

The logo for SYMCRAU features the word "SYMCRAU" in a bold, blue, sans-serif font. It is enclosed within a blue graphic element that resembles a stylized water drop or a trapezoid with a pointed bottom, with a horizontal line passing through the middle of the text.

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

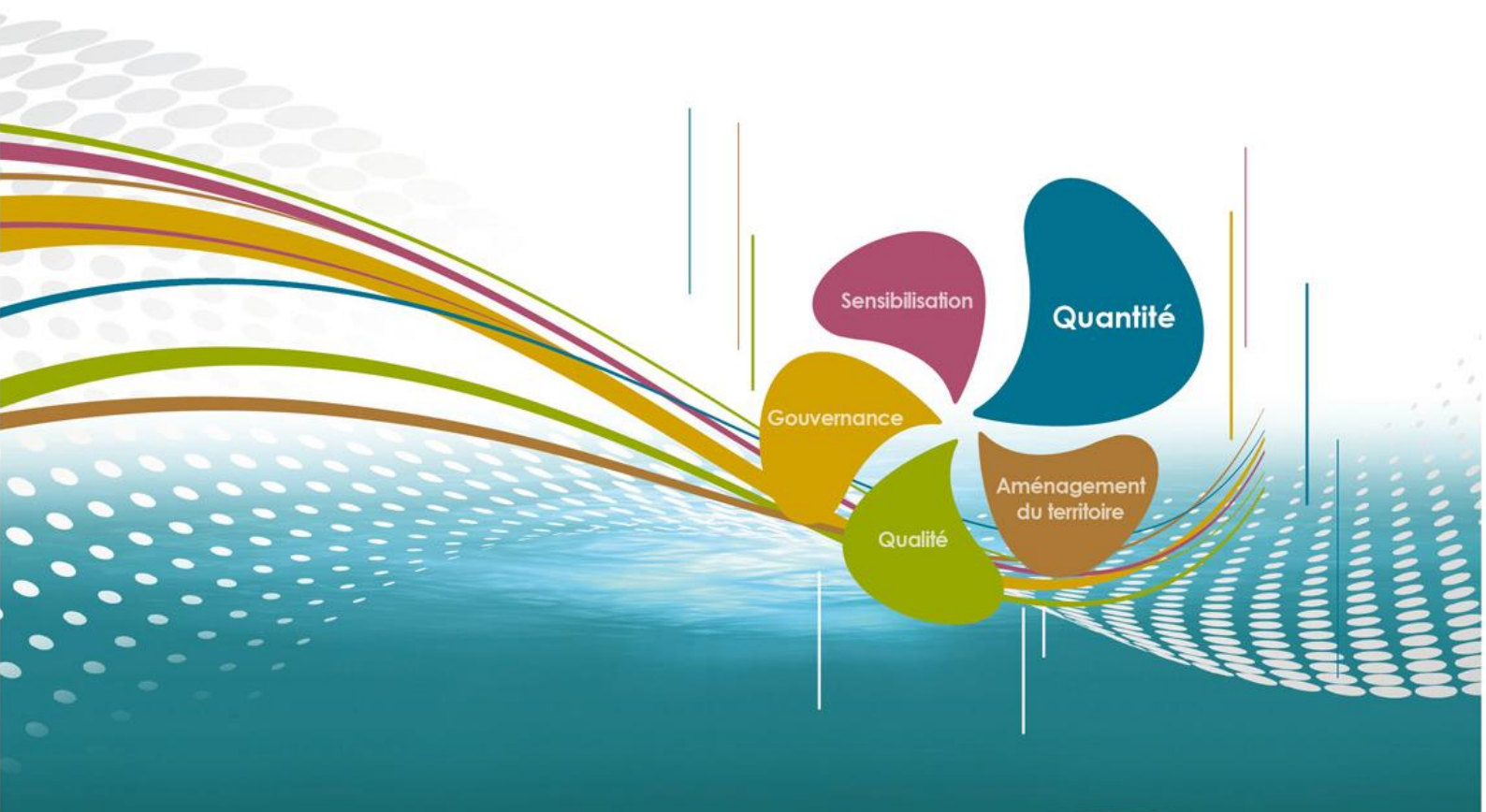
Opération inscrite au

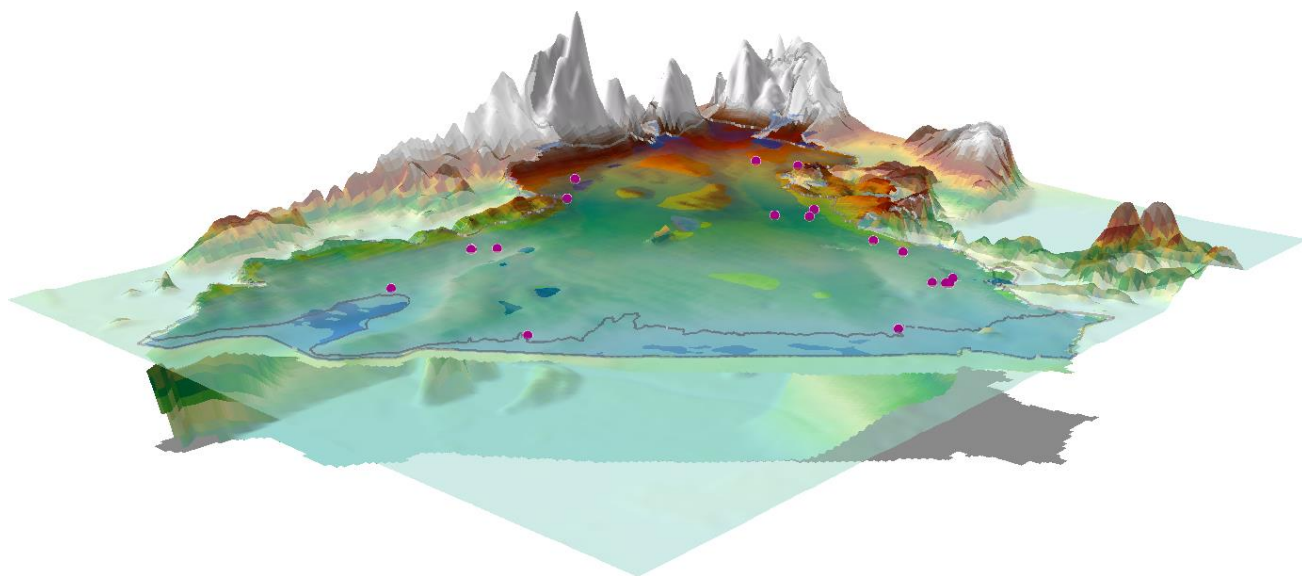
Contrat
de **nappe** Crau

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 ressource à l'horizon 2050

Synthèse

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 - Synthèse 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

1	L'AVENIR DES EAUX DE LA CRAU EN QUESTION.....	7
1.1	Des hydro systèmes sous tensions.....	8
1.1.1	<i>L'irrigation gravitaire : Un héritage exceptionnel qui pourrait être remis en question</i>	<i>8</i>
1.1.2	<i>Une pression foncière continue sur les terres agricoles</i>	<i>8</i>
1.1.3	<i>Une inquiétude sur les impacts potentiels du changement climatique</i>	<i>8</i>
1.2	Des connaissances à approfondir et des outils à mobiliser pour appréhender le fonctionnement d'un système aquifère	9
1.2.1	<i>De la nécessité de modéliser pour prévoir</i>	<i>9</i>
1.2.2	<i>De la nécessité de connaître avant d'essayer de prévoir</i>	<i>9</i>
1.2.3	<i>Les outils de simulation du systeme aquifère de la Crau</i>	<i>17</i>
1.3	Les enjeux en Crau liés aux évolutions potentielles de la nappe	22
1.3.1	<i>Des enjeux socio-economiques : les usages préleveurs.....</i>	<i>22</i>
1.3.2	<i>Des enjeux écologiques : l'alimentation des zones humides en plaine de Crau et sur ses bordures²⁴</i>	
1.3.3	<i>Synthèse des indicateurs de gestion</i>	<i>25</i>
1.3.4	<i>Méthodologie de classement des indicateurs.....</i>	<i>25</i>
1.4	La nappe de la Crau aujourd'hui	29
1.4.1	<i>Piézométrie actuelle de la nappe des cailloutis</i>	<i>29</i>
1.4.2	<i>La recharge et les exutoires des eaux souterraines</i>	<i>31</i>
1.4.3	<i>Le degré de satisfaction des enjeux actuels liés à la nappe</i>	<i>33</i>
2	SIMULATIONS EXPLORATOIRES ET PREVISIONNELLES.....	35
2.1	Quantification de la sensibilité de la nappe aux conditions de recharge et de prélèvements	36
2.1.1	<i>48 simulations pour approcher de façon systématique l'impact d'un déficit de ressource en eau souterraine par rapport à la situation actuelle</i>	<i>36</i>
2.1.2	<i>Impacts des variations du couple volumes irrigation gravitaire et prélèvements</i>	<i>37</i>
2.1.3	<i>Impacts d'un deficit de ressource en eau souterraine</i>	<i>40</i>
2.2	Les futurs possibles à l'horizon 2050	43
2.2.1	<i>7 simulations pour explorer différentes trajectoires socio-économiques</i>	<i>43</i>
2.2.2	<i>Les évolutions potentielles de la ressource à l'horizon 2050</i>	<i>44</i>
2.3	L'impact d'une secheresse et de sa gestion	48
2.3.1	<i>5 simulations pour appréhender les effets des mesures potentielles de gestion des épisodes de sécheresse sévère.....</i>	<i>48</i>
2.3.2	<i>Impact de la gestion des épisodes de sécheresse.....</i>	<i>50</i>

3	QU'EST-CE QUE NOUS APPREND SINERGI ?	52
3.1	Une réduction des incertitudes sur le fonctionnelent du système aquifère	52
3.1.1	<i>Une vision détaillée des flux entre les différents hydro-systèmes.....</i>	<i>52</i>
3.1.2	<i>Une nappe dans un système aquifère</i>	<i>54</i>
3.1.3	<i>Des enjeux pour la gestion de nappe identifiés et cartographiés</i>	<i>55</i>
3.2	Quelles stratégies pour l'avenir de la ressource en eau ?.....	57
3.2.1	<i>Comment evolueront les usages et les bénéfices actuels ?</i>	<i>57</i>
3.2.2	<i>Quels sont les leviers pour accompagner ces éventuelles evolutions ?</i>	<i>59</i>
3.2.3	<i>Les arbitrage à considérer pour concevoir la gestion de l'eau.....</i>	<i>62</i>
4	CONCLUSION.....	64
5	BIBLIOGRAPHIE	67

1 L'AVENIR DES EAUX DE LA CRAU EN QUESTION

Préambule

SINERGI est une étude réalisée par le SYMCRAU et financée par l'Agence de l'Eau et la Région Sud Provence Alpes Côte d'Azur. Son objectif est l'élaboration d'une stratégie de gestion de la demande et de la ressource en eau face aux évolutions attendues du territoire.

Elle a débuté en juin 2018 et a été finalisée en septembre 2020.

Face aux évolutions en cours, en premier lieux les changements climatiques, et aux risques de pénuries d'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.

Cette prospective cible un horizon proche (2050), pour lequel l'étude vise à approcher les évolutions climatiques et socio-économiques prévisibles, leurs impacts sur la ressource disponible et les besoins en eau, ainsi que les mesures d'adaptation opérationnelles à mettre en œuvre pour atténuer la vulnérabilité du territoire.

Comme le dit Michel Godet, prospectiviste français, « la bonne projection n'est pas celle qui se réalise mais celle qui conduit à l'action ». Ainsi, il ne s'agit pas d'établir une prospective exacte, tâche impossible, mais davantage d'envisager ensemble les futurs possibles pour ne pas subir l'avenir mais le préparer.

Ainsi, 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. Parmi ces futurs possibles, se posera nécessairement celui d'éventuelles évolutions concernant les prélèvements dans la nappe. 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 dotations des flux en provenance de 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/dotations sur les enjeux identifiés liés à la nappe (usages AEP, agricoles et industriels, mais aussi les milieux naturels).
- La deuxième approche 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.
- 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 événement exceptionnel de sécheresse, ici une diminution de 50% des précipitations durant deux années consécutives.

Pour être capable d'appréhender les impacts de ces évolutions potentielles sur les niveaux de nappe, l'étude SINERGI s'est appuyée sur une chaîne de modélisation dénommée MHYCRAU.

1.1 DES HYDRO SYSTEMES SOUS TENSIONS

1.1.1 L'IRRIGATION GRAVITAIRE : UN HERITAGE EXCEPTIONNEL QUI POURRAIT ETRE REMIS EN QUESTION

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.

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, classée stratégique dans le SDAGE pour l'alimentation de près de 300 000 habitants et dont dépendent des activités agricoles et industrielles majeures.

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 pourraient avoir 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.

1.1.2 UNE PRESSION FONCIERE CONTINUE SUR LES TERRES AGRICOLES

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 et entraîne 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.

1.1.3 UNE INQUIETUDE SUR LES IMPACTS POTENTIELS DU CHANGEMENT CLIMATIQUE

Dans son 5ème rapport, publié en 2014, le GIEC (Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat) met en évidence :

- Une hausse de la température moyenne mondiale de 0,85°C sur la période 1880-2012.
- Une accélération du réchauffement. Chacune des trois décennies (1980-90 / 1990-2000 / 2000-2010) a été plus chaude que la précédente et que toutes les autres depuis 1850.
- L'influence des activités humaines sur le réchauffement climatique. En particulier, c'est l'augmentation des émissions anthropiques de gaz à effet de serre (dioxyde de carbone, méthane et oxydes nitreux) sous l'ère industrielle qui est la principale cause du réchauffement observé.

Il est aujourd'hui reconnu que le changement climatique a d'ores et déjà impacté le grand cycle de l'eau en France. En effet, derrière une augmentation moyenne annuelle d'environ 1°C, se cache de

grandes variabilités spatiales et temporelles : certains territoires sont plus impactés par ce réchauffement que d'autres et les variations observées sont souvent plus fortes en été qu'en période hivernale. A titre d'exemple, le réchauffement observé moyen des étés en Cévennes est de +3°C entre 1980 et 2010.

Les conséquences reconnues du changement climatique sont doubles :

- Modification de la distribution des pluies sur un cycle annuel (intensification des événements pluvieux).
- Augmentation de l'évapotranspiration donc diminution de la pluie efficace (part de l'eau météorologique destinée à l'infiltration et au ruissellement).

Concernant la Crau, les enjeux sont doubles : possibilité d'une perte de recharge par baisse de l'infiltration des eaux de pluie sur la Plaine de Crau et d'une diminution conjoncturelle et/ou structurelle de la disponibilité de l'eau transférée depuis la Durance.

1.2 DES CONNAISSANCES A APPROFONDIR ET DES OUTILS A MOBILISER POUR APPREHENDER LE FONCTIONNEMENT D'UN SYSTEME AQUIFERE

1.2.1 DE LA NECESSITE DE MODELISER POUR PREVOIR

Le contexte dans lequel se placent 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 vont être amenés à évoluer dans les prochaines décennies. SINERGI vise à analyser les conséquences potentielles de ces évolutions sur la ressource en eau et à déterminer les leviers possibles pour en atténuer les impacts négatifs.

L'objectif de SINERGI est ambitieux. C'est un exercice de prospective, de prévision des futurs possibles de plusieurs hydrosystèmes en interrelations.

Un tel exercice n'est possible qu'avec un modèle dit hydrodynamique qui intègre et relie toutes les hypothèses concernant les mécanismes susceptibles d'influencer la nappe de Crau (les conditions hydrométéorologiques, les usages préleveurs, l'irrigation, la nature des sols) et la nappe elle-même (ses niveaux dans le temps mais aussi les flux d'eau qui entrent et qui sortent de la nappe). **L'étude SINERGI s'est donc appuyée sur l'actualisation d'une chaîne de modélisation intégrant un modèle de surface et un modèle de nappe (MHYCRAU). Ce modèle numérique permet de décrire les variations des niveaux de nappe en fonction de différents futurs possibles.**

Il est important de comprendre que la capacité de prévision d'un modèle n'est pas absolue. Elle est liée au choix des échelles spatiales et temporelles de description des phénomènes et dépend de la qualité des données qui servent d'hypothèses aux calculs.

MHYCRAU, décrivant des phénomènes sur des mailles de 200x200 m et variant tous les 10 jours, est un modèle du système assez fin pour anticiper les impacts sur de grands cycles annuels des variations de nappe sur les principaux usages de la nappe et sur les zones humides qui en dépendent.

1.2.2 DE LA NECESSITE DE CONNAITRE AVANT D'ESSAYER DE PREVOIR

La qualité de prévision d'un modèle dépend de la qualité de ses données constitutives. Il est donc essentiel de bien connaître toutes ces données, de les actualiser, avant de se lancer dans un exercice de modélisation. Il serait vain et illusoire d'essayer de prédire des trajectoires futures possibles pour un système mal décrit dans son fonctionnement actuel.

LES CONNAISSANCES SUR LA NAPPE DE LA CRAU EN DEBUT D'ETUDE

La nappe phréatique de la Crau se situe dans les dépôts sédimentaires de l'ancien delta de la Durance d'époque plio-quaternaire. 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 (figure 1). 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.

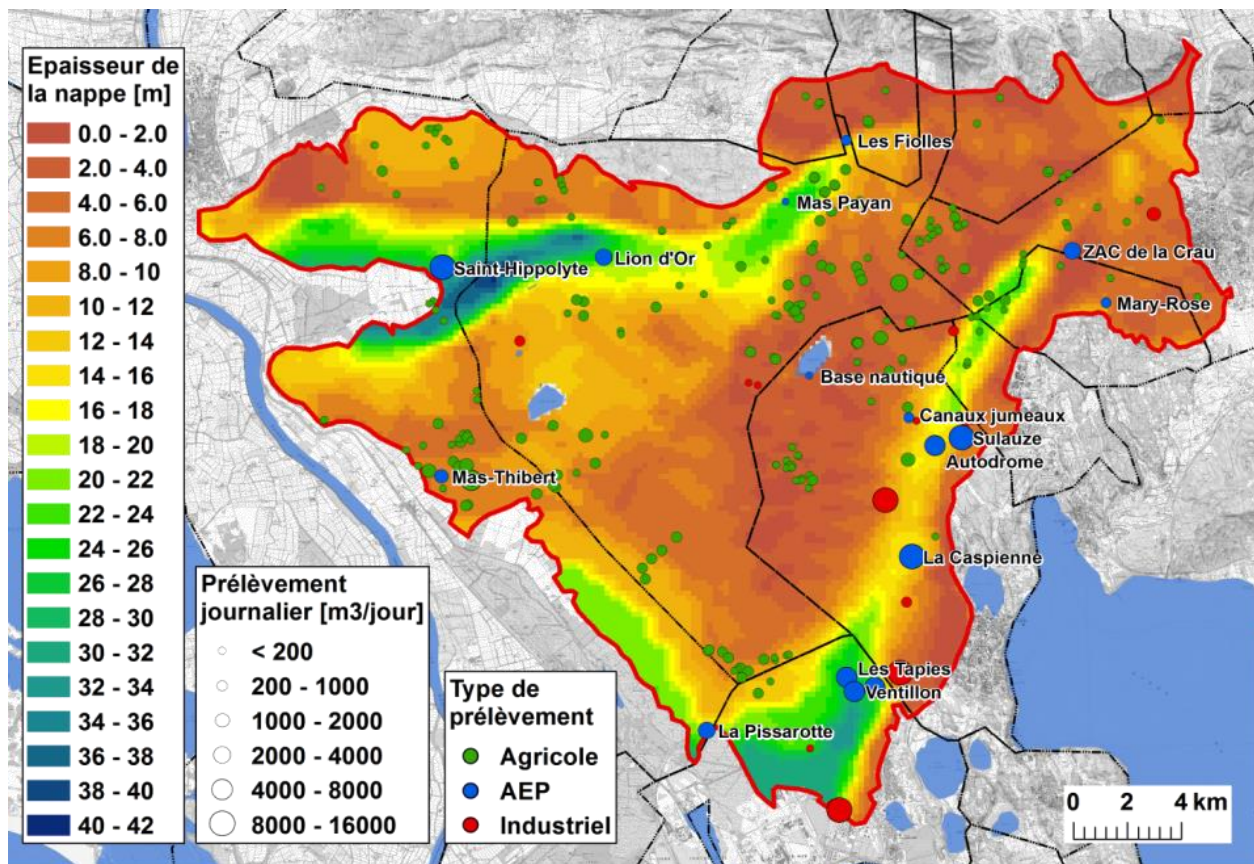


Figure 1 Epaisseur de la nappe (BRGM 2004) et prélèvements référencés.

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.

La recharge de la nappe serait 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. 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 avec un faible apport en provenance des collines du pays salonnais.

L'AMELIORATION DES CONNAISSANCES MENEES DANS SINERGI

Afin de renforcer la démarche de modélisation, les actions suivantes ont été déployées dans le cadre de SINERGI :

- **Actualisation 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, d'images satellitaires SPOT et photo-aériennes. 21 classes d'OS ont ainsi été identifiées (figure 2). 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).

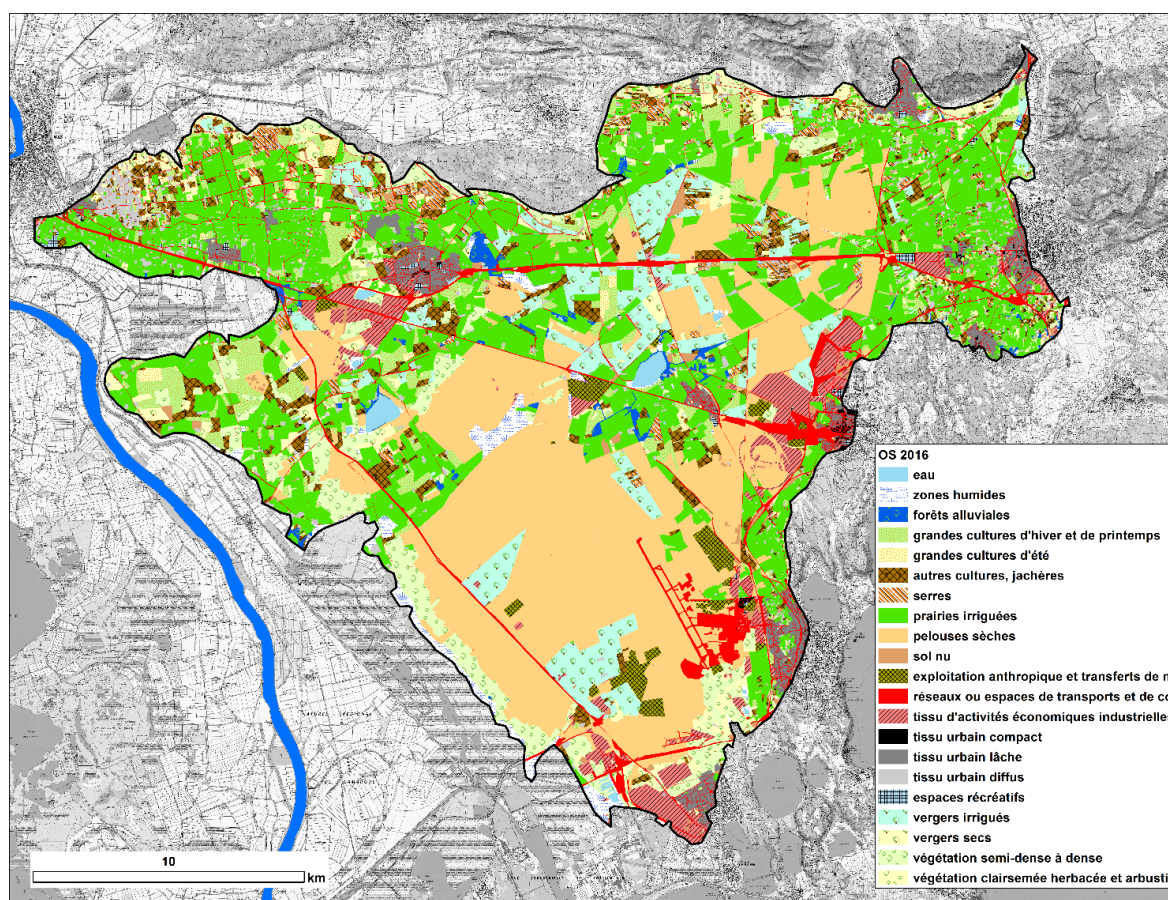


Figure 2 Occupation des sols 2016

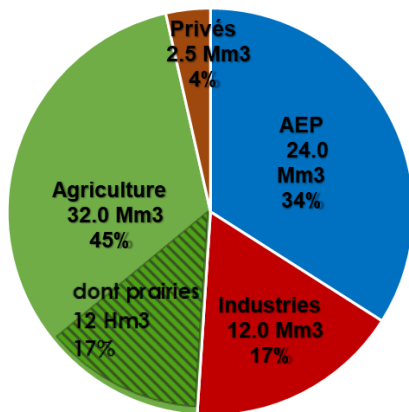
		Surface		
		ha	%	
Zones urbanisées		5200	10%	
Zones agricoles	prairies	14200	28%	50%
	autres cultures	11100	22%	
Zones naturelles	coussouls	14200	28%	40%
	autres	5900	12%	

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

▪ **Actualisation de l'estimation des prélèvements 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). 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 millions de m³/an entre 2012 et 2016, avec une variation interannuelle relativement faible établies autour de 1 millions de m³.
- Captages domestiques privés. Les dernières estimations effectuées sur les prélèvements domestiques individuels ont été réalisés par le bureau d'étude GINGER en 2009 dans le cadre du bilan quantitatif de la nappe de la Crau. Les prélèvements privés pour des usages domestiques peuvent être évalués à environ 2.5 millions de m³/an.
- Captages industriels ou du secteur tertiaire. La base de données de l'Agence de l'eau indique les prélèvements industriels représentent 11 captages pour un volume annuel moyen s'établissant autour de 12 millions de m³ entre 2012 et 2016.
- Captages agricoles pour les cultures irriguées. Les prélèvements agricoles en Crau sont partiellement connus. Un OUGC permet aux irrigants de s'enregistrer, mais les moyens de contrôles ne permettent pas de vérifier efficacement l'exactitude et l'exhaustivité des données renseignées. Une analyse statistique des prélèvements agricoles a été réalisée en fonction des déclarations référencées, rapportées aux surfaces connues pour chaque type de culture. La répartition spatiale de ces estimations est ensuite repositionnée en fonction de l'occupation agricole déterminée en 2016. Cette estimation permet de proposer, pour les besoins agricoles, environ 32 Mm³/an dont 12 Mm³ pour les prairies.

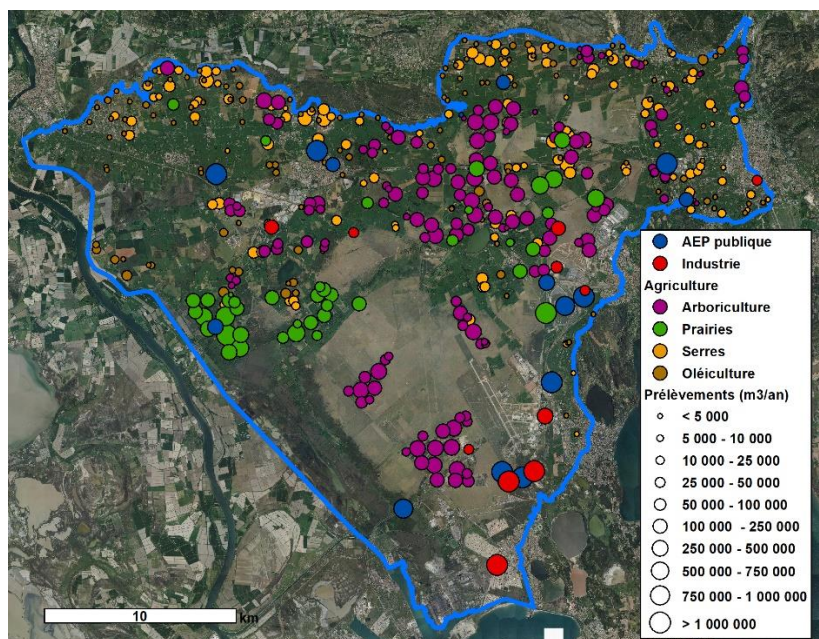
On peut estimer le prélèvement actuel total dans la nappe à environ 71 millions de m³/an (figure 3), avec l'agriculture comme principale activité consommatrice d'eau (32 millions de m³/an), suivie de l'alimentation en eau potable publique (24 millions de m³/an), les activités industrielles (12 millions de m³/an) et enfin les besoins domestiques privés (2.5 millions de m³/an). La carte ci-dessous permet d'appréhender la distribution spatiale de ces prélèvements.



▲ Bilan

➤ Répartition spatiale

Figure 3 Prélèvements estimés sur la période 2013-2018



▪ **Mise en place d'une approche sur l'influence des aquifères bordiers sur la nappe de la Crau (HYDROFIS, 2018).** La nappe de la Crau est hydrauliquement connectée à des aquifères bordiers qui contribuent à son alimentation 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 demeurerait 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 (figure 4) et une estimation des conditions flux entrant et sortant (tableau 2).

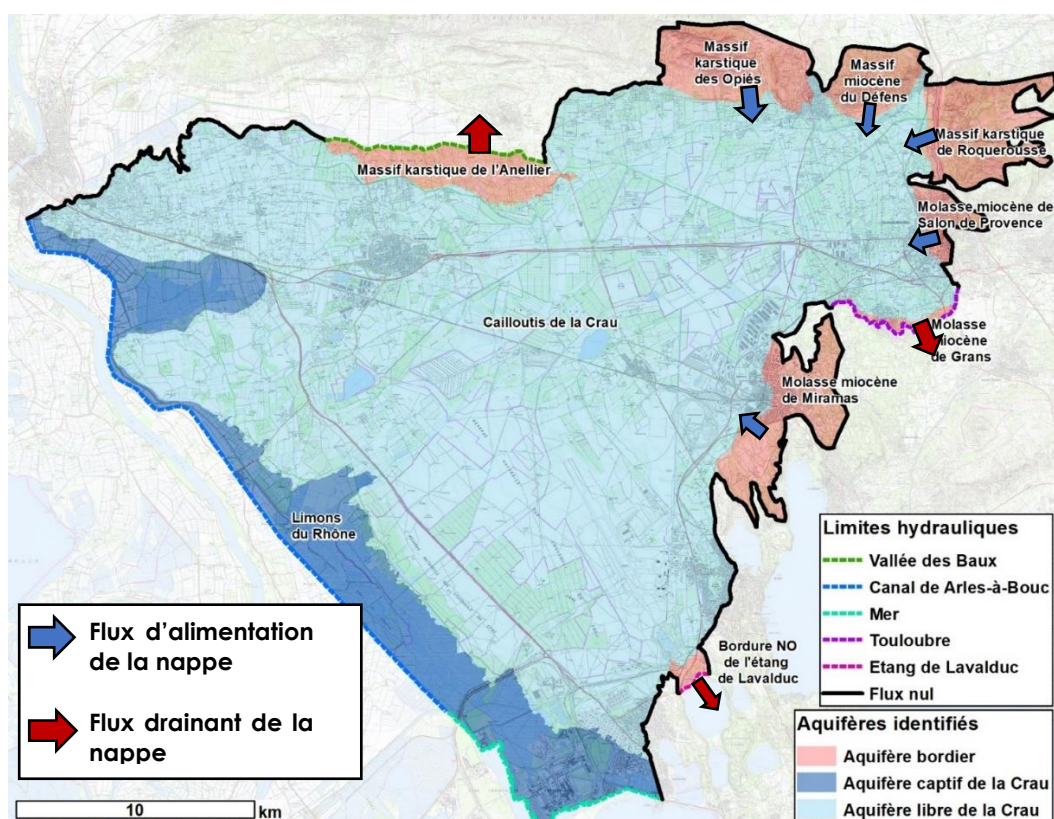


Figure 4 Aquifères bordiers alimentant ou drainant la nappe de la Crau

Massif	Nature des flux pour la nappe de la Crau	Estimation des flux « actuels » (débit fictif continu) Mm3 = millions de m ³
Partie occidentale de la Dépression des Baux	Drainants mais faibles et localisés	Négligeables dans le processus de modélisation
Massif karstique de l'Anellier	Drainant	De l'ordre de 30 Mm ³ /an (estimation peu fiable)
Partie orientale de la Dépression des Baux	Drainants mais faibles et localisés	Négligeables dans le processus de modélisation
Massif karstique des Opies	Alimentant	De l'ordre de 1 à 1,5 Mm ³ /an
Massif miocène du Défens	Alimentant	De l'ordre de 0,5 Mm ³ /an
Massif karstique de Roquerousse	Alimentant	Entre 2,5 et 3 Mm ³ /an
Molasse miocène de Salon de Provence	Alimentant	Entre 1 et 1,5 Mm ³ /an
Molasse miocène de Grans	Drainant	Environ 1 Mm ³ /an pour la source Marie-Rose, inconnus pour les venues sous-alluviales
Molasse miocène de Miramas	Alimentant	Environ 2 Mm ³ /an
Bordure Nord-Ouest de l'étang de Lavalduc	Drainant	Estimation peu fiable d'environ 3 Mm ³ /an

Tableau 2 Synthèse des échanges entre nappe de Crau et aquifères bordiers

▪ **Actualisation de la géométrie du système aquifère 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 (BRGM 2004). L'actualisation de nouvelles données géologiques renseignées dans la BSS depuis 2004 a été conduite sur la base des travaux de Séraphin (2016a), complétées par les connaissances sur les forages domestiques déclarés à l'ARS (Guiral 2018), afin de proposer une réinterprétation de la géométrie du mur des cailloutis (figure 5). Une réinterprétation récente des campagnes géophysiques, conduites par le secteur pétrolier depuis les années 50, ont également apporté de nouvelles connaissances sur la géométrie des formations constituant le substratum des cailloutis (Depons, 2007). Cette analyse met en évidence l'épaisse série sablo-argileuse du pliocène, liée à l'incision messinienne, qui constitue le substratum imperméable de l'aquifère des cailloutis dans sa partie sud-ouest (figure 6).

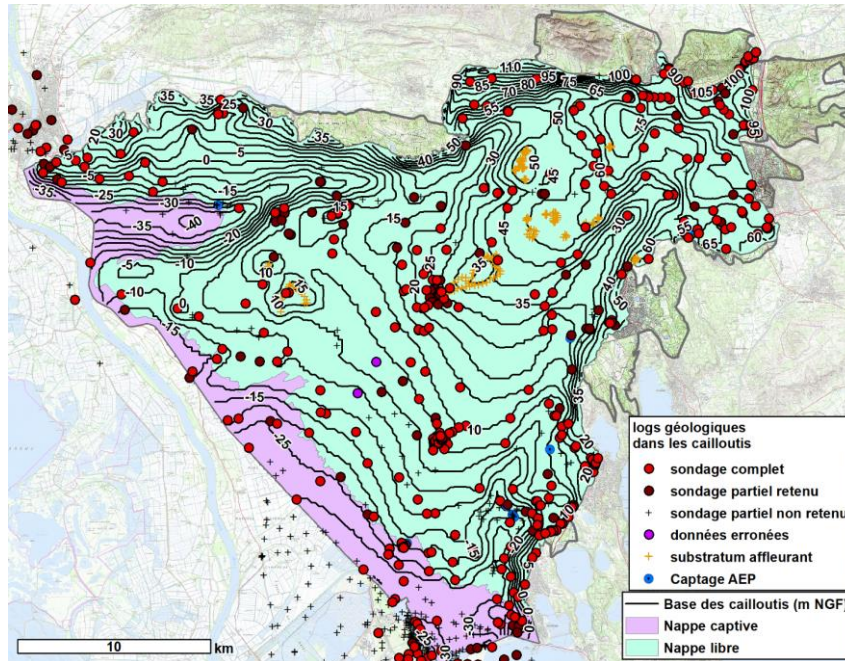


Figure 5 Topographie du substratum des cailloutis de la Crau

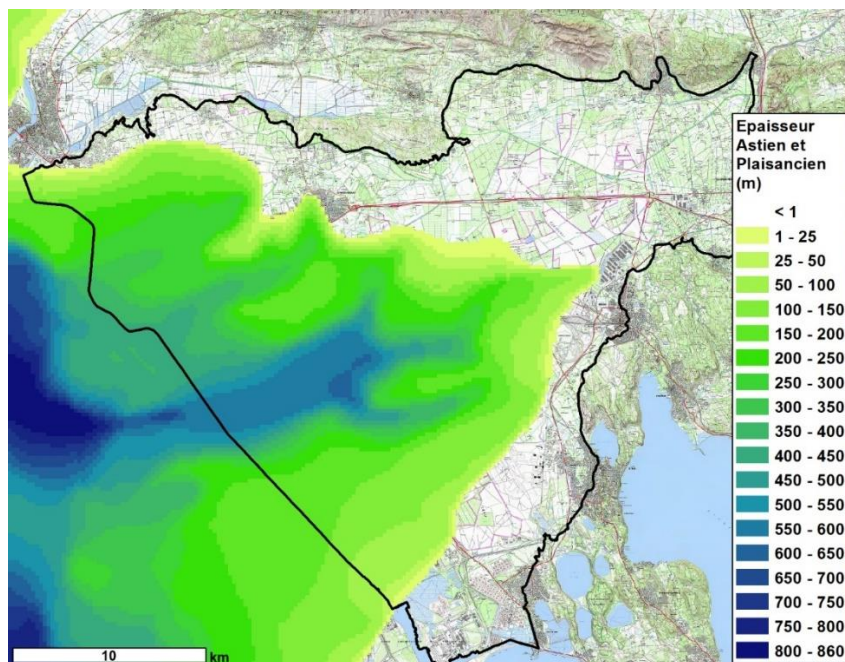


Figure 6 Epaisseur de la série astienne et plaisancienne sous les cailloutis plio-quaternaires

• **Première caractérisation des écosystèmes dépendants des eaux souterraines.** Hormis quelques plans de gestion des zones humides protégées, les études sur le fonctionnement des milieux humides alimentés par la nappe étaient incomplètes et ne permettaient pas de statuer sur leurs dépendances aux eaux souterraines. Des premières investigations ont donc 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 (ECOSPHERE, 2018). La figure 7 illustre les zones humides ainsi identifiées et leur relation avec les zones d'émergence de la nappe.

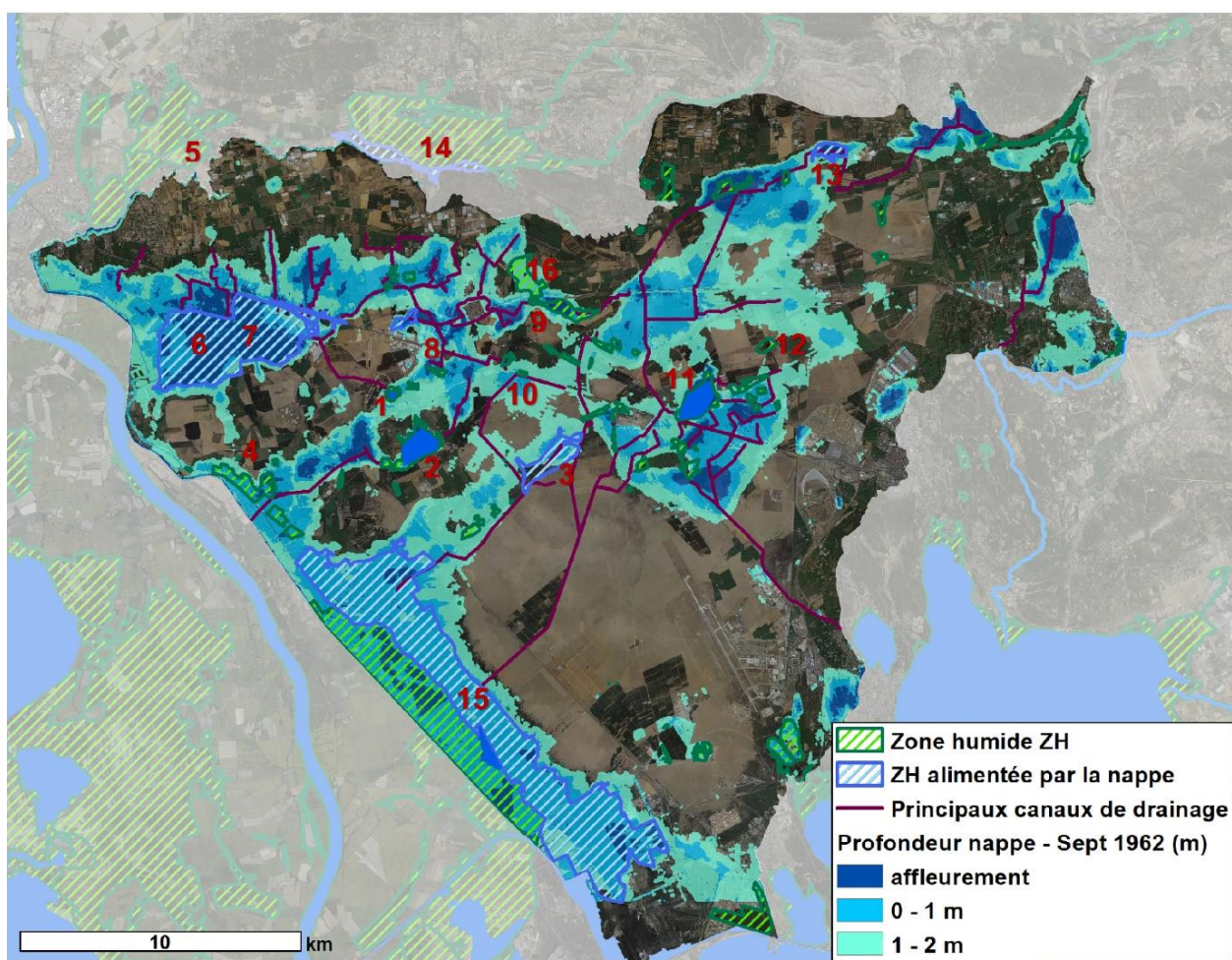


Figure 7 Zones humides sur la plaine de la Crau (secteurs investigués numérotés), profondeur de la nappe et milieux humides dépendants des eaux souterraines (Baillieux et al. 2019)

▪ **Analyse de la distribution spatiale des pluies sur la plaine de la Crau et les massifs environnants.**

La plaine de la Crau est caractérisée par une distribution contrastée des pluies, probablement favorisée par le contexte géomorphologique : relief au nord et littoral au sud. Les flux de recharge naturelle de la nappe de la Crau étant dépendant de l'intensité des pluies, il convient de mieux comprendre leur distribution spatiale et la représentativité des stations climatiques en place. 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 8) ne permet pas de dégager de tendances très nettes en lien avec la géomorphologie du site : les précipitations les plus intenses se situent au nord et à l'ouest de la plaine, tandis que le secteur central est marqué par des cumuls faibles. La station climatique du domaine du merle est la station la plus représentative des conditions moyennes des pluies sur la plaine.

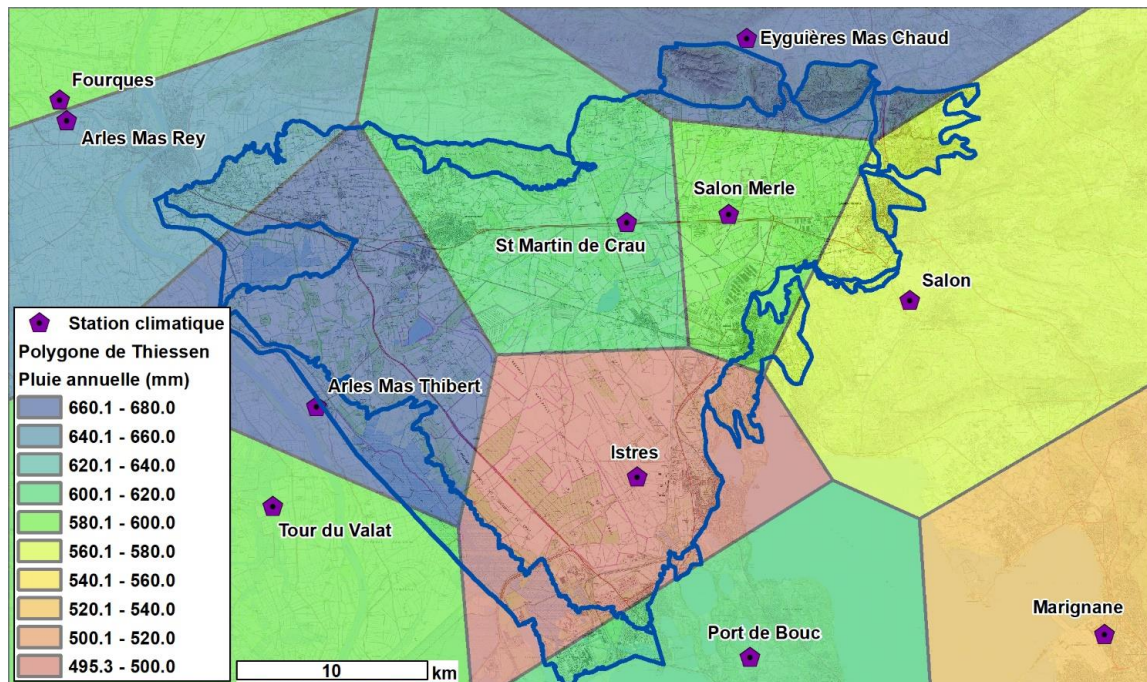


Figure 8 Localisation des stations climatiques dans le secteur de la plaine de la Crau et distribution des polygones d'influence (méthode de Thiessen)

• **Analyse spatiale des dynamiques piézométriques de la nappe.** 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.

Si l'on néglige la zone de bordure du fait de sa modeste emprise et la zone de haut fond du substratum, qui constituent une zone de relais hydraulique avec des dynamiques piézométriques peu cohérentes, le calcul de corrélation statistique sur les variations piézométriques, appliqué au réseau de surveillance 1955-1969 et 2013-2018, permet de distinguer trois grandes zones (figure 9) : zone de recharge contrôlée par l'irrigation (vert), zone de recharge contrôlée par les pluies (bleu) et la zone de drainage (violet).

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.

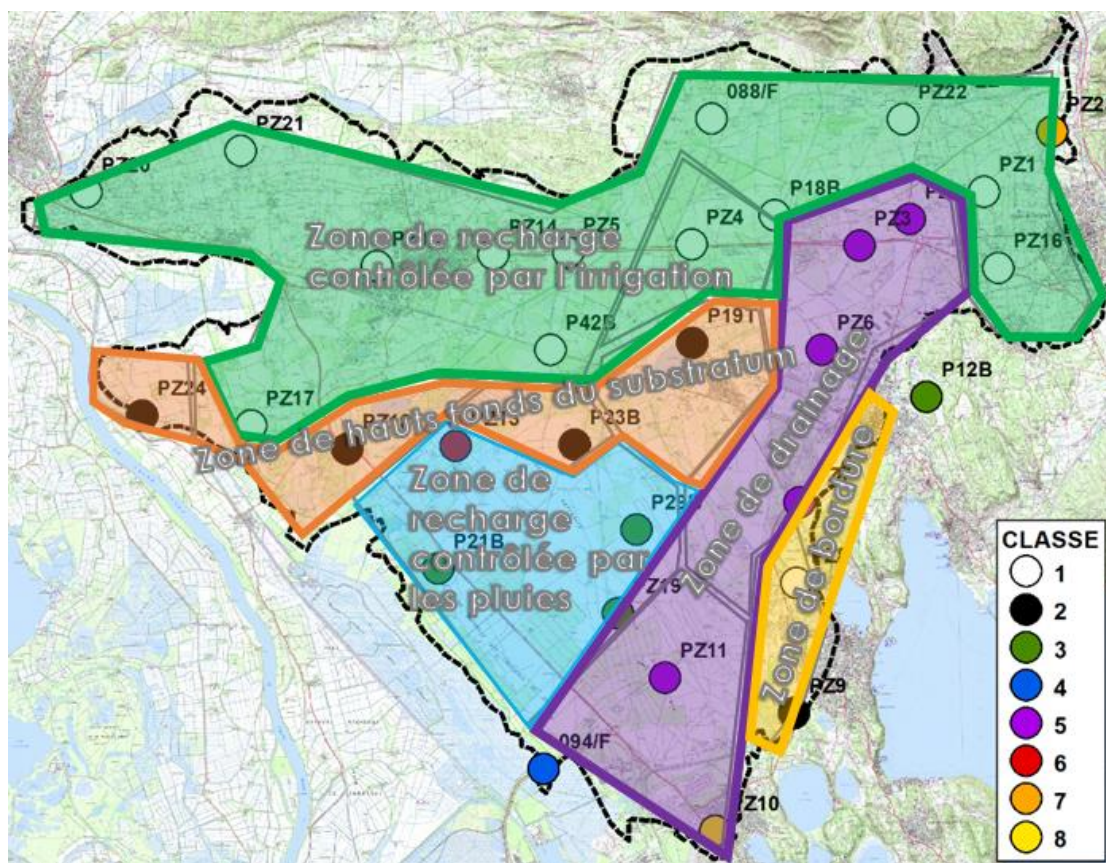


Figure 9 Grandes zones de cohérence piézométriques

1.2.3 LES OUTILS DE SIMULATION DU SYSTEME AQUIFERE DE LA CRAU

LA CHAÎNE DE MODELISATION

Le modèle MHYCRAU a été développé dans le cadre des projets de recherche ASTUCE&TIC (2008-2011) (De Mordant de Massiac *et al.*, 2011) et SIRRIMED (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 composée (figure 10) :

- 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.
- d'un **modèle de nappe** capable de simuler les écoulements souterrains en fonction des conditions de recharges et de prélèvements calculées 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)

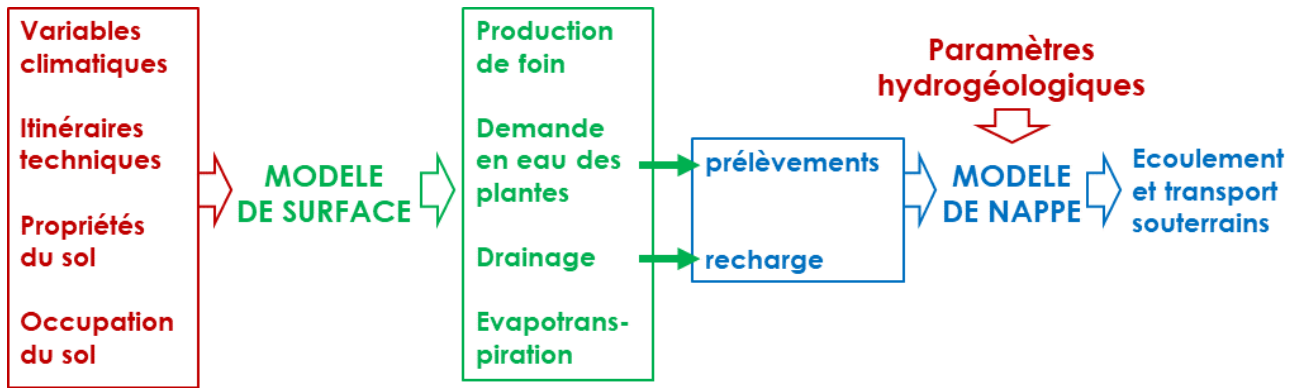


Figure 10 Chaîne de modélisation MHYCRAU

LE 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 (buisson *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)

LE MODELE 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). Le tableau 3 en présente les principales caractéristiques.

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

Tableau 3 Paramètres généraux du modèle de nappe

Les données de recharges introduites dans le modèle de nappe correspondent aux lames d'eau de drainage générées par le modèle de surface pour chaque maille du modèle au pas de temps décadaire (figure 11). En moyenne sur la période 2013-2018 (figure 12), les lames d'eau infiltrées par type d'occupation des sols varient entre 0 (zone captive) et 2400 mm/an (prairies irriguées). Dans les zones naturelles, cette lame d'eau infiltrée varie entre 150 et 300 mm.

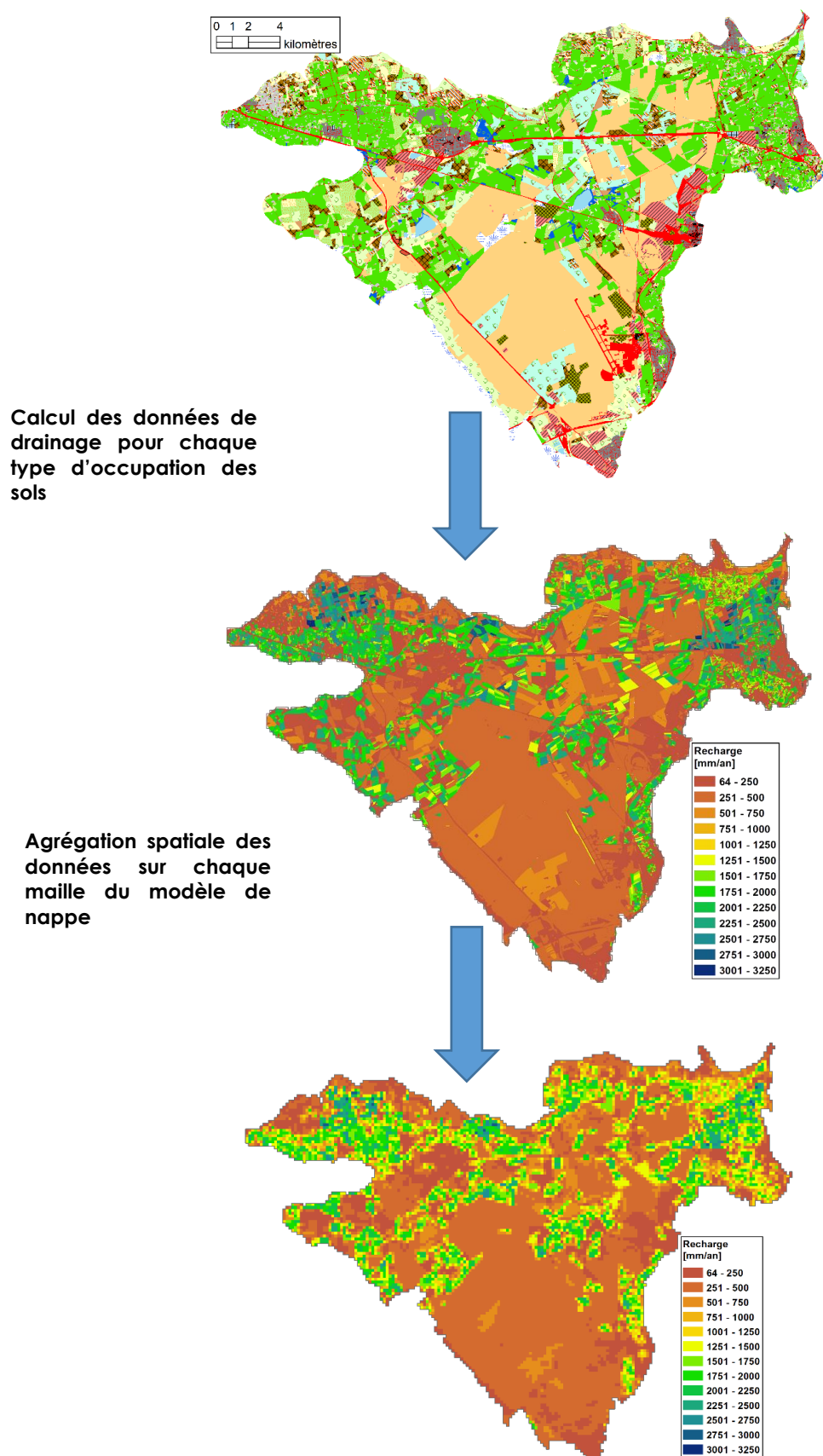


Figure 11 Illustration des différentes étapes de calculs du drainage pour chaque maille du modèle de nappe

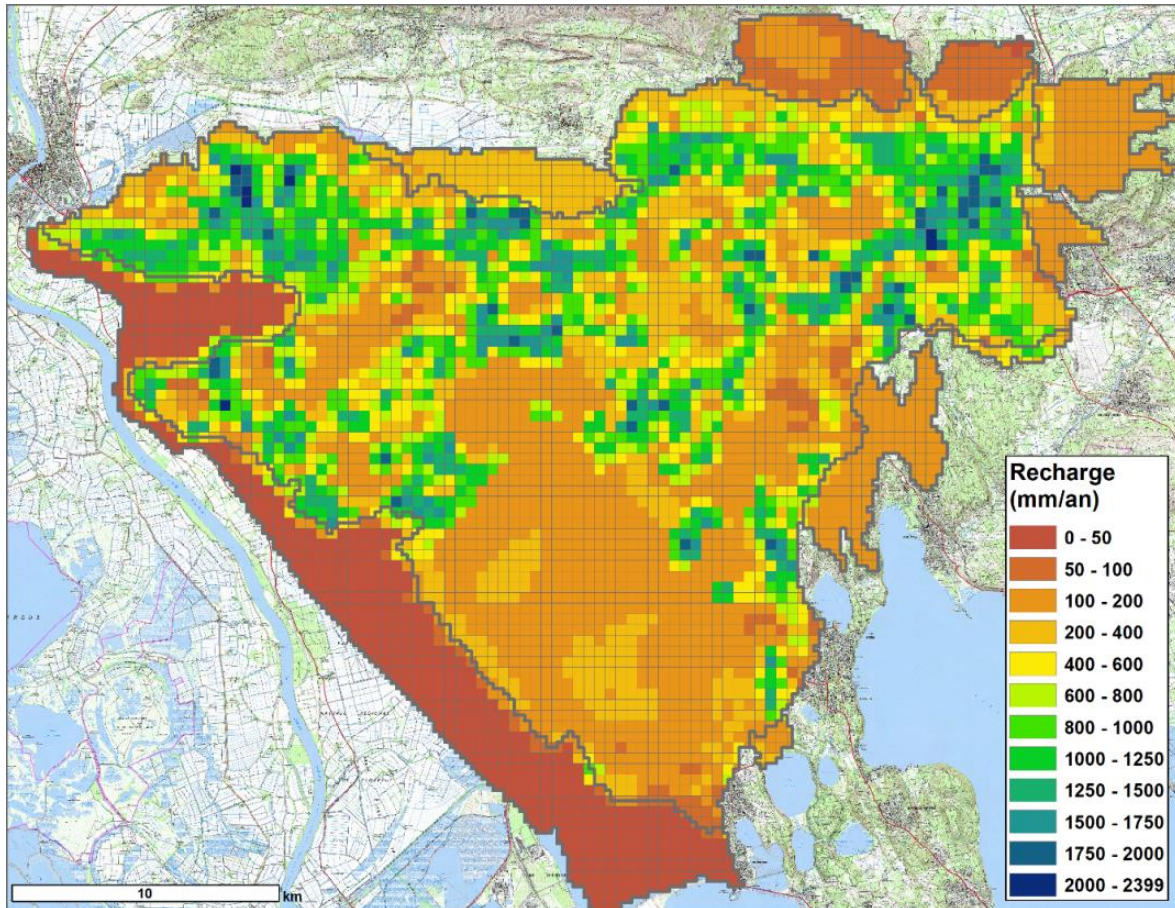


Figure 12 Recharge annuelle moyenne calculée sur la période 2011-2018 par maille du modèle

QUALITE DU MODELE

Le calage du modèle a été réalisé par ajustement de la répartition des perméabilités et le coefficient d'emménagement. Ils sont déterminés par des méthodes de calibration basées sur les chroniques piézométriques complètes issues de la base de données ADES (réseau BRGM/SYMCRAU), complétées par un réseau INRA (38 points de contrôles).

La procédure de calage a conduit à déterminer un champ de perméabilité s'établissant entre $5 \cdot 10^{-6}$ et 10^{-2} m/s (figure 13). 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. 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.

Le résultat du processus de calibration a aussi conduit à définir un champ du coefficient d'emménagement variant de 1% à 15%. Celui-ci montre une certaine cohérence géographique.

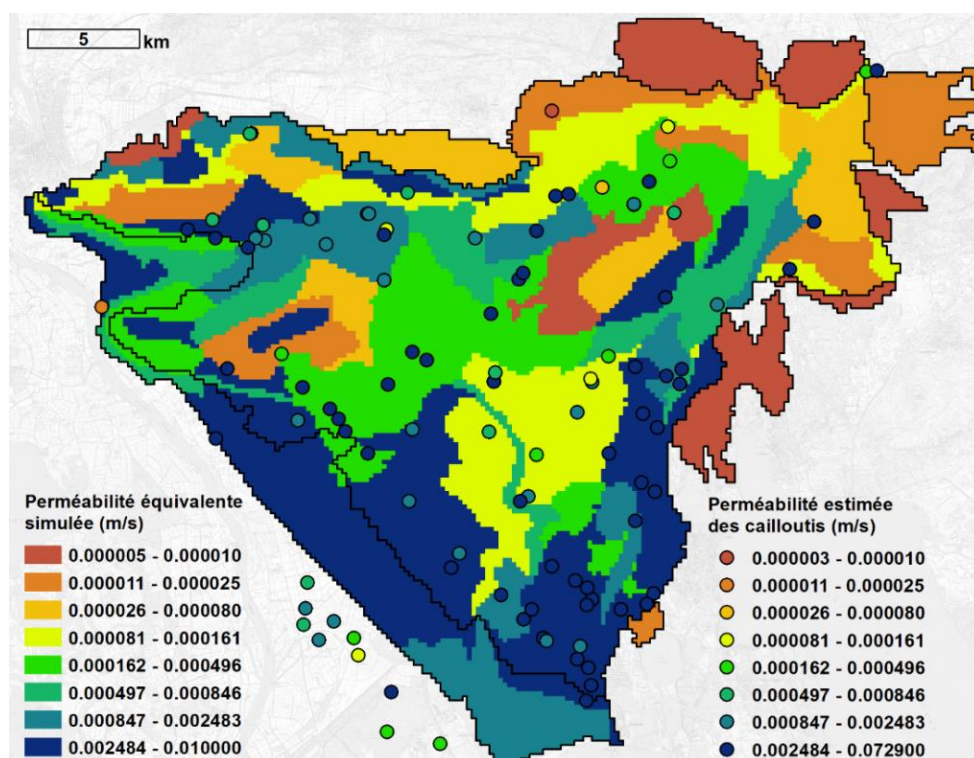


Figure 13 Distribution spatiale des perméabilités simulées et estimées sur le terrain

Une analyse des chroniques piézométriques permet d'estimer la capacité du modèle à simuler les phénomènes transitoires. Une analyse statistique 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. Une comparaison des sorties du modèle avec les données estimées de débits aux exutoires du système indique que le modèle reproduit assez bien les flux aux limites du système (tableau 4).

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

Tableau 4 Flux annuels moyens, maximaux et minimaux, simulés aux exutoires naturels de la nappe de la Crau (m³/s entre 2011 et 2018). Les valeurs attendues reprennent les données de la littérature ou estimées sur le terrain

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.

1.3 LES ENJEUX EN CRAU LIÉS AUX ÉVOLUTIONS POTENTIELLES DE LA NAPPE

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 aussi à la dégradation potentielle des eaux par les intrusions salines, liées aux conditions de gestion quantitative de la ressource.

Nous avons donc défini des 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.

Pour chaque indicateur relatif à un enjeu, deux niveaux de tension sont identifiés :

- 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

1.3.1 DES ENJEUX SOCIO-ECONOMIQUES : LES USAGES PRELEVEURS

USAGE D'ALIMENTATION EN EAU POTABLE COLLECTIVE

L'aquifère de la Crau est exploité par 17 captages publics pour l'eau potable, pour un volume d'environ 24 millions de m³/an

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 :

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

On constate 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 un habitat diffus significatif et non relié 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 mouillées captées 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 où 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 supérieur à 4 m par rapport à la moyenne actuelle

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. 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 configuration hydrogéologique, nous avons 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 de variations des niveaux de nappe.

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 représentatif des tensions sur les prélèvements agricoles :

- un seuil piézométrique de tension faible, correspondant à une perte d'environ 20% du potentiel de production installée.
- un seuil piézométrique de tension forte correspondant à une perte d'environ 50% du potentiel de production installée.

USAGE DE PRELEVEMENTS POUR LES INDUSTRIES

L'aquifère de la Crau est exploité par 11 captages à caractère industriel pour un volume d'environ 12 millions de m³/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 – ESSSO

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

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

ETAT DU RISQUE LIE A 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.

Les captages structurants concernés par les risques de remontées salines sont :

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

1.3.2 DES ENJEUX ECOLOGIQUES : L'ALIMENTATION DES ZONES HUMIDES EN PLAINE DE CRAU ET SUR SES BORDURES

ÉTAT DE SATISFACTION DES BESOINS EN EAU DES MILIEUX NATURELS

L'étude spécifique sur les zones humides en Crau (ECOSPHERE, 2018) a conclu à un état de dépendance aux eaux souterraines pour 8 sites d'habitats humides sur la Crau présentant un fort intérêt écologique (tableau 5). Cette sélection et le regroupement spatial des sites conduisent à une représentation de l'enjeu « zones humides » composée de 7 sites indicateurs alimentés par la nappe, auxquels il a été rajouté la Touloubre dont la nappe participe au soutien d'étiage.

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)		
Bausse / 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 relevés 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 relevés 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 Vigueirat	Cladiaies Reliques glaciaires		

Tableau 5 Sites indicateurs de l'enjeu « alimentation des zones humides » et critères de qualification de la tension sur l'alimentation des milieux

1.3.3 SYNTHÈSE DES INDICATEURS DE GESTION

La carte ci-dessous permet d'appréhender la répartition spatiale des indicateurs de gestion suivis dans l'étude :

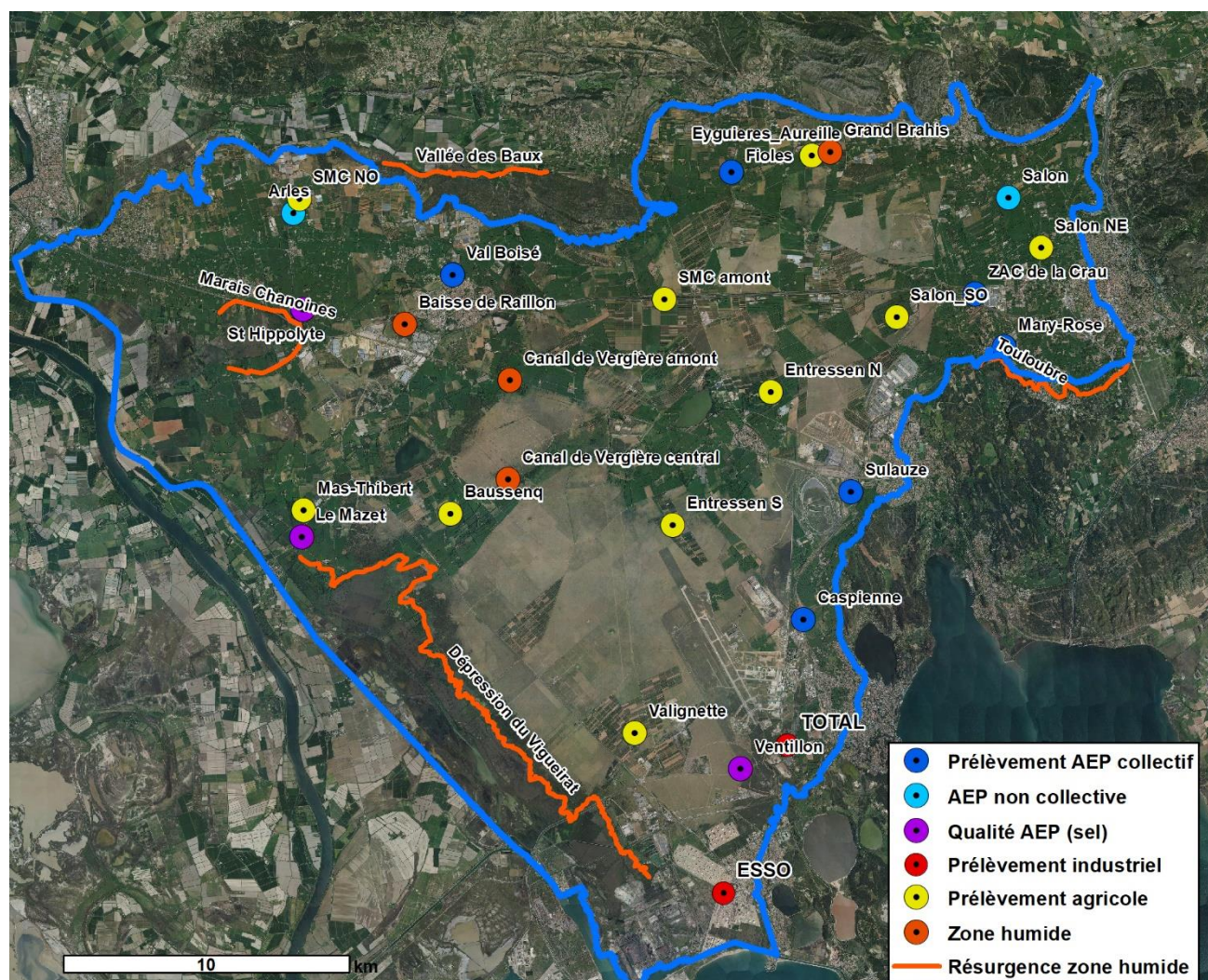


Figure 14 Localisation des indicateurs de satisfaction des usages de la nappe et de l'alimentation des écosystèmes

1.3.4 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 général 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 6).

Ex : La charge hydraulique au point indicateur AEP Caspienne passe durant un mois sous la cote haute des crêpines, 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 6 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 7)

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 7 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 tension (tableau 8)

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
	• ZONES HUMIDES* • PRELEVEMENTS AGRICOLES* • PRELEVEMENTS INDUSTRIELS * calculé sur la période de mai à septembre	• INTRUSIONS SALINES • AEP COLLECTIF
Neutre	Dépassement 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 8 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 9 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 » concernent 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 plus 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 »

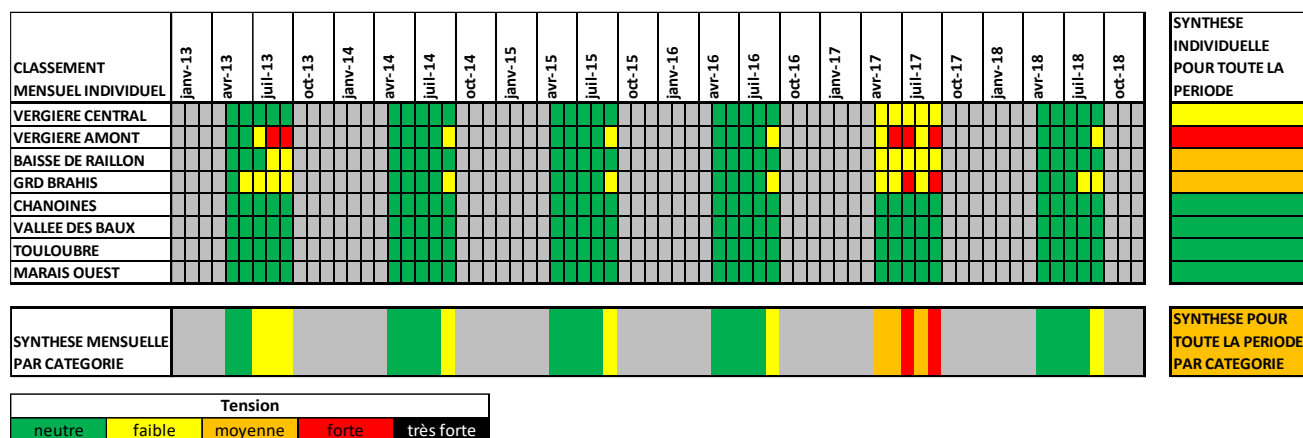


Tableau 9 Représentation synthétique du classement des indicateurs « zones humides »

1.4 LA NAPPE DE LA CRAU AUJOURD'HUI

Une fois le modèle construit et calé, une simulation dite de référence sur la période 2013 à 2018 a été réalisée. Elle sert 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.

1.4.1 PIEZOMETRIE ACTUELLE DE LA NAPPE DES CAILLOUTIS

Le modèle hydrodynamique permet d'estimer les niveaux de nappe par décade pendant la séquence 2013-2018. La carte de la figure 15 donne les altitudes de la nappe pour deux situations de référence sur cette période, l'une en basses eaux (février 2015), l'autre en hautes eaux (septembre 2018).

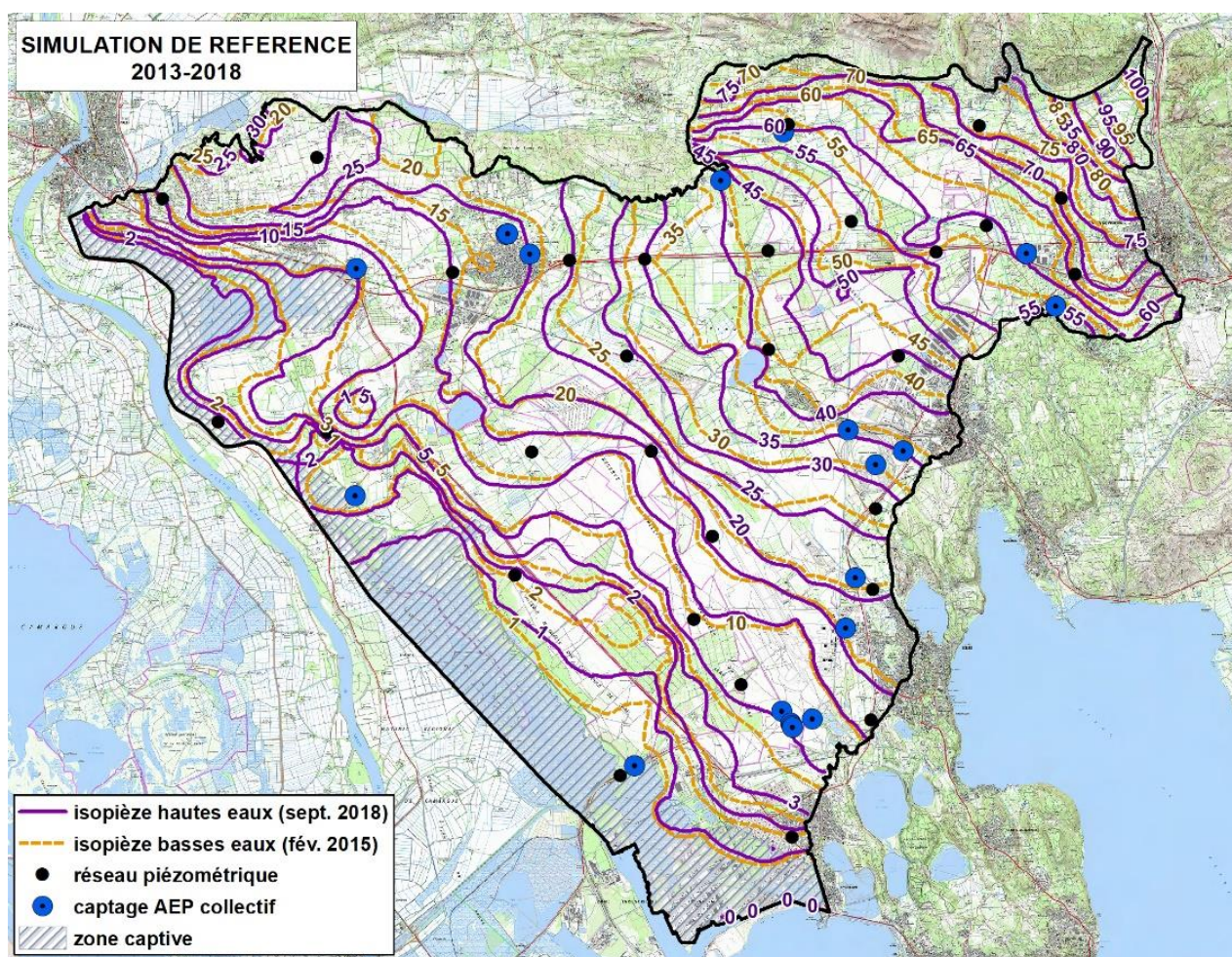


Figure 15 isopièzes simulés en situation de hautes eaux (septembre 2018) et de basses eaux (février 2015)

Le calcul de la différence de charges hydrauliques entre l'hiver et l'été montre que le battement de nappe, s'établissant en moyenne à 4 m dans les secteurs irrigués au nord, dépasse localement 8 m (figure 16).

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 influencée 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 hivernales.

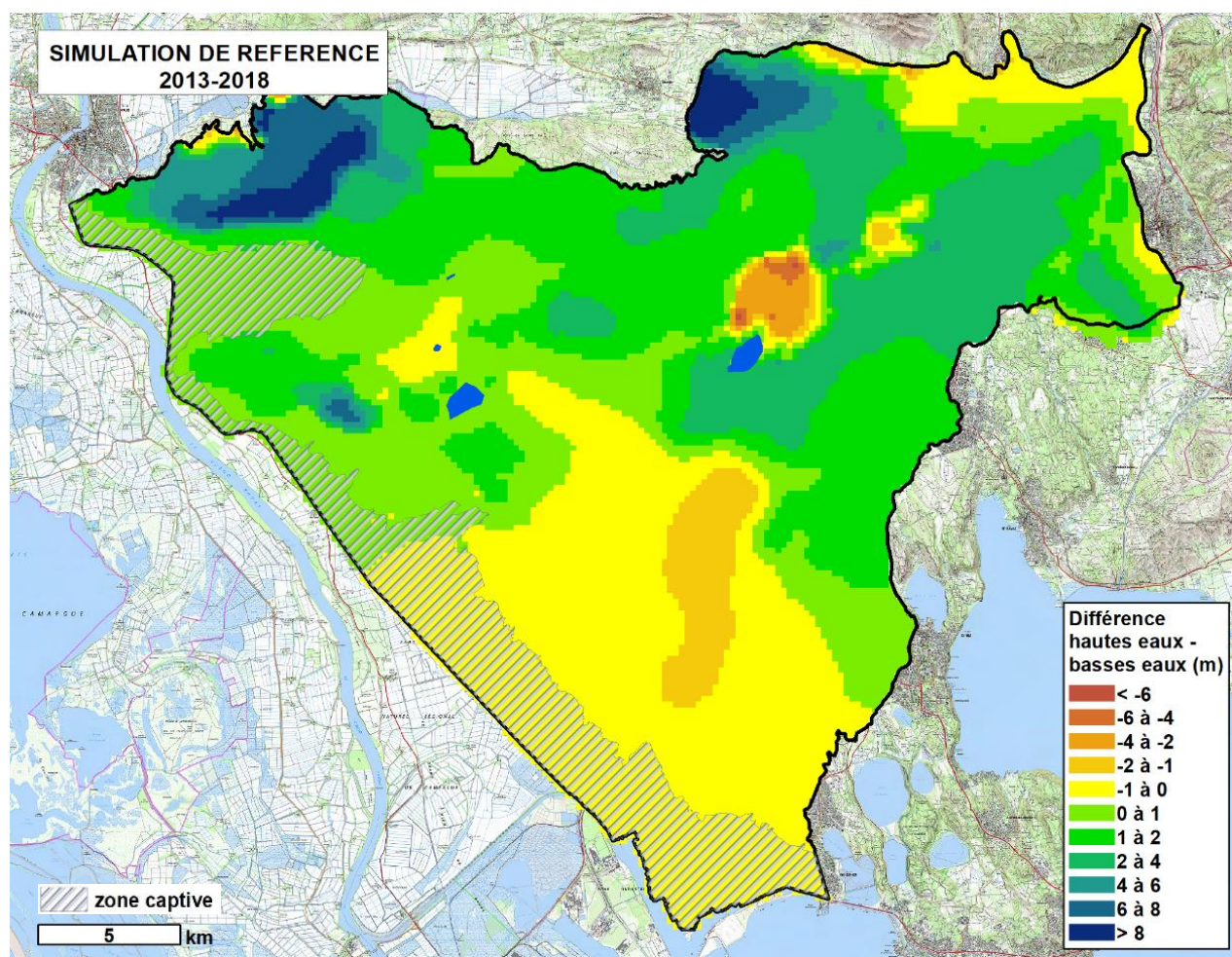


Figure 16 Battement de nappe simulée

Le modèle numérique permet aussi de déterminer les variations spatiales et temporelles de l'épaisseur de la zone noyée pour les cailloutis (figure 17). L'épaisseur de zone saturée au sein de l'horizon des cailloutis, en moyenne de 11.8 m, marque des grandes variétés spatiales et temporelles.

Par exemple, on peut observer qu'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 anté-pliocènes.

Cette surface dénoyée concerne en moyenne 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. Nous verrons cependant que des déficits de ressource en eau souterraine, liés soit à une baisse de recharge, soit à une augmentation des prélèvements, peuvent conduire à des baisses sévères des niveaux de nappe et à une extension forte des zones de cailloutis dénoyées.

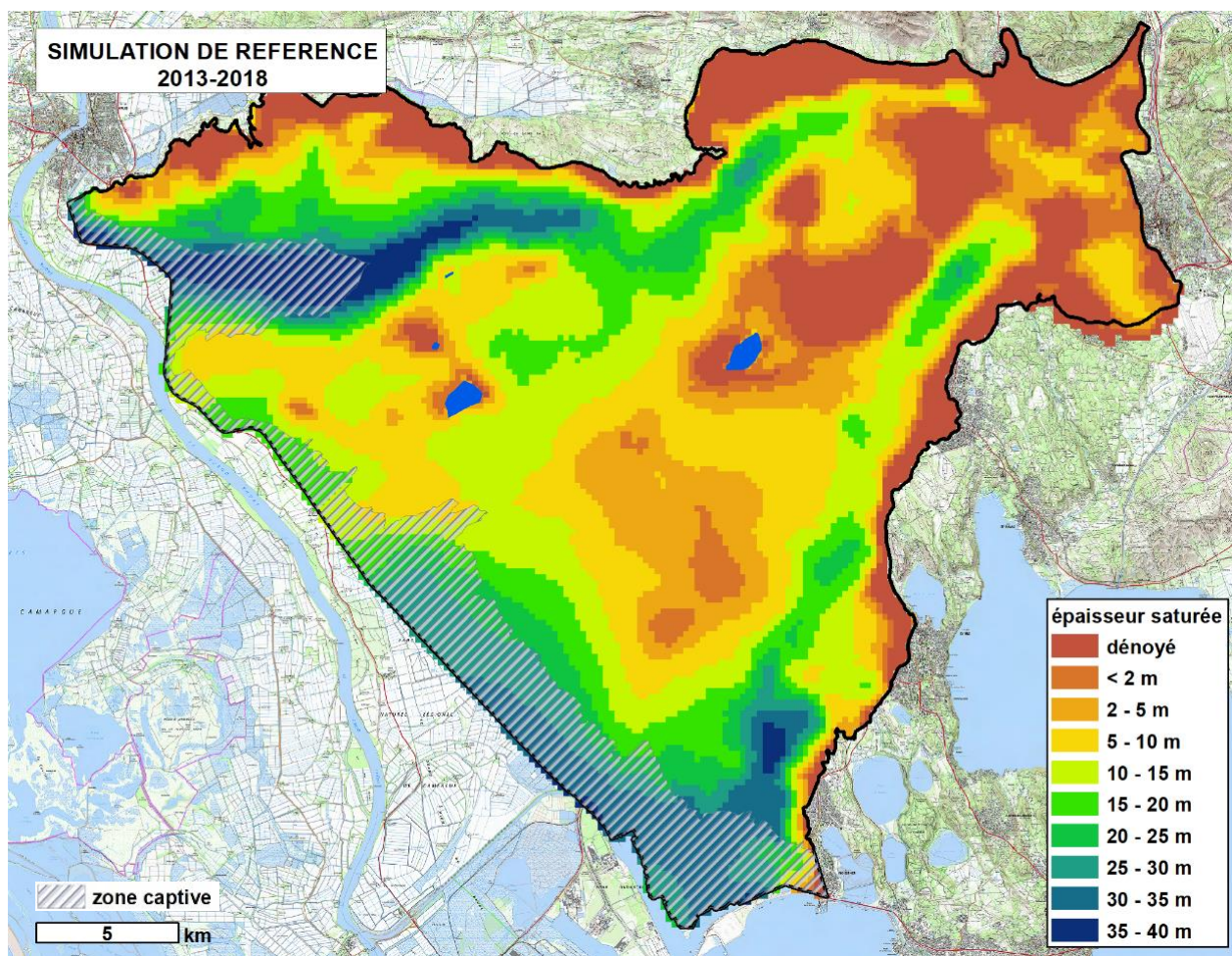


Figure 17 Epaisseur de la nappe dans les cailloutis plio-quaternaires.

1.4.2 LA RECHARGE ET LES EXUTOIRES DES EAUX SOUTERRAINES

Le bilan des flux entre 2013 et 2018 indique que l'aire du système aquifère (70 842 ha) est alimentée par 857 Mm³/an d'eau dont la moitié provient de la pluie (432 Mm³/an) et l'autre moitié provient des eaux d'irrigation issues de la Durance (425 Mm³/an). 25% des eaux de canaux rejoignent les exutoires à l'extérieur du système aquifère (soit environ 100 Mm³/an), tandis que 75 % du volume est utilisé pour l'irrigation des surfaces de prairies (environ 320 Mm³/an). 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 de la nappe représente ainsi un volume annuel d'environ 370 M m³/an, dont 66% a pour origine l'eau d'irrigation (241 M m³/an). Les aquifères bordiers contribuent seulement à environ 2% de la recharge totale du système aquifère (environ 8 Mm³/an) ; l'infiltration des eaux de pluie sur la plaine de Crau représente environ 120 Mm³/an.

La variation interannuelle de la recharge est assez forte. Elle oscille entre 300 Mm³/an en année sèche (2016, 2017) et 480 Mm³/an en année humide (2018). 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 des 69% estimés par Séraphin (2016a).

Dans la situation actuelle, en cohérence avec les conditions aux limites telles qu'elles ont été définies, la nappe de la Crau a pour principal exutoire les zones humides en bordure de Crau (Marais de Meyrannes, Marais des Chanoines mais aussi Dépression des Baux et Touloubre) avec des flux estimés en moyenne annuelle à environ 290 Mm³/an et plus secondairement les prélèvements avec environ 70 Mm³/an.

Ces modélisations de la situation actuelle permettent d'établir pour la première fois un bilan hydrologique complet et détaillé, de l'origine et du devenir des eaux transitant dans l'hydrosystème. Il donne une vision « moyenne » des grands flux qui alimentent et qui drainent la nappe (figure 18).

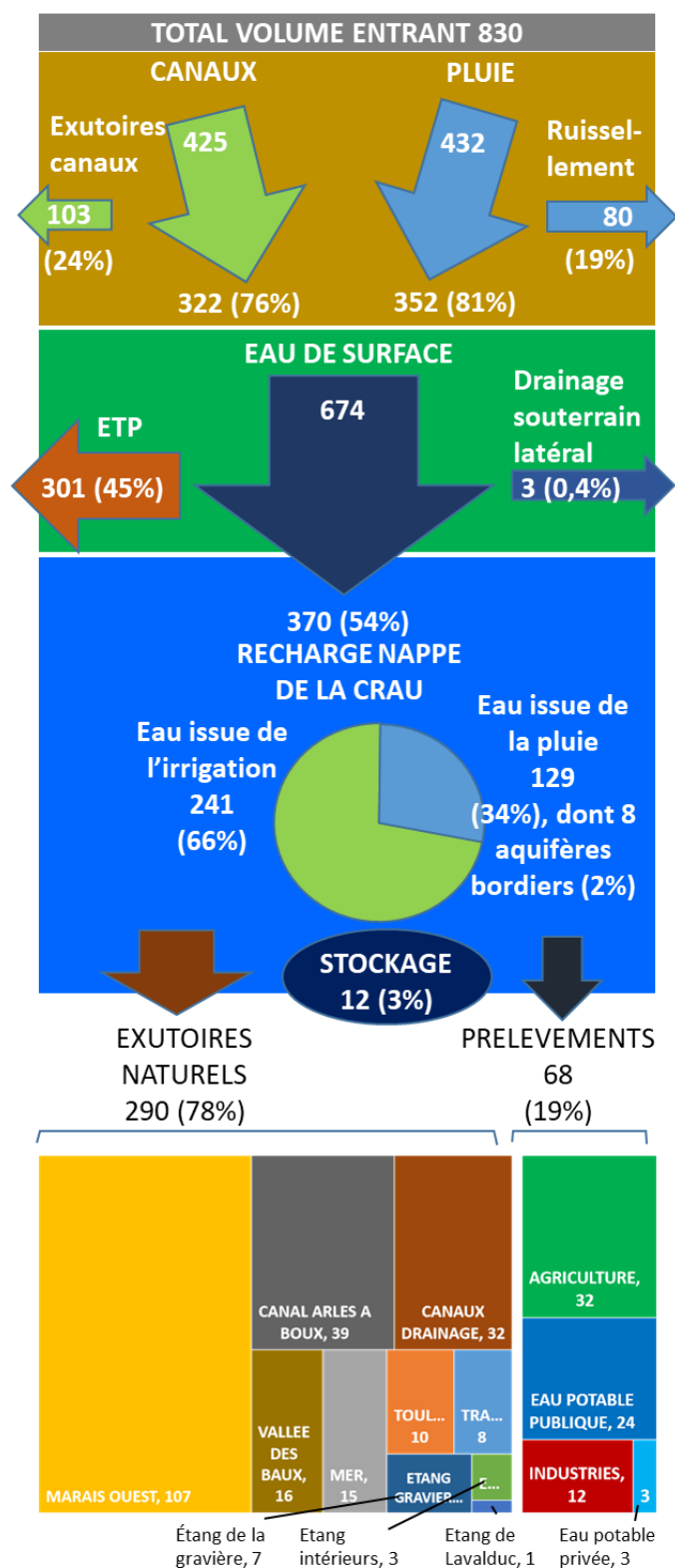


Figure 18 Bilan général des flux sur l'hydro système de la Crau

1.4.3 LE DEGRE DE SATISFACTION DES ENJEUX ACTUELS LIES A LA NAPPE

En utilisant la modélisation de référence sur la période 2013-2018, il a été calculé en situation « actuelle », l'état de tension des différents indicateurs d'usages et d'alimentation des milieux naturels.

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 19).

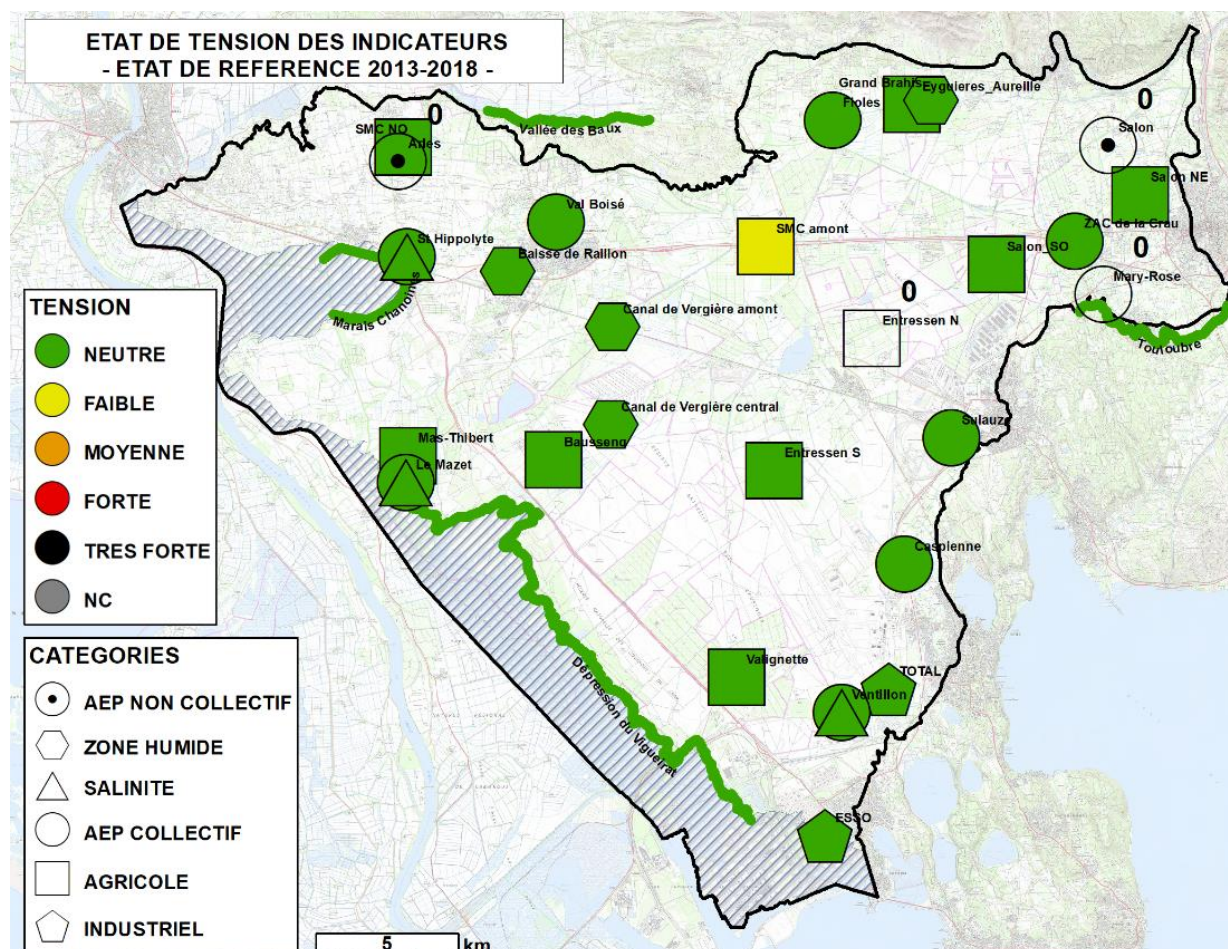


Figure 19 Modélisation de référence - Classement synthétique individuel pour toute la période

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 cote 38.6 m NGF, a été dépassé durant les étés 2013 et 2017 (figure 20). L'indicateur agricole « Entressen sud » est concerné par une tension faible au cours de l'été 2017 (figure 21). L'analyse statistique du classement mensuel des catégories indique que les indicateurs agricoles présentent une tension « faible » dans 7% des mois analysés (figure 22). Une analyse du tableau synthétique des indicateurs indique que l'ensemble des catégories d'indicateurs est classée de manière synthétique en tension « neutre » sur toute la période simulée.

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

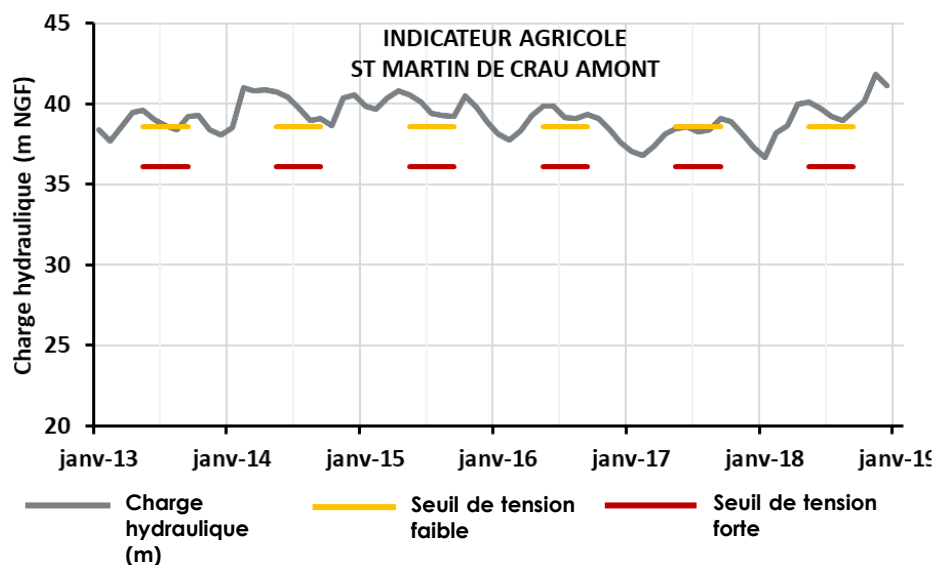


Figure 20 Modélisation de référence - Piézométrie simulée et seuil de tension de l'indicateur agricole « St Martin de Crau amont »

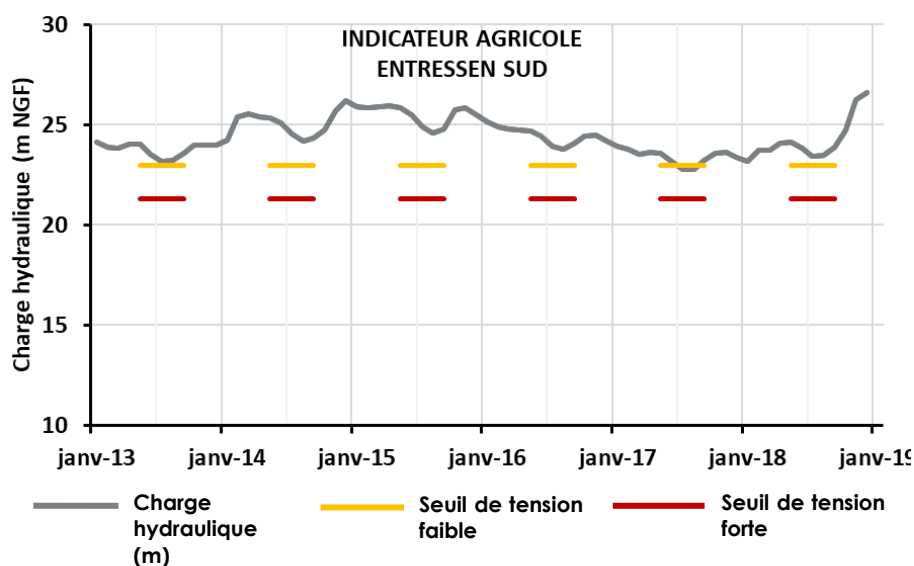


Figure 21 Modélisation de référence - Piézométrie simulée et seuil de tension de l'indicateur agricole « Entressen Sud ».

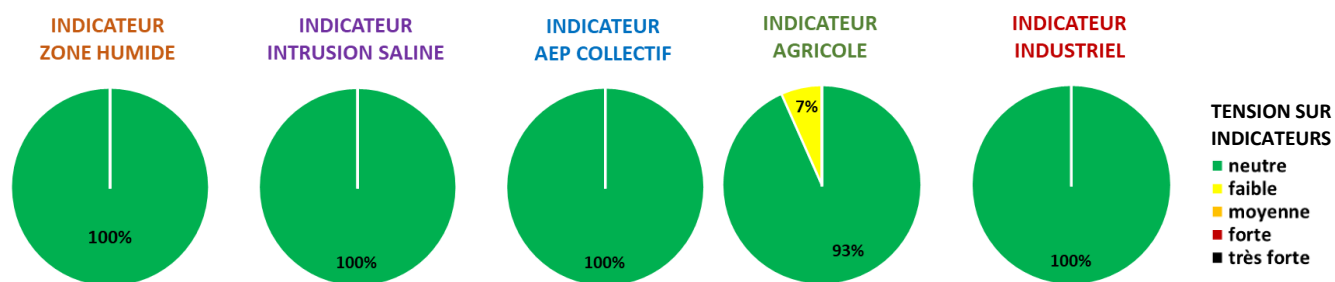


Figure 22 Modélisation de référence - fréquence d'apparition des différents états de tension sur chaque catégorie d'indicateurs

2 SIMULATIONS EXPLORATOIRES 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, trois approches ont été conjuguées :

- **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 pour 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 un volume pour l'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 événement 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 événement, n'ayant jamais eu lieu en Crau à ce jour, mais dont le risque d'apparition pourrait augmenter avec les évolutions climatiques.

2.1 QUANTIFICATION DE LA SENSIBILITE DE LA NAPPE AUX CONDITIONS DE RECHARGE ET DE PRELEVEMENTS

2.1.1 48 SIMULATIONS POUR APPROCHER DE FAÇON SYSTEMATIQUE L'IMPACT D'UN DEFICIT DE RES-SOURCE EN EAU SOUTERRAINE PAR RAPPORT A LA SITUATION ACTUELLE

A partir du modèle MHYCRAU, il a été conduit une analyse de sensibilité des indicateurs aux baisses de dotation en 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.

METHODOLOGIE

La méthodologie retenue est la suivante :

1) Il est calculé les flux de recharge correspondant à des baisses de volumes d'eau destinée 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 (tableau 10).

Dotation en eau	Tour d'eau moyen (jours)	Volume d'eau alloué à l'irrigation (Mm ³ /an)	Volume de recharge par l'irrigation (Mm ³ /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 10 Tours d'eau moyens appliqués aux itinéraires techniques en fonction de baisses de dotation en eau et volumes d'eau alloués à l'irrigation et de recharge correspondants

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 Mm³/an, dont 12 Mm³/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 ³ /an)	22	27	32	37	42	52	72	92

Tableau 11 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.

2.1.2 IMPACTS DES VARIATIONS DU COUPLE VOLUMES IRRIGATION GRAVITAIRE ET PRELEVEMENTS

Les résultats de cette 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 allouée à l'irrigation (figure 23). Ces résultats montrent l'impact inégalement réparti des conditions de recharge et de prélèvements sur les indicateurs d'état de la ressource. Il y a une gradation des impacts en fonction des catégories.

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'investissement 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 conséquentes 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). Néanmoins, chaque captage étant structurant pour le territoire, avec un degré de sécurisation par maillage faible, le défaut de fonctionnement d'un seul ouvrage met en situation de tension forte la capacité d'approvisionnement des populations. Ce sont principalement les caractéristiques techniques de deux champs captants qui conditionnent la vulnérabilité de cet usage : Caspienne et Sulauze.

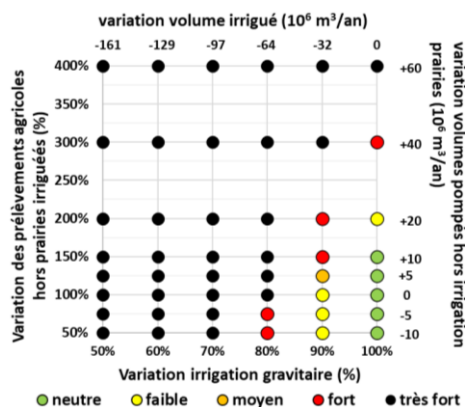
Dans une certaine mesure, les captages d'eau potable semblent relativement protégés du risque d'intrusions salines dans les conditions actuelles du niveau marin. Le captage le plus exposé est celui du Mas-Thibert en cas de baisse drastique des volumes d'eau alloués à l'irrigation (-40%). L'éloignement 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 alloués à l'irrigation ont des répercussions plus importantes que les hausses de prélèvements dans un même rapport. Ceci s'explique par les volumes en jeu : une baisse de 10% des volumes d'eau alloués à l'irrigation représente une quantité d'eau de recharge en moins de 32 Mm³/an tandis qu'une hausse de prélèvement agricole d'un même volume représenterait une hausse de 150%.

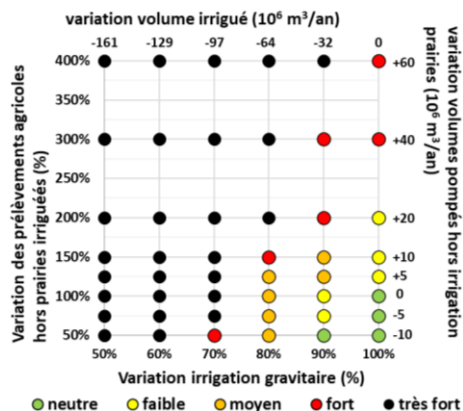
Sur la base de ces résultats et d'une hypothèse sur les tensions jugées acceptables par catégories d'indicateurs, il peut être estimé les marges de manœuvres existantes sur les volumes d'eau alloués à l'irrigation rechargeant la nappe et les prélèvements, tout en conciliant les usages de la nappe et l'alimentation des écosystèmes. De cette analyse il ressort :

- **Dans les conditions actuelles (volume d'eau alloué à l'irrigation et occupation du sol), il serait possible d'augmenter les prélèvements dans la nappe d'environ 20 Mm³ 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 Mm³/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.**

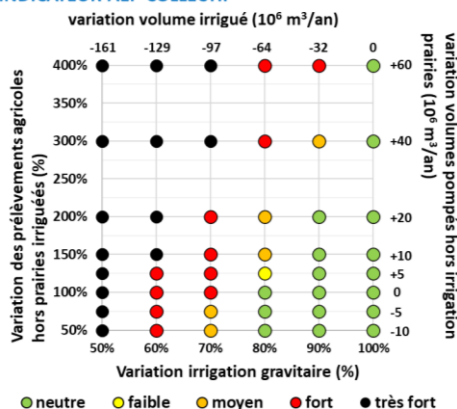
INDICATEUR ZONES HUMIDES



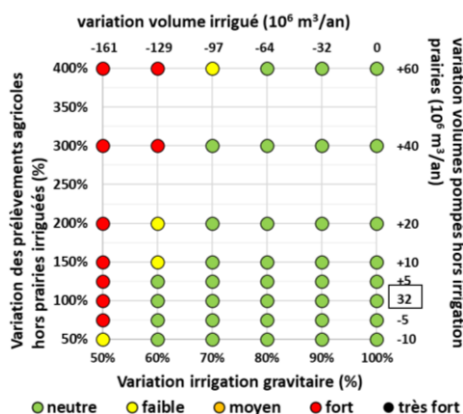
INDICATEURS AGRICOLES



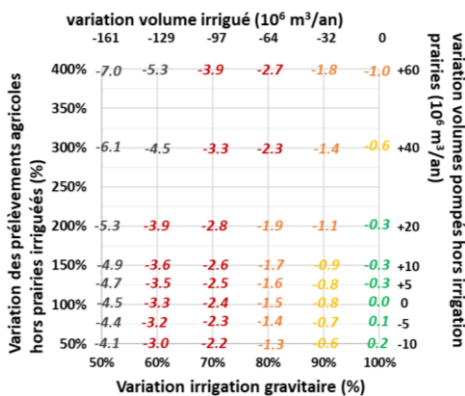
INDICATEUR AEP COLLECTIF



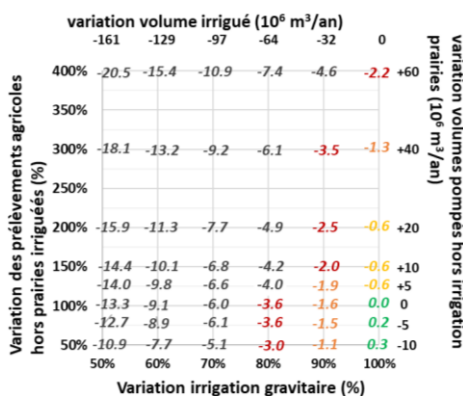
INDICATEUR INTRUSIONS SALINES



INDICATEUR FORAGES PRIVÉS SECTEUR ARLES



INDICATEUR FORAGES PRIVÉS SECTEUR SALON



INDICATEURS INDUSTRIELS

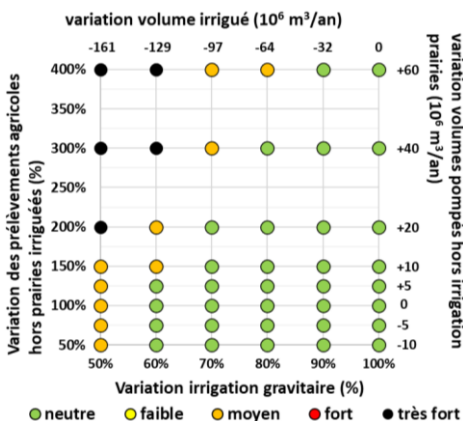


Figure 23 Classement des catégories d'indicateurs en fonction des volumes d'eau alloués à l'irrigation et des prélèvements

2.1.3 IMPACTS D'UN DEFICIT DE RESSOURCE EN EAU SOUTERRAINE

LA NOTION DE DEFICIT EN RESSOURCE EN EAU SOUTERRAINE

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 d'utiliser ce critère intégrateur 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^3/an), est ainsi 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^3/an), est défini comme la différence entre l'équilibre de la situation donnée et l'équilibre de l'état de référence.

Une analyse par ce critère intégrateur implique de vérifier que pour un même déficit, produit par des couples de recharge/prélèvements différents, les impacts sur les indicateurs sont globalement identiques. Une comparaison des impacts pour plusieurs couples recharge/prélèvements représentant un même déficit montre que ces impacts sont identiques pour 95% des indicateurs. **On peut donc faire l'hypothèse 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.**

Quelques différences mineures apparaissent pour les indicateurs de pompages agricoles. La baisse de volumes d'eau pour l'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 dans les grandes zones de pompage. De façon plus anecdotique, il est observé des différences de sensibilité dans certaines zones humides localisées près de grandes zones de pompage agricole (Vergière centrale et Grand Brahis).

USAGES ET DEFICIT EN EAU SOUTERRAINE

A partir du modèle MHYCRAU, il a été conduit une analyse de sensibilité des indicateurs aux baisses de volume d'eau alloués à 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.

Pour plus de lisibilité, il est 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 Hippolite.
- Salinité dans le secteur du Mazet.
- Captages pour l'AEP collective structurellement peu vulnérables car intéressant une épaisseur mouillée importante (Ventillon, Valboisé, St Hippolite 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.

On observe une gradation des impacts en fonction des catégories (figure 24). **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 Mm³/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 Mm³/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 Mm³/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.

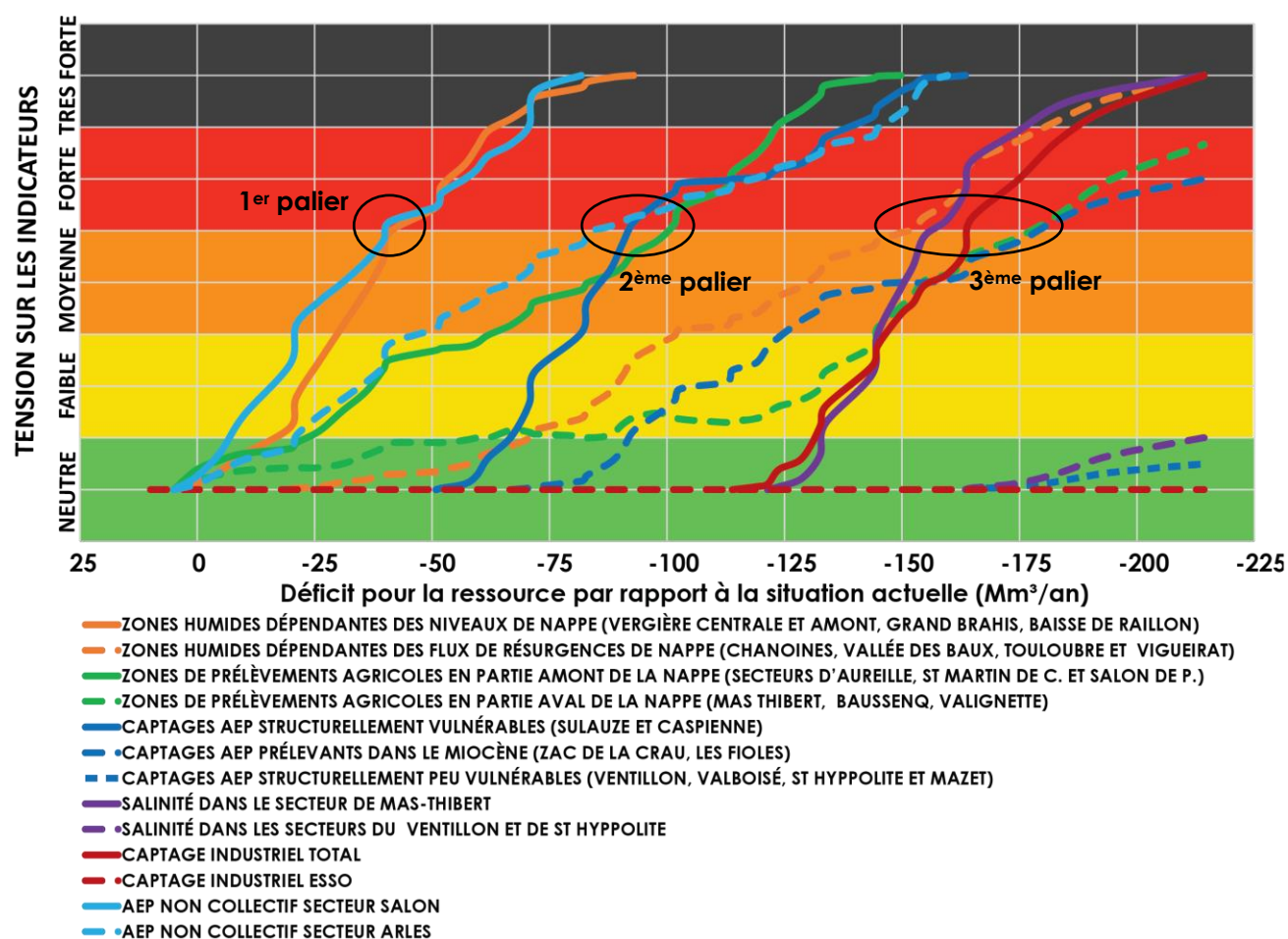


Figure 24 Tension sur les groupes d'indicateurs en fonction du déficit par rapport à la situation actuelle

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 alloués à l'irrigation. 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.

2.2 LES FUTURS POSSIBLES A L'HORIZON 2050

2.2.1 7 SIMULATIONS POUR EXPLORER DIFFERENTES TRAJECTOIRES SOCIO-ECONOMIQUES

Afin d'analyser les impacts de différentes trajectoires socio-économiques potentielles, 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.

Sur la base de ces éléments, il a ainsi 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 l'urbanisation d'environ 2800 ha. Ceci représente une continuité des tendances actuelles d'une extension urbaine 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 d'eau alloué à l'irrigation 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 alloués 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 alloués à l'irrigation des 90% restant, 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 alloués 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 d'eau pour l'irrigation baisse de 30 %

Ce scénario explore l'impact à l'horizon 2050 d'une réduction générale des volumes d'eau pour l'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 due à la limitation des volumes d'eau pour l'irrigation. Une telle baisse des volumes alloués à l'irrigation serait donc compatible avec les impératifs économiques de la filière 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 du sol sont conservées. La recharge baisse de 72% (recharge moyenne de 96 Mm3 contre 343 Mm3), simplement assurée par les apports pluvio-métriques.

2.2.2 LES EVOLUTIONS POTENTIELLES DE LA RESSOURCE A L'HORIZON 2050

IMPACTS DES SCENARIOS 2050 SUR L'ETAT DE LA RESSOURCE

La figure 25 synthétise les impacts de chaque scénario sur les groupements d'indicateurs proposés au 2.1.3. Les résultats montrent 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 Mm3/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 tensions entre préleveurs agricoles et pour l'AEP des captages privés.
- Le scénario 4, correspondant à une baisse de volume pour l'irrigation de 20% (déficit cumulé de 80 Mm3/an par rapport à la situation actuelle), constitue une configuration pivot où des tensions commencent à apparaître sur certains indicateurs AEP collectifs et sur les remontées salines.
- La baisse de volume alloués à l'irrigation de 30% gérée dans les scénarios 5 et 6 (déficit de 130 Mm3/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 Mm3/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.

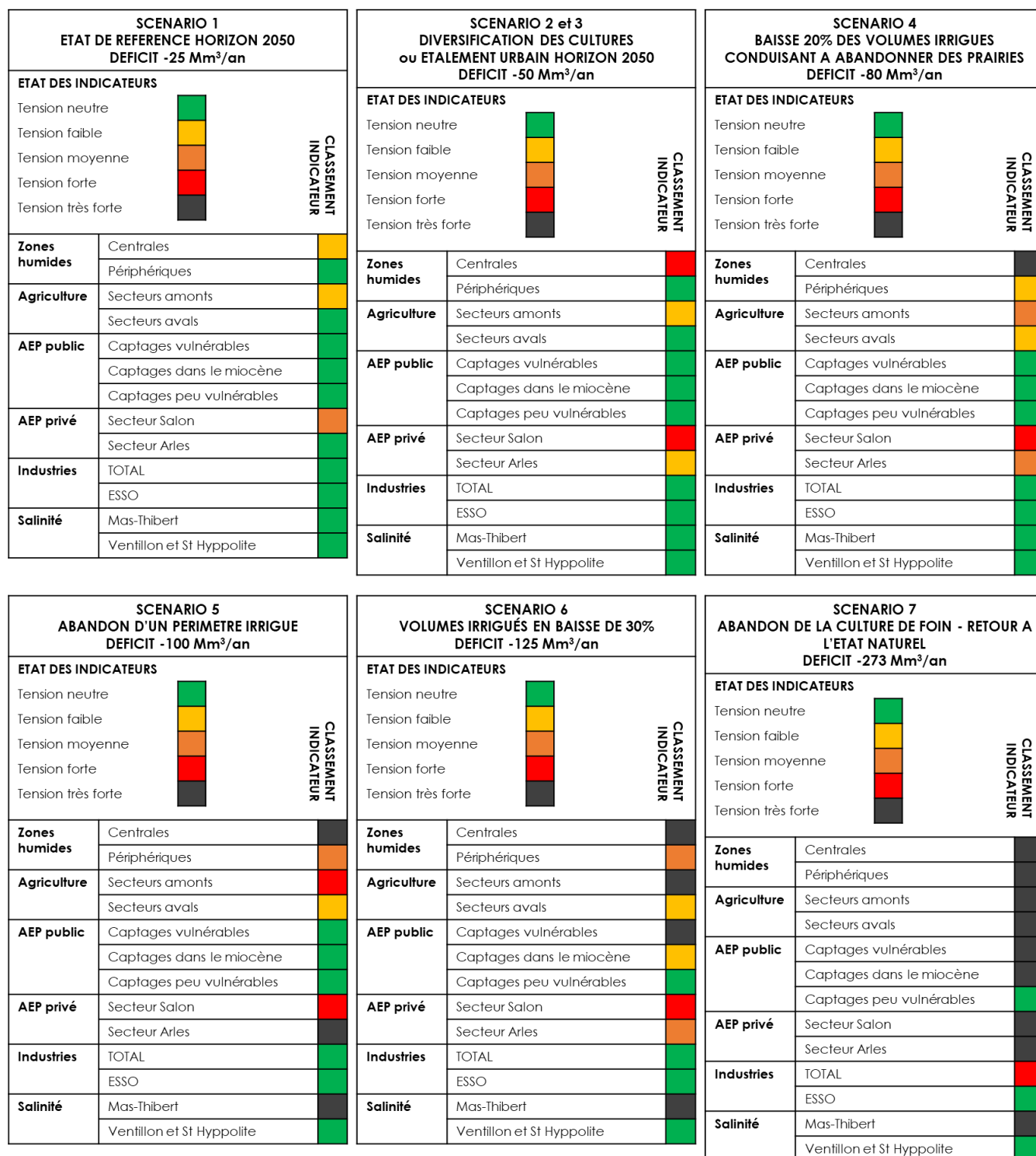


Figure 25 Impact des scénarios prospectifs de la ressource à l'horizon 2050

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 Mm³/an, principalement par augmentation de l'évapotranspiration (tableau 12). Précisons qu'il s'agit d'une estimation optimiste (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.

	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 12 Comparaison des flux de recharge et d'évapotranspiration entre la période 2013-2018 et la période 2053-2058 (moyenne en Mm³/an)

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 de prélèvements inchangées 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 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. 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 Mm³/an se cumulant au -26 Mm³/an causés par le changement climatique.

Les impacts sont importants : 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 alloués à l'irrigation en Crau. Toute diminution de la recharge par perte de volumes d'eau pour l'irrigation viendra se cumuler aux pertes de recharge attendues, liées au seul changement climatique.

2.3 L'IMPACT D'UNE SÉCHERESSE ET DE SA GESTION

2.3.1 5 SIMULATIONS POUR APPREHENDER LES EFFETS DES MESURES POTENTIELLES DE GESTION DES ÉPISODES DE SÉCHERESSE SEVERE

L'objectif de cette analyse est de connaître l'impact sur la ressource d'un événement exceptionnel de sécheresse, ici une diminution de 50% des précipitations durant deux années consécutives. Un contexte climatique semblable à celui observé sur la période 2013-2018 est simulé, avec une pluie divisée par deux pour les années 2015 et 2016. On peut estimer qu'un tel niveau de sécheresse engendre des restrictions fortes sur les usages dès 2016, notamment sur l'accès à la ressource durancienne 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 des dotations en eau de 10% en saison d'irrigation, c'est-à-dire à partir du mois de mars et jusqu'en octobre. Au stade de crise, nous avons regardé les effets d'une limitation de mars à octobre avec des restrictions sur les dotations en eau de 30% afin d'assurer les usages AEP et l'alimentation des milieux, et le 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 dotations en eau 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.

Précisons qu'il s'agit d'un exercice exploratoire ; 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.

Il est ainsi testé différentes mesures qui pourraient s'appliquer en fonction du stade de sécheresse décrété par les services de l'état selon les conditions de sécheresse. Le tableau 13 détaille les caractéristiques des 5 scénarios de gestion ainsi simulés.

SCENARIOS CONJONCTURELS HORIZON 2010	Climat	Description	Restriction sur les volumes d'eau des canaux, destinés à l'irrigation	Restrictions sur les prélèvements agricoles et industriels en nappe
Scénario 8	Pluie divisée par deux en 2015 & 2016	Sécheresse sévère en 2015 et 2016 sans mesures de restriction	aucun	aucun
Scénario 9		Sécheresse 2015-2016 : situation d'alerte anticipée	Baisse des volumes pour l'irrigation de 10% de mars à octobre 2016	-20% de mars à octobre 2016
Scénario 10		Sécheresse 2015-2016 : situation d'alerte renforcée	Baisse des volumes pour l'irrigation de 20 % de juillet à octobre 2016	-50% de juillet à octobre 2016
Scénario 11		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 pour ne pas détériorer la qualité agronomique des terres)
Scénario 12		Sécheresse 2015-2016 : situation de crise non anticipée	Arrêt du volume pour l'irrigation de juillet à octobre 2016	interdiction de juillet à octobre 2016

Tableau 13 Scénarios de mesures de gestion d'un épisode de sécheresse

2.3.2 IMPACT DE LA GESTION DES EPISODES DE SECHERESSE

Les résultats sont analysés en comparant l'état de la ressource à différentes périodes :

- **septembre 2016**, soit en période de forte demande en eau pendant l'épisode de sécheresse
- **février 2017**, période de basses-eaux consécutive à l'épisode de pénurie.
- **Mai 2017** soit au redémarrage de l'irrigation dans l'année suivant l'épisode de sécheresse

La figure 26 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).

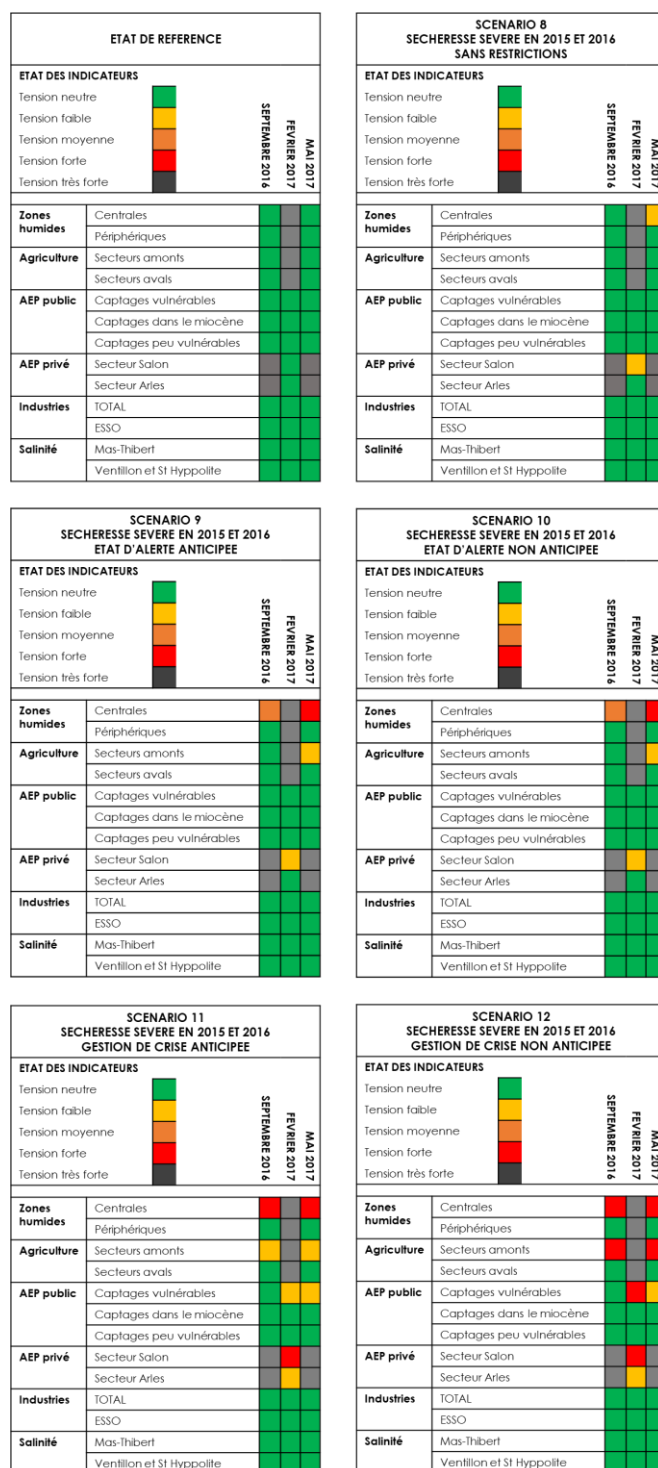


Figure 26 Impact des différentes mesures de gestion de la sécheresse

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 la demande en eau pour l'irrigation gravitaire qui se traduit par une augmentation des volumes d'eau d'irrigation infiltrés (augmentation de 266 à 290 Mm³/an). Ceci compense partiellement la diminution de la recharge liée à l'infiltration des eaux de pluie (baisse de 45 à 9 Mm³/an). Le déficit global est donc seulement de -13 Mm³/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 tenant 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 d'un changement climatique ou l'impact d'une sécheresse sévère.

DES OUTILS AUX EFFETS CONTRASTES

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 la Durance alloués à l'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 Mm³/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 d'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 que des mesures tardives et plus drastiques ont légèrement tendance 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.

3 QU'EST-CE QUE NOUS APPREND SINERGI ?

3.1 UNE REDUCTION DES INCERTITUDES SUR LE FONCTIONNEMENT DU SYSTEME AQUIFERE

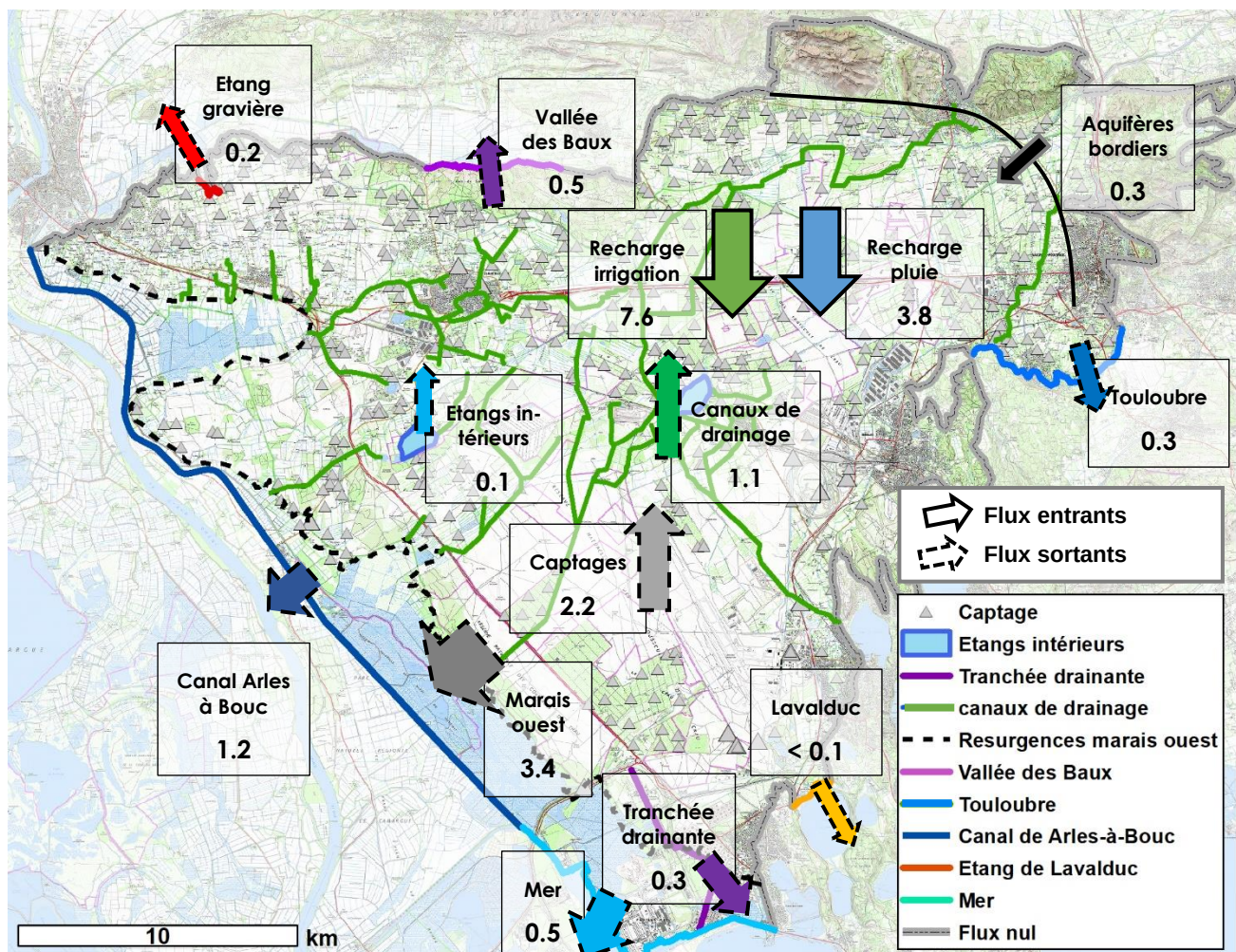
3.1.1 UNE VISION DETAILLEE DES FLUX ENTRE LES DIFFERENTS HYDRO-SYSTEMES

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 Mm³/an.

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

Elle est pour partie basée sur une reprise et une exploitation des données existantes (données relatives aux flux souterrains en provenance des aquifères bordiers et aux prélèvements), pour partie déduite de l'exploitation du modèle hydrodynamique qui permet de proposer une quantification précise des autres termes du bilan.

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. Les flux globaux sont détaillés dans le schéma intégratif de la figure 27.



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 130 Mm³/an qui alimentent les zones humides en bordure de Crau : 80% les marais sur la bordure Sud mais aussi la dépression des Baux (12%) et la Touloubre (8 %).
- Environ 160 Mm³/an qui alimentent des systèmes superficiels : à 90% les étangs intérieurs, les canaux de drainage et canal de Arles à Bouc ; à 10% la mer.
- 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 Mm³/an sur les 425 Mm³/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.

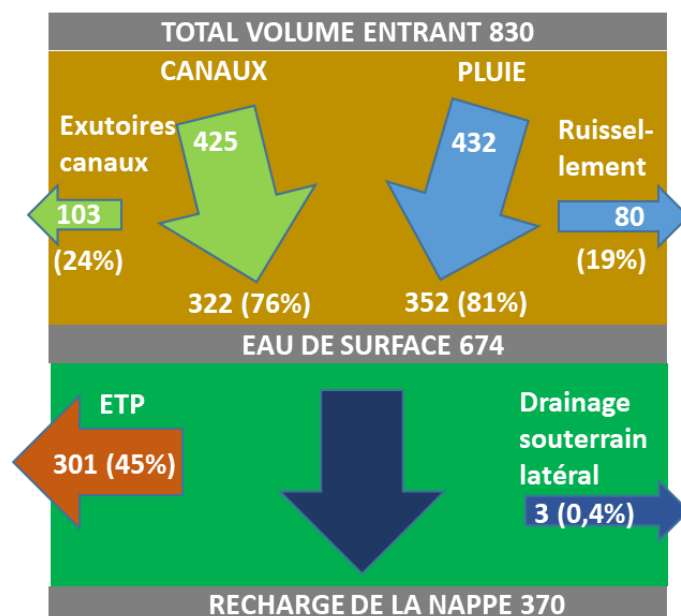


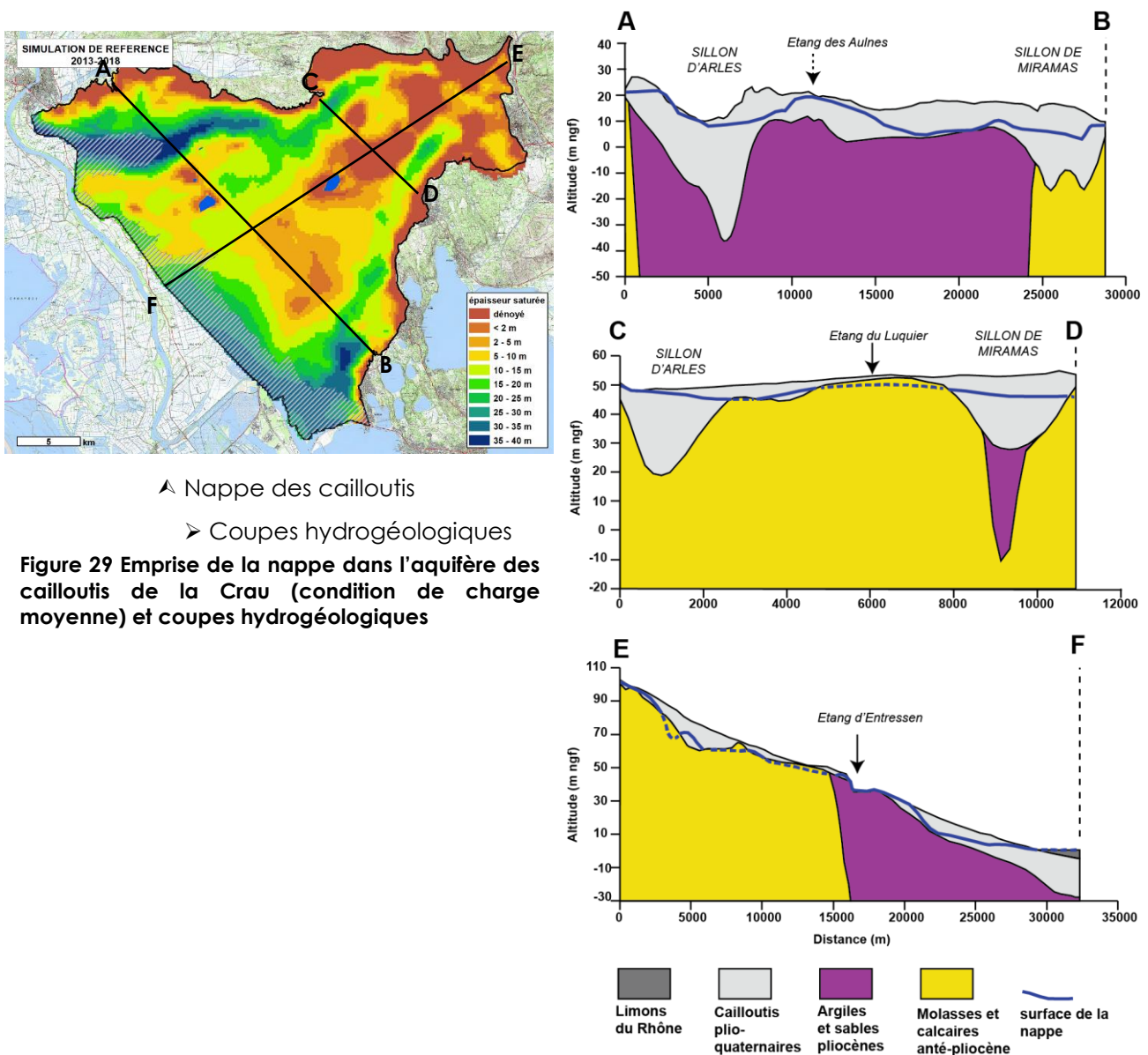
Figure 28 Bilan en entrée du système aquifère (flux en Mm³/an), ETP = évapotranspiration

Un autre résultat important est de montrer que la variation interannuelle de la recharge est assez forte. Elle oscille entre 300 Mm³/an en année sèche (2016, 2017) et 480 Mm³/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 souterraine et l'expression de certains écosystèmes.**

3.1.2 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). L'exploitation des études disponibles dans le secteur pétrolier (Depons 2007) a également permis de mieux définir la nature du substratum sous-jacent, se partageant entre l'épaisse série sablo-argileuse du pliocène (Plaisancien et Astien) au centre et à l'ouest et les roches carbonatées pré-pliocènes au nord et à l'est de la plaine (essentiellement molasse et karst du Miocène).

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 29). 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.



Cette géographie de hauts fonds est importante car elle structure partiellement l'hydrodynamique de la nappe de la Crau. Si la nappe du sillon d'Arles et du sillon Miramas sont en relation au nord-est au travers des molasses miocènes qui jouent le rôle de relais hydraulique, les dépôts sablo-argileux de la série pliocène cloisonne le système dans la partie sud-ouest.

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.

Cette compartimentation explique en partie la différenciation géographique des dynamiques piézo-métriques décrites au chapitre 2.1.8.

Ces coupes montrent 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 ».

3.1.3 DES ENJEUX POUR LA GESTION DE NAPPE 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 captants AEP collectif et zones de haute densité de forages domestiques (AEP non collective).
- 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 30.

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 subiraient 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. Dans son état actuel d'influence par les activités anthropiques, la nappe de la Crau permet de satisfaire le bon état de toutes les zones humides.

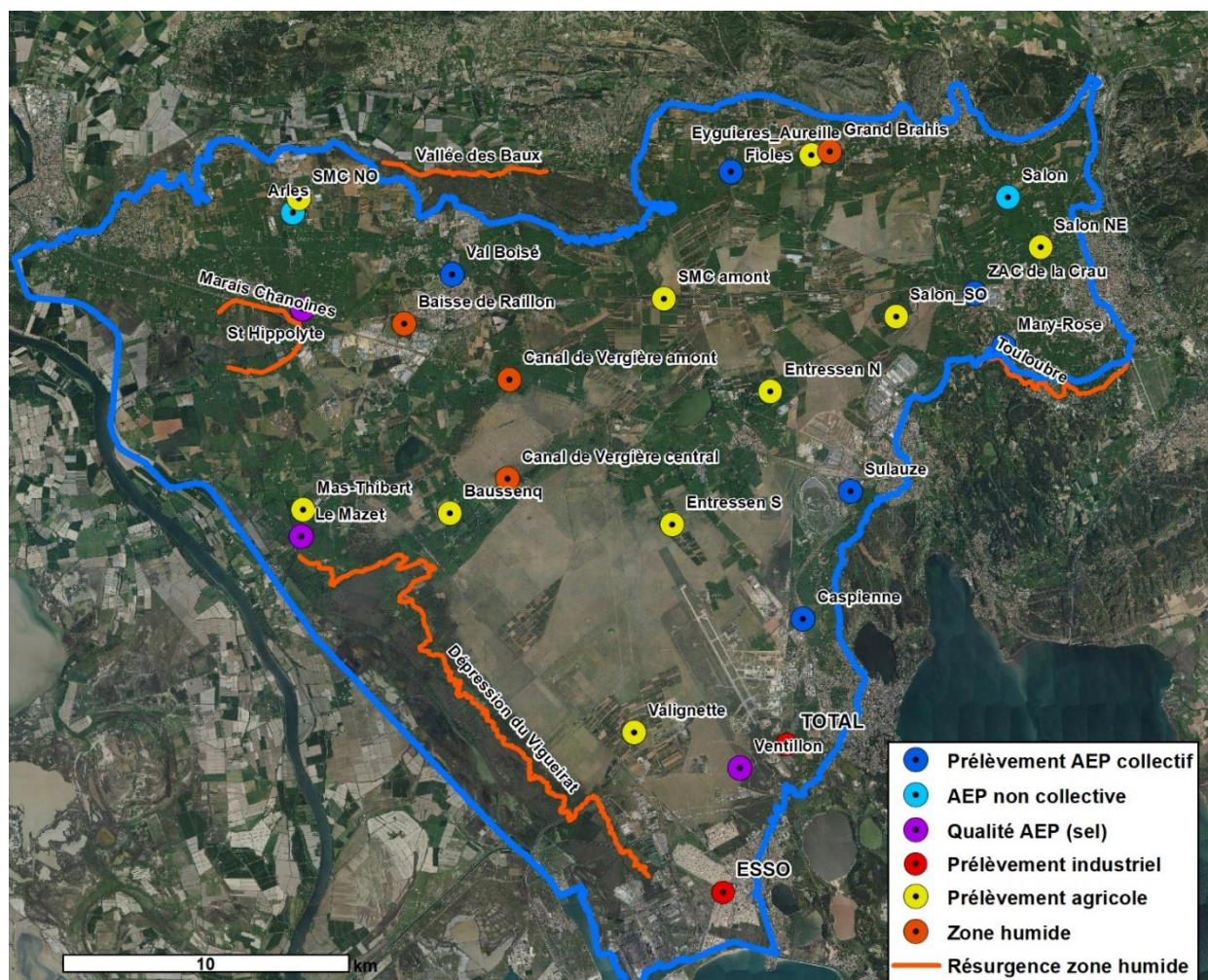


Figure 30 Enjeux de la nappe de la Crau

3.2 QUELLES STRATEGIES POUR L'AVENIR DE LA RESSOURCE EN EAU ?

3.2.1 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 agricoles 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.

A 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 Mm³/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% des surfaces de prairies irriguées, ce qui pourrait correspondre à la tendance actuelle (par urbanisation des terres agricoles ou changement de culture).

Une baisse des volumes d'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 Mm³/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 de sa fonction d'alimentation des milieux naturels, dépend 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 la capacité d'exploitation des captages privés pour l'eau potable et l'agriculture seraient les premiers enjeux impactés 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 la 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, caractérisée 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 actuels alloués à l'irrigation, 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 pour l'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 des 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 Mm³/an par rapport aux conditions actuelles de flux.** 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 il est proposé de réduire la valeur seuil à 60 Mm³/an pour intégrer les imprécisions intrinsèques du processus de modélisation et d'interprétation des indicateurs.

Avec 25 Mm³/an de déficit structurel lié au changement climatique, les marges de manœuvre passent alors à 35 Mm³/an. Ce chiffre correspond à peu près à une baisse de volume d'eau pour l'irrigation 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.

3.2.2 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 de 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 constituent 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 Mm³/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 artificielle ne constitue pas à l'heure actuelle 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 structurel lié à des restrictions sur les volumes d'eau pour l'irrigation (-10% représentant environ 32 Mm³/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 Mm³/an) et industriels (12 Mm³/an).** Même portée par l'ensemble des catégories des usagers, une compensation totale d'une diminution des eaux d'irrigation semble ne pas pouvoir 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 Mm³/an, par comparaison entre les flux entrant comptabilisés et les flux théoriques appliqués aux prairies, évalués par modèle. **Ce chiffre devrait être confirmé par des mesures de terrain et les gains à attendre ne sont pas quantifiables en l'état actuel 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 à l'aide de 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 d'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 Mm³/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, liée 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 Mm³/an, si l'on considère l'impact des changements climatiques (-25 Mm³/an) et la perte de recharge liée à la disparition des prairies (-35 Mm³/an) et une éventuelle baisse des volumes transférés depuis la Durance (-30 Mm³/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 dépendant 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 pour 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 ($- 25 \text{ Mm}^3/\text{an}$).

Dans cette stratégie, les marges de manœuvre sont à priori très réduites, de l'ordre $+5 \text{ Mm}^3/\text{an}$, qui pourraient théoriquement être partagées entre urbanisation (maximum 200 à 300 ha de prairies consommées par rapport à l'actuel) ou augmentation des prélèvements ($+ 5 \text{ Mm}^3/\text{an}$ 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 étages 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 $+60 \text{ Mm}^3/\text{an}$ (approche prudentielle des résultats donnés par la modélisation) par rapport à l'équilibre actuel. Avec $25 \text{ Mm}^3/\text{an}$ qui seront consommés par les effets du changement climatique, les marges de manœuvre passent à $35 \text{ Mm}^3/\text{an}$, auxquels il faut rajouter les économies potentielles sur les rejets aux exutoires du système d'irrigation pouvant compenser d'éventuelles restrictions sur les volumes d'eau d'irrigation.

Cette stratégie peut permettre de réallouer ces volumes d'eau à d'autres besoins en Crau (prélèvements, aménagements 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 actuel 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 pas dépasser 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 pour 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 Mm³/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 Mm³) par des économies d'eau aux exutoires des canaux. A titre informatif, une baisse de 10% des volumes pour l'irrigation serait idéalement compensée par une économie d'eau de 32 Mm³/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 disponibles 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'augmenter la capacité de résilience du territoire aux épisodes conjoncturels de sécheresse. Un programme de réduction des prélèvements de 15 Mm³/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.

3.2.3 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 du niveau de la nappe. Il s'agit d'écosystèmes fragiles, très vulnérables à la moindre baisse de niveaux piézométriques. Par rapport à la situation actuelle, les évolutions attendues du changement climatique vont conduire à des tensions grandissantes sur ces écosystèmes. Ceci induira mécaniquement une réduction du potentiel d'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 d'irrigation dans les conditions actuelles de transport, **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 pour l'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 d'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 d'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.**

4 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 pour l'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 du changement climatique 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 pourrait 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 publics d'eau potable 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 manoeuvre. 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 manoeuvre permettent le développement socio-économique du territoire ou une diversification des cultures, au détriment des prairies irriguées. Une réduction des volumes dédiés 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 manoeuvre 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 au bénéfice des usages du bassin versant de la Durance.

La figure 31 résume ces trajectoires possibles pour la ressource en eau 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 manoeuvre peuvent être explorées. Elles dépendront des arbitrages duranciens, 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 engendra 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.

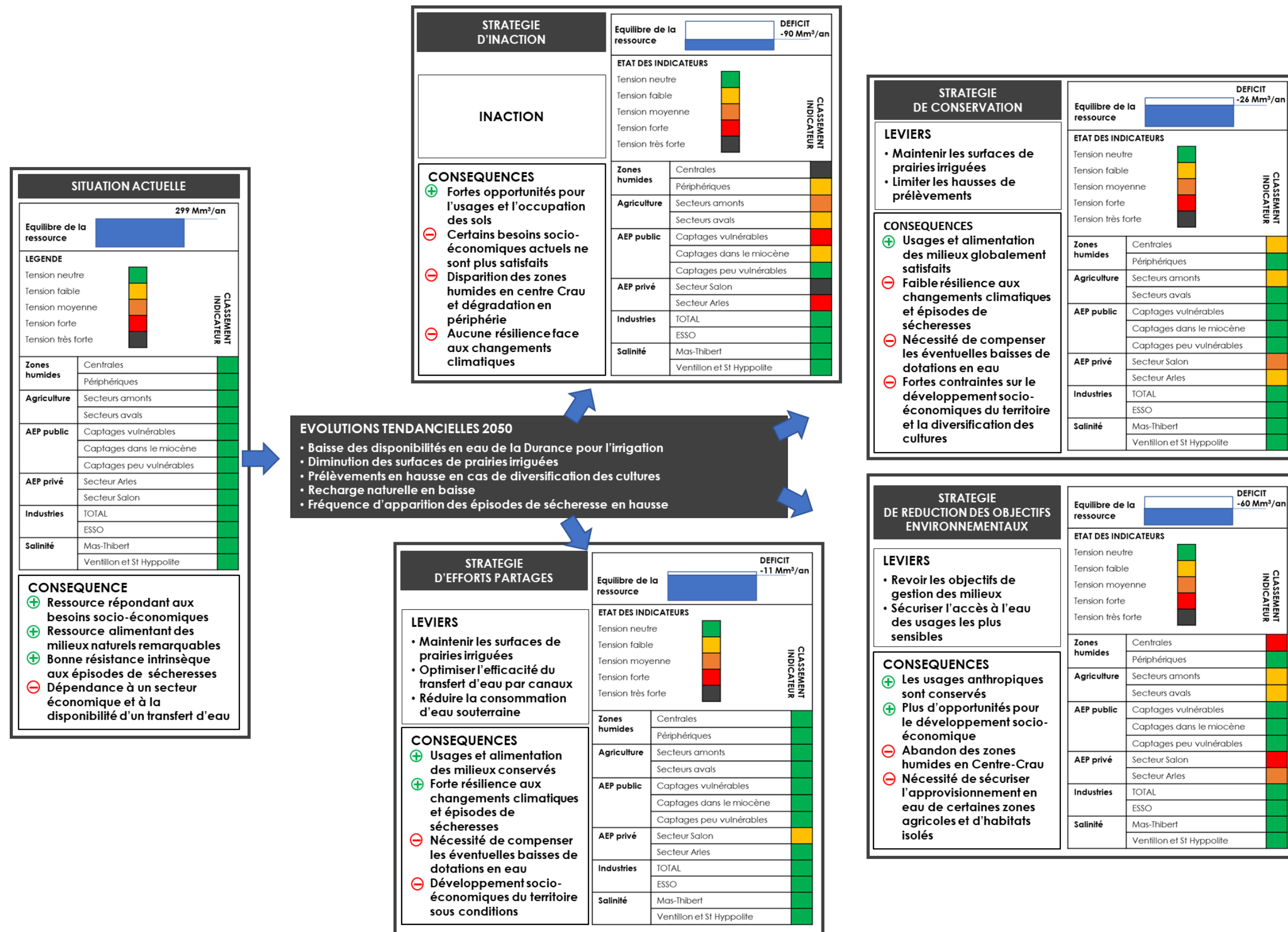


Figure 31 Les conditions de gestion de la nappe de la Crau en 2050

5 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.
- 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 MARTCAU : Actualisation du modèle de la nappe de la Crau BRGM/RR-38199FR 73 pp
- BRGM 2004 Géodynamique des systèmes plio-quaternaires 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.
- 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.
- 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.
- 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

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

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

McDonald M.G., Harbaugh A.W., 1988. A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Groundwater Flow Model. Edité par le US Geological Survey, Reston, VA.

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 ($\delta^{18}\text{O}$ et δD) 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.

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. apitre 8)

Etude réalisée par :



Avec l'appui technique de :



Avec l'appui en concertation de :



Partenaires techniques et financiers :

