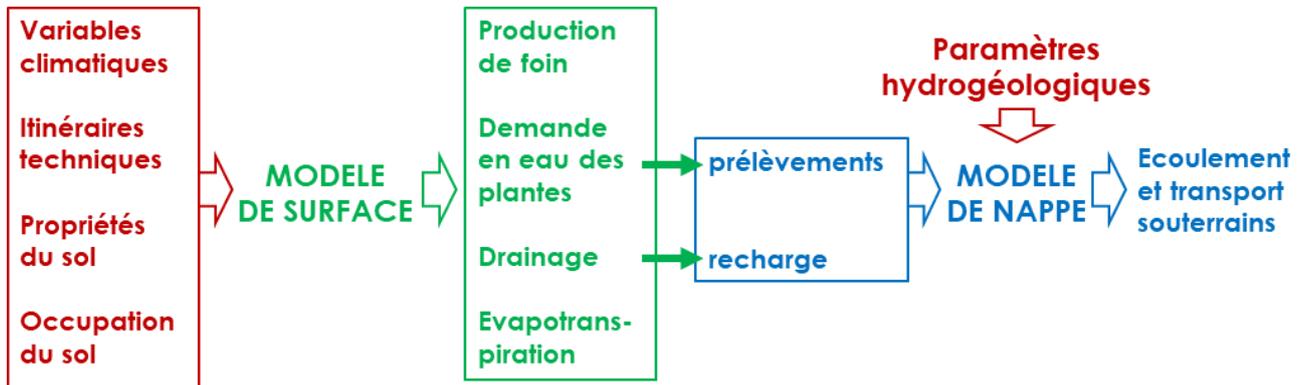


Figure 28 Chaîne de modélisation MHYCRAU

#### DESCRIPTION DU MODELE DE SURFACE

Le modèle de surface permet de générer différents types de données (rendement de foin, drainage, évapotranspiration et demande en eau) sur 11 classes d'occupation des sols : prairies sèches, zones humides, blés, tournesol, oliviers, vergers, serres, prairies irriguées, forêt, zones urbanisées et plans d'eau.

Le modèle de culture utilisé pour simuler la production de foin, l'évapotranspiration, ainsi que le drainage sous prairie irriguée et sous grande culture (blé, tournesol), est l'outil STICS (Brisson *et al.*, 2003). La bibliothèque de fonctions MultiSimLib (Buis *et al.*, 2011), développée par l'UMR EMMAH, est employée pour réaliser en une seule opération les multiples simulations de STICS sur les 6 600 parcelles de prairies irriguées répertoriées. Un module spécifique à la Crau a été développé sous le logiciel de programmation MATLAB, (i) afin de générer les données d'entrées nécessaires à STICS pour chaque parcelle de prairies de foin de Crau et (ii) pour agréger les données du drainage calculées sous les différentes surfaces.

Le drainage et l'évapotranspiration sous les autres surfaces agricoles, naturelles ou urbaines sont simulés en utilisant une simple approche par bilan hydrique tenant compte des pluies et de l'évapotranspiration, fondée sur la méthode de la FAO (Allen *et al.*, 1998)

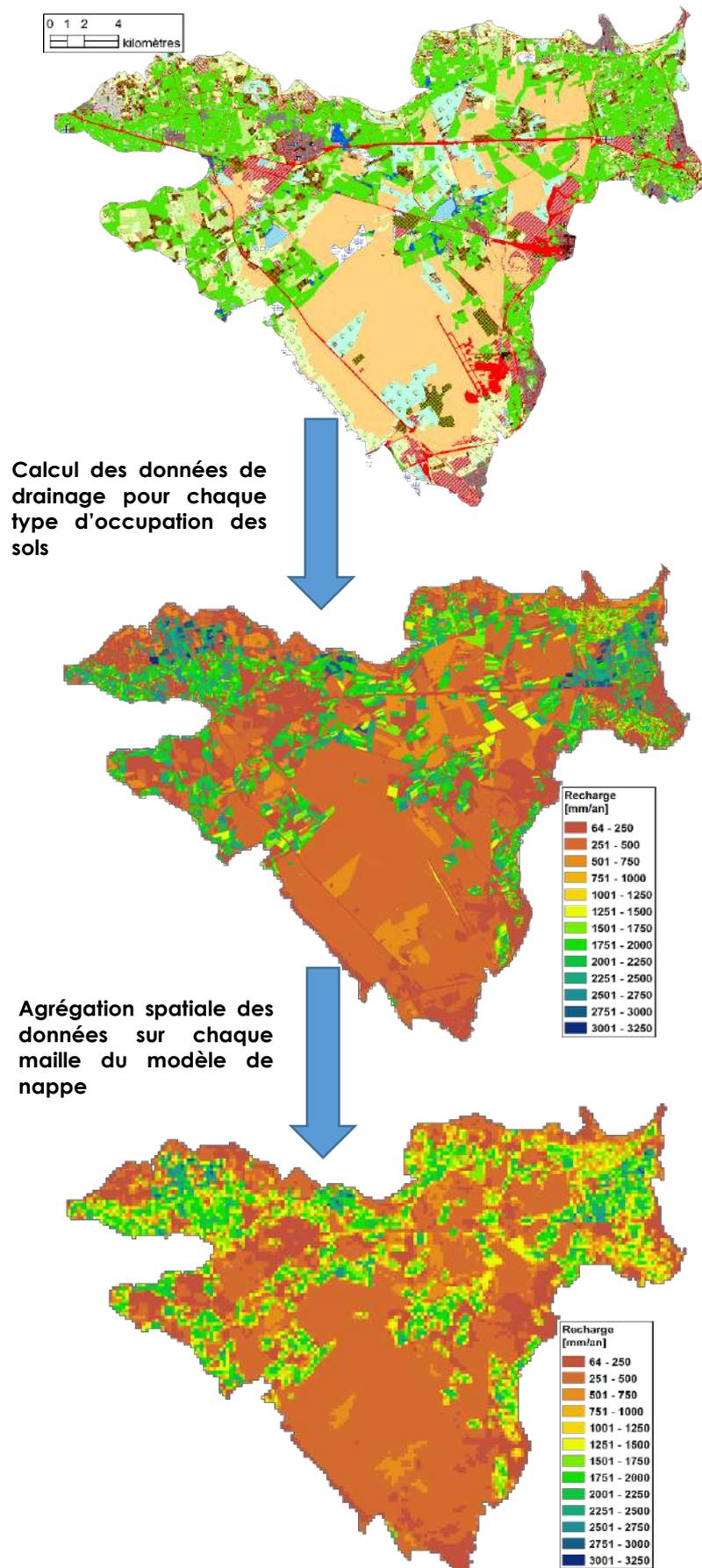


Figure 29 Illustration des différentes étapes de calculs du drainage pour chaque maille du modèle de nappe

Si l'on se réfère aux observations de terrains et conformément aux indications du BRGM en 1970 (BRGM 1970), la plaine de la Crau, très perméable et peu accidentée, ne présente pas de phénomène de ruissellement significatif. Même lors des épisodes de pluies abondantes, des mares temporaires se forment et s'infiltrent ou s'évaporent en quelques jours ou quelques heures. La recharge est donc assimilée à l'excédent d'eau dans le sol, correspond ainsi à l'infiltration efficace des volumes d'eau de pluies et d'irrigation.

#### DESCRIPTION DU MODULE DE NAPPE

La recharge de la nappe et les écoulements souterrains sont simulés par le programme VISUAL-MODFLOW (licence PRO), utilisant le code de calcul MODFLOW pour une résolution des équations par différences finies (McDonald et Harbaugh, 1988). Il s'agit d'un modèle monocouche à surface libre, de résolution de calcul 200 x 200 m soit 13520 mailles de calcul (tableau 8) pour une surface d'environ 714 km<sup>2</sup>.

Caractéristiques	Valeur
<b>Nombre de maille de calcul</b>	17854
<b>Résolution du calcul</b>	200 x 200 m
<b>Nombre de couches</b>	1
<b>Période de référence simulée</b>	2011-2018
<b>Régime d'écoulement simulé</b>	transitoire
<b>Pas de temps de calcul en mode transitoire</b>	10 jours

Tableau 8 Paramètres généraux du modèle de nappe

Les paramètres d'entrées du modèle sont :

Calcul des écoulements	<b>Paramètres constant</b>	Géométrie de l'aquifère Champ de perméabilité Conditions aux limites à charge constante ou de drain Répartition spatiale du coefficient d'emmagasinement
	<b>Paramètres variant dans le temps</b>	Prélèvements dans la nappe (naturels et anthropiques) Conditions aux limites à flux imposés Conditions aux limites de rivière
Calcul du transport	<b>Paramètres constant</b>	Porosité
	<b>Paramètres variant dans le temps</b>	Flux entrant de substance polluant

Tableau 9 Paramètres du modèle de nappe

Les paramètres d'ajustement du modèle sont : la répartition des perméabilités et le coefficient d'emmagasinement. Ils sont déterminés par méthodes de calibration basées sur les chroniques piézométriques complètes issues de la base de données ADES<sup>12</sup> (réseau BRGM/SYMCRAU), complétés par un réseau INRA (38 points de contrôles, figure 30).

<sup>12</sup> Portail national d'accès aux données sur les eaux souterraines.

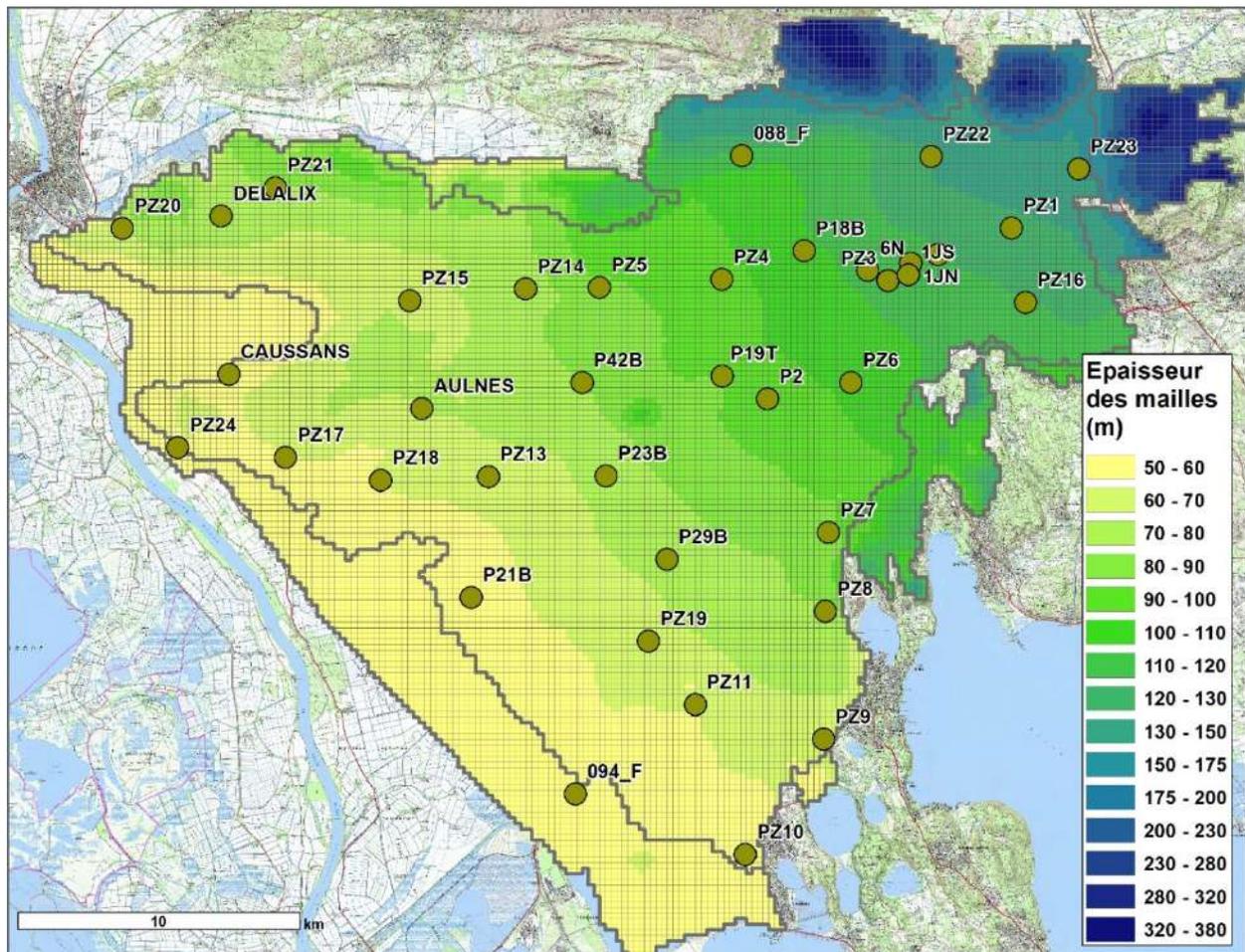


Figure 30 Maille du modèle MHCRAU et points de contrôle piézométriques

## 2.2.2 METHODOLOGIE DE CALCUL DE LA RECHARGE

La recharge de la nappe correspond aux volumes de drainages simulés sur les différents types d'occupation de sols de l'aire modélisée. Le détail des calculs est fourni en annexe 6.

## 2.2.3 PARAMETRISATION DU MODELE DE SURFACE

### ZONE D'ETUDE

L'aire de modélisation recouvre le bassin versant hydrogéologique de la nappe de la Crau (figure 32), c'est-à-dire :

- Les aquifères bordiers alimentant et drainant la nappe la nappe (cf. chapitre 2.1.3) : massif karstique des Opiès, massif miocène du Défens, massif karstique de Roquerousse, Molasse miocène de Miramas, massif karstique de l'Anellier, molasse miocène de Grans, miocène bordant l'étang de Lavalduc ;
- La partie libre et captive de l'aquifère des cailloutis de la Crau, jusqu'aux limites à charge constante représenté par la mer et le canal de Arles-à-Bouc.

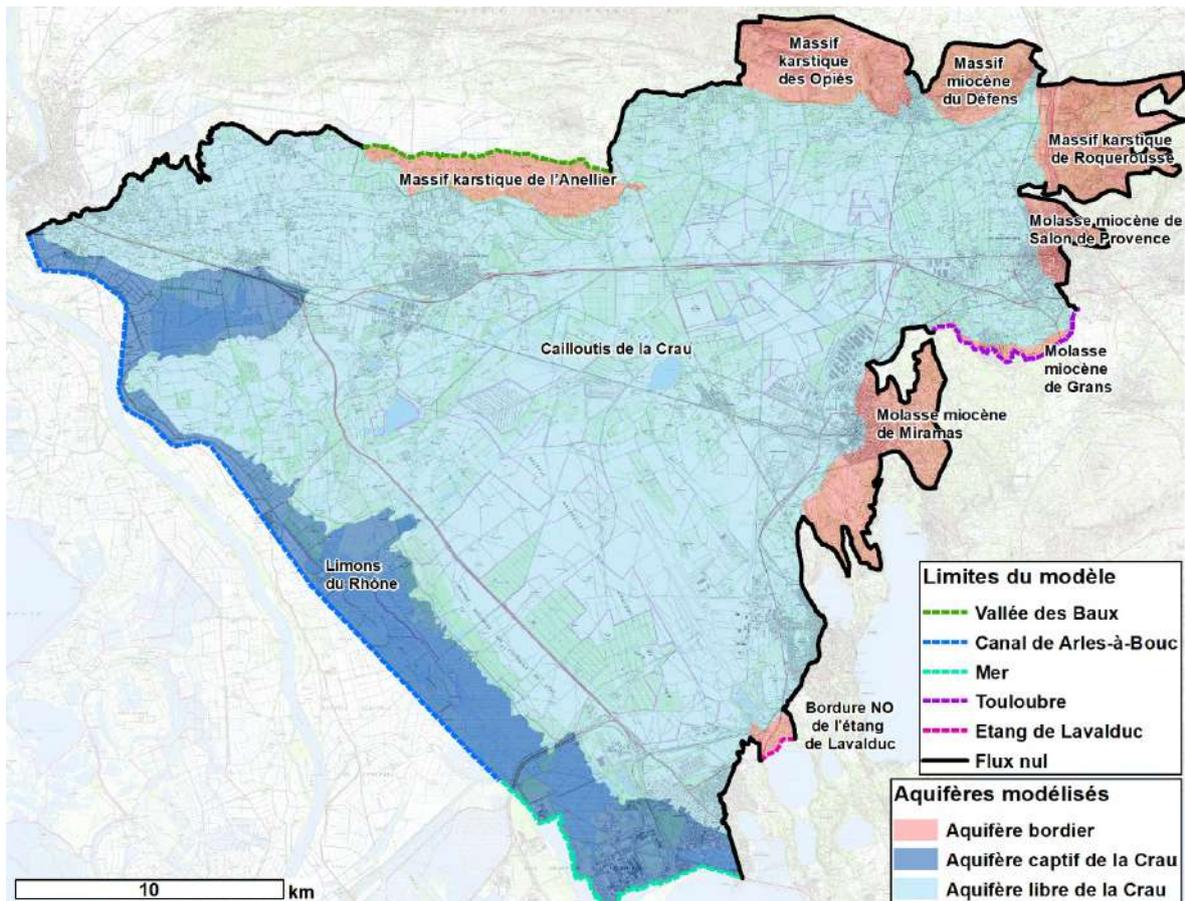


Figure 32 Bassin versant hydrogéologique de la nappe de la Crau

### PARAMETRES INTRODUIITS DANS LE MODELE

La description des paramètres d'entrées du modèle de surface est largement tirée des rapports AS-TUCE&TIC (De Mordant de Massiac J.C. 2011) et SIRRIMED (INRA 2012<sup>a,b</sup>, 2013)

### Données climatiques

L'outil STICS requiert les données météorologiques au pas de temps journalier : températures minimale et maximale, précipitations, vent moyen, rayonnement solaire, pression de vapeur.

La modélisation de l'agro-hydrosystème est réalisée, en mode transitoire, durant une période allant de 2011 à 2018, en utilisant les données climatiques de la station climatique du domaine du Merle à Salon-de-Provence. Cette station est considérée comme représentative des conditions de précipitation moyennes sur l'aire de la nappe (cf. chapitre 2.1.7)

Il est reconnu que les reliefs au nord du territoire, constituant les aires de recharges des aquifères bordiers alimentant la nappe, présentent des conditions climatiques différentes de celles prévalent sur la plaine de la Crau. Il n'y a cependant pas de stations climatiques renseignant les paramètres nécessaires au modèle de surface dans ce secteur. L'évaluation des variables climatiques sur les aquifères bordiers se base donc sur le modèle de spatialisation des données climatiques SAFRAN, disponibles entre 1999 et 2011 (figure 33).

Une comparaison des données mensuelles moyennes SAFRAN indique une différence significative du climat estimé au centre de la plaine et les mailles couvrant les aquifères nord bordiers (tableau 14). Par exemple il est observé, dans le secteur nord, une augmentation d'environ 10% du cumul annuel des pluies (jusqu'à +30% en aout), une diminution d'environ 10% des températures (atteignant -30%

en hiver) tandis que le vent diminue d'environ 20% (coefficient relativement peu variant dans l'année).

Les données climatiques dans le secteur des aquifères bordiers peuvent donc être évaluées en appliquant un facteur de correction mensuel aux valeurs mesurées sur la plaine à la station climatique Salon Merle (tableau 15). Les aires climatiques s'appliquant au modèle sont illustrées en figure 34.

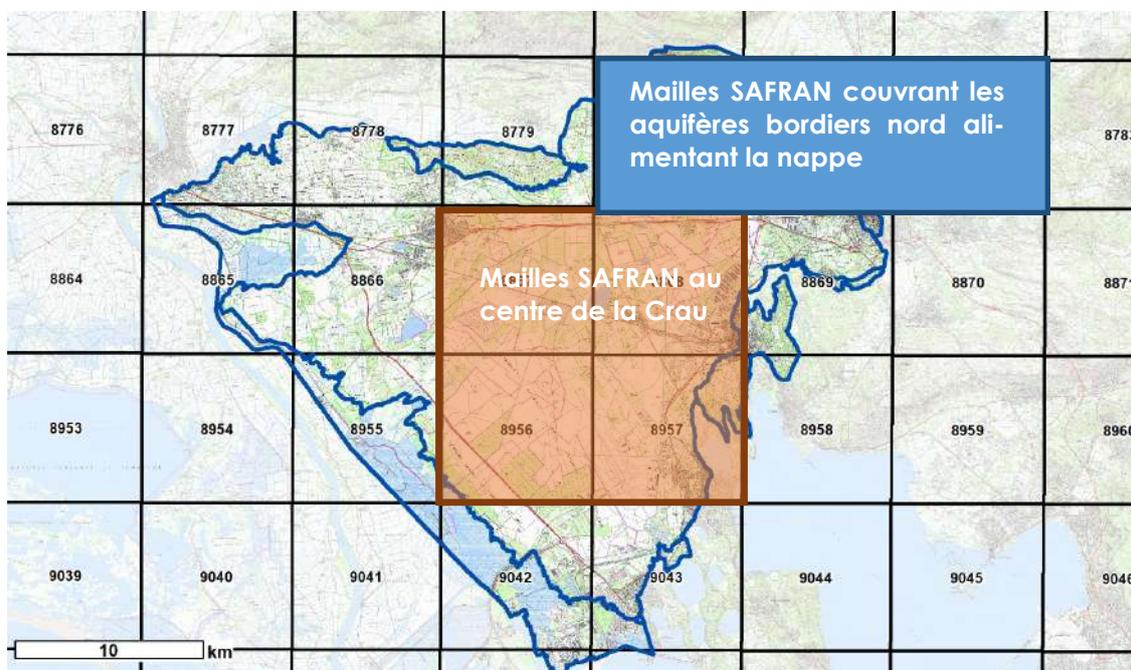


Figure 33 Couverture SAFRAN de la plaine de la Crau

	JANV	FEVR	MARS	AVR	MAI	JUIN	JUIL	AOUT	SEPT	OCT	NOV	DEC	MOYENNE
TEMP MAX (°C)	10.4	11.9	15.6	18.8	22.8	27.0	29.3	29.4	25.3	20.7	14.8	10.8	19.8
TEMP MIN (°C)	3.2	3.8	6.0	9.4	13.8	17.6	19.7	19.1	15.2	12.0	7.3	3.9	10.9
RAYONNEMENT (MJ/M <sup>2</sup> )	6.2	8.9	12.7	16.6	19.7	23.8	24.5	21.0	15.5	9.5	6.7	5.4	14.2
PLUIE (MM)	46.7	29.4	35.9	48.5	46.6	26.4	13.1	18.0	81.6	89.0	81.2	50.3	566.8 (cumul)
VENT (M/S)	2.9	3.2	3.1	2.9	2.7	2.9	2.9	2.7	2.6	2.7	3.1	3.1	2.9
TENSION DE VAPEUR (MBAR)	7.4	7.3	8.5	10.5	13.7	16.1	17.1	17.5	15.3	13.5	9.8	7.8	12.1

Tableau 14 Moyennes mensuelles et annuelles des variables climatiques des observations spatialisées SAFRAN entre 1999 et 2011 sur les mailles représentatives du centre de la Crau (mailles 8867, 8868, 8956 et 8957)

	JANV	FEVR	MARS	AVR	MAI	JUIN	JUIL	AOUT	SEPT	OCT	NOV	DEC	MOYENNE
TEMP MAX (°C)	-11.1%	-8.8%	-5.3%	-3.5%	-2.4%	-1.7%	-1.3%	-1.6%	-3.2%	-4.8%	-7.8%	-10.8%	-4.1%
TEMP MIN (°C)	-34.0%	-28%	-17.4%	-10.5%	-7.8%	-6.8%	-6.6%	-5.9%	-7.8%	-10%	-15.3%	-27.5%	-10.3%
RAYONNEMENT (J/MM <sup>2</sup> )	-0.2%	+0.4%	+0.4%	+0.1%	-0.3%	-0.5%	-0.2%	-0.5%	-0.5%	-0.2%	-1.2%	-1.3%	-0.3%
PLUIE (MM)	+2.5%	+0.2%	+12.4%	+8.1%	+16%	+11.4%	+7.1%	+30.2%	+10.9%	+4.8%	+10.0%	+10.9%	+9.4%
VENT (M/S)	-23.4%	22.3%	-22.6%	-22.4%	-22.6%	-19.9%	-19%	-20.3%	-22.7%	-24%	-24.2%	-25.3%	-22.4%
TENSION DE VAPEUR (MBAR)	-5.1%	-3.9%	-4.1%	-2.9%	-2.5%	-2.5%	-2.7%	-3.1%	-3.6%	-4.5%	-4.6%	-4.3%	-3.5%

Tableau 15 Différence entre les données SAFRAN au droit des aquifères bordiers nord et les données au centre de la Crau (moyenne 1999-2011)

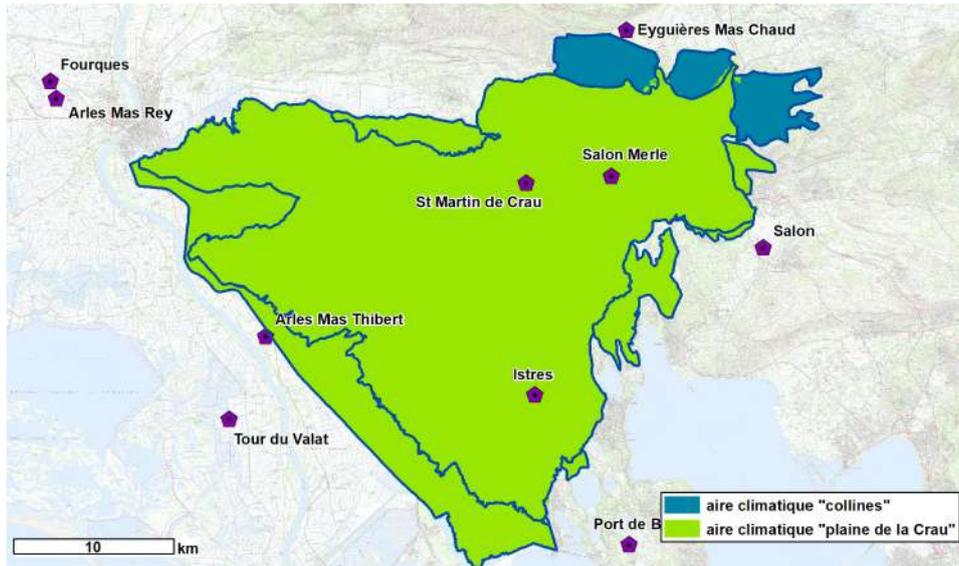


Figure 34 Aires climatiques appliquées au modèle MHYCRAU (les pentagones localisent les stations climatiques sur territoire).

### Occupation des sols

L'occupation des sols sur l'aire du modèle (figure 25) est compilée à partir de :

- L'occupation des sols sur la partie libre nappe de la Crau a été réalisée pour le compte du SYMCRAU en 2016 par le bureau d'étude GeographR (cf 2.1.2).
- les classes d'occupation des sols identifiés en dehors du territoire de la nappe (zone captive et aquifères bordiers) dans le travail cartographique opéré sur l'année 2009 dans le cadre du projet ASTUCE&TIC.

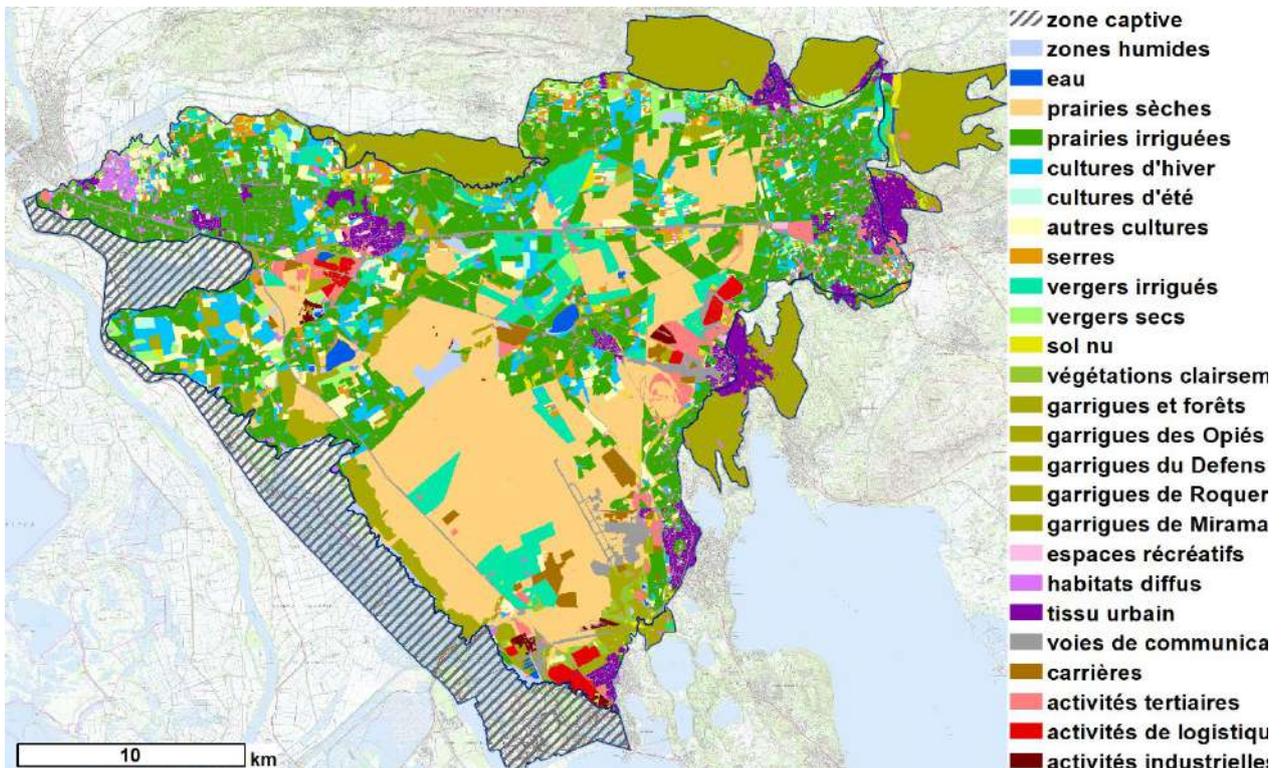


Figure 35 Occupation des sols 2016

## Propriétés du sol

Les paramètres de sol utilisés par STICS pour chaque horizon sont : l'obstacle à l'enracinement ; l'épaisseur de chaque horizon du sol, l'humidité au point de flétrissement de l'horizon, l'humidité à la capacité au champ de l'horizon ; la densité apparente de l'horizon, la teneur volumétrique en cailloux de l'horizon, la densité apparente des cailloux et l'humidité à la capacité au champ des cailloux.

Les propriétés des sols ont été évaluées à partir des données de sondages et de répartition spatiale des sols déterminés par la carte pédologique d'Arles (Bouteyre et Duclos, 1994) et d'hypothèses liant l'épaisseur des sols à l'âge des prairies irriguées. Deux types de sols ont été identifiés en fonction de leur capacité de rétention d'eau : sols hydromorphes (170 mm/m de sol) et fersiallitiques (50 mm/m de sol).

Il est supposé que la capacité au champ des sols fersiallitiques dépend de l'épaisseur du premier horizon de sols, qui est fonction de l'âge des prairies. En effet la pratique d'irrigation gravitaire provoque un dépôt de limons favorisant la rétention d'eau pour les plantes. En se basant sur une analyse croisée de la carte de Cassiny (1783), des images Landsat de 1975 et des images satellitaires récentes, il est possible d'évaluer la répartition spatiale de l'âge des prairies.

L'ensemble des zones ne correspondant pas à des sols « hydromorphes » ou n'ayant jamais été cultivées ont été insérées dans une dernière classe ayant les caractéristiques des sols fersiallitiques sans l'horizon A développé sur les surfaces cultivées.

Les méthodes de détermination des propriétés des sols sont détaillées au chapitre 16 du rapport AS-TUCE&TIC (De Mordant de Massiac 2011).

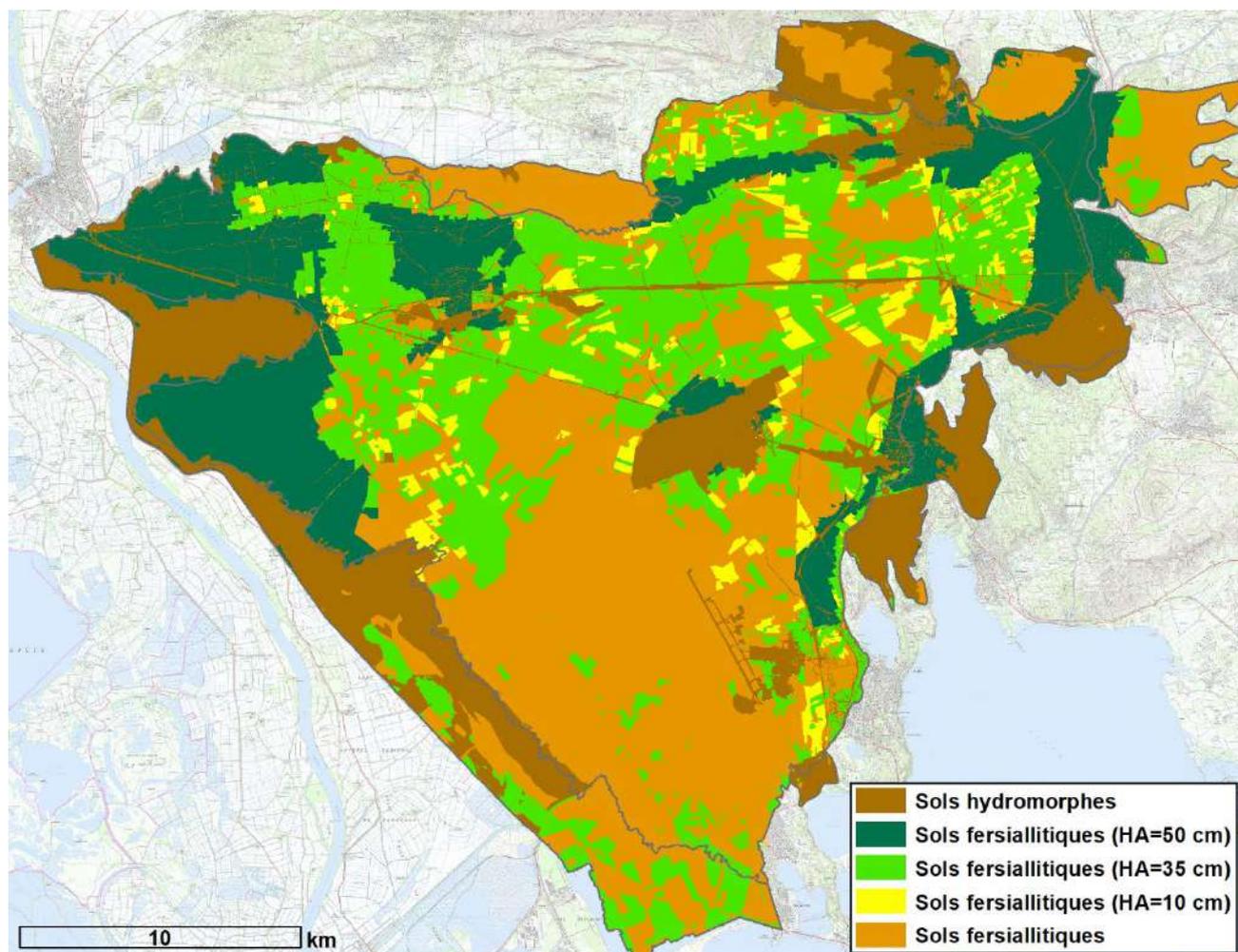


Figure 36 Carte des types de sols définis par l'épaisseur de l'horizon superficiel (horizon A) et l'hydromorphie.

Ainsi il est distingué 5 classes d'occupation des sols sur la Crau (figure 36) avec les caractéristiques reportées dans le tableau 16, dont les paramètres sont calculés comme indiqué dans le tableau 17.

	H	Obstarac	E	H <sub>CC</sub>	H <sub>PF</sub>	Φ	V <sub>c</sub>	R <sub>CC</sub>	R <sub>PF</sub>	RU
<b>Sol hydromorphe</b>	1	100	27	22.1	12.2	1.4	0	352	235	117
	2		45	19.2	12.3	1.6	0			
	3		44	20.8	16.0	1.6	11.25			
<b>Sols fersiliatiques horizon A = 50 cm</b>	1	91	50	18.6	8.64	1.4	10	206	102	104
	2		36	16.3	8.70	1.6	42			
	3		32	15.8	8.43	1.6	58			
<b>Sols fersiliatiques horizon A = 35 cm</b>	1	76	35	18.6	8.64	1.4	10	170	85	85
	2		36	16.3	8.70	1.6	42			
	3		32	15.8	8.43	1.6	58			
<b>Sols fersiliatiques horizon A = 10 cm</b>	1	51	10	18.6	8.64	1.4	10	112	58	54
	2		36	16.3	8.70	1.6	42			
	3		32	15.8	8.43	1.6	58			
<b>Sols fersiliatiques</b>	1	41	36	15.4	7.66	1.6	55	85	44	42
	2		32	15.8	8.43	1.6	75			

**Tableau 16** Caractéristiques des sols identifiés sur la Crau avec *H* : l'horizon ; *E* : l'épaisseur (cm) ; *H<sub>PF</sub>* : l'humidité au point de flétrissement (g d'eau/g de sol en %) ; *H<sub>CC</sub>* l'humidité à la capacité au champ (g d'eau / g de sol en %) ; *Φ* : la densité apparente (-) ; *V<sub>c</sub>* : la teneur volumétrique en cailloux (%) ; *R<sub>PF</sub>* : la teneur en eau du sol au point de flétrissement permanent (mm) ; *R<sub>CC</sub>* : la teneur en eau à la capacité au champ (mm) ; *RU* : la réserve utile (mm).

$$R_{CC} \text{ (mm)} = H_{CC}/100 \cdot E \cdot 10 \cdot \Phi \cdot (1 - V_c/100)$$

$$R_{PF} \text{ (mm)} = H_{PF}/100 \cdot E \cdot 10 \cdot \Phi \cdot (1 - V_c/100)$$

$$RU = R_{CC} - R_{PF}$$

**Tableau 17** Détail du calcul des teneurs en eau caractéristiques et de la réserve utile des sols

## Itinéraires techniques pour le foin de Crau :

La modélisation du drainage par l'outil STICS nécessite de paramétrer les itinéraires techniques des cultures de prairies irriguées et de grandes cultures.

Les itinéraires techniques de production du foin ont été définis avec des tours d'eau dépendants du cahier des charges de la culture du foin de Crau, des règles d'allocation de l'eau établies dans chacune des 11 ASA et des règles de décisions suivies par les agriculteurs en fonction de la météorologie (Oliosio *et al.*, 2013).

L'irrigation des prairies irriguées est définie par plusieurs critères :

- Le tour d'eau, qui indique la fréquence à laquelle les parcelles sont irriguées ; celui-ci est désigné en fonction des critères définis pour chacune des 15 ASA (Associations Syndicale Autorisées ayant en gestion les canaux d'irrigation) présents sur le territoire de la Crau. En dehors du périmètre syndical le tour d'eau moyen de 10 jours est affecté (figure 37).
- Les dates de début et de fin d'irrigation établies par le décret de l'AOC du foin de Crau entre le 1<sup>er</sup> mars et le 31 octobre, dates qui peuvent être décalées en fonction des précipitations :
  - Selon Merot (2007), la date de démarrage des tours peut être liée au taux d'humidité des sols. En comparant pratiques agricoles aux données simulées, il est établi un démarrage des tours d'eau lorsque l'indice de stress hydrique tombe à 0.9.
  - La fin de l'irrigation est programmée à partir de septembre lorsqu'un épisode pluvieux atteint 20 mm/j.
- La dose d'irrigation qui dépend des précipitations (e.g. certains tours d'eau peuvent ne pas être réalisés si la période a été particulièrement humide) et de la taille des parcelles. Merot 2007 montre que la dose d'irrigation dépend de la forme de la parcelle puisque que la durée de l'irrigation est fonction du temps pour que le front d'irrigation passe d'un côté à l'autre de la parcelle.  
Une relation empirique a été établie sur le site expérimental du domaine du Merle (Montpellier Supagro) : **Hirrigation (mm) = 0.1424 x Longueur de la parcelle (m) + 78.148**
- Lorsque la longueur est supérieure à 850 m, nous considérons que l'irrigation s'effectue dans la largeur de la parcelle. Une limite de 200 mm/tour d'eau est donnée
- La distribution des tours d'eau est distribuée de façon aléatoire au sein de chaque ASA afin de reproduire le démarrage différé de l'irrigation entre chaque parcelle au sein des exploitations.

La coupe des prairies irriguées s'effectue trois fois dans l'année selon l'AOP foin de Crau : du 1<sup>er</sup> au 31 mai, du 25 juin au 25 juillet et du 15 au 3 septembre. Dans ces périodes, la première coupe a été fixée lorsque la somme des températures moyennes journalières depuis le 1<sup>er</sup> février atteint 1600°C. En cas de jours pluvieux (>1 mm), la coupe est reportée de deux jours. La date des deuxièmes et troisièmes coupes est ensuite décalée du même nombre par rapport à la date minimale de coupe avec un coefficient de 2/3 pour la deuxième coupe et 1/3 pour la troisième coupe.

Il y a deux sources d'azote sur les prairies : les moutons qui paissent lors de la « 4<sup>ème</sup> coupe », entre octobre et février, et des apports par les agriculteurs après la première coupe. La quantité de fumier est d'environ 3t/ha durant l'hiver, avec une teneur en matière sèche de 25% dont 42% de carbone et un ratio C/N de 15. Les producteurs apportent 20 unités d'azote 2 jours après la première irrigation suivant la première coupe.

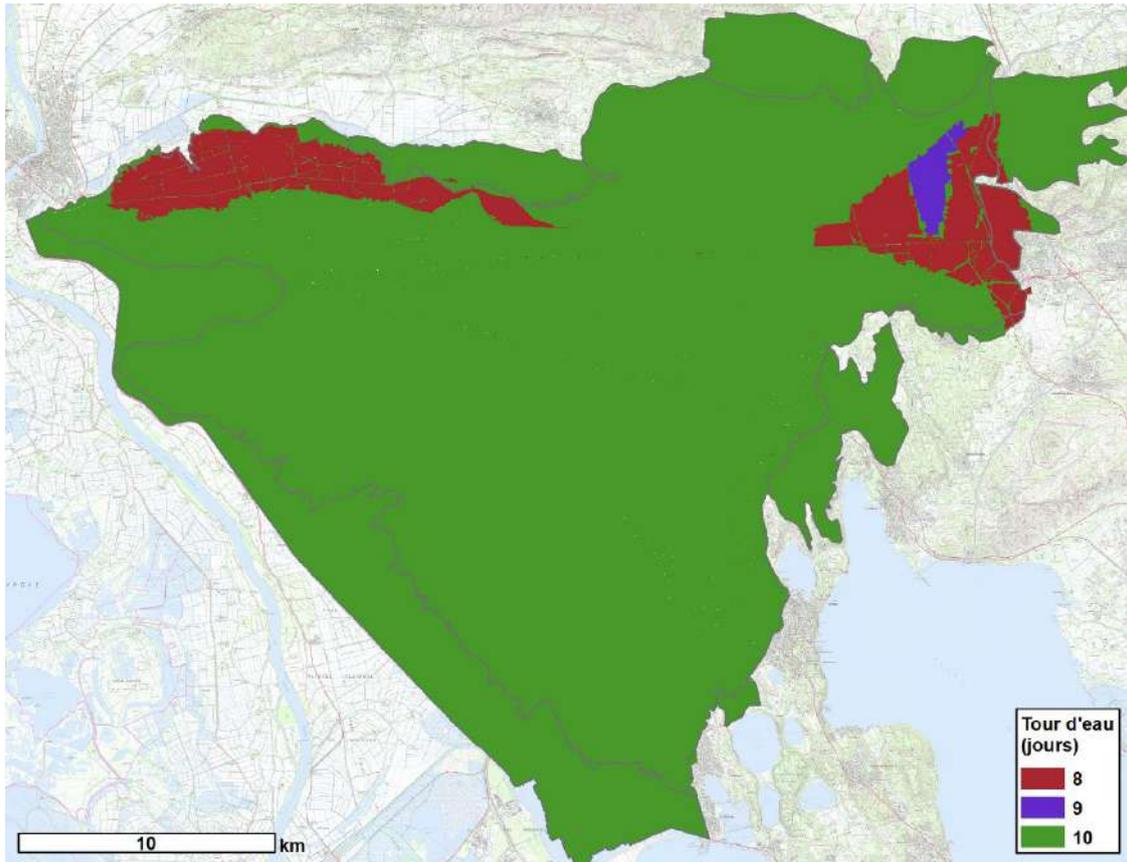


Figure 37 Répartition spatiale des tours d'eau appliqués au modèle

### Itinéraires techniques pour les grandes cultures

Les itinéraires techniques des parcelles de blé ont été établis à partir d'enquêtes auprès de quatre exploitants agricoles qui précisent les dates de leurs principales interventions et les doses de fertilisation. Les itinéraires techniques des parcelles de tournesol ont été établis sur dire d'expert, aucun itinéraire technique n'ayant été obtenu auprès des exploitants enquêtés. Le tableau 18 résume les dates et doses d'azote pour les deux types de culture.

Culture	Blé	Tournesol
<b>Date de semis</b>	15 décembre	5 avril
<b>Date de récolte</b>	22 juin	11 septembre
<b>Date de fertilisation 1</b>	15 décembre	17 avril
<b>Nombre d'unité d'azote 1</b>	30	60
<b>Date de fertilisation 2</b>	6 mars	15 mai
<b>Nombre d'unités d'azote 2</b>	70	100

Tableau 18 Dates d'intervention et doses de fertilisants azotés pour les cultures de blé et tournesol utilisées dans les simulations par le modèle STICS.

Les coefficients culturaux  $K_c$  influençant les processus d'évapotranspiration sont gérés automatiquement par STICS pour les grandes cultures et les prairies irriguées.

Pour les autres occupations des sols, agricoles, naturelles ou urbaines, les coefficients culturaux sont paramétrés selon les valeurs du tableau 19, extraites de la littérature grise (vergers, oliviers), admis par défaut (zones humides), établis de manière empirique (prairies sèches) ou par analogie (espaces urbains et serres dont la surface d'infiltration est supposée couverte de prairies sèches).

<b>Vergers</b>	Jour	1	75	91	152	181	212	274	305	366
	Kc	0.35	0.35	0.7	1	1	0.7	0.7	0.35	0.35
<b>Oliviers</b>	Jour	1	121	135	212	217	258	288	366	
	Kc	0.2	0.2	0.25	0.25	0.3	0.3	0.2	0.2	
<b>Zones humides</b>	Jour	1	366							
	Kc	1	1							
<b>Prairies sèches, espaces urbains, serres</b>	Jour	1	366							
	Kc	0.4	0.4							
<b>Garrigues</b>	Jour	1	133	134	273	274	366			
	Kc	0.5	0.5	0.8	0.8	0.5	0.5			

**Tableau 19 Coefficients culturaux appliqués aux classes d'occupation des sols.**

### COEFFICIENTS HYDROLOGIQUES

La nouvelle version de MHYCRAU introduit des coefficients hydrologiques affinant l'évaluation des flux d'eau alimentant le système (tableau 20).

Le coefficient d'infiltration représente la part d'eau précipitée qui participe au processus de drainage vers le sous-sol, l'autre part étant le ruissellement de surface non infiltré, collecté ou intercepté en surface. On évalue ainsi par exemple que la zone captive présente un taux d'infiltration de 0%. Ce coefficient d'infiltration est évalué à 50% pour les zones urbanisées, généralement pourvus de dispositif d'évacuation des eaux de ruissellement et dont une partie des eaux sont interceptée avant infiltration. On estime ce coefficient à 80% pour les serres en estimant une interception des eaux de 20% sur les bâches et dans les bassins d'infiltration.

La surface infiltrante représente la part réelle des surfaces participant à l'infiltration. Ceci concerne en particulier les surfaces imperméabilisées (zones urbaines, serres) ou les eaux de ruissellement sont collectées puis infiltrées dans des bassins spécifiques. En considère par exemple que seulement 10% des surfaces occupées par des serres participent à l'infiltration des eaux de pluies. Dans les zones urbaines on évalue cette part à 30%.

Le coefficient d'alimentation de la nappe quantifie la part des eaux infiltrées qui rejoignent la nappe de la Crau. Ce coefficient s'applique par exemple pour les eaux s'infiltrant dans les aquifères bordiers, dont une partie est exporté en dehors de la nappe de la Crau (cf. chapitre 3.3).

Occupation des sols	N° OS	Coefficient d'infiltration CI	Surface infiltrante SI	Coefficient d'alimentation CA
zone captive	23	0%	100%	100%
zones humides	1	100%	100%	100%
eau	21	100%	100%	100%
prairies sèches	8	100%	100%	100%
prairies irriguées	7	100%	100%	100%
cultures d'hiver	2	100%	100%	100%
cultures d'été	3	100%	100%	100%
autres cultures	9	100%	100%	100%
serres	6	80%	10%	100%
vergers irrigués	5	100%	100%	100%
vergers secs	4	100%	100%	100%
sol nu	0	100%	100%	100%
végétations clairsemées	11	100%	100%	100%
garrigues et forêts	10	100%	100%	100%
garrigues des Opiès	24	80%	100%	50%
garrigues du Défens	25	60%	100%	50%
garrigues de Roquerousse	26	80%	100%	80%
garrigues de Miramas	27	80%	100%	100%
espaces récréatifs	19	100%	100%	100%
habitats diffus	13	100%	100%	100%
tissu urbain	12	50%	30%	100%
voies de communication	17	50%	30%	100%
carrières	18	100%	100%	100%
activités tertiaires	15	50%	30%	100%
logistique	16	50%	30%	100%
activités industrielles	14	50%	30%	100%

Tableau 20 Coefficients hydrologiques par occupation des sols dans le domaine modélisé

## 2.2.4 PARAMETRISATION DU MODELE DE NAPPE

### RECHARGE

Les données de recharges introduites dans le modèle de nappe sont assimilées aux lames d'eau de drainage générées par le modèle de surface pour chaque maille du modèle. En moyenne sur la période 2013-2018, les lames d'eau infiltrées par type d'occupation des sols sont indiquées dans le tableau 21. La figure 39 présente la répartition spatiale de cette recharge moyenne sur la surface modélisée.

OS	Recharge annuelle moyenne (mm/an)
coussouls	167
prairies	1980
zone captive	0
zones urbaines	115
collines	138
forêts	266
fruit	264
culture d'hiver	135
culture d'été	126
oliviers	410
zones humides	317

Tableau 21 recharge annuelle calculée par type d'occupation des sols

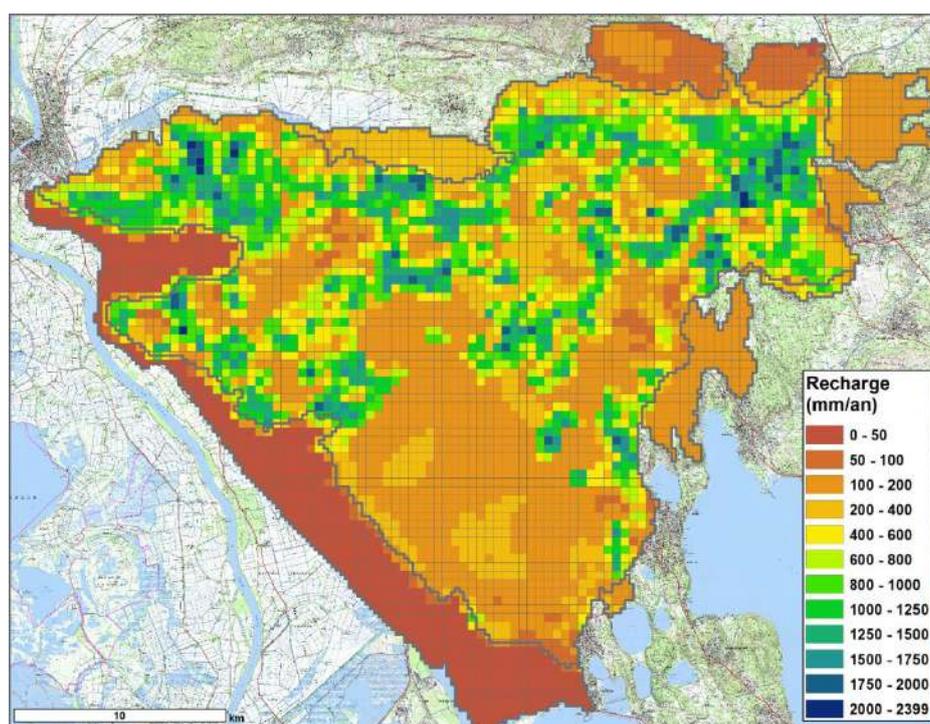


Figure 38 Recharge annuelle moyenne calculée sur la période 2011-2018 par maille du modèle

## PRELEVEMENTS D'EAU SOUTERRAINE

Les prélèvements d'eau souterraine pour l'eau potable publique, les besoins industriels et agricoles sont simulés par le modèle. Les prélèvements domestiques, représentant moins de 4% des volumes totaux sont négligés en raison de l'incertitude sur leur localisation et afin de ne pas alourdir le temps de calcul de MHYCRAU. Les prélèvements par les milieux naturels ne sont pas pris en compte au regard des incertitudes sur leur connections à la nappe.

Un total de prélèvement dans l'aquifère de 68 Mm<sup>3</sup>/an est simulé dans la nappe de la Crau (Figure 39), dont :

- 47 % pour les besoins agricoles (32 M m<sup>3</sup>/an dont 12 M m<sup>3</sup> pour les prairies),
- 35 % pour les besoins AEP (24 M m<sup>3</sup>/an),
- 18 % pour les besoins industriels (12 M de m<sup>3</sup>).

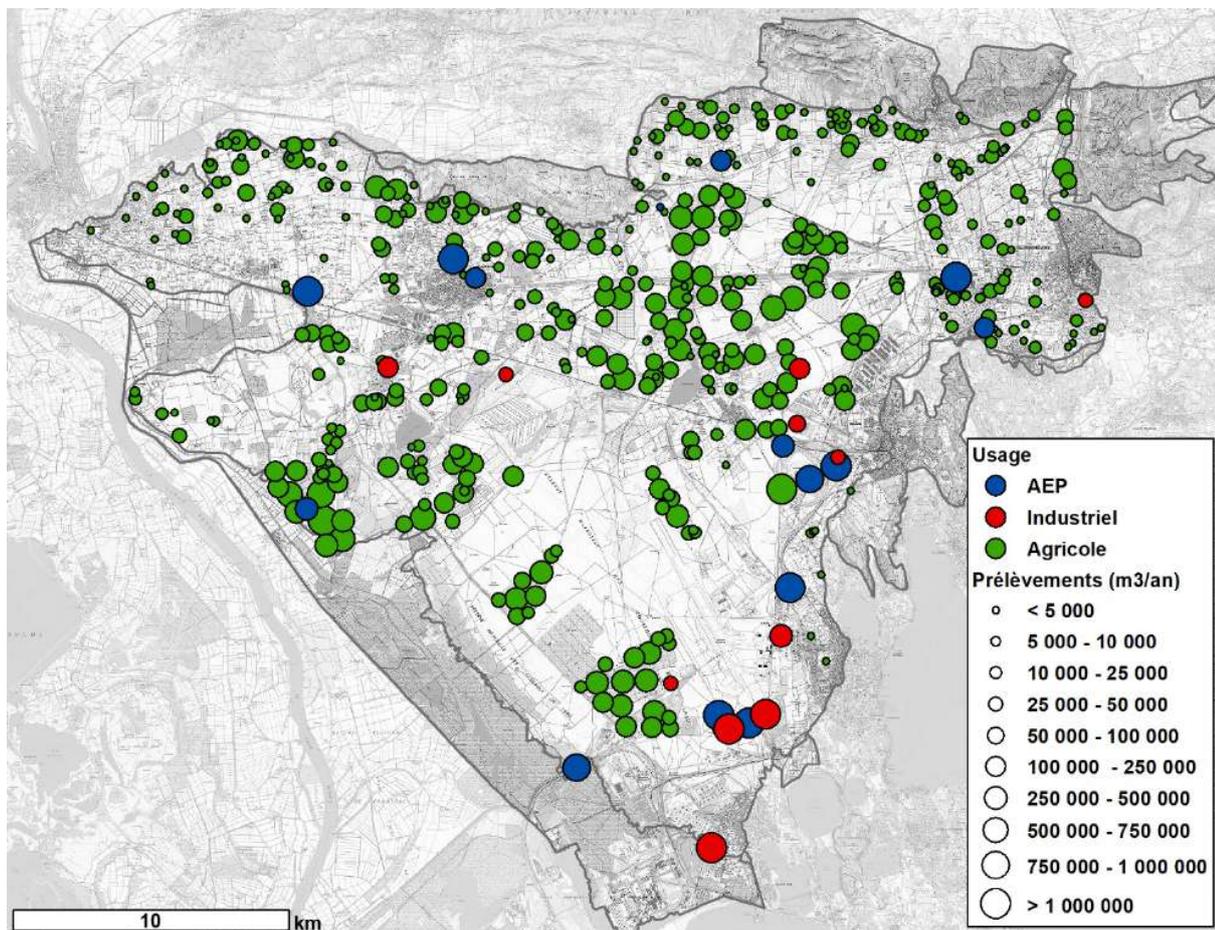


Figure 39 Localisation des captages simulés dans MHYCRAU

### Modulation mensuelle des prélèvements :

Pour chaque point de prélèvement, il est estimé une modulation mensuelle (tableau 22) en fonction :

- de la demande en eau des plantes issue du référentiel des besoins en eau d'irrigation des productions agricoles de Provence-Alpes-Côte d'Azur (Chambre d'Agriculture PACA 2014) pour les cultures de maraichage, l'arboriculture, les vergers secs et les grandes cultures,
- des volumes d'eau mise en irrigation sur les prairies calculés par STICS,
- des observations sur la consommation AEP des communes.

Mois	AEI	AEP	Vergers secs	Serres	Arboriculture	Prairies
Janvier	1.000	0.980	0.000	0.000	0.000	0.000
Février	1.000	0.889	0.000	0.000	0.000	0.000
Mars	1.000	0.979	0.000	0.000	0.000	1.888
Avril	1.000	0.967	0.000	0.084	0.167	1.625
Mai	1.000	0.994	0.188	0.870	1.274	1.646
Juin	1.000	1.073	2.347	3.239	3.442	1.707
Juillet	1.000	1.114	4.733	4.619	4.186	1.789
Août	1.000	1.098	3.944	2.790	2.448	1.594
Septembre	1.000	1.031	0.789	0.398	0.484	1.550
Octobre	1.000	0.988	0.000	0.000	0.000	0.201
Novembre	1.000	0.937	0.000	0.000	0.000	0.000
Décembre	1.000	0.948	0.000	0.000	0.000	0.000
<b>Prélèvements totaux [m³]</b>	<b>12 025 619</b>	<b>23 893 156</b>	<b>671 802</b>	<b>3 915 053</b>	<b>15 266 863</b>	<b>12 157 567</b>

Tableau 22 Pondération mensuelle des prélèvements annuels

En régime transitoire, les prélèvements sont simulés avec une donnée moyenne variant tous les 30 jours (Figure 40).

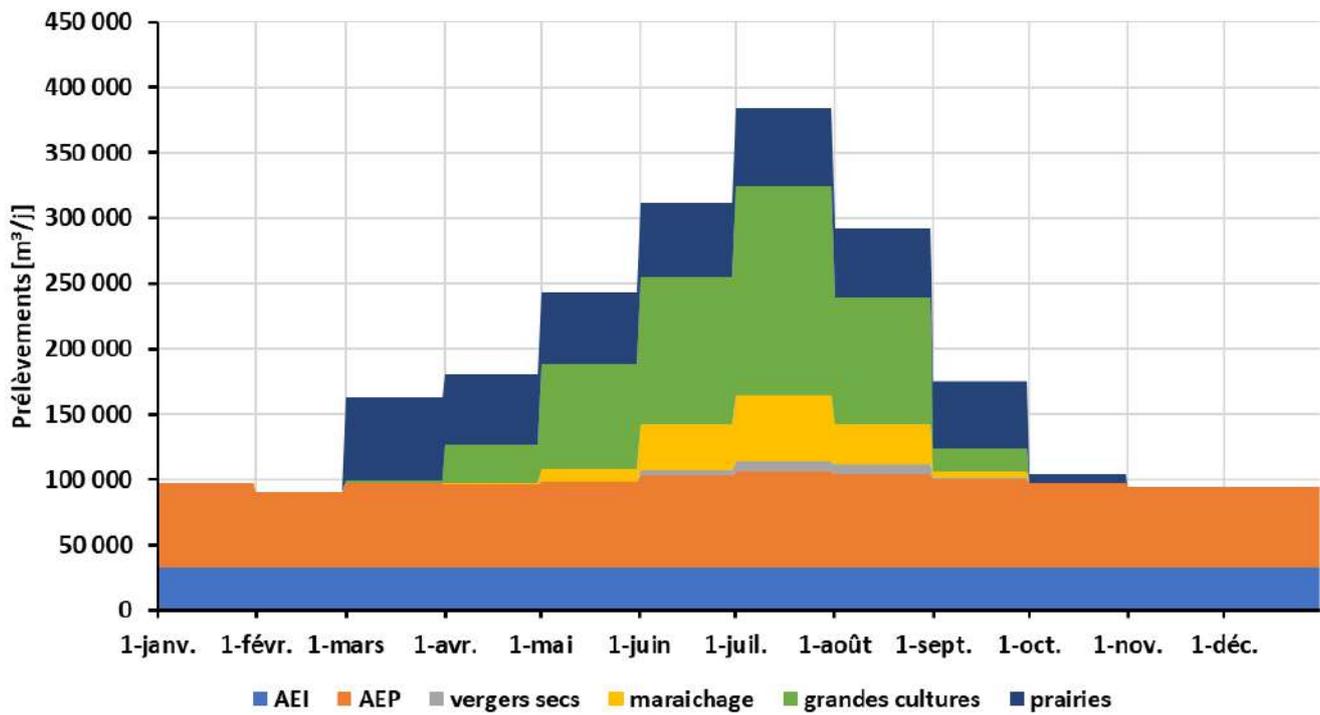


Figure 40 Evolution temporelle des prélèvements journaliers

## CONDITIONS AUX LIMITES DU MODELE

Les conditions aux limites concernent les règles d'échange des flux entre le domaine modélisé et le milieu extérieur. Sur la plaine de la Crau, les écoulements de la nappe sont conditionnés par ces zones de résurgence naturels (laurons, sources de la vallée des Baux, étang intérieurs) ou des ouvrages de drainage (canaux de drainage, canaux de navigation) ou le contact avec la mer (figure 41)

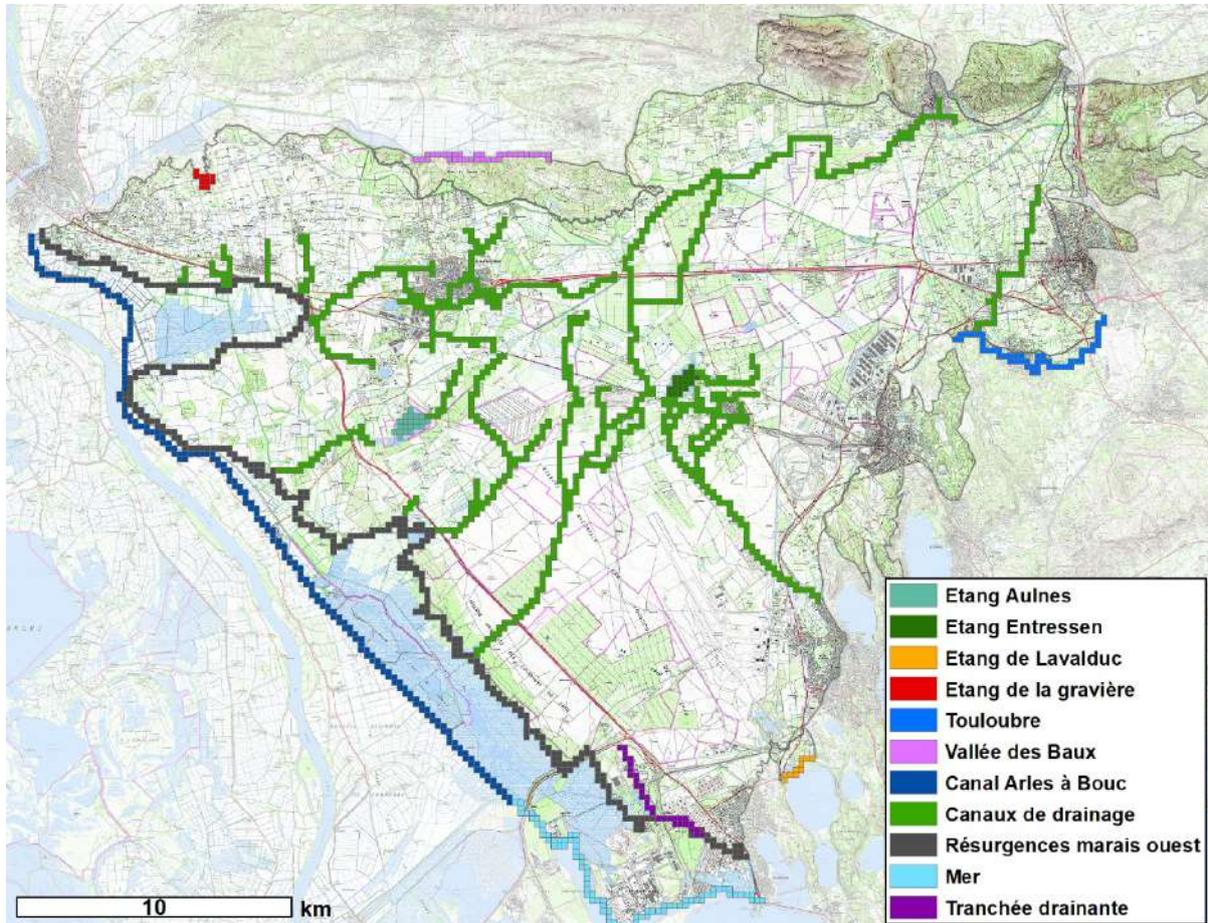


Figure 41 Conditions aux limites identifiées sur le périmètre du modèle

Les conditions aux limites sont définies en fonction des caractéristiques hydrogéologiques et de la nature de ces échanges (tableau 23). On distingue trois types de conditions aux limites applicables sur la Crau (figure 42) :

- Conditions aux limites de type « drains » matérialisant des zones de débordement de nappe activé en fonction de la charge hydraulique dans l'aquifère (drainage temporaire lié à un dépassement du fond des drains par la nappe en hautes eaux). Cette condition est appliquée aux limites suivantes : Ligne de résurgences alimentant les marais à l'ouest, Limite drainante vers l'étang de la Gravière, Canaux de drainage, Etang des Aulnes, Etang d'Entressen, Tranchée drainante ;
- Les conditions aux limites de type « rivière » tenant compte d'une perméabilité du lit distincte de la perméabilité de l'aquifère et pouvant avoir une fonction de drainance ou d'alimentation en fonction des conditions respectives de charge hydraulique dans la nappe et ces cours d'eau. Cette condition est appliquée à la Touloubre et au canal de Arles-à-Bouc ;
- Une condition aux limites de type « charge constante » marquant un lien hydraulique fort avec un plan d'eau. Ce type de conditions aux limites est appliquée aux limites supposées drainantes en permanence. Cette condition est appliquée au contact avec la mer.

Les différentes conditions aux limites du modèle (figure 41) ont été paramétrées en fonction des données de terrain et des valeurs de la littérature (tableau 24)

Conditions	Description	Paramètres
<b>Rivière</b>	Cette condition représente les zones de décharges des eaux souterraines conduisant à l'alimentation de cours d'eau. Elle permet également de simuler la recharge de la nappe par des eaux de surface. Elle tient compte de la perméabilité du lit de la rivière et des pertes de charges dans cette zone de transfert.	$H_{riv}$ = Elévation de la surface libre (m NGF) $F_{riv}$ = Elévation du fond de la rivière (m NGF) $E_{riv}$ = épaisseur de la zone de colmatation (m) $L_{riv}$ = largeur de la rivière (m) $C_{riv}$ = conductivité hydraulique du fond de la rivière (m/s)
<b>Charge</b>	Une charge hydraulique constante est imposé sur l'une des limites du modèle. Afin de satisfaire cette condition le modèle peut faire entrer ou sortir de l'eau du système sans limite. Cette condition ne représente pas les pertes de charges à l'approche de la structure drainante et peut également conduire à une générer des flux non réalistes.	$H_c$ = Charge hydraulique imposée
<b>Drain</b>	Cette condition représente l'effet d'un drain écrétant la nappe à partir d'une certaine côte piézométrique. Lorsque la charge dépasse cette côte, l'eau est évacuée et sort du système. Lorsque la nappe n'atteint pas la côte de drainage, cette condition n'a pas d'effet sur l'hydraulique souterraine. Elle tient compte des pertes de charges à l'approche de la structure drainante	$H_d$ : contrainte hydraulique que la structure drainante impose à la nappe $C_d$ = Coefficient de drainance représentant la perte de charge entre le système de drain et la nappe phréatique. Cette perte de charge est liée à la convergence des flux à proximité du drain, à la présence d'un horizon moins perméable autour de la structure drainante (colmatage de fond de canal par exemple)

Tableau 23 Description des conditions limites

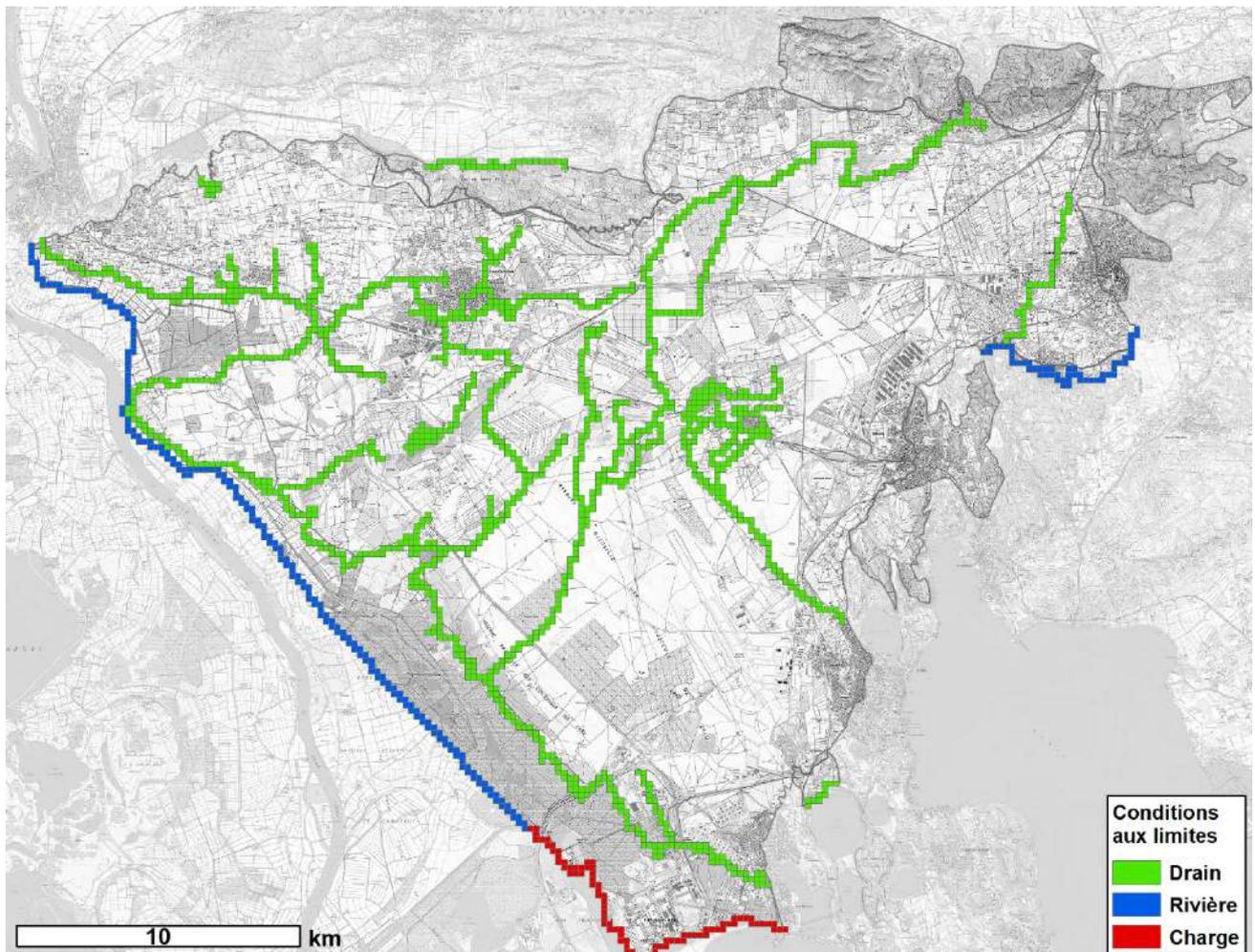


Figure 42 Nature des conditions aux limites appliquées au modèle de la nappe.

Objet	Type de conditions aux limites	Conditions appliquées
<b>Canal de Arles-à-Bouc</b>	Rivière	Hriv = 0.2 m (SMGAS non daté) Friv = -2.33 m (SMGAS non daté) E riv = 0.5 m Lriv = 20 m Criv = 10-4 m/s (arbitraire)
<b>Ligne de résurgences alimentant les marais à l'ouest</b>	Drain	Hd = charge hydraulique hautes eaux observée en octobre 1962 Cd = calcul automatique MODFLOW
<b>Limite drainante vers l'étang de la Gravière</b>		
<b>Canaux de drainage</b>	Drain	Hd = altitude moyenne du sol Cd = calcul automatique MODFLOW
<b>Etang des Aulnes</b>	Drain	Hd = 11.35 m (Hydrogéotechnique Sud Est 2017) Cd = calcul automatique MODFLOW
<b>Etang d'Entressen</b>	Drain	Hd = 35.7 m (SYMCAU 2018) Cd = calcul automatique MODFLOW
<b>Tranchée drainante</b>	Drain	Hd = 1.3 m NGF (PAM 1989) Cd = calcul automatique MODFLOW
<b>Touloubre</b>	Rivière	Hriv = données topo du fond de la rivière <sup>13</sup> Friv = Hriv - 0.3 m E riv = 0.5 m Lriv = 8 m Criv = 10-4 m/s (arbitraire)
<b>Vallée des Baux</b>	Drain	Hd = 5 m (altitude des résurgences) Cd = calcul automatique MODFLOW
<b>Mer</b>	Charge	Hc = 0 m

Tableau 24 Paramètres des conditions aux limites appliquées au modèle

## GEOMETRIE DE L'AQUIFERE

Pour des raisons de limite de puissance de calcul et de convergence du modèle, la maille de calcul a été réduite à une seule couche. Pour autant l'analyse de la topographie du substratum indique qu'une partie des écoulements s'effectue dans l'aquifère sous-jacent, dominé par la molasse du miocène (cf chapitre 2.1.4). Pour éviter des problèmes de dénoyage de certaines mailles du modèle résultant en une non-convergence des calculs, le modèle a été approfondi jusqu'à la côte -50 m et le modèle numérique de terrain constitue la limite haute des mailles de calcul.

Dans cette configuration, la structuration verticale des écoulements n'est pas simulée, ce qui est acceptable dans un système de nappe peu épaisse comme celle de la Crau.

### 2.2.5 CALAGE DES PARAMETRES HYDRODYNAMIQUES

Les paramètres de calage du modèle sont le champ de perméabilité et le coefficient d'emmagasinement. Les réseaux de surveillance en place constituent les points de contrôle piézométriques (Figure 43) de la procédure de calage.

#### PROCEDURE DE CALAGE

Le champ de perméabilité est estimé par calibration du modèle selon la méthode suivante :

- Une première estimation de la distribution du champ de perméabilité a été estimée à l'aide du champ de gradients hydrauliques donné par la carte hydrogéologie de 1969.
- Le modèle a été configuré en régime permanent avec comme champ de recharge la moyenne des chroniques de recharges simulées par le module de surface et comme les prélèvements les volumes journaliers moyens simulés entre 2013 et 2018.

<sup>13</sup> MNT avec échantillonnage du sol tous les 5 m, résolution 0.1 m en verticale.

- La moyenne des charges hydrauliques observées entre 2013 et 2018 a été désignée comme valeur de référence à atteindre en régime permanent
- L'outil d'estimation automatique PEST <sup>14</sup> a été utilisé pour calibrer le champ de perméabilité en régime permanent
- Le champ de perméabilité issu du processus de calibration est alors testé en régime transitoire et les données de référence sont éventuellement corrigées, pour tenir compte du décalage entre la moyenne des chroniques piézométriques simulées en régime transitoire et les charges hydrauliques simulées en régime permanent
- Un travail itératif est réalisé pour adapter la répartition des sous-zones du champ de perméabilité et la valeur affectée à chacun de ces sous-zones, en recherchant à minimiser l'erreur entre les chroniques piézométriques simulées et celles observées.

La répartition spatiale du coefficient d'emmagasinement s'établit ainsi dans un maillage de l'aire modélisée correspondant au rayon d'influence de chaque piézomètre de contrôle (polygones de Thiessen). Au sein de chaque zone, il est recherché à minimiser l'écart entre les battements piézométriques simulés et ceux mesurés.

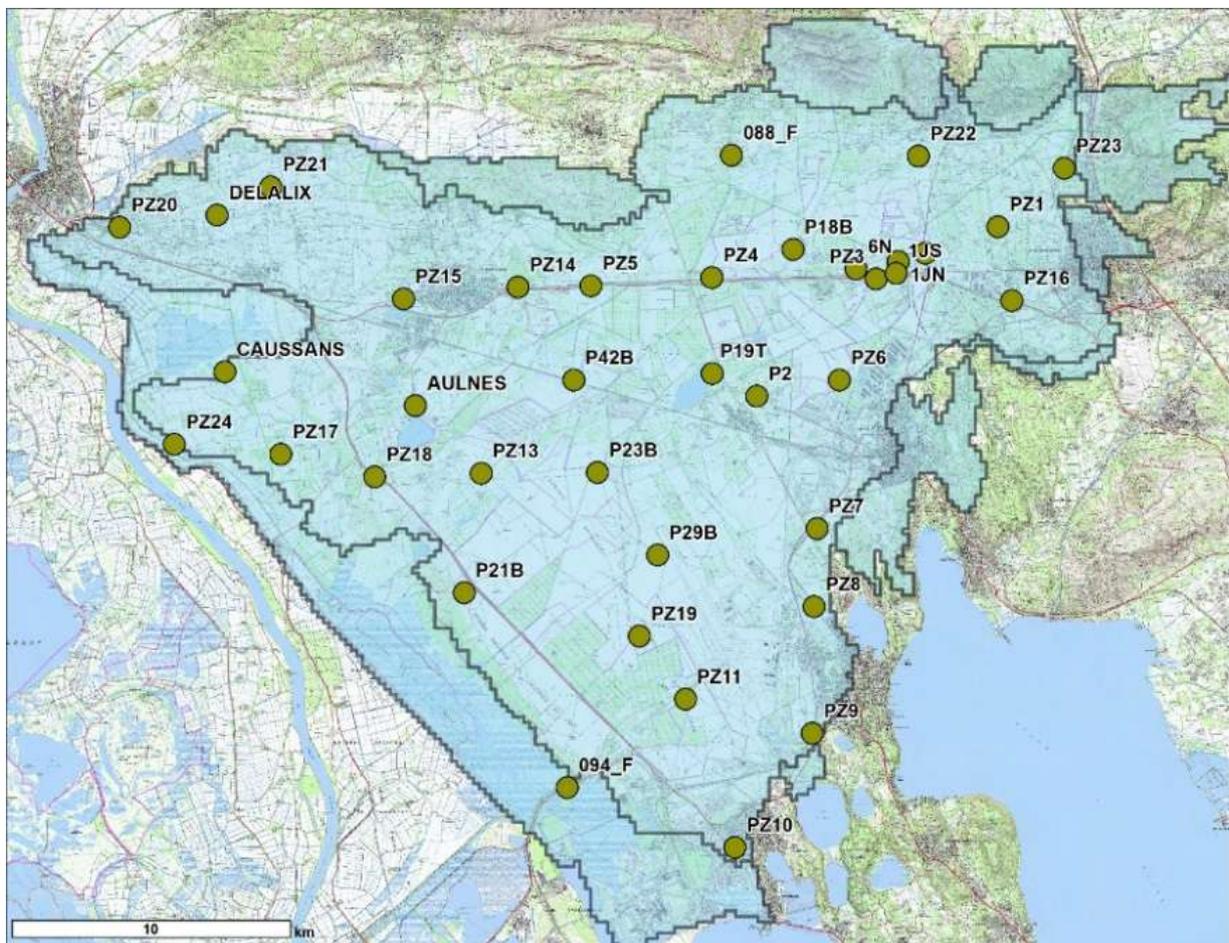


Figure 43 Points de contrôle piézométrique de MHYCRAU.

<sup>14</sup> PEST : Parameter ESTimation software développé par John Doherty et implémenté dans VISUAL-MODFLOW

**CHAMP DE PERMEABILITES ESTIMES**

La procédure de calage a conduit à un champ de perméabilité s'établissant entre  $5 \cdot 10^{-6}$  et  $10^{-2}$  m/s (figure 44). Il est observé une tendance à une perméabilité élevée dans le couloir du sillon de Miramas et du sillon d'Arles et en bordure sud-ouest de l'aquifère. Au centre et en bordure nord, nord-est et sud-est se distinguent des perméabilités plus faibles correspondant aux zones d'affleurement du substratum moins perméable.

Si une différence est bien observée entre les données estimées sur le terrain, l'ordre de grandeur de la distribution des données est bien respecté à l'échelle de l'aquifère (figure 45). La correspondance entre zonalité de ce paramètre hydrodynamique et zonalité des grandes structures sédimentaires (Crau de Arles, Crau du Luquier et Crau de Miramas) est assez cohérente. Les différences locales peuvent tenir également du champ d'investigation très local des essais hydrauliques tandis que le modèle intègre une variabilité à grande échelle.

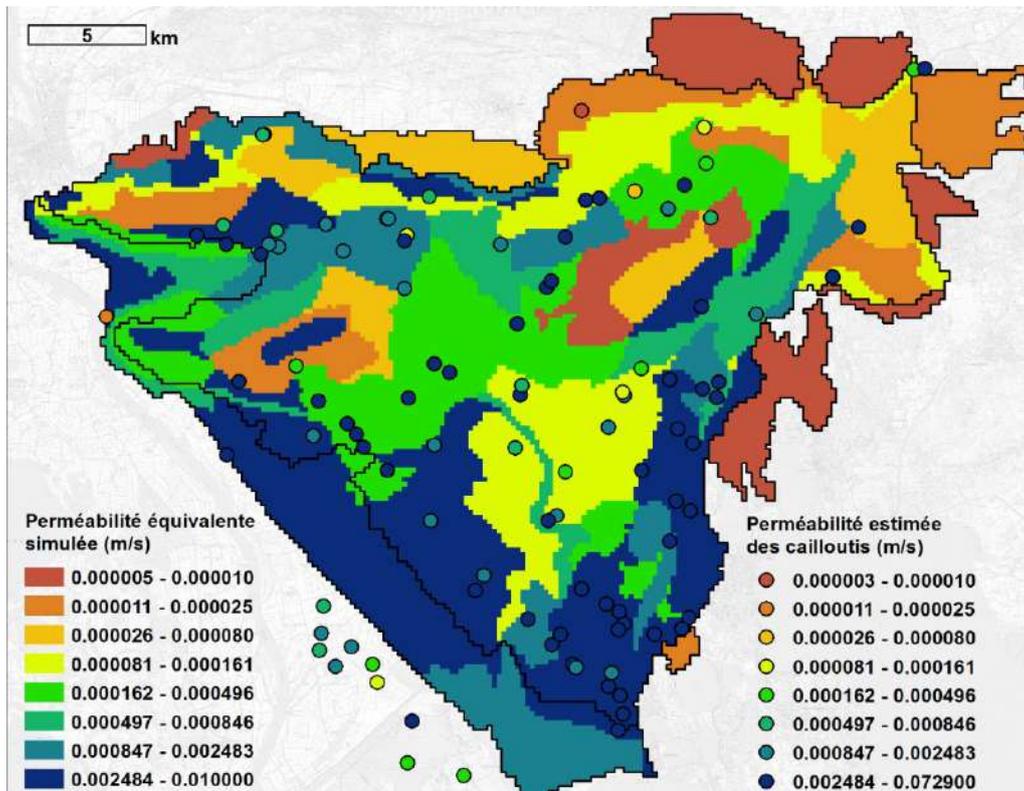


Figure 44 Distribution spatiale des perméabilités simulées et estimées sur le terrain

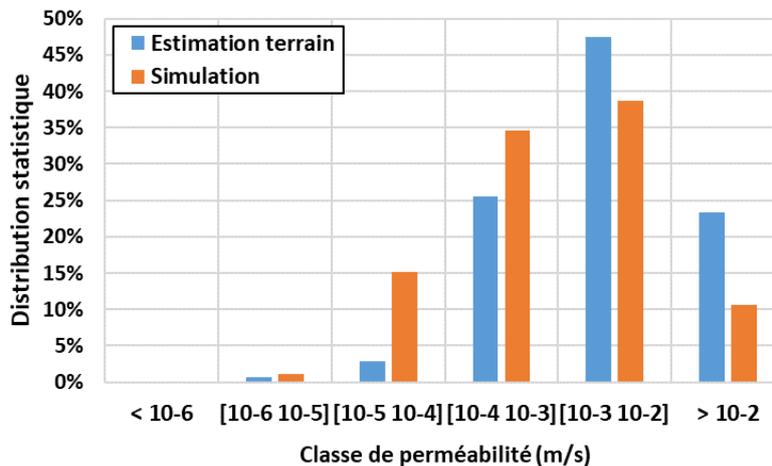


Figure 45 Distribution statistique des données de perméabilités

### COEFFICIENT D'EMMAGASINEMENT ESTIME

Le résultat du processus de calibration définit un champ du coefficient d'emmagasinement variant de 1% à 15% (figure 46). Celui-ci montre une certaine cohérence géographique sans qu'il soit distingué de logique en termes de lithologie des aquifères.

Les données estimées sur le terrain présentent également cette forte hétérogénéité spatiale. La nature plus ou moins indurées des cailloutis peut provoquer des phénomènes locaux de captivités de la nappe, expliquant des coefficients d'emmagasinement très hétérogènes dans l'espace et relativement faible pour une nappe alluviale réputée libre.

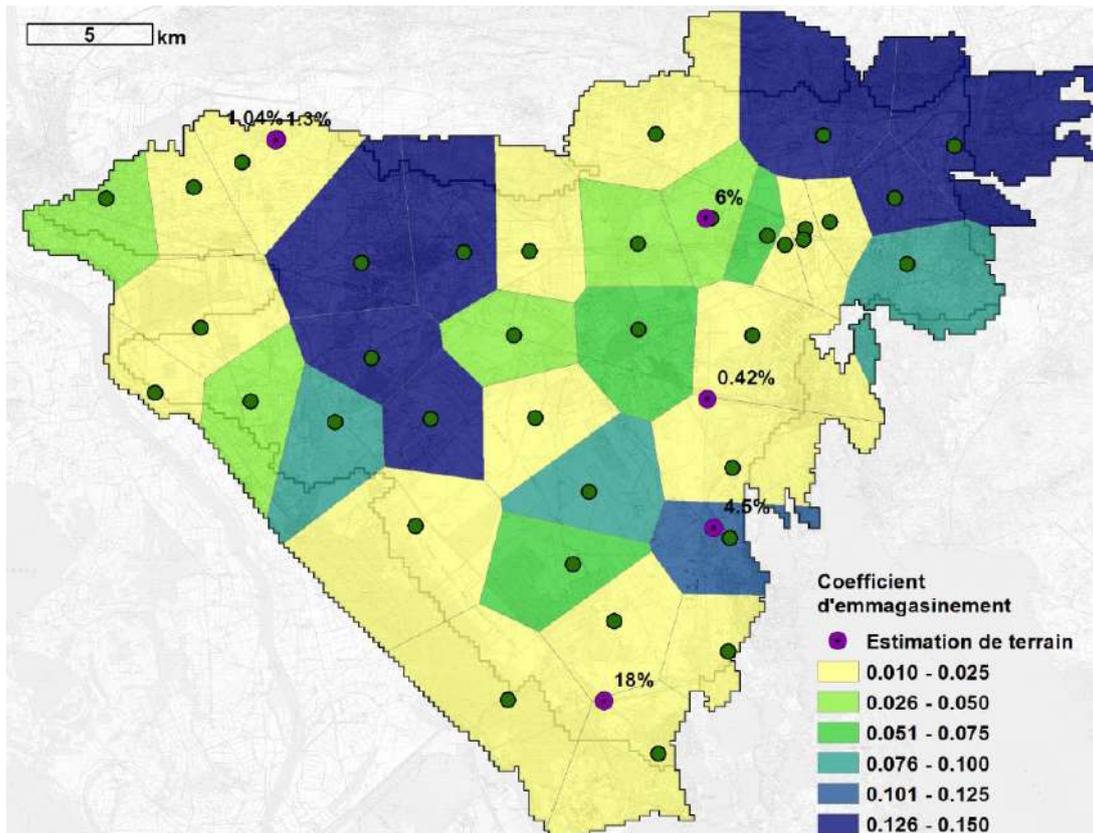


Figure 46 Distribution spatiale du coefficient d'emmagasinement simulé et estimé sur le terrain.

## 2.2.6 QUALITE DU MODELE

La qualité du modèle a été estimée selon trois critères :

- la capacité à reproduire les moyennes piézométriques sur toute la période de simulation.
- la capacité à reproduire les chroniques piézométriques.
- la capacité à reproduire les débits mesurés ou l'ordre de grandeur estimés des flux aux exutoires du système.

### PIEZOMETRIE SIMULEE MOYENNE

Une analyse des erreurs indique une très bonne corrélation entre les charges hydrauliques moyennes simulées et la moyenne des charges observées (figure 47). En moyenne, le modèle surévalue les charges hydrauliques d'environ 6 cm (tableau 25), ce qui est négligeable par rapport à l'échelle de travail. L'écart absolu entre les données simulées et observées s'établit à 11 cm en moyenne, avec un écart type sur l'ensemble des points de mesures de 14 cm.

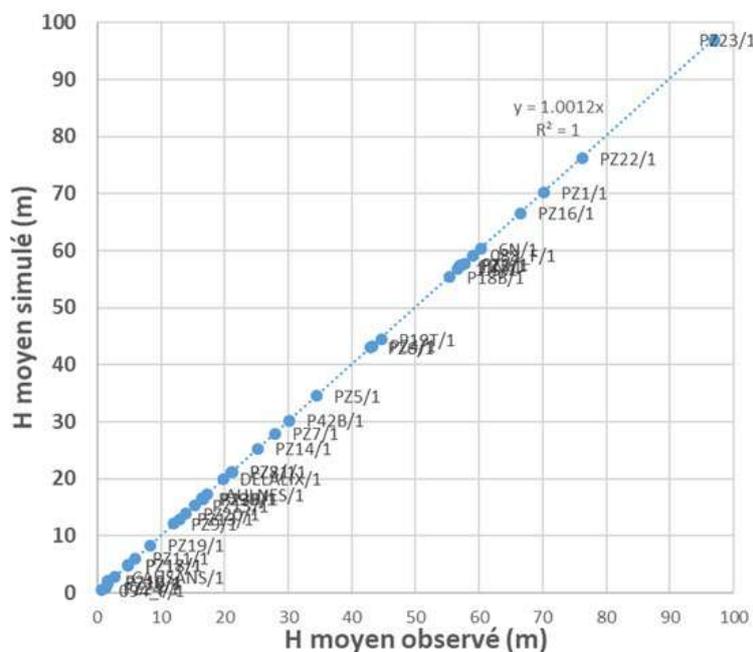


Figure 47 Diagramme de corrélation entre les charges hydrauliques observées et simulées (moyenne sur toute la période de simulation)

Moyenne des erreurs sur toute la période	0.06 m
moyenne des erreurs absolues sur toute la période	0.11 m
Ecart type des erreurs absolues	0.14 m
Moyenne des erreurs absolues à chaque pas de temps	0.79 m

Tableau 25 Statistiques de l'erreur entre les charges hydrauliques simulées et observées, moyennées sur toute la période de simulation

**PIEZOMETRIE SIMULEE EN REGIME TRANSITOIRE**

Une analyse des chroniques piézométrique permet d'estimer la capacité du modèle à simuler les phénomènes transitoires. Une analyse statistique (figure 48) montre que pour environ 35% des piézomètres l'erreur absolue moyenne à chaque pas de temps est inférieure à 50 cm. L'erreur est de 50 cm à 1 m pour 41 % d'entre eux et dépasse 1 m pour 24% d'entre eux. En moyenne, cette erreur est de 79 cm (tableau 25).

**La qualité de représentation du modèle peut donc être qualifiée de bonne à très bonne pour 76 % des points d'observation.**

Pour ces points de contrôle, la variabilité des signaux est bien représentée avec un modèle qui a une légère tendance à accentuer la réaction du système à des phénomènes transitoires (précipitations) par rapport à la réalité.

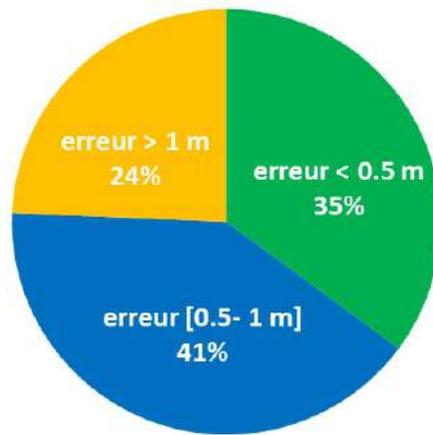


Figure 48 Répartition de la moyenne des erreurs observée à chaque pas de temps de calcul parmi les 37 points d'observation piézométrique

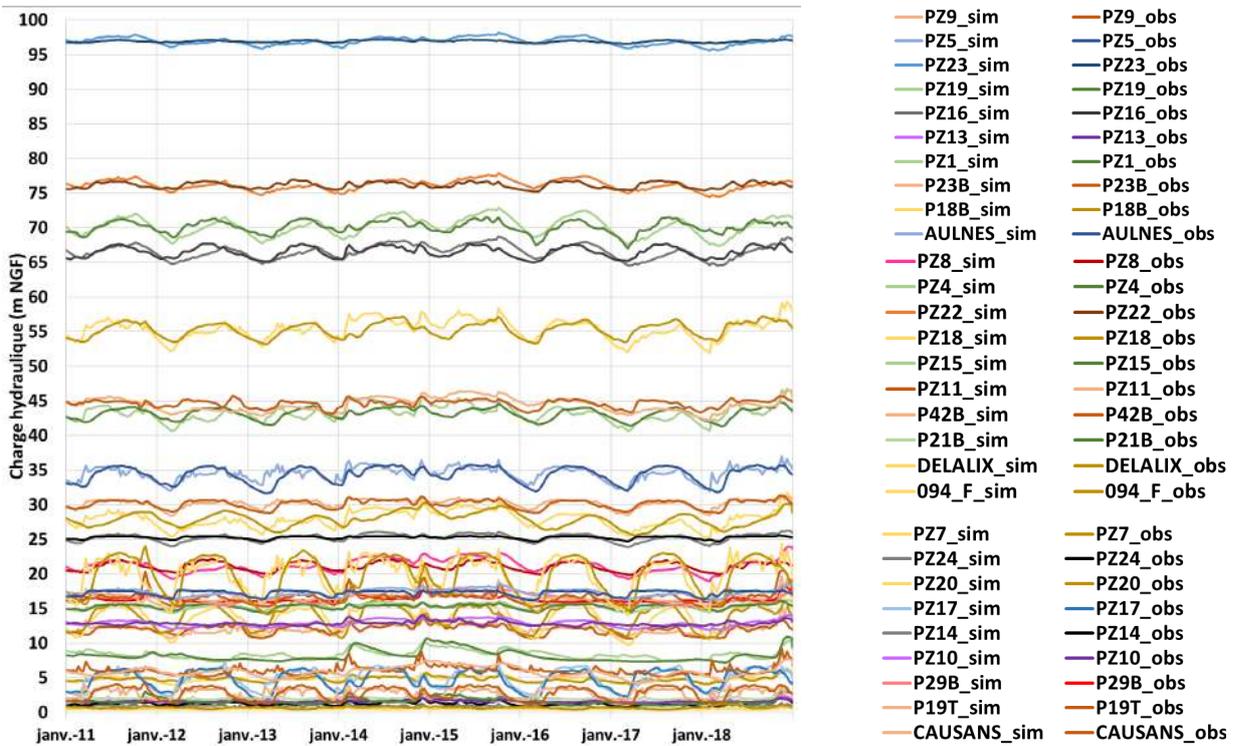


Figure 49 Evolution temporelle de la piézométrie simulée et observée (points où l'erreur est < 1 m)

Les figures 50 et 51 montrent que des différences significatives apparaissent pour 24% des piézomètres (erreur absolue moyenne > 1 m à chaque pas de temps). Il s'agit des secteurs entre Salon et Miramas, au sud d'Aureille, et au nord de Raphèles. L'erreur peut correspondre à décalage temporel entre la réponse réelle du système aux conditions de recharge et la réponse simulée. Ceci indique des conditions hydrogéologiques (transfert au sein de l'aquifère) et hydrauliques (drainage superficiel) localement complexes, qui ne sont pas bien reproduites par le modèle. Dans le secteur du Merle, la comparaison des chroniques observées et simulées montre en particulier un battement réel de nappe très important (7 m) que le modèle n'est pas capable de reproduire (3.5 m) (figure 52).

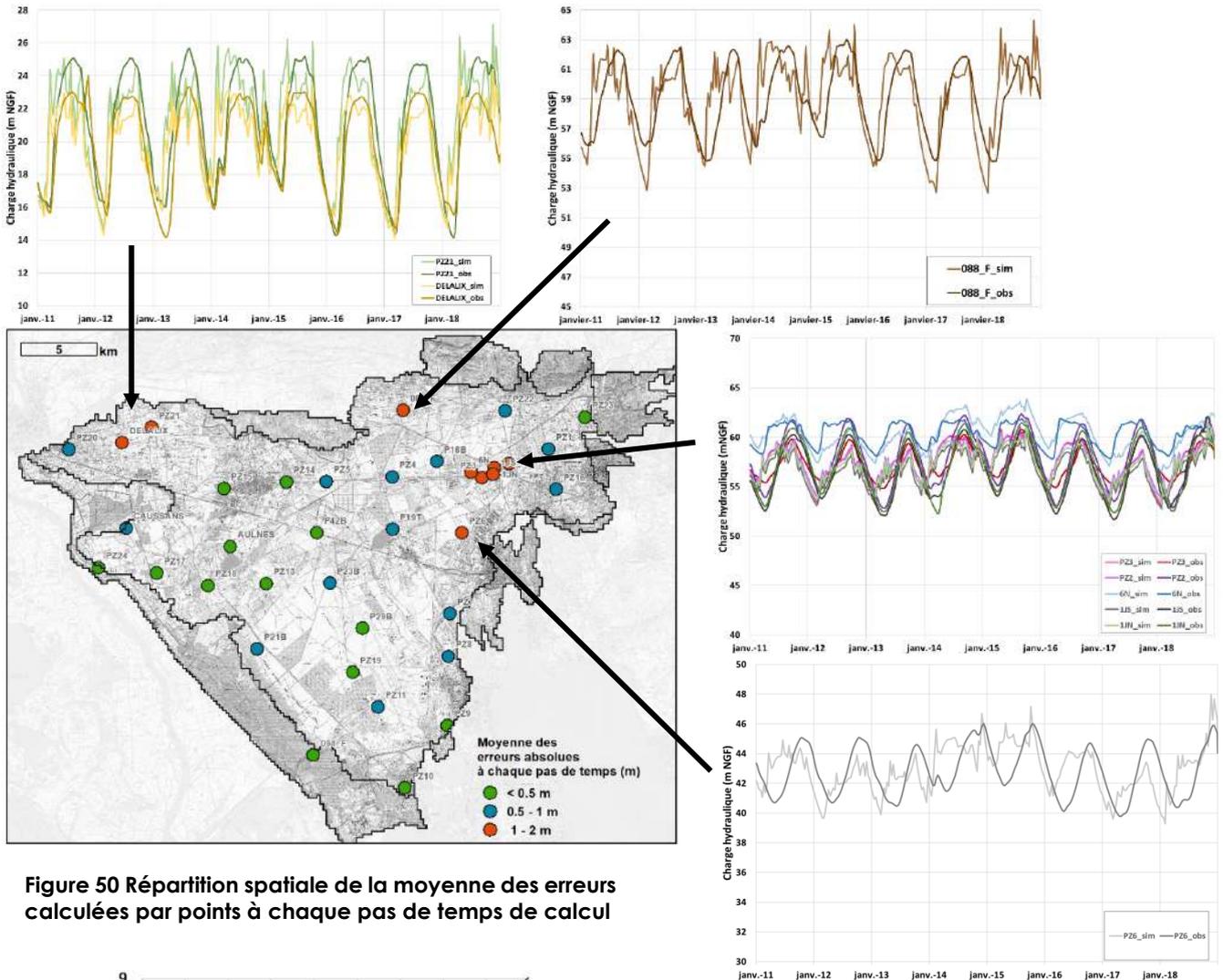


Figure 50 Répartition spatiale de la moyenne des erreurs calculées par points à chaque pas de temps de calcul

Figure 51 Chroniques piézométriques simulée et observée : points où l'erreur est > 1 m

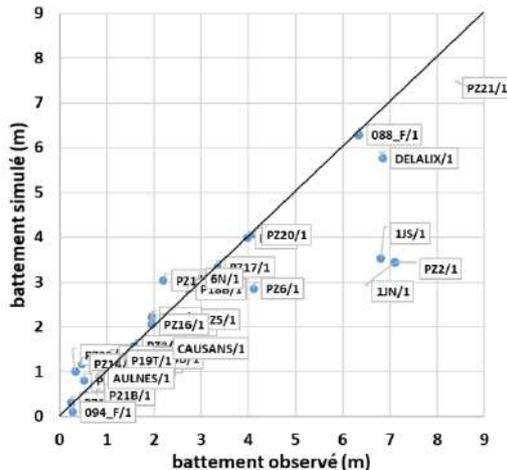


Figure 52 Battement piézométrique moyen observé et simulé (m)

## FLUX AUX LIMITES DU SYSTEME

Une comparaison des sorties du modèle avec les données estimées de flux aux exutoires du système indique que le modèle reproduit assez bien les flux aux limites du système (tableau 26). Par exemple le modèle donne une valeur de drainage de la tranchée drainante d'environ 270 l/s, tandis que la littérature technique indique un débit de drainage compris entre 200 et 300 l/s. Le flux moyen simulé des eaux collectées par la Touloubre sont plutôt dans la fourchette basse des évaluations effectuées sur le terrain (300 à 600 l/s).

	Débit (m <sup>3</sup> /s)			Ordre de grandeur estimées
	Données simulées			
	moy	min	max	
<b>Tranchée drainante</b>	0.27	0.20	0.37	0.2-0.3
<b>Touloubre</b>	0.32	0.27	0.35	0.3-0.6
<b>Mer</b>	0.47	0.44	0.51	nc
<b>Marais ouest</b>	3.44	2.45	4.12	3.0
<b>Etang de Lavalduc</b>	0.02	0.02	0.04	<0.1
<b>Etangs intérieurs</b>	0.09	0.04	0.11	<0.1
<b>Etang de la gravière</b>	0.23	0.00	0.41	nc
<b>Canaux intérieurs</b>	1.09	0.19	2.02	1.0
<b>Canal de Arles à Bouc</b>	1.25	1.02	1.39	1.0
<b>Résurgences de la vallée des Baux</b>	0.52	0.47	0.59	0.3-0.6

**Tableau 26 Flux annuels moyens, maximaux et minimaux, simulés aux exutoires naturels de la nappe de la Crau (m<sup>3</sup>/s entre 2011 et 2018). Les valeurs attendues reprennent les données de la littérature ou estimées sur le terrain**

## CONCLUSION SUR LA QUALITE DU MODELE

Les résultats du modèle sont très cohérents avec les observations piézométriques moyennes sur la Crau et les flux en sortie du système. Si la qualité du modèle sur l'évolution temporelle des charges hydrauliques est bonne pour la grande majorité des points de mesure, celle-ci est perfectible pour 25% des points. Ces erreurs étant locales et non systémiques, la qualité du modèle reste satisfaisante au regard des objectifs de SINERGI.

### 2.2.7 SIMULATION D'UNE PERIODE DITE DE REFERENCE (2013-2018)

Une fois le modèle construit et calé, une simulation dite de référence sur la période 2013 et 2018 est générée. Celle-ci servira de base de comparaison aux simulations exploratoires et prospectives réalisées dans les phases ultérieures de l'étude. Cette simulation de référence sert en quelque sorte d'étalon de la situation actuelle des usages et de l'état de la nappe de Crau.

#### LES FLUX ACTUELS DANS LA NAPPE DES CAILLOUTIS

Le bilan des flux (tableau 27) entre 2013 et 2018 indique que l'aire du système aquifère (70842 ha) est alimentée par 857 Mm<sup>3</sup>/an d'eau dont la moitié provient de la pluie (432 Mm<sup>3</sup>/an) et l'autre moitié provient des eaux d'irrigation issue de la Durance (42 Mm<sup>3</sup>/an). 25% des eaux de canaux rejoignent les exutoires à l'extérieur du système aquifère (tableau 28), tandis que 75 % du volume est utilisé pour l'irrigation des surfaces de prairies. Environ 20% des eaux de pluies ruissellent et ne s'infiltrent pas dans le système aquifère. L'évapotranspiration conduit à une perte d'eau d'environ 45 % du total des eaux entrant dans le système aquifère.

La recharge représente ainsi un volume annuel d'environ 370 M m<sup>3</sup>/an, dont 66% a pour origine l'eau d'irrigation (241 M m<sup>3</sup>/an). Les aquifères bordiers contribuent seulement à environ 2% de la recharge total du système aquifère.

Terme du bilan 2013-2018	Volume (Mm <sup>3</sup> /an)
Volume des entrées par canaux	425.1
Volume d'eau utilisé pour l'irrigation	321.7
Volume d'eau de canaux non utilisé pour l'irrigation	103.4
Volume pluie sur l'aire totale	432.3
Volume de pluie sur la plaine	336.7
Volume de ruissellement sortant du système	79.9
Drainage souterrain n'alimentant pas la nappe	3.1
Volume de recharge totale	369.5
Volume de recharge totale sur la plaine	357.8
Apport aquifères bordiers	7.7
Recharge naturelle totale	128.7
Recharge naturelle sur la plaine	116.9
Volume de recharge liée à l'irrigation sur les prairies	240.8
ETP	301.4

**Tableau 27 Bilan quantitatif des flux en surface du système aquifère**

Contribution des apports latéraux à la recharge totale :	2.1%
Part des eaux de canaux affectés à l'irrigation	75.7%
Part de l'irrigation dans la recharge totale du système aquifère	65.9%
Part de l'irrigation dans la recharge sur l'aire de la nappe	67.3%
Part de l'eau d'irrigation qui est drainée vers la nappe	74.9%
Part de l'eau des canaux qui participent à l'alimentation de la nappe	56.6%
Part des eaux de surface évapotranspirées	44.9%

**Tableau 28 Bilan relatif des flux**

La recharge de la nappe s'établit ainsi autour de 10 m<sup>3</sup>/s en moyenne entre 2011 et 2018 (figure 53), avec des flux autour de 15 m<sup>3</sup>/s en période d'irrigation et des débits proche de zéro en période hivernale. En période de pluies, la recharge peut ponctuellement atteindre 40 m<sup>3</sup>/s. En moyenne annuelle cela représente une recharge totale d'environ 370 Mm<sup>3</sup>, surfaces de prairies irriguées contribue à 80%, avec un volume constitué à 85 % d'eau de canaux.

La variation inter-annuelle de la recharge, illustrée à la figure 54, est assez forte. Elle oscillant entre 300 Mm<sup>3</sup>/an en année sèche (2016, 2017) et 480 Mm<sup>3</sup>/an en année humide (2018).

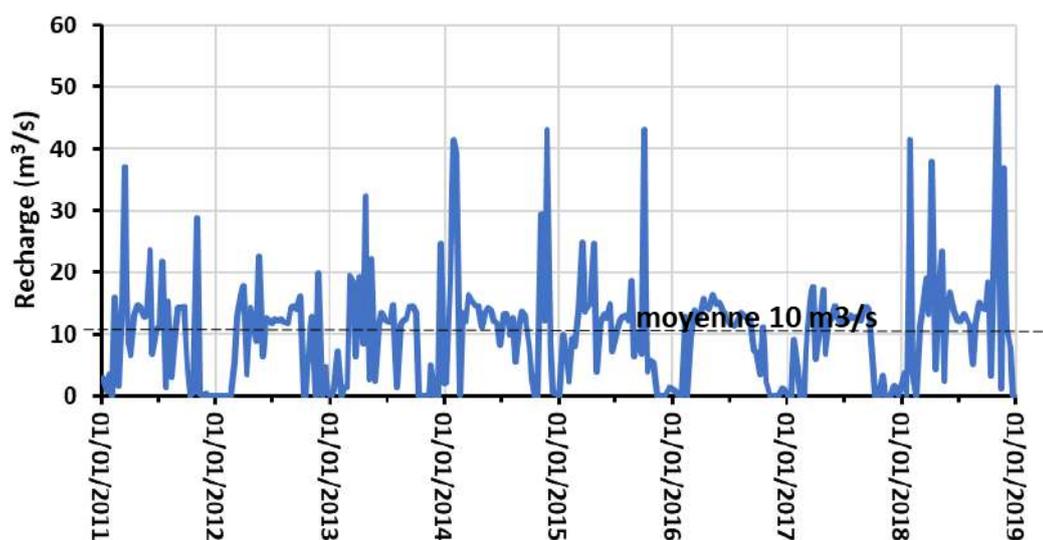


Figure 53 Evolution de la recharge simulée sur l'ensemble de l'aire modélisée [m<sup>3</sup>/s]

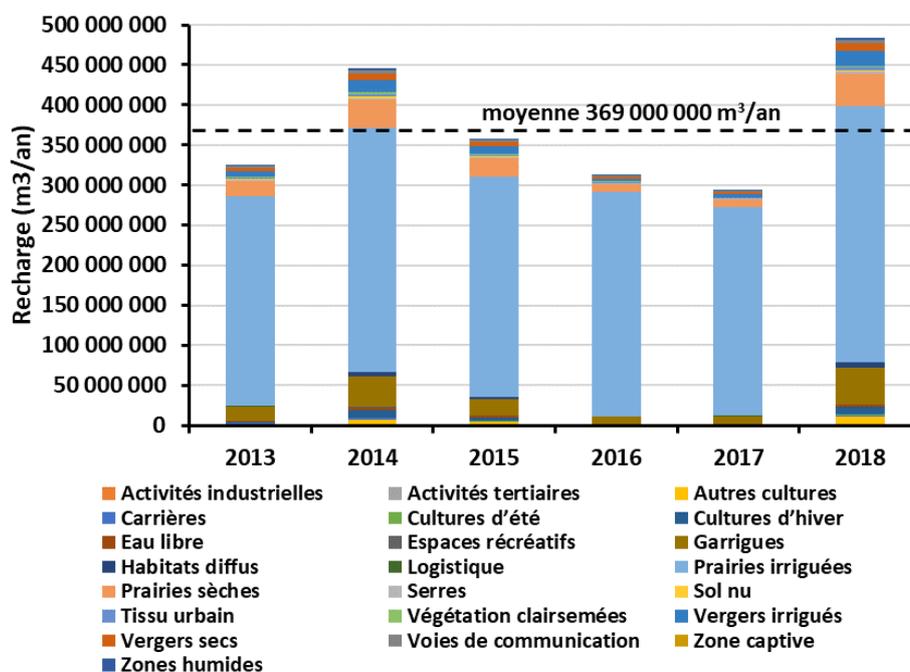
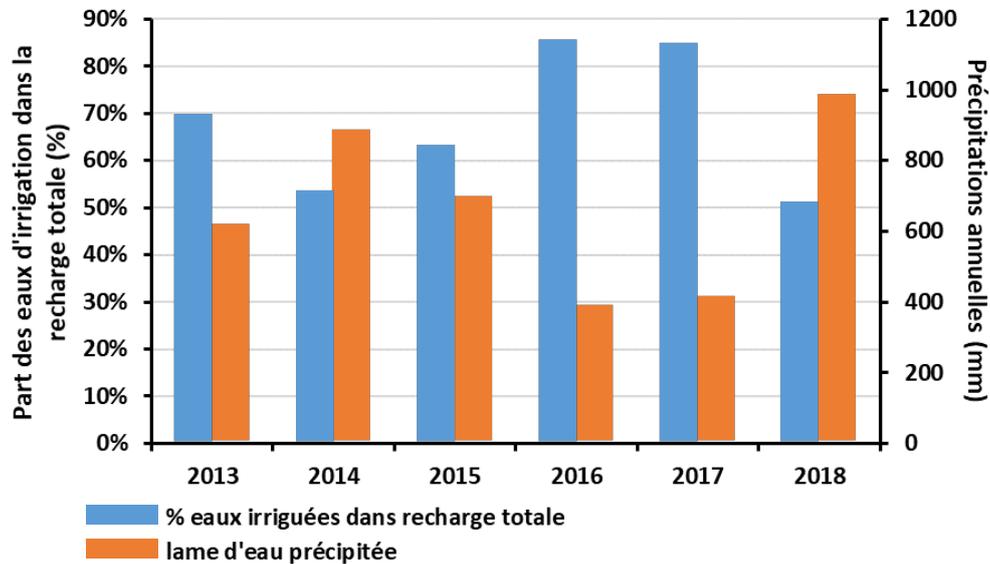


Figure 54 Contribution de chaque type d'occupation des sols à la variation inter-annuelle de la recharge.

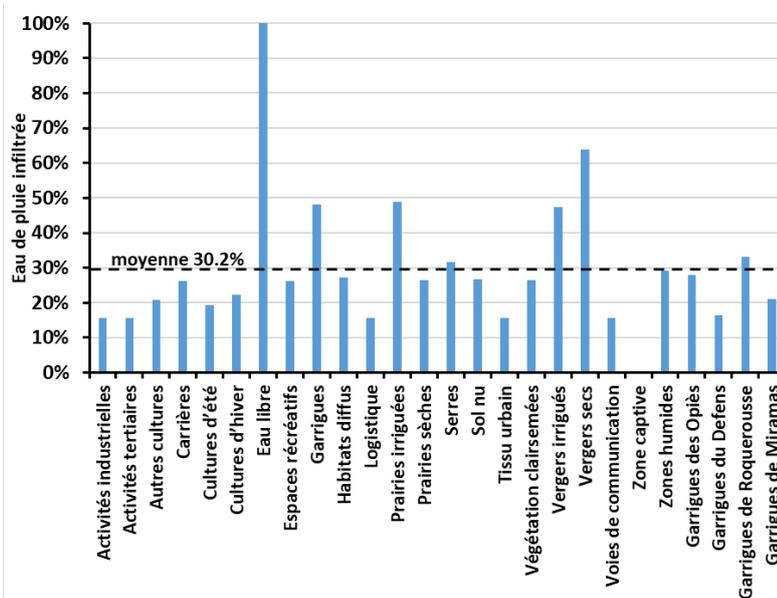
La part de l'irrigation gravitaire dans la recharge est en moyenne de 66% sur la totalité de l'aire modélisée entre 2013 et 2018, proche de la valeur de 69% estimée par Séraphin (2016). Une analyse par année montre la forte variabilité de ce rapport, évoluant entre 50% les années à fort cumul de pluie et 85% les années sèches (figure 55).



**Figure 55 Evolution interannuelle de la part d'eau d'irrigation dans la recharge totale de la nappe et des lames d'eau précipitées**

La figure 56 indique l'infiltration efficace des pluies par type d'occupation des sols moyennée sur la période 2013-2018. Celle-ci s'échelonne de 15 % pour les zones urbaines à 100% pour les plans d'eau (toute l'eau de pluie entre dans le système), avec une moyenne de 30% à l'échelle du système aquifère. La pluie efficace sous vergers secs (oliviers) s'établit à 63% des précipitations. C'est un chiffre assez élevé par rapport à ce qui est attendu, néanmoins la surface couverte par cette culture étant faible (1400 ha), une éventuelle erreur d'estimation sur cette surface n'a pas d'incidence sur les sorties du modèle.

A titre de comparaison, en se basant sur l'analyse des isotopes stables, Seraphin et al. (2016b) estime une infiltration efficace des eaux de pluies d'environ 21% à l'échelle de la Crau. En tenant compte des eaux superficielles issues des aquifères bordiers, non comptabilisées dans le bilan de Séraphin 2016, les résultats du modèle sont cohérents avec cette étude.



**Figure 56 Précipitation efficace par type d'occupation des sols**

## PIEZOMETRIE ACTUELLE DE LA NAPPE DES CAILLOUTIS

L'évolution des charges hydrauliques sur l'aire du modèle sont simulées entre 2011 et 2018, avec un pas de temps de 10 jours. Les années 2011 et 2012 constituent un période d'initialisation du remplissage du système aquifère, les sorties du modèle sont analysées sur la période 2013-2018.

Des cartes piézométriques peuvent être produites à chaque pas de temps, comme par exemple aux mois de hautes et basses, respectivement septembre 2018 et février 2015 (figure 57).

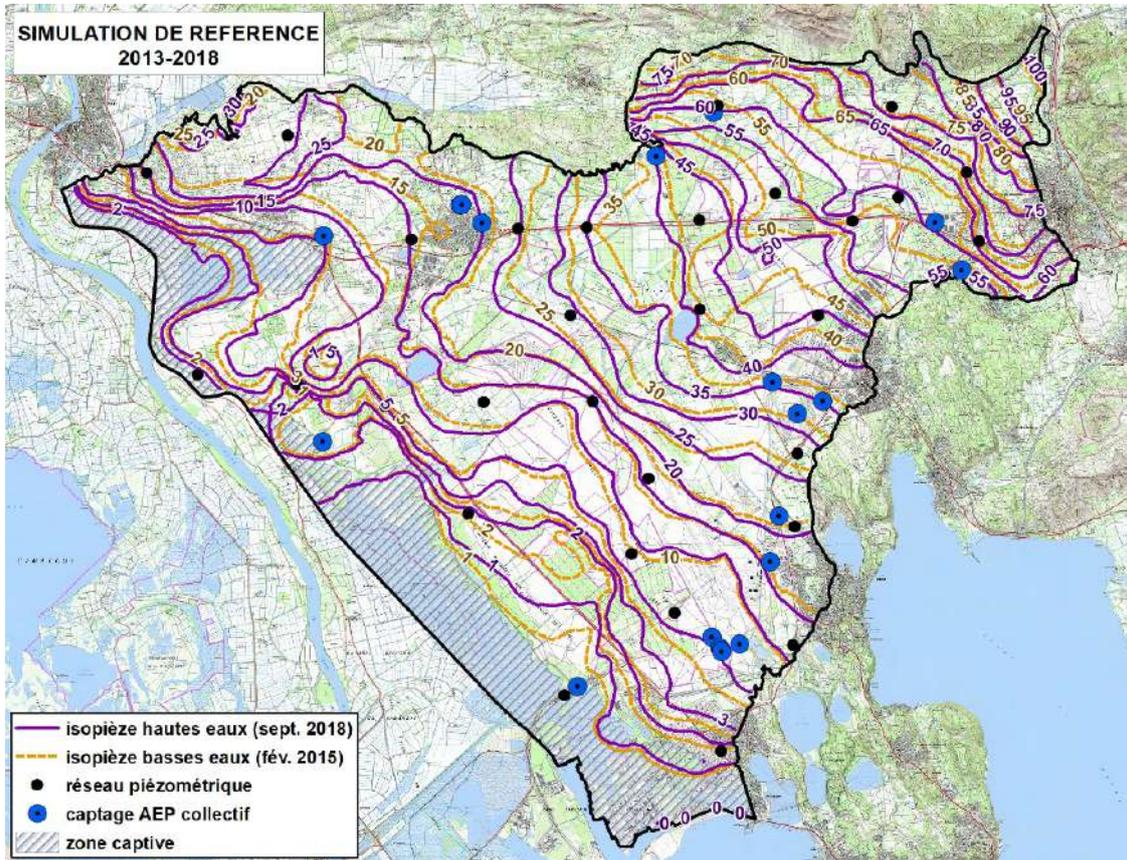


Figure 57 isopièzes simulés en situation de hautes eaux (septembre 2018) et de basses eaux (février 2015)

Le calcul de la différence de charges hydrauliques entre l'hiver et l'été (figure 58), montre que le battement de nappe, s'établissant en moyenne à 4 m dans les secteurs irrigués au nord, dépasse localement 8 m. Dans les secteurs agricoles majoritairement irrigués par pompage et à faible perméabilité, à proximité nord d'Entressen par exemple, ou dans la partie sèche de la Crau majoritairement influencé par les pluies hivernales, le calcul montre un battement négatif, c'est-à-dire que les charges hydrauliques en hiver sont supérieures aux charges hydrauliques estivales. Ceci est conforme aux observations de terrain, montrant que la piézométrie dans la partie centrale de la basse-Crau est très influencée par les cumuls de pluies automnales et hivernaux.

L'épaisseur de zone saturée au sein de l'horizon des cailloutis (figure 59) est en moyenne de 11,8 m. Ceci permet une estimation du volume d'eau contenu dans les cailloutis d'environ 740 Mm<sup>3</sup> (hypothèse de porosité des alluvions 10%). La variation du volume de la nappe entre 2013 et 2018 s'établit entre 700 et 790 Mm<sup>3</sup> (figure 60).

Une grande partie des cailloutis au nord est- d'Entressen n'est pas cependant ennoyée par la nappe de la Crau. Celle-ci s'écoule sous l'horizon des cailloutis, dans les roches carbonatées pré-pliocènes en conformités avec les observations décrites au chapitre 3.4.4. Cette surface dénoyée concerne 15% de la surface de la nappe (partie libre et captive). 6% de la surface présente une épaisseur de nappe inférieure à 2 m et près de 50% de la surface présente une épaisseur supérieure à 10 m (figure 61).

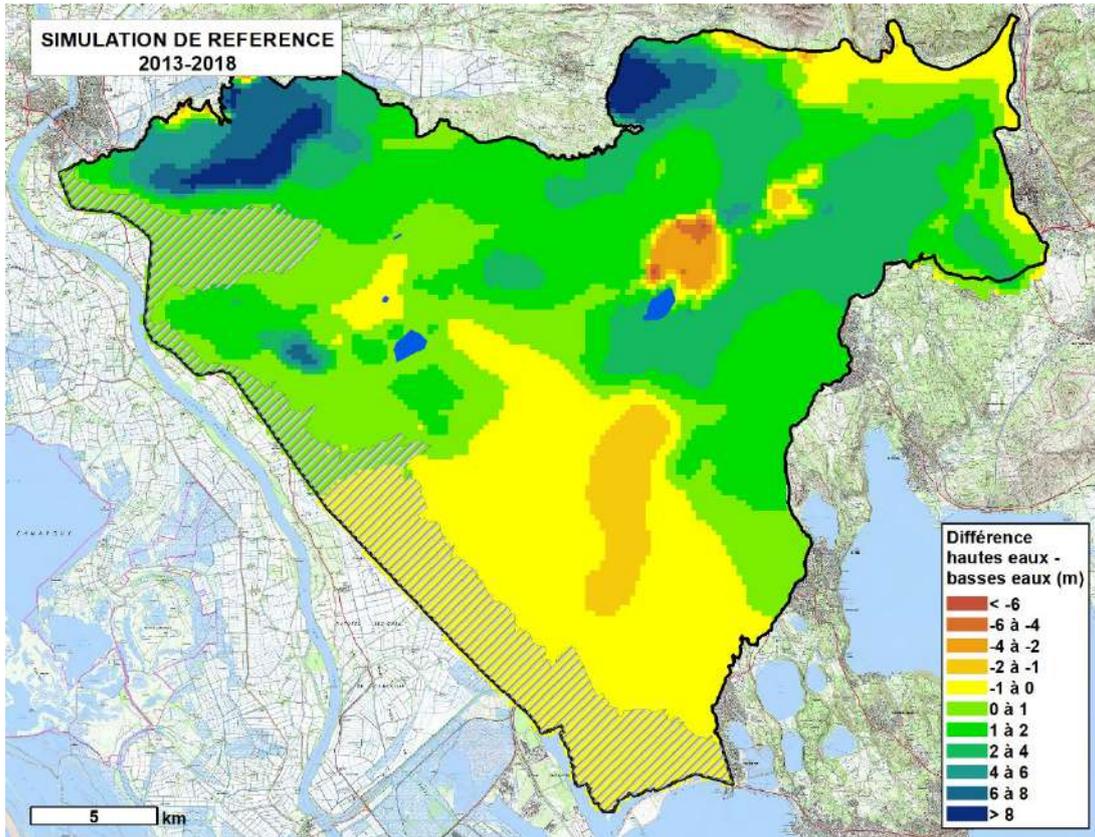


Figure 58 Battement de nappe simulée. La zone hachurée représente la partie captive de la nappe.

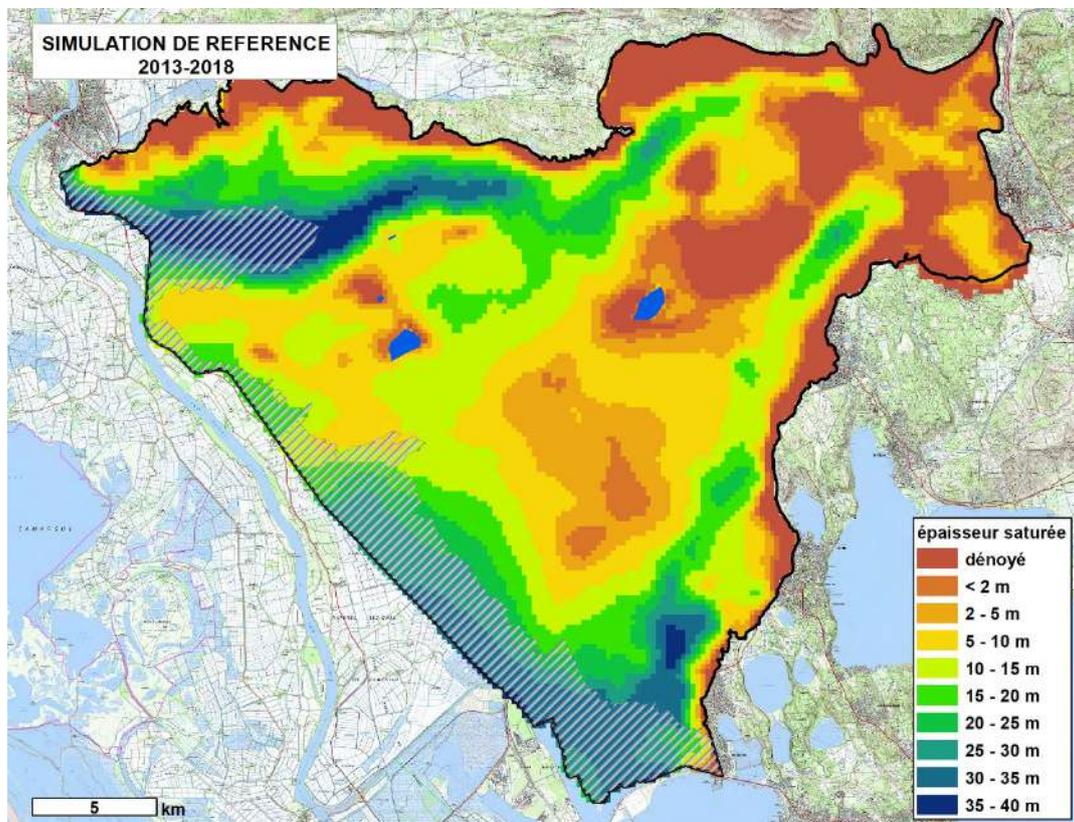


Figure 59 Epaisseur de la nappe dans les cailloutis plio-quadernaires. La zone hachurée représente la partie captive de la nappe.

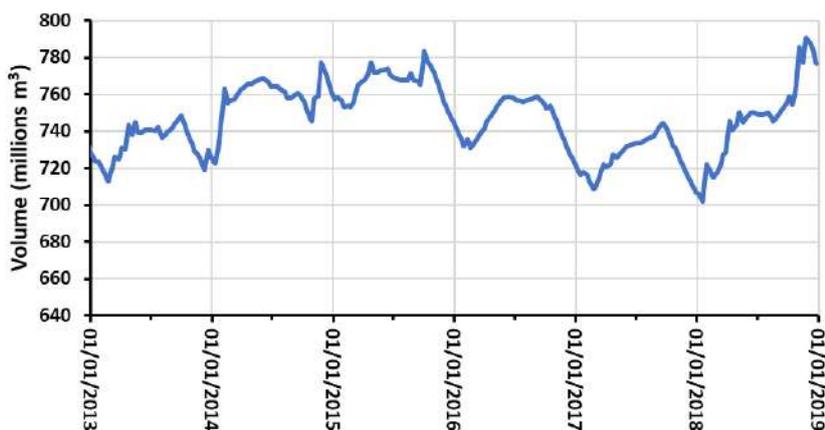


Figure 60 Evolution du volume de la nappe des cailloutis de la Crau.

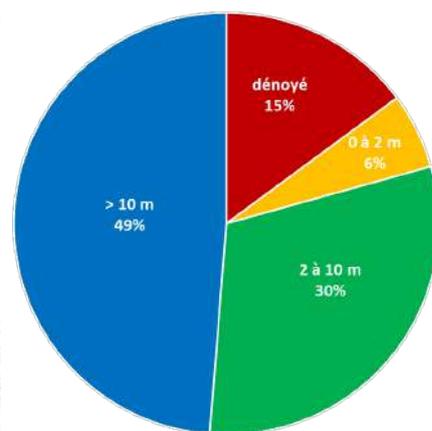


Figure 61 Répartition statistiques de l'épaisseur de la nappe

#### INDICATEUR GLOBAL D'ETAT DE LA RESSOURCE :

Le SYMCRAU utilise un indicateur probabiliste pour qualifier au cours du temps l'évolution de la ressource en eau à l'échelle globale de l'aquifère (Villesseche et al. 2017). Cet indicateur repose sur une analyse fréquentielle réalisée sur les moyennes mensuelles des charges hydrauliques observées sur chacun des piézomètres du réseau piézométriques. Il est ainsi calculé, par piézomètre et par mois, la fréquence de non-dépassement des niveaux piézométriques observés par rapport aux observations disponibles depuis 2013.

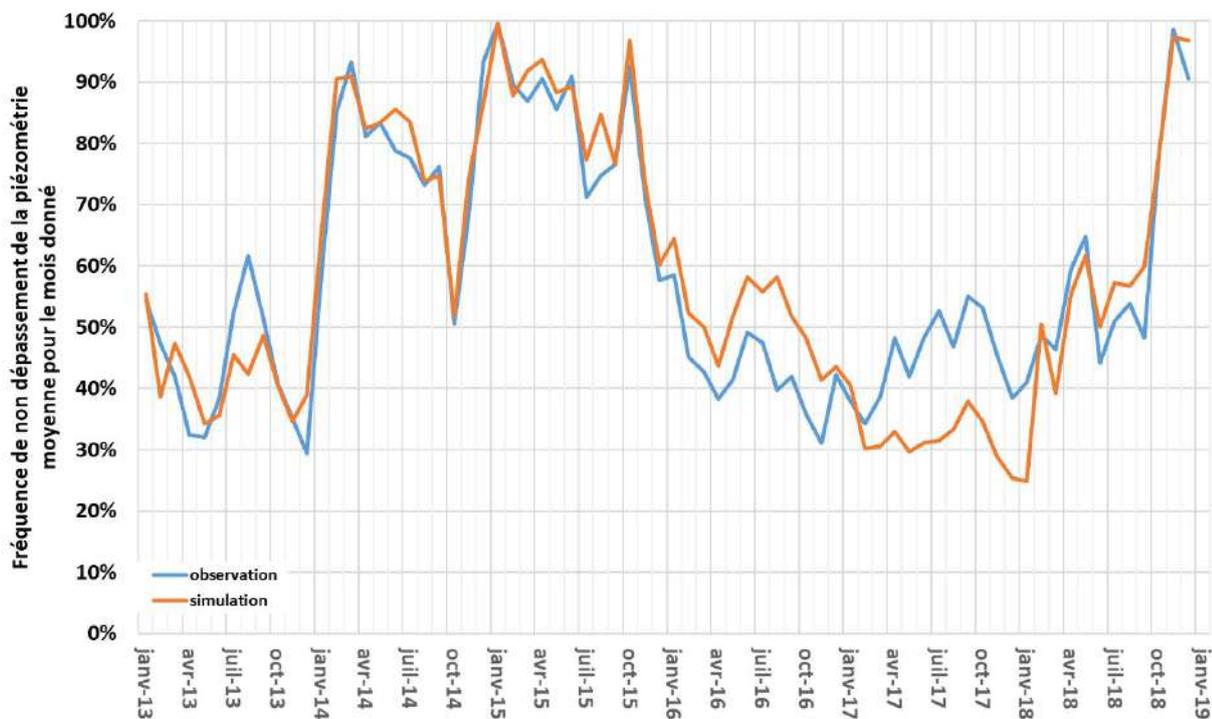


Figure 62 Evolution observée et simulée de l'indicateur piézométrique global d'état de la ressource du SYM-CRAU

L'évolution temporelle de cette fréquence est représentée dans la figure suivante montrant par exemple que durant la période 2013 à 2018, les années 2014, 2015 et 2018 sont marquées par des états piézométriques particulièrement haut tandis que les années 2013, 2016 et 2017 sont des années marquées par des états relativement bas.

**Une comparaison entre les données observées et simulées (figure 62) montre une bonne corrélation entre l'évolution de l'indicateur d'état quantitatif de la ressource basée sur les observations et celle basée sur les sorties du modèle, validant son utilisation pour simuler de façon exploratoire l'état quantitatif global de la ressource.**

#### BILAN DE MASSE :

Le modèle de nappe présente un débit entrant moyen de 1.15 Mm<sup>3</sup>/j, constitué à 66% d'eau issue de l'irrigation des prairies, variant de 0.5 à 4 Mm<sup>3</sup>/j suivant les conditions de recharge (figure 63). Le stock d'eau dans le réservoir, calculé par rapport au volume initial, varie de -60 à + 60 Mm<sup>3</sup>, avec un bilan qui tend vers un stock positif en décembre 2018 (figure 64). Ceci est conforme avec la situation de hautes eaux qui prédomine en décembre 2018 à la suite de fortes pluies automnales.

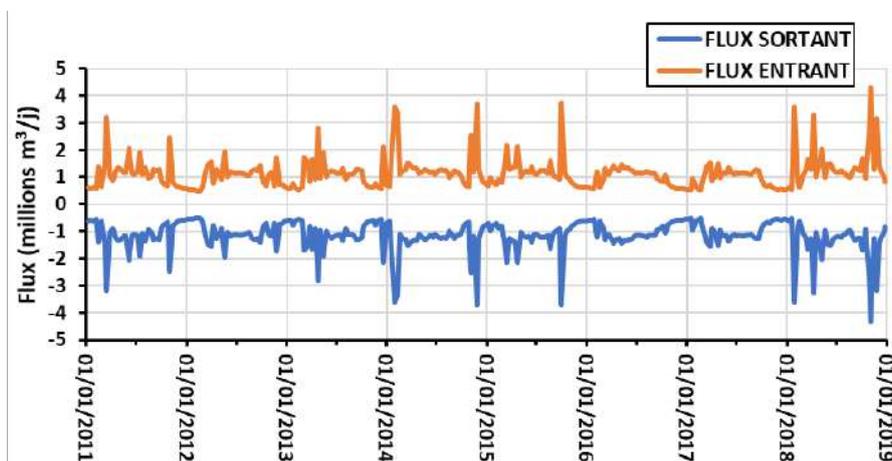


Figure 63 Entrées (IN) et sorties (OUT) simulées (Mm<sup>3</sup>/j)

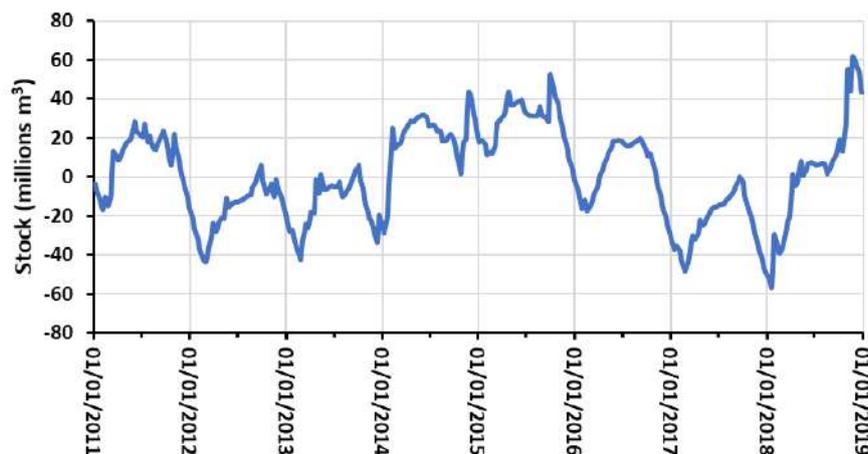


Figure 64 Evolution temporelle du stock simulé (par rapport au 01/01/2011)

80% des flux en sortie sont représentés par les exutoires naturels et 20% par les ouvrages de captage. La ligne de résurgence alimentant les marais ouest, s'étendant d'Arles à Fos-sur-Mer, représente un débit entre 2.5 et 4 m<sup>3</sup>/s (figure 66). La limite du canal de Arles-à-Bouc draine entre 1 et 1.3 m<sup>3</sup>/s. Les volumes drainés par les canaux intérieurs présentent la très forte variabilité, avec des débits situés en 0.1 et 2 m<sup>3</sup>/s, en conformité avec la fonction de drainage ponctuelle de ces ouvrages. Parmi les

exutoires aux flux importants, les résurgences de la vallée des Baux présentent des débits relativement stables d'environ 0.5 m<sup>3</sup>/s. Ces grandeurs simulées sont cohérentes avec les ordres de grandeur connus ou estimés pour ces flux en limite de nappe (cf 2.2.6).

La figure 67 illustre la cartographie des flux sur l'aire du système aquifère.

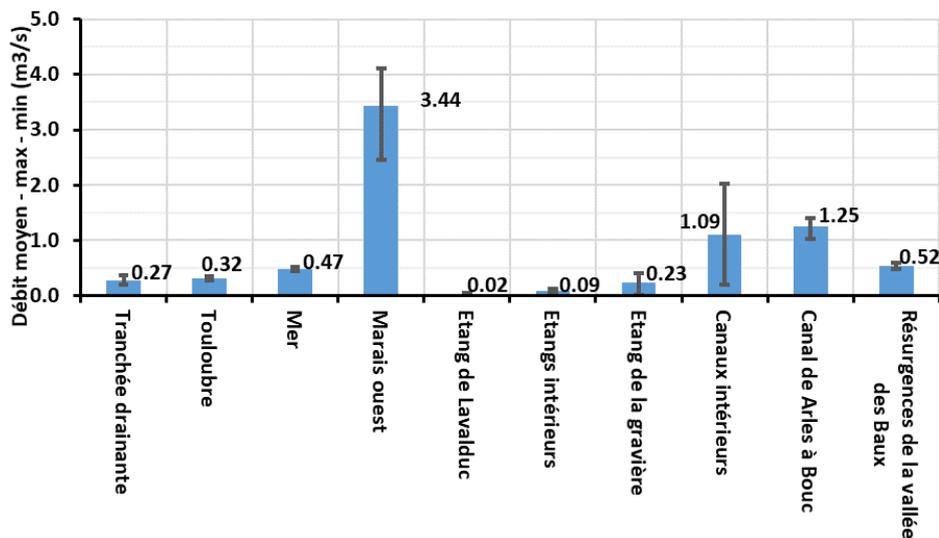


Figure 66 Flux aux exutoires du système aquifère

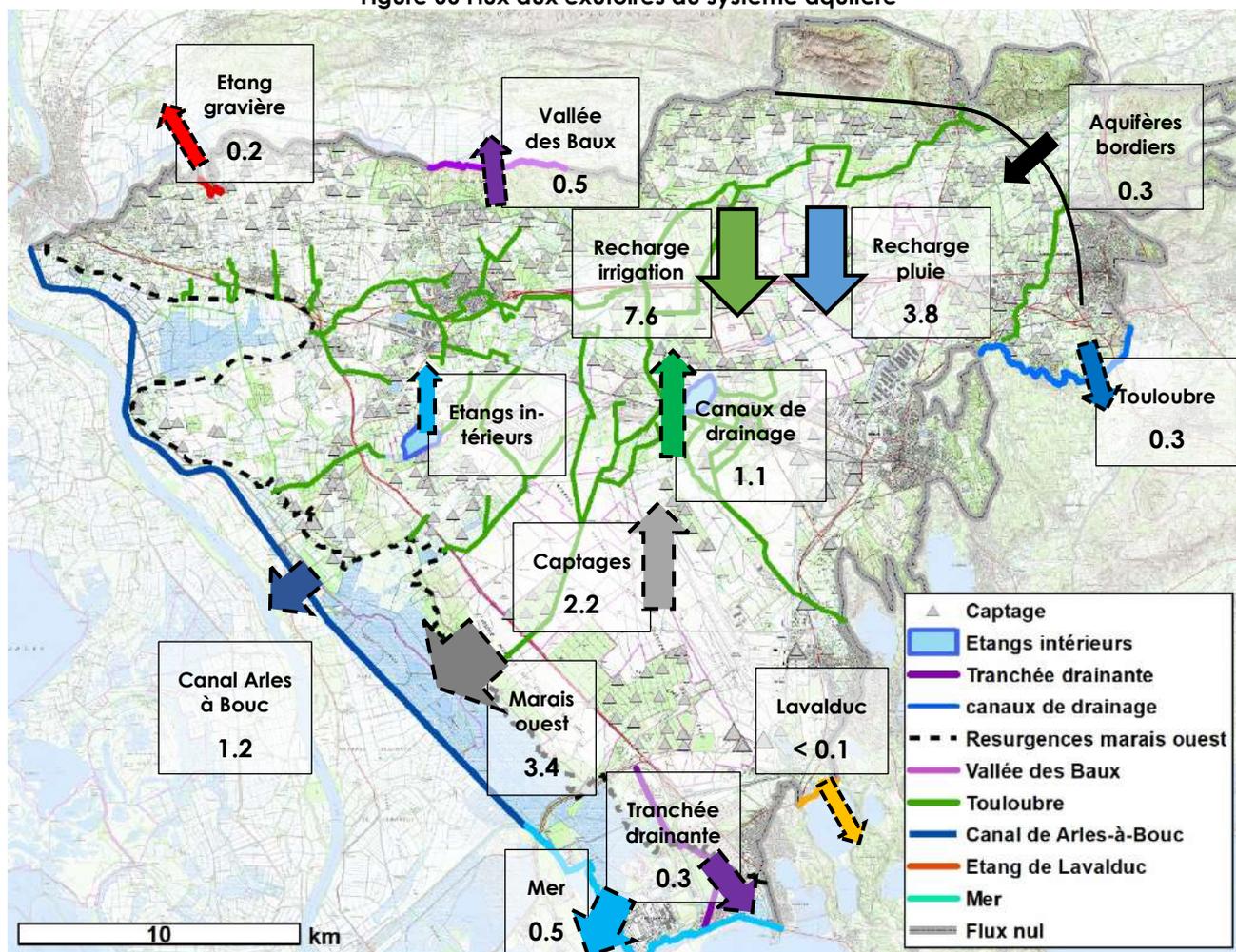


Figure 67 Bilan des flux entrant et sortant de la nappe de la Crau exprimés en m<sup>3</sup>/s

### 2.2.8 AVIS SUR LE DEGRE DE REPRESENTATIVITE DU MODELE

MHYCRAU exploite un module de surface, élaboré par l'UMR EMMAH, capable de simuler la recharge à l'échelle parcellaire en fonction des conditions climatiques, de l'occupation des sols et des itinéraires techniques agricoles. Ce module permet en particulier de quantifier l'infiltration dans la nappe des flux issue de l'irrigation gravitaire, facteur majeur de la recharge sur le territoire de la Crau.

Dans le cadre de SINERGI, le module de nappe a été profondément réactualisé et corrigé entre 2018 et 2019.

- Les limites physiques des modèles sont repoussées au-delà de l'aire d'alimentation de la nappe libre des cailloutis.
- La prise en compte des aquifères karstiques bordiers permet de mieux simuler les volumes et l'inertie des apports latéraux souterrains.
- Le linéaire de résurgences (laurons) marquant la frontière des marais ouest, les étangs intérieurs (Aulnes et Entressen) et les canaux de drainage sont désormais pris en compte dans le calcul.
- Il est introduit le canal d'Arles à Bouc, les résurgences de la Vallée des Baux, le cordon littoral et l'étang de Lavalduc comme nouvelles zones de drainage de la nappe.

Toutes ces améliorations permettent en particulier de pleinement simuler l'impact des variations piézométriques sur l'alimentation des zones humides des marais ouest et de la vallée des Baux.

La cohérence des sorties de MHYCRAU avec la piézométrie observée et les flux déjà mesurés sur la Crau permet de conforter la qualité de représentation du modèle et sa capacité à répondre aux objectifs de SINERGI, en particulier l'analyse de scénarios exploratoires d'évolution de l'hydro système.

**La précision des résultats permet d'établir pour la première fois un bilan hydrologique complet de l'origine et du devenir des eaux transitant dans le système (figure 68).**

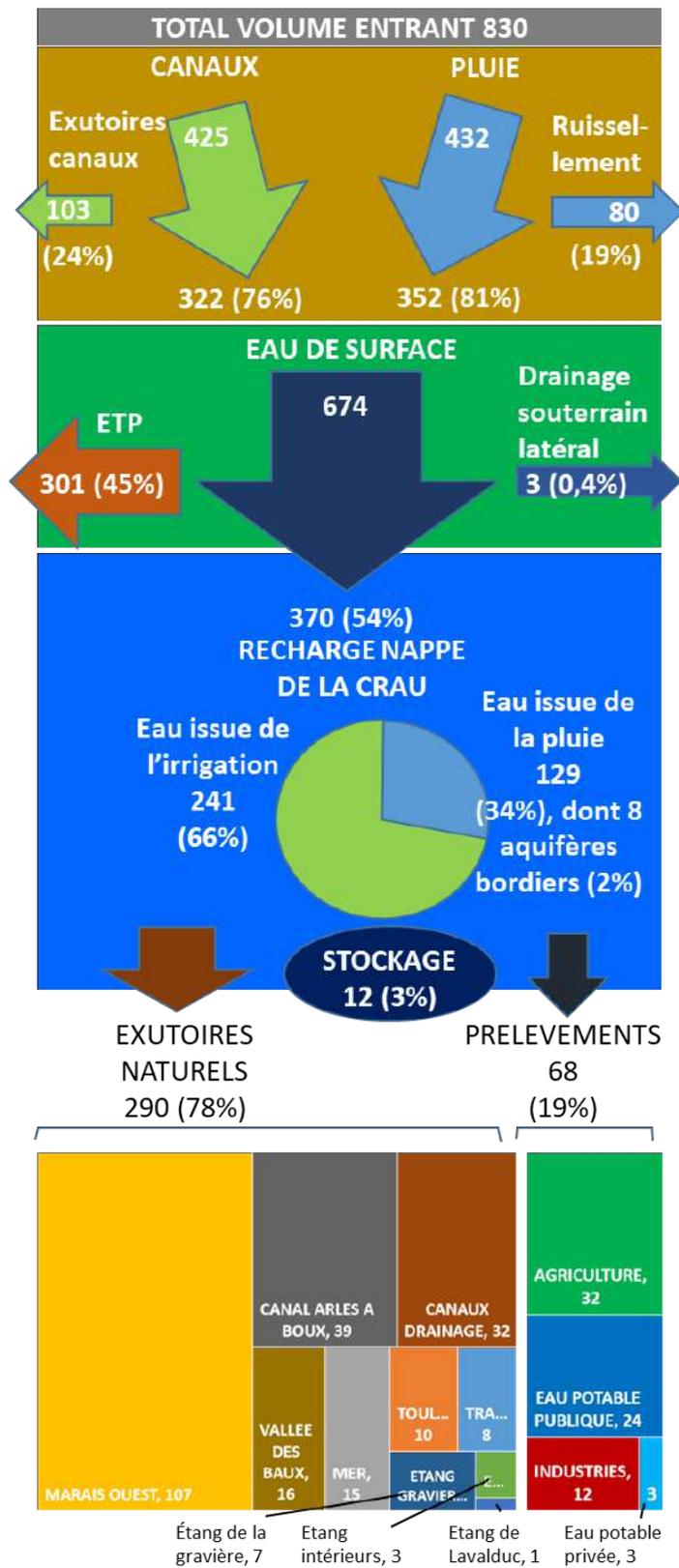


Figure 68 Bilan général des flux sur l'hydro système de la Crau

## 2.3 INDICATEURS D'ETAT DE LA RESSOURCE

L'un des objectifs de SINERGI est de déterminer les conditions de préservation des différents enjeux de la nappe :

- L'approvisionnement en eau potable des populations.
- Les prélèvements pour les secteurs économiques (agricoles et industriels).
- Le maintien du bon état des milieux naturels alimentés par la nappe.

Si l'étude SINERGI ne concerne pas l'évaluation des pollutions liées aux activités humaines, elle s'intéresse à la dégradation potentielle des eaux par les intrusions salines, liées aux conditions de gestion quantitative de la ressource.

Cette étape du projet consiste donc à identifier, pour chacun de ces enjeux, les d'indicateurs adéquats, permettant d'évaluer la capacité de la ressource à y répondre.

**Il s'agit d'indicateurs localisés de flux ou de niveaux piézométriques associés à des fréquences de dépassement de seuils, qualifiant l'état de tension exercé sur chaque usage.**

Ce chapitre présente donc l'identification des indicateurs par usages et établit les critères mesurant la tension hydrique qui s'y exerce. Il décrit l'état de ces indicateurs durant la période de référence 2013-2018, qui serviront de base pour analyser l'impact de variations du couple recharge/prélèvements dans les simulations exploratoires ou de prospective.

### 2.3.1 IDENTIFICATION DES INDICATEURS PAR ENJEUX

#### CADRE METHODOLOGIQUE

Les principaux enjeux de la gestion de l'eau à l'échelle de la Crau consistent à maintenir les conditions d'équilibre quantitatif et de qualité des eaux pour :

- Préserver les usages de la ressource : l'approvisionnement en eau potable des populations et des secteurs économiques (agricoles et industriels) ;
- Maintenir le bon état des milieux naturels alimentés par la nappe ;
- Réduire le risque de dégradation des eaux captées par les intrusions salines.

Chaque enjeu est constitué d'un ensemble d'éléments contributifs, répartis spatialement dans l'hydro système de la Crau. Il s'agit par exemple des différents captages AEP alimentant les populations du territoire ou des différentes zones humides alimentées par les eaux souterraines. Il s'agit donc de définir un indicateur par zone à enjeux. Afin de pouvoir être simulé par le modèle, il s'agit d'indicateur de flux ou de niveaux d'eau souterraine.

Pour chaque élément contributeur des enjeux, plusieurs états de tension sont identifiés :

- Un état de tension neutre, caractérisant un fonctionnement normal répondant aux usages et services de la ressource
- Un état de tension faible, caractérisant un état de fonctionnement dégradé demandant une vigilance particulière et des mesures légères de gestion pour répondre aux usages et services
- Un état de tension forte, menaçant la satisfaction des usages et des services

## USAGE D'ALIMENTATION EN EAU POTABLE COLLECTIVE

L'aquifère de la Crau est exploité par 16 captages publics pour l'eau potable, pour un volume d'environ 24 Mm<sup>3</sup>/an

Selon les résultats de l'étude ressource stratégique (HYDROFIS, 2015), 9 captages sont véritablement structurants pour le territoire (figure 69):

- St Hippolyte, alimentant Arles.
- Mas Thibert, alimentant Arles.
- Valboisé, alimentant St Martin de Crau.
- Les Fioles, alimentant Aureille.
- ZAC de Crau, alimentant Salon de Provence.
- Mary Rose, alimentant Grans.
- Caspienne, alimentant Istres.
- Sulauze, alimentant Miramas.
- Ventillon, alimentant le GPMM.

La tension sur l'exploitation des ouvrages intervient lorsqu'une partie des crépines se trouve dénoyée, entraînant une usure prématurée des colonnes crépinées et une baisse de productivité de l'ouvrage ; il existe aussi un dénoyage des pompes. Pour chaque ouvrage, deux indicateurs en côtes NGF sont ainsi proposés (tableau 29)

- Seuil de tension faible : côte supérieure des crépines qui indique le début du dénoyage des crépines.
- Seuil de tension forte : Cote correspondant à un dénoyage de 20% de la colonne crépinée, qui marque le début d'une perte de productivité significative de l'ouvrage.

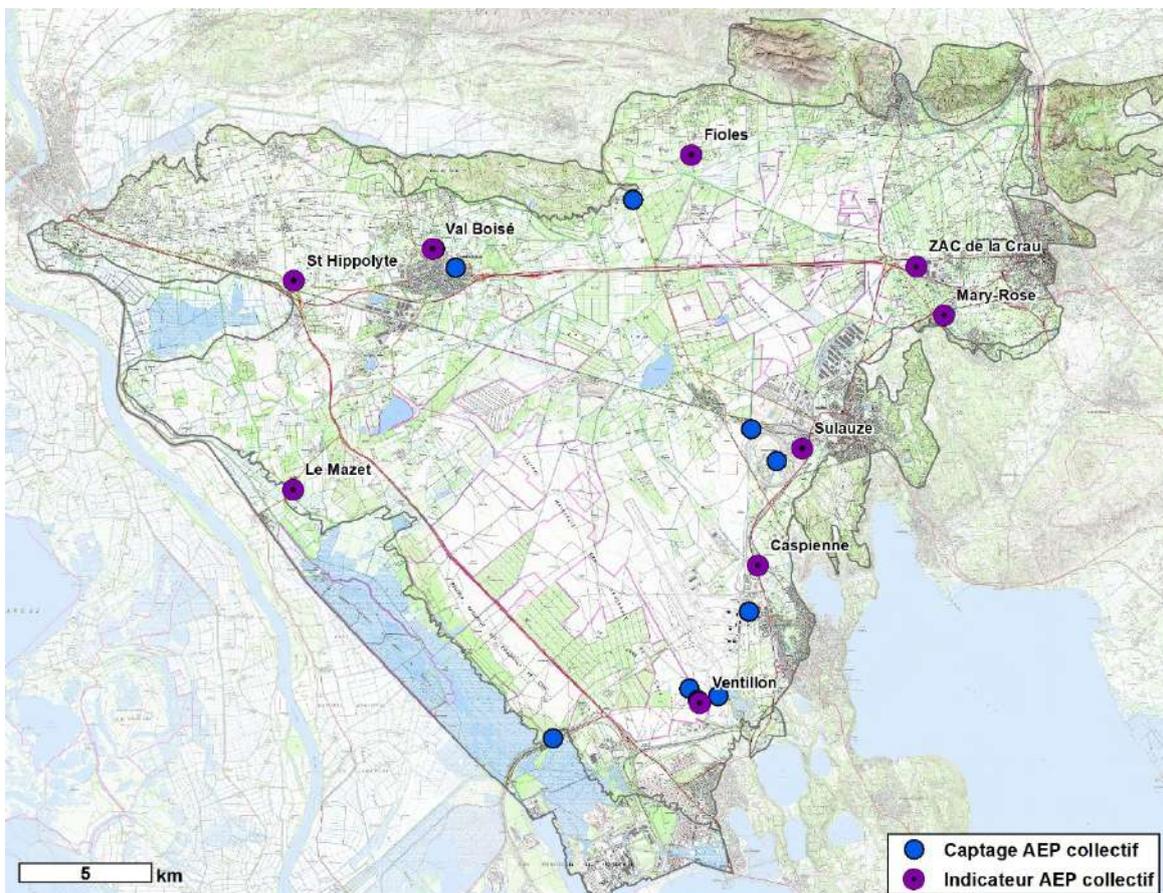


Figure 69 Localisation des captages et indicateurs de l'AEP collectif.

	Côte cré- pine haute	Côte cré- pine basse	Seuil tension faible	Seuil tension forte
<b>ZAC CRAU</b>	52.0	-70.0	52.0	27.6
<b>VENTILLON</b>	1.3	-6.7	1.3	-0.3
<b>VALBOISE</b>	7.3	-12.7	7.3	3.3
<b>SULAUZE</b>	30.0	25.0	30.0	29.0
<b>ST HIPPOLYTE</b>	-6.0	-16.0	-6.0	-8.0
<b>LE MAZET</b>	0.1	-14.9	0.1	-2.9
<b>MARY ROSE</b>	54.5	51.0	54.5	53.8
<b>LES FOLLES</b>	47.5	-2.5	47.5	37.5
<b>LA CASPIENNE</b>	18.3	3.3	18.3	15.3

Tableau 29 Calcul des indicateurs par ouvrage

On peut constater que tous les ouvrages ne présentent pas la même vulnérabilité. Une grande majorité des ouvrages présente des épaisseurs crépinées de plus de 10 mètres, voire plusieurs dizaines de mètres. Seul Sulauze présente une vulnérabilité structurelle élevée.

#### USAGE D'ALIMENTATION EN EAU POTABLE NON COLLECTIVE

Les habitats diffus, dont une partie n'est pas reliée à un réseau collectif d'eau potable, sont largement répartis sur la partie nord du territoire. La plupart des captages privés, sous-déclarés, ne sont pas localisés. Il est identifié deux secteurs montrant une densité significative d'habitats diffus non reliés à un réseau collectif : secteur d'Arles et secteur de Salon (figure 70).

La capacité à satisfaire cet usage dépend grandement de l'investissement initial des propriétaires dans le forage pour aller capter des horizons profonds du système aquifère. Etant donné le peu d'information sur le nombre et l'épaisseur mouillée captée par ces forages, il a été défini un critère général de classement de l'état de tension sur ces indicateurs, par rapport à la période actuelle ou il est considéré que l'usage des captages privés est bien satisfait :

- **tension neutre** : baisse moyenne de 0.5 m par rapport à la moyenne actuelle
- **tension faible** : baisse annuelle moyenne de 0,5 à 1 m par rapport à la moyenne actuelle
- **tension moyenne** : baisse annuelle moyenne de 1 à 2 m par rapport à la moyenne actuelle
- **tension forte** : baisse annuelle moyenne de 2 à 4 m par rapport à la moyenne actuelle
- **tension très forte** : baisse moyenne annuelle supérieure à 4 m par rapport à la moyenne actuelle

Ne connaissant ni la localisation ni les caractéristiques des forages privés, il n'est pas possible de définir un indicateur de tension par usager. Il a donc été désigné un point de surveillance centrale pour chacune des zones, en faisant l'hypothèse que les variations piézométriques en ces points sont représentatives des variations générales au sein de ces zones.

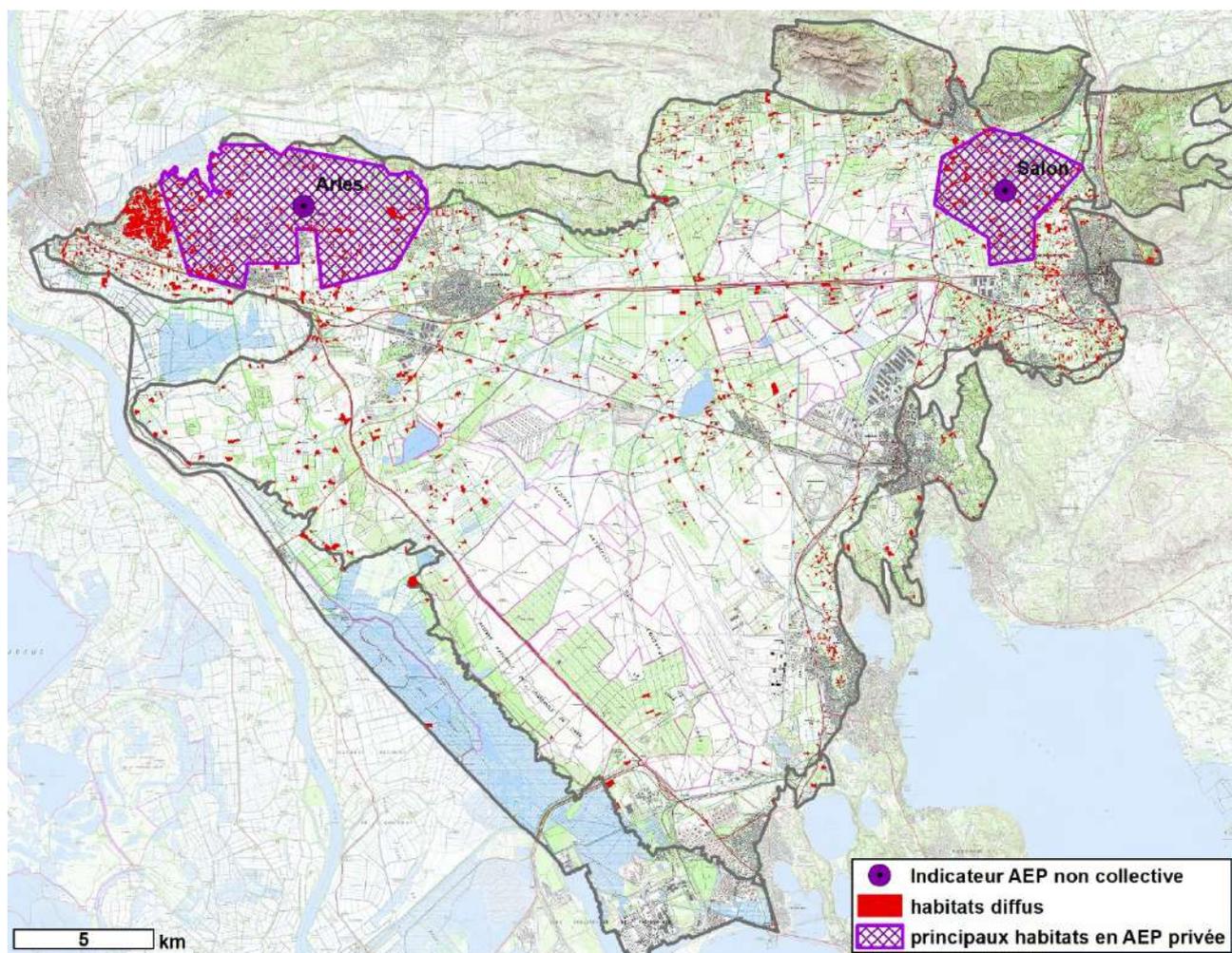


Figure 70 Distribution de l'habitat diffus et localisation des indicateurs pour l'AEP non collective

#### USAGE DE PRELEVEMENTS POUR L'IRRIGATION AGRICOLE

Pour les prélèvements agricoles, les forages sont trop nombreux et trop peu décrits pour permettre une définition des indicateurs par ouvrage sur la base du risque de dénoyage de crépine ou de pompes.

Les données déclaratives au titre de l'OUGC font figurer des débits de pointe maximaux, ainsi que des profondeurs d'ouvrage. Près de 75% des pompes installées présentent des puissances de pompage inférieures à 100 m<sup>3</sup>/h. Les pompages puissants (> 200 m<sup>3</sup>/h) sont relativement rares (moins de 20 ouvrages équipés). De plus, connaissant le niveau piézométrique moyen en NGF (moyenne des niveaux estimés en octobre 2013 et mai 2014) et le fond de l'ouvrage en NGF, il est possible d'estimer l'épaisseur de la zone noyée.

On peut observer qu'une grande majorité des ouvrages présente une profondeur supérieure à 10 m. On pourrait en conclure de façon hâtive que ces ouvrages sont peu vulnérables. Or, il s'agit souvent d'ouvrages qui recoupent en profondeur les séries moins perméables du Miocène.

Au vu du nombre important d'ouvrages à usage agricole et des variétés de configurations hydrogéologiques, il est déterminé un indice de productivité installée par secteur de nappe, recoupant à la fois un grand nombre de captages agricoles et une cohérence dans la dynamique piézométrique (figure 71 et 72). Cette cartographie s'appuie d'une part sur le registre de déclaration de l'OUGC et d'autre part sur la détermination de secteurs de cohérence de dynamiques piézométriques détaillées au chapitre 2.1.8.

Considérant que la perméabilité des graviers est approximativement 100 fois plus forte que celle des séries hétérogènes miocènes, il est affecté un indice de productivité 1 pour chaque mètre de forage implanté dans les graviers « mouillés » et de 0,01 pour chaque mètre de forage qui recoupe les séries miocènes.

Avec un tel indice intégrateur, pour une même situation piézométrique de référence (moyenne des niveaux estimés en octobre 2013 et mai 2014), il est alors possible de calculer pour chaque ouvrage deux seuils piézométriques représentatifs des tensions sur les prélèvements agricoles (tableau 30) :

- un seuil piézométrique de tension faible, correspondant à une perte d'environ 20% du potentiel de production installée (hauteur de la zone noyée sollicitable).
- un seuil piézométrique de tension forte correspondant à une perte d'environ 50% du potentiel de production installée (hauteur de la zone noyée sollicitable).

Identifiant du point indicateur	Cap-tages agricoles référencés	Côte piézo (m NGF)	Hauteur mouillée HM dans cailloutis (m)	HM sous les cailloutis (m)	Indice moyen de productivité IP	variation piézométrique pour IP -20% (m)	variation piézométrique pour IP -50% (m)	seuil tension faible (m NGF)	seuil tension forte (m NGF)
Baussenq	12	9.57	5.21	0.00	5.21	-1.04	-2.60	8.7	7.1
Entressen S	7	27.64	5.09	47.83	5.56	-1.11	-2.78	23.0	21.3
Valignette	4	1.64	7.60	2.05	7.62	-1.52	-3.81	0.9	-1.4
Entressen N	8	44.97	1.55	29.24	1.84	-0.37	-0.92	45.4	44.8
Mas-Thibert	19	2.00	6.39	0.64	6.40	-1.28	-3.20	2.4	0.4
SMC amont	38	42.45	8.32	7.97	8.40	-1.68	-4.20	38.6	36.1
Salon SO	24	54.96	10.67	4.44	10.71	-2.14	-5.36	53.7	50.5
Salon	13	70.33	2.99	37.90	3.37	-0.67	-1.69	74.0	73.0
Aureille	12	71.60	3.65	47.63	4.13	-0.83	-2.06	62.0	60.7
SMC NO	20	24.03	4.51	26.00	4.77	-0.95	-2.38	21.6	20.2

Tableau 30 Calcul des seuils de tension des indicateurs agricoles

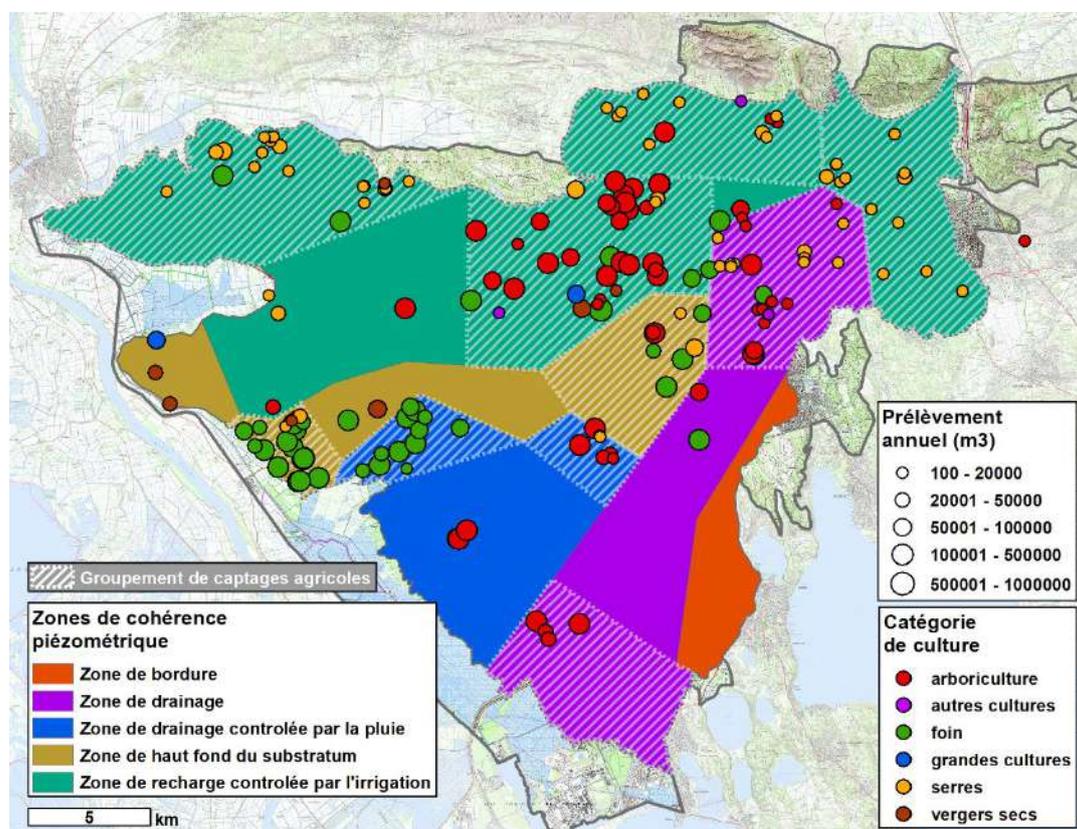


Figure 71 Regroupement des captages agricoles en fonction de la densité des ouvrages et des secteurs dynamique piézométrique cohérente (cf conclusions chapitre 2.1.8)

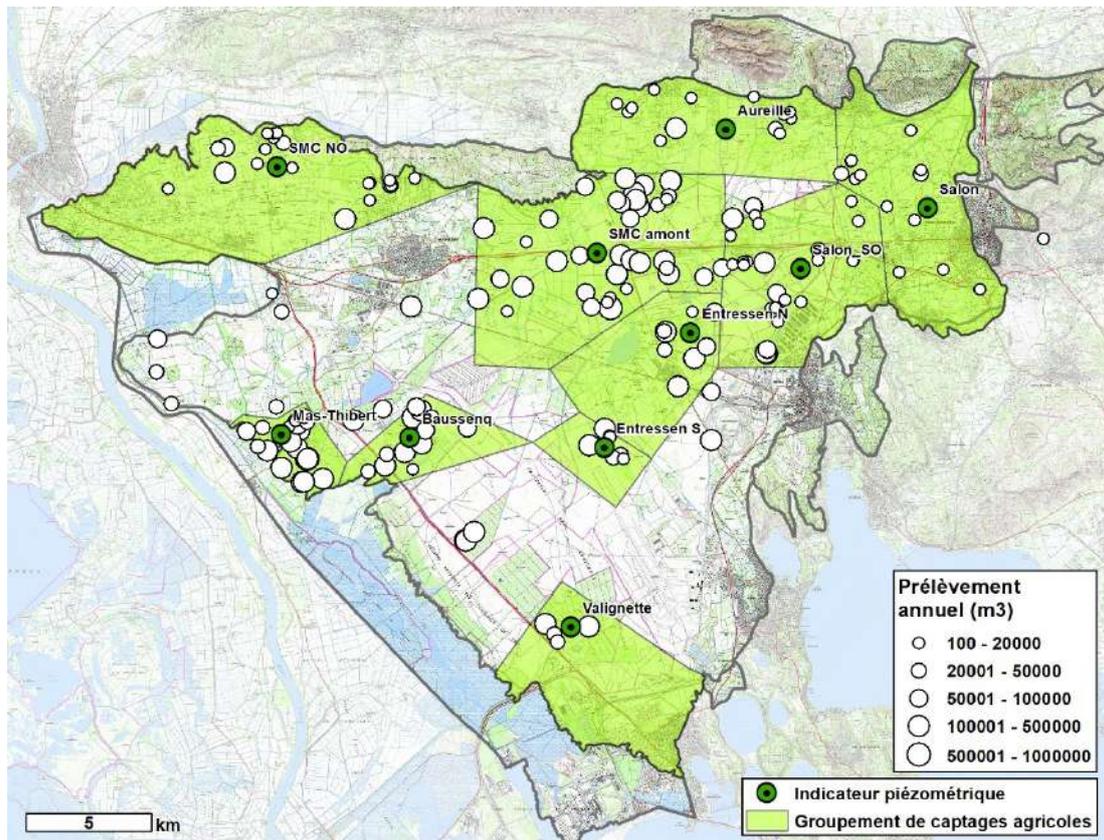


Figure 72 Localisation des indicateurs agricoles

#### USAGE DE PRELEVEMENTS POUR LES INDUSTRIES

L'aquifère de la Crau est exploité par 16 captages à caractère industriel (figure 73), pour un volume d'environ 12 Mm<sup>3</sup>/an. Trois captages peuvent être considérés comme stratégiques, couvrant quasiment la totalité des besoins :

- Le captage du GPMM au Ventillon
- Le captage de la raffinerie Provence - TOTAL
- Le captage de la raffinerie de Fos-sur-Mer – ESSO

L'indicateur du captage du Ventillon étant déjà couvert par un indicateur pour l'AEP, il a été conservé les captages ESSO et TOTAL comme un indicateur de référence pour les besoins industriels.

La tension sur l'exploitation des ouvrages intervient lorsqu'une partie des crépines se trouve dénoyée, entraînant une usure prématurée des colonnes crépinées ou un dénoyage des pompes. Pour chaque ouvrage, deux indicateurs en côtes NGF sont ainsi proposés (tableau 31):

- Seuil de tension faible : côte supérieure des crépines
- Seuil de tension forte : Cote correspondant à un dénoyage de 20% de la colonne crépinée.

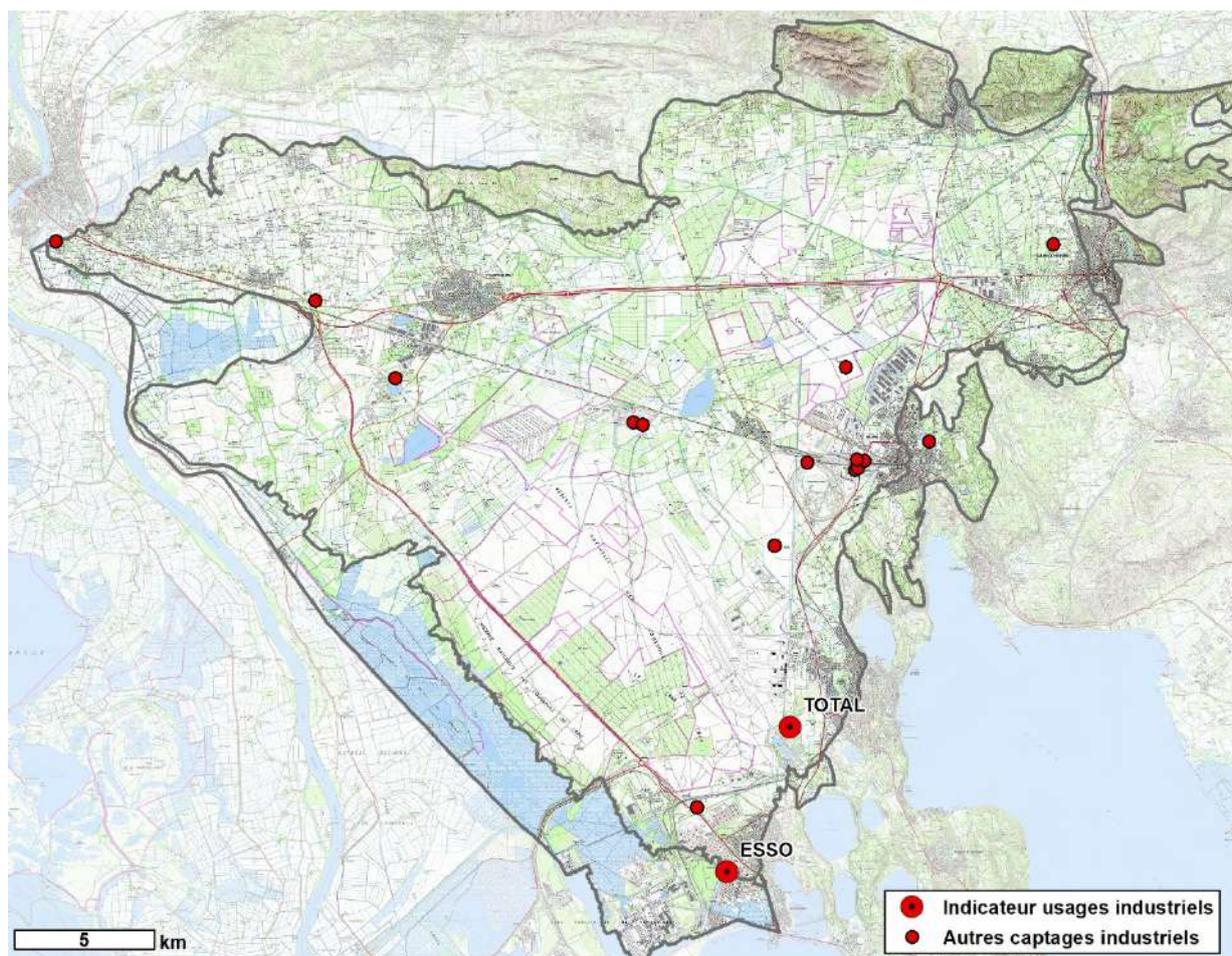


Figure 73 localisation des indicateurs industriels.

	côte cré- pine haute	côte cré- pine basse	seuil tension faible	seuil tension forte
<b>TOTAL</b>	7.3	0.33	7.3	5.9
<b>ESSO</b>	-0.35	-13.85	-0.4	-3.1

Tableau 31 Calcul des seuils de tension des indicateurs industriels

## ETAT DE SATISFACTION DES BESOINS EN EAU DES MILIEUX NATURELS

L'étude présentée au chapitre 3.5 a conclu à un état de dépendance aux eaux souterraines pour 8 sites d'habitats humides sur la Crau présentant un fort intérêt écologique. Cette sélection et le regroupement spatial des sites conduisent à une représentation de l'enjeu « zones humides » composé de 7 sites indicateurs alimentés par la nappe, auxquels il a été rajouté la Touloubre dont la nappe participe au soutien d'étiage (tableau 32 et figure 74).

Zone humide	Habitats humides établissant l'enjeu écologique	Critère qualifiant une tension faible sur l'alimentation des milieux	Critère qualifiant une tension forte sur l'alimentation des milieux
Baisse de Raillon	Phragmitaies Cladiaies	Niveau piézométrique mensuel diminuant de 0.2 m par rapport au minimum mensuel observé durant la période de référence	Niveau piézométrique mensuel diminuant de 0.5 m par rapport au minimum mensuel observé durant la période de référence
Grand Brahis	Ripisylves Marais permanent (Fougère des marais)		
Bausseq / canal de Vergières central	Prairies humides / Cladiaies		
Canal de Vergière amont	Odonates		
Marais des Chanoines	Cladiaies et laurons Prairies humides Reliques glaciaires	Flux mensuel de drainage superficiel des eaux souterraines le long de ligne de résurgence diminuant de 20% par rapport aux flux mensuels minimums relevé durant la période de référence	Flux mensuel de drainage superficiel des eaux souterraines le long de ligne de résurgence diminuant de 50% par rapport aux flux mensuels minimums relevé durant la période de référence
Touloubre	Ripisylves		
Marais de l'Illon et des Quatre Platanes / vallées des Baux	Cladiaies, Reliques glaciaires		
Marais de la dépression du Vi-gueirat	Cladiaies Reliques glaciaires		

**Tableau 32 Sites indicateurs de l'enjeu « alimentation des zones humides » et critères de qualification de la tension sur l'alimentation des milieux**

Les connaissances sur la vulnérabilité de ces habitats à des variations de charges hydrauliques ou de flux ne permettent pas de définir de seuils sur des bases solides. A dire d'expert les critères suivants ont été retenus :

- **Seuil de tension faible** sur l'alimentation des milieux : Niveau piézométrique ou flux mensuel diminuant de 0.2 m ou 20% par rapport au minimum mensuel observé durant la période de référence
- **Seuil de tension forte** sur l'alimentation des milieux : Niveau piézométrique mensuel diminuant de 0.5 m ou de 50% par rapport au minimum mensuel observé durant la période de référence

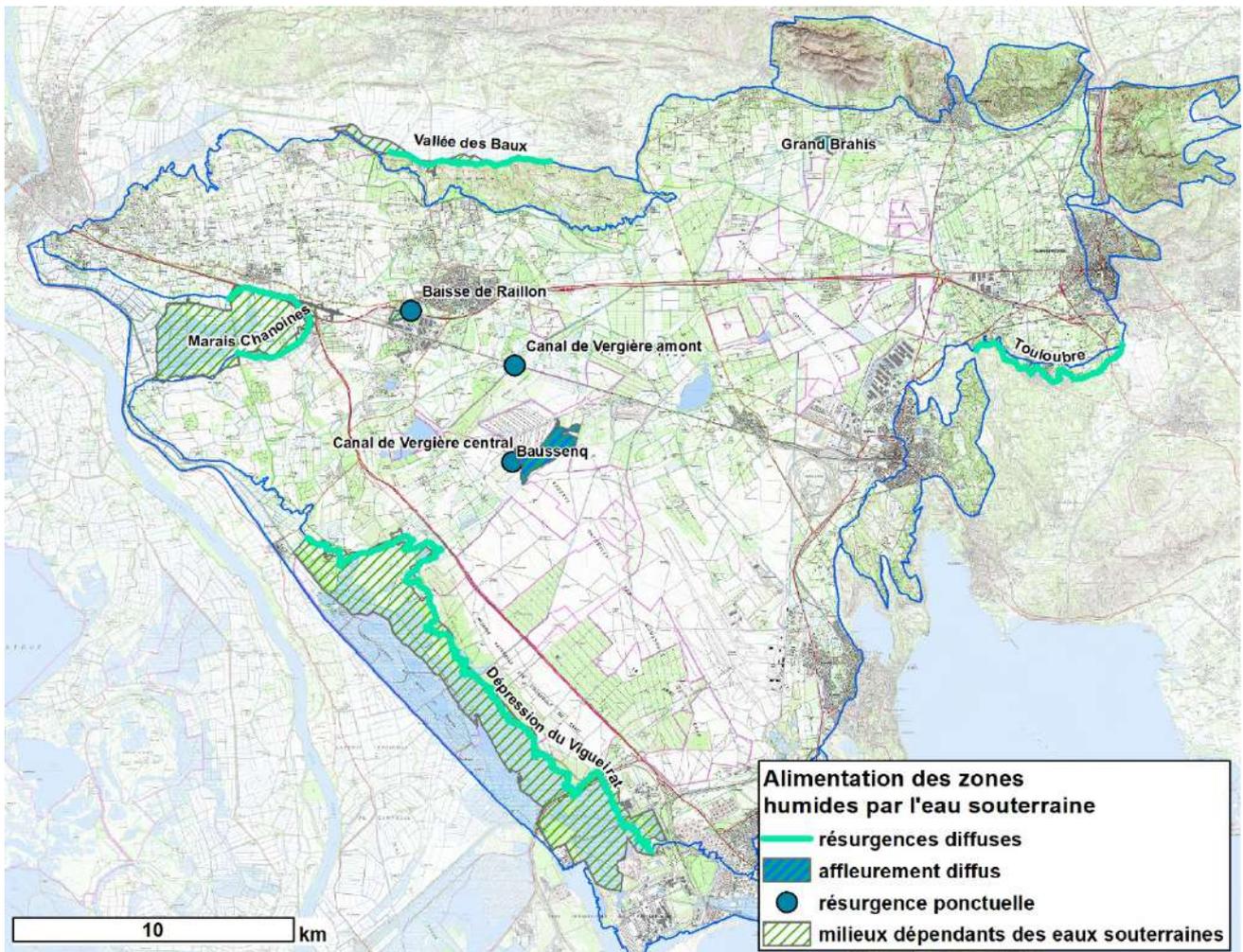


Figure 74 Localisation des indicateurs de zones humides

#### ÉTAT DU RISQUE LIÉ À LA PROPAGATION DES INTRUSIONS SALINES

L'étude SIMBA (Bailly-Comte et Rivet, 2019) montre que la charge d'eau douce est le principal facteur influençant l'évolution du biseau salé avec la topographie du substratum comme élément limitant des remontées salines.

L'étude propose une adaptation du modèle de Ghyben-Herzberg pour calculer le potentiel de déplacement de la salinité dans la nappe de la Crau, suivant l'équation :

$$Z_{S1} = H * 21$$

$Z_{S1}$  étant la profondeur de la salinité 1 psu dans la colonne d'eau, H étant la charge hydraulique d'eau douce. Par exemple au contact de la mer exerçant une pression hydraulique de 0 m NGF, la profondeur de la salinité de 1 psu se trouve à 21 m sous le niveau de la mer.

Le deuxième principe est que la remontée saline va être empêchée par le substratum imperméable, ci représenté par le pliocène sablo-argileux astien-Plaisancien. Ainsi c'est le croisement de la topographie du substratum avec la profondeur de l'intrusion saline qui conditionne le déplacement potentiel maximal du biseau salé.

Il peut être considéré qu'une salinité de 1 psu (environ 1 mg de sel / l) suffit à dégrader la qualité des eaux captées et marque un grand risque de dégradation plus importante de la qualité des eaux. Les indicateurs représentatifs du risque de dégradation des eaux captées par les intrusions salines sont donc définis selon les critères suivants :

- Seuil de tension faible : l'intrusion saline de salinité 1 psu atteint le substratum de la nappe au droit du captage d'eau potable.  
**Soit une charge hydraulique  $H = - (\text{Côte Substratum en m NGF}) * 21$**
- Seuil de tension forte : l'intrusion saline de salinité 1 psu atteint la base des crépines du captage d'eau potable.  
**Soit une charge hydraulique  $H = - (\text{Côte base des crépines m NGF}) * 21$**

Les captages structurants concernés par les risques de remontées salines sont (figure 75) :

- Le champ captant du Ventillon
- Le Mazet
- St Hippolyte

Le tableau 33 indique les seuils de tensions définis pour chacun de ces trois captages.

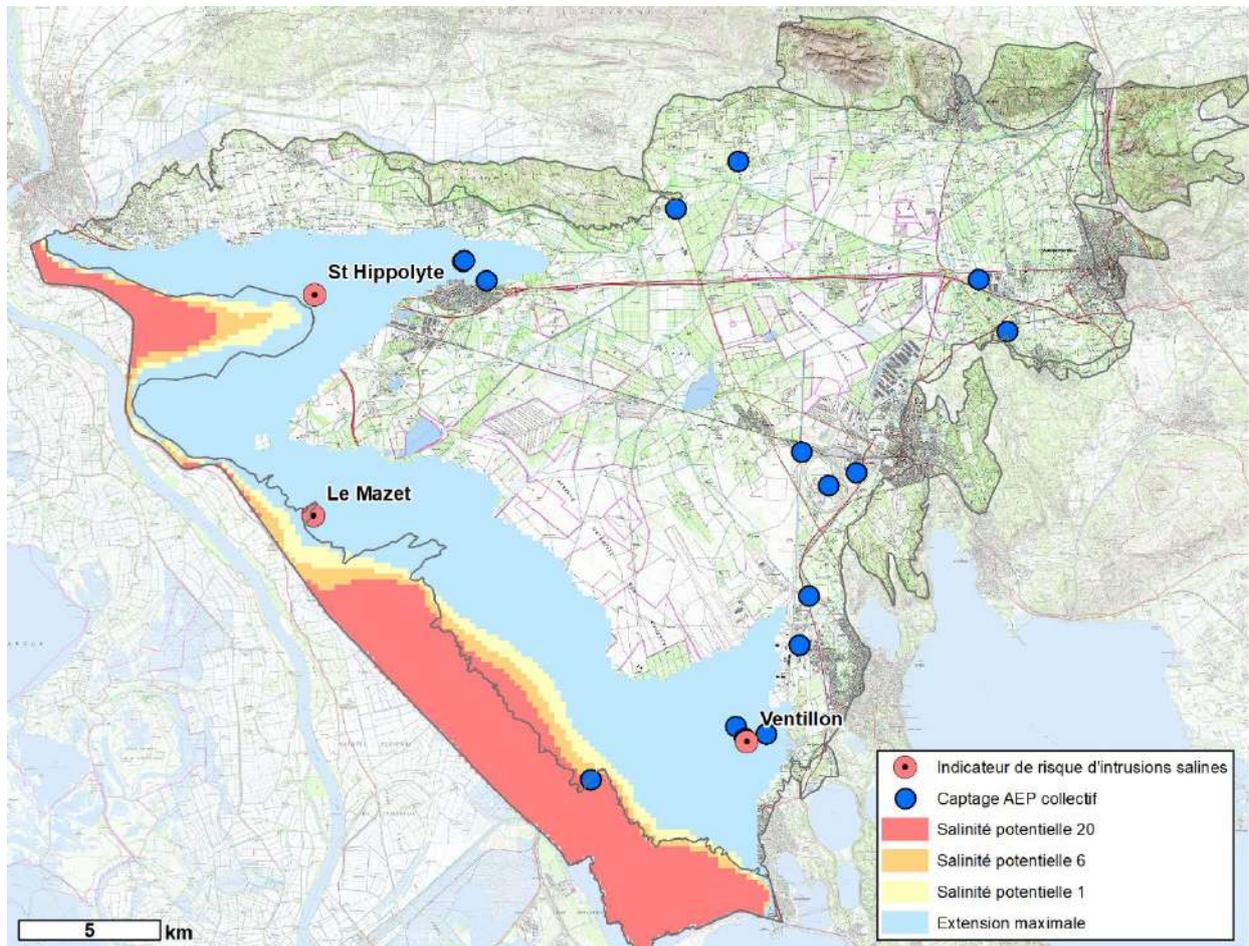


Figure 75 Localisation des captages indicateurs des intrusions salines

Captage	Mur des cailloutis	Base des crépines	Seuil tension faible	Seuil tension forte
Ventillon	-25.02	-6.7	1.2	0.3
St Hippolyte	-24.89	-16	1.2	0.8
Le Mazet	-15.5	-14.92	0.7	0.7

Tableau 33 Calcul des seuils de tension sur les indicateurs d'intrusions salines.

**SYNTHESE DES INDICATEURS DE GESTION**

Ce chapitre présente une synthèse de la localisation des indicateurs relatifs aux enjeux sur la Crau (figure 76) et des critères d'évaluation des tensions exercées sur ces indicateurs (tableau 33).

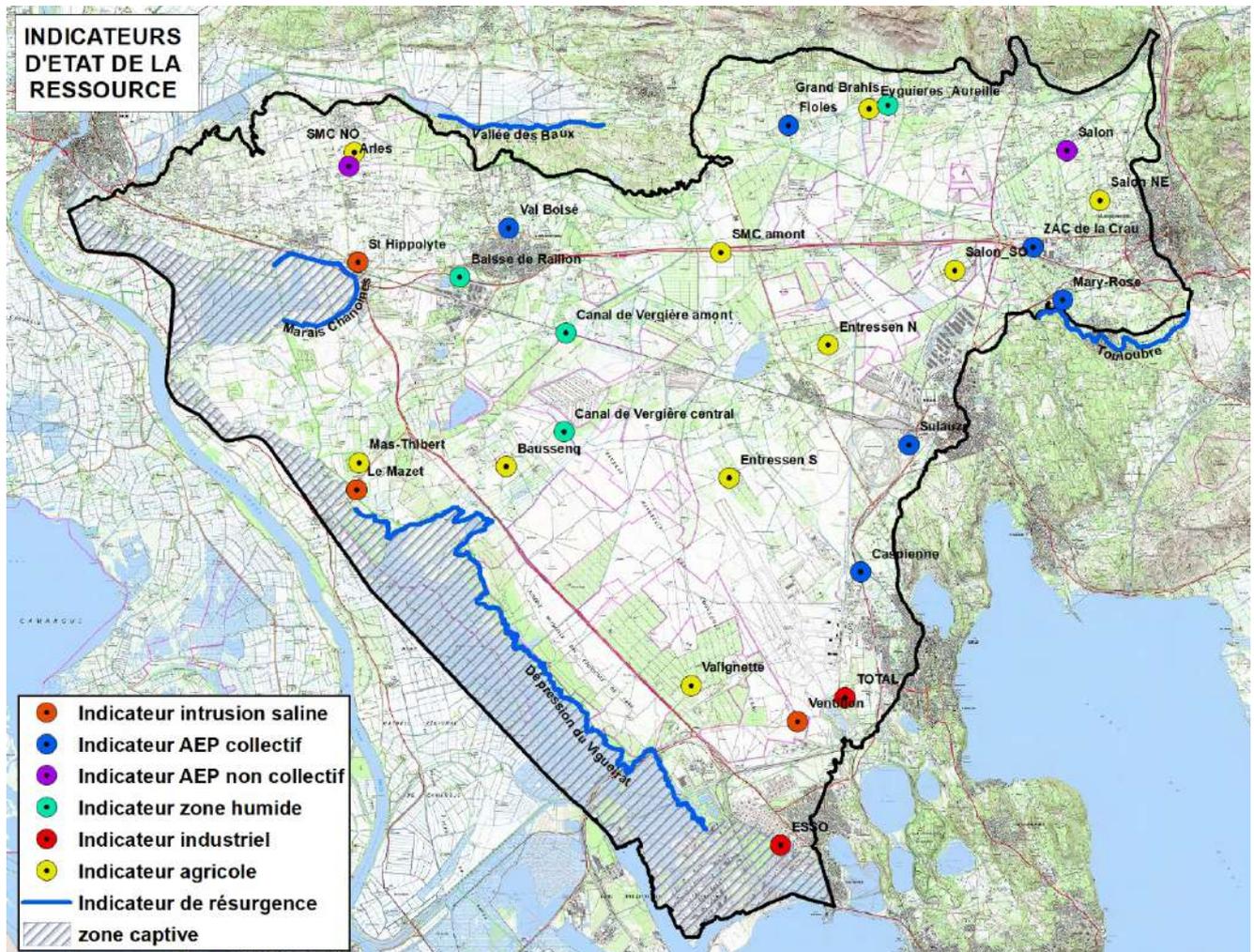


Figure 76 Localisation des indicateurs de satisfaction des usages de la nappe et de l'alimentation des écosystèmes

TYPE	Localisation	Critères de calcul des seuils
Zone humide	Canal de Vergières amont, Vergière central, Baisse de Raillon, Grand Brahis	Niveaux mensuels les plus bas simulés entre 2013 et 2018 de mai à septembre : Tension faible : - 20 cm Tension forte : - 50 cm
	Vallée des Baux, Marais Chanoines, Dépression du Vigueirat, Touloubre	Flux de drainage les plus faibles simulés entre 2013 et 2018 de mai à septembre : Tension faible : - 20 % Tension forte : - 50 %
Salinité	Ventillon, St Hyppolite, Mazet	Avancée iso-salinité 1 théorique selon le modèle SIMBA adapté de Ghyben-Herzberg et SIMBA : Tension faible : substratum Tension forte : base des crépines
AEP non collectif	Secteur Salon, secteur Arles	Tension neutre : baisse moyenne de 0.5 m par rapport à la moyenne actuelle Tension faible : baisse annuelle moyenne de 0,5 à 1 m par rapport à la moyenne actuelle Tension moyenne : baisse annuelle moyenne de 1 à 2 m par rapport à la moyenne actuelle Tension forte : baisse annuelle moyenne de 2 à 4 m par rapport à la moyenne actuelle Tension très forte : baisse moyenne annuelle supérieur à 4 m par rapport à la moyenne ac-tuelle
AEP collectif	ZAC de la Crau, Ventillon, Valboisé, Sulauze, St Hyppolite, Mazet, Mary-Rose, Les Fioles, Caspienne	Niveau piézométrique Tension faible : crépine haute Tension forte : 20% des crépines dénoyées
Agricole	Valignette, St Martin de C. amont, St Martin de C. nord-ouest, Salon sud-ouest, Salon nord, Mas-Thibert, Entressen S, Entressen nord, Bausenq, Aureille	Indice de productivité IP calculé sur l'épaisseur moyenne exploitée de cailloutis (pondération 100) et miocène (pondération 1) Tension faible : IP - 20% Tension forte : IP -50%
Industriel	Total, Esso	Niveau piézométrique Tension faible : crépine haute Tension forte : 20% des crépines dénoyées

**Tableau 34 Synthèse des critères de seuils de tensions sur les indicateurs d'état de la ressource**

### 2.3.2 METHODOLOGIE DE CLASSEMENT DES INDICATEURS

Un état de tension sur un indicateur isolé ne rend pas forcément compte de l'état de déséquilibre de la ressource sur une longue période ou dans un espace du territoire significatif. Il peut ainsi être représentatif d'un phénomène temporaire, de durée plus ou moins longue. Il est donc nécessaire de définir à quelle échelle spatiale et temporelle est analysée la tension.

Plusieurs échelles de classement sont ainsi définies :

- **Classement mensuel individuel.**
- **Classement individuel synthétique pour toute la période.**
- **Classement mensuel par catégorie d'indicateur.**
- **Classement synthétique pour toute la période simulée par catégorie d'indicateur.**

Pour chaque catégorie de classement, selon des critères spécifiques, il est établi si la tension est :

- **neutre**, caractérisant un fonctionnement normal répondant aux usages et services de la ressource
- **faible**, caractérisant un état de fonctionnement dégradé demandant une vigilance particulière et des mesures légères de gestion pour répondre aux usages et services
- **forte**, menaçant la satisfaction des usages et des services

Concernant la catégorie des usages pour l'AEP non collectif, étant donné le peu d'information sur les ouvrages, il n'est pas procédé à un classement mensuel. L'état de tension générale n'est décrit qu'en comparaison avec la piézométrie moyenne observée durant la période référence 2013-2018.

#### CLASSEMENT MENSUEL INDIVIDUEL

Ce classement permet de mesurer l'état de tension sur un indicateur pris individuellement et à un instant donné. Le critère de classement se base sur le dépassement des différents seuils de tensions (tableau 35).

*Ex : La charge hydraulique au point indicateur AEP Caspienne passe durant un mois sous la cote haute des crépines, définie comme seuil de « tension faible ». L'indicateur AEP collectif Caspienne est donc classé en « tension faible » pour ce mois-ci.*

CLASSEMENT MENSUEL INDIVIDUEL	
CLASSEMENT	CRITERE
Neutre	Le seuil « tension faible » n'est pas franchi
Faible	Le seuil « tension faible » est franchi
Forte	Le seuil « tension forte » est franchi

**Tableau 35 Critères de classement mensuel individuel**

#### CLASSEMENT INDIVIDUEL SYNTHETIQUE POUR TOUTE UNE PERIODE

Ce classement permet de mesurer l'état de tension sur un indicateur individuel, pris sur une longue période. Le critère de classement relève des fréquences de dépassement des seuils de tension (tableau 36)

*Ex : Si pour une situation donnée, le modèle montre que le seuil « tension faible » est franchi durant 30% des mois et que le seuil de crise n'est franchi que dans 5% des mois, l'indicateur est classé « en tension moyenne » sur la période de calcul*

CLASSEMENT INDIVIDUEL SYNTHETIQUE POUR TOUTE LA PERIODE SIMULEE	
CLASSEMENT	CRITERE
Neutre	La fréquence de classement « neutre » est supérieure à 90%
Faible	La fréquence de dépassement du seuil « tension faible » est supérieure à 10%
Moyenne	La fréquence de dépassement du seuil « tension faible » est supérieure à 20%
Forte	La fréquence de dépassement du seuil « tension forte » est supérieure à 10%
Très forte	La fréquence de dépassement du seuil « tension forte » est supérieure à 20%

**Tableau 36 Critères de classement individuel synthétique pour toute une période**

#### CLASSEMENT MENSUEL PAR CATEGORIE D'INDICATEUR

Ce classement permet de mesurer l'état de tension sur une catégorie d'indicateurs, répondant à un enjeu particulier, à un instant donné. Le critère de classement relève du taux d'indicateurs de la catégorie dépassant les seuils de tensions (tableau 37)

*Ex : Si pour un mois, le modèle montre que le seuil « tension faible » pour les zones humides est dépassé sur 25% des indicateurs (soit 2 indicateurs sur les 8), la catégorie d'indicateurs « zone humide » est classée en situation de « tension faible ».*

Si un seul indicateur AEP collectif dépasse le seuil de « tension forte » pour un mois donné, l'indicateur AEP est classé en « tension forte ».

CLASSEMENT MENSUEL PAR CATEGORIE D'INDICATEURS		
Classement	Critère de classement pour chaque type d'indicateur	Critère de classement pour chaque type d'indicateur
	<ul style="list-style-type: none"> <li>ZONES HUMIDES*</li> <li>PRELEVEMENTS AGRICOLES*</li> <li>PRELEVEMENTS INDUSTRIELS</li> </ul> * calculé sur la période de mai à septembre	<ul style="list-style-type: none"> <li>INTRUSIONS SALINES</li> <li>AEP COLLECTIF</li> </ul>
Neutre	Dépassements des valeurs seuils inférieur à 20% des indicateurs	Aucun dépassement des valeurs seuils
Faible	Dépassement des valeurs seuils « tension faible » pour 20% des indicateurs	Dépassement des valeurs seuils « tension faible » pour un des indicateurs
Moyenne	Dépassement des valeurs seuils « tension faible » pour 40% des indicateurs	Dépassement des valeurs seuils « tension faible » pour au moins deux des indicateurs
Forte	Dépassement des valeurs seuils « tension forte » pour 20% des indicateurs	Dépassement des valeurs seuils « tension forte » pour un des indicateurs
Très forte	Dépassement des valeurs seuils « tension forte » pour 40% des indicateurs	Dépassement des valeurs seuils « tension forte » pour au moins deux des indicateurs

**Tableau 37 Critères de classement mensuel par catégorie d'indicateurs**

#### CLASSEMENT SYNTHETIQUE POUR TOUTE LA PERIODE SIMULEE PAR CATEGORIE D'INDICATEUR

Ce classement permet de mesurer l'état de tension sur une catégorie d'indicateurs durant une période donnée. Le critère de classement relève de la fréquence de classement de la catégorie d'indicateur durant la période analysée. Si un classement apparaît plus de 10% des mois sur la période de calcul il est pris en compte. Le classement le plus dégradé est retenu

*Ex : Si pour une situation donnée, le modèle montre que le seuil d'alerte pour les zones humides est dépassé dans 45% des mois et que le seuil de crise est dépassé dans 15% des mois, l'indicateur zone humide est classé « en situation de crise » sur la période de calcul*

#### TABLEAU SYNTHETIQUE DE CLASSEMENT DES INDICATEURS

Afin d'aider à l'analyse des résultats dans toutes les dimensions de l'espace et du temps, il est proposé une représentation par tableau de couleurs indiquant l'état de tension des indicateurs pris individuellement ou de sa catégorie.

Le tableau 37 indique par exemple le résultat de l'analyse de la tension sur la catégorie d'indicateurs « zones humides » pour un scénario testé sur la période allant de 2013 à 2018.

- **Classement mensuel individuel** : il est observé par exemple une tension faible s'exerçant sur l'indicateur « Grand Brahis », entre juin et septembre 2013, puis entre mai et juin 2017. Le mois de septembre montre une tension faible chaque année. Une tension forte s'exerce sur cet indicateur aux mois de juillet et septembre 2017.
- **Classement synthétique individuel pour toute la période** : la fréquence d'apparition du dépassement de seuil « tension faible » étant supérieur à 20% pour l'indicateur « Grand-Brahis », celui-ci est classé en tension « moyenne » sur toute la période analysée.
- **Classement mensuel par catégorie** : les tensions faibles exercées sur la catégorie d'indicateur « zones humides » concerne certains mois plus de 20% des indicateurs (ex : septembre 2014) et parfois plus de 40% des indicateurs, entraînant un classement mensuel de la catégorie en tension faible (ex : juillet 2013) à moyenne (mai 2017). Une tension forte s'exerce dans plus de 20% des indicateurs aux mois de juillet et septembre 2017, ce qui produit un classement synthétique mensuel de la catégorie en tension forte.
- **Classement synthétique pour toute la période simulée par catégorie d'indicateur** : l'état de tension « moyenne » s'exerçant de 10% des mois sur la catégorie « zones humides », celle-ci est classée en état de tension moyenne sur toute la période analysée.

La figure ci-dessous présente un exemple de classement pour les indicateurs de la catégorie « zones humides »

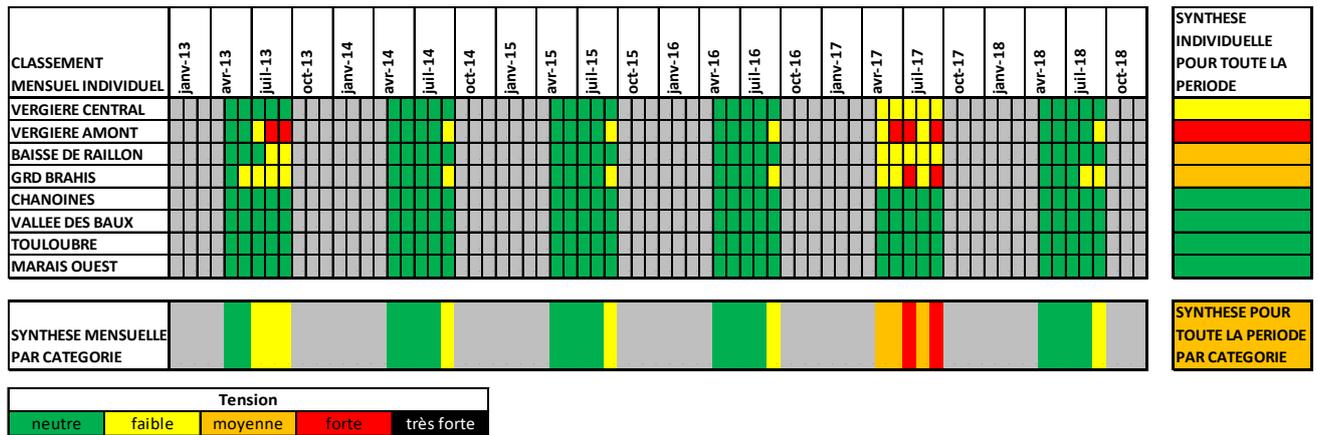


Tableau 37 Représentation synthétique du classement des indicateurs « zones humides »

### 2.3.3 MODELISATION DE REFERENCE 2013 – 2018 DES INDICATEURS D'USAGES ET D'ALIMENTATION DES MILIEUX NATURELS

En utilisant la modélisation de référence sur la période 2013-2018, détaillée au chapitre 4.5, nous avons calculé l'évolution des différents indicateurs de l'état de la ressource qui permet ainsi d'appréhender l'état de tensions dans la situation actuelle. L'ensemble des résultats sont présentés sous forme de fiche synthétique en annexe 5.

Une analyse spatiale du classement individuel pour toute la période, montre que seul l'indicateur agricole St Martin de Crau amont (SMC amont) présente un état de tension « faible » sur toute la période analysée.

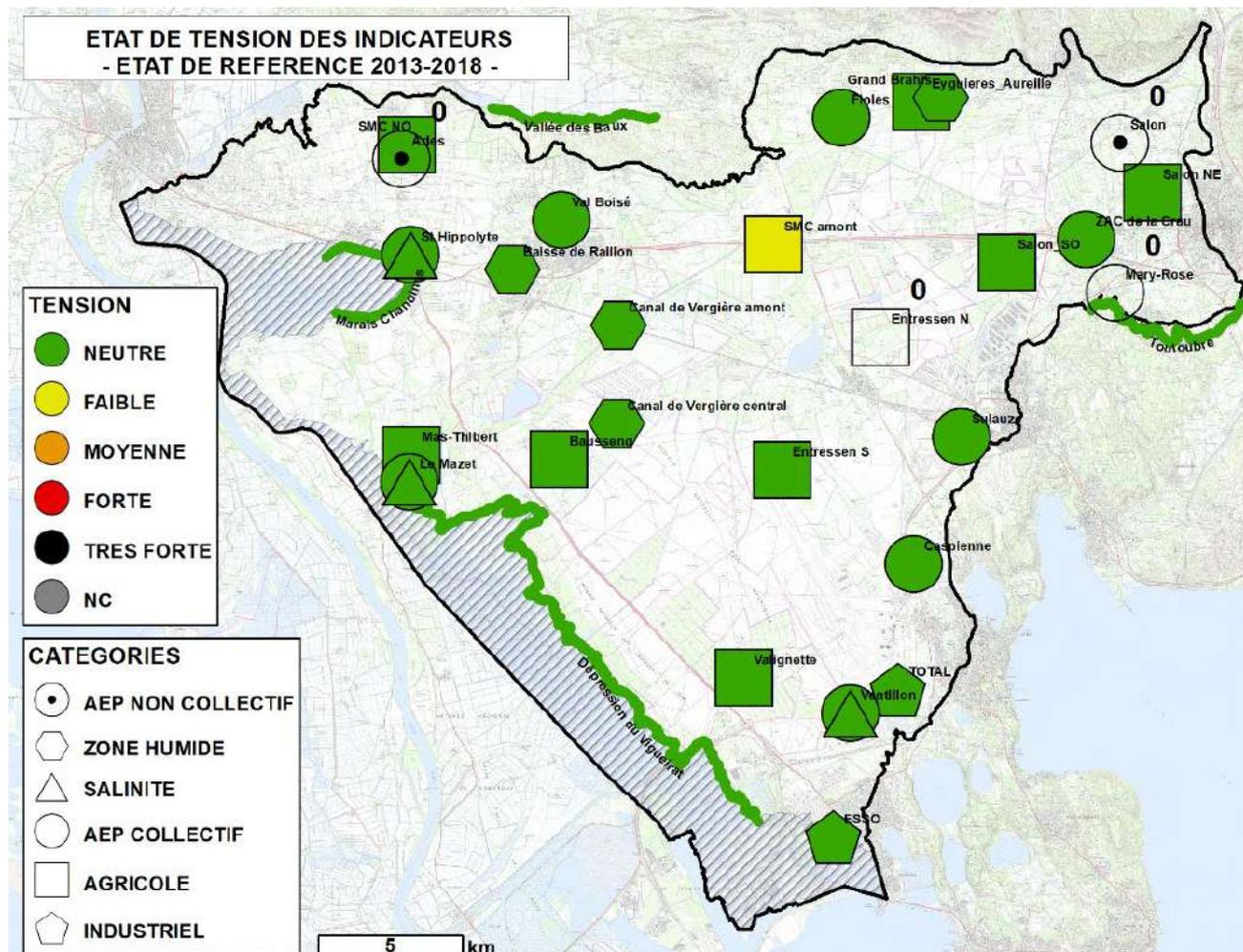


Figure 77 Modélisation de référence - Classement synthétique individuel pour toute la période

L'analyse de l'évolution piézométrique au droit de l'indicateur St-Martin-de-Crau amont, montre en effet que le seuil de tension « faible », s'établissant à la côte 38.6 m NGF, a été dépassé durant les étés 2013 et 2017.

L'analyse statistique du classement mensuel des catégories indique que les indicateurs agricoles présentent une tension « faible » dans 7% des mois analysés (figure 78). Une analyse du tableau synthétique des indicateurs indique que l'ensemble des catégories d'indicateurs sont classés de manière synthétique en tension « neutre » sur toute la période simulée (figure 81). En plus de l'indicateur « St Martin de Crau amont », l'indicateur agricole « Entressen sud » est concerné par une tension faible au cours de l'été 2017 (figure 80)

**Il peut être conclu que la période de référence 2013-2018 réunit les conditions d'un état de tension globalement neutre pour les différents usages de la nappe et l'alimentation des milieux naturels.**

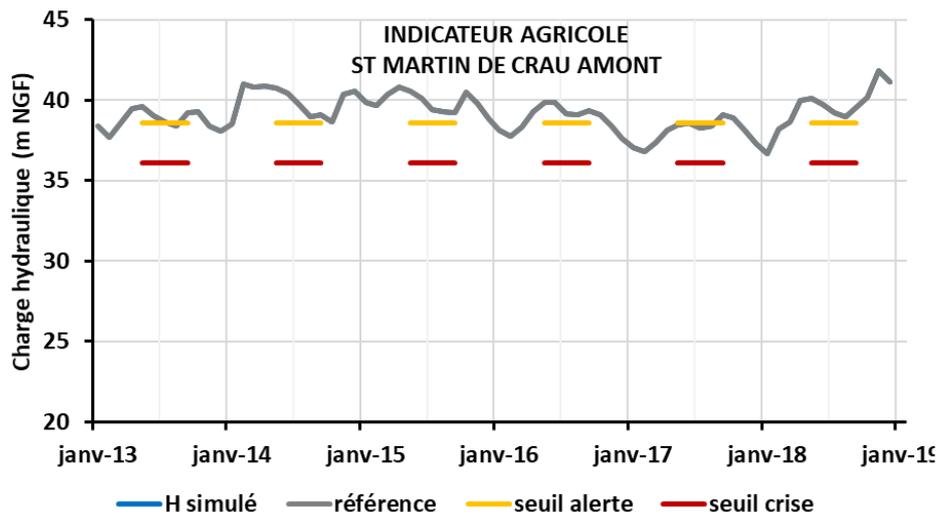


Figure 78 Modélisation de référence - Piézométrie simulée et seuil de tension de l'indicateur agricole « St Martin de Crau amont »

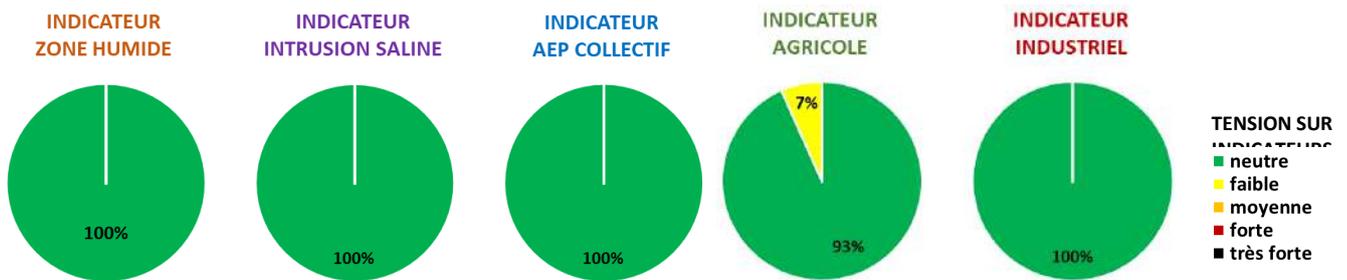


Figure 78 Modélisation de référence - fréquence d'apparition des différents états de tension sur chaque catégorie d'indicateurs

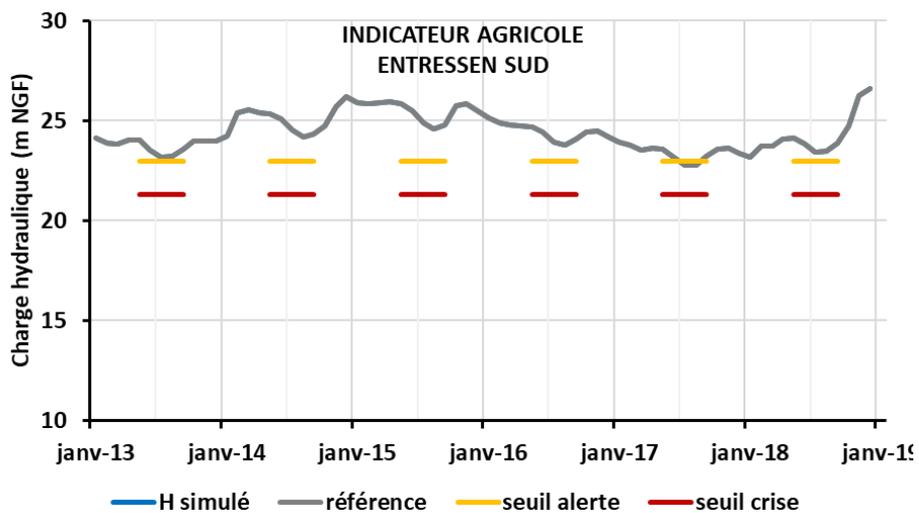


Figure 80 Modélisation de référence - Piézométrie simulée et seuil de tension de l'indicateur agricole « Entressen Sud ».

CODE DE COULEUR INDICATIF DE LA TENSION SUR LES INDICATEURS				
NEUTRE	FAIBLE	MOYENNE	FORTE	TRES FORTE

INDICATEURS ZONES HUMIDES																														
CLASSEMENT MENSUEL INDIVIDUEL	janv-13	avr-13	juil-13	oct-13	janv-14	avr-14	juil-14	oct-14	janv-15	avr-15	juil-15	oct-15	janv-16	avr-16	juil-16	oct-16	janv-17	avr-17	juil-17	oct-17	janv-18	avr-18	juil-18	oct-18	SYNTHESE INDIVIDUELLE SUR TOUTE LA PERIODE					
VERGIERE CENTRAL																														
VERGIERE AMONT																														
BAISSE DU RAILLON																														
GRD BRAHIS																														
MARAIS CHANOINES																														
VALLE DES BAUX																														
TOULOUBRE																														
DEPRESSION VIGUEIRAT																														
SYNTHESE MENSUELLE PAR CATEGORIE																												CLASSEMENT SYNTHETIQUE		
INDICATEURS SALINITE																														
CLASSEMENT MENSUEL INDIVIDUEL	janv-13	avr-13	juil-13	oct-13	janv-14	avr-14	juil-14	oct-14	janv-15	avr-15	juil-15	oct-15	janv-16	avr-16	juil-16	oct-16	janv-17	avr-17	juil-17	oct-17	janv-18	avr-18	juil-18	oct-18	SYNTHESE INDIVIDUELLE SUR TOUTE LA PERIODE					
VENTILLON																														
ST HIPPOLYTE																														
LE MAZET																														
SYNTHESE MENSUELLE PAR CATEGORIE																													CLASSEMENT SYNTHETIQUE	
INDICATEURS AEP COLLECTIF																														
CLASSEMENT MENSUEL INDIVIDUEL	janv-13	avr-13	juil-13	oct-13	janv-14	avr-14	juil-14	oct-14	janv-15	avr-15	juil-15	oct-15	janv-16	avr-16	juil-16	oct-16	janv-17	avr-17	juil-17	oct-17	janv-18	avr-18	juil-18	oct-18	SYNTHESE INDIVIDUELLE SUR TOUTE LA PERIODE					
ZAC DE LA CRAU																														
VENTILLON																														
VALBOISE																														
SULAUZE																														
ST HIPPOLYTE																														
LE MAZET																														
LES FIOLES																														
CASPIENNE																														
SYNTHESE MENSUELLE PAR CATEGORIE																														CLASSEMENT SYNTHETIQUE
INDICATEURS AGRICOLES																														
CLASSEMENT MENSUEL INDIVIDUEL	janv-13	avr-13	juil-13	oct-13	janv-14	avr-14	juil-14	oct-14	janv-15	avr-15	juil-15	oct-15	janv-16	avr-16	juil-16	oct-16	janv-17	avr-17	juil-17	oct-17	janv-18	avr-18	juil-18	oct-18	SYNTHESE INDIVIDUELLE SUR TOUTE LA PERIODE					
VALIGNETTE																														
ST MARTIN AMONT																														
ST MARTIN NORD-OUEST																														
SALON SUD-OUEST																														
SALON NORD-EST																														
MAS-THIBERT																														
ENTRESSEN-SUD																														
BAUSSENQ																														
AUREILLE																														
SYNTHESE MENSUELLE PAR CATEGORIE																														CLASSEMENT SYNTHETIQUE
INDICATEURS INDUSTRIELS																														
CLASSEMENT MENSUEL INDIVIDUEL	janv-13	avr-13	juil-13	oct-13	janv-14	avr-14	juil-14	oct-14	janv-15	avr-15	juil-15	oct-15	janv-16	avr-16	juil-16	oct-16	janv-17	avr-17	juil-17	oct-17	janv-18	avr-18	juil-18	oct-18	SYNTHESE INDIVIDUELLE SUR TOUTE LA PERIODE					
TOTAL																														
ESSO																														
SYNTHESE MENSUELLE PAR CATEGORIE																														CLASSEMENT SYNTHETIQUE

Figure 81 Modélisation de référence - Tableau synthétique de classement des indicateurs

### 3 SIMULATIONS EXPLORATOIRE ET PREVISIONNELLES

L'objectif de SINERGI est d'explorer les évolutions possibles du territoire qui seraient susceptibles de modifier à moyen et long terme les équilibres actuels de la nappe et ses usages associés. En effet, parmi ces futurs possibles, se posera nécessairement celui d'éventuelles évolutions concernant les prélèvements et la disponibilité de la ressource en eau de la Durance pour la culture du foin de Crau. De même, l'impact du changement climatique fait peser une double menace : celle d'une baisse de la recharge liée à l'infiltration des eaux de pluie sur la plaine de Crau et celle d'une baisse des volumes transférés depuis la Durance à cause de situations de tension sur ce territoire voisin de la Crau.

Afin d'appréhender ces futurs possibles, nous avons choisi de conjuguer trois approches :

- **La première concerne la réalisation d'analyses dites de sensibilité qui ont exploré de façon systématique les impacts de variations possibles du couple prélèvement/volumes d'eau destinée à l'irrigation** sur les enjeux identifiés liés à la nappe (usages AEP, agricoles et industriels, mais aussi les milieux naturels ; et ce avec les indicateurs définis préalablement). Pour satisfaire cet objectif, 48 simulations ont été réalisées pour tester toutes les configurations possibles avec des prélèvements agricoles qui varient entre 50% et 400% des volumes actuels et des volumes mis en irrigation variant entre 100% et 50% des volumes actuels.

- **La deuxième approche s'est basée sur la réalisation de scénarios pour envisager les évolutions possibles en 2050** avec une accentuation des impacts du changement climatique. La méthode a consisté à définir des scénarios d'évolution du territoire à l'horizon 2050, scénarios dits structurels, en s'appuyant sur les principaux enseignements de la concertation menée auprès des acteurs du territoire (cf. annexe n°9). Dans un second temps, nous avons testé l'impact de ces scénarios sur les indicateurs d'état de la ressource. Ceci conduit à dessiner le champ des possibles de l'état de la ressource, et sa capacité à rendre les services aujourd'hui rendus, à l'horizon 2050 en fonction des choix pris dans la gestion du territoire et des flux d'eau. Sept simulations correspondant à sept trajectoires possibles ont été testées ; elles correspondent à des scénarios dits structurels qui vont conjuguer changement climatique, évolution des pratiques agricoles et extension des zones urbanisées.

- **La troisième approche est centrée sur une approche des effets de mesures envisageables pour réduire l'impact de sécheresses exceptionnelles.** L'objectif de cette analyse est de connaître l'impact sur la ressource d'un évènement exceptionnel de sécheresse, ici une diminution de 50% des précipitations durant deux années consécutives. Il s'agit d'un axe de travail souhaité par les acteurs du territoire lors de la séance de concertation. Nous avons simulé à travers 5 scénarios dits conjoncturels, les différentes mesures correctives qui pourraient s'appliquer sur le territoire de la Crau et de la Durance. L'objectif est ainsi de mieux connaître la sensibilité du système à un tel évènement, n'ayant jamais eu lieu en Crau à ce jour, mais dont le risque d'apparition pourrait augmenter avec les évolutions climatiques.

## 3.1 ETUDE SYSTEMATIQUE DE LA SENSIBILITE DE LA NAPPE AUX CONDITIONS DE RECHARGE ET DE PRELEVEMENTS

### 3.1.1 OBJECTIFS ET METHODE

A partir du modèle MHYCRAU actualisé et des indicateurs d'état de la ressource, il a été conduit une analyse de sensibilité des indicateurs aux baisses de volume d'eau pour l'irrigation et aux variations sur les prélèvements agricoles (à la hausse et à la baisse). Cette analyse permet de quantifier, d'une part, les conséquences de ces variations sur les indicateurs d'état de la ressource et, d'autre part, les marges de manœuvre existantes pour conserver tout ou partie des services rendus par la nappe.

La méthodologie retenue est la suivante :

1) Il est calculé les flux de recharge pour des baisses des volumes simulés d'eau destinées à l'irrigation de -10%, -20%, 30%, -40% et -50%, qui se traduisent par un espacement temporel des tours d'eau pris en compte dans les itinéraires techniques de culture de prairies (cf. chapitre 2.2.3)

Restriction sur les volumes d'eau irriguée	Tour d'eau moyen (jours)	Volume d'eau mise en irrigation (Mm <sup>3</sup> /an)	Volume de recharge par l'irrigation (Mm <sup>3</sup> /an)
100%	10	322	241
90%	11.1	290	209
80%	12.5	258	176
70%	14.3	225	144
60%	16.7	193	112
50%	20	161	80

**Tableau 38 Tours d'eau moyens appliqués au itinéraires techniques en fonction de baisses de volume irrigués et recharges correspondantes**

2) Il est calculé les flux pompés correspondants à des variations de pompages agricoles allant de 50% à 400% des flux actuellement pompés, hors pompages destinés à l'irrigation des prairies irriguées. Sur la base d'un prélèvement moyen de 32 Mm<sup>3</sup>/an, dont 12 Mm<sup>3</sup>/an pour l'irrigation des prairies, les variations sont :

Variations des volumes prélevés pour les besoins agricoles hors prairies (%)	50%	75%	100%	125%	150%	200%	300%	400%
Prélèvements agricoles totaux (Mm <sup>3</sup> /an)	22	27	32	37	42	52	72	92

**Tableau 39 Volumes agricoles prélevés en fonction de la gamme de variation testée**

3) Ce panel de variations de recharge et de prélèvements est combiné et appliqué au modèle de nappe aux conditions de référence 2013-2018, ce qui représente 48 simulations.

4) Pour chaque simulation, est établie le classement synthétique, pour toute la période simulée par catégorie d'indicateurs selon la méthode décrite au chapitre 2.3.

### 3.1.2 ANALYSE DES RESULTATS

Les résultats de l'analyse de sensibilité sont présentés sous forme de graphique montrant le classement synthétique des catégories d'indicateurs, en fonction des flux de recharge et de volume d'eau mise en irrigation, et d'autre part sous forme de fiches synthétiques de résultats présentées en annexe 5.

Une analyse des résultats synthétiques du test de sensibilité montre que les indicateurs de zones humides, et dans une moindre mesure les indicateurs agricoles, sont très sensibles aux variations de recharge et prélèvements.

#### INDICATEURS ZONES HUMIDES

A recharge constante, l'indicateur global « zone humide » est soumis à une tension « faible » lorsque l'augmentation des prélèvements atteint + 20 Mm<sup>3</sup>/an, et à une tension forte à + 40 Mm<sup>3</sup>/an (figure 82). Une baisse de volume irrigué de 10% fait basculer l'indicateur global en tension « faible », même avec un prélèvement réduit. A ce niveau de recharge, une augmentation de prélèvements de 10 Mm<sup>3</sup>/an fait basculer l'indicateur global dans une tension « moyenne » et au-delà dans une tension « forte ». Une baisse de volume irrigué de 20% entraîne une tension qualifiée de très forte. C'est une appréciation globale à nuancer : elle témoigne d'abord d'une tension très forte sur toutes les zones humides en centre Crau dont le bon état écologique dépend fortement des niveaux actuels de nappe ; c'est moins vrai pour les zones humides alimentées en bordure de plaine de Crau (cf. ci-après).

Cette forte sensibilité peut s'expliquer par les critères de qualification de la tension exercée sur ces indicateurs. Une baisse de 20 cm et 50 cm par rapport aux minimums piézométriques observés durant la période de référence suffit à créer un état de tension faible et forte sur les milieux humides.

Ce sont surtout les points indicateurs « Grand Brahis » et « Vergière amont » qui sont les plus sensibles (tableaux synthétiques des indicateurs des tests présentés en annexe 5). L'indicateur « Grand Brahis » étant localisé en zone amont de la nappe, il est mécaniquement plus sensible aux baisses piézométriques qui sont en général plus fortes vers l'amont. L'indicateur « Vergière amont » est assez sensible car cette zone humide est localisée dans un secteur moins perméable, donc plus sensible aux conditions de pompage et de recharge.

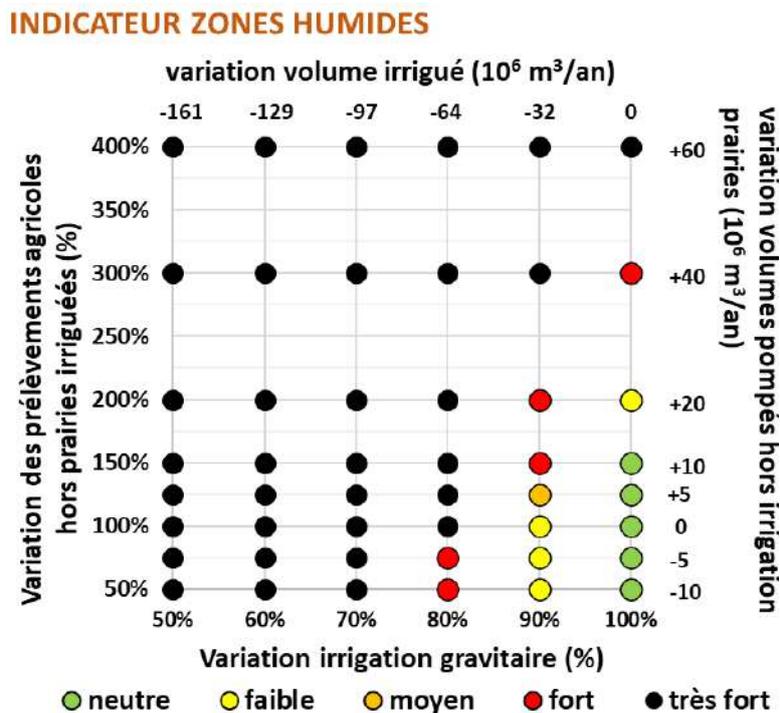


Figure 82 Classement synthétique de la catégorie d'indicateurs « zone humides » en fonction de conditions de recharge et prélèvements

A l'inverse, les indicateurs de flux alimentant les zones humides sont assez peu sensibles. Cela s'explique par les critères de qualification, qui se basent sur des variations de flux d'eau souterraine assez importantes par rapport aux variations fines exercées sur la recharge et les prélèvements.

On observe ainsi que les variations de charges hydrauliques ont un impact global plus important sur la tension exercée sur les indicateurs que les variations de flux d'eau souterraine. Dans le détail, il faut un déficit d'environ 80 Mm<sup>3</sup>/an pour voir apparaître des tensions faibles mais répétées en période estivale sur les zones humides de la Touloubre et de la Dépression du Vigueirat.

### INDICATEURS AGRICOLES

Il est observé une apparition de tensions sur les prélèvements agricoles dès une augmentation de prélèvements de 5 Mm<sup>3</sup>/an à recharge constante (figure 83). Avec une telle augmentation de prélèvements, la plupart des secteurs agricoles passent régulièrement (3 années sur 5) en état de tensions faibles durant la période estivale. Les tensions deviennent fortes pour des augmentations de prélèvements atteignant 40 Mm<sup>3</sup>/an.

Cette forte sensibilité des prélèvements agricoles s'expliquent logiquement par des effets locaux de baisse de niveaux de nappe avec l'augmentation des volumes extraits par pompage.

Une baisse des volumes d'eau destinée à l'irrigation de 10% (-32 Mm<sup>3</sup>/an en termes de recharge de nappe) classe automatiquement l'indicateur agricole en état de tension « faible » avec une apparition de tension « forte » pour des augmentations de prélèvements de 20 Mm<sup>3</sup>/an (soit une perte cumulée de capacités d'environ 50 Mm<sup>3</sup>/an). Une baisse des volumes d'eau mise en irrigation de 20% classe automatiquement l'indicateur agricole en état de tension « moyenne » avec une apparition de tension « forte » pour des augmentation de prélèvements de 10 Mm<sup>3</sup>/an.

Les points indicateurs les plus sensibles se situent dans les secteurs où l'épaisseur de la zone mouillée est faible, avec un indice de productivité très sensible à la baisse piézométrique (« Entressen Sud »), les secteurs à forte perméabilité dont la charge hydraulique est soutenue par l'irrigation (« St Martin amont, Salon Sud-Ouest ») et les secteurs déjà fortement exploités (« Valignette »). Certains secteurs (Baussenq, Mas Thibert, Salon Nord-Est) sont peu vulnérables et restent peu sensibles à des scénarios extrêmes (déficit cumulé de plus de 80 Mm<sup>3</sup>/an par rapport à la situation actuelle).

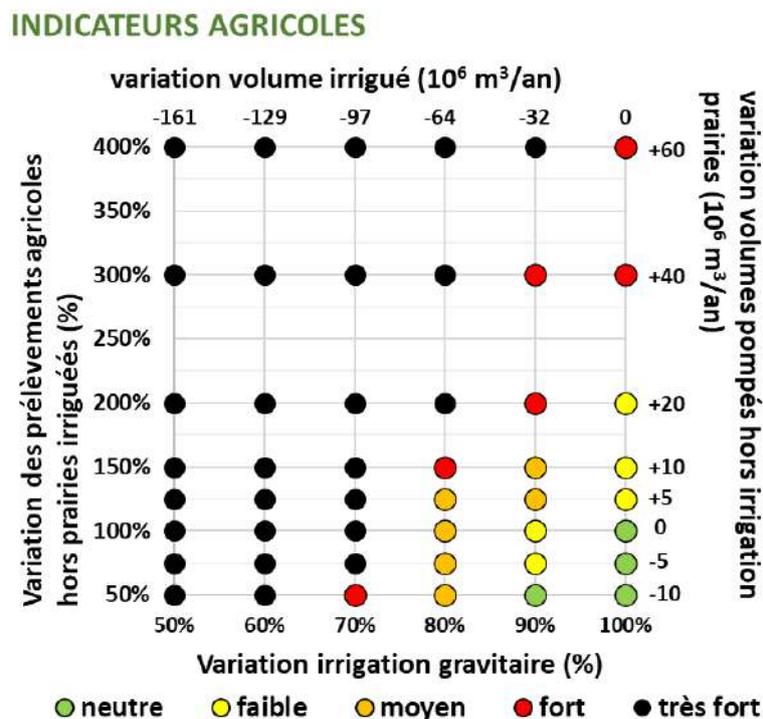


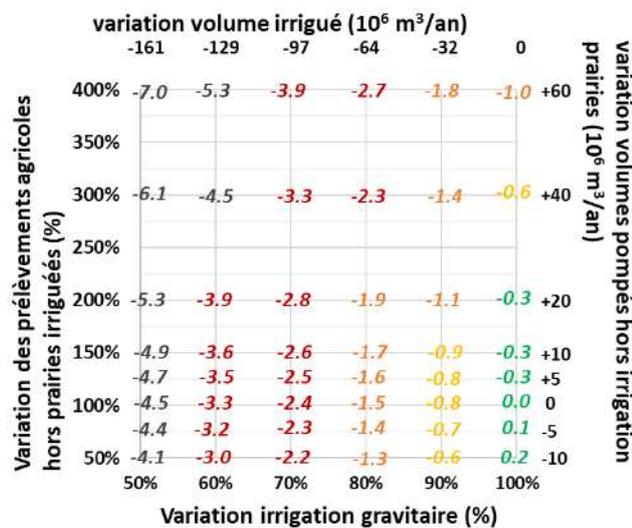
Figure 83 Classement synthétique de la catégorie d'indicateurs « agricoles » en fonction des conditions de recharge et prélèvements.

### INDICATEURS « AEP PRIVES »

Les indicateurs pour les usages AEP privés montrent des sensibilités différentes suivant les secteurs géographiques (figure 84). Le secteur de Salon est le plus sensible aux variations du couple recharge/prélèvements. Une augmentation modérée des prélèvements de 5 M m<sup>3</sup>/an entraîne une baisse de 0,6 m dans le secteur de Salon et seulement de 0,3 m dans le secteur d'Arles. La tension devient forte dans le secteur d'Arles pour une baisse des volumes d'eau destinée à l'irrigation de 20% associée à une augmentation des prélèvements de 40 Mm<sup>3</sup>. Dans le secteur de Salon, l'état de tension forte apparaît lorsque la baisse des volumes irrigués atteint 10% pour une augmentation des prélèvements de 20 Mm<sup>3</sup>.

L'analyse montre donc une sensibilité élevée de cet indicateur aux baisses de recharge et à l'augmentation de prélèvements. La différence de sensibilité peut s'expliquer par la localisation des secteurs. Située en amont, le secteur de Salon est mécaniquement plus sensible au déséquilibre quantitatif de la ressource.

#### INDICATEUR FORAGES PRIVES SECTEUR ARLES



#### INDICATEUR FORAGES PRIVES SECTEUR SALON

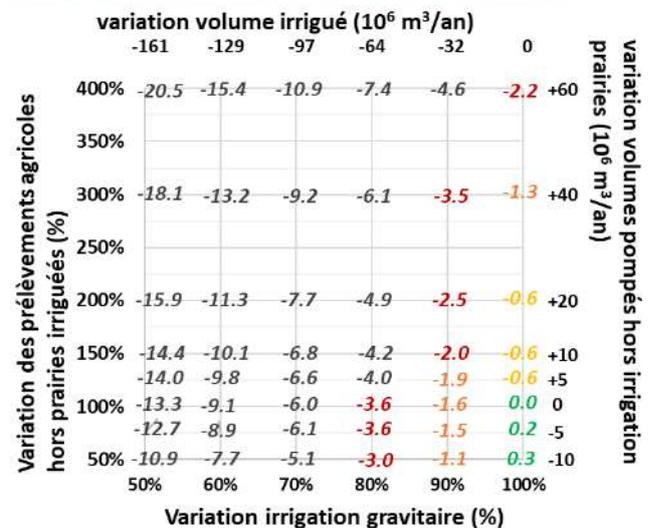


Figure 84 Evolution piézométrique sur les indicateurs « AEP privés » en fonction des conditions de recharge et prélèvements. Les codes couleurs renseignent sur l'état de tension sur ces usages : neutre, faible, moyen, fort, très fort.

### INDICATEURS « AEP COLLECTIF »

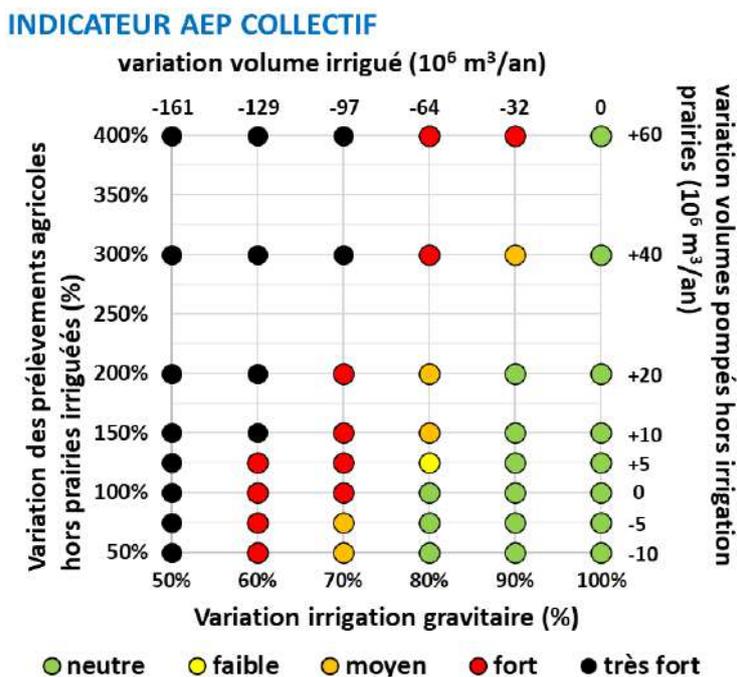
L'indicateur AEP collectif résiste mieux aux variations de recharge et prélèvements que les indicateurs « zones humides » et « agricoles », bien que les critères statistiques de déclassement soient plus stricts, un seul point indicateur déclassé entraînant un déclassé de toute la catégorie. Cette plus forte résilience peut s'expliquer par la sécurisation donnée aux ouvrages de captage, avec des niveaux crépinés suffisamment bas et des secteurs aquifères productifs, limitant les risques de pénurie.

Une analyse individuelle montre que « Caspienne » constitue le captage le plus sensible aux changements de conditions de recharge et prélèvements. Avec des crépines hautes relativement proches du toit de la nappe (entre 2 et 3 m en moyenne), dans un secteur très perméable, le captage de Caspienne peut être soumis à des difficultés d'exploitation pour des baisses de charge intervenant en période de basses-eaux. Le captage de « Sulauze » est également un point sensible du réseau d'alimentation AEP du territoire.

A prélèvements constants, des tensions faibles et rares apparaissent à partir d'un déficit de recharge de 40 Mm<sup>3</sup>/an (figure 84) ; la tension devient forte et significative en période estivale (1 année sur 5) pour les champs captants de Sulauze et Caspienne à partir d'un déficit de recharge de 100 Mm<sup>3</sup>/an

(70% des volumes actuellement appliqués). De la même façon, en conservant les volumes d'eau mise en irrigation actuels, l'indicateur AEP collectif serait relativement épargné par des hausses de prélèvements atteignant 60 Mm<sup>3</sup>/an.

Une baisse de 10% des volumes d'eau destinée à l'irrigation entraîne une difficulté d'exploitation pour une hausse de prélèvements de 40 Mm<sup>3</sup>/an. Une baisse de volume irrigué de 20% ne permet plus de marge de manœuvre en termes de prélèvement sans une bascule de l'indicateur en tension « faible » à « moyenne ». Une baisse de 30% des volumes d'eau mise en irrigation précipite l'indicateur en tension « forte »



**Figure 85 Classement synthétique de la catégorie d'indicateurs « AEP collectif » en fonction des conditions de recharge et prélèvements**

### INDICATEURS « SALINITE » ET « INDUSTRIELS »

Les indicateurs « salinité » et « industriels » sont remarquablement résilients aux variations de conditions de recharge et de prélèvements. Les premiers impacts interviennent pour des baisses de volume irrigué de 40% (figures 86 et 87).

Ceci s'explique d'une part par la localisation des indicateurs en secteur aval de la nappe. D'un point de vue strictement hydraulique, ils sont peu influencés par les conditions d'exploitation et de recharge affectant le secteur amont de l'aquifère et bénéficient d'une relative stabilité des charges hydrauliques en lien avec les zones de drainage aval et le niveau de la mer. D'autre part, les captages industriels ont une conception recherchant à sécuriser l'approvisionnement dans des secteurs avec une forte potentialité aquifère.

Dans des conditions hydrologiques très dégradées, les points les plus vulnérables seraient le captage « Le Mazet » pour la catégorie d'indicateurs « salinité » et le captage « TOTAL » pour la catégorie d'indicateur « industriels ».

### INDICATEUR INTRUSIONS SALINES

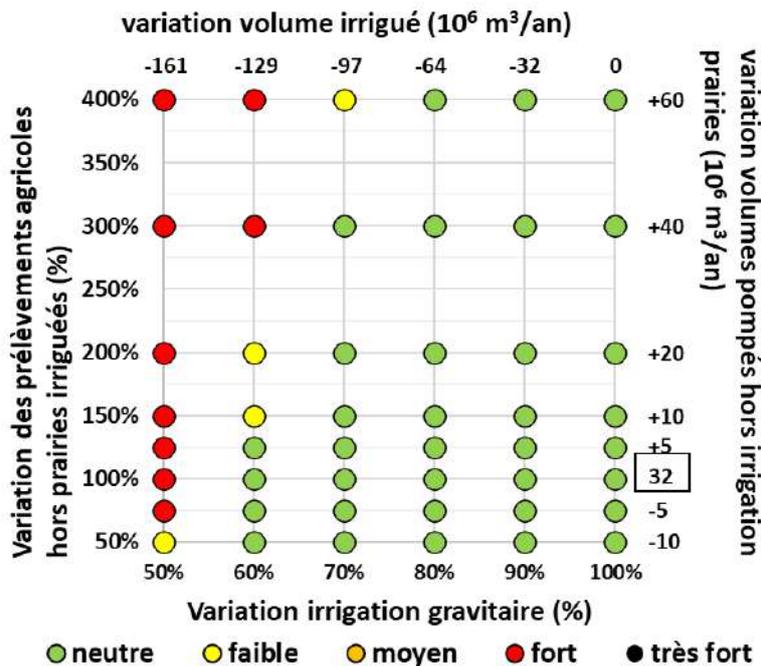


Figure 86 Classement synthétique de la catégorie d'indicateurs « intrusions salines » en fonction des conditions de recharge et prélèvements

### INDICATEURS INDUSTRIELS

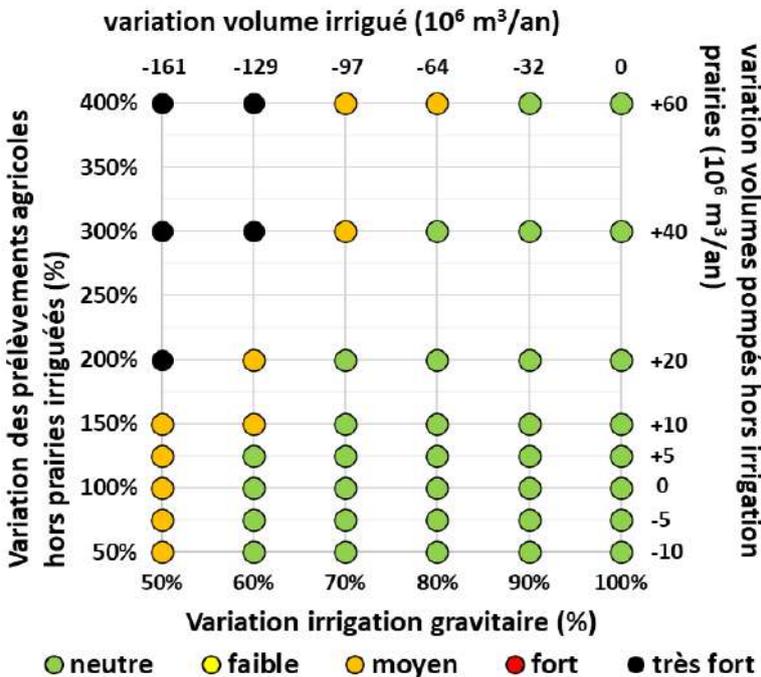


Figure 87 Classement synthétique de la catégorie d'indicateurs « industriels » en fonction des conditions de recharge et prélèvements

### 3.1.3 DISCUSSION SUR L'IMPACT DES VARIATIONS DU COUPLE RECHARGE/PRELEVEMENTS SUR LES USAGES ET LES MARGES DE MANOEUVRE DISPONIBLES ACTUELLEMENT

#### DES USAGES ET DES BENEFICES ENVIRONNEMENTAUX DIVERSEMENT SENSIBLES AUX VARIATIONS DU COUPLE RECHARGE / PRELEVEMENT

L'analyse de sensibilité conduite dans ce chapitre montre l'impact inégalement réparti des conditions de recharge et de prélèvements sur les indicateurs d'état de la ressource, ainsi qu'une gradation des impacts selon des catégories d'indicateurs.

**Les zones humides, les captages AEP privés et les prélèvements agricoles se révèlent être les enjeux les plus sensibles aux déséquilibres quantitatifs.**

Cela s'explique d'une part par le processus de colonisation récente de certains sites par des habitats humides rendant les milieux sensibles à de faibles variations de charges hydrauliques. D'autre part, la capacité d'investissement des irrigants agricoles ne permet pas toujours de se mettre à l'abri de baisse importante des niveaux piézométriques. Au sein de ces catégories d'indicateurs, certains sites sont plus sensibles que d'autres. Pour les zones humides, il s'agit des sites centraux alimentés par remontées de nappe, en particulier « Grand Brahis » et « Vergière amont ». Cette sensibilité dépend de la situation hydraulique (le secteur amont de la nappe étant plus sensible que les secteurs aval car c'est sur cette partie de la nappe qu'on observe les plus fortes chutes de niveaux piézométriques) et des conditions hydrogéologiques (perméabilité locale).

Les captages AEP privés sont structurellement très sensibles aux baisses de recharge, d'une part puisque leur implantation ne répond pas toujours à une logique hydrogéologique mais plus généralement à une opportunité d'habitats agricoles. D'autre part, les captages ne sont généralement pas très profonds afin de limiter l'investissements de forage.

Pour les prélèvements agricoles, cette sensibilité est liée aux conditions hydrogéologiques (perméabilité, épaisseur de nappe), comme pour l'indicateur « Entressen sud », la densité des captages déjà en place (indicateur « Valignette ») ou la dépendance à des recharges locales par irrigation des prairies (indicateurs « St Martin amont » et « Salon Sud-Ouest »). De façon générale, c'est la faible profondeur des captages agricoles qui ne captent pas toute l'épaisseur mouillée de la nappe qui rend cet usage si vulnérable à d'éventuelles baisses du niveau piézométrique.

**Les captages pour l'AEP publique sont légèrement moins sensibles que les zones humides et les prélèvements agricoles.** Cela s'explique par les études préalables et les capacités d'investissements plus conséquents visant une sécurisation de l'approvisionnement en eau potable. Les champs captants ont souvent été implantés dans les zones les plus productives de la nappe avec un dimensionnement optimal (ouvrage dit complet qui capte la totalité des de la zone saturée en eau). Néanmoins, chaque captage étant structurant pour le territoire, avec un degré de sécurisation par maillage faible, le défaut de fonctionnement d'un seul ouvrage les captages met en situation de tension forte la capacité d'approvisionnement des populations. Ce sont principalement les caractéristiques techniques de deux champs captant qui conditionnent la vulnérabilité de cet usage : Caspienne et Sulauze.

**Dans une certaine mesure, les captages d'eau potable semblent relativement protégés du risque d'intrusions salines dans les conditions actuelles du niveau marin.** Le captage le plus exposé est celui du Mas-Thibert en cas de baisse drastique des volumes d'eau irriguée (-40%). L'éloignement des ouvrages du trait de côte ou de la limite de la nappe captive, ainsi que la profondeur des crépines, sont les facteurs principaux explicatifs de leur vulnérabilité.

**Enfin la catégorie d'indicateurs industriels, constituée des deux principaux captages ESSO et TOTAL, sont peu sensibles aux variations testées des conditions de recharge et prélèvements.** Cela s'explique d'une part par la capacité d'investissement initial, recherchant une sécurisation pour l'approvisionnement en eau du secteur pétrolier, conduisant à des captages bien conçus et bien situés dans des secteurs productifs de la nappe. D'autre part, cela s'explique par la localisation en aval de la nappe qui atténue les variations piézométriques en fonction des conditions de recharge et de prélèvements.

De manière générale on constate que de faibles variations sur les volumes d'eau irrigués ont des répercussions plus importantes que les hausse de prélèvements dans un même rapport. Ceci s'explique

par les volumes en jeu : une baisse de 10% des volumes d'eau destinée à l'irrigation représente une quantité d'eau de recharge en moins de 32 Mm<sup>3</sup>/an tandis qu'une hausse de prélèvement agricole d'un même volume représenterait une hausse de 150%.

## NOTION D'EQUILBRE DE LA RESSOURCE ET DE DEFICIT POUR UNE ANALYSE GLOBALE DES IMPACTS

Afin de faciliter l'analyse des impacts sur les usages, il est introduit la notion d'équilibre de la ressource et de déficit par rapport à une situation de référence. L'intérêt est de raisonner en termes de flux global, qu'il soit lié aux variations de recharge ou à celles des prélèvements.

L'équilibre de la ressource, en (Mm<sup>3</sup>/an), est défini pour une situation donnée comme la différence entre les flux moyens entrants dans le système et les flux moyens prélevés. Le déficit pour la ressource dans une situation donnée par rapport à un état de référence, en (Mm<sup>3</sup>/an), est défini comme la différence entre l'équilibre de la situation donnée et l'équilibre de l'état de référence.

$$\text{Equilibre}_{\text{scénario testé}} = (\text{Recharge} - \text{Prélèvements})_{\text{scénario testé}}$$

$$\text{Déficit (Mm}^3\text{/an)} = \text{Equilibre}_{\text{scénario testé}} - \text{Equilibre}_{\text{état de référence}}$$

**Une analyse par ce critère implique de vérifier que pour un même déficit, produit par des couples de recharge/prélèvements différents, les impacts sur les indicateurs sont globalement identiques.**

A partir des indices mensuels de tensions pour chaque enjeu, il est procédé à l'analyse des impacts différentiels à volume de déficit équivalent pour la nappe, des baisses de recharge ou d'augmentation de prélèvements.

La figure 88 ci-dessous montre par exemple les impacts pour deux scénarios qui correspondent à un même volume de déficit de l'ordre de 140 Mm<sup>3</sup>/an :

- Scénario avec un volume irrigué à 70% (-100 Mm<sup>3</sup>/an) et 300% de prélèvements agricoles (-40 Mm<sup>3</sup>/an) par rapport à l'actuel.
- Scénario avec un volume irrigué à 60% (-130 Mm<sup>3</sup>/an) et 150% de prélèvements agricoles (-10 Mm<sup>3</sup>/an) par rapport à l'actuel.

**Les résultats montrent que les scénarios qui présentent un même déficit cumulé portent le même impact sur 95% des indicateurs.**

Quelques différences mineures apparaissent pour les indicateurs de pompages agricoles. La baisse de volumes d'eau mise en irrigation entraîne une diminution relativement répartie dans l'espace des niveaux de nappes ; l'augmentation des prélèvements agricoles conduit à des baisses de nappe forcément plus localisées au droit des grandes zones de pompage.

De façon plus anecdotique, on peut aussi observer des différences de sensibilité au droit de certaines zones humides localisées près de grandes zones de pompage agricole (Vergière centrale et Grand Brahis).

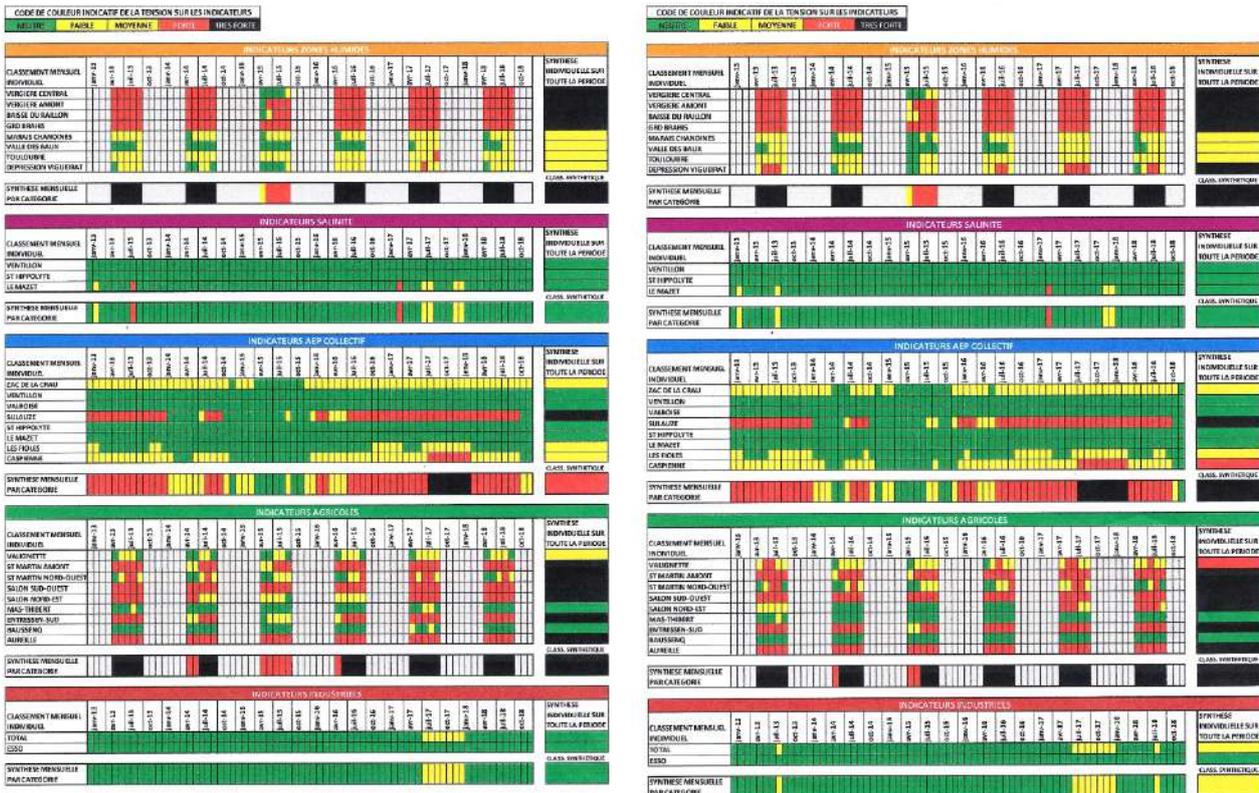


Figure 88 Comparaison des impacts pour deux configurations correspondant à un même volume de déficit (140 Mm<sup>3</sup>/an)

**QUELS SONT LES USAGES LES PLUS IMPACTES PAR UNE POTENTIELLE MODIFICATION DE L'EQUILIBRE ACTUEL ENTRE RECHARGE ET PRELEVEMENTS ?**

Si on néglige les variations secondaires causées par un impact différentiel entre hausse des prélèvements et baisse de recharge (voir ci-dessus), on peut réduire ce couple à une valeur dite de déficit par rapport à la situation actuelle. A partir de l'analyse mensuelle de tous les indicateurs et pour tous les scénarios exploratoires testés, il est alors possible de déterminer pour chaque indicateur à partir de quel ordre de grandeur du déficit, l'indicateur passe d'un état à un autre en termes de tension (neutre, faible, moyenne, forte à très forte).

Dans SINERGI, nous avons testé des déficits qui varient selon les contraintes suivantes :

- De - 10 Mm<sup>3</sup>/an à +60 Mm<sup>3</sup>/an en termes de prélèvements. Rappelons que les prélèvements cumulés actuels sont de l'ordre de 70 Mm<sup>3</sup>/an. Le scénario le plus extrême correspond donc à un presque doublement de la pression par prélèvements.
- Des baisses de recharge liées à la baisse des volumes d'eau destinés à l'irrigation de 30 à 160 Mm<sup>3</sup>/an. Rappelons que la recharge actuelle liée à ces volumes est estimée à environ 240 Mm<sup>3</sup>/an. Le scénario extrême testé correspond donc à une baisse de 66% des eaux en provenance de l'usage irrigation.

**En cumulé le déficit par rapport à la situation actuelle du couple recharge-prélèvements peut ainsi atteindre 215 Mm<sup>3</sup>/an. Un tel déficit représenterait environ 60% des réserves renouvelables annuelles actuelles de la nappe de Crau.**

Pour plus de lisibilité, nous avons opéré les regroupements suivants pour les usages qui présentent les mêmes dynamiques de dégradation de leur indicateur :

- Zones humides dépendants des niveaux de nappe (Vergière centrale et amont, Grand Brahis, Baisse de Raillon).
- Zones humides dépendants des flux de la nappe sur ses bordures (Marais des Chanoines, Vallée des Baux, Touloubre et Dépression du Vigueirat).
- Salinité dans les secteurs du champ captant du Ventillon et du champ captant de St Hyppolite.
- Salinité dans le secteur du Mazet.
- Captages pour l'AEP collective structurellement peu vulnérables car intéressant une épaisseur mouillée importante (Ventillon, Valboisé, St Hyppolite et Mazet).
- Captages pour l'AEP collective prélevant dans la couche miocène (ZAC de la Crau, Les Fioles)
- Captages pour l'AEP collective structurellement vulnérables car caractérisés par une faible épaisseur mouillée (Sulauze et Caspienne).
- AEP privée secteur Arles
- AEP privée secteur Salon
- Zones de prélèvements agricoles en partie aval de la nappe (Mas Thibert, Valignette, Bausenq).
- Zone de prélèvements agricoles en partie amont de la nappe (secteurs d'Arles, d'Aureille, de St Martin et de Salon en Provence).
- Champ captant de TOTAL
- Champ captant d'ESSO.

**Il a été déterminé le degré de tension sur chaque groupe d'indicateur, pour toute la période modélisée.** C'est un exercice nécessairement approximatif car les groupes d'indicateurs peuvent recouvrir des dynamiques locales variables et la relation entre déficit et état de tension n'est pas toujours univoque en fonction de l'origine du déficit (baisse de recharge ou hausse de prélèvement). Un lissage statistique des courbes a été nécessaire et il est raisonné en ordre de grandeur. La figure 89 résume les trajectoires de ces « familles » d'indicateurs.

**Le premier indicateur concerné par une dégradation de son état de tension concerne les captages AEP privés dans le secteur de Salon. Un déficit de 10 Mm<sup>3</sup>/an suffit à exercer une tension faible.**

**Les zones humides dépendantes des niveaux de nappe, les pompages agricoles en partie amont de la nappe et les captages AEP privés dans le secteur d'Arles sont également particulièrement sensibles.** Un déficit de seulement 20 Mm<sup>3</sup>/an produira régulièrement des tensions faibles pour ces trois types d'enjeu. Une tension moyenne apparaît sur l'indicateur zones humides dépendantes de niveaux de nappe pour un déficit de 30 Mm<sup>3</sup>/an. Les captages privés d'Arles passent en tension moyenne pour un déficit dépassant 50 Mm<sup>3</sup>/an.

Pour les zones humides, cela s'explique d'une part par le processus de colonisation récente de certains sites par des habitats humides rendant les milieux sensibles à de faibles variations du niveau de nappe. Pour l'AEP privé, cela s'explique par la vulnérabilité structurelle des petits captages pénétrant la nappe sur une faible épaisseur et par la localisation amont du secteur de Salon. Pour les forages agricoles en partie amont de la nappe, cela s'explique de deux manières. D'une part, il est important de rappeler que les baisses de niveaux de nappe liés à un déficit de ressource sont beaucoup plus fortes dans la partie amont, Nord, de la nappe ; au Sud, les marais et les étangs jouent un rôle d'effets tampon et amortissent ces impacts. D'autre part, la capacité d'investissement des irrigants agricoles ne permet pas toujours de se mettre à l'abri de baisse importante des niveaux piézométriques (forages pas assez profonds, dits incomplets quand ils ne recoupent pas toute la hauteur mouillée des cailloutis de Crau). De façon générale, c'est la faible profondeur des captages agricoles qui ne captent pas toute l'épaisseur mouillée de la nappe qui rend cet usage si vulnérable à d'éventuelles baisses du niveau piézométrique.

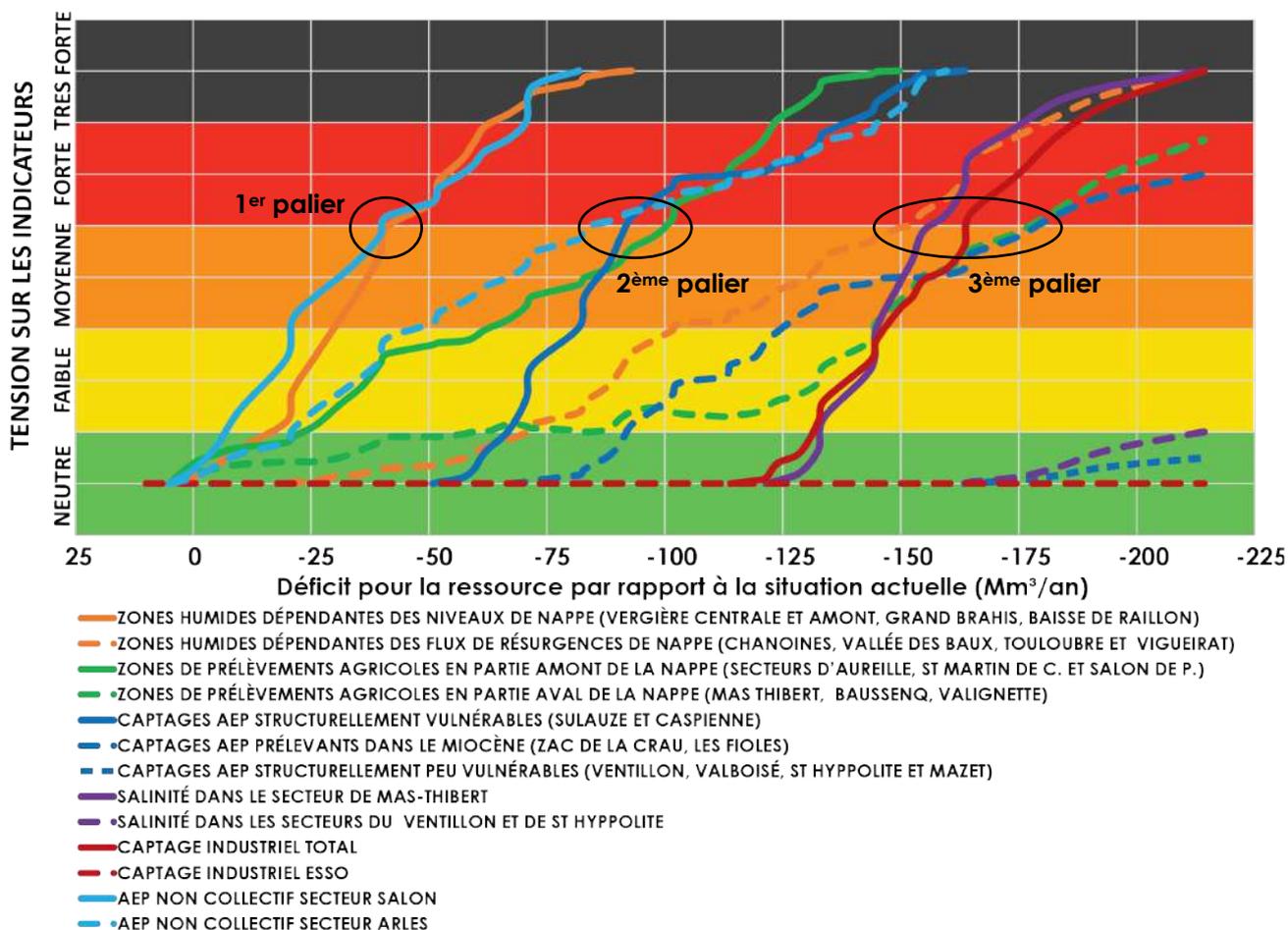


Figure 89 Tension sur les groupes d'indicateurs en fonction du déficit par rapport à la situation actuelle

1 <sup>er</sup> PALIER DÉFICIT 30 à 40 Mm³/an			2 <sup>ème</sup> PALIER DÉFICIT 80 à 100 Mm³/an			3 <sup>ème</sup> PALIER DÉFICIT 140 à 175 Mm³/an		
<b>ÉTAT DES INDICATEURS</b>			<b>ÉTAT DES INDICATEURS</b>			<b>ÉTAT DES INDICATEURS</b>		
Tension neutre		<b>CLASSEMENT INDICATEUR</b>	Tension neutre		<b>CLASSEMENT INDICATEUR</b>	Tension neutre		<b>CLASSEMENT INDICATEUR</b>
Tension faible			Tension faible			Tension faible		
Tension moyenne			Tension moyenne			Tension moyenne		
Tension forte			Tension forte			Tension forte		
Tension très forte			Tension très forte			Tension très forte		
<b>Zones humides</b>	Centrales		<b>Zones humides</b>	Centrales		<b>Zones humides</b>	Centrales	
	Périphériques			Périphériques			Périphériques	
<b>Agriculture</b>	Secteurs amonts		<b>Agriculture</b>	Secteurs amonts		<b>Agriculture</b>	Secteurs amonts	
	Secteurs avals			Secteurs avals			Secteurs avals	
<b>AEP public</b>	Captages vulnérables		<b>AEP public</b>	Captages vulnérables		<b>AEP public</b>	Captages vulnérables	
	Captages dans le miocène			Captages dans le miocène			Captages dans le miocène	
	Captages peu vulnérables			Captages peu vulnérables			Captages peu vulnérables	
<b>AEP privé</b>	Secteur Salon		<b>AEP privé</b>	Secteur Salon		<b>AEP privé</b>	Secteur Salon	
	Secteur Arles			Secteur Arles			Secteur Arles	
<b>Industries</b>	TOTAL		<b>Industries</b>	TOTAL		<b>Industries</b>	TOTAL	
	ESSO			ESSO			ESSO	
<b>Salinité</b>	Mas-Thibert		<b>Salinité</b>	Mas-Thibert		<b>Salinité</b>	Mas-Thibert	
	Ventillon et St Hyppolite			Ventillon et St Hyppolite			Ventillon et St Hyppolite	

Tableau 40 Tension apparaissant au-delà des trois paliers de déficit caractéristiques

**L'analyse de l'évolution des tensions fait apparaître 3 paliers caractéristiques au-delà desquelles des tensions fortes apparaissent sur certains groupes d'indicateurs (Tableau 40).**

**Un premier palier apparaît au-delà d'un déficit de 30 à 40 Mm<sup>3</sup>/an** où les tensions deviennent fortes sur les zones humides dépendantes du niveau de nappe et les captages AEP privés du secteur de Salon. Ceci implique une difficulté d'approvisionnement en eau potable des habitats isolés et un assèchement important des zones humides dépendantes des niveaux de nappe.

**On observe un deuxième palier en termes d'impacts sur les enjeux liés à un déficit de ressource entre 80 à 100 Mm<sup>3</sup>/an.** Dans cet intervalle, on observe des tensions fortes de façon récurrente sur les prélèvements agricoles en zone amont, sur les captages AEP privés d'Arles et les captages AEP collectifs les plus vulnérables (Sulauze et Caspienne).

Ce sont principalement les caractéristiques techniques de deux champs captants qui conditionnent la vulnérabilité de cet usage. Les autres captages pour l'AEP sont nettement moins sensibles au déficit de ressource. Cela s'explique par les études préalables et les capacités d'investissements plus conséquents visant une sécurisation de l'approvisionnement en eau potable. Les champs captants ont souvent été implantés dans les zones les plus productives de la nappe avec un dimensionnement optimal (ouvrage dit complet qui capte la totalité de la zone saturée en eau).

Au-delà d'un déficit de 140 Mm<sup>3</sup>/an l'ensemble des indicateurs est classé en état de tension moyenne, y compris le captage industriel de TOTAL et le captage AEP Le Mazet, concerné par des remontées salines récurrentes. Les autres indicateurs de l'intrusion saline (St Hyppolite et Ventillon), les captages AEP peu vulnérables (Ventillon, Valboisé, St Hyppolite, Ventillon et le Mazet) et le captage industriel d'ESSO restent en état de tension neutre.

**Le troisième palier de déficit se situe entre 140 et 175 Mm<sup>3</sup>/an.** Avec de tels déficits de ressource, on observera des tensions récurrentes et fortes sur quasiment tous les autres enjeux de nappe :

- Augmentation du risque de salinisation du champ captant AEP de Mas-Thibert.
- Diminution significative des flux d'eaux souterraines vers les hydro systèmes en bordure de Crau avec risque de déséquilibre du gradient eau douce – eau salée.
- Perte de productivité significative pour les forages agricoles en partie aval de la nappe.
- Baisse de productivité du captage industriel de TOTAL.

Seuls les champs captants AEP peu vulnérables car bien dimensionnés, ainsi que le champ captant ESSO, ne sont pas impactés dans les ordres de grandeur de déficit testés.

Ainsi, dans une certaine mesure, les captages d'eau potable publics semblent relativement protégés du risque d'intrusions salines dans les conditions actuelles du niveau marin. Le captage le plus exposé est celui du Mas-Thibert en cas de baisse drastique des volumes d'eau irriguée. L'éloignement des ouvrages du trait de côte ou de la limite de la nappe captive, ainsi que la profondeur des crépines, sont les facteurs principaux explicatifs de leur vulnérabilité.

## **QUELLES SONT LES MARGES DE MANŒUVRES SUR LA RECHARGE ET LES PRELEVEMENTS ?**

Dans un objectif de préservation de l'ensemble des usages de la nappe et de la satisfaction des besoins en eau des milieux, l'analyse permet de dégager les marges de manœuvres possibles en termes de réduction des volumes d'eau destinée à l'irrigation des prairies et d'augmentation des capacités pour les besoins agricoles. Dans les conditions actuelles, il pourrait être admis une hausse des prélèvements agricoles de +20 Mm<sup>3</sup>. Une baisse de 10% des volumes alloués à l'irrigation limiterait cette augmentation possible des prélèvements à + 5 Mm<sup>3</sup>/an. Une baisse supplémentaire de recharge ou une hausse supplémentaire de prélèvements auraient un impact significatif sur les zones humides dont le bon état dépend des niveaux de nappe (Brahis, Vergière, Baussenq et Raillon).

Ce cadre de bonne gestion concerne cependant les conditions actuelles d'aménagement et de gestion d'eau du territoire. L'évolution de ces conditions pourrait remettre en cause les capacités d'exploitation de la nappe.

La définition de conditions de gestion compatibles avec les usages repose sur deux concepts :

- **Le degré de priorisation de la protection par catégorie d'usages identifiée sur le territoire :**

On peut distinguer d'une part l'usage pour l'AEP collectif (incluant le risque de dégradation de la qualité des eaux par remontées salines) et la fonctionnalité pour l'alimentation des écosystèmes, qui sont reconnus comme prioritaires dans le SDAGE. D'autre part, peuvent être considérés les usages pour l'alimentation des secteurs socio-économiques (agricoles et industriels) qui bénéficient d'une protection réglementaire moins importante.

- **Le degré de tension acceptable pour chacun des usages : tension faible, moyenne, forte et très forte.**

La tension « faible » est considérée comme un état de tension limité dans le temps, perturbant le système mais n'induisant pas de dégradation de conditions d'usage ou de fonctionnalité sur le long terme. La tension « moyenne » est un état de tension « faible » qui perdure ou revient fréquemment. Même si l'intégrité de l'usage ou de la fonctionnalité n'est pas menacée, il peut entraîner une dégradation marquée de la qualité de cet usage ou fonctionnalité. La tension « forte » est un état menaçant dans un temps limité la capacité à satisfaire à l'usage ou à permettre l'expression de la fonctionnalité. La tension « très forte » marque une tension « forte » qui perdure ou revient fréquemment.

Définir le cadre d'une gestion quantitative demande donc de définir pour chaque catégorie d'usage ou de fonctionnalité, le degré de protection à respecter et une tension acceptable. Ceci relève avant tout d'un choix sociologique et politique, fondé sur les contraintes réglementaire, les savoirs techniques, et les perspectives de développement socio-économique du territoire. SINERGI ne prévoit pas une telle analyse mais pose un premier cadre technique.

On pourrait considérer que les milieux naturels peuvent être soumis à une certaine tension sur un court terme, puisque les écosystèmes présentent généralement une certaine résilience au stress hydrique. De même on peut considérer que les tensions sur les prélèvements agricoles sont régulées par la profession à travers l'OUGC et donc qu'une tension « moyenne » serait gérable par auto-régulation ou diversification par des prélèvements plus profonds. Une tension forte serait cependant difficilement acceptable car les agriculteurs sans capacités financières pourraient avoir du mal à s'adapter. Pour les indicateurs relatifs à la salinité et à l'AEP collectif, il serait difficilement possible déployer des solutions de substitution, il s'agirait donc de ne pas atteindre une tension « moyenne ». Pour les captages AEP privés, il s'agit de ne pas provoquer une baisse piézométrique supérieure à 2 m afin de limiter les risques d'assèchement de certains secteurs concernés par de l'habitat isolé. Pour les industriels, usage non prioritaire et substituable avec une capacité financière, il s'agirait de ne pas atteindre une tension « forte ».

Suivant ce raisonnement, on peut définir un cadre théorique d'une gestion quantitative respectant un état de tension jugée acceptable :

Indicateurs	Tension acceptable	Tension non acceptable
Zones humides	« faible » à « moyenne »	« forte » à « très forte »
Intrusion salines	« faible »	« moyenne » à « très forte »
AEP collectif	« faible »	« moyenne » à « très forte »
AEP privé	« faible à moyenne »	« forte » à « très forte »
Agricoles	« faible » à « moyenne »	« forte » à « très forte »
Industriels	« faible » à « moyenne »	« forte » à « très forte »

**Tableau 41 Acceptabilité de l'état de tension pour chaque catégorie d'indicateurs**

Sur la base des classements synthétiques de l'état de tension des indicateurs, établies au 3.1.2, et du cadre théorique de bonne gestion quantitative, sont quantifiées les marges de variations de recharges et prélèvements possibles conservant un état de tension acceptable pour les usages et les milieux alimentés par la nappe.

La figure 90 représente le cadre quantitatif du couple recharge/prélèvement respectant un état de tension acceptable des indicateurs. Cette synthèse, moyennant la tension exercée sur chaque catégorie d'indicateur, ne permet pas de traiter toutes les variabilités spatiales de la tension sur les usages

et l'alimentation des milieux. Il s'agit donc d'une analyse globale permettant de dégager les grandes tendances.

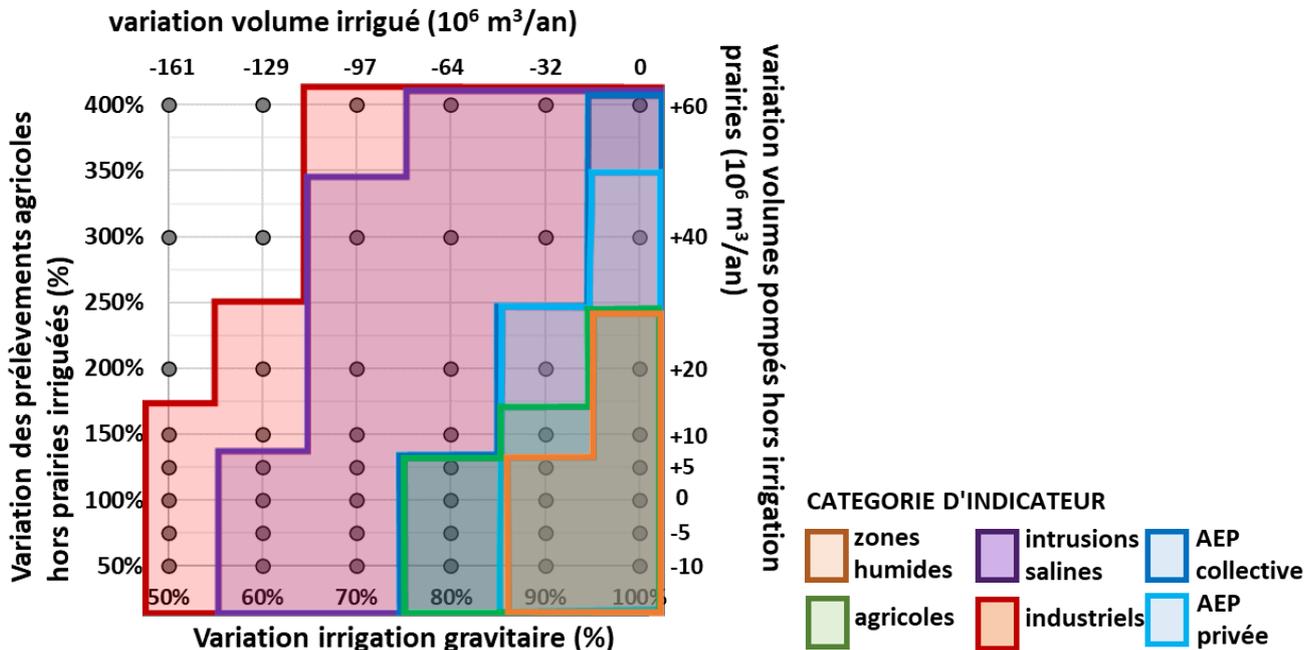


Figure 90 Cadre quantitatif d'un état de tension acceptable

En fonction du degré de tension acceptée sur les différentes catégories d'usages les marges de manœuvre sur la réduction des volumes d'eau appliquées à l'irrigation et la hausse des prélèvements en nappe peuvent être catégorisées en 7 situations (tableau 42).

- En limitant la hausse des prélèvements agricoles à +20 Mm<sup>3</sup>/an avec les volumes actuels d'eau d'irrigation ou en limitant les prélèvements en cas de baisse d'eau d'irrigation de 10% : **il est conservé un optimum de gestion où tous les usages sont conservés (situation 1).**
- En limitant les prélèvements à +10 Mm<sup>3</sup>/an alors que les volumes d'eau d'irrigation sont réduits de 10% : **certains milieux humides passent en état de tension jugée non acceptable mais les autres usages sont globalement maintenus dans de bonnes conditions (situation 2).**
- En limitant les prélèvements à +40 Mm<sup>3</sup>/an, en conditions de recharge actuelle, à +20 Mm<sup>3</sup>/an avec des volumes d'eau irrigués réduits de 10% ou à +5 Mm<sup>3</sup>/an avec une baisse d'eau d'irrigation de 20% : **tensions importantes apparaissent sur les milieux humides et la capacité de prélèvements agricoles alors que les autres usages seraient globalement satisfaits (situation 3)**
- En limitant la hausse des prélèvements à +5 Mm<sup>3</sup>/an alors que les volumes d'eau irriguée sont réduits de 20% : il y a un **assèchement de certains milieux humides et l'AEP privée est soumise à des difficultés de prélèvement (situation 4)**
- En limitant la hausse des prélèvements à +60 Mm<sup>3</sup>/an avec des volumes d'eau irriguée réduits de 30% ou à +5 Mm<sup>3</sup>/an avec une baisse d'eau d'irrigation de 40% : **les zones humides, les prélèvements agricoles, l'AEP privée et collective sont en état de tensions importants, tandis que les autres usages sont satisfaits (situation 5).**
- En limitant la hausse des prélèvements à +20 Mm<sup>3</sup>/an avec des volumes d'eau irriguée réduits de 40% ou à +10 Mm<sup>3</sup>/an avec une baisse d'eau d'irrigation de 50% : l'ensemble des usages sont touchés hormis les captages industriels (**situation 6**)

- Au-delà d'une augmentation de + 20 Mm<sup>3</sup>/an ou + 10 Mm<sup>3</sup>/an pour des baisses de volumes d'eau mise en irrigation respectivement de 40% ou 50%, **plus aucun usage n'est satisfait dans de bonnes conditions (situation 7).**

	Tension sur les usages et l'alimentation des milieux :	acceptable non acceptable	Volumes d'eau mise en irrigation	Marges de manœuvre sur les prélèvements
<b>Situation 1</b> Tous les usages et l'alimentation des milieux sont satisfaits	Zones humides		100% >	> -10 à +20 Mm <sup>3</sup> /an
	Prélèvements agricoles		90% >	> -10 à +5 Mm <sup>3</sup> /an
	AEP privée		< 80% : situation non satisfaite	> sans objet
	AEP collective			
	Intrusions salines			
Prélèvements industriels				
<b>Situation 2</b> Tensions sur les milieux humides, Autres usages satisfaits	Zones humides		90% >	> +10 Mm <sup>3</sup> /an
	Prélèvements agricoles		≤ 80% : situation non satisfaite	> sans objet
	AEP privée			
	AEP collective			
	Intrusions salines			
Prélèvements industriels				
<b>Situation 3</b> Tensions sur les milieux humides et la capacité de prélèvements agricoles Autres usages satisfaits	Zones humides		100% >	> +40 Mm <sup>3</sup> /an
	Prélèvements agricoles		90% >	> +20 Mm <sup>3</sup> /an
	AEP privée		80% >	> ≤ 5 Mm <sup>3</sup> /an
	AEP collective		≤ 80% : situation non satisfaite	> sans objet
	Intrusions salines			
Prélèvements industriels				
<b>Situation 4</b> Tensions sur les milieux humides et l'AEP privée Autres usages satisfaits	Zones humides		80% >	> -10 à +5 Mm <sup>3</sup> /an
	Prélèvements agricoles		≤ 70% : situation non satisfaite	> sans objet
	AEP privée			
	AEP collective			
	Intrusions salines			
Prélèvements industriels				
<b>Situation 5</b> Tensions sur les milieux humides, la capacité de prélèvements agricoles, l'AEP privée et collective Autres usages satisfaits	Zones humides		70% >	> + 60 Mm <sup>3</sup> /an
	Prélèvements agricoles		60% >	> +5 Mm <sup>3</sup> /an
	AEP privée		≤ 50% : situation non satisfaite	> Sans objet
	AEP collective			
	Intrusions salines			
Prélèvements industriels				
<b>Situation 6</b> Tensions sur les milieux humides, la capacité de prélèvements agricoles, l'AEP privée et collective et la salinité des eaux captées Autres usages satisfaits	Zones humides		60% >	> + 20 Mm <sup>3</sup> /an
	Prélèvements agricoles		50% >	> + 10 Mm <sup>3</sup> /an
	AEP privée			
	AEP collective			
	Intrusions salines			
Prélèvements industriels				
<b>Situation 7</b> Tension sur toutes les catégories d'usages et l'alimentation des milieux	Zones humides		60% >	> aucune marge de manœuvre au-delà de + 20 Mm <sup>3</sup> /an
	Prélèvements agricoles		50% >	> aucune marge de manœuvre au-delà de + 10 Mm <sup>3</sup> /an
	AEP privée			
	AEP collective			
	Intrusions salines			
Prélèvements industriels				

**Tableau 42** Marges de manœuvre sur les prélèvements en fonction des volumes d'eau irrigué et des tensions acceptée sur les usages et l'alimentation des milieux

## 3.2 SIMULATIONS PROSPECTIVES A L'HORIZON 2050

### 3.2.1 OBJECTIFS ET METHODES

Le contexte dans lequel se place la gestion actuelle des eaux souterraines et le fonctionnement de l'hydro système de la Crau dépend d'un contexte climatique, d'un aménagement du territoire et d'une organisation sociale et réglementaire de gestion des flux, qui sont amenés à évoluer dans les prochaines décennies.

Parmi ces objectifs, l'étude SINERGI vise à analyser les conséquences potentielles de ses changements sur la ressource en eau et à déterminer les leviers possibles pour en atténuer les impacts négatifs. C'est sur cette analyse que pourra être bâffi une stratégie pour un territoire plus résilient aux changements climatiques, conciliant usages socio-économiques et besoins des écosystèmes.

La méthode a consisté à définir dans un premier temps des scénarios d'évolution du territoire à l'horizon 2050, en s'appuyant sur un temps de concertation menée auprès des acteurs du territoire. Dans un second temps il est testé l'impact de ces scénarios sur les indicateurs d'état de la ressource. Ceci conduit à dessiner le champ des possibles de l'état de la ressource, et sa capacité à rendre les services aujourd'hui rendus, à l'horizon 2050 en fonction des choix pris dans la gestion du territoire et des flux d'eau.

### 3.2.2 ETABLISSEMENT DES SCENARIOS PROSPECTIFS SUR L'ETAT DE LA RESSOURCE

#### CONCERTATION AVEC LES ACTEURS LOCAUX

SINERGI a pour objectif d'estimer l'impact de changements structurels pouvant affecter la gestion du territoire et de la ressource à l'horizon 2050, en considérant les effets des changements climatiques. L'élaboration de ses scénarios doit refléter les projections perçues par les acteurs du territoire, les projets des décideurs locaux et tenir compte des tendances qui se dessinent aujourd'hui en fonction des connaissances des acteurs de terrain.

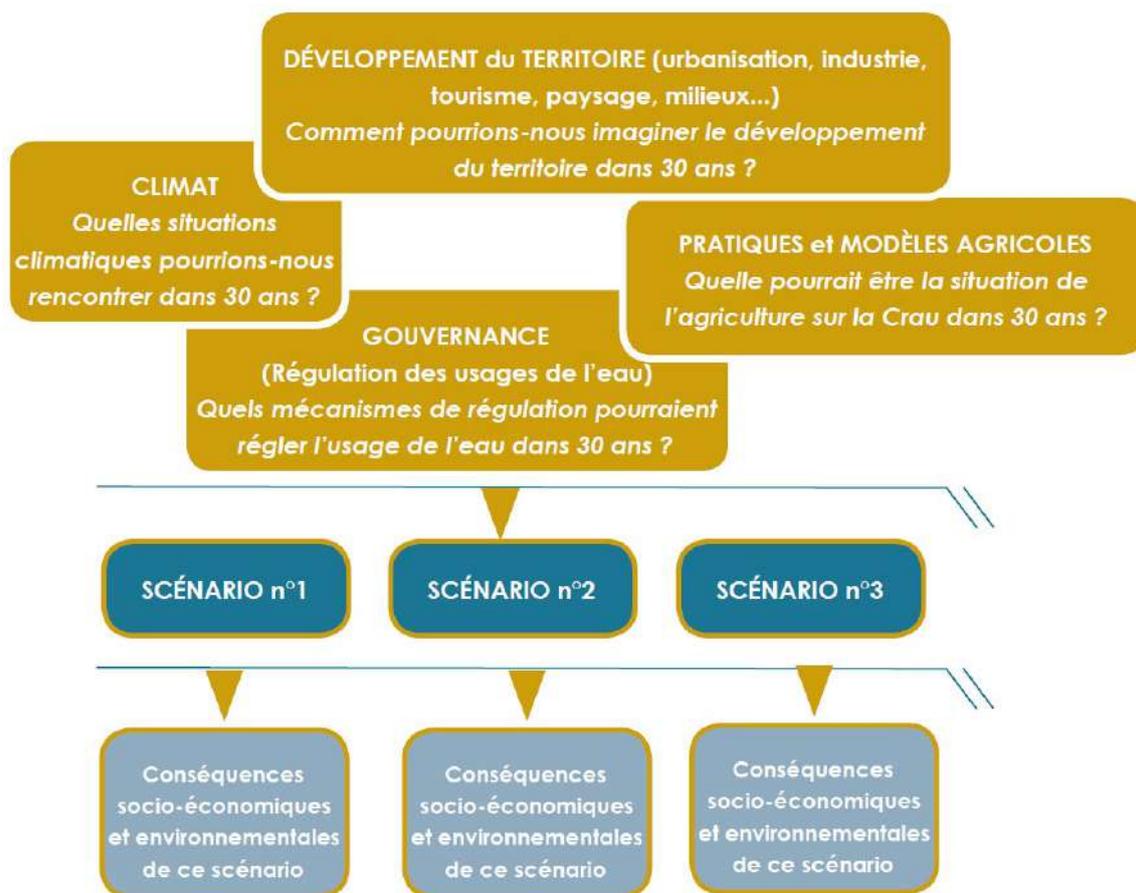
Pour cette raison, l'élaboration des scénarios s'est appuyée sur un temps de concertation préalable avec les acteurs locaux, au cours d'une réunion organisée le 18 décembre 2018 à la Maison des Association de Grans.

#### Organisation de la concertation

L'invitation à l'atelier de concertation s'est portée sur un panel d'acteurs intéressés aux perspectives d'évolution de la ressource en eau dans les prochaines décennies : élus, techniciens des collectivités territoriales, profession agricole, milieu associatif, chercheurs, services de l'état. La thématique de travail était : « *Demain ... quelles évolutions et quels usages de la nappe de la Crau* »

Les participants ont été invités à travailler en ateliers pour exprimer leur vision de l'avenir de la ressource en eau sur ces 4 variables afin de dégager différents scénarios prospectifs (matinée). La concertation de l'après-midi a été consacrée à étudier les conséquences socio-économiques et environnementales de chaque scénario ressorti de la concertation du matin. La figure 91 schématise les différents temps de cette concertation.

Ces deux temps de concertation sont restitués dans le compte-rendu consultable en annexe 9.



**Figure 91 Organisation de la concertation sur les scénarios de gestion future des ressources en eau sur la Crau**

### Enseignements de l'atelier sur les perspectives climatiques à l'horizon 2050

Le changement climatique est pour les participants un état de fait qui se traduit sur le territoire depuis quelques années (épisodes de tensions hydriques liés à des modifications des saisons et à des épisodes climatiques intenses (sécheresse ou inondation). Cette situation ressentie aujourd'hui va selon eux encore s'accroître dans l'avenir, ce qui corrobore les prévisions du GIEC.

Deux axes de travail ressortent de cet atelier pour l'élaboration de scénarios climatiques :

- Scénario tendanciel à tester intégrant les hypothèses de changement climatique du GIEC, en tenant compte des variations interannuelles et donc d'un rééquilibrage du système d'une année sur l'autre (des années sèches succédant à des années plus humides).
- Scénario conjoncturel à tester intégrant une succession d'événements extrêmes sur plusieurs années (par exemple sécheresse sur plusieurs années), favorisant un déséquilibre s'aggravant d'année en année.

### Scénarios issus de l'atelier sur développement du territoire à l'horizon 2050

Le développement futur du territoire pourrait passer par une rupture sous-tendue par une réelle implication et volonté politique ; ceci afin d'encadrer le développement et d'éviter ainsi l'artificialisation des sols, démarrée dans les décennies précédentes puis ralentie, mais qui se poursuit aujourd'hui. Les outils législatifs et réglementaires actuellement présents semblent ne pas être suffisants. Avec les règles actuelles, on continue à consommer des terres et à les imperméabiliser. L'affirmation de la poursuite de l'artificialisation des sols sur le territoire de la Crau ne repose pas sur un ressenti mais sur une réalité démontrée par les chiffres.

Deux axes de travail ressortent de cet atelier développement territorial pour l'élaboration des scénarios :

- Tester une implication plus forte des pouvoirs publics et des règles plus adaptées d'encadrement du développement du territoire pour éviter son artificialisation et une dégradation des ressources en eau. Questionner la faisabilité politique, sociale, économique et réglementaire de ce scénario.
- Tester un scénario de "laisser aller" avec poursuite de l'artificialisation des sols en Crau, un "relâchement" dans l'encadrement réglementaire de l'urbanisation et une absence de prise de conscience des conséquences environnementales et socio-économiques

#### Scénarios issus de l'atelier sur l'évolution des pratiques et modèles agricoles à l'horizon 2050

Il ressort de ces échanges une volonté de maintenir à l'avenir un agro-hydro système acquis et sécurisé en l'adaptant et en le valorisant. Le scénario de rupture avec un baisse drastique des volumes d'eau destinée à l'irrigation est donc difficile à envisager pour certains ou s'il est envisagé, méritera des mesures adaptatives importantes (solutions techniques, organisationnelles et financières). De même, le scénario de rupture extrême : fin de l'irrigation gravitaire et donc arrêt de l'activité du foin de Crau, s'il est imaginable, n'est pas acceptable pour les acteurs.

Deux axes de travail ressortent de cet atelier agriculture pour l'élaboration des scénarios :

- Tester une baisse importante des disponibilités en eau de la Durance pour la Crau avec un scénario d'économie d'eau face aux changements globaux (climatique, réglementaire...) en mettant en œuvre des solutions d'adaptation dans les itinéraires techniques (allongement des tours d'eau...) et la modernisation des ouvrages (réduction des pertes sous canaux...)
- Bien que difficilement envisageable par les acteurs du territoire, un arrêt de l'irrigation gravitaire mériterait d'être testé afin de mesurer les difficultés qu'une telle situation engendrerait pour l'accès à l'eau sur le territoire.

#### Scénarios issus de l'atelier sur la gouvernance et la régulation des usages de l'eau à l'horizon 2050

Il ressort de cet atelier que des conflits d'usages se dessinent, entre l'amont qui manque d'eau et l'aval de la Durance bénéficiant d'une ressource abondante. Ces conflits toucheraient également les différents usagers de la nappe de la Crau (eau potable, activités agricoles, industrielles et alimentation des milieux. Pour certains participants, une régulation des droits d'eau est nécessaire. Un scénario tendanciel reconnu : l'évolution des droits d'eau sur la Durance est aujourd'hui indéniable du fait de l'interdépendance des usages.

Deux axes de travail ressortent de cet atelier gouvernance pour l'élaboration des scénarios :

- Scénario à tester sur une évolution positive des droits d'eau (maintien des volumes d'eau mise en irrigation actuels voire augmentation).
- Scénario de rupture à tester sur une baisse importante des volumes d'eau destinée à l'irrigation et la nécessité de prioriser et/ou partager l'eau entre les différents usages présents sur l'axe durancien (hydroélectricité, tourisme, agriculture, besoins en eau potable...).

## REPRISES DES PROPOSITIONS DE LA CONCERTATION DANS LES SCENARIOS SINERGI

L'atelier de concertation a permis de faire ressortir un panel de conditions structurant l'évolution de la ressource en eau à l'horizon 2050. Parmi les éléments qui sont ressortis figurent : le réchauffement climatique, l'urbanisation aux abords des villes, des conditions d'irrigation gravitaire se dégradant ou se modernisant, avec une nouvelle régulation des volumes d'eau mise en irrigation et une gouvernance de l'eau capable de préserver les usages actuels ou les incitant à évoluer. Les conséquences d'un scénario extrême d'arrêt total de l'irrigation gravitaire intéressent certains acteurs.

Sur la base de ces éléments, il a été défini 7 scénarios exploratoires :

### **Scénario 1 – Etat de référence horizon 2050.**

Dans ce scénario il est considéré que la gouvernance de l'eau et les conditions économiques ont permis un maintien des conditions actuelles d'irrigation et que le territoire n'a pas évolué. Seul le changement climatique structure l'avenir de la ressource par rapport aux conditions actuelles.

### **Scénario 2 – Etalement urbain horizon 2050**

Ce scénario se place dans la situation de la continuité des tendances actuelles d'une expansion urbaine autour des villes à l'horizon 2050, représentant urbanisation d'environ 2800 ha. Ceci représente une continuité des tendances actuelles d'une extension urbaines malgré les nouvelles dispositions réglementaires favorisant la densification (Lois ALUR et suivantes) Ce développement est d'autant plus marqué sur le territoire de la Crau qu'une grande partie du territoire de la Crau est classée en réserve naturelle des Coussouls et que le résiduel de possibilité d'extension urbaine se ferait en concurrence avec l'occupation agricole, historiquement proche des villes. Cet étalement urbain conduirait ainsi à la disparition de 10% des prairies actuellement irriguées (1300 ha).

### **Scénario 3 – conversion arboriculture horizon 2050**

Ce scénario analyse l'effet d'une diversification des cultures à l'horizon 2050 se traduisant par l'implantation de 1350 ha d'arbres fruitiers au détriment des prairies irriguées. Ce développement est tout à fait envisageable dans une société d'économie libérale ou le développement de l'agriculture s'adapte aux conditions de l'offre et de la demande sur le marché local et international : stagnation ou baisse du prix de vente liées à un marché fortement concurrentiel, charge d'irrigation importante et avec une tendance à la hausse pour financer la rénovation des canaux et politique supra-territoriale de développement de certaines autres filières (amandes par exemple). Cela représente seulement -10% de prairies et +20% des surfaces en arboriculture, soit des évolutions des pratiques relativement limitées.

### **Scénario 4 – Baisse de volume irrigué conduisant à diminuer les surfaces irriguées**

Ce scénario étudie l'impact d'une régulation des surfaces de prairies et des itinéraires techniques à la suite d'une baisse importante de la disponibilité en eau agricole imposée par une nouvelle règle de partage des eaux de la Durance avec l'apparition de tension récurrente donnant lieu à des arbitrages. Une réduction générale des volumes d'eau destinée à l'irrigation de 20% se traduit ainsi par l'abandon de 10% des prairies irriguées et une réduction de 10% les volumes d'eau mise en irrigation afin de maintenir un rendement des cultures.

### **Scénario 5 – abandon d'un périmètre irrigué**

Ce scénario explore l'impact à l'horizon 2050 de l'abandon d'un périmètre irrigué, soit à la suite d'une réduction générale des volumes d'eau destinée à l'irrigation de 30% entraînant un choix collectif d'abandonner 30% des prairies irriguées par un arrêt de tout un secteur irrigué, soit à la suite de l'incapacité d'une ASA à assurer seule l'entretien et la rénovation des canaux au bénéfice de tous. L'exemple s'est porté sur l'abandon de l'irrigation gravitaire dans les périmètres des ASA Haute Crau, de Langlade et Rageyrol de Vergières. Les volumes d'eau d'irrigation sont maintenus sur les autres périmètres irrigués

### **Scénario 6 – Volume irrigué baisse de 30 %**

Ce scénario explore l'impact à l'horizon 2050 d'une réduction générale des volumes d'eau mise en irrigation de 30% appliquée de manière homogène sur l'ensemble des prairies irriguées. Les récentes études (Olios 2013) ont montré que l'augmentation de la photosynthèse liée au changement

climatique pourrait compenser la baisse rendement liée à la limitation des volumes d'eau destinée à l'irrigation. Une telle baisse des volumes mis en irrigation serait donc compatible avec le maintien des rendements actuels de la culture de foin de Crau.

### Scénario 7 – Abandon de toute culture irriguée en Crau

Ce scénario explore l'impact à l'horizon 2050 d'un abandon total de la culture de foin de Crau et de toute culture irriguée sur le territoire. Les autres occupations de sols sont conservées. La recharge baisse de 72% (recharge moyenne de 96 Mm3 contre 343 Mm3), simplement assurée par les apports pluviométriques.

Les configurations de ces différents scénarios sont reprises dans le tableau suivant.

SCENARIOS STRUCTURELS HORIZON 2050	Volumes irrigués	Usage sols
1 Référence à l'horizon 2050	100%	Actuel
2 10% des prairies disparaissent par urbanisation	100% (sur les prairies restantes)	Urbanisation de 10% des prairies aux abords des zones urbaines
3 10% des prairies sont converties en arbo	100% (sur les prairies restantes)	Conversion agricole sur 10% des prairies uniformément réparties
4 Diminution des volumes d'eau mise en irrigation de 20%	-10 % sur les prairies restantes	10% des prairies retournent en jachères (coussouls)
5 Volume irrigué baissent de 30%	100% (sur les prairies restantes)	Arrêt d'une branche du canal de Crauponne (-30% surface prairie)
6 Volume irrigué de 30% seuls les prélèvements AEP sont conservés	70 %	Actuel
7 Etat naturel non influencé	0%	Les espaces agricoles sont convertis en coussouls

Tableau 43 Description des scénarios structurels à l'horizon 2050

### 3.2.3 ANALYSE DES RESULTATS

Les résultats sont analysés dans un premier temps en comparant l'état de la ressource en 2050 et en 2010 (scénario 1), puis en mesurant l'effet des différentes évolutions du territoire (scénarios 2 à 7). L'ensemble des résultats sont présentés ci-après sous forme de fiches synthétiques.

Le détail sur l'évolution mensuelle de l'état de tension sur les indicateurs est fourni sous forme de tableaux synthétiques en annexe 10.

## SCENARIO 1 – ETAT DE REFERENCE HORIZON 2050

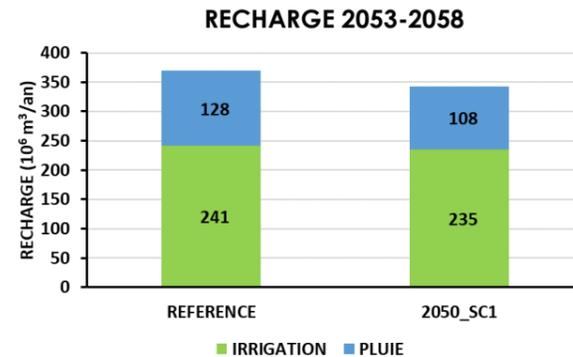
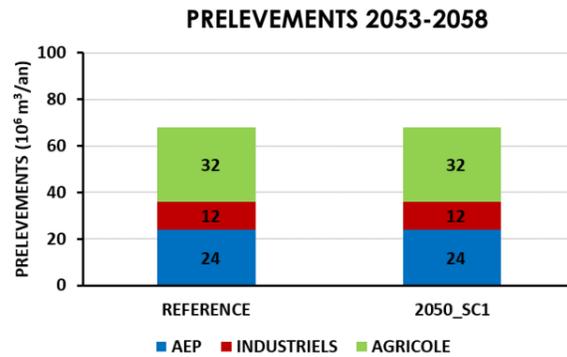
Il est simulé un contexte climatique entre 2051 et 2058 tel que défini dans le scénario médian A1B du GIEC, régionalisé avec une répartition des pluies homogène aux conditions actuelles.

### DONNEES D'ENTREE

#### SYNTHESE

Climat  
Occupation des sols  
Conditions de recharge  
Condition de prélèvements  
Condition de référence

**Scénario climatique A1B 2053-2058 (jusqu'à +4°C en été)**  
Observation 2016  
Volume irrigué pour l'irrigation 100%  
Prélèvements agricoles estimés 2013-2058  
**REFERENCE 2013-2018**



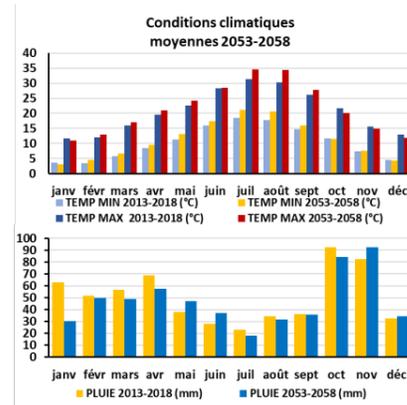
#### BILAN HYDROLOGIQUE

Comparaison du bilan hydrologique (en Mm<sup>3</sup>/an) entrant dans le système entre la période 2013-2018 et la période 2053-2058

	2013-2018	2053-2058	Différence
irrigation	321.7	329.3	+7.6
pluie	430.0	402.0	-28.1
pluie piégée dans le sol	350.6	327.8	-22.9
ruissellement	79.4	74.2	-5.2
recharge totale	369.3	343.0	-26.3
recharge naturelle	127.9	107.6	-20.3
recharge liée à l'irrigation	241.4	235.5	-5.9
export souterrain	1.8	1.5	-0.3
évapotranspiration	301.2	312.5	+11.3

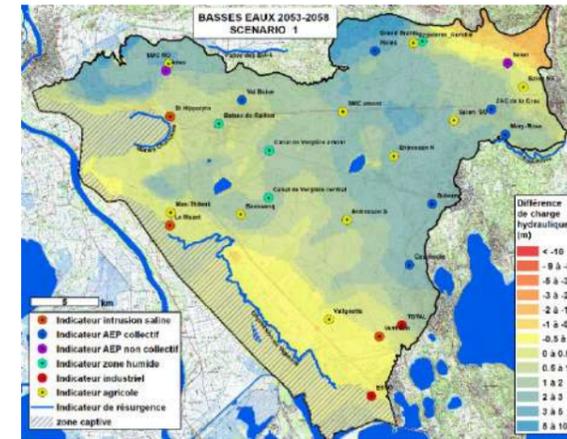
#### CONDITIONS CLIMATIQUES

2053-2058 vs 2013-2018

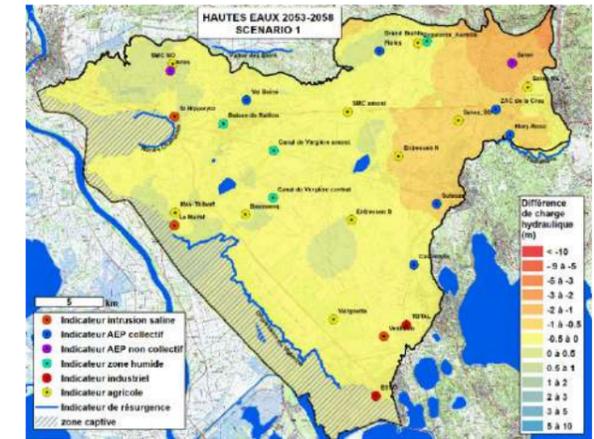


### RESULTATS

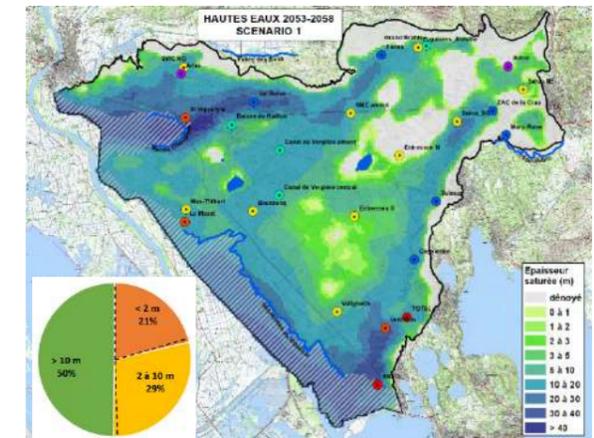
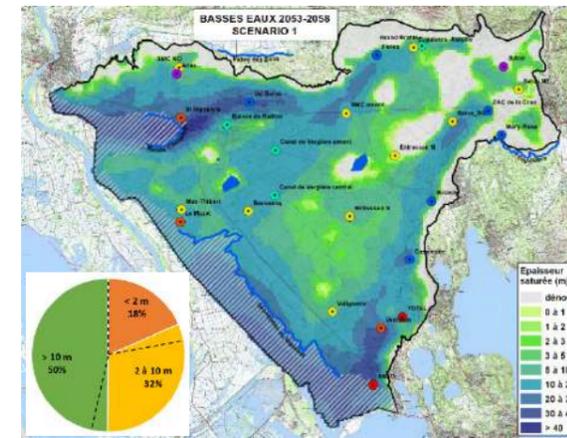
#### BASSES EAUX MOYENNES - février 2055



#### HAUTES EAUX MOYENNES - septembre 2058

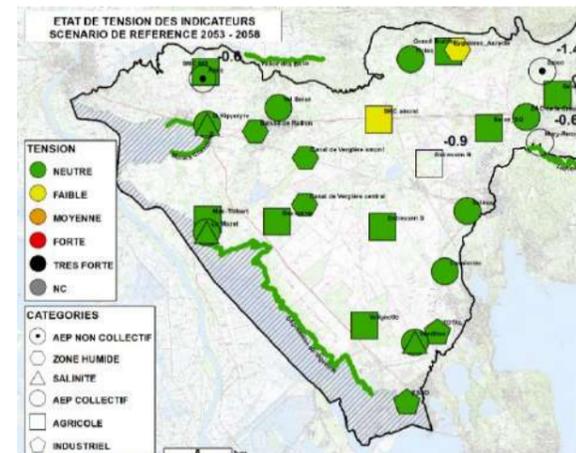


Différence de charge hydraulique par rapport à la simulation de référence (février 2016 / septembre 2018)

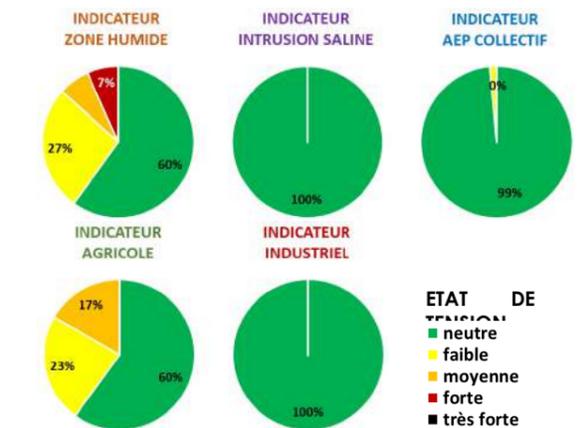


Répartition spatiale et statistique de l'épaisseur de zone saturée dans les cailloutis en basses et hautes eaux

#### INDICATEURS



Répartition spatiale de la tension sur les indicateurs



Répartition statistique de la tension sur chaque catégorie d'indicateurs

**ANAYSE :** Les conditions climatiques à l'horizon 2050 indiquent une augmentation moyenne des températures par rapport à la période 2013-2018 d'environ 1°C (tableau), avec des disparités saisonnières marquées : augmentation des températures estivales d'environ 4°C et baisse des températures en automne – hiver de l'ordre de 1°C. La pluviométrie sera sensiblement plus faible passant de 607 mm/an à 567 mm/an.

Le bilan hydrologique montre une augmentation sensible de l'irrigation et des précipitations plus faibles en 2050. Les conditions climatiques en 2050 augmentent l'évapotranspiration et la recharge totale baisse d'environ 26 millions de m<sup>3</sup>/an.

Les chroniques piézométriques indiquent que les charges hydrauliques à l'horizon 2010 et 2050 sont proches, avec des niveaux sensiblement plus bas en 2050. Les catégories d'indicateurs « zones humides » et « agricoles » sont également dégradés, basculant en état de tension « faible » en 2057, après deux années 2056 et 2057 particulièrement sèches (pluviométrie annuelle de respectivement 359 et 404 mm). Dans le secteur de Salon, concerné par de l'habitat isolé, l'AEP privé bascule en tension moyenne (-1.4 m).

En considérant une occupation des sols, des conditions d'irrigation et des prélèvements inchangées par rapport à l'actuel, l'état de la nappe à l'horizon 2050 serait ainsi relativement proche de l'état prévalents à l'horizon 2010. Des années particulièrement sèches peuvent mettre les usages agricoles et la fonction d'alimentation des milieux sous tension « faible ». L'AEP privée dans le secteur de Salon présente un état de tension moyenne.

## SCENARIO 2 – ETALEMENT URBAIN HORIZON 2050

Ce scénario explore l'impact à l'horizon 2050 d'un étalement urbain sur 2800 ha, conduisant à la disparition de 10% des prairies (1300 ha). Le déficit de recharge en 2016 se creuse (320 Mm<sup>3</sup> contre 343 Mm<sup>3</sup>) avec la baisse des surfaces irriguées.

### DONNEES D'ENTREE

#### SYNTHESE

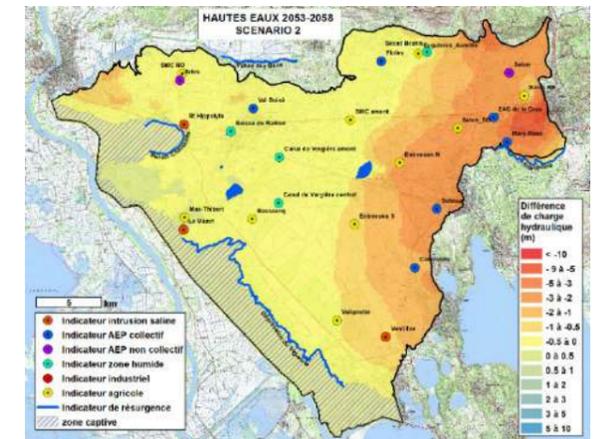
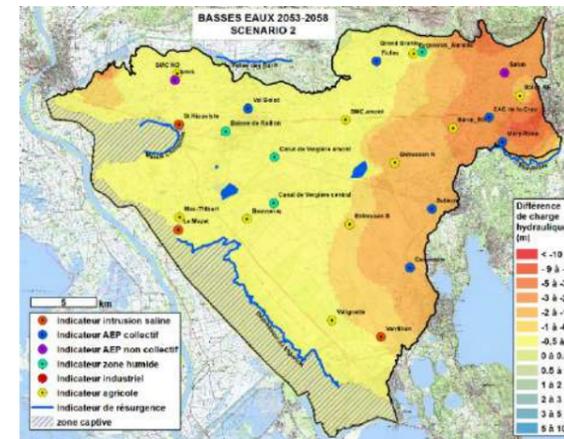
Climat  
Occupation des sols  
Conditions de recharge  
Condition de prélèvements  
Condition de référence

**Scénario climatique A1B 2053-2058**  
**Urbanisation autour des villes (+2800 ha) conduisant à une disparition de 10% des prairies irriguées**  
Volume irrigué pour l'irrigation 100%  
Prélèvements agricoles estimés 2013-2058  
Etat de référence à l'horizon 2050 (scénario 1 2053-2058)

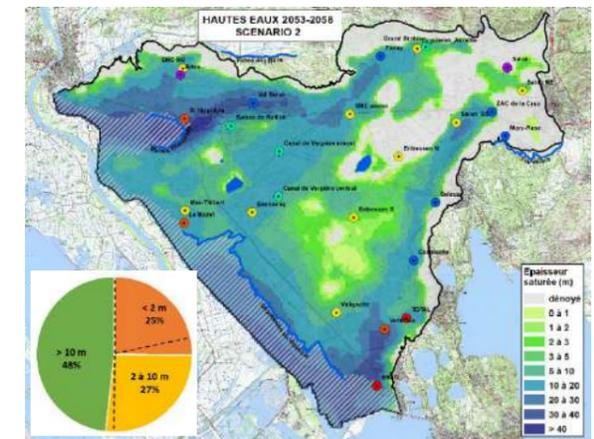
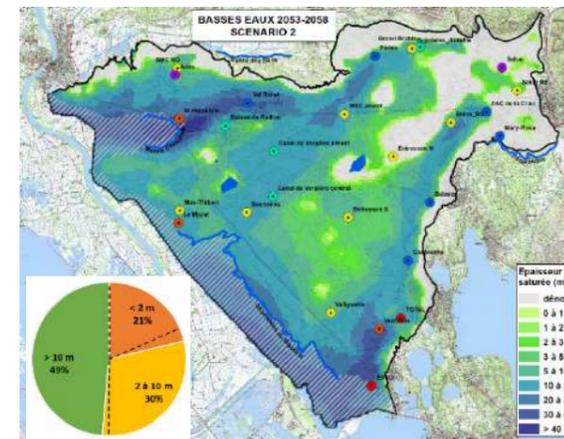
### RESULTATS

#### BASSES EAUX MOYENNES - février 2055

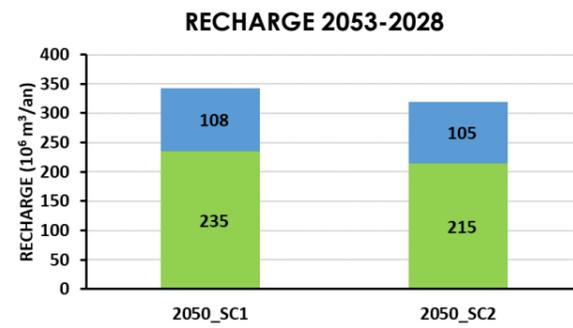
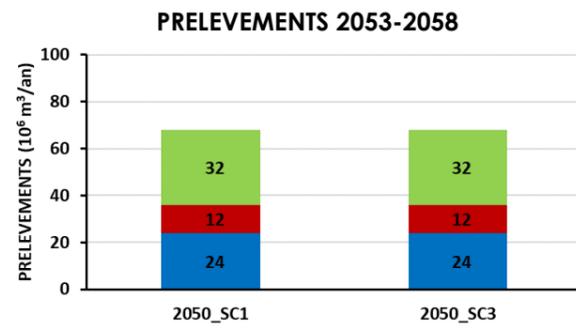
#### HAUTES EAUX MOYENNES - septembre 2058



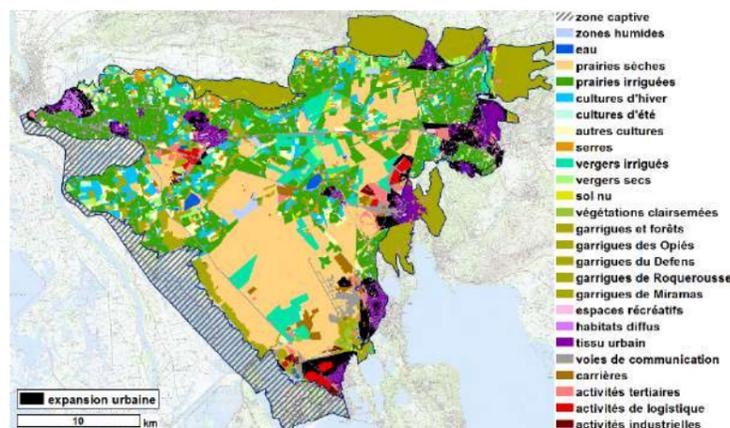
Différence de charge hydraulique par rapport à la simulation de référence (scénario 1 2053 -2058)



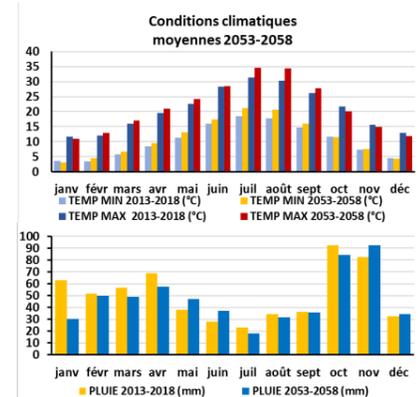
Répartition spatiale et statistique de l'épaisseur de zone saturée dans les cailloutis en basses et hautes eaux



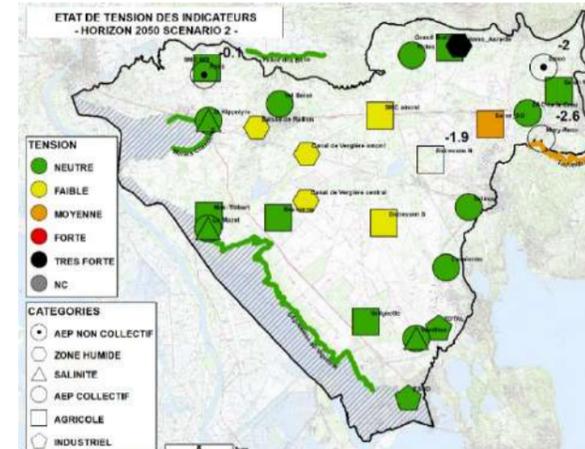
#### OCCUPATION DES SOLS 2053-2058



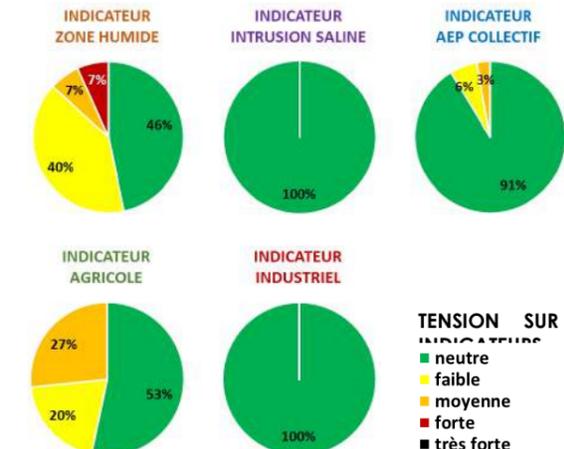
#### CONDITIONS CLIMATIQUES 2053-2058 vs 2013-2018



#### INDICATEURS



Répartition spatiale de la tension sur les indicateurs



Répartition statistique de la tension sur chaque catégorie d'indicateur

**ANALYSE :** Le déficit de recharge moyenne se creuse (320 Mm<sup>3</sup> contre 343 Mm<sup>3</sup> entre 2053 et 2058) avec la baisse des surfaces irriguées. La piézométrie est en baisse sur l'ensemble de la nappe (-0.5 m), de manière plus marquée dans le sillon de Miramas (-2 m) et en particulier dans le secteur de Salon de Provence (-4 m), que ce soit en période de basses eaux, qu'en période de hautes eaux.

En période de basses eaux, 21% (+3%) de l'emprise de la nappe présente des épaisseurs de l'horizon saturé inférieur à 2 m, tandis que cette surface représente à 25% (+4%) en période de hautes eaux.

Des tensions « faibles » apparaissent pour l'ensemble des indicateurs piézométriques « zones humides » et également sur l'indicateur de flux « Dépression du Vigueirat » pour l'année 2057. L'indicateur « Touloubre » sous état de tension « faible » permanente est en tension « moyenne ». L'indicateur zone humide « Grand Brahis » bascule en tension forte en 2057. Près de la moitié des indicateurs « agricoles » présente des états de tension « faible » au cours des années les plus sèches (2053, 2056 et 2057), classant cette catégorie en état de tension « moyenne ». Les indicateurs « AEP collectif » sont légèrement dégradés, avec des tensions « faibles » apparaissant en 2057 pour les captages de « Sulauze » et de « Caspienne ». L'AEP privée dans le secteur de Salon est en état de tension forte (-2 m).

**Le scénario 2 montre que l'étalement urbain a un impact pouvant être qualifié de globalement « moyen » sur les usages et les fonctions écologique de la ressource.**

## SCENARIO 3 – DIVERSIFICATION DES CULTURES HORIZON 2050

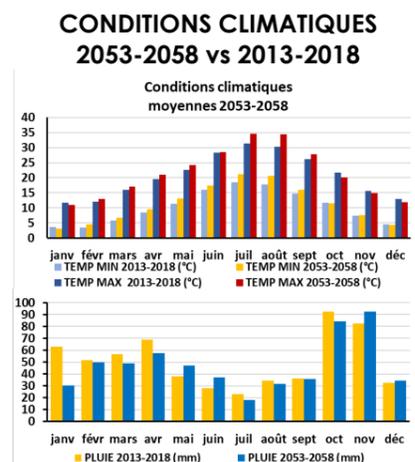
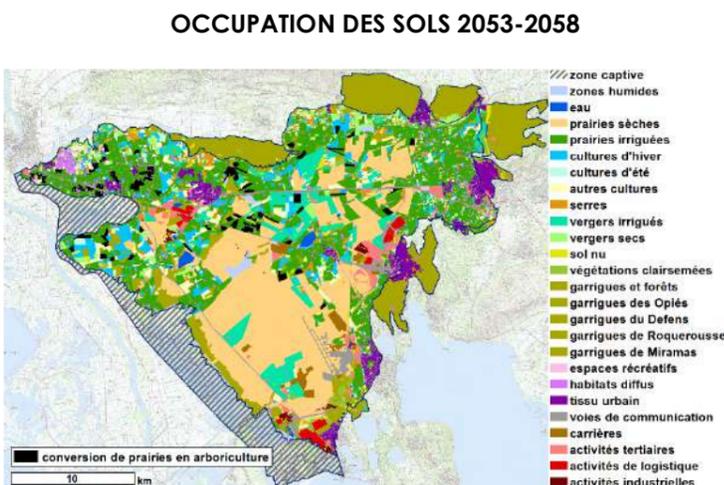
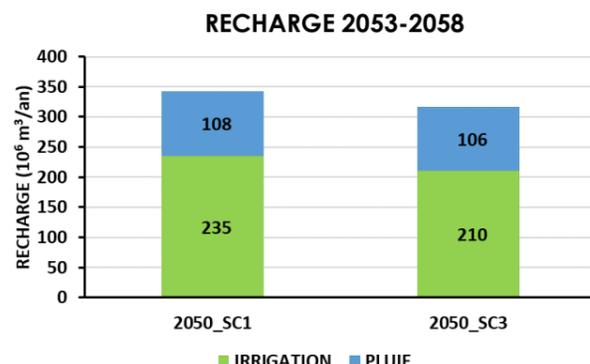
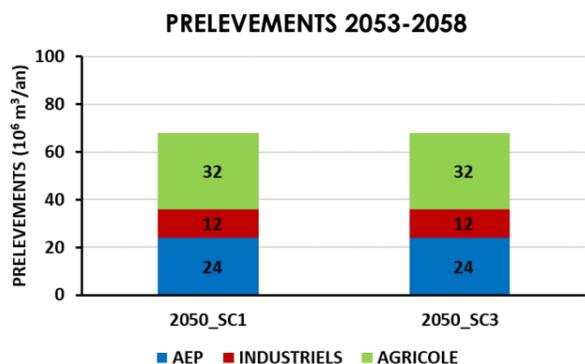
Ce scénario explore l'impact à l'horizon 2050 d'une conversion à l'arboriculture d'environ 10% des prairies irriguées (1350 ha). La répartition de cette conversion est assez uniforme sur le territoire.

### DONNEES D'ENTREE

#### SYNTHESE

Climat  
Occupation des sols  
Conditions de recharge  
Condition de prélèvements  
Condition de référence

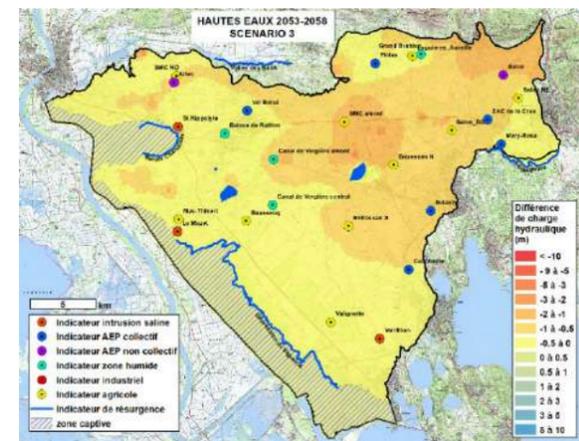
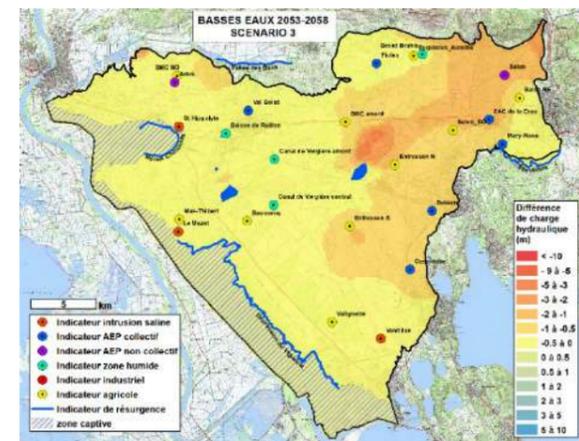
**Scénario climatique A1B 2053-2058**  
**10% des prairies sont converties en arboriculture (1350 ha)**  
Volume irrigué pour l'irrigation 100%  
Prélèvements agricoles estimés 2013-2058  
Référence 2053-2058 (scénario 1)



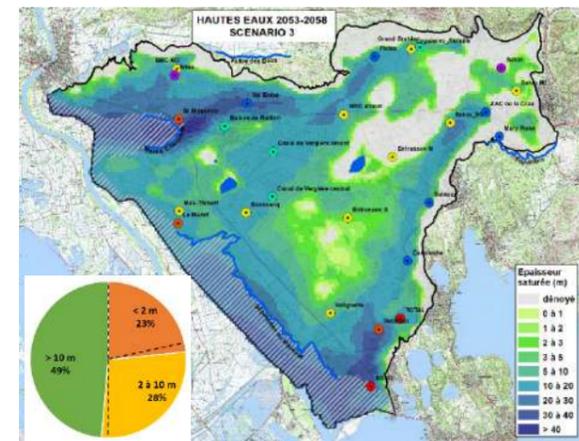
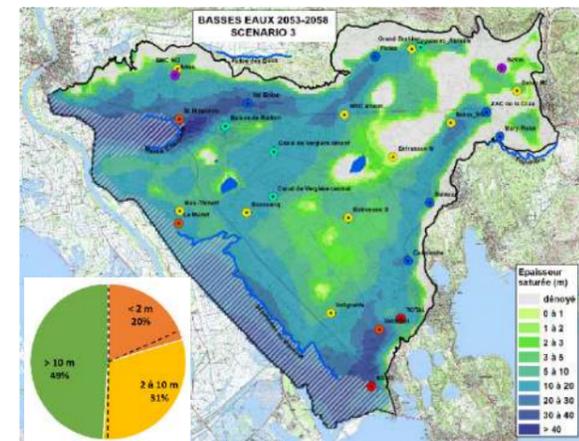
### RESULTATS

#### BASSES EAUX MOYENNES - février 2055

#### HAUTES EAUX MOYENNES - septembre 2058

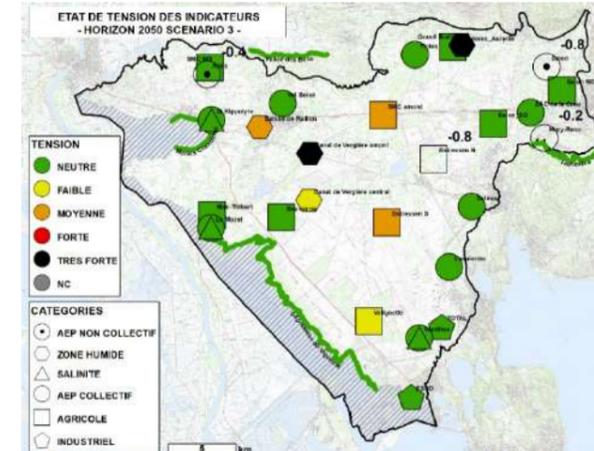


Différence de charge hydraulique par rapport à la simulation de référence (Scénario 1 2053 -2058)

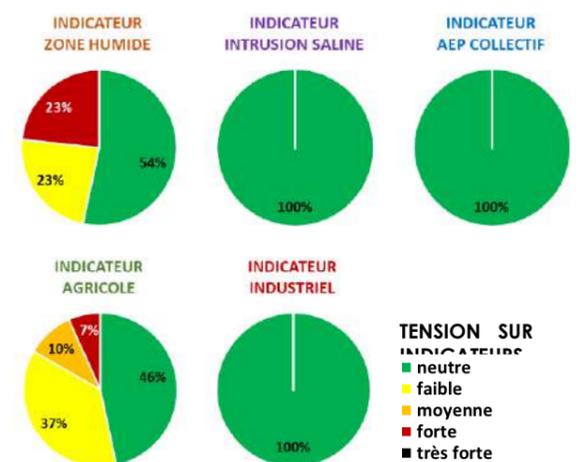


Répartition spatiale et statistique de l'épaisseur de zone saturée dans les cailloutis en basses et hautes eaux

#### INDICATEURS



Répartition spatiale de la tension sur les indicateur



Répartition statistique de la tension sur chaque catégorie d'indicateur

**ANALYSE :** Le déficit de recharge moyenne se creuse (316 Mm<sup>3</sup> contre 343 Mm<sup>3</sup> entre 2053 et 2058) avec la baisse des surfaces irriguées par submersion. La piézométrie est en baisse sur l'ensemble de la nappe (-0.5 m), de manière plus marquée dans le secteur nord-est (-1m) et en particulier au nord de l'étang d'Entressen et dans le secteur de Lamanon-Eyguières (-2 m), que ce soit en période de basses eaux, qu'en période de hautes eaux. En période de basses eaux, 20% (+2%) de l'emprise de la nappe présente des épaisseurs de l'horizon saturé inférieur à 2 m, tandis que cette surface représente à 23% (+2%) en période de hautes eaux.

Les seuils de tension « faible » à forte sont dépassés pour l'ensemble des indicateurs zones humides, en particulier les indicateurs « Vergière amont » et « Grand Brahis », soumis à une tension « très forte », notamment durant l'année 2057. Des tensions « faibles » touchent une moitié des indicateurs « agricoles », en particulier St Martin amont et Entressen sud classés en tension forte durant l'été 2057, ainsi que l'AEP privée du secteur de Salon (-0.8 m). Les autres indicateurs sont en état de tension « neutre ».

**Le scénario 3 montre que la conversion à l'arboriculture a un impact significatif sur la ressource, pouvant être qualifié de « moyen » sur les usages agricoles et à forte sur certains indicateurs « zones humides ». En comparaison avec les résultats du scénario 2, les impacts piézométriques sont plus diffus mais ont des conséquences un peu plus importantes sur les indicateurs « zones humides » et « agricoles » localisés en dehors des secteurs urbains.**

## SCENARIO 4 – BAISSSE DES VOLUMES D'EAU DESTINEE A L'IRRIGATION CONDUISANT A ABANDONNER DES PRAIRIES

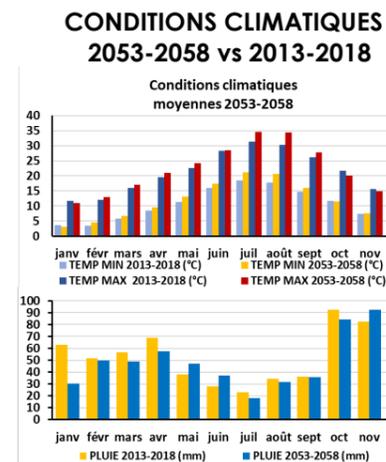
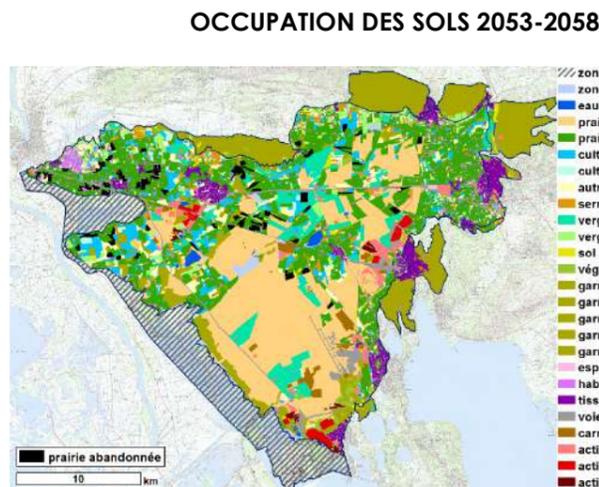
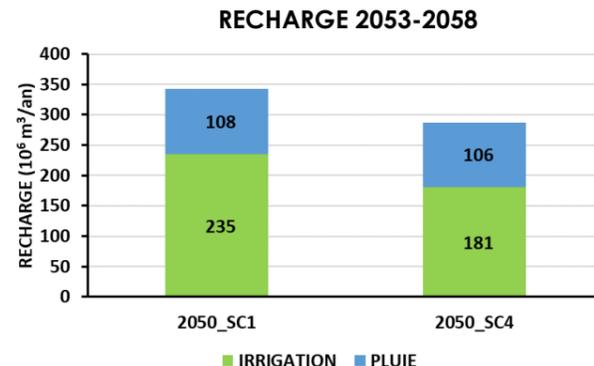
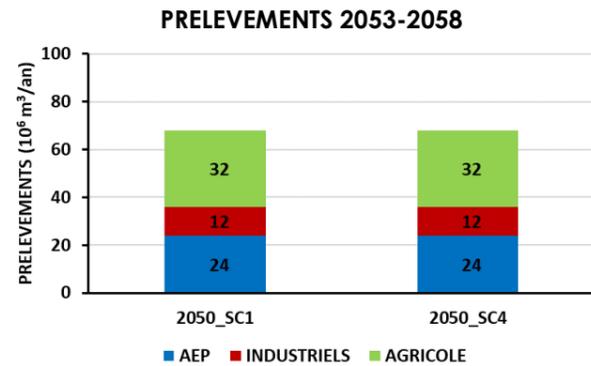
Ce scénario explore l'impact à l'horizon 2050 d'une réduction générale des volumes d'eau mise en irrigation de 20%, conduisant à abandonner 10% des prairies irriguées et réduire de seulement 10% les volumes d'eau destinée à l'irrigation afin de maintenir un rendement des cultures. La répartition de cette conversion est assez uniforme sur le territoire.

### DONNEES D'ENTREE

#### SYNTHESE

Climat  
Occupation des sols  
Conditions de recharge  
Condition de prélèvements  
Condition de référence

**Scénario climatique A1B 2053-2058**  
**10% des prairies sont mises en jachère (coussouls)**  
**Volume irrigué pour l'irrigation 90%**  
Prélèvements agricoles estimés 2013-2058  
Référence 2053-2058 (scénario 1)

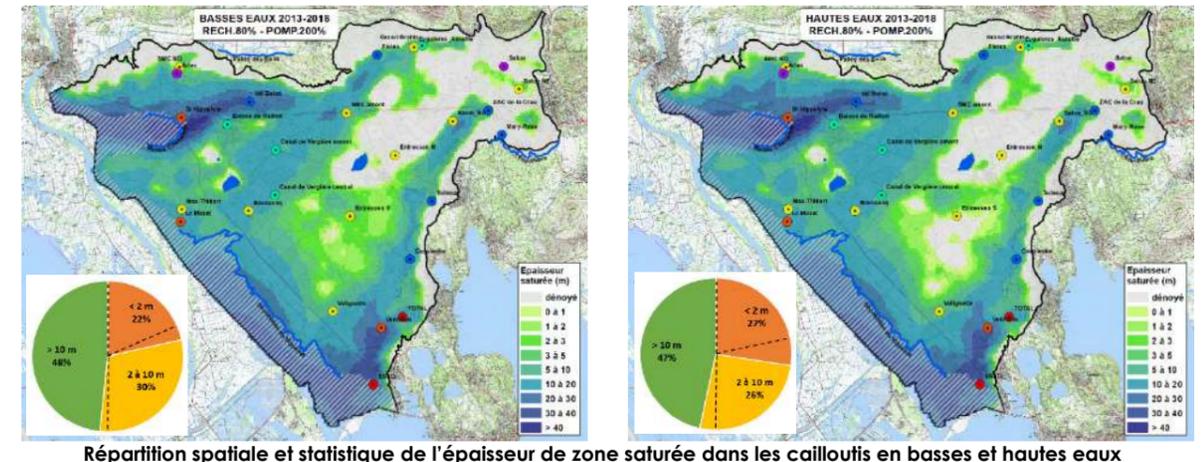
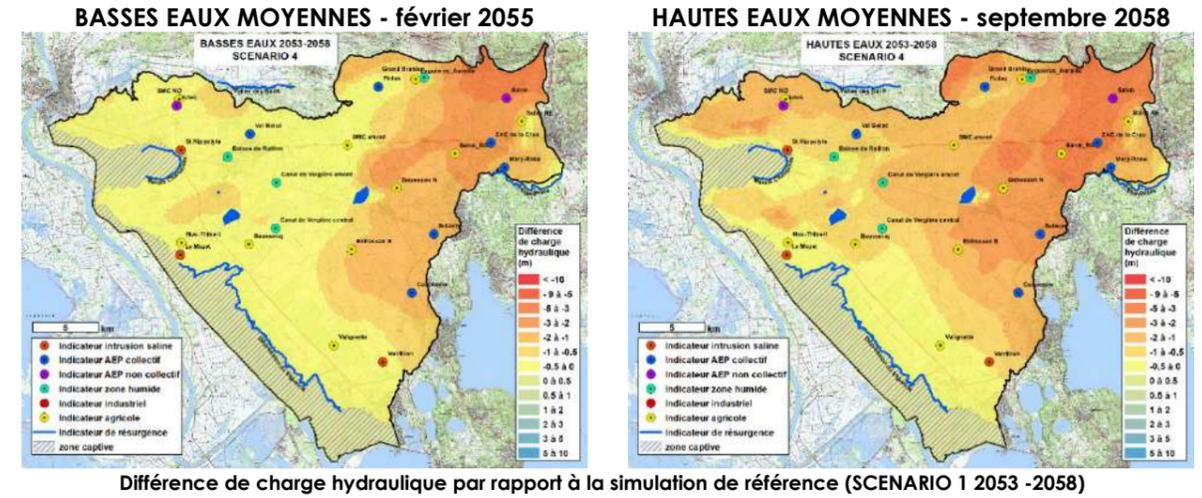


**ANALYSE :** Le déficit de recharge moyenne se creuse (287 Mm<sup>3</sup> contre 343 Mm<sup>3</sup> entre 2053 et 2058) avec la baisse des surfaces irriguées par submersion et la baisse des volumes d'eau mise en irrigation de 10% sur les prairies restantes. La piézométrie est en baisse sur l'ensemble de la nappe : -0.5 m à l'ouest atteignant -3 m à l'est en situation de basses-eaux et une baisse d'au moins 1 m sur les 2/3 du territoire en situation de hautes eaux dépassant 3 m au nord de Miramas. En période de basses eaux, 22% (+4%) de l'emprise de la nappe présente des épaisseurs de l'horizon saturé inférieures à 2 m, tandis que cette surface représente à 27% (+6%) en période de hautes eaux.

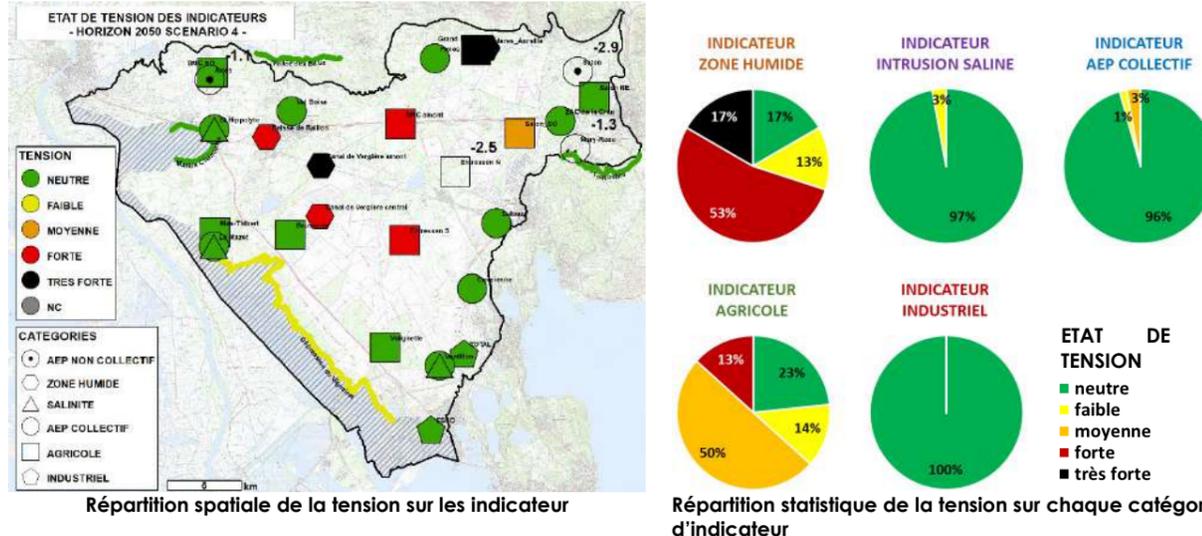
Les indicateurs piézométriques « zones humides » sont en état de tension « forte » à « très forte » et les indicateurs de flux « Dépression du Vigueirat » et « Touloubre » se situent également dans un état de tension faible chronique pour l'année 2057. Des remontées salines commencent à apparaître ponctuellement au mur des cailloutis au niveau du captage du Mazet. Les indicateurs AEP collectif « Sulauze » et « Caspienne » présente également très ponctuellement des états de tension « faible ». La majorité des indicateurs agricoles sont soumis à des tensions faible à forte sur la majorité des années, en particulier « Aureille », « Entressen sud » et St Martin amont ». L'AEP privée présente un état de tension moyenne (-1.1 m dans le secteur d'Arles) à forte (-2.9 m dans le secteur de secteur Salon)

**Le scénario 4 montre qu'une baisse des volumes d'eau destinée à l'irrigation de 20%, gérée par une réduction des surfaces et une diminution des volumes alloués à l'irrigation, a une incidence forte sur l'état de la ressource. Ce sont surtout les zones humides, les prélèvements agricoles et l'AEP privée qui seraient soumis à une tension persistante pouvant être qualifiée de forte à très forte. Les autres indicateurs commencent à être dégradé à l'exception des indicateurs « industriels ».**

### RESULTATS



#### INDICATEURS



## SCENARIO 5 – ABANDON D'UN PERIMETRE IRRIGUE

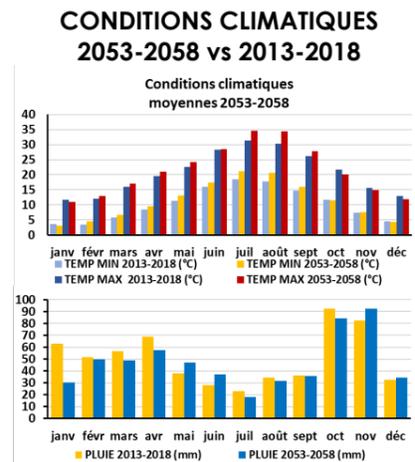
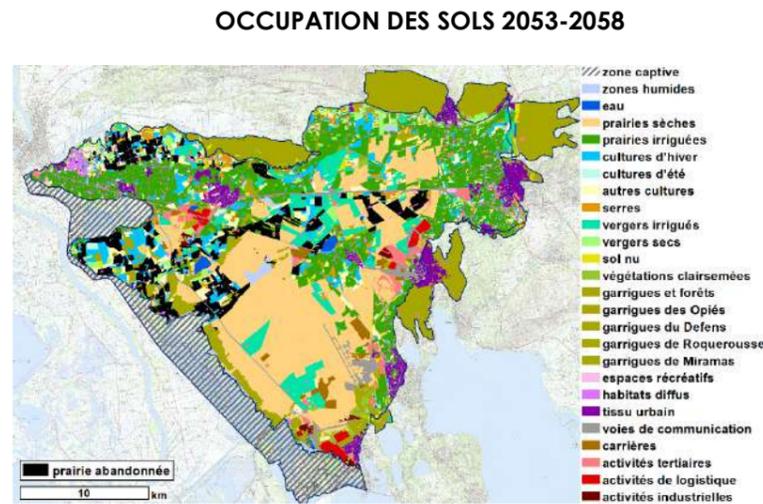
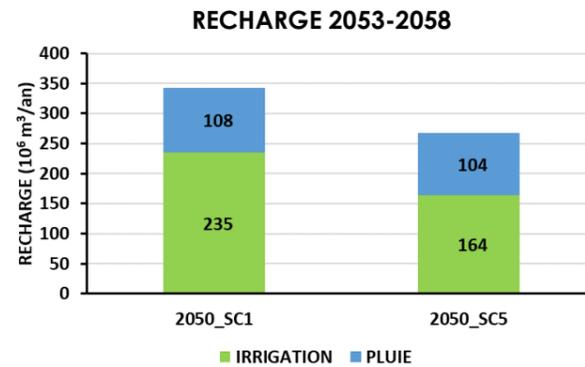
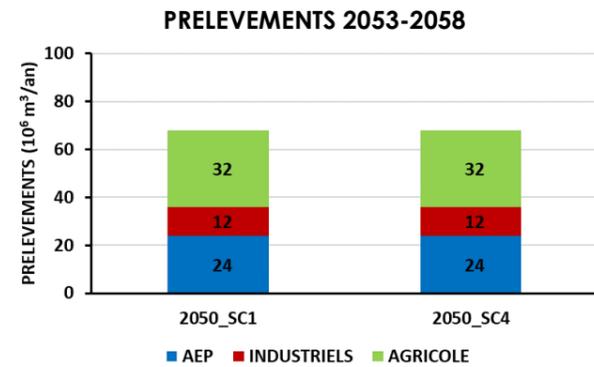
Ce scénario explore l'impact à l'horizon 2050 d'une réduction générale des volumes d'eau mise en irrigation de 30%, conduisant à abandonner 30% des prairies irriguées par un arrêt de l'irrigation gravitaire dans les périmètres des ASA Haute Crau, de Langlade et Rageyrol de Vergières. Les volumes d'irrigation sont conservés sur les surfaces de prairies restantes.

### DONNEES D'ENTREE

#### SYNTHESE

Climat  
Occupation des sols  
Conditions de recharge  
Condition de prélèvements  
Condition de référence

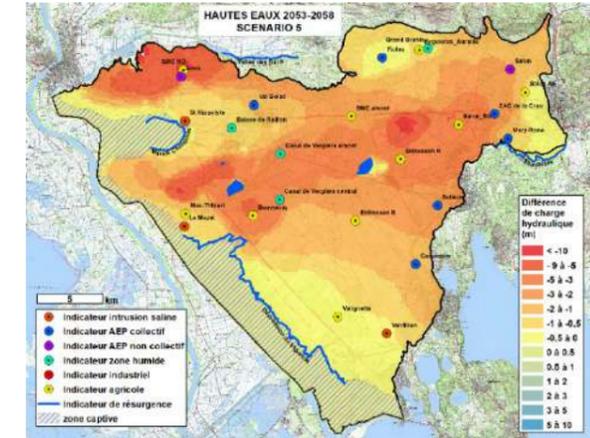
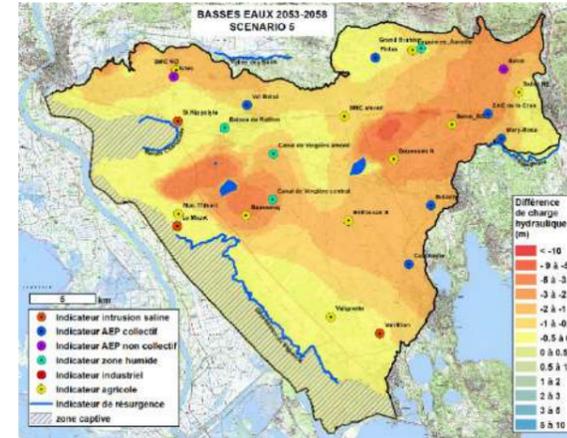
**Scénario climatique A1B 2053-2058**  
**L'irrigation est abandonnée dans les périmètres de l'ASA Haute Crau, de Langlade et Rageyrol de Vergières (-30% de prairies)**  
**Volume irrigué pour l'irrigation 100% sur les prairies restantes**  
Prélèvements agricoles estimés 2013-2058  
Référence 2053-2058 (scénario 1)



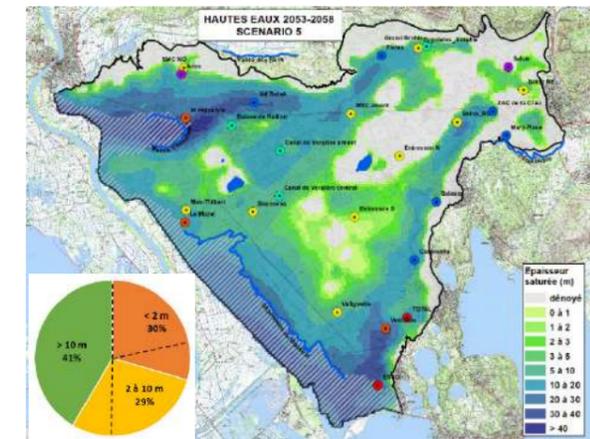
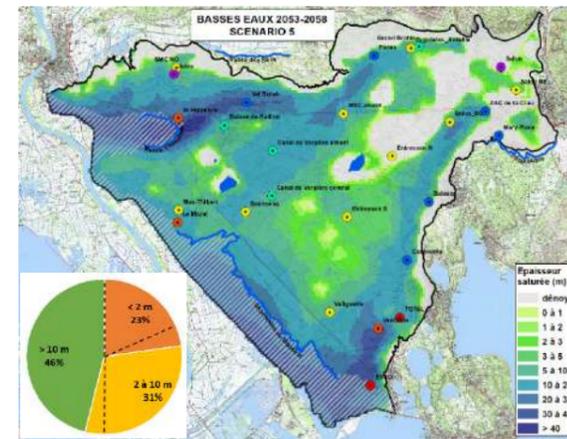
### RESULTATS

#### BASSES EAUX MOYENNES - février 2055

#### HAUTES EAUX MOYENNES - septembre 2058

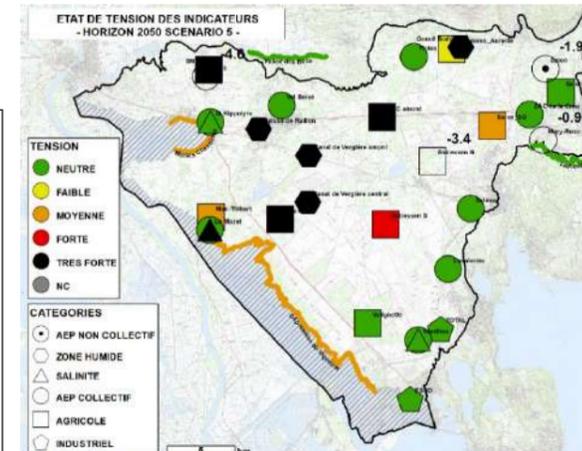


Différence de charge hydraulique par rapport à la simulation de référence (SCENARIO 1 2053 -2058)

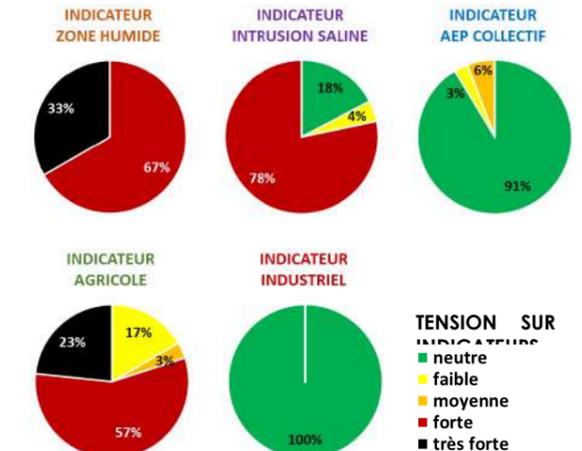


Répartition spatiale et statistique de l'épaisseur de zone saturée dans les cailloutis en basses et hautes eaux

#### INDICATEURS



Répartition spatiale de la tension sur les indicateur



Répartition statistique de la tension sur chaque catégorie d'indicateur

**ANALYSE** Le déficit de recharge moyenne se creuse (268 Mm<sup>3</sup> contre 343 Mm<sup>3</sup> entre 2053 et 2058) avec la diminution des surfaces irriguées. La piézométrie est en baisse sur l'ensemble de la nappe : -0.5 m à l'ouest atteignant -3 m dans les secteurs des ASA abandonnées. Très localement une baisse de 5 à 10 m est constatée en période de hautes-eaux par rapport à l'état de référence. En période de basses eaux, 23% (+5%) de l'emprise de la nappe présente des épaisseurs de l'horizon saturé inférieures à 2 m, tandis que cette surface représente à 30% (+9%) en période de hautes eaux.

L'ensemble des indicateurs piézométriques « zones humides » sont soumis à une tension très forte tandis qu'une moitié des indicateurs de flux « zones humides » se classent en situation de tension moyenne. La salinité atteint la base des crépines du captage du Mazet, soumis à une tension « très forte ». Des tensions « faibles » ponctuels se présentent pour les indicateurs « AEP collectif » de « Sulauze » et de « Caspienne ». L'ensemble des indicateurs « agricoles » sont soumis à une tension faible à forte, à l'exception de l'indicateur « Salon nord-est ». Les indicateurs « industriels » ne sont pas sous tension. Dans le secteur d'Arles, l'AEP privée se classe en tension très forte (-4.6 m).

**Le scénario 5 montre que l'abandon d'une partie significative de prairies aurait des conséquences très importantes sur les usages et fonctions écologiques rendus par la nappe. Ce sont surtout les zones humides, les prélèvements agricoles et l'AEP privée dans le secteur d'Arles, qui seraient soumis à une tension persistante pouvant être qualifiée de « très forte ». Le captage du Mazet rencontrerait des remontées salines et certains captages AEP rencontreraient des tensions « faibles » sur le plan quantitatif.**

## SCENARIO 6 – VOLUMES IRRIGUÉS EN BAISSSE DE 30%

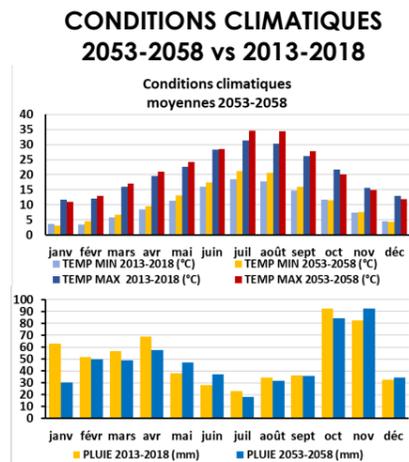
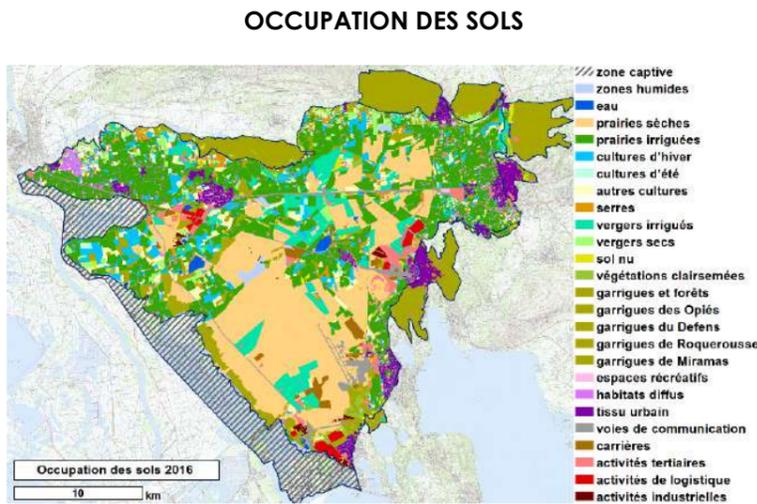
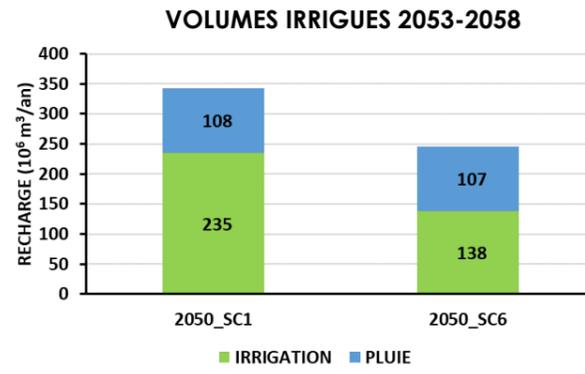
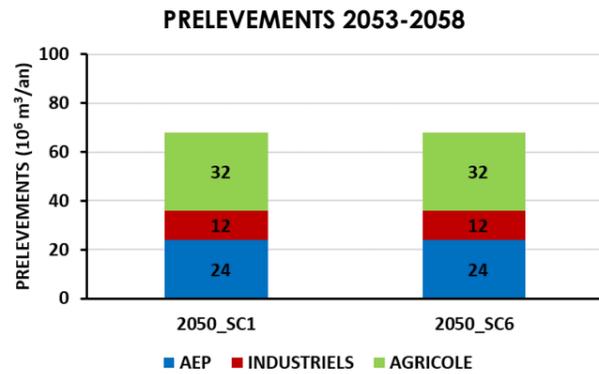
Ce scénario explore l'impact à l'horizon 2050 d'une réduction générale des volumes d'eau destinée à l'irrigation de 30% appliquée de manière homogène sur l'ensemble des prairies irriguées. Les récentes études ont montré que l'augmentation de la photosynthèse liée au changement climatique pourrait compenser la baisse rendement due à la limitation des volumes d'eau mise en irrigation.

### DONNEES D'ENTREE

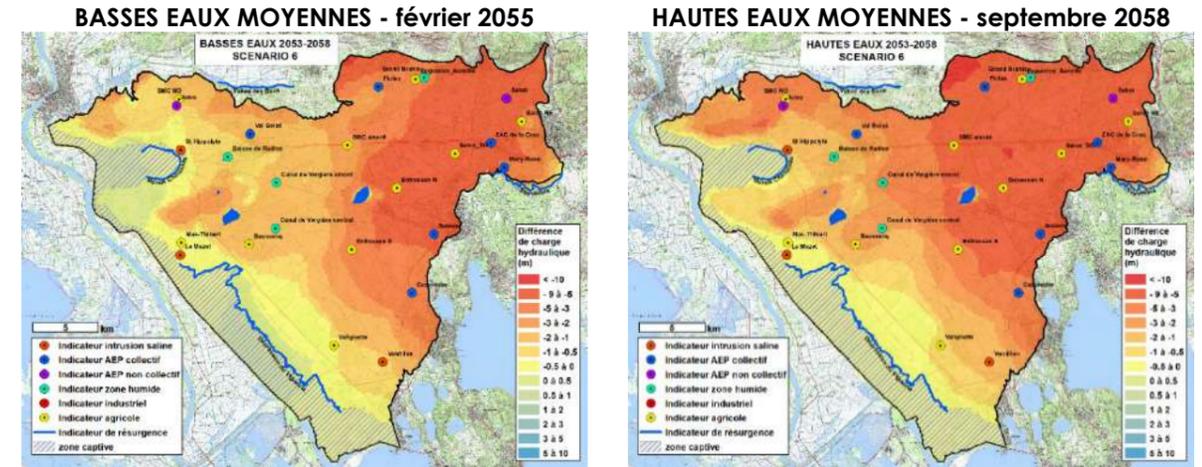
#### SYNTHESE

Climat  
Occupation des sols  
Conditions de recharge  
Condition de prélèvements  
Condition de référence

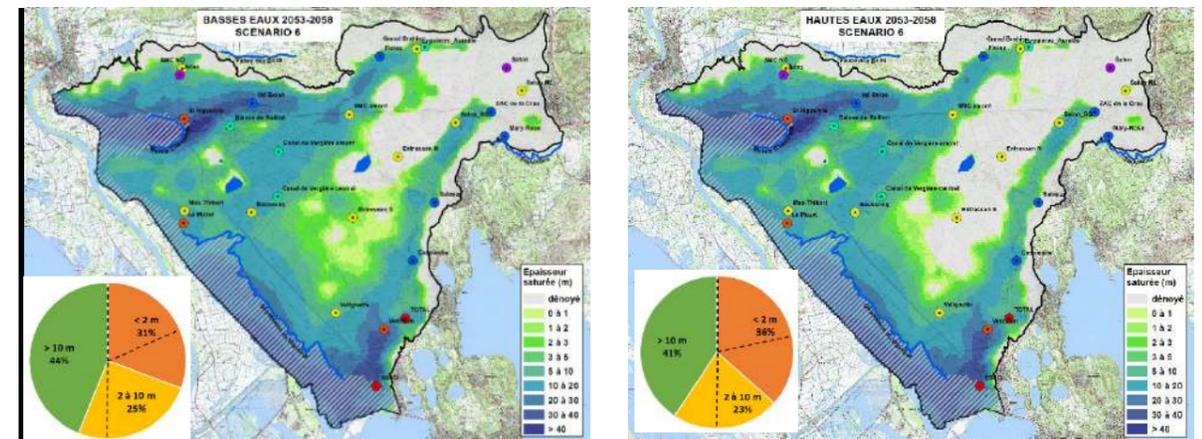
**Scénario climatique A1B 2053-2058**  
Occupation des sols 2016  
**Volume irrigué pour l'irrigation 70%**  
Prélèvements agricoles estimés 2013-2058  
REFERENCE 2053-2058



### RESULTATS

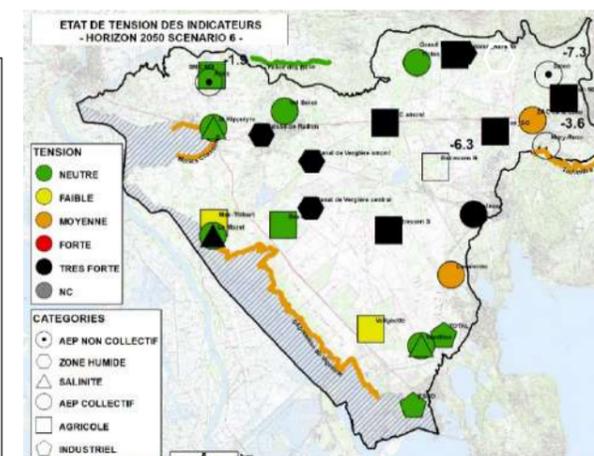


Différence de charge hydraulique par rapport à la simulation de référence (SCENARIO 1 2053 -2058)

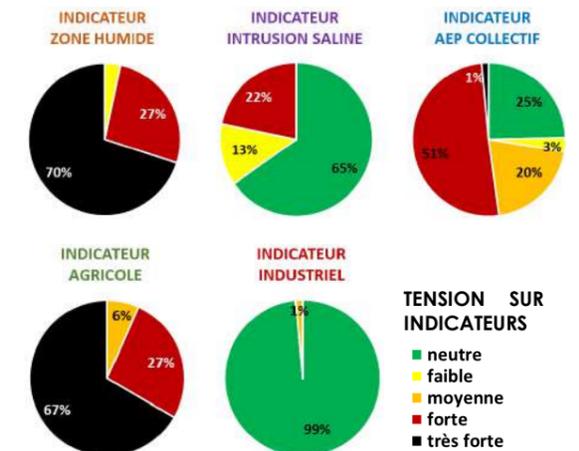


Répartition spatiale et statistique de l'épaisseur de zone saturée dans les cailloutis en basses et hautes eaux

### INDICATEURS



Répartition spatiale de la tension sur les indicateur



Répartition statistique de la tension sur chaque catégorie d'indicateur

**ANALYSE :** Le déficit de recharge moyenne se creuse (245 Mm<sup>3</sup> contre 343 Mm<sup>3</sup> entre 2053 et 2058) avec la limitation des volumes d'eau mise en irrigation. La piézométrie est en baisse sur l'ensemble de la nappe : -0.5 m à -5 m d'est en ouest que ce soit en position à l'ouest atteignant -3 m dans les secteurs des ASA abandonnées. Très localement une baisse de 5 à 10 m est constatée en période de hautes-eaux par rapport à l'état de référence. En période de basses eaux, 31% (+13%) de l'emprise de la nappe présente des épaisseurs de l'horizon saturé inférieures à 2 m, tandis que cette surface représente à 36% (+15%) en période de hautes eaux.

L'ensemble des indicateurs piézométriques « zones humides » sont soumis à une tension « très forte » tandis qu'une moitié des indicateurs de flux « zones humides » se classent en situation de tension « moyenne ». L'AEP privée est en état de tension moyenne dans le secteur d'Arles (-1.9 m) et très forte dans le secteur de Salon (-7.3 m). La salinité atteint la base des crêpines du captage du Mazet, soumis à une tension « très forte ». Des tensions « faibles » à « forte » persistantes se présentent pour les indicateurs « AEP collectif » « ZAC de la Crau », « Sulauze » et « Caspienne ». Le captage « Les Fioles » est ponctuellement sous tension « faible ». L'ensemble des indicateurs « agricoles » sont soumis à une tension faible à forte, à l'exception de l'indicateur « Baussenq » et St Martin nord-ouest ». Une tension faible apparaît sporadiquement pour l'indicateur « industriel » « Total ».

Le scénario 6 montre que la baisse de volume irrigué de 30% aurait des conséquences très importantes sur les usages et fonctions écologiques rendus par la nappe. Ce sont surtout les zones humides et les prélèvements agricoles qui seraient soumis à une tension persistante pouvant être qualifiée de « très forte ». Le captage du Mazet rencontrerait des remontées salines et certains captages AEP rencontreraient des tensions « faibles » à « fortes » sur le plan quantitatif.

## SCENARIO 7 – ABANDON DE LA CULTURE DE FOIN - RETOUR A L'ETAT NATUREL

Ce scénario explore l'impact à l'horizon 2050 d'un abandon total de la culture de foin de Crau et de toute culture irriguée sur le territoire. Les autres occupations de sols sont conservées.

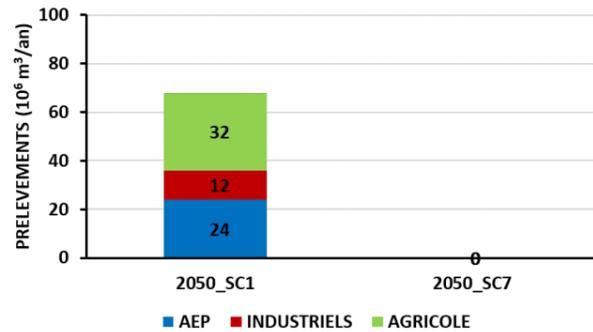
### DONNEES D'ENTREE

#### SYNTHESE

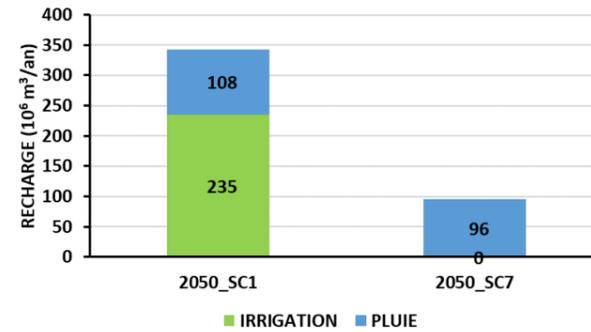
Climat  
Occupation des sols  
Conditions de recharge  
Condition de prélèvements  
Condition de référence

Scénario climatique A1B 2053-2058  
Abandon de toute culture agricole  
Volume irrigué pour l'irrigation 0%  
Aucun prélèvements  
Référence 2053-2058 (scénario 1)

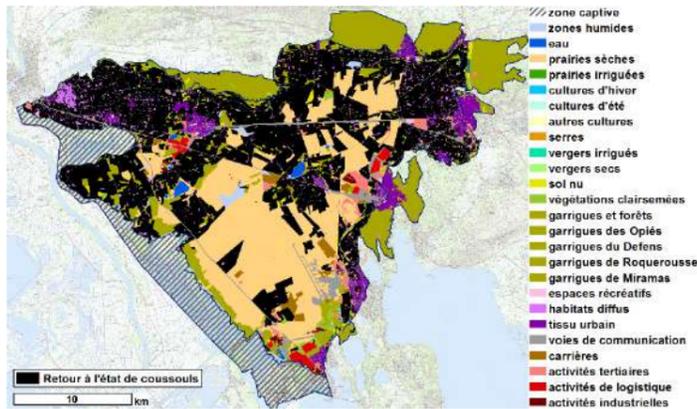
#### PRELEVEMENTS 2053-2058



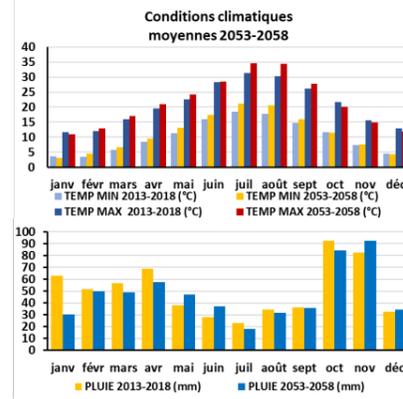
#### RECHARGE 2053-2058



#### OCCUPATION DES SOLS 2053-2058

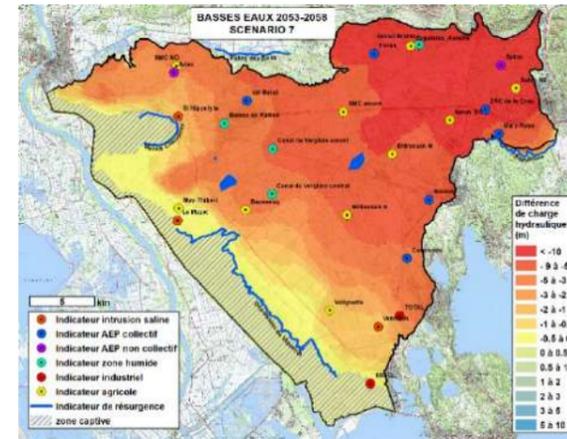


#### CONDITIONS CLIMATIQUES 2053-2058 vs 2013-2018

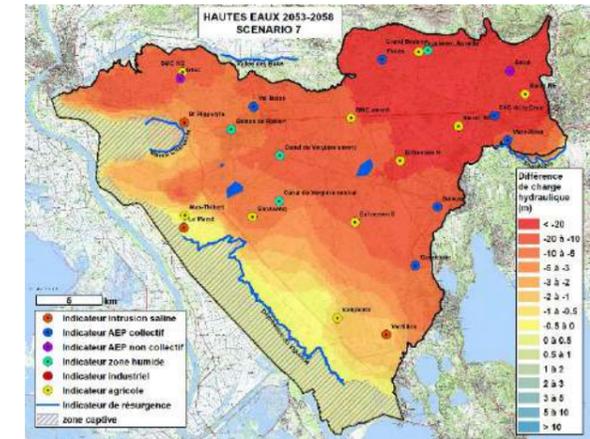


### RESULTATS

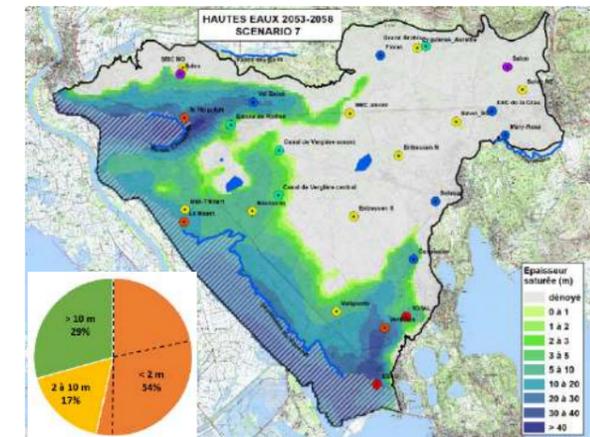
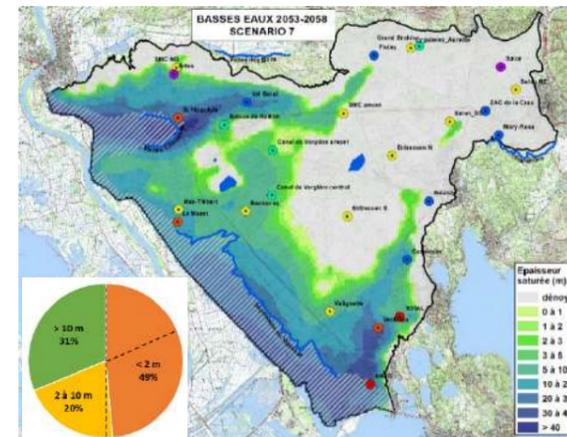
#### BASSES EAUX MOYENNES - février 2055



#### HAUTES EAUX MOYENNES - septembre 2058

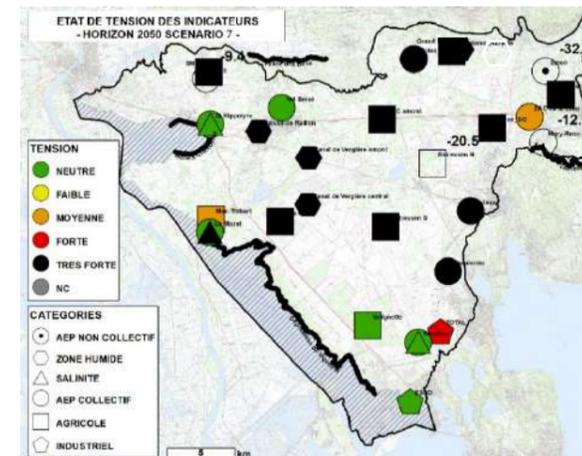


Différence de charge hydraulique par rapport à la simulation de référence (SCENARIO 1 2053 -2058)

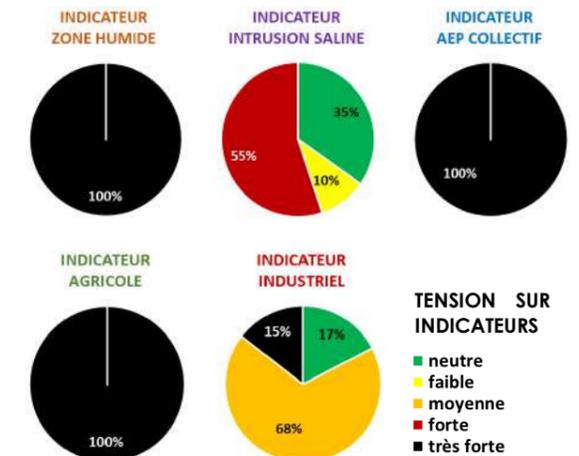


Répartition spatiale et statistique de l'épaisseur de zone saturée dans les cailloux en basses et hautes eaux

#### INDICATEURS



Répartition spatiale de la tension sur les indicateurs



Répartition statistique de la tension sur chaque catégorie d'indicateur

**ANALYSE :** La recharge moyenne baisse de 72% (recharge moyenne de 96 Mm<sup>3</sup> contre 343 Mm<sup>3</sup> entre 2053 et 2058), simplement assurée par les apports pluviométriques. Une baisse piézométrique atteignant l'ensemble de la nappe atteignant plus de 10 m sur le tiers nord-est du territoire et localement plus de 30 m. En période de basses eaux, 49% (+31%) de l'emprise de la nappe présente des épaisseurs de l'horizon saturé inférieures à 2 m, tandis que cette surface représente à 54% (+33%) en période de hautes eaux.

L'ensemble des indicateurs « zones humides », piézométriques ou de flux, ainsi que l'AEP privée, sont soumis à une tension « très forte ». Une tension de salinité « très forte » atteint le captage du Mazet mais épargne les deux autres indicateurs « salinité ». Les indicateurs « AEP collectif » « Sulauze », « Les Fioles », « Caspienne » sont soumis à des tensions « très fortes », tandis que « ZAC de la Crau » est en tension moyenne. Les autres indicateurs de « AEP collectif » ne présentent pas de tension. Une très forte majorité des indicateurs « agricoles » sont soumis à une tension « très forte », à l'exception de « Valignette » et « Mas-Thibert » en tension « faible » à « moyenne ». L'indicateur industriel « total » est classé en tension « forte ».

**Un retour à un état peu influencé aurait des répercussions très graves sur l'ensemble usages et fonctions écologiques de la nappe. Seul certains captages AEP pourraient continuer à fonctionner sans être touchés par des intrusions salines : St Hippolyte, Valboisé et Ventillon.**

### 3.2.4 DISCUSSION : LES EVOLUTIONS POTENTIELLES DE LA RESSOURCE ET DE SES USAGES A L'HORIZON 2050

Cette analyse montre une gradation des conséquences en fonction des évolutions en termes de développement du territoire ou de la gestion des eaux d'irrigation, indépendamment des conséquences directes du changement climatique sur le cycle de l'eau en Crau.

- Si les scénarios 2 et 3, correspondant à un déficit de 50 à 55 Mm<sup>3</sup>/an par rapport à la situation actuelle, semblent les plus soutenables sans modifier en profondeur le paysage futur, les conséquences sur les zones humides seraient non négligeables et il faut s'attendre à l'apparition de tension entre préleveurs agricoles et pour l'AEP des captages privés.
- Le scénario 4, correspondant à une baisse de volume irrigué de 20% (déficit cumulé de 80 Mm<sup>3</sup>/an par rapport à la situation actuelle), constitue une configuration pivot où des tensions commencent à apparaître sur certains indicateurs AEP collectif et sur les remontées salines.
- La baisse de volume irrigué de 30% gérée dans les scénarios 5 et 6 (déficit de 130 Mm<sup>3</sup>/an par rapport à la situation actuelle) a une conséquence très forte touchant une majorité des indicateurs et remettant en cause partiellement le système en place pour l'alimentation en eau des populations.
- Le scénario 7 (déficit de 270 Mm<sup>3</sup>/an par rapport à la situation actuelle) montre l'impossibilité de maintenir les usages et les fonctionnalités écologiques de la nappe en cas d'abandon de la culture de foin de Crau.

#### DES IMPACTS ACCEPTABLES POUR LE SEUL CHANGEMENT CLIMATIQUE ATTENDU

**L'évolution climatique établie par le GIEC sur un scénario médian à l'horizon 2050 conduira à une baisse de la recharge de l'ordre de 25 Mm<sup>3</sup>/an, principalement par augmentation de l'évapotranspiration. Précisons qu'il s'agit d'une estimation optimisée (scénario médian), que l'on pourrait qualifier de minimale. Les mesures récentes (2000-2020) ont montré que malheureusement les évolutions enregistrées se calent plutôt sur un scénario pessimiste et non médian.**

Avec ce scénario médian, les périodes estivales seront probablement plus intenses et plus longues mais sous réserve de conserver la disponibilité de la ressource en eau durancienne, les baisses de niveaux piézométriques par rapport à la situation actuelle seront limitées à la période estivale et significatives (> 1 m) seulement pour le quart nord-est de la nappe (secteur de Salon en Provence).

**Ainsi, en considérant une occupation des sols, des conditions d'irrigation et des prélèvements inchangés par rapport à l'actuel, l'état de la nappe à l'horizon 2050 serait ainsi relativement proche de l'état en 2010. Des années particulièrement sèches peuvent cependant mettre les usages agricoles, l'alimentation de certains captages privés du secteur nord-est et la fonction d'alimentation des zones humides dépendantes des niveaux de nappe dans un premier niveau de tension faible.**

#### MAIS QUI VIENDRONT SE CUMULER AVEC LES IMPACTS LIES AUX EVOLUTIONS TENDANCIELLES DU TERRITOIRE

Les éléments d'évolutions récentes indiquent que les surfaces de prairies irriguées marquent une tendance à la diminution :

- L'aménagement du territoire de la Crau évolue rapidement, avec une pression urbaine importante autour des grandes agglomérations où les projets de ZAC et de zones d'habitat se multiplient. Entre 1997 et 2009, l'urbanisation a détruit irréversiblement 1600 ha des terres agricoles et d'espaces naturels. Des grands projets d'infrastructures autoroutières sont prévus dans les prochaines années : contournement d'Arles et liaison entre Salon-de-Provence et Fos-sur-Mer. Des évolutions sont à prévoir autour des pôles industriels liés au Grand Port Maritime de Marseille (GPMM).
- La filière Foin de Crau représente 14 000 ha de prairies irriguées. Ce secteur se heurte à certaines difficultés socio-économiques. La pression foncière a entraîné la conversion de surfaces agricoles en zones urbaines (835 ha convertis entre 1997 et 2009).

- Les évolutions récentes indiquent que les récentes dispositions réglementaires favorisant la densification urbaine (Lois ALUR et suivantes) n'atténuent pas les tendances à l'étalement urbain.

**Les scénarios 2 et 3 explorent ainsi l'impact d'un développement du territoire qui suivraient les tendances actuelles d'une diminution des surfaces de prairies irriguées (-10%) en lien avec l'urbanisation du territoire (scénario 2) ou la diversification des cultures (scénario 3).**

**Que ce soit pour l'un ou l'autre scénario, la recharge marque une baisse : environ -20 Mm<sup>3</sup>/an se cumulant au -26 Mm<sup>3</sup>/an causés par le changement climatique.**

Les impacts sont importants (figure 92): la piézométrie est en baisse sur l'ensemble de la nappe (-0.5 m), de manière plus marquée dans le sillon de Miramas (- 2m) et en particulier dans le secteur de Salon de Provence (-4 m), que ce soit en période de basses eaux, qu'en période de hautes eaux. Des tensions « faibles » apparaissent pour l'ensemble des indicateurs piézométriques « zones humides » dépendants des niveaux de nappe. L'indicateur zone humide « Grand Brahis » bascule en tension forte durant les étés les plus secs. Près de la moitié des indicateurs « agricoles » présentent des états de tension « faible » au cours des années les plus sèches (2053, 2056 et 2057), classant cette catégorie en état de tension « moyenne ». L'AEP privée dans le secteur de Salon est en état de tension forte (-2 m).

**Le changement climatique va donc réduire les marges de manœuvre actuelles pour la satisfaction des usages et du bon état des milieux associés à la nappe. La simple continuité des politiques passées et actuelles d'aménagement va conduire à des situations de crise, centrées sur l'assèchement d'une part importante des zones humides dépendantes des niveaux de nappe et sur une baisse de productivité des pompages agricoles, particulièrement dans la partie Nord de la plaine de Crau.**

Cet effet cumulatif se retrouve dans les scénarios qui ont étudié les impacts de baisse de volumes d'eau destinée à l'irrigation en Crau. Toute diminution de la recharge par perte de volumes d'eau mise en irrigation viendra se cumuler aux pertes de recharge attendues, liées au seul changement climatique.

CODE DE COULEUR INDICATIF DE LA TENSION SUR LES INDICATEURS  
 NEUTRE FAIBLE MOYENNE FORTE TRES FORTE

SCENARIO 2 – ETALEMENT URBAIN HORIZON 2050

SCENARIO 3 – DIVERSIFICATION DES CULTURES HORIZON 2050

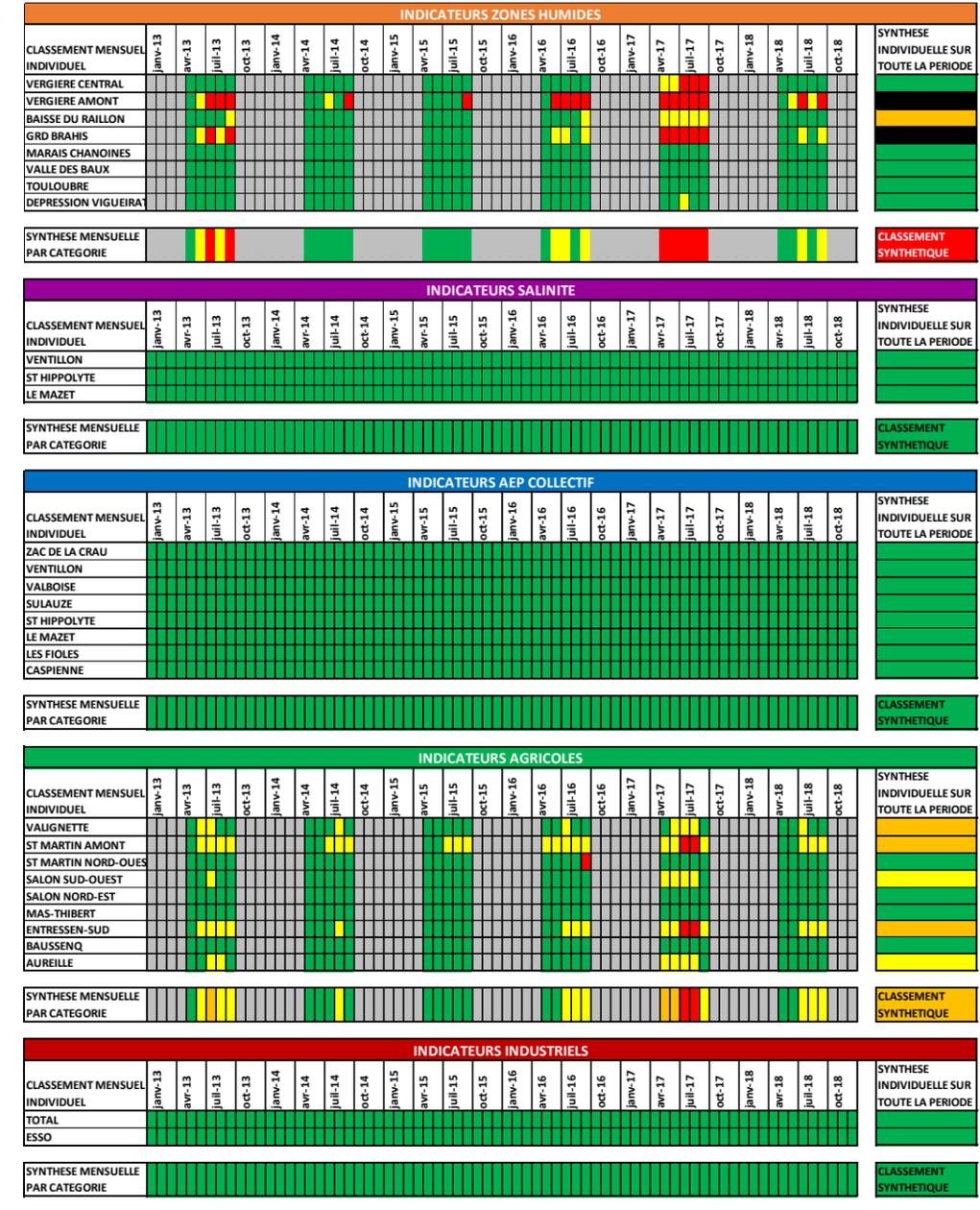
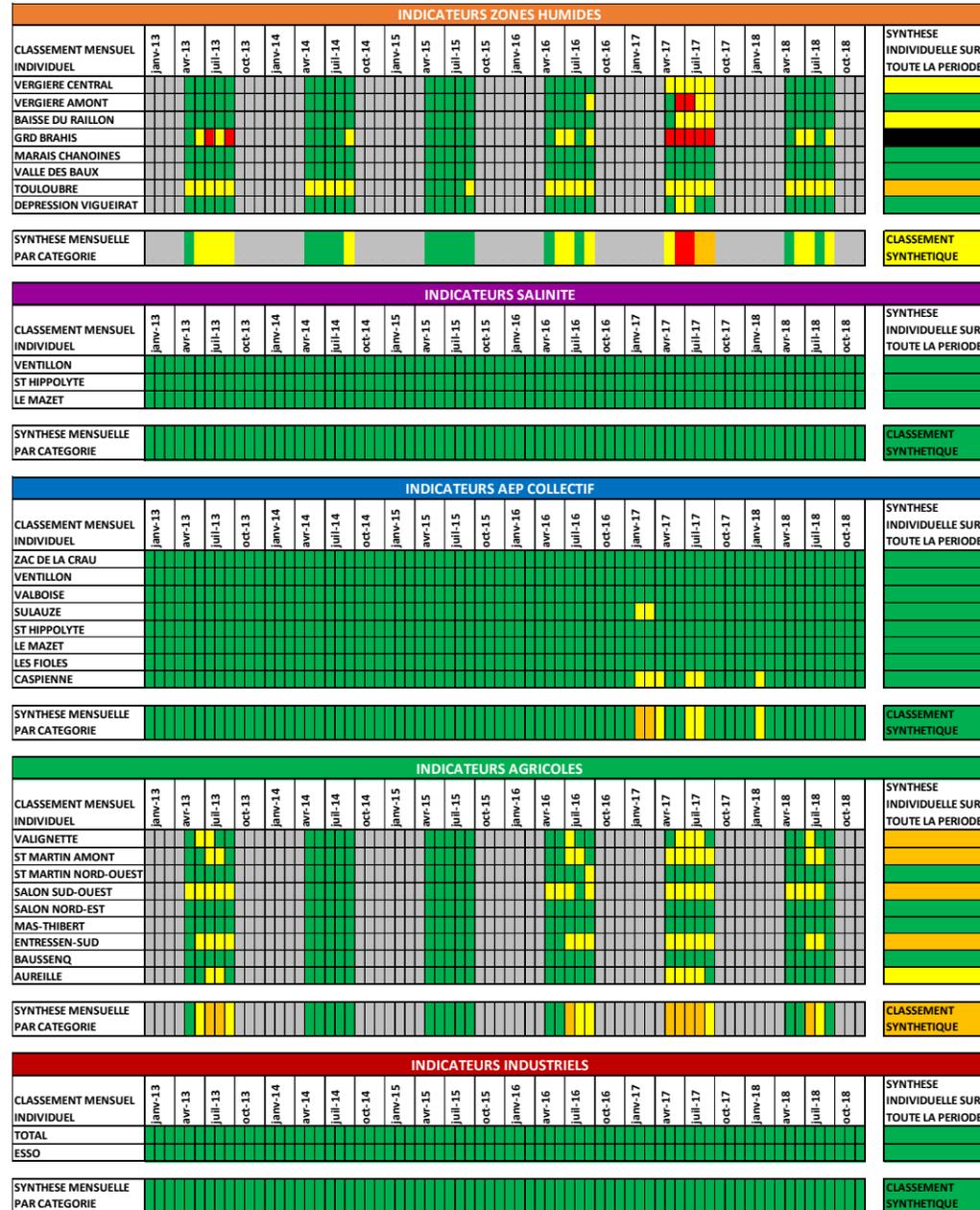


Figure 92 Tensions sur les indicateurs selon les scénarios 2 et 3

## 3.3 SIMULATIONS DES MODALITES DE GESTION D'UN EPISODE SECHERESSE

### 3.3.1 OBJECTIFS ET METHODE

L'objectif de cette analyse est de connaître l'impact sur la ressource d'un évènement exceptionnel de sécheresse, ici une diminution de 50% des précipitations durant deux années consécutives. Il s'agit d'un axe de travail souhaité par les acteurs du territoire lors de la séance de concertation décrite au chapitre 7.2.

Il est simulé les différentes mesures correctives qui pourraient s'appliquer sur le territoire de la Crau et de la Durance. L'objectif est de mieux connaître la sensibilité du système à un tel évènement, n'ayant jamais eu lieu sur la Crau mais dont le risque d'appariation augmente avec les évolutions climatiques. Cela permet également de mesurer l'impact de différentes stratégies de gestion de pénurie en eau pour orienter l'élaboration des plans de gestion des risques sécheresse.

L'outil de simulation MHYCRAU est mobilisé pour :

- comparer d'une part l'impact de sécheresse sévère sur les indicateurs d'état de la nappe par rapport à la situation de référence, afin de mesurer le seul effet climatique sur la ressource
- mesurer d'autre part l'impact sur les indicateurs, des différentes mesures de gestion qui pourraient s'appliquer dans une logique de préservation des équilibres quantitatifs à l'échelle des bassins-versants de la Durance et de Crau.

L'épisode de sécheresse et les mesures de gestion s'inscrivant une période courte, l'analyse s'appuie sur un suivi des impacts dans le temps, notamment grâce à la grille d'analyse proposée au chapitre 6.

Il s'agit également d'étudier la répartition des impacts à des moments clés de l'épisode de sécheresse : septembre 2016 et février 2017, respectivement les dates de plus hautes eaux et de plus basses eaux consécutives à l'épisode de sécheresse.

### 3.3.2 DESCRIPTION DES SCENARIOS SIMULES

Il est simulé un contexte climatique semblable à celui observé sur la période 2013-2018, avec une pluie divisée par deux pour les années 2015 et 2016. On peut estimer qu'un tel contexte climatique engendre des restrictions fortes sur les usages dès 2016, notamment sur l'accès à la ressource d'ancienne pour l'irrigation des cultures de prairie et sur les prélèvements non essentiels dans les nappes.

Deux niveaux de restrictions sont ainsi envisagés : stade d'alerte si l'état des masses d'eau ne présente pas de tensions importantes et stade de crise si les masses d'eaux présentent un déficit grave.

De plus il est envisagé deux modes de réponses :

**(1) Une anticipation du risque** déployant des mesures de restrictions modérées sur une période longue. Au stade d'alerte, le scénario testé est une réduction des prélèvements de 20% et les volumes d'eau destinée à l'irrigation de 10% en saison d'irrigation, c'est-à-dire le mois de mars et jusqu'en octobre. Au stade de crise, nous avons regardé les effets d'une limitation de mars à octobre des restrictions sur les volumes d'eau mise en irrigation de 30% afin d'assurer les usages AEP et l'alimentation des milieux, maintien d'une autorisation de prélèvement de 30% pour les usages non prioritaires (industriels et agricoles).

**(2) Une gestion non anticipée** déployant des mesures fortes sur une période plus courte. Le scénario testé consiste en des mesures correctives plus fortes avec une restriction sur les prélèvements de 50% et une baisse des volumes d'eau destinée à l'irrigation de 20% de juillet à octobre. Au stade de crise, des mesures correctives plus fortes s'appliquent, notamment une interdiction totale de prélèvements hors AEP et de l'irrigation gravitaire de juillet à octobre.

En l'absence des niveaux piézométriques de référence, les services de l'état n'ont pas défini à ce jour de mesures de restrictions spécifiques à la nappe de la Crau. La masse d'eau pourrait être affectée par des limitations d'usages appliquées au bassin versant de la Durance, en particulier les prélèvements pour l'irrigation gravitaire. Des restrictions sur les prélèvements en Crau pourraient également

être s'appliquées, en cas de risques de pénuries pour les captages d'eau potable ou l'alimentation des écosystèmes et par solidarité entre les territoires.

Il est proposé différentes mesures qui pourraient s'appliquer en fonction du stade de sécheresse décrit par les services de l'état selon les conditions de sécheresse :

- **Gestion d'état d'alerte sécheresse établie de manière anticipée** : réduction des prélèvements de 20% et les volumes d'eau mise en irrigation de 10% en saison d'irrigation, c'est-à-dire le mois de mars et jusqu'en octobre 2016.
- **Gestion par réaction à une situation d'alerte sur les équilibres quantitatifs** : des mesures correctives plus fortes s'appliquent, notamment une restriction sur les prélèvements de 50% et une baisse des volumes d'eau destinée à l'irrigation de 20% de juillet à octobre 2016.
- **Gestion d'état de crise sécheresse établie de manière anticipée** : Restrictions de mars à octobre sur les volumes d'eau mise en irrigation de 30% afin d'assurer les usages AEP et l'alimentation des milieux, maintien d'une autorisation de prélèvement de 30% pour les usages non prioritaires (industriels et agricoles) afin d'atténuer les conséquences économiques et agronomiques.
- **Gestion par réaction à une situation de crise sur les équilibres quantitatifs** : des mesures correctives plus fortes s'appliquent, notamment une interdiction totale de prélèvements hors AEP et de l'irrigation gravitaire de juillet à octobre 2016.

Le tableau suivant détaille les caractéristiques des différents scénarios de gestion ainsi simulés.

SCENARIOS CON-JONCTURELS HORIZON 2010	Climat	Description	Restriction sur les volumes d'eau destinée à l'irrigation d'eau des canaux	Restrictions sur les prélèvements agricoles et industriels en nappe
<b>Scénario 8</b>	Pluie divisée par deux en 2015 & 2016	Sécheresse sévère en 2015 et 2016 sans mesures de restriction	aucun	aucun
<b>Scénario 9</b>		Sécheresse 2015-2016 : situation d'alerte anticipée	Baisse des volumes d'eau mise en irrigation de 10% de mars à octobre 2016	-20% de mars à octobre 2016
<b>Scénario 10</b>		Sécheresse 2015-2016 : situation d'alerte renforcée	Baisse des volumes d'eau destinée à l'irrigation de 20 % de juillet à octobre 2016	-50% de juillet à octobre 2016
<b>Scénario 11</b>		Sécheresse 2015-2016 : situation de crise anticipée	Maintien d'un volume minimal de 70% pour l'AEP de mars à octobre 2016 (volume nécessaire au maintien de l'AEP)	-70% de mars à octobre 2016 (en considérant qu'un volume minimal est conservé pour les besoins industriels et ne pas détériorer la qualité agronomique des terres)
<b>Scénario 12</b>		Sécheresse 2015-2016 : situation de crise non anticipée	Arrêt de la volume irrigué de juillet à octobre 2016	interdiction de juillet à octobre 2016

**Tableau 44 Scénarios de mesures de gestion d'un épisode de sécheresse**

### 3.3.3 ANALYSE DES RESULTATS PAR SCENARIOS

Les résultats sont analysés en comparant l'état de la ressource en septembre 2016, soit en période de forte demande en eau pendant l'épisode de sécheresse, et en février 2017, période de basses-eaux consécutive à l'épisode de pénurie. L'ensemble des résultats sont présentés ci-après sous forme de fiches synthétiques. Le détail sur l'évolution mensuelle de l'état de tension sur les indicateurs est fourni en annexe 11.

## SCENARIO 8 – SECHERESSE SEVERE EN 2015 ET 2016

Ce scénario explore l'impact de la sécheresse sans qu'aucune restriction en soit imposée. Les résultats sont comparés à la simulation de référence 2013-2018 sans sécheresse

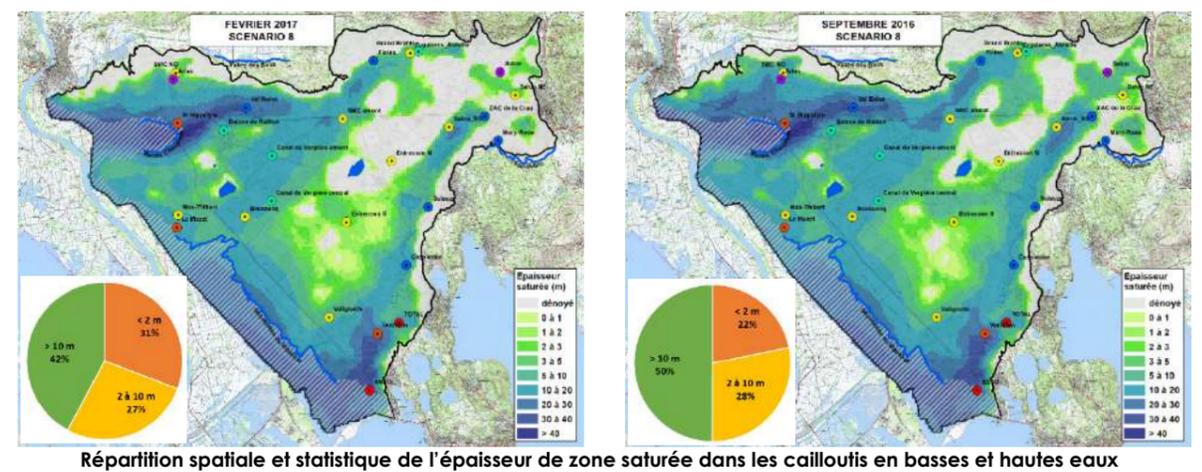
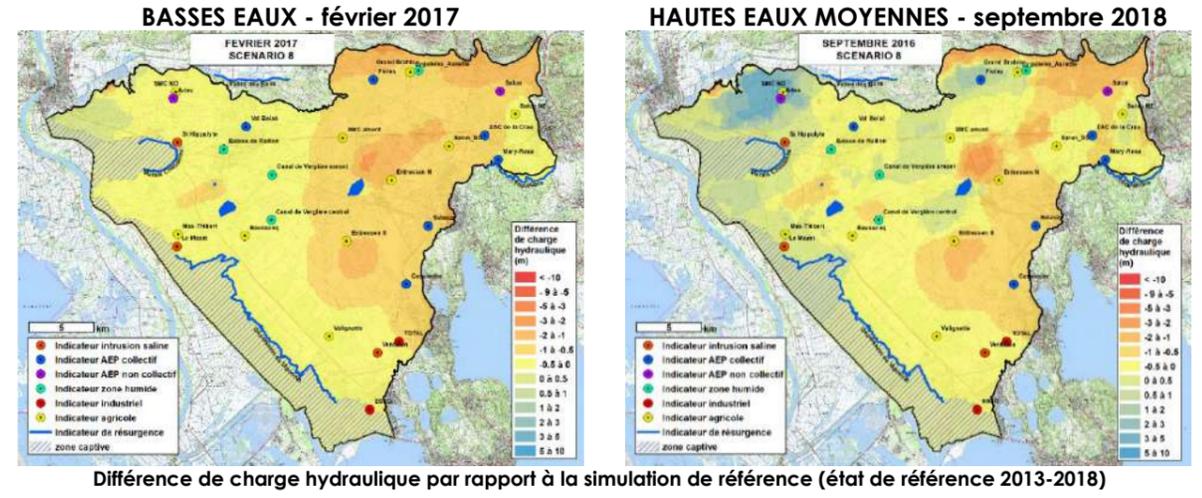
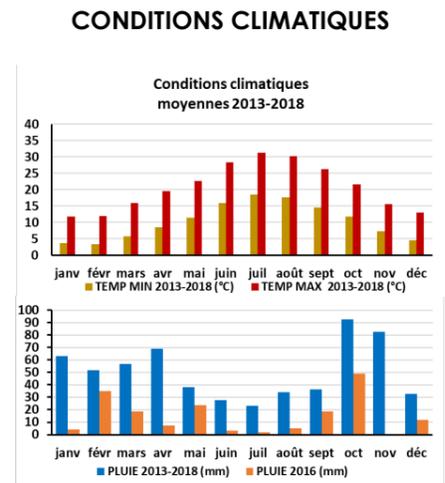
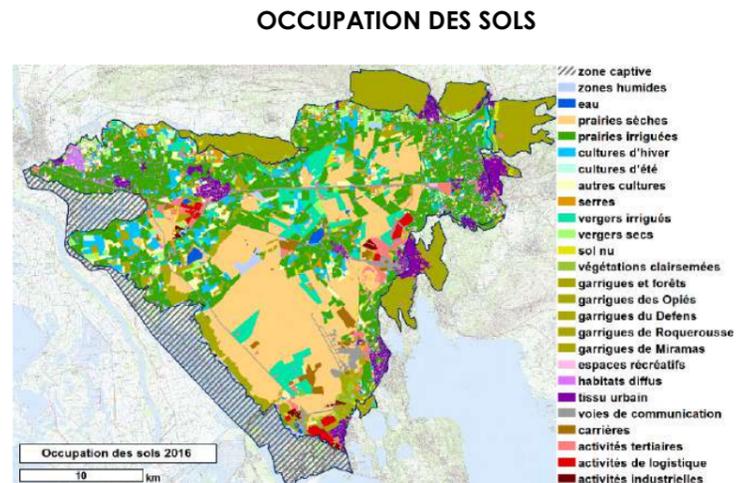
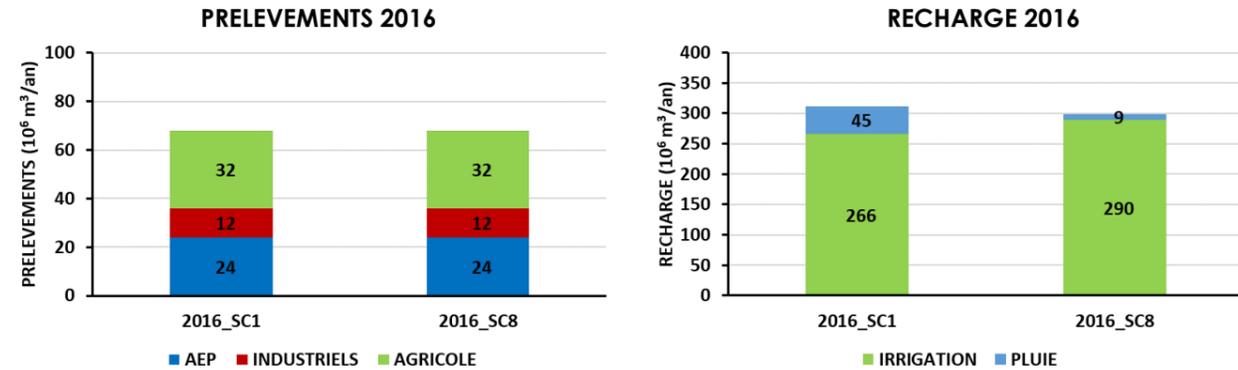
### DONNEES D'ENTREE

#### SYNTHESE

Climat  
Occupation des sols  
Conditions de recharge  
Condition de prélèvements  
Condition de référence

**Climat 2013-2018 avec un déficit en pluie de 50% en 2015-2016**  
Observation 2016  
Volume irrigué pour l'irrigation 100%  
Prélèvements agricoles estimés 2013-2018  
Etat de référence année 2016

### RESULTATS

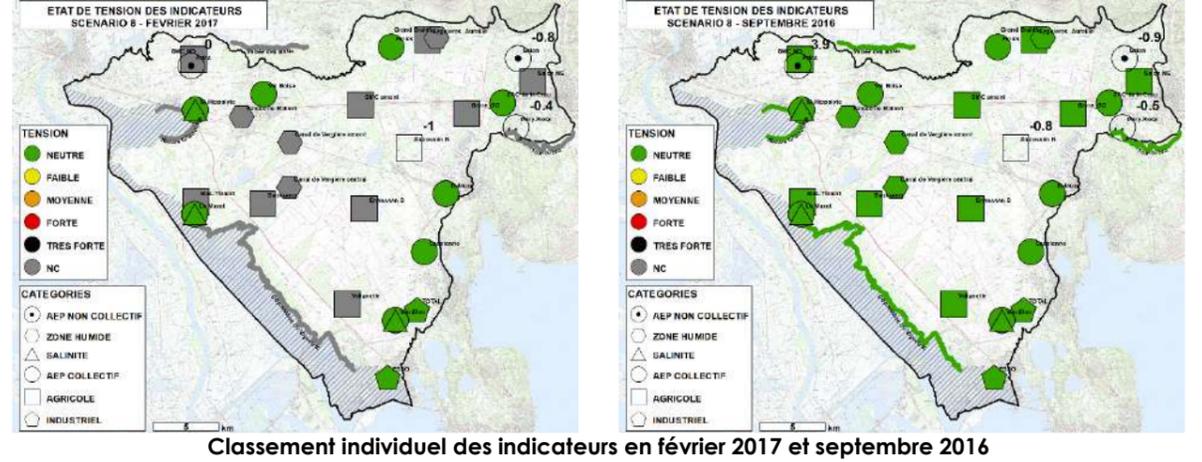


**ANALYSE :** La recharge en 2016 est globalement déficitaire (299 Mm<sup>3</sup> contre 311 Mm<sup>3</sup>) : l'augmentation de l'irrigation liée à la faiblesse des précipitations ne compense pas les pertes de recharge liées à la faible pluie. Cela donne un résultat contrasté en septembre 2016 avec des secteurs où la piézométrie a tendance à augmenter (jusqu'à + 2m) et une majorité du territoire où celle-ci baisse (-0.5 à -2 m). En février 2017, l'ensemble de la nappe présente un déficit de -0.5 à -2 m). En septembre 2016, 22% de la surface de la nappe présente une épaisseur inférieure à 2 m. En février 2017, cette très faible épaisseur atteint 31% de la nappe.

Les indicateurs d'état sont globalement en tension « neutre » en septembre 2016 et février 2017. L'AEP privés pourrait rencontrer des tensions faibles dans le secteur de Salon. Quelques tensions qualifiées de « faibles » interviennent ensuite à l'été 2017 sur les indicateurs « zones humides » et « agricoles », soit un an après l'épisode de sécheresse. L'état de référence est rattrapé au cours de l'année 2018 pour la majorité des indicateurs, marquant une inertie du système d'environ 1 à 2 ans.

**Globalement, l'impact de pluie très faibles cumulées sur deux ans n'a pas d'incidence majeure sur l'état de la ressource.**

### INDICATEURS



Classement individuel des indicateurs en février 2017 et septembre 2016

### SCENARIO 9 – SECHERESSE 2015-2016 : ETAT D'ALERTE ANTICIPEE

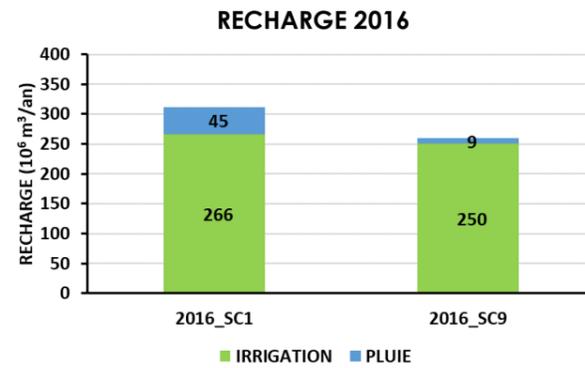
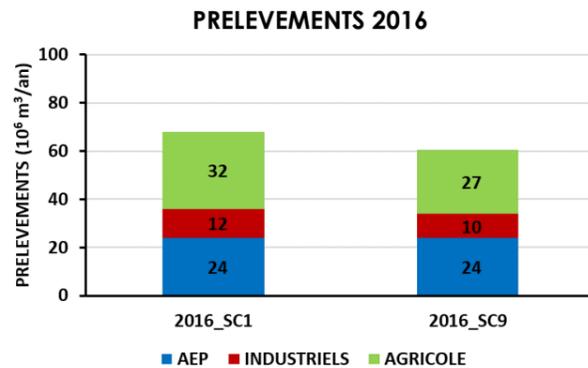
Ce scénario explore l'impact d'une gestion anticipée de la sécheresse en état d'alerte, avec une restriction de 10% sur les volumes d'eau mise en irrigation appliquées de mars à octobre 2016 et une restriction de 10% sur les prélèvements (-7 Mm<sup>3</sup> prélevés en 2016). Les résultats sont comparés au scénario 8, avec un épisode de sécheresse sans mesures appliquées.

#### DONNEES D'ENTREE

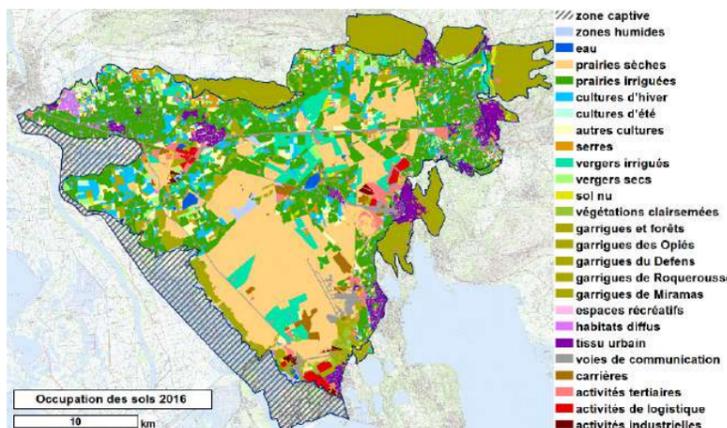
##### SYNTHESE

- Climat
- Occupation des sols
- Conditions de recharge
- Condition de prélèvements
- Condition de référence

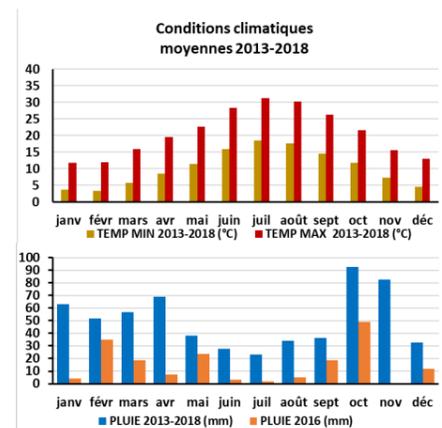
**Climat 2013-2018 avec un déficit en pluie de 50% en 2015-2016**  
 Observation 2016  
**Volume irrigué -10 % de mars à octobre 2016**  
**Prélèvements agricoles et industriels -20% de mars à octobre 2016**  
 Scénario 8 (sécheresse 2015-2016 sans mesures de gestion)



#### OCCUPATION DES SOLS

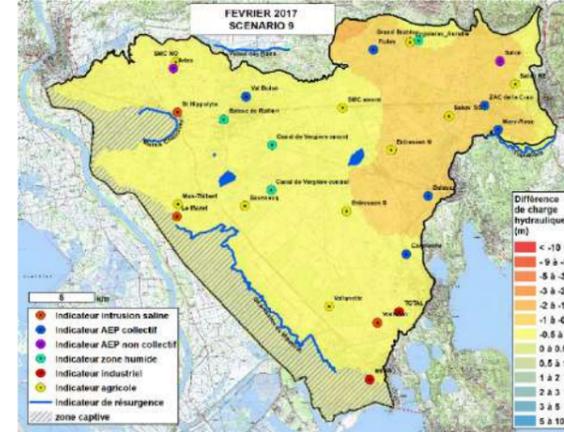


#### CONDITIONS CLIMATIQUES

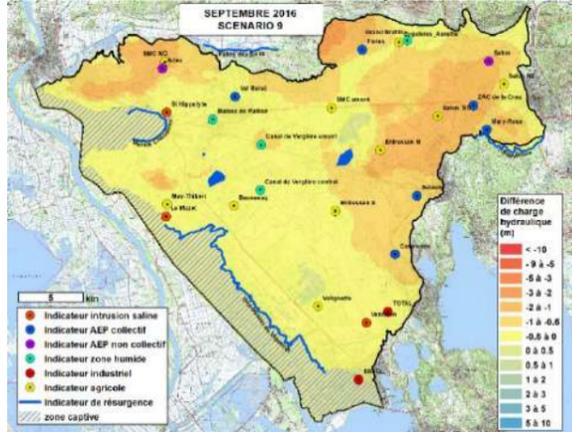


#### RESULTATS

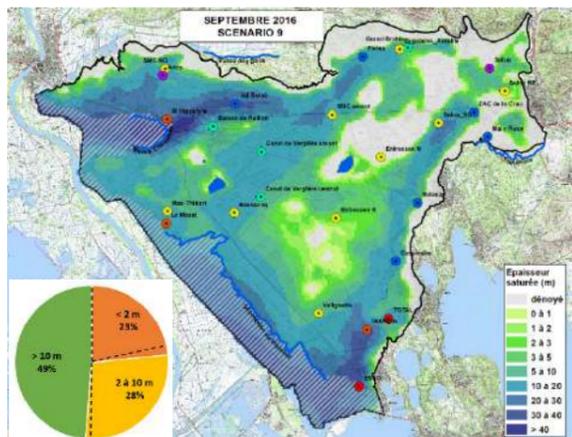
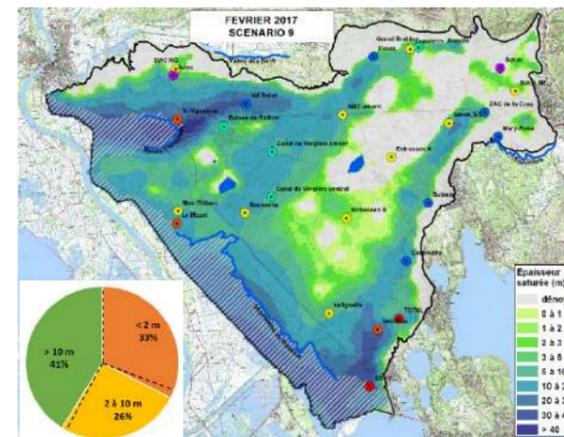
##### BASSES EAUX - février 2017



##### HAUTES EAUX MOYENNES - septembre 2016

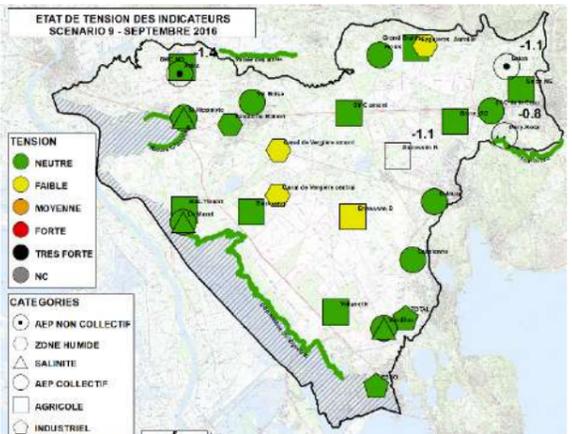
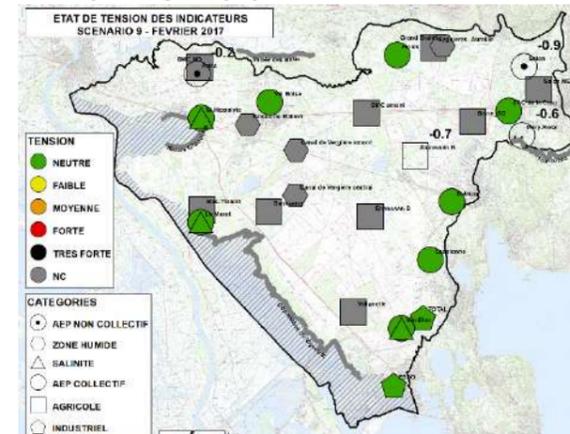


Différence de charge hydraulique par rapport à la simulation de référence (scénario 8)



Répartition spatiale et statistique de l'épaisseur de zone saturée dans les cailloutis en basses et hautes eaux

#### ETAT DES INDICATEURS



Classement individuel des indicateurs en février 2017 et septembre 2016

**ANALYSE :** Le déficit de recharge en 2016 se creuse (259 Mm<sup>3</sup> contre 299 Mm<sup>3</sup>) avec la baisse des volumes disponibles pour l'irrigation. La piézométrie est en baisse, avec une diminution des niveaux piézométrique atteignant 2 m en septembre 2016 et 1 m en février 2017, dans le secteur irrigué au nord de Miramas.

En septembre 2016, 23% (+1%) de la surface de la nappe présente une épaisseur inférieure à 2 m. En février 2017, cette très faible épaisseur atteint 33% de la nappe (+1%).

Des tensions faibles apparaissent sur les indicateurs zones humides à l'été 2016, s'accroissant au printemps 2017 : tension « forte » pour « Vergière centrale » et « Grand Brahis ». Des tensions « faibles » apparaissent pour les indicateurs « agricoles » (« St Martin amont », « Entressen sud ») en étés 2016 et 2017. L'AEP privée est en état de tension faible dans le secteur de Salon (-0.9 m en basses eaux) et « neutre » dans le secteur d'Arles (-0.2 m en basses eaux).

**Globalement, la gestion anticipée de l'alerte par restrictions faibles appliquées sur toute la saison d'irrigation, a un impact modéré sur les usages et les fonctionnalités écologiques.**

## SCENARIO 10 – SECHERESSE 2015-2016 : ETAT D'ALERTE NON ANTICIPEE

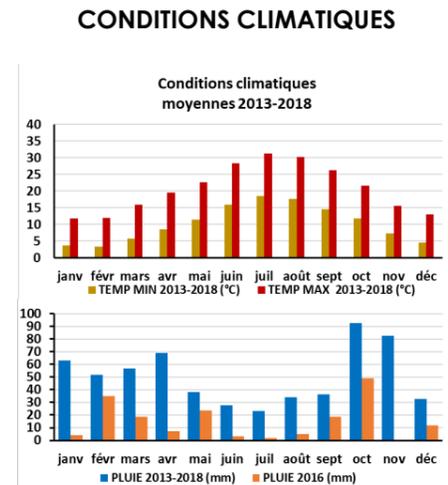
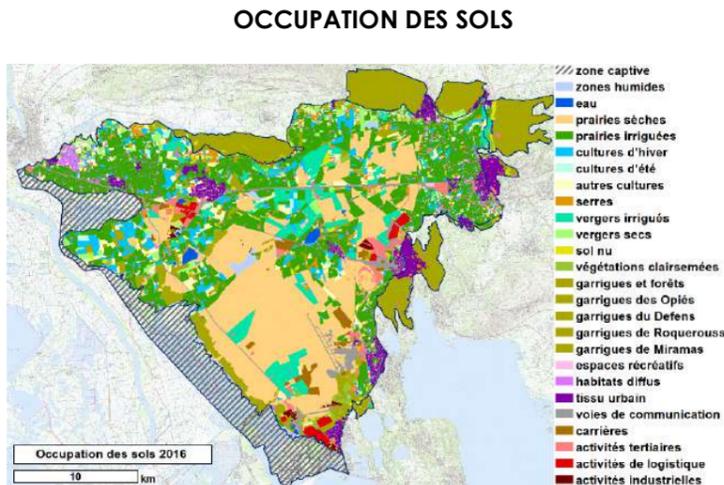
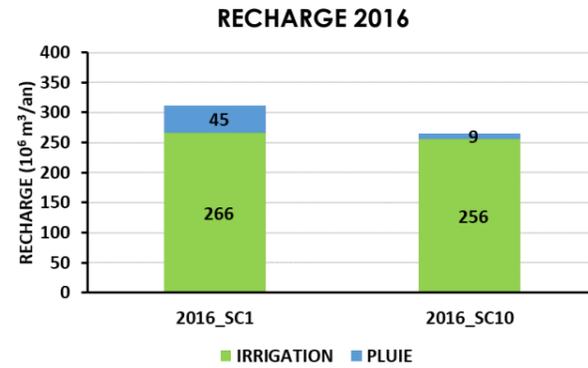
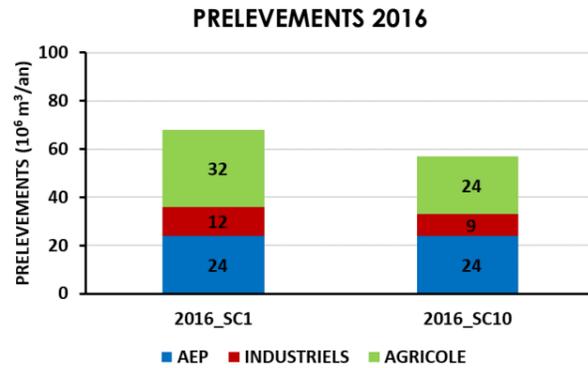
Ce scénario explore l'impact d'une gestion non anticipée de la sécheresse en état d'alerte, conduisant à une restriction de 20% sur les volumes d'eau destinée à l'irrigation et une restriction de 50% sur les prélèvements (-11 Mm<sup>3</sup> prélevés en 2016) appliquées de juillet à octobre 2016. Les résultats sont comparés au scénario 8, avec un épisode de sécheresse sans mesures appliquées.

### DONNEES D'ENTREE

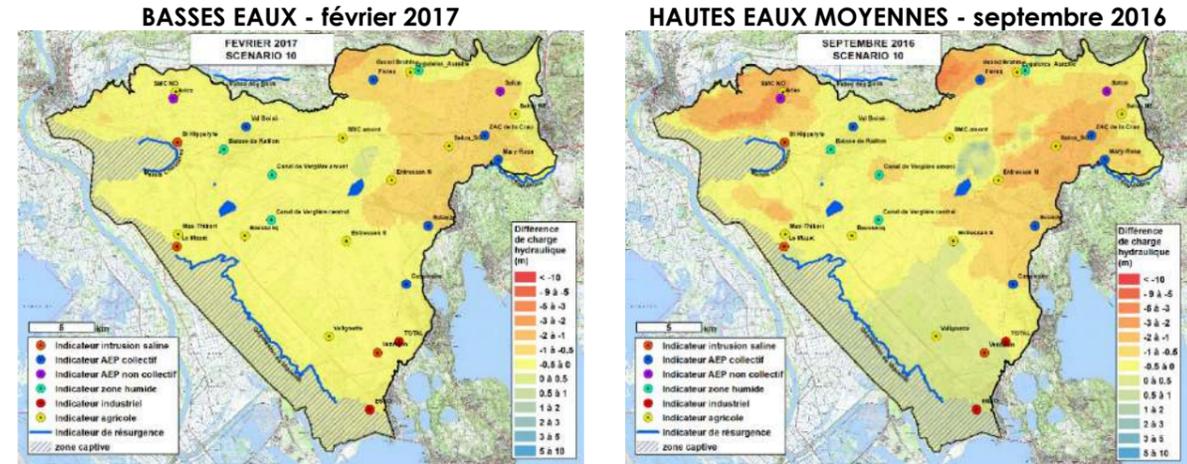
#### SYNTHESE

Climat  
Occupation des sols  
Conditions de recharge  
Condition de prélèvements  
Condition de référence

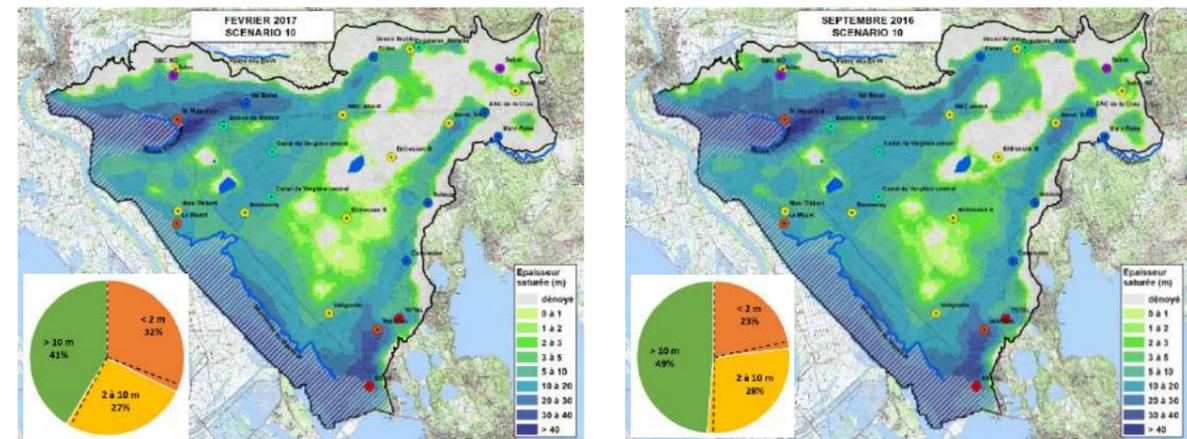
**Climat 2013-2018 avec un déficit en pluie de 50% en 2015-2016**  
Observation 2016  
**Volume irrigué -20 % à partir de juillet 2016**  
**Prélèvements agricoles et industriels -50% de juillet à décembre 2016**  
Scénario 8 (sécheresse 2015-2016 sans mesures de gestion)



### RESULTATS

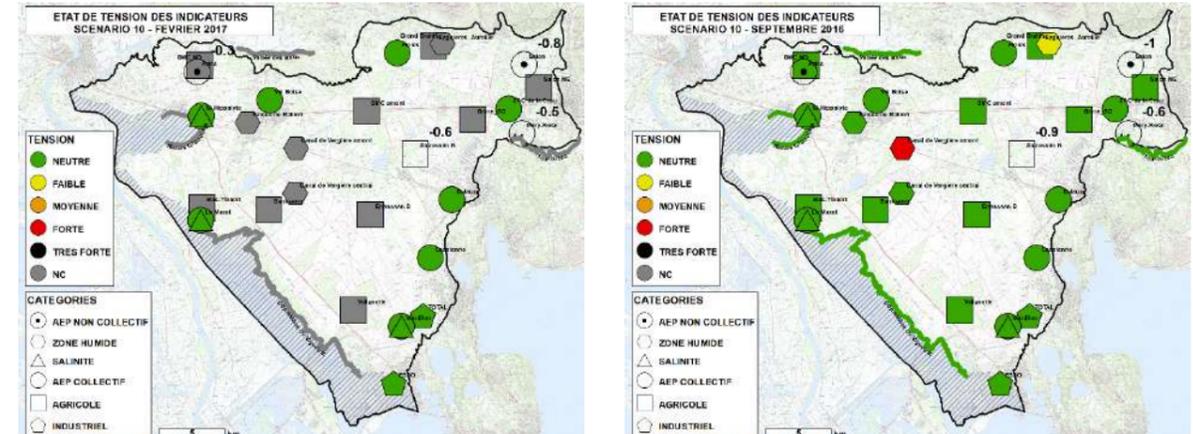


Différence de charge hydraulique par rapport à la simulation de référence (scénario 8)



Répartition spatiale et statistique de l'épaisseur de zone saturée dans les cailloutis en basses et hautes eaux

#### ETAT DES INDICATEURS



Classement individuel des indicateurs en février 2017 et septembre 2016

**ANALYSE :** Le déficit de recharge en 2016 se creuse (265 Mm<sup>3</sup> contre 299 Mm<sup>3</sup>) avec la baisse des volumes disponibles pour l'irrigation. La piézométrie est en baisse, avec une diminution des niveaux piézométrique atteignant 3 m en septembre 2016, dans le secteur d'Arles et au nord de Miramas, et 1 m en février 2017 au nord-est du territoire. Certains secteurs montrent une légère tendance à l'augmentation en lien avec les restrictions sur les prélèvements (nord d'Entressen, Costières sud). En septembre 2016, 23% (+1%) de la surface de la nappe présente une épaisseur inférieure à 2 m. En février 2017, cette très faible épaisseur est de 32% de la nappe (stable).

Des tensions faibles (« vergière centrale », Grand brahis ») et à fortes (« Vergière amont ») apparaissent sur les indicateurs zones humides à l'été 2016, s'accroissant au printemps 2017 : tension « forte » pour « Vergière centrale » et « Grand Brahis ». Des tensions « faibles » apparaissent pour les indicateurs « agricoles » (« St Martin amont », « Entressen sud ») en étés 2016 et 2017. L'AEP privée est en état de tension faible dans le secteur de Salon (-0.8 m en basses eaux) et « neutre » dans le secteur d'Arles (-0.3 m en basses eaux).

**Globalement, la gestion anticipée de l'alerte par restrictions fortes appliquées en milieu de saison d'irrigation, a un impact modéré sur les usages et les fonctionnalités écologiques. Les tensions sur les indicateurs sont légèrement plus accentuées que pour la gestion d'alerte anticipée (scénario 9)**

## SCENARIO 11 – SECHERESSE 2015 – 2016 : GESTION DE CRISE ANTICIPEE

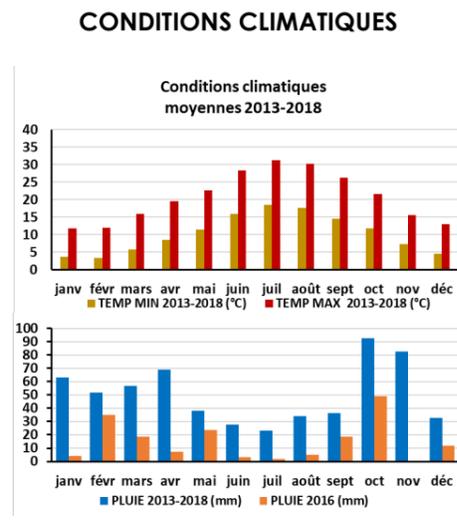
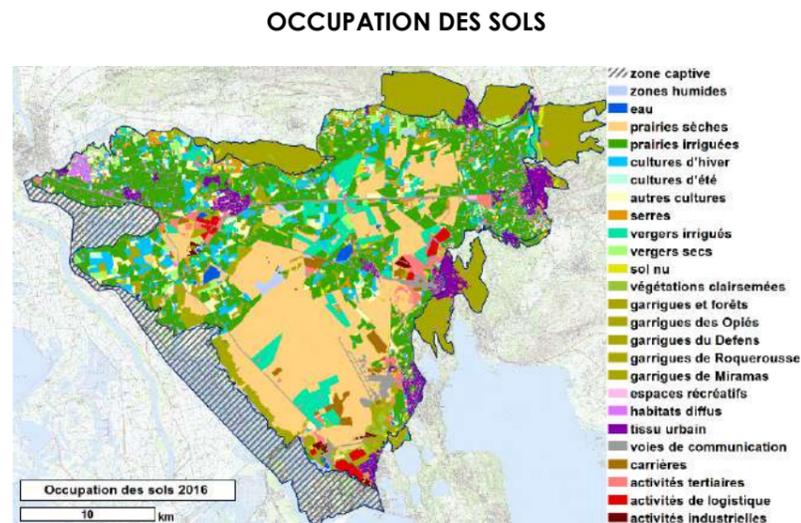
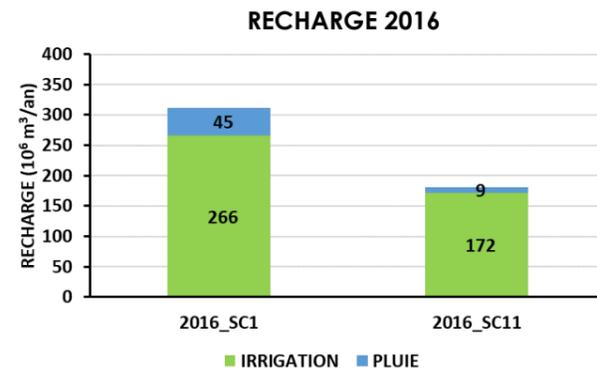
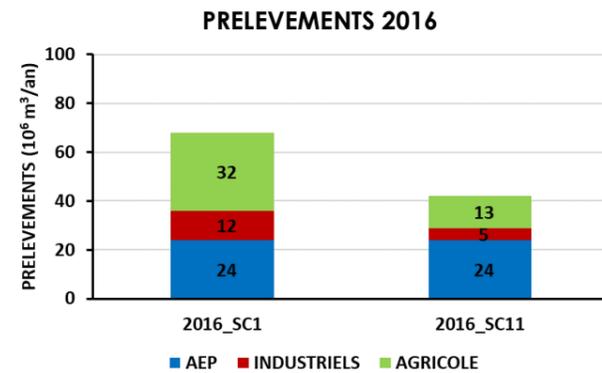
Ce scénario explore l'impact d'une gestion non anticipée de la sécheresse en état d'alerte, conduisant à une restriction de 30% sur les volumes d'eau mise en irrigation et une restriction de 70% sur les prélèvements (-26 Mm<sup>3</sup> prélevés en 2016) appliquées de mars à octobre 2016. Les résultats sont comparés au scénario 8, avec un épisode de sécheresse sans mesures appliquées.

### DONNEES D'ENTREE

#### SYNTHESE

Climat  
Occupation des sols  
Conditions de recharge  
Condition de prélèvements  
Condition de référence

**Climat 2013-2018 avec un déficit en pluie de 50% en 2015-2016**  
Observation 2016  
**Volume irrigué -30 % de mars à septembre 2016**  
**Prélèvements agricoles et industriels -70% de mars à décembre 2016**  
Scénario 8 (sécheresse 2015-2016 sans mesures de gestion)

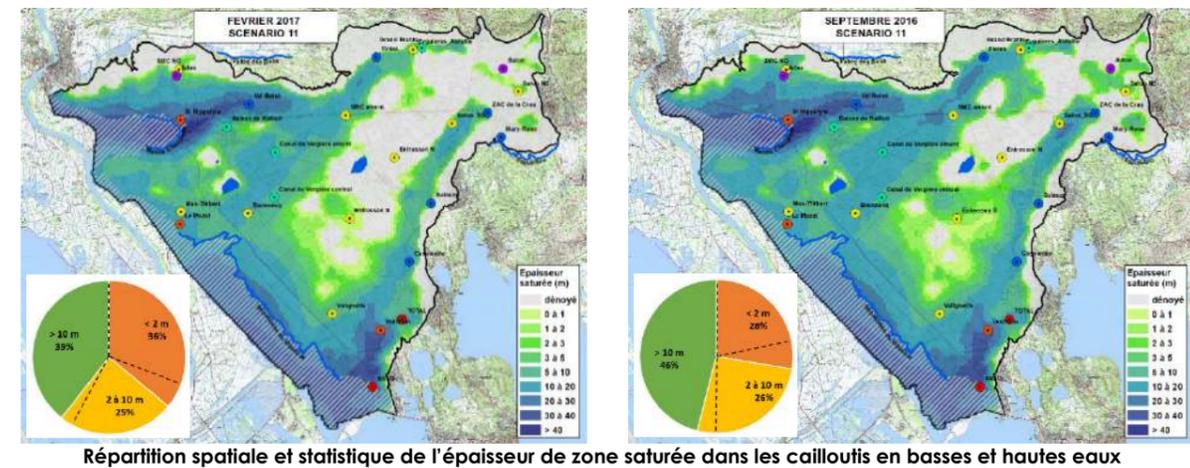
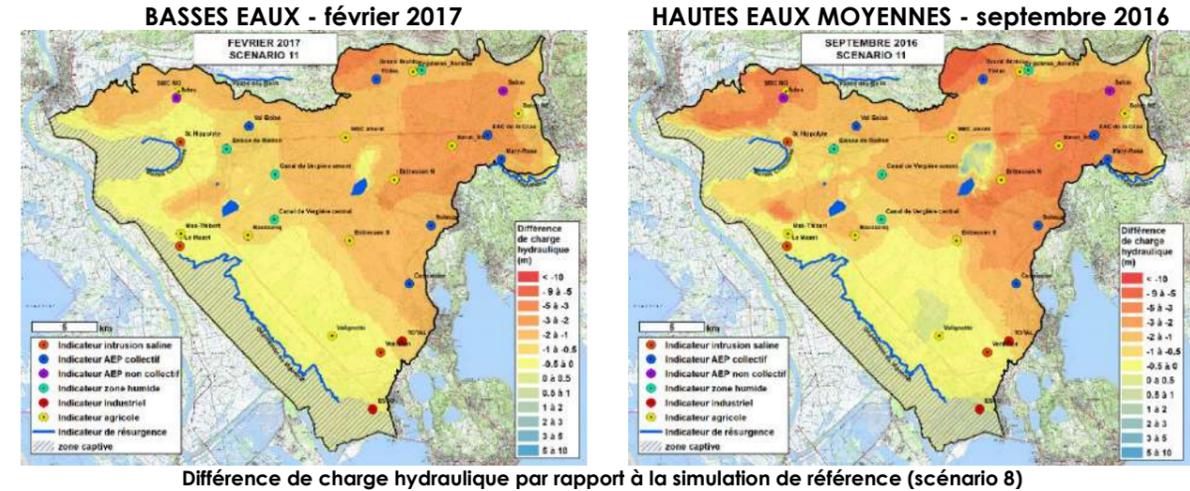


**ANALYSE :** Le déficit de recharge en 2016 se creuse (181 Mm<sup>3</sup> contre 299 Mm<sup>3</sup>) avec la baisse des volumes disponibles pour l'irrigation. La piézométrie est en baisse, avec une diminution des niveaux piézométrique atteignant 3-4 m en septembre 2016 et 2 m en février 2017, au nord du ligne Istres-Arles. Certains secteurs très localisés montrent une légère tendance à la hausse en lien avec les restrictions sur les prélèvements (nord d'Entressen, Valignette). En septembre 2016, 28% (+6%) de la surface de la nappe présente une épaisseur inférieure à 2 m. En février 2017, cette très faible épaisseur est de 36% de la nappe (+4%).

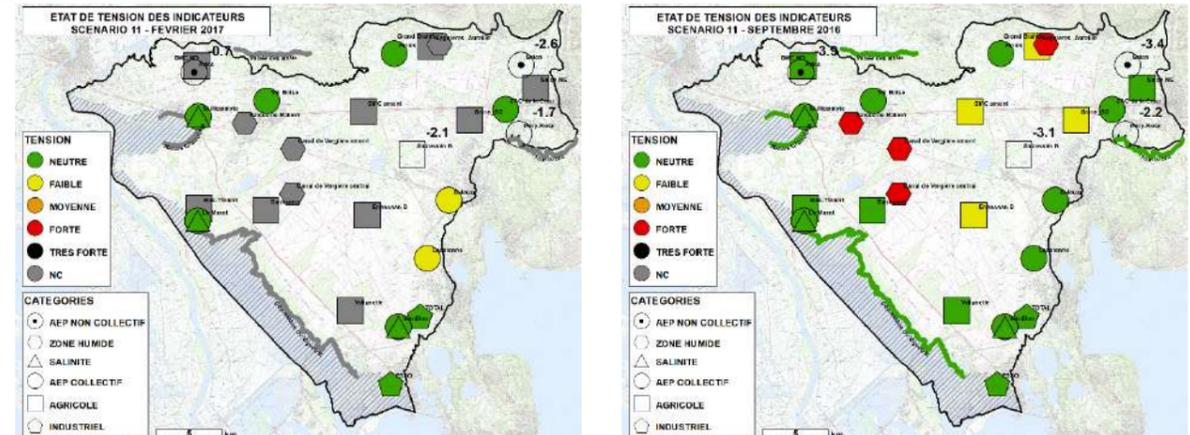
Des tensions fortes apparaissent pour l'ensemble des indicateurs piézométriques « zones humides » pour les 2016 et 2017. Une grande partie des indicateurs agricoles sont classés en tension « faible », avec un état de tension forte pour « Entressen sud » en été 2017. Les points indicateurs « AEP collectifs » se placent en situation de tension faible en hiver 2017 et janvier 2018. L'AEP privée est en état de tension forte dans le secteur de Salon (-2.6 m en basses eaux) et en état de tension faible dans le secteur d'Arles (-0.7 m en basses eaux).

**Globalement, la gestion anticipée d'une situation de crise par restrictions très fortes appliquées tout au long de la saison d'irrigation, a un impact important sur les usages et les fonctionnalités écologiques.**

### RESULTATS



### ETAT DES INDICATEURS



## SCENARIO 12 – SECHERESSE 2015-2016 : GESTION CRISE NON ANTICIPEE

Ce scénario explore l'impact d'une gestion non anticipée de la sécheresse en état de crise, conduisant à une interdiction des prélèvements agricoles et industriels et une mesure d'arrêt de l'irrigation, appliquées de juillet à octobre 2016. Les résultats sont comparés au scénario 8, avec un épisode de sécheresse sans mesures appliquées

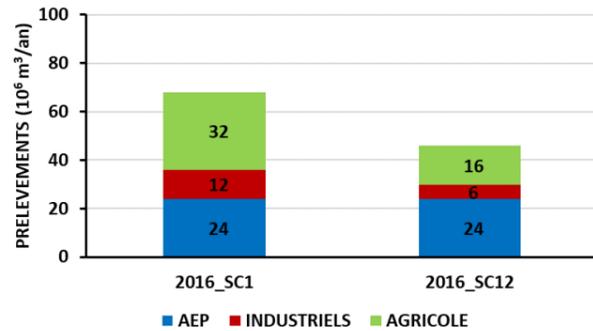
### DONNEES D'ENTREE

#### SYNTHESE

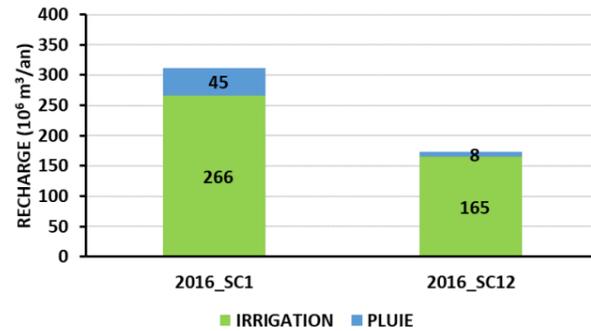
- Climat
- Occupation des sols
- Conditions de recharge
- Condition de prélèvements
- Condition de référence

**Climat 2013-2018 avec un déficit en pluie de 50% en 2015-2016**  
 Observation 2016  
**Arrêt de l'irrigation à partir de juillet 2016**  
**Interdiction prélèvements agricoles et industriels de juillet à décembre 2016**  
 Scénario 8 (sécheresse 2015-2016 sans mesures de gestion)

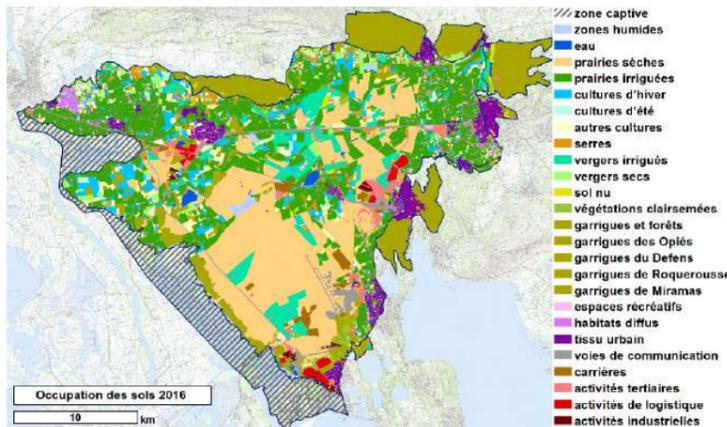
#### PRELEVEMENTS 2016



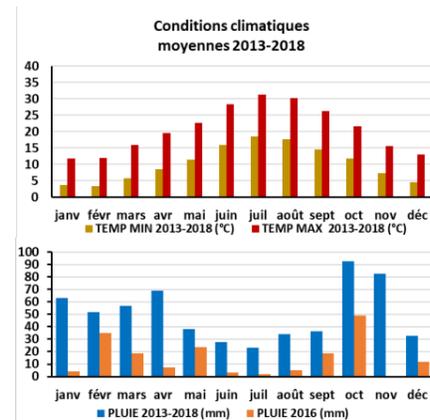
#### RECHARGE 2016



#### OCCUPATION DES SOLS

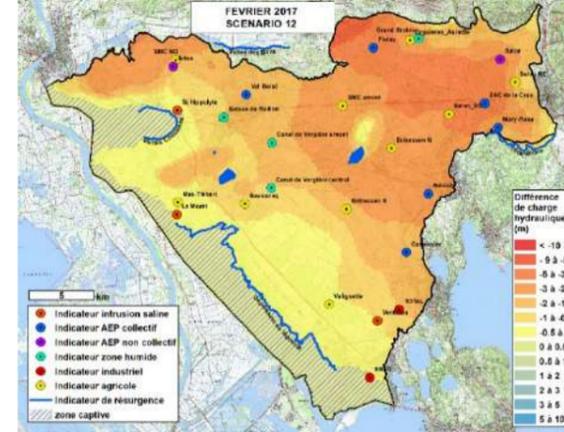


#### CONDITIONS CLIMATIQUES

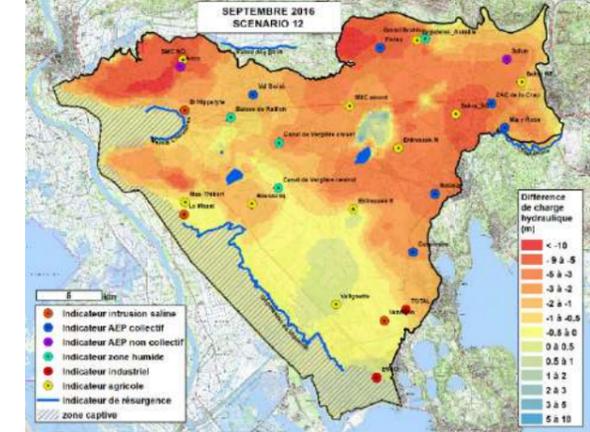


### RESULTATS

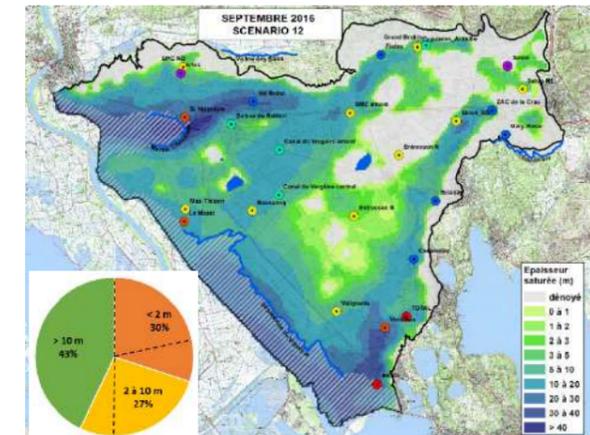
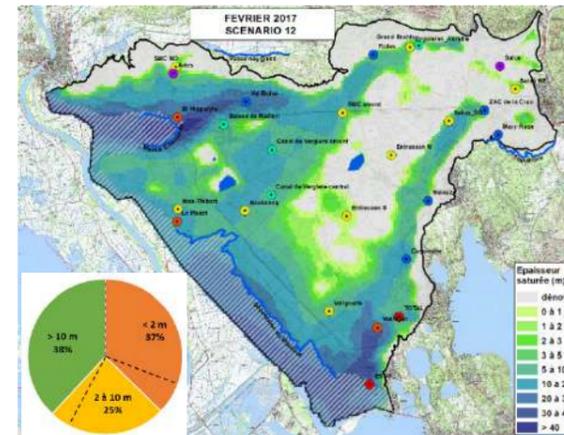
#### BASSES EAUX - février 2017



#### HAUTES EAUX MOYENNES - septembre 2016

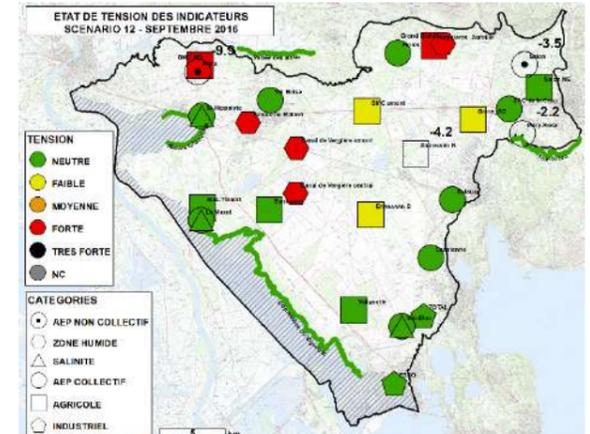
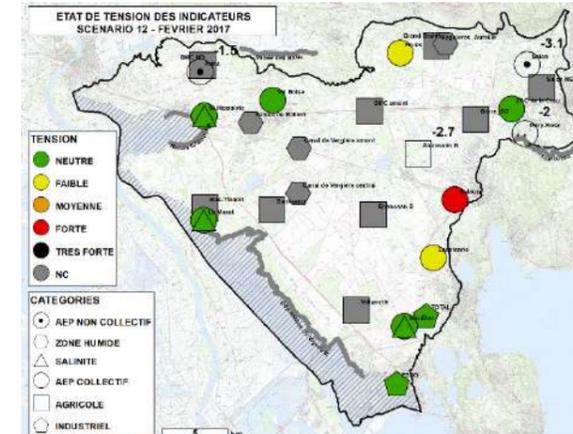


Différence de charge hydraulique par rapport à la simulation de référence (scénario 8)



Répartition spatiale et statistique de l'épaisseur de zone saturée dans les cailloutis en basses et hautes eaux

#### INDICATEURS



Classement individuel des indicateurs en février 2017 et septembre 2016

**ANALYSE :** Le déficit de recharge en 2016 se creuse (173 Mm<sup>3</sup> contre 299 Mm<sup>3</sup>) avec la baisse des volumes disponibles pour l'irrigation. La piézométrie est en baisse, avec une diminution des niveaux piézométrique atteignant 3-5 m en septembre 2016 et 3 m en février 2017, au nord du ligne Istres - Mas-Thibert. Certains secteurs très localisés montrent une légère tendance à la hausse en lien avec les restrictions sur les prélèvements (nord d'Entressen, Valignette). En septembre 2016, 30% (+8%) de la surface de la nappe présente une épaisseur inférieure à 2 m. En février 2017, cette très faible épaisseur est de 37% de la nappe (+5%).

Des tensions fortes apparaissent pour l'ensemble des indicateurs piézométriques « zones humides » dès juillet 2016 et en été 2017. Une grande partie des indicateurs agricoles sont classés en tension « faible », avec un état de tension forte pour « Aureille » et « St Martin nord-ouest » en été 2016 et « Entressen sud » en été 2017. Des points indicateurs « AEP collectifs » se placent en situation de tension faible en hiver 2017 et janvier 2018 (Les Fioles, Caspienne). L'indicateur AEP collectif « Sulauze » est soumis à une tension « forte » en hiver 2017. L'AEP privée est en état de tension forte dans le secteur de Salon (-3.1 m en basses eaux) et en état de tension moyenne dans le secteur d'Arles (-1.5 m en basses eaux).

Globalement, la gestion non anticipée de l'alerte par restrictions drastiques appliquées en milieu de saison d'irrigation, a un impact fort sur les usages (AEP collective et privée, irrigation agricole) et les fonctionnalités écologiques. Les tensions sur les indicateurs sont notablement plus accentuées que pour la gestion d'alerte anticipée (scénario 11).

### 3.3.4 CONCLUSIONS SUR LA GESTION DES CRISES HYDRIQUES

Dans le cadre du projet SINERGI, nous avons essayé d'appréhender l'impact sur la ressource d'un événement exceptionnel de sécheresse, ici une diminution de 50% des précipitations durant deux années consécutives et ce dans un contexte climatique actuel.

#### UN PREMIER RESULTAT SURPRENANT

Le premier scénario simulé a été celui d'une sécheresse sévère consécutive sur deux années sans aucune mesure de restriction (scénario 8).

Avec un tel scénario de sécheresse sévère, le modèle prédit une augmentation de l'usage irrigation qui se traduit à volume irrigué égal par une augmentation des volumes infiltrés (augmentation de 266 à 290 Mm<sup>3</sup>/an) qui compense partiellement la diminution de la recharge liée à l'infiltration des eaux de pluie (baisse de 45 à 9 Mm<sup>3</sup>/an). Le déficit global est donc seulement de -13 Mm<sup>3</sup>/an avec de faibles impacts sur les usages et les milieux.

**Le système actuel avec son niveau de dotation est donc relativement bien dimensionné pour supporter des sécheresses sévères étalées sur deux ans, que ce soit aujourd'hui ou demain en tant compte des évolutions attendues liées au changement climatique.**

**Ce constat est à nuancer : en cas de demande accrue liée à une forte évapotranspiration, le système de canaux ne permet pas une augmentation importante de l'irrigation sans conduire à des tensions entre usagers. Typiquement l'amont du système est relativement bien servi tandis que l'aval a du mal à s'approvisionner, comme cela a pu être observé au cours de l'année 2016.**

De même ce premier scénario suppose que la disponibilité de la ressource en eau n'est pas limitée par les effets des changements climatiques ou l'impact d'une sécheresse sévère.

#### DES OUTILS DE GESTION AUX EFFETS CONTRASTES SUR LE DEFICIT DE LA RESSOURCE

Pour appréhender l'impact d'épisodes de sécheresse exceptionnelle, deux niveaux de restrictions ont été ainsi envisagés : stade d'alerte si l'état des masses d'eau ne présente pas de tensions importantes et stade de crise si les masses d'eaux présentent un déficit grave. Deux modes de réponses sont également testées : (1) une anticipation du risque déployant des mesures de restrictions modérées sur une période longue, (2) une gestion non anticipée déployant des mesures fortes sur une période plus courte.

Le bilan des flux des différents scénarios de gestion de sécheresse conjoncturelle montre un effet contrasté sur le déficit de la ressource, selon les leviers de restriction actionnés (tableau 45). Celui-ci montre d'une part que toute réduction de volume irrigué se traduit par des déficits de ressource, qui amplifient les effets de la période sécheresse en aggravant la diminution des niveaux de nappe. D'autre part, les réductions ou les interdictions de prélèvements ont pour conséquence de diminuer le déséquilibre quantitatif.

**En termes d'efficacité, on peut retenir que toute politique de réduction structurelle ou temporaire des volumes d'eau destinée à l'irrigation issue de la Durance conduira à aggraver les baisses de nappe en période de fortes sécheresses et ce même pour des réductions a priori modestes (-10 à -20% sur 4 à 8 mois seulement).**

**La réduction des prélèvements en nappe pour les usages non prioritaires aura un impact limité. Elle pourra venir en partie compenser des déficits annuels de la ressource, dont la part liée à la faiblesse des pluies est comprise entre 30 et 40 Mm<sup>3</sup>/an.**

SCENARIOS CONJONCTURELS	Description	Recharge 2016 par rapport à l'état de référence (Mm <sup>3</sup> /an)	Prélèvements par rapport à l'état de référence (Mm <sup>3</sup> /an)	Déficit pour la ressource (Mm <sup>3</sup> /an)
<b>Scénario 8</b>	Sécheresse sévère en 2015 et 2016 sans mesures de restriction	-13	0	-13
<b>Scénario 9</b>	Sécheresse 2015-2016 : situation d'alerte anticipée	-52	-7	-44
<b>Scénario 10</b>	Sécheresse 2015-2016 : situation d'alerte renforcée	-46	-11	-35
<b>Scénario 11</b>	Sécheresse 2015-2016 : situation de crise anticipée	-131	-26	-105
<b>Scénario 12</b>	Sécheresse 2015-2016 : situation de crise non anticipée	-138	-22	-116

**Tableau 45 Bilan quantitatif pour chaque scénario de gestion d'un épisode de sécheresse**

#### DES USAGES ET UNE ALIMENTATION DES MILIEUX SOUS TENSION SELON LES ACTIONS DE GESTION DE LA SECHERESSE

Si le système actuel est capable de maintenir, en cas de sécheresse, l'ensemble des usages et une alimentation satisfaisante des zones humides, celui-ci est totalement dépendant de la ressource en eau durancienne. Or, il est probable qu'une sécheresse sur le territoire de la nappe s'accompagne de tension hydrique majeure sur le système durancien et que des mesures de restriction s'appliquent sur les volumes d'eau mise en irrigation.

La simulation des différents scénarios de gestion montre que des restrictions modérées (-20% sur les prélèvements et -10% sur les volumes d'eau destinée à l'irrigation) et appliquées suffisamment en amont (de mars à octobre), a **un impact modéré sur les usages et l'alimentation des milieux (scénario 9). Des mesures plus tardives (de juillet à octobre) et un peu plus fortes (volume irrigué -20% et prélèvements -50%) ont un impact un peu plus important mais restent modérées sur les usages et les fonctionnalités écologiques.**

**Si des mesures plus drastiques devaient être appliquées (scénarios de gestion de crise 11 et 12), des tensions importantes affecteraient les zones humides, les prélèvements agricoles et l'AEP privée.** De manière générale, il peut être observée que les effets des mesures perdurent dans le temps et peuvent impacter les usages durant 1 à 2 ans après leur application. Des captages vulnérables comme celui de Sulauze ou de la Caspienne se révèlent sensibles aux importantes baisses de volume irrigué, même temporaires, lors de périodes de basses-eaux consécutives aux épisodes de sécheresse.

Globalement il est à noter que les mesures de gestion anticipée, si elle crée un déficit plus précoce, permettent de maintenir des usages et une alimentation des milieux dans un état plus satisfaisant sur le moyen terme que lorsque des mesures plus drastiques et plus tardives sont prises (gestion non anticipée).

## 4 ENSEIGNEMENTS ET DISCUSSION

### 4.1 QU'EST-CE QUE NOUS APPREND SINERGI ?

#### 4.1.1 UNE REDUCTION DES INCERTITUDES SUR LE FONCTIONNEMENT DU SYSTEME AQUIFERE

##### UNE VISION DETAILLEE DES FLUX ENTRE LES DIFFERENTS HYDRO-SYSTEMES

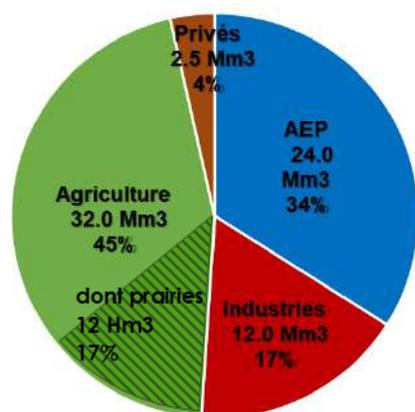
En début d'étude la connaissance sur le bilan hydrique de la nappe de la Crau était basée sur un équilibre entrée/sorties compris entre 250 et 310 Mm<sup>3</sup>/an selon les études précédentes (SYMCRAU 2006a, Séraphin 2016b). Une forte incertitude prévalait sur la part d'eau issue de l'irrigation dans la recharge sur l'aire de la nappe, évoluant entre 67% et 78% selon les approches par modélisation et par bilan massique de proportion de mélange établi par chimie isotopique (Séraphin 2016b). Une grande incertitude également sur les captages agricoles, réputé premier usagés de la nappe de la Crau mais dont le prélèvement total estimé entre 22 et 52 millions m<sup>3</sup>/an.

**Dans le cadre de SINERGI, une actualisation importante du bilan a été réalisée.**

Pour partie basée sur une reprise et une exploitation des données existantes, elle intéresse les termes suivants :

- **Apport latéraux souterrains** : Une étude spécifique a été réalisée pour identifier les aquifères en interaction avec la nappe de la Crau et pour estimer les conditions de flux entrant et sortant (HYDROFIS, 2018). Elle a permis de réviser et d'actualiser les estimations antérieures : Au global, les flux « perdants » de la nappe de la Crau au profit d'aquifères bordiers seraient compris entre 30 et 40 Mm<sup>3</sup>/an alors que les flux « gagnants » pour la nappe sont plus faibles (compris entre 7 et 10 Mm<sup>3</sup>/an).

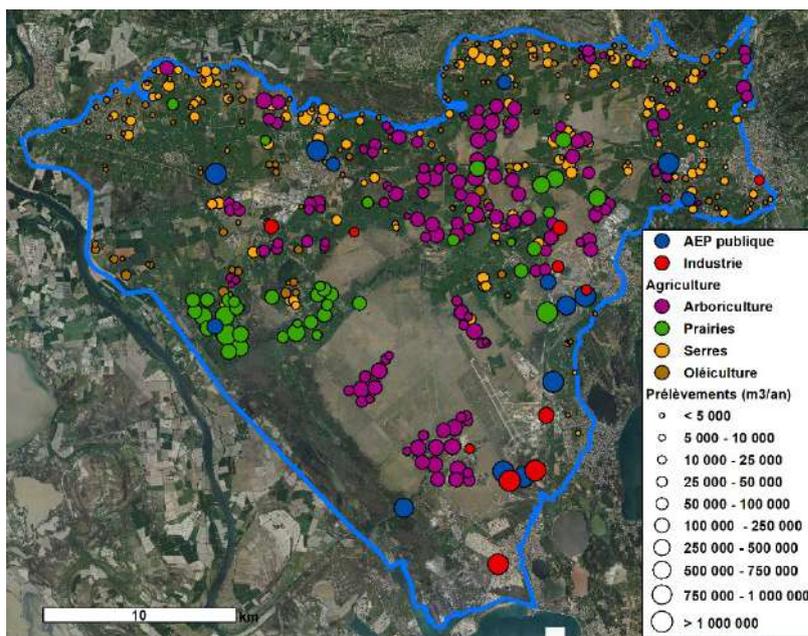
- **Prélèvements** : Une actualisation des volumes prélevés a été réalisée à partir des données de l'Agence de l'Eau ; cette dernière donne un prélèvement moyen pour l'AEP de 24 Mm<sup>3</sup>/an entre 2012 et 2016 et les prélèvements industriels représentent 11 captages pour un volume annuel moyen s'établissant autour de 12 Mm<sup>3</sup> par an entre 2012 et 2016. Concernant les prélèvements agricoles, à partir des données de l'OUGC mais aussi de la consommation surfacique moyenne par types d'usages agricoles, nous avons produit une nouvelle estimation de ces prélèvements à environ 32 Mm<sup>3</sup>/an. Au final, en intégrant les prélèvements domestiques estimés à environ 2,5 Mm<sup>3</sup>/an, on peut estimer un prélèvement actuel total dans la nappe à environ 71 Mm<sup>3</sup>/an (figure 93)



▲ Bilan

➤ Répartition spatiale

**Figure 93 Prélèvements estimés sur la période 2013-2018**



De plus, l'exploitation du modèle hydrodynamique a permis de proposer une quantification précise des autres termes du bilan qui peuvent être déduit d'une simulation des variations de nappe entre 2013 et 2018. Les flux globaux sont détaillés dans le schéma intégratif ci-dessous (figure 94) :

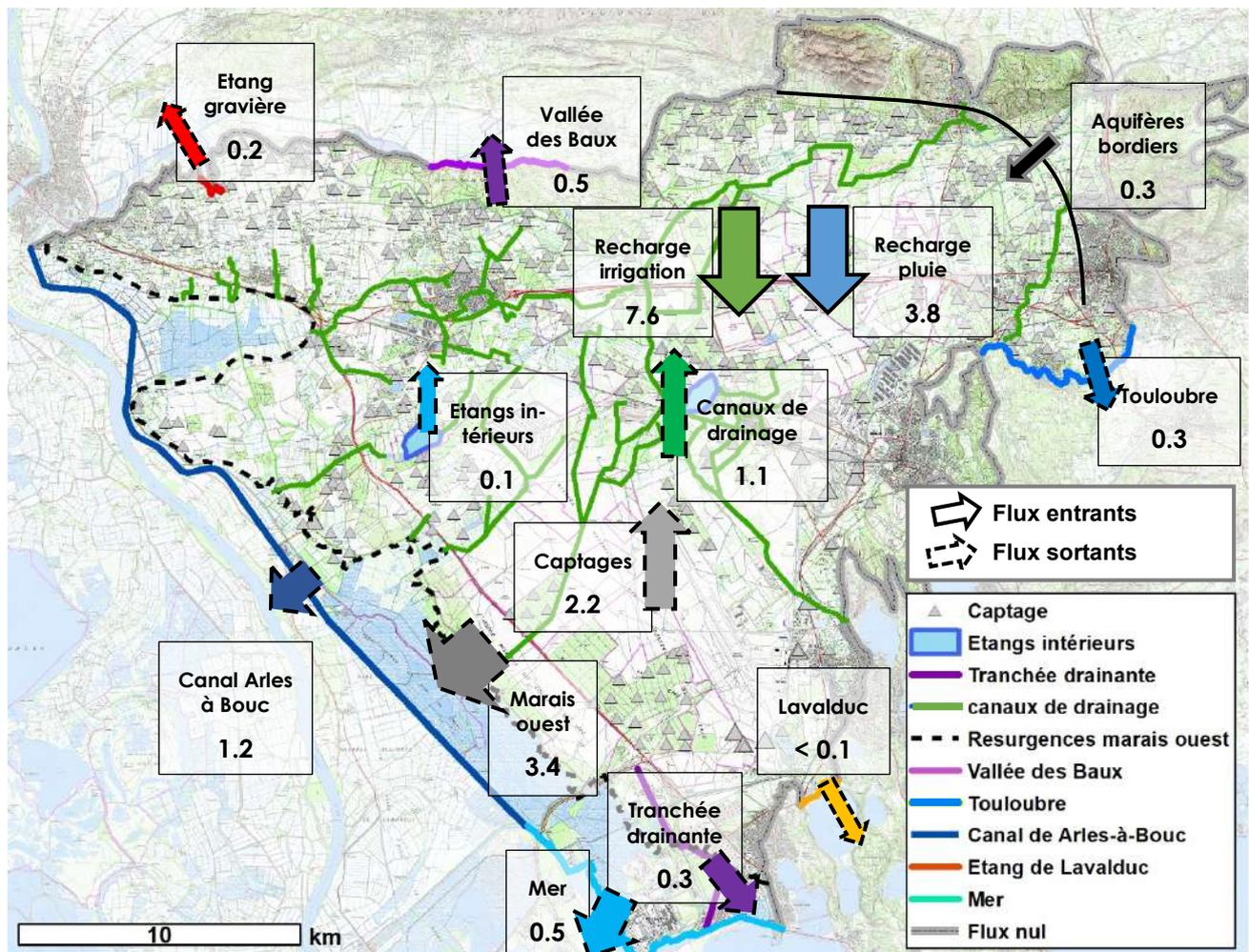


Figure 94 Bilan des flux entrant et sortant de la nappe de la Crau exprimés en m³/s

Ce nouveau bilan représente un gain de connaissance important. Il propose notamment un lien quantitatif entre les hydro systèmes superficiels et souterrains. Notamment, en ce qui concerne les exutoires naturels de la nappe, il détaille la répartition des flux alimentant les hydrosystèmes bénéficiaires, ce qui n'avait jamais été proposé.

Dans ce bilan, on retiendra les grands ordres de grandeur suivants qui représentent des moyennes interannuelles sur la séquence 2013-2018.

Pour la recharge :

- Environ 240 Mm³/an d'eaux d'irrigation infiltrées au bénéfice de la nappe en moyenne interannuelle.
- Environ 120 Mm³/an d'eaux souterraines correspondant à l'infiltration des eaux de pluie.
- Environ 10 Mm³/an d'alimentation souterraine en provenance des aquifères bordiers.

Pour les modalités de vidange :

- Environ 300 Mm³/an qui alimentent les zones humides en bordure de Crau (principalement les marais sur la bordure Sud mais aussi la dépression des Baux et la Touloubre).
- Environ 70 Mm³/an d'eaux souterraines prélevées par forages.

Un autre terme important du bilan concerne les eaux mises dans le système d'irrigation mais qui le traversent sans jamais être utilisées. Cela représente environ 100 Mm<sup>3</sup>/an sur les 425 Mm<sup>3</sup>/an mis dans ces canaux (Figure 95). Ces eaux généralement relativement chaudes et turbides par rapport aux eaux souterraines alimentent ainsi directement différents hydro systèmes : la Touloubre, les étangs d'Entressen et des Aulnes mais aussi le Marais des Chanoines, via le canal de Chalavert, et l'étang de Berre via le canal intersyndical de l'étang d'Entressen à l'étang de l'Olivier.

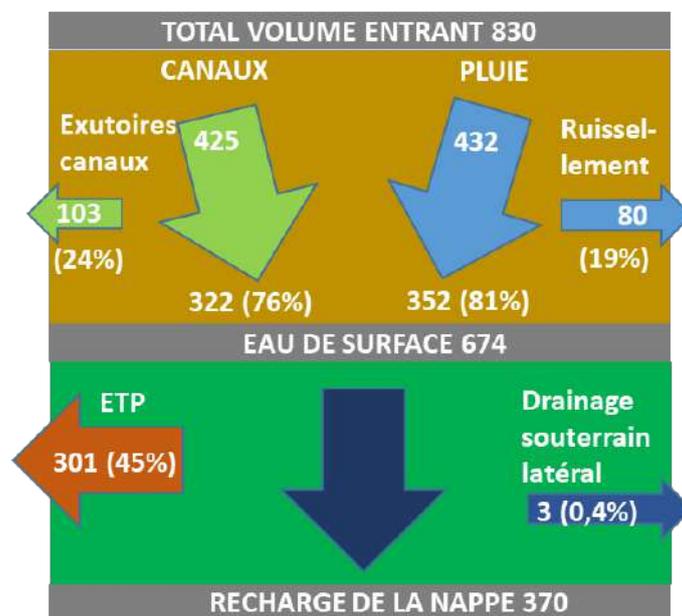


Figure 95 Bilan en entrée du système aquifère (flux en Mm<sup>3</sup>/an), ETP = évapotranspiration

Un autre résultat important est de montrer que la variation interannuelle de la recharge est assez forte (figure 96). Elle oscille entre 300 Mm<sup>3</sup>/an en année sèche (2016, 2017) et 480 Mm<sup>3</sup>/an en année humide (2018). Ceci contraste avec les oscillations de la nappe dont les tendances interannuelles sont relativement stables. **Ceci indique que les charges hydrauliques, et donc les écoulements, sont très contraints par les systèmes de drainage superficiel (canaux, marais, étangs) en grande partie mis en place par l'Homme sur ce territoire qui contrôlent les flux d'eau souterraines et l'expression de certains écosystèmes.**

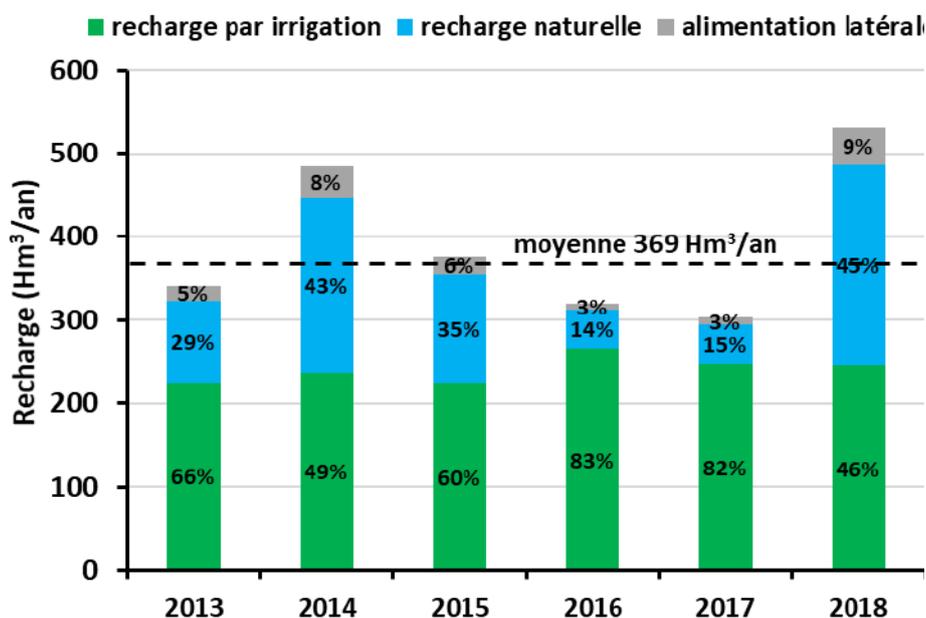
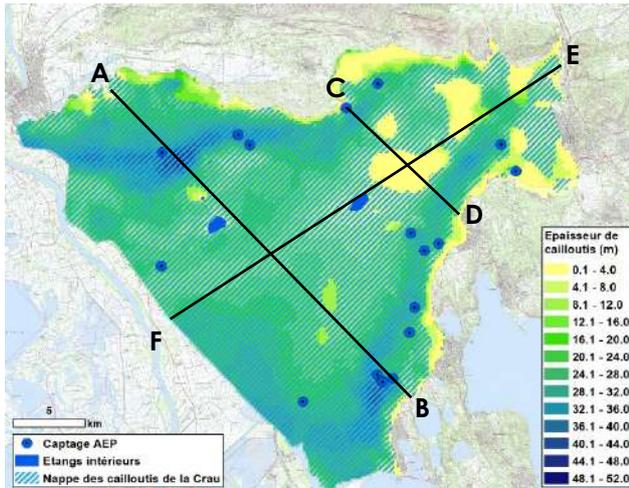


Figure 96 Evolution interannuelle de la recharge

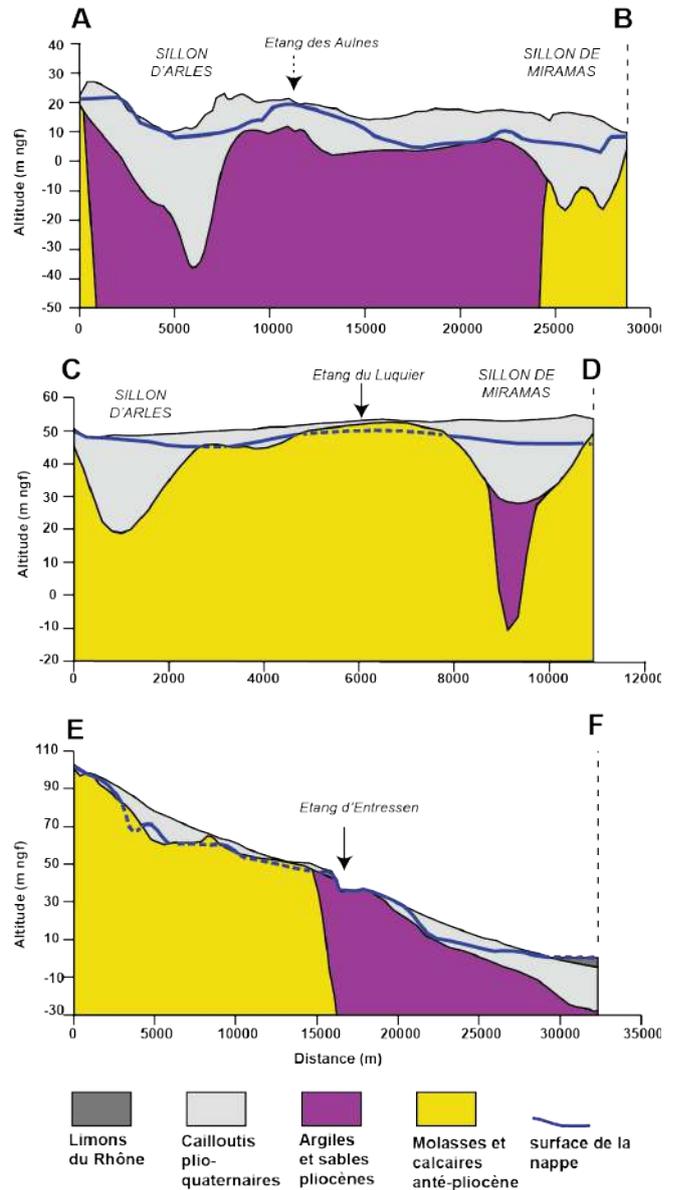
## UNE NAPPE DANS UN SYSTEME AQUIFERE

L'approche systématique de reconstruction des grandes interfaces géologiques a permis de proposer une surface relativement précise du mur des cailloutis aquifères, se basant sur les études précédentes (BRGM 2004, Séraphin 2016a). La cartographie de l'épaisseur des cailloutis en eau indique qu'une grande surface de zone de cailloutis est dénoyée, sur les bordures de la nappe mais aussi dans sa partie amont et le long d'un haut fond orienté N040 et qui passe par l'étang d'Entressen (Figure 97). Au nord-est de ce secteur en particulier, cela ne signifie pas que la nappe n'existe pas mais qu'elle est dans la formation sous-jacente aux cailloutis quaternaires, c'est à dire la molasse miocène ou les argiles pliocènes. On voit apparaître un autre haut fond, de plus petite dimension, dans le secteur de l'étang des Aulnes.



- ▲ Nappe des cailloutis
- Coupes hydrogéologiques

**Figure 97** Emprise de la nappe dans l'aquifère des cailloutis de la Crau (condition de charge moyenne) et coupes hydrogéologiques



Cette géographie de hauts fonds est importante car elle cloisonne partiellement la nappe de la Crau. Ainsi, la nappe de la Crau se place dans un système aquifère distinguant quatre grandes unités:

- Le sillon oriental de Miramas.
- le sillon occidental d'Arles.
- le sillon central de Mas-Thibert, entre l'étang des Aulnes et celui d'Entressen.
- la molasse Miocène.

La nappe du sillon d'Arles et celle de Mas-Thibert sont en connexion dans le secteur du Coussoul d'Ase. La nappe du sillon d'Arles et du sillon Miramas sont en relation au travers des molasses miocènes qui jouent le rôle de relais hydraulique. Cette compartimentation explique en partie la différenciation géographique des dynamiques piézométriques décrites au chapitre 2.1.8.

**On devine en regardant ces coupes que toute baisse significative des niveaux de nappe renforcera cette compartimentation structurelle. C'est un point de compréhension important : plus la nappe sera sollicitée, plus les effets locaux vont se renforcer en diminuant les interrelations des différentes « nappes ».**

#### DES ENJEUX POUR LA GESTION DE LA RESSOURCE IDENTIFIES ET CARTOGRAPHIES

Ce travail a permis d'identifier la globalité des enjeux de gestion de la nappe et de les caractériser par des indicateurs de tension :

- Intrusion saline à proximité de champs captant AEP.
- Champs captant AEP collectif et zones de haute densité de forages domestiques (AEP non collectif).
- Zones de forages pour l'usage agricole.
- Champs captants pour l'industrie.
- Zones humides en relation avec la nappe de la Crau.

L'ensemble des enjeux identifiés sont représentés sur la carte de la figure 98.

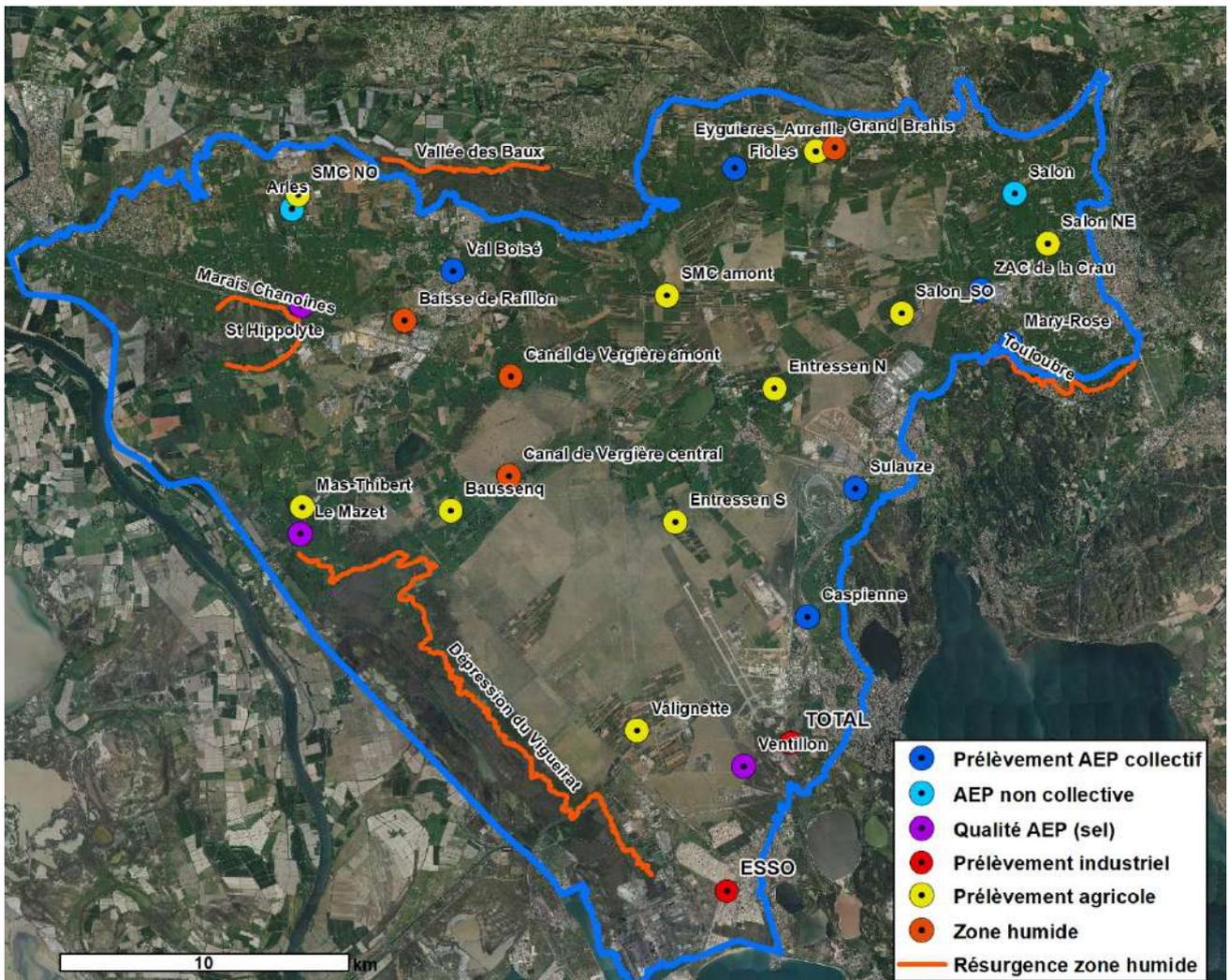


Figure 98 Enjeux de la nappe de la Crau

**SINERGI** montre que dans son état actuel d'influence, la nappe de la Crau permet de satisfaire la majorité de ces usages préleveurs sans tension. Les modélisations montrent que seules quelques zones avec des forages agricoles subirait une petite baisse de productivité lors des étiages sévères.

**Concernant les zones humides, SINERGI confirme une forte dépendance à la nappe de ces milieux naturels à haute valeur écologique.**

En limite de la partie libre, la nappe de la Crau alimente, sous forme de résurgences ou par exfiltration diffuse, des zones humides qui constituent un patrimoine écologique exceptionnel, en particulier les sites Natura 2000 des « Trois marais » incluant la Réserve naturelle nationale des Marais du Vigueirat, et ceux de la vallée des Baux. Ces espaces naturels sont classés comme habitat prioritaire par l'Union Européenne. Ils abritent des espèces végétales protégées ou rares et représentent un habitat de nidification pour plusieurs espèces d'oiseaux listées sur la Directive Oiseaux. 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 qui les bordent.

A l'intérieur de la zone libre, des zones humides, telles des forêts alluviales ou ripisylve, des plans d'eau (notamment étang des Aulnes et d'Entressen mais aussi les zones humides du Bois de Brahis, de Bausse et de la Baisse du Raillon) sont liées à des affleurements ou à une faible profondeur de la nappe.

Dans le cadre de SINERGI, une étude spécifique a été réalisée pour essayer de caractériser la dépendance de ces deux types de zones humides à la nappe de la Crau (ECOSPHERE 2018). 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 (Baillieux et al, 2020) :

1. des habitats humides fortement dépendants des eaux souterraines, généralement de fort intérêt écologique.
2. des habitats humides plus communs alimentés exclusivement par les eaux de surface.
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.
4. une absence d'habitats humides dans des secteurs de faible profondeur de nappe.

De plus, cette étude a permis de distinguer les zones humides qui dépendent d'un niveau de nappe (zones humides à l'intérieur des terres) de celles qui dépendent d'un flux en provenance de la nappe qui apporte des eaux de bonne qualité, douce et relativement froide (zones humides en bordure de la Crau). Le tableau 46 résume ces enjeux.

Zone humide	Habitats humides établissant l'enjeu écologique	Type de dépendance aux eaux de la nappe de la Crau
Baisse de Raillon	Phragmitaies Cladiaies	Dépendance à un niveau de nappe de la Crau
Grand Brahis	Ripsisylves Marais permanent (Fougère des marais)	
Bausseuq / canal de Vergières central	Prairies humides / Cladiaies	
Canal de Vergière amont	Odonates	
Marais des Chanoines	Cladiaies et laurons Prairies humides Reliques glaciaires	Dépendance à un flux en provenance de la nappe de la Crau
Touloubre	Ripsisylves	
Marais de l'Ilon et des Quatre Platanes / vallées des Baux	Cladiaies, Reliques glaciaires	
Marais de la dépression du Vigueirat	Cladiaies Reliques glaciaires	

**Tableau 46 Zones humides identifiées dépendantes de la nappe de la Crau**

**Dans son état actuel d'influence, la nappe de la Crau permet de satisfaire le bon état de toutes ces zones humides.**

#### 4.1.2 ANALYSE PROSPECTIVES DE L'EVOLUTION DE LA RESSOURCE EN EAU SOUTERRAINE ET DE SES USAGES

A partir du modèle MHYCRAU, il a été étudié comment évoluerait le degré de satisfaction des usages et alimentation des milieux naturels, si les conditions de recharge et de prélèvements venaient à évoluer. Cette étude se base sur une analyse comparative de plusieurs configurations de flux dans le système : des variations du couple recharge/prélèvements en conditions climatiques actuelles, un épisode de sécheresse s'accompagnant de différents dispositifs de gestion de pénuries d'eau et différents scénarios d'évolutions du territoire à l'aune des conditions climatiques envisageable en 2050.

##### LA NOTION DE DEFICIT DE LA RESSOURCE

Afin de pouvoir analyser les enjeux d'une éventuelle modification des usages en Crau, il convient de vérifier l'équivalence à volumes constants entre prélèvements et baisse de recharge. A partir des indices mensuels de tensions pour chaque enjeu (eau potable publique, eau potable privée, zones humides, besoins agricoles et industriels), il est possible d'analyser les impacts différentiels à volume de déficit équivalent pour la nappe, des baisses de recharge ou d'augmentation de prélèvements.

**Les résultats montrent que les scénarios qui présentent un même déficit cumulé portent la même information à 95% en termes d'impact sur les usages ou les milieux. On peut donc faire l'hypothèse que que les déficits sur la ressource, qu'ils soient issus d'une variation de recharge ou d'une variation de prélèvements, aura un impact sensiblement équivalent sur les différents enjeux.**

Il apparaît quelques différences mineures pour les indicateurs de pompages agricoles ; c'est une conséquence attendue. La baisse de volumes d'eau mise en irrigation entraîne une diminution relativement répartie dans l'espace des niveaux de nappes ; l'augmentation des prélèvements agricoles conduit à des baisses de nappe forcément plus localisées au droit des grandes zones de pompage.

De façon plus anecdotique, il est observé des différences de sensibilité au droit de certaines zones humides localisés près de grandes zones de pompage agricole (Vergière centrale et Grand Brahis).

##### APPROCHE SYSTEMIQUE DE LA SENSIBILITE DE LA NAPPE AUX CONDITIONS DE RECHARGE ET DE PRELEVEMENTS

A partir du modèle MHYCRAU, il a été conduit une analyse de sensibilité des indicateurs aux baisses de volume irrigué et aux variations sur les prélèvements agricoles (à la hausse et à la baisse). Cette analyse permet de quantifier, d'une part, les conséquences de ces variations sur les indicateurs d'état de la ressource et, d'autre part, les marges de manœuvre existantes pour conserver tout ou partie des services rendus par la nappe.

On observe une gradation des impacts en fonction des catégories. **Les captages AEP privés dans le secteur de Salon, les zones humides dépendantes des niveaux de nappe et les prélèvements agricoles en secteur amont se révèlent être les enjeux les plus sensibles aux déséquilibres quantitatifs.**

- Un premier palier d'une bascule à un état de tension forte apparaît ainsi pour un déficit global de la ressource de 30 à 40 Mm<sup>3</sup>/an. Au-delà, il serait observé des baisses de productivité significatives des captages privés destinés à l'AEP et un assèchement important des zones humides dépendantes des niveaux de nappe.
- Un deuxième palier apparaît pour un déficit de ressource entre 80 à 100 Mm<sup>3</sup>/an. Dans cet intervalle, on observe des tensions fortes de façon récurrente sur les prélèvements agricoles en zone amont, sur les captages AEP privés d'Arles et les captages AEP collectifs les plus vulnérables (Sulauze et Caspienne).
- Un troisième palier de déficit se situe entre 150 et 180 Mm<sup>3</sup>/an. Avec de tels déficits de ressource, on observerait des tensions récurrentes et fortes sur quasiment tous les autres enjeux de nappe :
  - Augmentation du risque de salinisation du champ captant AEP de Mas-Thibert.
  - Diminution significative des flux d'eaux souterraines vers les hydro systèmes en bordure de Crau avec risque de déséquilibre du gradient eau douce – eau salée.

- Perte de productivité significative pour les forages agricoles en partie aval de la nappe.
- Baisse de productivité du captage industriel de TOTAL.

Sur la base de ces résultats et d'une hypothèse sur les tensions jugées acceptables par catégories d'indicateurs, il peut être estimé les marges de manœuvres existantes sur les volumes irrigués rechargeant la nappe et les prélèvements, tout en conciliant les usages de la nappe et l'alimentation des écosystèmes. De cette analyse il ressort :

- **Dans les conditions actuelles (volume irrigué et occupation du sol), il serait possible d'augmenter les prélèvements dans la nappe d'environ 20 Mm<sup>3</sup> tout conservant des conditions satisfaisantes pour les usages et l'alimentation des milieux.** Au-delà des tensions significatives affecteraient les usages agricoles, l'alimentation des zones humides et dans une moindre mesure l'AEP privée.
- **Une baisse d'environ 10% du volume d'eau appliquée sur les prairies aurait pour conséquence de limiter les capacités de prélèvements supplémentaires à + 5 Mm<sup>3</sup>/an.**
- **Une baisse plus importante des volumes d'eau alloués à l'irrigation (-20%) créerait un déséquilibre structurel pour l'alimentation des milieux humides et les prélèvements pour l'AEP privée.**

#### SIMULATION PROSPECTIVE D'ÉVOLUTIONS STRUCTURELLES A L'HORIZON 2050

L'analyse prospective à l'horizon 2050 montre qu'une l'évolution climatique selon un scénario médian du GIEC conduirait à une baisse de la recharge de l'ordre de 25 Mm<sup>3</sup>/an, principalement par augmentation de l'évapotranspiration (tableau 47). Le tableau 48 permet de comparer l'impact des différentes situations qui pourrait contrôler le fonctionnement de l'hydrosystème en 2050.

En considérant une occupation des sols, des conditions d'irrigation et des prélèvements inchangées par rapport à l'actuel (scénario 1), l'état de la nappe à l'horizon 2050 serait ainsi relativement proche de l'état en 2010. Des années particulièrement sèches peuvent cependant mettre les usages agricoles et la fonction d'alimentation des zones humides dépendantes des niveaux de nappe sous tension « faible ».

	2013-2018	2053-2058	Déficit
recharge totale	369.3	343.0	-26.3
recharge naturelle	127.9	107.6	-20.3
recharge liée à l'irrigation	241.4	235.5	-5.9
évapotranspiration	301.2	312.5	+11.3

**Tableau 47 Comparaison des flux de recharge et d'évapotranspiration entre la période 2013-2018 et la période 2053-2058 (moyenne en Mm<sup>3</sup>/an)**

Cependant le changement climatique va réduire les marges de manœuvre actuelles pour la satisfaction des usages et du bon état des milieux associés à la nappe. **La simple continuité des politiques passées et actuelles d'aménagement (scénario 2) ou la transformation des pratiques culturelles (scénario 3) va conduire à des situations de crise, centrées sur l'assèchement d'une part importante des zones humides dépendantes des niveaux de nappe et sur une baisse de productivité des pompages agricoles et des captages AEP individuels, particulièrement dans la partie Nord de la plaine de Crau.**

Enfin **des scénarios de rupture**, avec un abandon d'une surface significative de prairies (scénario 4 et 5), de fortes baisses de volumes d'eau destinée à l'irrigation fortes (-30%) non compensées par des améliorations de rendement de réseau d'adduction d'eau agricole (scénario 6), ou un abandon de la pratique d'irrigation gravitaire, **auraient pour conséquence de changer complètement le fonctionnement de l'hydrosystème de la Crau, et par conséquence les services rendus par la nappe et ses usages. Ceci impliquerait de revoir toute l'organisation socio-économique du territoire, le schéma d'alimentation en eau potable et réduirait la qualité du territoire en termes de biodiversité.**

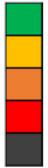
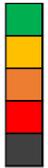
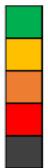
SCENARIO 1 ETAT DE REFERENCE HORIZON 2050 DEFICIT -25 Mm <sup>3</sup> /an			SCENARIO 2 et 3 DIVERSIFICATION DES CULTURES ou ETALEMENT URBAIN HORIZON 2050 DEFICIT -50 Mm <sup>3</sup> /an			SCENARIO 4 BAISSE 20% DES VOLUMES IRRIGUES CONDUISANT A ABANDONNER DES PRAIRIES DEFICIT -80 Mm <sup>3</sup> /an					
<b>ETAT DES INDICATEURS</b> Tension neutre Tension faible Tension moyenne Tension forte Tension très forte 			<b>CLASSEMENT INDICATEUR</b>			<b>ETAT DES INDICATEURS</b> Tension neutre Tension faible Tension moyenne Tension forte Tension très forte 			<b>CLASSEMENT INDICATEUR</b>		
<b>Zones humides</b>	Centrales		<b>Zones humides</b>	Centrales		<b>Zones humides</b>	Centrales				
	Périphériques			Périphériques			Périphériques				
<b>Agriculture</b>	Secteurs amonts		<b>Agriculture</b>	Secteurs amonts		<b>Agriculture</b>	Secteurs amonts				
	Secteurs avals			Secteurs avals			Secteurs avals				
<b>AEP public</b>	Captages vulnérables		<b>AEP public</b>	Captages vulnérables		<b>AEP public</b>	Captages vulnérables				
	Captages dans le miocène			Captages dans le miocène			Captages dans le miocène				
	Captages peu vulnérables			Captages peu vulnérables			Captages peu vulnérables				
<b>AEP privé</b>	Secteur Salon		<b>AEP privé</b>	Secteur Salon		<b>AEP privé</b>	Secteur Salon				
	Secteur Arles			Secteur Arles			Secteur Arles				
<b>Industries</b>	TOTAL		<b>Industries</b>	TOTAL		<b>Industries</b>	TOTAL				
	ESSO			ESSO			ESSO				
<b>Salinité</b>	Mas-Thibert		<b>Salinité</b>	Mas-Thibert		<b>Salinité</b>	Mas-Thibert				
	Ventillon et St Hyppolite			Ventillon et St Hyppolite			Ventillon et St Hyppolite				
<b>SCENARIO 5 ABANDON D'UN PERIMETRE IRRIGUE DEFICIT -100 Mm<sup>3</sup>/an</b>			<b>SCENARIO 6 VOLUMES IRRIGUES EN BAISSE DE 30% DEFICIT -125 Mm<sup>3</sup>/an</b>			<b>SCENARIO 7 ABANDON DE LA CULTURE DE FOIN - RETOUR A L'ETAT NATUREL DEFICIT -273 Mm<sup>3</sup>/an</b>					
<b>ETAT DES INDICATEURS</b> Tension neutre Tension faible Tension moyenne Tension forte Tension très forte 			<b>CLASSEMENT INDICATEUR</b>			<b>ETAT DES INDICATEURS</b> Tension neutre Tension faible Tension moyenne Tension forte Tension très forte 			<b>CLASSEMENT INDICATEUR</b>		
<b>Zones humides</b>	Centrales		<b>Zones humides</b>	Centrales		<b>Zones humides</b>	Centrales				
	Périphériques			Périphériques			Périphériques				
<b>Agriculture</b>	Secteurs amonts		<b>Agriculture</b>	Secteurs amonts		<b>Agriculture</b>	Secteurs amonts				
	Secteurs avals			Secteurs avals			Secteurs avals				
<b>AEP public</b>	Captages vulnérables		<b>AEP public</b>	Captages vulnérables		<b>AEP public</b>	Captages vulnérables				
	Captages dans le miocène			Captages dans le miocène			Captages dans le miocène				
	Captages peu vulnérables			Captages peu vulnérables			Captages peu vulnérables				
<b>AEP privé</b>	Secteur Salon		<b>AEP privé</b>	Secteur Salon		<b>AEP privé</b>	Secteur Salon				
	Secteur Arles			Secteur Arles			Secteur Arles				
<b>Industries</b>	TOTAL		<b>Industries</b>	TOTAL		<b>Industries</b>	TOTAL				
	ESSO			ESSO			ESSO				
<b>Salinité</b>	Mas-Thibert		<b>Salinité</b>	Mas-Thibert		<b>Salinité</b>	Mas-Thibert				
	Ventillon et St Hyppolite			Ventillon et St Hyppolite			Ventillon et St Hyppolite				

Tableau 48 Impact des scénarios prospectifs de la ressource à l'horizon 2050

### SIMULATION PROSPECTIVE D'UN ETAT DE SECHERESSE CONJONCTURELLE DANS LES CONDITIONS ACTUELLES

La figure 99 synthétise l'impact sur les indicateurs des différentes mesures de gestion qui pourraient s'appliquer sur la ressource en eau en cas de sécheresse sévère en période actuelle (2015 et 2016). Selon les résultats du scénario 8, **le système, avec la disponibilité des volumes aujourd'hui mis en irrigation, est relativement bien dimensionné pour supporter ce type d'aléa climatique**, que ce soit aujourd'hui ou demain en tant compte des évolutions attendues liées au changement climatique.

De l'analyse des mesures de gestion (scénarios 9 à 12), on peut retenir que toute politique de réduction structurelle ou temporaire des volumes d'eau de Durance mise en irrigation conduira à aggraver les baisses de nappe en période de fortes sécheresses et ce même pour des réductions a priori modestes (-10% à -20% sur 4 à 8 mois seulement). **La réduction des prélèvements en nappe pour les usages non prioritaires aura un impact limité. Elle pourra venir en partie compenser des déficits annuels de la ressource**, dont la part liée à la faiblesse des pluies est comprise entre 30 et 40 Mm<sup>3</sup>/an.

**Pour des restrictions modérées** (scénarios 9 et 10 de gestion d'alerte sécheresse), les impacts sur les indicateurs de la nappe concernent principalement les zones humides de Centre-Crau, avec des tensions faibles à fortes qui apparaîtraient ponctuellement durant une année après la mise en place des mesures de restrictions. Les prélèvements agricoles en tête de bassin versant connaîtraient également de faibles tensions.

**Des restrictions plus drastiques** (scénarios 11 et 12), avec des volumes d'eau destinée à l'irrigation baissant d'au moins 30% sur toute une période d'irrigation, auraient des impacts majeurs sur les indicateurs :

- L'alimentation des zones humides en centre-Crau basculeraient de manière constante en tension forte.
- Les prélèvements agricoles en tête de bassin versant seraient sous forte tension.
- Les captages AEP les plus vulnérables subiraient des difficultés techniques d'approvisionnement en période de basses-eaux : captages publics de Sulauze et de Caspienne, captages privés dans le secteur de Salon.

**De manière générale, il peut être observé que les effets des mesures perdurent dans le temps et peuvent impacter les usages durant 1 à 2 ans après leur application. L'année 2018 présente cependant un retour à des tensions neutres pour tous les indicateurs, quel que soit le scénario de gestion projeté.**

Enfin une analyse des impacts dans le temps indique des mesures tardives et plus drastiques ont légèrement tendances à avoir un impact plus négatif que des mesures moins fortes plus étalées dans le temps. En effet, des mesures fortes et tardives entraînent un gain sur l'état de la ressource en début de saison d'irrigation, par rapport aux mesures modérées et anticipées, mais les impacts plus marqués ont tendance à s'étaler plus longtemps après la crise.

**Ainsi, ces scénarios montrent que dans les configurations testées, les mesures appliquées de manière préventives semblent plus profitables sur le long terme pour la ressource et les usages associés, que des mesures fortes appliquées de manière tardive. Cette tendance dépend évidemment du degré de restriction et des périodes d'application, avec un équilibre qu'il conviendrait d'affiner par une étude complémentaire.**

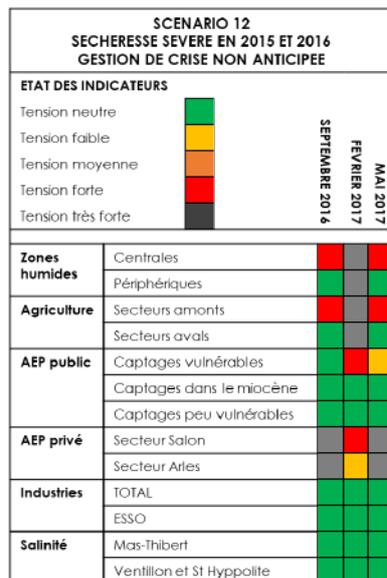
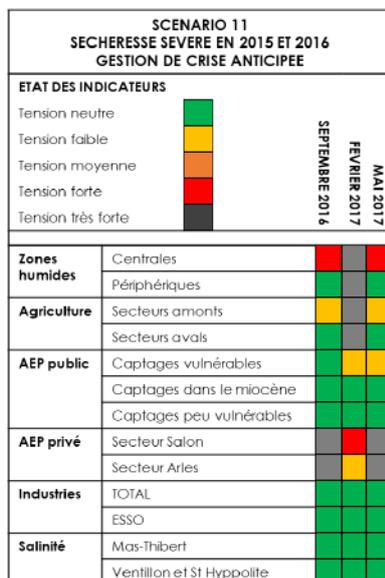
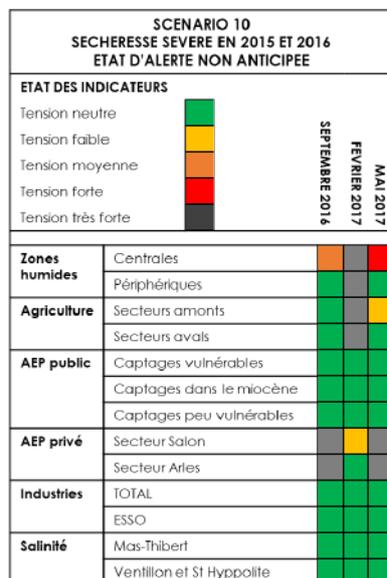
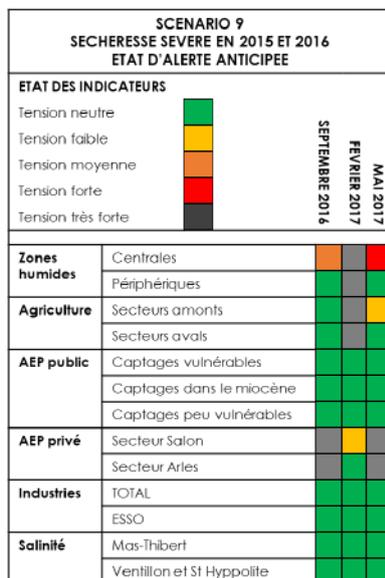
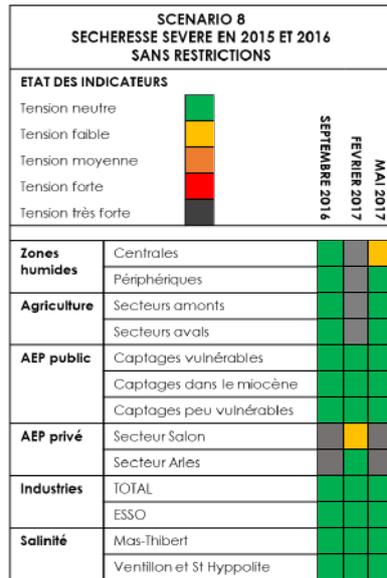
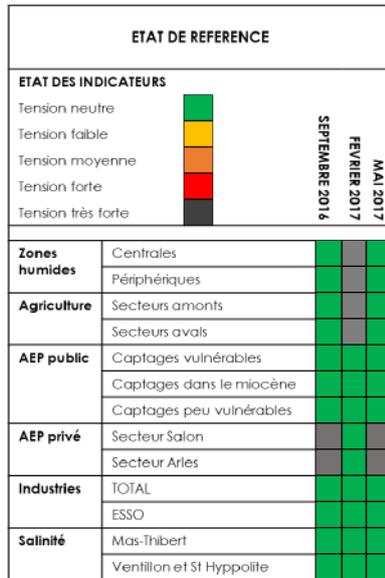


Figure 99 Impact des différentes mesures de gestion de la sécheresse

## 4.2 QUELLES STRATEGIES POUR L'AVENIR DE LA RESSOURCE EN EAU ?

### 4.2.1 COMMENT EVOLUERONT LES USAGES ET LES BENEFICES ACTUELS ?

#### LE DEFICIT HYDRIQUE SE CREUSERA DANS LE FUTUR

Le développement du territoire de la Crau est fortement lié à l'accès à sa ressource en eau, que ce soit pour les besoins socio-économiques (eau potable, besoins agricole et industriels) que pour l'alimentation des milieux naturels. L'équilibre quantitatif de cette ressource et son déficit par rapport à la situation actuelle est dépendante des volumes d'eau apportés par l'irrigation des prairies, les précipitations et les prélèvements par captage.

À l'horizon 2050, même en conservant les conditions du système de gestion actuel (scénario 1), des tensions apparaîtront pour l'AEP privée située en tête de bassin hydrogéologique (secteur Salon) et l'alimentation des milieux naturels. La disparition tendancielle des surfaces de prairies, inscrites dans les scénarios 2 et 3, aggrave le déficit à  $- 50 \text{ Mm}^3/\text{an}$  : zones humides et AEP privée commencent à basculer en tension forte.

**L'équilibre actuel aurait donc naturellement tendance à se dégrader avec les évolutions climatiques des prochaines décennies et les usages actuels sont voués à évoluer dans le futur. Cette tendance serait aggravée simplement par la disparition progressive d'environ 10% surfaces de prairies irriguées qui pourrait correspondre à la tendance actuelle (par urbanisation des terres agricoles ou changement de culture).**

Une baisse des volumes d'eau mise en irrigation de 20 à 30%, illustrée de manière progressive par les scénarios 4 à 6, ont pour conséquence un déficit sur la ressource compris entre 80 à 125  $\text{Mm}^3/\text{an}$ . Ce déficit fait franchir aux indicateurs le deuxième palier d'impact : tension forte pour certains prélèvements agricoles, l'AEP privée du secteur d'Arles, et les captages AEP collectifs les plus vulnérable.

**SINERGI montre ainsi que la gestion des volumes d'eau en Durance aura une répercussion très importante sur l'équilibre quantitatif de la nappe de la Crau et donc sur la satisfaction des usages de cette ressource. L'avenir de la ressource en eau, de ces usages et sa fonction d'alimentation des milieux naturels, dépendent donc des choix qui seront pris par les décideurs et les acteurs du territoire sur l'aménagement urbain, le développement agricole et le partage de l'eau du bassin versant de la Durance.**

#### L'AVENIR DE LA RESSOURCE DEPENDRA DES CHOIX DE GESTION DES ENJEUX LES PLUS VULNERABLES

L'alimentation des milieux naturels et les captages privés pour l'eau potable et l'agriculture seraient les premiers enjeux impacts par le déficit de la ressource dans le futur. Il se pose ainsi la question de conserver un objectif de conservation de toute la potentialité de ces usages ou de procéder à une révision de ces objectifs.

➤ Avant la mise en eau de la partie Nord de la plaine de Crau grâce aux canaux d'irrigation, les zones humides de centre Crau, alimentées par un mélange d'eaux superficielles et d'eaux souterraines, n'existaient probablement pas. **Ce constat interroge sur leur naturalité et leur qualité, et donc sur la nécessité de leur conservation sur le long terme.**

La simulation du scénario 7 dit de retour à l'état naturel (système Crau non influencé par les usages anthropiques) permet d'illustrer, d'appréhender cette problématique. Les baisses de niveau de nappe sont alors spectaculaires (plus de 20 m dans la partie Nord-Est de la nappe, entre 5 et 10 m en partie centrale) et conduisent à « dénoyer » plus de 50% de la superficie de la nappe. Bien évidemment, toutes les zones humides en position centrale dans la plaine de Crau disparaîtraient et les usages préleveurs ne sont alors plus possibles que dans les parties terminales des sillons d'Arles, du Mas-Thibert et de Miramas mais avec un risque accru de pénétration à l'intérieur des terres du biseau salé. De plus, il est important de souligner que ce scénario de la naturalité montre que les flux d'eaux

souterraines qui alimentent les zones humides en bordure de la plaine de Crau sont diminués de presque 70% ; on peut en déduire qu'avant l'aménagement des systèmes d'irrigation de la plaine de Crau, ces étangs étaient alors plus salés, plus proche en termes de modèle de ce que l'on observe sur le littoral languedocien.

Deux questions fondamentales se posent donc au territoire : **les zones humides, présentant une richesse naturelle exceptionnelle mais dépendantes d'un usage anthropique, doivent-elles être protégées avec un objectif de conservation de leur état actuel ? La recherche d'une naturalité originelle du système, caractérisé par l'absence de zones humides en Centre Crau et une indisponibilité de la ressource pour les usages anthropiques, peut-elle être également retenue comme objectif de gestion ?**

➤ La forte vulnérabilité de l'alimentation en eau potable non collective des habitats isolés est également un point de réflexion qui doit être posé. En effet, une grande partie de l'économie du territoire repose sur des infrastructures agricoles disséminées dans toute la zone de la Crau humide. La vie et le travail au sein de ces habitats isolés nécessitent un accès à l'eau par captage, puisque le raccordement au réseau collectif n'est souvent pas économiquement ou techniquement possible. La pérennité de ces activités agricoles et de la vie dans ces habitats isolés nécessiterait donc de maintenir des conditions d'accès à la ressource en eau souterraine.

Ce constat pose la nécessité d'intégrer cet enjeu dans la gestion de l'eau. Si des choix devaient être pris pour réduire les volumes d'eau destinée à l'irrigation actuels, l'alimentation en eau potable individuelle en serait probablement impactée. **Il se pose donc la question de l'accompagnement qui devrait être alors engagé avec les usagers dépendants de captages d'eau souterraine pour les habitats isolés : aide à la sécurisation des captages et raccordement au réseau collectif.**

➤ **Une baisse significative des volumes d'eau mise en irrigation conduirait à une baisse de productivité importante des pompages agricoles, particulièrement dans la partie Nord de la plaine de Crau.**

Si les acteurs du Territoire venaient à décider d'une baisse de dotation pour cause de raréfaction de la ressource en eau liée au changement climatique dans le bassin versant de la Durance, la conversion des parcelles de foin de Crau conduirait probablement à privilégier les prélèvements par forage pour conserver un potentiel agricole. On aurait alors une triple aggravation des déficits en termes de ressource en eaux souterraines : cumul des effets du changement climatique avec une hausse des prélèvements et une baisse de la recharge. C'est un des autres enseignements forts de SINERGI : **au vu des évolutions attendues du territoire, il serait judicieux de repenser dans sa globalité le système de prélèvements agricoles actuels qui risque d'être soumis à de fortes contraintes à l'horizon 2050. Concrètement, cela signifie une sécurisation des captages par approfondissement des forages ou une adaptation des cultures et des systèmes d'irrigation aux conditions de prélèvement.**

#### LA REVISION DE CERTAINS OBJECTIFS DE GESTION POURRAIT PRODUIRE DES ECONOMIES D'EAU AU PROFIT D'AUTRES USAGES

L'étude SINERGI permet d'évaluer le gain et la perte en eau pour les différents usages en fonction des choix de gestion des flux et de développement territorial à moyen terme.

A titre d'exemple, **l'abandon de l'objectif d'alimentation de écosystèmes de Centre-Crau**, accompagnée d'une aide pour la sécurisation des prélèvements agricoles et pour l'AEP privée, **permettraient de dégager une marge de manœuvre potentielle d'environ 80 Mm<sup>3</sup>/an par rapport aux conditions de flux actuelles.** Au-delà, certains usages prioritaires commencent à être impactés et on commence à modifier significativement les flux d'eau douce vers les zones humides en bordure de Crau (baisse d'environ 30%). Par prudence de réduire la valeur seuil à 60 Mm<sup>3</sup>/an pour intégrer les imprécisions intrinsèques du processus de modélisation et d'interprétation des indicateurs.

Avec 25 Mm<sup>3</sup>/an de déficit structurel lié au changement climatique, les marges de manœuvre passent alors à 35 Mm<sup>3</sup>/an. Ce chiffre correspond à peu près à une baisse de volume irrigué de 10%, qui

ferait mécaniquement remonter l'eau aux besoins du bassin versant de la Durance : **milieux naturels, tourisme, énergie, agriculture pourraient en bénéficier**. Ce volume pourrait également permettre un développement de l'irrigation agricole sur la plaine de la Crau ou un choix d'urbanisation du territoire au détriment des surfaces de prairies irriguées.

Ce choix d'abandon de certaines zones humides pose évidemment la question d'une acceptabilité sociale, environnementale et de conformité réglementaire d'une dégradation de zones humides, milieux protégés par le droit européen au travers de la Directive Cadre sur l'Eau.

#### 4.2.2 QUELS SONT LES LEVIERS POUR ACCOMPAGNER CES EVENTUELLES EVOLUTIONS ?

##### LES LEVIERS A CONSIDERER POUR REDUIRE LES DEFICITS

Le déficit de ressources en eau à moyen terme peut provenir de trois facteurs :

- Les changements climatiques, faisant augmenter l'évapotranspiration des plantes et diminuer l'efficacité de la recharge par les pluies
- Une baisse de la dotation des eaux en provenance de la Durance, justifiée par une réallocation de cette ressource sur d'autres enjeux ou par une baisse significative des surfaces dédiées au foin de Crau à cause d'évolutions socio-économiques fortes.
- Une baisse de la quantité des eaux de pluie infiltrée sur l'impluvium de la nappe la Crau consécutivement au changement climatique ou à l'extension des zones urbanisées sur les surfaces de prairies irriguées.
- Une augmentation des prélèvements, par exemple liée à une modification des cultures en plaine de Crau.

Il faut malheureusement considérer comme inéluctable le déficit attendu lié au changement climatique, qui dépend des politiques environnementales engagées à l'échelon international. Il demeure cependant trois leviers sur lequel le territoire peut s'appuyer pour limiter les déficits sur la ressource et leurs impacts : la conservation des surfaces de prairies, la limitation des prélèvements en nappe et l'optimisation du transport d'eau vers les surfaces irriguées.

- **Les surfaces de prairies et la pratique de l'irrigation par submersion constitue le maillon central du système aquifère de la Crau.** A titre informatif, la disparition d'environ 1300 ha liée à un étalement d'environ 3000 ha en périphérie des villes créerait un déficit potentiel de 20 Mm<sup>3</sup>/an. Une mutation des cultures pourrait également réduire ces surfaces. La limitation des pertes de surfaces nécessiterait **d'engager des mécanismes de soutien de la filière foin de Crau et de compenser des prairies détruites par une relocalisation des surfaces**. La création de bassin de recharge artificiel venant ne constitue pas à l'heure actuel une solution durable de compensation des flux d'infiltration perdus pour la nappe.

- **Les prélèvements ont un impact non négligeable sur l'équilibre quantitatif de la ressource.** Une modification des cultures en plaine de Crau pourrait conduire à une augmentation importante des prélèvements agricoles. Le choix de cultures fortement consommatrices en eau et nécessitant des prélèvements importants d'eaux souterraines conduirait à un déficit aggravé : baisse de nappe par pompage et baisse de recharge liée à la diminution de surfaces de prairies irriguées. **Il devrait être privilégié une conversion des terres agricoles vers des types d'agriculture peu consommateurs en eau.**

En cas de déséquilibre structurelle liée à des restrictions sur les volumes d'eau destinée à l'irrigation (-10% représentant environ 32 Mm<sup>3</sup>/an économisés sur l'eau de la Durance), les résultats montrent que celles-ci ne pourraient pas être compensées totalement par une baisse de prélèvements agricoles, à moins de les supprimer. **D'autres secteurs devront être mis à contribution : les prélèvements domestiques (actuellement 24 Mm<sup>3</sup>/an) et industriels (12 Mm<sup>3</sup>/an).**

Même portée par l'ensemble des catégories des usagers, une compensation totale d'une diminution des eaux d'irrigation semblent ne peut être totalement atteinte sans revoir en

profondeur l'organisation économique et les modalités d'approvisionnement en eau potable du territoire. **Des approches de sobriété dans les usages de la nappe avec des pratiques adaptées aux régions méditerranéennes et un entretien patrimonial des réseaux d'eau peuvent cependant contribuer significativement à la résorption d'un déséquilibre.**

- **Le principal levier de compensation pourrait se situer dans les économies d'eau réalisables sur les pertes aux exutoires des canaux.** Cette étude évalue ces pertes à environ 100 Mm<sup>3</sup>/an, par comparaison entre les flux entrant comptabilisés et les flux théoriques appliquées aux prairies, évaluées par modèle. **Ce chiffre devrait être confirmé par des mesures de terrain et les gains à attendre ne sont pas quantifiables en l'état actuelle des connaissances.**

Ces pertes aux exutoires superficiels du système sont actuellement nécessaires pour porter l'eau jusqu'aux surfaces irriguées. Des évolutions techniques lourdes devraient nécessairement être engagées et des innovations recherchées pour optimiser la régulation de ces eaux de canaux avec un transfert d'eau optimisé avec des canaux mieux régulés et rénovés.

Ces eaux superficielles contribuent également localement à l'alimentation de certaines zones humides. Il faudra donc s'assurer avant toute tentative de modification de ces flux que leur diminution, voire leur disparition, puisse être envisagée sans dégradation de l'état écologique de ces milieux. Il est possible et probable qu'il faille conserver un débit réservé pour assurer le bon état écologique de certaines zones humides.

Enfin, **en cas de sécheresse conjoncturelle marquée sur le territoire**, plus que le déficit de recharge naturelle, ce seront avant tout les mesures de gestion de l'irrigation qui vont impacter l'équilibre quantitatif de la ressource. De manière générale, les mesures de restriction sur les prélèvements en nappe (par exemple -20% sur les prélèvements non prioritaires), bien que positives, compensent difficilement la baisse piézométrique liée aux restrictions sur l'irrigation gravitaire. Il sera donc impératif de coordonner les deux types de mesure (restriction sur les volumes d'eau mise en irrigation et sur les prélèvements) pour obtenir un équilibre acceptable pour les usages et l'alimentation des milieux.

#### LES DIFFERENTES STRATEGIES DE GESTION QUI POURRAIENT DEFINIR L'ETAT DE LA RESSOURCE EN 2050

Au vu de ces considérations, il se dégage quatre grands schémas sur l'état de la ressource en fonction des objectifs de gestion fondés sur plusieurs leviers :

- **Accepter une baisse de recharge liée au changement climatique de l'ordre de 25 Mm<sup>3</sup>/an.**
- **Maintenir les surfaces de prairies irriguées**
- **Optimiser l'efficacité du transfert d'eau par canaux**
- **Réduire la consommation d'eau souterraine**
- **Sécuriser l'accès à l'eau des usages les plus sensibles**
- **Adapter les objectifs de gestion des eaux**

1. **Une stratégie d'inaction marquée** par une diminution d'environ 20% des surfaces de prairies irriguées liées à l'étalement urbain et la diversification des cultures, sans améliorer l'efficacité du transfert d'eau par canaux pour l'irrigation.

**La ressource accuse alors un déficit cumulé pouvant atteindre -90 Mm<sup>3</sup>/an**, si l'on considère l'impact des changements climatiques (-25 Mm<sup>3</sup>/an) et la perte de recharge liée à la disparition des prairies (-35 Mm<sup>3</sup>/an) et une éventuelle baisse des volumes transférés depuis la Durance (-30 Mm<sup>3</sup>/an).

Les conséquences d'un tel développement seraient une dégradation importante des conditions de prélèvements pour l'agriculture et l'alimentation en eau potable, y compris l'AEP publique. Les zones humides de centre Crau seraient fortement menacées. Les usages sur la ressource, déjà fortement fragilisés, seraient peu résilients aux épisodes de sécheresse.

2. **Une stratégie de conservation** pourrait être celle du maintien de tous les usages mais aussi des zones humides dépendantes des niveaux de nappe dans leur état actuel. **Il implique la limitation des pertes de surfaces de prairies irriguées et des hausses de prélèvements en nappe**, ainsi que la compensation des éventuelles baisses des volumes d'eau destinée à l'irrigation par une optimisation du système de transfert d'eau. Le déficit de la ressource en eau souterraine se limite alors principalement au déficit généré par le changement climatique (- 25 Mm<sup>3</sup>/an).

Dans cette stratégie, les marges de manœuvre sont à priori très réduites, de l'ordre +5 Mm<sup>3</sup>/an, qui pourraient être théoriquement être partagées entre urbanisation (maximum 200 à 300 ha de prairies consommées par rapport l'actuel) ou augmentation des prélèvements (+ 5 Mm<sup>3</sup>/an par rapport à l'actuel). La prudence recommanderait de sanctuariser ces marges de manœuvre pour encaisser une éventuelle aggravation des effets du changement climatique ou les étiages sévères qui ne manqueront pas de se produire à une fréquence plus élevée dans les années à venir.

Ce schéma impliquerait d'imposer un développement socio-économique maintenant les surfaces de cultures de foin de Crau ou prévoyant des solutions de compensation intégrale des flux de recharge perdus.

3. **Une stratégie de réduction des objectifs environnementaux** pourrait être celle de l'abandon des efforts de maintien des zones humides dépendantes des niveaux de nappe, d'un accompagnement pour l'accès à l'eau des habitats isolés et d'un renforcement, d'une sécurisation des capacités d'exploitation de la nappe au profit du monde agricole.

L'abandon de l'objectif de maintien des zones humides permet de dégager une marge de manœuvre de l'ordre de +60 Mm<sup>3</sup>/an (approche prudentielle des résultats donnés par la modélisation) par rapport à l'équilibre actuel. Avec 25 Mm<sup>3</sup>/an qui seront consommés par les effets du changement climatique, les marges de manœuvre passent à 35 Mm<sup>3</sup>/an, auxquels il faut rajouter les économies potentielles sur les rejets aux exutoires du système d'irrigation pouvant compenser d'éventuelle restriction sur les volumes d'eau mise en irrigation d'eau d'irrigation.

Cette stratégie peut permettre de réallouer ces volumes d'eau à d'autres besoins en Crau (prélèvements, aménagement impactant la recharge de la nappe) ou en Durance (milieux naturels, agriculture, tourisme, énergie). De nouveau, il sera nécessaire de ne pas consommer toutes les marges de manœuvre pour laisser une réserve capable de tamponner les épisodes de fortes sécheresses qui devraient accompagner le réchauffement climatique.

Ce scénario de rupture soulève de nombreuses problématiques qu'il faudra traiter par des études adaptées et ambitieuses. Citons :

➤ **Acceptation sociale et réglementaire** de dégradation importante sur la biodiversité des zones humides du Bois de Brahis, de Vergière et de la Baisse du Raillon.

➤ **Vérification de l'impact acceptable sur les autres zones humides** : baisse significative des flux d'eaux souterraines au profit des marais des Chanoines et de Meyranne mais aussi des sources de la dépression des Baux et de la Touloubre ; il faut ajouter la disparition probable de ces flux dans le bilan des étangs d'Entressen et des Aunes.

➤ **Améliorer les techniques actuelles de transport d'eau par canaux** pour limiter au maximum les flux perdus aux exutoires, en tenant compte des externalités positives de ces flux notamment pour les milieux.

➤ **Validation de la capacité technique à faire muter, à adapter le système d'exploitation actuelle des eaux souterraines par le monde agricole**. Se posera nécessairement la question du financement d'un vaste programme potentiellement très coûteux.

➤ **Acceptabilité réglementaire de la modification des équilibres actuels au regard de la Directive Cadre sur l'Eau**, avec comme ligne directrice que les prélèvements ne doivent dépasser pas la capacité de renouvellement de la ressource disponible, compte tenu de la nécessaire alimentation des écosystèmes aquatiques.

**4. Une stratégie d'efforts partagés** consisterait à rechercher la satisfaction globale de l'ensemble des usages et des conditions d'alimentation des milieux, tout en permettant une réduction des volumes d'eau destinée à l'irrigation de 10%, au bénéfice des besoins en Durance. Cette stratégie fait porter un effort d'optimisation des flux sur l'ensemble des parties prenantes :

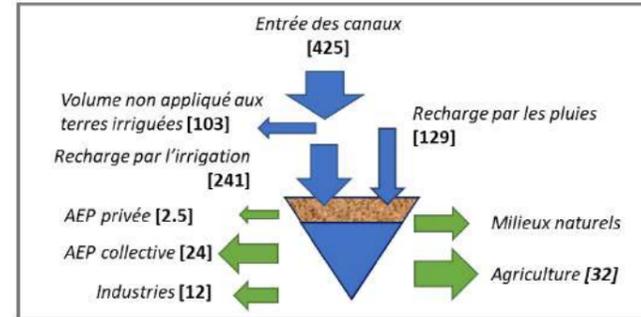
➤ **Efforts à poursuivre en matière d'aménagement du territoire** pour limiter la perte des surfaces de prairies irriguées à environ 300 ha. Le changement d'occupation des sols ou de culture ne devrait pas conduire à un déficit supérieur à -5 Mm<sup>3</sup>/an, par rapport aux conditions actuelles. Ceci revient à limiter la perte des surfaces de prairies irriguées à environ 300 ha, ce qui laisse très peu de marges de manœuvre. Des mécanismes de soutien de la filière foin de Crau et de compensation des surfaces irriguées détruites devaient être mis en œuvre.

➤ **Compenser les éventuelles restrictions sur les volumes alloués actuellement à l'irrigation** (environ 425 Mm<sup>3</sup>) par des économies d'eau aux exutoires des canaux. A titre informatif, une baisse de 10% des volumes d'eau mise en irrigation serait idéalement compensée par une économie d'eau de 32 Mm<sup>3</sup>/an aux exutoires des canaux, soit un tiers des flux actuellement en jeu. Si une telle optimisation s'avère possible, les capacités d'irrigation des prairies seraient conservées malgré la baisse des volumes d'eau disponible depuis la Durance.

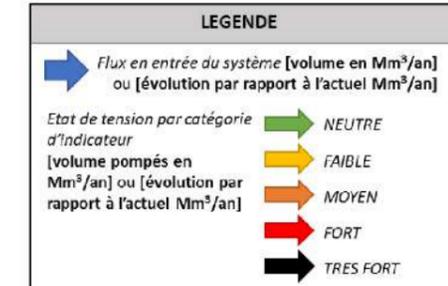
➤ **Réaliser des économies d'eau sur l'ensemble des prélèvements**, en fonction des contraintes propres à chaque catégorie d'usages, pour compenser en partie les déficits structurels liés au changement climatique ainsi qu'à augmenter la capacité de résilience du territoire aux épisodes conjoncturels de sécheresse. Un programme de réduction des prélèvements de 15 Mm<sup>3</sup>/an répartis entre les catégories d'usagers serait un objectif ambitieux mais probablement réaliste. Ceci demande de mettre en place de manière adaptée un vaste programme d'économie d'eau sur les usages : technique d'irrigation, choix des cultures, gestion des espaces verts, réduction des fuites, contrôle des volumes prélevés, sensibilisation des populations.

La figure 100 résume ces trajectoires possibles.

## EQUILIBRE ACTUEL



- EQUILIBRE DE LA RESSOURCE : 299 Mm<sup>3</sup>/an**
- ⊕ Ressource répondant aux besoins socio-économiques
  - ⊕ Ressource alimentant des milieux naturels remarquables
  - ⊕ Bonne résistance aux épisodes de sécheresses
  - ⊖ Dépendance à un secteur économique et à la régulation d'un transfert d'eau



## HORIZON 2050

- EVOLUTIONS TENDANCIELLES 2050**
- Limitation des disponibilités en eau de la Durance pour l'irrigation
  - Diminution des surfaces de prairies irriguées
  - Prélèvements en hausse en cas de diversification des cultures
  - Recharge naturelle en baisse
  - Fréquence d'apparition des épisodes de sécheresse en hausse

INACTION

- LEVIERS**
- Maintenir les surfaces de prairies irriguées
  - Limiter les hausses de prélèvements

- LEVIERS**
- Revoir les objectifs de gestion des milieux
  - Sécuriser l'accès à l'eau des usages les plus sensibles

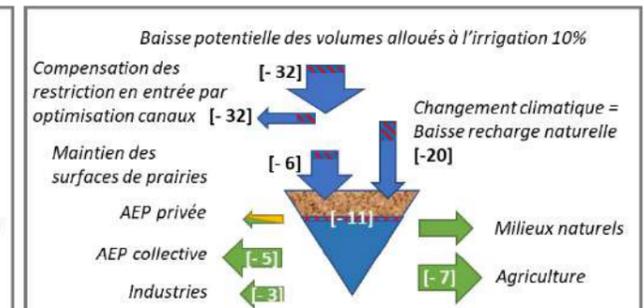
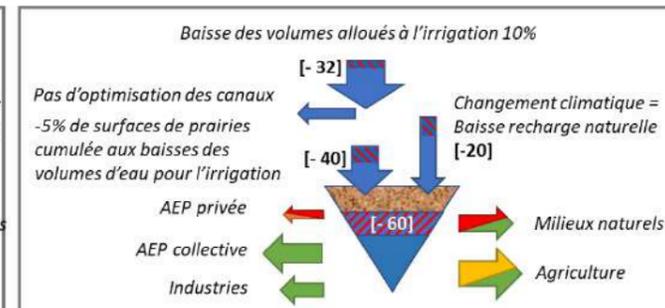
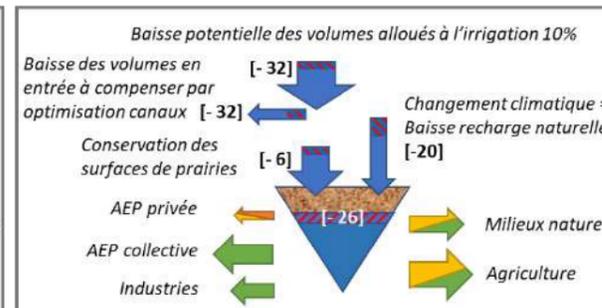
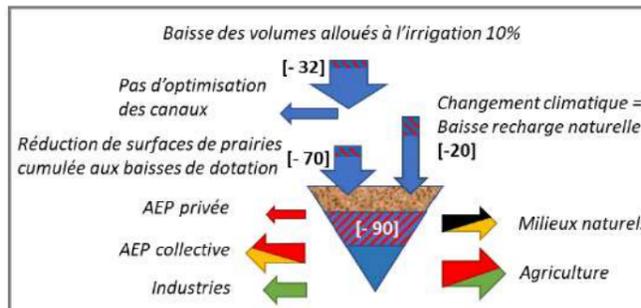
- LEVIERS**
- Maintenir les surfaces de prairies irriguées
  - Optimiser l'efficacité du transfert d'eau par canaux
  - Réduire la consommation d'eau souterraine

STRATEGIE 2050 D'INACTION

STRATEGIE 2050 DE CONSERVATION

STRATEGIE 2050 DE REDUCTION DES OBJECTIFS ENVIRONNEMENTAUX

STRATEGIE 2050 D'EFFORTS PARTAGES



- ⊕ Fortes opportunités pour l'usages et l'occupation des sols
- ⊖ Certains besoins socio-économiques actuels ne sont plus satisfaits
- ⊖ Disparition des zones humides en centre Crau et dégradation en périphérie
- ⊖ Aucune résilience face aux changements climatiques

- ⊕ Usages et alimentation des milieux globalement satisfaits
- ⊖ Faible résilience aux changements climatiques et épisodes de sécheresses
- ⊖ Nécessité de compenser les éventuelles baisses de dotations en eau
- ⊖ Fortes contraintes sur le développement socio-économiques du territoire et la diversification des cultures

- ⊕ Les usages anthropiques sont conservés
- ⊕ Plus d'opportunités pour le développement socio-économique
- ⊖ Abandon des zones humides en Centre-Crau
- ⊖ Nécessité de sécuriser l'approvisionnement en eau de certaines zones agricoles et d'habitats isolés

- ⊕ Usages et alimentation des milieux conservés
- ⊕ Forte résilience aux changements climatiques et épisodes de sécheresses
- ⊖ Nécessité de compenser les éventuelles baisses de dotations en eau
- ⊖ Développement socio-économique du territoire sous conditions

Figure 100 Les stratégies possibles pour la gestion des eaux souterraines à l'horizon 2050

### 4.2.3 LES ARBITRAGE A CONSIDERER POUR CONCEVOIR LA GESTION DE L'EAU

SINERGI met en évidence les arbitrages essentiels qui conditionneront les politiques de gestion de l'eau en Crau et indirectement en Durance à moyen terme (2050).

**Il s'agit en premier lieu de la conservation ou non ou des zones humides de centre Crau qui dépendent de niveaux de nappe.** Il s'agit d'écosystème fragiles, très vulnérables à la moindre baisse de niveaux piézométriques. Par rapport à la situation actuelle, les évolutions attendues du changement climatiques vont conduire à des tensions grandissantes sur ces écosystèmes. Ceci induira mécaniquement une réduction de toute marge de manœuvre sur de potentielles économies d'eau transférée depuis la Durance ou d'éventuelles augmentations des prélèvements ou des surfaces imperméabilisés.

**La question se pose également d'inscrire dans les objectifs de gestion un maintien de l'accès à l'eau des habitats isolés,** particulièrement sensibles aux déficits sur la ressource. Si cet objectif de maintien est retenu malgré une politique de restriction des volumes d'eau destinée à l'irrigation dans les conditions de transport actuel, **un accompagnement devrait être mis en place pour sécuriser l'accès à l'eau de ses populations et des activités agricoles qu'elles génèrent. Concrètement cela passe par une étude au cas par cas du degré de sécurisation des captages et un approfondissement des forages si utile et nécessaire.**

De la même manière, un déficit de recharge lié à une restriction des volumes d'eau mise en irrigation, pourrait entraîner des tensions importantes sur les prélèvements agricoles dans leur configuration actuelle. **Il convient donc d'accompagner le secteur agricole pour le rendre plus résilient face aux déficits de ressources structurels ou conjoncturels, auquel il pourrait être confronté dans le futur.**

L'étude met également en évidence l'utilité de **porter un programme d'économie d'eau pour tous les secteurs de prélèvements dans la nappe.** Ces économies amélioreront la résilience du territoire face aux changements climatiques et aux épisodes de sécheresse menant à des restrictions sur l'irrigation des prairies. Ces économies devront prendre en compte les marges de progression envisageables en fonction des capacités techniques et des types usages : mode d'irrigation, réduction des fuites, contrôle, sensibilisation.

Enfin, SINERGI montre que, si l'accès à la ressource en eau durancienne demeure le principal facteur d'équilibre quantitatif de la nappe de la Crau, les économies d'eau réalisées à l'exutoires des canaux constituent un levier potentiel à étudier pour compenser les éventuelles restrictions sur les volumes d'eau destinée à l'irrigation en entrée du système. **Une recherche de solutions techniques et de financements pour l'optimisation du transport d'eau par canaux et l'entretien de ces infrastructures permettrait d'améliorer la sécurisation de la ressource en eau sur le long terme.**

## 5 CONCLUSION

**SINERGI révèle que la nappe de la Crau répond aujourd'hui pleinement à des besoins en eau sur lesquels le développement socio-économique du territoire s'est bâti et dont bénéficie un patrimoine écologique exceptionnel**, hérités des âges glaciaires. La ressource est actuellement bien sécurisée face aux sécheresses qui pourraient l'affecter, des marges de manœuvres existent même pour augmenter les prélèvements en nappe.

Cependant **l'équilibre actuel du système aquifère de la Crau et les bénéfices que le territoire en retire aujourd'hui sont irrémédiablement amenés à évoluer dans un futur proche (2050)**. D'une part le changement climatique, avec des pluies plus faibles et moins efficaces pour recharger la nappe, va accroître les tensions sur les usages et l'alimentation en eau des milieux naturels. Il pourrait conduire à revoir à la baisse les volumes d'eau mise en irrigation dont bénéficie le territoire depuis le bassin versant de la Durance et qui constituent le « carburant » indispensable de tout l'hydrosystème. D'autre part la réduction progressive des surfaces de prairies irriguées, même faible, liée à des questions d'aménagement du territoire ou de mutation agricole, conduit également à des impacts significatifs sur la ressource pouvant se cumuler aux effets des changements climatiques. Enfin, il est probable que le territoire subisse à plus ou moins long terme des épisodes de sécheresses conduisant à des mesures de gestion radicales pouvant affecter certains usages réglementairement non prioritaires mais d'importance économique, comme l'agriculture et les besoins industriels.

En tout état de cause, en 2050, il ne sera donc plus possible de conserver les usages actuels de la nappe et ses services écosystémiques, tout en continuant à réduire les surfaces de prairies irriguées (urbanisation, diversification des cultures) dans un contexte de raréfaction de la disponibilité des volumes d'eau d'irrigation transférés depuis la Durance (stratégie de continuité des tendances actuelles décrite au chapitre précédent).

**Ne pas anticiper** les effets des changements climatiques sur la disponibilité de la ressource en eau durancienne et la recharge naturelle de la nappe, et poursuivre les tendances actuelles d'urbanisation et d'autorisation de prélèvements sans réflexion sur la disponibilité et l'évolution de la ressource, **entraînerait non seulement une fragilité du système en cas de sécheresse sévère mais remettrait également en question une grande partie des usages et services aujourd'hui rendus par la nappe**. D'une part le territoire verrait une perte de sa biodiversité, aujourd'hui reconnue d'un point de vue écologique mais qui contribue également à la qualité de vie sur ce territoire et peut constituer un attrait touristique. D'autre part, une partie des habitats isolés pourraient connaître des difficultés d'approvisionnement en eau. Sans solution alternative de raccordement au réseau public, certaines habitations pourraient être abandonnées. Certaines exploitations agricoles pourraient connaître des baisses de capacité d'irrigation voire une impossibilité d'approvisionnement. Enfin, certains captages d'eau potable publique devraient être sécurisés voire déplacés pour palier la baisse de productivité de l'aquifère. Or la relocalisation des captages publics dans des périmètres sécurisés d'un point de vue sanitaire est déjà aujourd'hui une vraie gageure.

Face à ce constat, l'étude montre que si le changement climatique dépend d'une action politique internationale, **le territoire est doté de moyens pour limiter ces évolutions et s'y adapter. Plusieurs leviers peuvent être mobilisés : moduler les prélèvements en nappe en adaptant les usages, maintenir les surfaces de prairies irriguées, optimiser le transport d'eau par canaux, sécuriser les usages, voire adapter les objectifs de certains milieux naturels**.

L'étude a permis de définir plusieurs horizons possibles pour la Crau en 2050 liés aux stratégies de développement qui seront mises en œuvre.

- **Une stratégie de conservation** où tous les usages actuels sont maintenus, y compris l'alimentation des milieux naturels. Dans ce cadre, on voit bien qu'il n'y a quasiment plus de marges de manœuvre pour augmenter les prélèvements agricoles ou réduire les surfaces de prairies. Si cette stratégie est favorable à l'activité de la culture du foin de Crau, il s'agit quasiment d'un gel du territoire qui devra compter sur un maintien des volumes actuels dédiés à l'irrigation des prairies) ou, si celle-ci devait se restreindre, sur une optimisation du système d'irrigation. Dans ce schéma, le territoire a peu de résilience face aux épisodes de sécheresse.

- **Une stratégie de réduction des objectifs environnementaux** où l'abandon des écosystèmes exceptionnels de zones humides en centre-Crau offre des marges de manœuvre. Les contraintes sur le maintien des recharges sont alors réduites à la faveur d'une urbanisation du territoire et les limites de prélèvements peuvent être réhaussées pour les usages socio-économiques. Ces marges de manœuvre permettent le développement socio-économique du territoire ou une diversification des cultures, au détriment des prairies irriguées. Une réduction des volumes d'eau destinée à l'irrigation peut également être absorbée. Cette trajectoire apporte cependant des difficultés d'approvisionnement pour certaines zones agricoles et habitats isolés. Des mesures d'accompagnement devront alors être prises. Des marges de manœuvre devront par ailleurs être conservées pour tamponner les effets d'éventuelles restrictions en période de sécheresse.

- **Une stratégie d'efforts partagés**, dans un objectif de satisfaction de tous les usages socio-économiques et du besoin en eau des milieux naturels. La réduction des surfaces de prairies irriguées pourrait être contenue par des mécanismes de compensation et de soutien de la filière foin de Crau. La baisse globale des prélèvements en eau permise par les efforts de chacun augmenterait la résilience du territoire non seulement aux impacts conjoncturels (épisodes de sécheresse) mais aussi structurels du changement climatique. Enfin, optimiser le fonctionnement des canaux permettrait d'économiser de l'eau aux bénéfices des usages du bassin versant de la Durance.

La figure 101 résume ces trajectoires possibles pour la ressource en de la Crau.

**Les conditions d'une gestion future de la ressource conciliant les besoins sociaux, économiques et écologiques du territoire sont maintenant clairement établies.** D'autres trajectoires et marges de manœuvre peuvent être explorées. Elles dépendront des arbitrages duranciens et des objectifs et des politiques que se fixeront les collectivités territoriales et l'Etat, en concertation avec les usagers (représentants des acteurs économiques et associatifs).

**Le cadre de décision pourra s'inscrire dans le volet quantitatif d'un Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SAGE)** qui devrait tenir compte de l'hydrosystème dans sa globalité, sachant que la principale ressource en eau du territoire de la Crau dépend du bassin versant de la Durance. **La résilience du territoire face au changement climatique engendrera nécessairement des arbitrages qui viendront ponctuer le débat à venir** : ils concerneront principalement l'entretien et l'optimisation du patrimoine hydraulique ainsi que la définition du modèle économique pour y parvenir, le soutien économique de la filière foin pour sa contribution à la recharge de la nappe, le partage de l'eau transférée depuis la Durance, les objectifs fixés de préservation des zones humides centrales de la Crau et le maintien de l'accès à l'eau des habitats isolés.

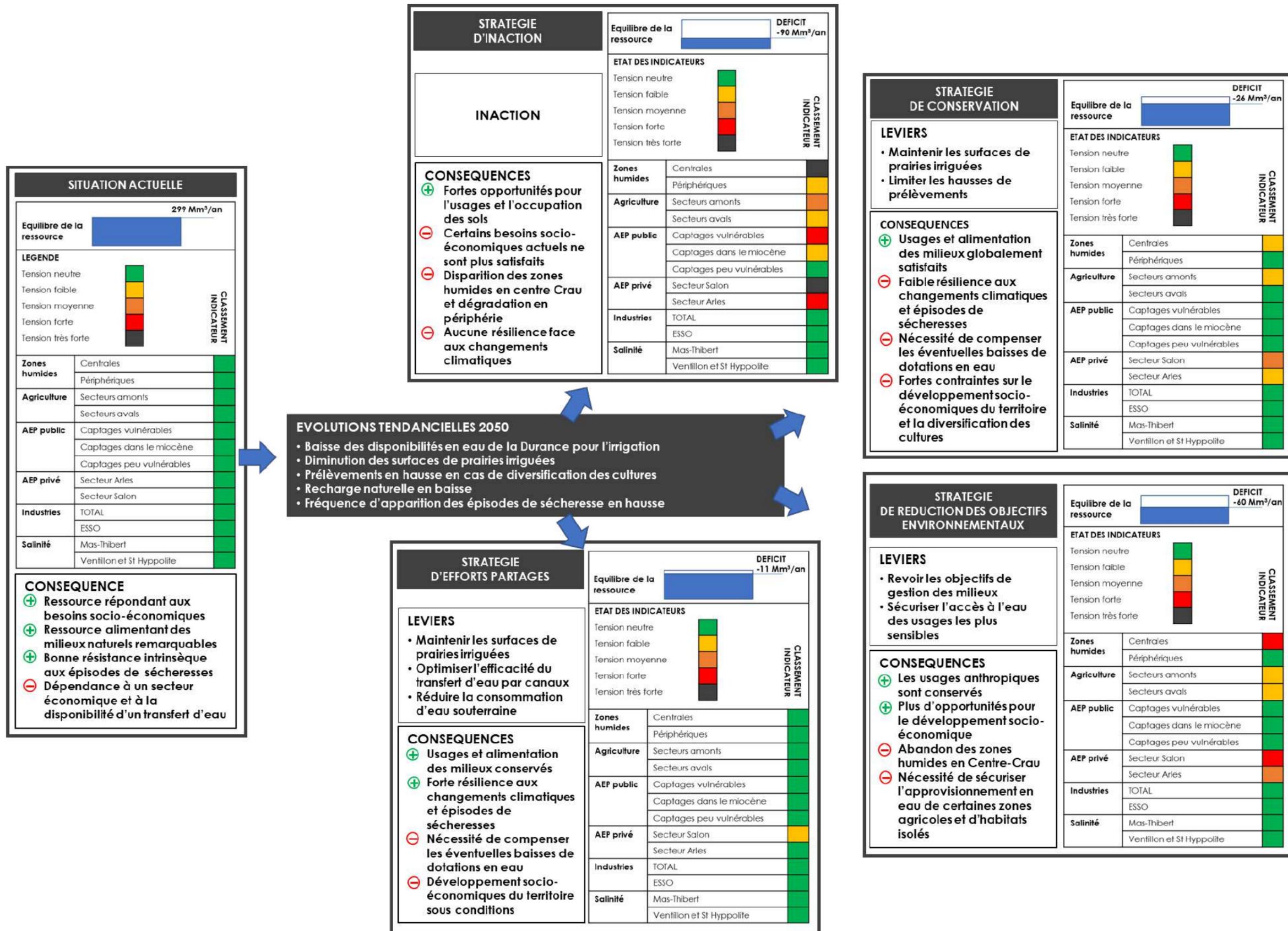


Figure 101 Les conditions de gestion de la nappe de la Crau en 2050

## 6 BIBLIOGRAPHIE

Allen R.G., Pereira L. S., Raes D., Smith M., 1998. Crop Evapotranspiration - Guidelines for Computing Crop Water Requirements. FAO Irrigation and Drainage, 56 p.

Baillieux A., Olioso 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

Baillieux et al. 2019 Investigation croisée entre écologues et hydrogéologues sur la nappe de la Crau pour une identification des écosystèmes dépendants des eaux souterraines Revue Géologue 202

Bailly-Comte V., Rivet F. (2019) -Projet SIMBA: Surveillance de l'Intrusion Marine en Basse-Crau. Rapport final. BRGM/RP-68639-FR, avec la collaboration de Dewandel. B. (BRGM) et Villesseche D. (SYMCRAU), 227p.,54ill.,6ann.

Bonnet A. 2017 Etude du fonctionnement hydrologique d'une zone humide en contexte méditerranéen : le site natura 2000 « Trois marais » Mémoire de master Université de Montpellier 79 p.

Bouteyre G., Duclos G., 1994. Carte pédologique de France à 1/100 000 : Arles (n°22).

BRGM 1964 Etude hydrogéologique de la Crau BRGM/RP-DSGR.64.A49 Aout 1964 375 pp.

BRGM 1969 Carte hydrogéologique de la plaine de la Crau et son fascicule.

BRGM 1970 Etude des ressources hydrologiques et hydrogéologiques du sud-est de la France - Fascicule 12 - LA CRAU BRGM/RP-70SGN158PRC Avril 1970 82 pp

BRGM 1971 Zones périodiquement inondées de Raphèle-Moulès (commune d'Arles) Etude de la nappe et de l'influence des irrigations par Audibert et Putallaz Marseille 1971, Rapport BRGM RP-71-SGN-189-PRC

BRGM 1995 MARTCRAU : Actualisation du modèle de la nappe de la Crau BRGM/RR-38199FR 73 pp

BRGM 2004 Géodynamique des systèmes plio-quadernaires des nappes alluviales de la plaine de la Crau BRGM/RP-53088 Sept.2004 69 pp

Brisson, N. & al. 2003. An Overview of the Crop Model STICS. European Journal of Agronomy, 18(3-4), pp. 309-332, doi: 10.1016/S1161-0301(02)00110-7.

Buis S. & al. 2011. The STICS Crop Model and Associated Software for Analysis, Parameterization and Evaluation. In. Methods of Introducing System Models into Agricultural Research. Advances in Agricultural Systems Modeling 2. Édité par by L. R. Ahuja and L. Ma, 395-426. American Society of Agronomy.

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

Chambre d'agriculture PACA 2014 Référentiel des besoins en eau d'irrigation des productions agricoles de PACA Rapport 141 p.

Champion, C., Choukroune, P., Clauzon, G., 2000. La déformation post-Miocène en Provence occidentale, Geodinamica Acta, 13:2-3, 67-85

Colomb, E., Roux, R.-M., 1978. La Crau. Données nouvelles et interprétations. Géologie 382 méditerranéenne, V(3), 303-324. 383

Colomb, E., Roux, R.-M., 1986. La Crau, histoire Plio-Pléistocène. Méditerranée, 3, p. 31-42.

Cova, R., 1965. Étude hydrogéologique de la partie septentrionale de la Crau et des reliefs de bordure. Thèse, Universités de Montpellier et de Marseille, 157 pp.

De Mordant de Massiac J.C., Trolard F. et Bourrié G. (pilotes de l'étude), 2011. ASTUCE&TIC : Anticipation sécurisée des territoires urbanisés des campagnes et de leur environnement fondée sur les nouvelles technologies de l'information et des communications. Rapport final, 1 480 p.

- Denizot G. Le Pliocène dans la vallée du Rhône. In: Revue de géographie de Lyon, vol. 27, n°4, 1952. pp. 327-357.
- Depons A., 2007, Les mécanismes de contrôle de l'érosion messinienne dans le bassin de Camargue, mémoire de stage.
- Ecosphère 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.
- GeographR 2016 Occupation du sol de la nappe de la Crau en 2016 Rapport technique 21 décembre 2016 – maîtrise d'ouvrage SYMCRAU 8p.
- Guiral B 2018 Nappe de la Crau : un ou plusieurs aquifères ? Apports des données récentes sur l'interprétation de la géométrie du réservoir – Mémoire de master Sciences de l'environnement terrestre Université Aix Marseille 22 pp.
- HYDROFIS 2018a Accompagnement à la réalisation du projet SINERGI - Synthèse des connaissances sur les aquifères bordiers de la nappe de la Crau 48 pp.
- HYDROFIS 2018b Accompagnement à la réalisation du projet SINERGI - Zones humides et profondeur de nappe. Rapport interne SYMCRAU non publié septembre 2018 23 p.
- INRA 2012a D4.4 and D4.5 Report on adaptations of the models and on the coupling of the crop model and hydraulic model Livrable du projet SIRRIMED, 7th framework programme THEME 2: Biotechnologies, Agriculture, Food 104 p. téléchargeable sur [http://www.sirrimed.org/catalogo/d4\\_4\\_d4\\_5\\_model\\_adaptation\\_coupling\\_v03.pdf](http://www.sirrimed.org/catalogo/d4_4_d4_5_model_adaptation_coupling_v03.pdf)
- INRA 2012b D5.5-5.6-5.8 Report on results of alpha-tests of the first prototype and Alpha-version of the information system. Report on beta-tests of the Watershed Information System Livrable du projet SIRRIMED, 7th framework programme THEME 2: Biotechnologies, Agriculture, Food 137 p. téléchargeable sur [http://www.sirrimed.org/catalogo/d\\_5\\_5-6-8-v2.pdf](http://www.sirrimed.org/catalogo/d_5_5-6-8-v2.pdf)
- INRA 2013 D5.7 Report on the analysis and evaluation of irrigation impact scenarios Livrable du projet SIRRIMED, 7th framework programme THEME 2: Biotechnologies, Agriculture, Food 137 p. téléchargeable sur [http://www.sirrimed.org/catalogo/d\\_5\\_7-v2.pdf](http://www.sirrimed.org/catalogo/d_5_7-v2.pdf)
- McDonald M.G., Harbaugh A.W., 1988. A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Groundwater Flow Model. Edité par le US Geological Survey, Reston, VA.
- Merot 2007 Analyse et modélisation du fonctionnement biophysique et décisionnel d'un système prairial irrigué - Application aux prairies plurispécifiques de Crau en vue de l'élaboration d'un Outil d'Aide à la Décision – Thèse Montpellier SupAgro 200 p.
- Miller, K.G., Kominz, M.A., Browning, J.V., Wright, J.D., Mountain, G.S., Katz, M.E., Sugarman, P.J., Cramer, B.S., Christie-Blick, N., Pekar, S.F., 2005. The Phanerozoic record of global sea-level change. *Science* 310, 1293–1298.
- Molinier R., Tallon G., 1950 La végétation de la Crau. Extrait de la Revue générale de Botanique Tome 56-57 – 1949-50, 111 p.
- Molliex, S., 2009. Caractérisation de la déformation tectonique récente en Provence (SE France). PhD 443 thesis, Aix-Marseille III University, 350 pp.
- Molliex, S., Siame, L., Bourlès, D., Bellier, O., Braucher, R., Clauzon, G., 2013. Quaternary evolution of a large alluvial fan in a periglacial setting (Crau Plain, SE France) constrained by terrestrial cosmogenic nuclide (<sup>10</sup>Be). *Geomorphology* 195, 45-52.
- Olioso, A. & al. 2013. Bilan hydrique des agrosystèmes de Crau face aux changements globaux. In. *Écologie et conservation d'une steppe méditerranéenne - La plaine de la Crau*. Edité par L. Tatin, A. Wolff, J. Boutin, E. Colliot et T. Dutoit. Éditions Quae, pp. 266-288.
- 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.

Prinos, Scott T., 2005), Correlation Analysis of a Ground-Water Level Monitoring Network, Miami-Dade County, Florida: U.S. Geological Survey Open-File Report 2004-1412, <https://pubs.usgs.gov/of/2004/1412/correlation.html>

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.

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.

Sauquet E. 2016 R2D22050 Risque, ressource en eau et gestion durable de la Durance en 2050. Les connaissances scientifiques au service de la Direction de la recherche et de l'innovation (DRI) du Commissariat Général au Développement Durable (CGDD), pp.47-55, 2015.

Seraphin 2016a Contribution du traçage isotopique ( $\delta^{18}O$  et  $\delta D$ ) à la compréhension et à la modélisation hydrogéologique de la nappe de la Crau Thèse de Doctorat de l'université Aix Marseille 260 pp.

Seraphin et al. 2016b Partitioning groundwater recharge between rainfall infiltration and irrigation return flow using stable isotopes: The Crau aquifer Journal of Hydrology 542 Nov 2016 p. 241-253

Seraphin et al. 2018 Multi-approach assessment of the spatial distribution of the specific yield : application to the Crau plain aquifer, France Hydrogeology Journal March 2018 18 pp

SYMCRAU 2015 Bulletin sur l'état quantitatif de la nappe de la Crau - Période décembre 2013 - décembre 2014, Rapport Juillet 2015, 24 p.

SYMCRAU 2016a Dossier définitif contrat de nappe Crau pour une gestion durable et solidaire de la ressource en eau Tome 1 Diagnostic, enjeux et stratégie du contrat Juillet 2016 134 pp.

SYMCRAU 2016b Dossier définitif contrat de nappe Crau pour une gestion durable et solidaire de la ressource en eau Tome 2 Cahier de fiches actions Juillet 2016 190 pp.

SYMCRAU 2017 Etude des résurgences de Mouriès – Dossier technique n°2 12 pp.

Tatin L., Wolff A., Boutin J., Colliot E., 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.

Terrier, M., Courrioux, G., Martelet, G., avec la collaboration de Bitri, A., et Hanot, F. (2007) – Etude de la faille de Salon-Cavaillon (Région PACA, France) – Rapport final. BRGM RP-55989-FR, 177 p., 66 fig., 3 ann.

Triat H., 1975 L'analyse pollinique de la tourbière de Fos-sur-Mer (B. du Rh.). *Ecologia mediterranea* T1-1975, 109-121

Villesseche et al. 2017 Mise en place et évaluation d'un réseau piézométrique : retour d'expériences sur la nappe alluviale de la Crau *Geologues* 195 décembre 2017

Wuilleumier A., Rivet F. (2018) - Avis sur le modèle hydrogéologique de la nappe de la Crau développé par le SYMCRAU. Rapport d'expertise. Rapport BRGM/RP-68025-FR. 48 p., 20 ill., 2 ann.

## 7 LISTE DES ANNEXES

### Annexe 1

Occupation du sol de la nappe de la Crau en 2016 - Rapport technique synthétique - Décembre 2016 (chapitre 3.2)

### Annexe 2

Synthèse des connaissances sur les aquifères bordiers de la nappe de la Crau et implications pour la stratégie de modélisation - Juillet 2018

### Annexe 3

Rapport de stage de Benoit GUIRAL (2018) Nappe de la Crau : un ou plusieurs aquifères ? Apports des données récentes sur l'interprétation de la géométrie du réservoir

### Annexe 4

Dépendance des zones humides avec la profondeur de la nappe – Décembre 2018

### Annexe 5

Tableaux des pluies mensuelles relevées sur les stations climatiques en Crau

### Annexe 6

Description des méthodes de calcul de drainage en fonction de l'occupation des sols

### Annexe 7

Fiche synthétique des résultats de la simulation de référence 2013-2018 (chapitre 5)

### Annexe 8

Fiches de synthèse des résultats de l'analyse de sensibilité aux conditions de recharges et de prélèvements (chapitre 6)

### Annexe 9

Restitution de la concertation sur les scénarios de gestion future de la ressource en eau "Demain... Quelles évolutions et quels usages de la nappe de la Crau ?" – décembre 2018 (chapitre 7)

### Annexe 10

Fiches de synthèse des résultats de l'analyse prospective à l'horizon 2050 (chapitre 7)

### Annexe 11

Fiches de synthèse des résultats de l'analyse des scénarios de gestion sécheresse (chapitre 8)



Etude réalisée par :



Avec l'appui technique de :



Avec l'appui en concertation de :



Partenaires techniques et financiers :



PRÉFET DE LA RÉGION  
PROVENCE-ALPES  
CÔTE D'AZUR



établissement public de l'État



PROVENCE  
ALPES  
CÔTE D'AZUR



DÉPARTEMENT  
BOUCHES  
DU RHÔNE



établissement public de l'État

