

Maître d'ouvrage :



Co-maîtres d'ouvrages :



Avec le soutien financier de :

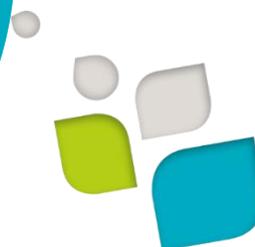


Action du :



ÉTUDE DES BESOINS D'ALIMENTATION EN EAU DES ZONES HUMIDES DE LA CRAU (OSMOSE 2)

Rapport final



Version définitive – Mars 2023



HYDROFIS



	<p>BRL ingénierie</p> <p>1105 Av Pierre Mendès-France BP 94001 30001 NIMES CEDEX 5</p>
  	<p>Pascal Fénart - Hydrofis</p> <p>Jeremy Cuvelier - O2TERRE</p> <p>Hervé Gomila Écologie Conseil</p>

Date de création du document	2 Novembre 2022
Contact	Ninon Sicard

Titre du document	Rapport final
Référence du document :	A00772
Indice :	Version définitive

Date émission	Indice	Observation	Dressé par	Vérifié et Validé par
30/11/2022	Version provisoire	Le dispositif de suivi sera présenté dans la version définitive.	Ninon SICARD Thomas LEGAY Jérémy CUVELIER Pascal FENART Hervé GOMILA	Sébastien CHAZOT
03/03/2023	Version définitive		Ninon SICARD Thomas LEGAY Jérémy CUVELIER Pascal FENART Hervé GOMILA	Sébastien CHAZOT

ÉTUDE DES BESOINS D'ALIMENTATION EN EAU DES ZONES HUMIDES DE LA CRAU (OSMOSE 2)

Rapport final

LISTE DES ABRÉVIATIONS	1
PRÉAMBULE	1
1 RAPPEL DU PROTOCOLE	3
2 CONCLUSIONS GÉNÉRALES	4
2.1 LIMITES DE L'ÉTUDE	4
2.2 SCENARIOS RETENUS	5
2.3 RESULTATS DE L'ÉTUDE VIS-A-VIS DU FONCTIONNEMENT ET DE L'ÉVOLUTION POTENTIELLE DES ZONES HUMIDES	6
3 RÉSULTATS SITE PAR SITE	13
3.1 GRAND BRAHIS	13
3.1.1 Contexte	13
3.1.2 Compréhension, hypothèses et questions formulées en début d'étude	14
3.1.3 Fonctionnement actuel	15
3.1.4 Évolution future	21
3.2 BAUSSENQ	28
3.2.1 Contexte	28
3.2.2 Compréhension, hypothèses et questions formulées en début d'étude	30
3.2.3 Fonctionnement actuel	31
3.2.4 Évolution future	42
3.3 ILON	48
3.3.1 Contexte	48
3.3.2 Compréhension, hypothèses et questions formulées en début d'étude	49
3.3.3 Fonctionnement actuel	50
3.3.4 Évolution future	62
3.4 CHANOINES	67
3.4.1 Contexte	67
3.4.2 Compréhension, hypothèses et questions formulées en début d'étude	68
3.4.3 Fonctionnement actuel	69
3.4.4 Évolution future	73
3.5 MEYRANNE	74
3.5.1 Contexte	74
3.5.2 Compréhension, hypothèses et questions formulées en début d'étude	75

3.5.3	Fonctionnement actuel	76
3.5.4	Evolution future	84
3.6	COSTIERES DE CRAU	86
3.6.1	Contexte	86
3.6.2	Compréhension, hypothèses et questions formulées en début d'étude	87
3.6.3	Fonctionnement actuel	88
3.6.4	Evolution future	97
4	SYSTÈME DE SUIVI HYDROLOGIQUE ET HYDROGÉOLOGIQUE	98
	ANNEXES	103
	Annexe 1. Observations pédologiques	105
1.	Contexte de l'étude	105
1.1.	Cadre général	105
1.2.	Cadrage méthodologique	105
2.	Résultats des expertises	107
2.1.	Marais du Grand Brahis	107
2.2.	Marais de Baussenq	110
2.3.	Marais de Ilon	113
2.4.	Marais de Meyranne et Chanoines	116
2.5.	Marais des costières de Crau	119
	Annexe 2. Méthode de modélisation simple	122
1.	Emprise des zones humides	122
1.1.	Marais de l'Ilon	122
1.2.	Grand Brahis	124
1.3.	Baussenq	125
1.4.	Meyranne	126
2.	Suivi de la ressource en eau	127
2.1.	Marais de l'Ilon	127
2.2.	Grand Brahis	129
2.3.	Baussenq	130
2.4.	Meyranne	131
3.	Evaporation à la surface de l'eau	133
3.1.	Formule de Rohwer	133
3.2.	Données météorologiques	134
3.3.	Calcul de la surface en eau	135
4.	Evapotranspiration au niveau des zones humides	138
4.1.	Calcul des surfaces qui ne sont pas en eau	138
4.2.	Calcul de l'évapotranspiration réelle	138
5.	Apports pluviométriques	139
6.	Ruissellement des bassins versants contributifs	140
6.1.	Emprise des bassin-versants contributifs	140
6.2.	Calcul de l'ETR	143
6.3.	Calcul du ruissellement	144

TABLE DES ILLUSTRATIONS

LISTE DES FIGURES

Figure 1-1 : Périmètre de l'étude Osmose 2.....	2
Figure 1-1 : Compartiments et termes du bilan en eau objets du protocole de mesure.....	3
Figure 2-1 : Scénarios retenus dans le cadre de l'étude	5
Figure 2-2 : Évolution potentielle des zones humides – Scénario 1	10
Figure 2-3 : Évolution potentielle des zones humides – Scénario 6	11
Figure 2-4 : Évolution potentielle des zones humides – Scénario 7	11
Figure 3-1 : Photo aérienne de la zone humide de Grand Brahis.....	13
Figure 3-2 : Schéma de la géologie de la zone humide de Grand Brahis selon une coupe nord sud.....	14
Figure 3-3 : Localisation des principaux flux entrants d'eau superficielle sur la zone humide de Grand Brahis	15
Figure 3-4 : Flux d'eau entrants et sortants sur la zone.....	16
Figure 3-5 : Bilan des flux sur la période juin 2021 - avril 2022	17
Figure 3-6 : Bilan des flux mensuels.....	17
Figure 3-7 : Bilan des flux - Mars 2022.....	18
Figure 3-8 : Bilan des flux - Août 2021	18
Figure 3-9 : Évolution des niveaux d'eau dans la zone humide et dans le piézomètre Brahis_piézo	19
Figure 3-10 : Superficie concernée par un engorgement quasi-permanent du TN-1 d'après les sondages pédologiques.....	20
Figure 3-11 : Répartition des indicateurs de milieux froids et frais sur la zone humide de Grand Brahis	21
Figure 3-12 : Hauteur de la nappe mesurée aux piézomètres Brahis, BRA1 et PZ22.....	22
Figure 3-14 : Corrélation entre les apports des eaux souterraines à la zone humide Grand Brahis et la hauteur piézométrique mesurée au piézomètre PZ 22	23
Figure 3-15 : Hauteurs piézométriques mesurées dans la situation actuelle et évolution selon les scénarios SC1, SC6 et SC7 d'après les simulations réalisées dans le cadre de Sinergi sur la zone humide de Grand Brahis.....	24
Figure 3-16 : Scénario 1 Grand Brahis. Bilan des flux mensuels – période juin 2051 – avril 2052.....	25
Figure 3-17 : Scénario 6 Grand Brahis. Bilan des flux mensuels – période juin 2051 – avril 2052.....	26
Figure 3-18 : Scénario 7 Grand Brahis. Bilan des flux mensuels – période juin 2051 – avril 2052.....	26
Figure 3-19 : Photo aérienne de la zone humide de Baussenq	28
Figure 3-20 : Profils topographiques de la zone humide de Baussenq.....	29
Figure 3-21 : Distribution tendancielle de la profondeur du sol sur la zone humide de Baussenq (extrapolation des sondages pédologiques réalisés dans le cadre d'Osmose 2)	29
Figure 3-22 : Schéma de la géologie de la zone humide de Baussenq.....	30
Figure 3-23 : Localisation des principaux flux entrants d'eau superficielle sur la zone humide de Baussenq	31
Figure 3-24 : Flux d'eau entrants et sortants sur la zone humide de Baussenq	32
Figure 3-25 : Bilan des flux sur la période avril 2021 - avril 2022	33
Figure 3-26 : Bilan des flux mensuels.....	33
Figure 3-27 : Bilan des flux - Mars 2022.....	34
Figure 3-28 : Bilan des flux - Août 2021	34
Figure 3-29 : Secteurs envoyés de manière permanente et temporaire sur le site de Baussenq	35
Figure 3-30 : Croisement du terrain naturel (TN) avec la nappe des cailloutis de Crau sur le site de Baussenq ...	36
Figure 3-31 : Hauteur d'eau au niveau des sites Puits, Puits 2 et habitat amont	37
Figure 3-32 : Relation entre la hauteur de la nappe au niveau du site Puits et la hauteur d'eau dans la zone habitat amont.....	37
Figure 3-33 : Croisement du terrain naturel – 1 mètre (TN-1) avec la nappe des cailloutis de Crau sur le site de Baussenq	38
Figure 3-34 : Variations piézométriques de la nappe au droit des piézomètres Puis amont, puits aval, P23B et PZ13	39
Figure 3-35 : Superficie concernée par un engorgement quasi-permanent à TN-1 d'après les sondages pédologiques.....	40
Figure 3-36 : Répartition des indicateurs de milieux froids et frais sur la zone humide de Baussenq	41
Figure 3-37 : Comparaison du débit des eaux souterraines et du niveau piézométrique PZ13.....	42
Figure 3-38 : Hauteurs piézométriques mesurées dans la situation actuelle et évolution selon les scénarios SC1, SC6 et SC7 d'après les simulations réalisées dans le cadre de SINERGI sur la zone humide de Baussenq	43

Figure 3-39 : Croisement du terrain naturel (TN) et du terrain naturel moins 1 mètre (TN-1 avec la nappe des cailloutis de Crau sur le site de Baussenq pour le scénario 7	44
Figure 3-40 : Scénario 1 – Baussenq. Bilan des flux mensuels – période juin 2051 – avril 2052	45
Figure 3-41 : Scénario 6 – Baussenq. Bilan des flux mensuels – période juin 2051 – avril 2052	46
Figure 3-42 : Photo aérienne du marais de l'Ilon	48
Figure 3-43 : Schéma de la géologie du marais de l'Ilon selon une orientation nord-sud.....	49
Figure 3-44 : Localisation des principaux flux entrants d'eau superficielle sur le marais de l'Ilon	50
Figure 3-45 : Flux d'eau entrants et sortants dans l'ensemble du système marais de l'Ilon (zone humide + canal)	51
Figure 3-46 : Bilan des flux sur la période juin 2021 – décembre 2021 pour l'ensemble du système marais de l'Ilon (zone humide + canal)	52
Figure 3-47 : Bilan des flux mensuels 2021 pour l'ensemble du système marais de l'Ilon (zone humide + canal)	53
Figure 3-48 : Bilan des flux - Août 2021 2021 pour l'ensemble du système marais de l'Ilon (zone humide + canal)	53
Figure 3-49 : Ennoiement du marais de l'Ilon	55
Figure 3-50 : Superficie concernée par un engorgement quasi-permanent à TN-1 d'après les sondages pédologiques.....	56
Figure 3-51 : Variation due la hauteur d'eau dans l'Ilon est fonction du débit dans le canal de la Vallée des Baux.....	57
Figure 3-52 : Relation entre le débit dans le canal des Baux et la hauteur d'eau dans l'Ilon est	57
Figure 3-53 : Hauteur d'eau mesurée au niveau de la sonde A. Rocha	58
Figure 3-54 : Relation entre la hauteur d'eau dans le canal de la vallée des Beaux et la hauteur d'eau dans le Grand marais	58
Figure 3-55 : Hauteur d'eau dans le Petit marais et seuil d'influence du canal de la Vallée des Baux	59
Figure 3-56 : Relation entre la hauteur du canal de la Vallée des Baux au droit du site Baux 2 et la hauteur d'eau mesurée dans le Petit marais.....	60
Figure 3-57 : Relation entre la hauteur du Grand marais et la hauteur d'eau mesurée dans le Petit marais.....	60
Figure 3-58 : Répartition des indicateurs de milieux froids et frais sur le marais de l'Ilon.....	61
Figure 3-59 : Niveau de la nappe au niveau du piézomètre PZ5.....	62
Figure 3-60 : Hauteurs piézométriques mesurées dans la situation actuelle et évolution selon les scénarios SC1, SC6 et SC7	63
Figure 3-61 : Bilan des flux mensuels – période juin 2051 – décembre 2051	64
Figure 3-62 : Bilan des flux mensuels – période juin 2051 – avril 2052	65
Figure 3-63 : Photo aérienne du marais de Chanoines	67
Figure 3-64 : Schéma de la géologie du marais des Meyranne et des Chanoines selon une coupe nord sud.....	68
Figure 3-65 : Localisation des principaux flux entrants d'eau superficielle sur le marais des Chanoines	69
Figure 3-66 : Débit enregistré à la station de la Chapelette entre novembre 2018 et février 2021	69
Figure 3-67 : Chanoines – situation des isopiezies par rapport au terrain naturel.....	70
Figure 3-68 : Superficie concernée par un engorgement quasi-permanent à TN-1 d'après les sondages pédologiques.....	71
Figure 3-69 : Répartition des indicateurs de milieux froids et frais sur le marais des Chanoines	72
Figure 3-70 : Photo aérienne du marais de Meyranne	74
Figure 3-71 : Schéma de la géologie du marais de Meyranne selon une coupe nord sud	75
Figure 3-72 : Localisation des principaux flux entrants d'eau superficielle sur le marais des Meyranne	76
Figure 3-73 : Flux d'eau entrants et sortants sur le marais de Meyranne.....	77
Figure 3-74 : Relation entre le débit estimé des eaux souterraines et la piézométrie sur Meyranne.....	78
Figure 3-75 : Bilan des flux sur la période avril 2021 – avril 2022	79
Figure 3-76 : Bilan des flux mensuels.....	79
Figure 3-77 : Bilan des flux - Août 2021	80
Figure 3-78 : Bilan des flux - Mars 2022.....	80
Figure 3-79 : Surface en eau lorsque h = 0,80 mNGF (condition remplie 20% du temps sur la période d'analyse).....	82
Figure 3-80 : Hauteurs d'eau des sondes Clément et Mas Perdu (en mNGF)	82
Figure 3-81 : Superficie concernée par un engorgement quasi-permanent à TN-1 d'après les sondages pédologiques.....	83
Figure 3-82 : Répartition des indicateurs de milieux froids sur le marais de Meyranne.....	84
Figure 3-83 : Hauteurs piézométriques mesurées dans la situation actuelle et évolution selon les scénarios SC1, SC6 et SC7	85
Figure 3-84 : Évolution potentielle du marais de Meyranne selon les différents scénarios retenus.....	86
Figure 3-85 : Photo aérienne du marais des Costières de Crau.....	87
Figure 3-86 : Schéma de la géologie du marais des Costières de Crau selon une coupe Nord-Est Sud-Ouest	88
Figure 3-87 : Localisation des principaux flux entrants d'eau superficielle dans les marais des Costières de Crau et du Tonkin	89

Figure 3-88 : Courbe de tarage du canal de Vergière en amont de la confluence avec le canal du Colmatage	90
Figure 3-89 : Flux d'eau au niveau du marais du Tonkin	91
Figure 3-90 : Principaux flux d'eau mesurés en août 2021 et en février 2022	92
Figure 3-91 : Niveau de la nappe mesuré en bordure du marais des Costières de Crau (X20bis, XA BIS et X 26 BIS) et en champ proche (piézomètre PZ19 et piézomètres 95/P21B).....	93
Figure 3-92 : Hauteurs d'eau mesurées au niveau du canal de Vergière, du canal du Colmatage et du canal Centre Crau à leur entrée dans la zone humide	93
Figure 3-93 : Hauteurs d'eau dans le canal d'Arles à Bouc et dans le canal du Vigueirat en amont de la zone humide	94
Figure 3-94 : Variation de hauteur d'eau dans le marais des Costières de Crau.....	95
Figure 3-95 : Superficie concernée par un engorgement quasi-permanent à TN-1 d'après les sondages pédologiques.....	96
Figure 3-96 : Répartition des indicateurs de milieux froids et frais sur le marais des Costières de Crau	97
Figure 3-97 : Évolution potentielle du marais des Costières de Crau selon les différents scénarios retenus	97
Figure 4-1 : Système de suivi des zones humides	99
Figure A- 1 : Emprises retenues pour le marais de l'Ilon	123
Figure A- 2 : Emprise retenues pour le marais du Grand Brahis	124
Figure A- 3 : Emprises retenues pour le marais de Baussenq.....	125
Figure A- 4 : Emprises retenues pour le marais de Meyranne.....	126
Figure A- 5 : Système de suivi du marais de l'Ilon	128
Figure A- 6 : Système de suivi du marais du Grand Brahis	129
Figure A- 7 : Système de suivi du marais de Baussenq	130
Figure A- 8 : Système de suivi du marais de Meyranne	132
Figure A- 9 : Localisation des postes Météo France.....	134
Figure A- 10 : Bassins versants contributifs de la zone humide de l'Ilon	140
Figure A- 11 : Bassins versants contributifs du marais du Grand Brahis.....	141
Figure A- 12 : Bassins versants contributifs de la zone humide de Baussenq	142
Figure A- 13 : Bassin-versant contributif du marais de Meyranne	143

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2-1 : Évolution potentielle des cinq zones humides étudiées selon les différents scénarios retenus.....	7
Tableau 3-1 : Évolution potentielle de Grand Brahis selon les différents scénarios retenus	27
Tableau 3-2 : Évolution potentielle de Baussenq selon les différents scénarios retenus.....	47
Tableau 3-3 : Évolution potentielle du marais de l'Ilon selon les différents scénarios retenus	66
Tableau 3-4 : Évolution potentielle du marais des Chanoines selon les différents scénarios retenus	73
Tableau A- 1 : Données disponibles au niveau des sondes installées sur le marais de l'Ilon.....	128
Tableau A- 2 : Données disponibles pour les sondes du marais du grand Brahis.....	129
Tableau A- 3 : Synthèse des données disponibles au niveau des sondes du marais de Baussenq.....	131
Tableau A- 4 : Synthèse des données disponibles au niveau des sondes du marais de Meyranne	132
Tableau A- 5 : Postes Météo France et données disponibles au niveau de chaque poste.....	134
Tableau A- 6 : Coefficients culturaux.....	139
Tableau A- 7 : Postes Météo France et données disponibles au niveau de chaque poste.....	139
Tableau A- 8 : Coefficients culturaux.....	143
Tableau A- 9 : Seuil de pluie et pourcentage de ruissellement.....	144

LISTE DES CARTES

Carte A- 1 : Synthèse des sondages pédologiques - Marais du Grand Brahis.....	108
Carte A- 2 : Synthèse des sondages pédologiques - Marais de Baussenq.....	111
Carte A- 3 : Synthèse des sondages pédologiques - Marais de Ilon	114
Carte A- 4 : Synthèse des sondages pédologiques - Marais de Meyranne et Chanoines	117
Carte A- 5 : Sondages pédologiques - Marais des costières de Crau	120

LISTE DES ABREVIATIONS

- BRGM : Bureau de Recherches Géologiques et Minières
- BRL : Bas-Rhône Languedoc
- CCTP : Cahier des Clauses Techniques Particulières
- CED : Commission Exécutive de la Durance
- CEN PACA : Conservatoire des Espaces Naturels Provence-Alpes-Côte d'Azur
- DOCOB : DOcument d'OBjectif
- EDF : Electricité De France
- ETR : EvapoTranspiration Réelle
- ETP : EvapoTranspiration Potentielle
- FAO : Food and Agriculture Organisation
- GEPPA : Groupe d'Etude des Problèmes de Pédologie Appliquée
- GIEC : Groupe d'experts Intergouvernemental sur l'Evolution du Climat
- GPMM : Grand Port Maritime de Marseille
- INRA : Institut National de Recherche Agronomique
- LIDAR : Light Detection And Ranging
- MNT : Modèle Numérique de Terrain
- NGF : Nivellement Général de la France
- PZ : Piézomètre
- RGE : Référentiel à Grande Echelle
- SAGE : Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux
- SYMCRAU : Syndicat mixte de gestion des nappes de la Crau
- TN : Terrain Naturel

PREAMBULE

La plaine de la Crau est un paléo-delta de la Durance d'environ 54 km², naturellement aride où s'est développée une agriculture alliant prairie de fauche irriguée et pastoralisme grâce à un transfert d'eau depuis le bassin de la Durance, qui permet indirectement la recharge de la nappe (à hauteur de 70% environ), le développement des usages associés et l'alimentation de nombreux milieux humides exceptionnels en Méditerranée.

Ces zones humides sont alimentées par l'eau de la Durance à travers le système d'irrigation et de drainage, les eaux souterraines de la nappe de la Crau et les précipitations, dans des proportions jusqu'ici inconnues. Elles couvrent environ 5 400 ha¹, soit 9% du territoire (plaine de la Crau élargie aux zones humides situées à l'exutoire du système Crau).

La plaine de la Crau présente un vaste réseau de canaux d'irrigation gravitaire (datant du XVI^e siècle) en fonctionnement du mois de mars au mois de septembre/octobre. Ces derniers sont alimentés par l'eau de la Durance via le partiteur de Lamanon et le canal EDF en provenance de la retenue de Serre-Ponçon. Chaque année, 300 millions de m³ d'eau sont ainsi apportés aux prairies, dont 200 millions de m³ rejoignent la nappe.

Cette ressource restant toutefois tributaire de la météorologie, des réflexions sur son partage sont menées au niveau du bassin-versant de la Durance (SAGE en cours d'élaboration, CED) afin de diminuer la pression sur les territoires déficitaires et sur les milieux aquatiques Duranciens, dans un contexte de changement climatique. Dans ce cadre, une politique de régulation des flux d'eau d'irrigation, visant un meilleur partage de la ressource entre les usagers et les milieux naturels, est encouragée par l'Agence de l'Eau. Cette politique s'accompagne d'un protocole de restitution des économies d'eau aux milieux naturels locaux et amont. Des négociations sont en cours pour qu'une partie des économies d'eau réalisées sur les canaux de Crau soit réaffectée aux milieux locaux si un besoin est avéré.

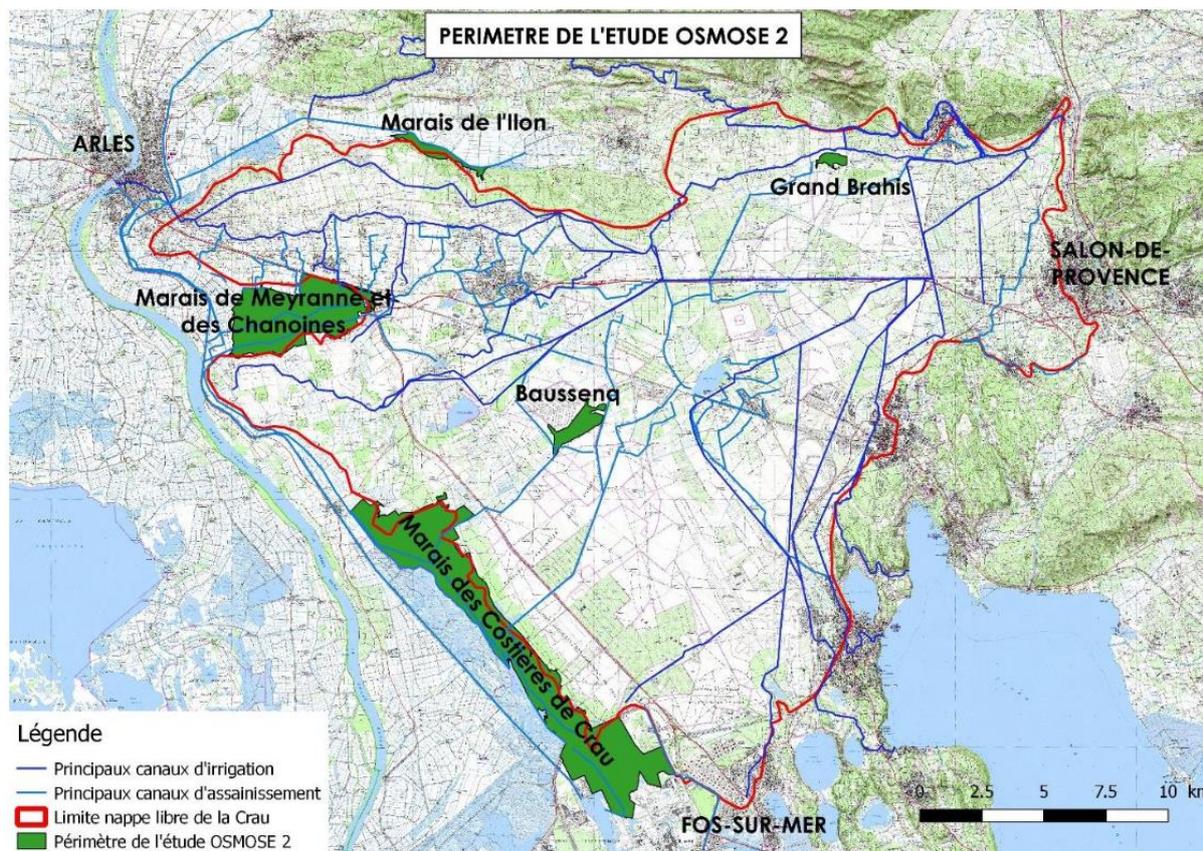
C'est dans ce cadre que le Syndicat Mixte de gestion de la nappe phréatique de la CRAU (maître d'ouvrage), ainsi que le Parc Naturel Régional des Alpilles, le Grand Port Maritime de Marseille-Fos et le Conservatoire du Littoral (co-maîtres d'ouvrages) portent l'étude de détermination du besoin d'alimentation en eau des zones humides de la Crau (projet OSMOSE 2).

L'étude se concentre sur 5 zones humides : Grand Brahis, Baussenq, marais de l'Illon, marais de Meyranne et des Chanoines et marais des Costières de Crau. Leur superficie cumulée représente 4 200 ha (7% de la plaine élargie). Elle a pour ambition d'élargir la compréhension à l'ensemble des zones humides de la Crau. Ce projet s'inscrit dans la continuité du projet OSMOSE 1, focalisé sur la collecte de données relatives au fonctionnement de ces zones humides.

¹ Inventaire des zones humides du département des Bouches-du-Rhône, 2019



Figure 1-1 : Périmètre de l'étude Osmose 2



Source : SYMCRAU (CCTP de l'étude)

2

OSMOSE 2 vise à déterminer l'impact d'un changement des conditions d'alimentation en eau des canaux sur les zones humides et leurs habitats. Plus spécifiquement, les objectifs de l'étude OSMOSE 2 peuvent être résumés comme suit :

- Améliorer la compréhension du fonctionnement hydro-écologique des zones humides de la Crau ;
- Estimer les impacts sur les habitats naturels humides de différents scénarios d'alimentation en eau à la baisse de l'hydrosystème ;
- Déterminer des niveaux piézométriques et débits des canaux d'alerte à partir desquels l'existence de la zone humide au sens de la définition réglementaire (végétation ou pédologie) est menacée et ceux à partir desquels les espèces protégées ou habitats faisant l'objet d'objectifs de conservation prioritaires dans le cadre de Natura 2000 sont menacés ;
- Traduire ces éléments sous la forme d'un suivi hydrologique de surveillance des zones humides.

L'étude OSMOSE 2 s'articule en deux temps :

- La conception d'un protocole et l'acquisition de données de terrain ;
- L'analyse des données collectées pour comprendre le fonctionnement actuel des zones humides, leur devenir possible selon différents scénarios, et enfin la définition de niveaux d'alerte et d'un système de surveillance.

Ce document constitue le rapport final de l'étude. Il s'agit d'une version provisoire. La version définitive intégrera le système de surveillance.

1 RAPPEL DU PROTOCOLE

Le protocole a été dimensionné pour répondre à la question suivante : Quels impacts sur les ZH et leurs habitats si les conditions d'alimentation en eau sont modifiées ?

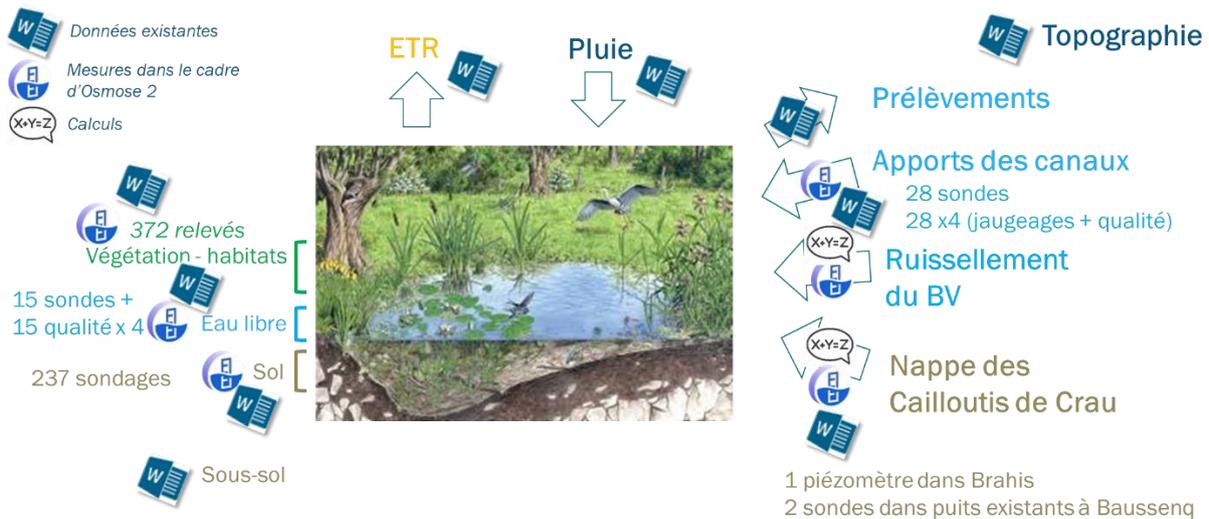
L'acquisition de données in situ dans le cadre projet OSMOSE 2 concerne les compartiments et termes du bilan en eau suivants :

- Les écoulements de surface entrants, sortants et circulants dans les zones humides ;
- Les niveaux d'eau dans les zones humides ;
- La qualité de l'eau (T°C, pH, turbidité) dans les zones humides et dans les canaux ;
- La pédologie ;
- La végétation ;
- Et de manière ponctuelle, les niveaux d'eau dans la nappe de la Crau (équipement de 3 piézomètres) ;

Les autres termes du bilan seront appréciés à l'aide du réseau de mesure existant ou déduits.

La présentation complète du protocole est disponible dans le rapport « note technique ».

Figure 1-1 : Compartiments et termes du bilan en eau objets du protocole de mesure



Source : BRLi



2 CONCLUSIONS GÉNÉRALES

2.1 LIMITES DE L'ÉTUDE

LIMITES RELATIVES AUX DONNÉES DISPONIBLES

Ces limites concernent principalement :

- La couverture spatiale des mesures de niveau d'eau. Des choix ont dû être faits dans le cadre de la conception du protocole du fait du nombre limité de sondes utilisables. Par ailleurs, plusieurs données du protocole se sont révélées inexploitable en raison :
 - Du vol de sondes (1)
 - De sondes défectueuses (2)
 - De l'absence de données en mNGF du positionnement de certaines sondes (3)
 - De l'arrêt du fonctionnement de la station hydrométrique de la Chapelette, qui devait indiquer les flux d'eau entrants dans Chanoines ;
 - De la mise à jour logiciel extraction données GPMM, qui a entraîné une indisponibilité des données relatives aux flux sortants du marais des Costières pendant la période d'analyse des données.
- La couverture temporelle des mesures de niveau d'eau. L'installation des sondes a pris plus de temps que prévu. De ce fait, pour certaines sondes, la période d'acquisition ne couvre pas une année hydrologique complète.
- Les incertitudes inhérentes aux mesures de débits dans les canaux (en général de l'ordre de 20%), et leurs répercussions sur l'estimation des débits de la nappe de la Crau.
- Les incertitudes liées à la qualité des données topographiques. Bien que la précision altimétrique soit correcte (Lidar ou MNT 1 m), la mesure s'arrête au miroir d'eau. L'altitude du terrain naturel du fond des zones humides (secteur rarement dénoyé) n'est en général pas connue.
- L'analyse de la végétation et de la pédologie se base sur un échantillonnage conçu pour répondre à la question posée et donne donc bien des tendances et non des résultats exhaustifs.

NB : L'emprise des zones humides étudiées est issue de l'inventaire des zones humides du département des Bouches-du-Rhône (CEN PACA, 2019). Ces entités ont été définies et cartographiées à une échelle de l'ordre du 1/10 000°. Elles constituent des enveloppes d'alerte pour la prise en compte des zones humides dans des dossiers réglementaires pour les services instructeurs. Les limites géographiques ont été essentiellement identifiées à partir de relevés de végétation. En ce sens, les résultats des expertises floristiques et pédologiques réalisées dans le cadre de cette étude à une échelle plus grande (plus précise), même si elles ne constituent qu'un échantillonnage, ont permis de préciser les périmètres des zones humides. En effet, les expertises de terrain ont surtout été fixées sur les espaces de transition entre les milieux humides et les milieux secs afin d'appréhender les conditions d'alimentation et d'existence des zones humides.

LIMITES RELATIVES A L'INTERPRÉTATION

Les données collectées permettent globalement de bien appréhender les flux d'eau en jeu (à l'exception du marais des Costières, et dans une moindre mesure du marais des Chanoines). Les limites exposées précédemment concernant les niveaux d'eau, ainsi que la complexité des phénomènes rendent parfois difficile la corrélation en flux et niveaux d'eau. Aussi, le schéma d'ensemble pour répondre à la question posée par l'étude a pu être établi (partiellement pour le marais des Costières et le marais des Chanoines) mais certaines observations n'ont pas pu trouver d'explication compte tenu du temps d'analyse contraint.



Certaines de ces observations pourraient peut-être être expliquées par les modes de gestion dont dépend également la distribution des habitats et des espèces hygrophiles. Ces modes de gestion ne sont pas toujours connus et sortent du champ de l'étude. De plus, la répercussion des scénarios sur la gestion n'est pas non plus connue. Les résultats de l'impact des scénarios sont donc valables en l'absence de modification de la gestion.

Le scénario du GIEC mobilisé dans le cadre de l'étude Sinergi est un scénario médian de la précédente génération scénario. Il peut donc être considéré comme optimiste et les impacts sur les zones humides sous-estimés.

Les réductions d'apport en eau de la Durance étudiées dans le cadre des scénarios Sinergi sont reportées également sur la totalité du réseau. En réalité, les extrémités aval de réseau pourront être davantage impactées.

2.2 SCENARIOS RETENUS

Par soucis de cohérence et de disponibilité des chroniques associées, les scénarios retenus ont été choisis (encadrés en vert ci-dessous) parmi les scénarios de l'étude Sinergi. Cette étude avait pour ambition de déterminer les pertes d'usage de la nappe (progression du biseau salé, impacts sur les usagers, sur les milieux,..) pour différents scénarios de long terme (2050) couplant évolution climatique, modification des apports d'eau depuis la Durance et des modes d'irrigation sur la plaine ; elle reposait sur la conception et l'exploitation d'un modèle hydrogéologique.

Dans le cadre de cette étude, 7 scénarios avaient alors été étudiés. Trois d'entre eux ont servi de référence pour les prospectives de long terme dans le projet OSMOSE 2.

Figure 2-1 : Scénarios retenus dans le cadre de l'étude

- Scénario 1 : Etat de référence horizon 2050 -> que changement climatique (CC)
- Scénario 2 : Étalement urbain horizon 2050 -> disparition de 10% des superficies irriguées (-1300 ha)
- Scénario 3 : Conversion arboriculture horizon 2050 -> conversion de 1350 ha de prairies irriguées en arboriculture
- Scénario 4 : Baisse du volume irrigué conduisant à diminuer les surfaces irriguées -> nouvelle règle de partage des eaux de la Durance : réduction de 20% des volumes destinés à l'irrigation (traduit en abandon de 10% des prairies irriguées + réduction de 10% des volumes utilisées sur les surfaces conservées)
- Scénario 5 : Abandon d'un périmètre irrigué -> nouvelle règle de partage des eaux de la Durance : réduction de 30% des volumes destinés à l'irrigation (traduit par l'abandon des ASA Haute Crau, Langlade et Rageyrol de Vergières)
- Scénario 6 : Volume irrigué baisse de 30% -> nouvelle règle de partage des eaux de la Durance : réduction de 30% des volumes destinés à l'irrigation (traduit par une réduction du volume de manière homogène sur toutes les surfaces irriguées, non diminuées)
- Scénario 7 : Abandon de toute culture irriguée en Crau -> état naturel non influencé (baisse de la recharge de 72%)

Les scénarios retenus se traduisent par une baisse de la recharge de la nappe de la Crau de l'ordre de :

- 10% pour le scénario 1 ;
- 40% pour le scénario 6 ;
- 75% pour le scénario 7.



2.3 RESULTATS DE L'ETUDE VIS-A-VIS DU FONCTIONNEMENT ET DE L'EVOLUTION POTENTIELLE DES ZONES HUMIDES

FONCTIONNEMENT DES ZONES HUMIDES

Il ressort globalement que :

- Le signal souterrain est très marquant pour le fonctionnement des zones humides de la Crau et ce même quand le flux d'eaux superficielles est supérieur au flux souterrain. Le signal nappe intègre en effet le signal irrigation lointain en été, assure la permanence des arrivées d'eau en hiver et le maintien quasi-permanent d'un ennoisement ou engorgement (selon les cas) et conditionne la présence d'habitats dits froids.
- La sensibilité des zones humides à la réduction des apports d'eau de la Durance est fonction de leur position géographique par rapport à la plaine de la Crau, position qui influence directement la manière dont s'exprime le signal nappe (logique de niveau ou de flux) et l'intensité de la réduction de l'alimentation par la nappe en fonction des scénarios. On distingue les secteurs suivants :
 - Secteur amont (Brahis) :
 - Logique de niveau piézométrique ;
 - Nappe relativement chaude, haute en été ;
 - Baisse de 30 m en cas de coupure totale de l'irrigation.
 - Secteur intermédiaire (Baussenq) :
 - Logique de niveau piézométrique ;
 - Nappe relativement chaude en été, haute en hiver ;
 - Baisse de 7 m en cas de coupure totale de l'irrigation.
 - Secteur aval / exutoire (Ilon, Meyranne-Chanoines, Costières) :
 - Logique de flux ;
 - Nappe fraîche, relativement haute en hiver.
 - Pas ou peu de baisse de niveau. Réduction drastique des flux en cas de coupure totale de l'irrigation (~70% à potentiellement 100% pour Ilon) ;
 - Sur ce secteur, les conditions pédologiques (présence de tourbe estimée à une dizaine de mètres d'épaisseur) laisse supposer des conditions d'alimentation et des processus d'apparition bien antérieurs à l'aménagement des canaux de Crau.

Cette sectorisation permet d'extrapoler, dans une certaine mesure, les résultats de l'étude aux autres zones humides de la plaine de la Crau.

ÉVOLUTION POTENTIELLE DES ZONES HUMIDES

L'évolution potentielle des zones humides selon les trois scénarios retenus est résumée dans le tableau et les cartes ci-dessous.

TN : terrain naturel

TN- 1 : terrain naturel moins 1 mètre.

Tableau 2-1 : Évolution potentielle des cinq zones humides étudiées selon les différents scénarios retenus

ZONE HUMIDE	SITUATION ACTUELLE	SCENARIO 1 (CHANGEMENT CLIMATIQUE)	SCENARIO 6 (CHANGEMENT CLIMATIQUE ET REDUCTION DE 30% DES APPORTS D'EAU D'IRRIGATION DEPUIS LA DURANCE)	SCENARIO 7 (CHANGEMENT CLIMATIQUE ET SUPPRESSION TOTALE DES APPORTS D'EAU D'IRRIGATION DEPUIS LA DURANCE)
Grand Brahis	<ul style="list-style-type: none"> - Ennoiemment circonscrit dans l'espace et limité à la période estivale. Flux lié de l'irrigation locale très faibles. ZH surtout alimentée par la nappe. - TN-1 engorgé de manière quasi-permanente sur la quasi-totalité de la zone humide. - Absence d'espèces végétales inféodées aux eaux froides (cohérent avec des eaux de la nappe relativement chaudes dans cette situation proche de la prise d'eau) 	<ul style="list-style-type: none"> - Légère baisse de la nappe mais suffit à réduire très fortement voire supprimer les flux souterrains vers la zone humide. - Substitution des zones engorgées en permanence à TN-1 par un engorgement temporaire. - Disparition de la cariçaie, fragmentation de la roselière, extension des scirpaies à Scirpe jonc. 	<ul style="list-style-type: none"> - La nappe baisse de 8 m environ. Coupure totale et permanente de l'alimentation de la zone humide par les eaux souterraines. - Maintien des apports d'irrigation et des précipitations - Assèchement total à terme. À court et moyen termes : extension des habitats boisés peupleraies blanches et noires au détriment des roselières et cariçaies. Les scirpaies pourraient se maintenir un peu. 	<ul style="list-style-type: none"> - La nappe baisse de 30 m environ. Coupure totale et permanente de l'alimentation de la zone humide par les eaux souterraines. - Assèchement total plus rapide que pour le scénario 6 en l'absence des apports de l'irrigation. Evolution des forêts de bois tendre (saulaies et peupleraies) vers des forêts à bois dur (frênaies et chênaies pubescentes). Possibilité d'infiltration des éléments xérophiiles (pinèdes de Pin d'Alep, chênaies vertes, garrigues sclérophylles) par apport depuis les Alpilles.
Bausseq	<ul style="list-style-type: none"> - Ennoiemment temporaire des prairies humides (en période d'irrigation). Dépressions topographiques d'origine anthropique au centre et en aval ennoyées quasiment toute l'année (superficie parfois très faible). - Croisement de la nappe et du TN limité à deux secteurs (centre et aval), dont la superficie est supérieure en hiver. - Croisement de la nappe et du TN-1 sur la quasi-totalité de la zone humide en hiver. 	<ul style="list-style-type: none"> - Quasi-similaire à la situation actuelle 	<ul style="list-style-type: none"> - La nappe baisse de 2 m environ. - Ennoiemment temporaires des dépressions centrales et aval (irrigation + pluies) mais ne sont plus ennoyées en permanence en hiver. - Possibilité de conservation des prairies humides si les périodes d'irrigation sont appropriées et si l'activité de pâturage est maintenue - Maintien de la peupleraie. Réduction surfacique des habitats frais. 	<ul style="list-style-type: none"> - La nappe baisse de 7 m environ. - Assèchement total à terme - Développement durable des fruticées mésophiles (ronciers, fourrés à Prunelliers...) sur les terrains actuellement pâturés.



ZONE HUMIDE	SITUATION ACTUELLE	SCENARIO 1 (CHANGEMENT CLIMATIQUE)	SCENARIO 6 (CHANGEMENT CLIMATIQUE ET REDUCTION DE 30% DES APPORTS D'EAU D'IRRIGATION DEPUIS LA DURANCE)	SCENARIO 7 (CHANGEMENT CLIMATIQUE ET SUPPRESSION TOTALE DES APPORTS D'EAU D'IRRIGATION DEPUIS LA DURANCE)
Ilon	<ul style="list-style-type: none"> - Majorité de la surface ennoyée toute l'année. Influence des eaux souterraines par résurgence (surtout visible sur Ilon Est) et par drainance ascendante sur tout l'lon. Expression des espèces inféodées aux milieux froids en bordure sud du site. - Grand marais de l'lon ouest, en communication directe et permanente avec le canal via plusieurs brèches. - Ilon est et petit marais de l'lon ouest : alimentés par le canal uniquement en période de crue. - TN-1 engorgé de manière quasi-permanente sur la quasi-totalité de la zone humide. Tourbe à partir de 50cm de profondeur. 	<ul style="list-style-type: none"> - Quasi-similaire à la situation actuelle 	<ul style="list-style-type: none"> - Réduction du flux d'eaux souterraines d'environ 20%. A priori pas d'influence sur l'engorgement mais réduction surfacique de la zone d'influence des eaux souterraines au niveau de l'lon Est. Pourrait se traduire par une réduction surfacique des habitats froids et par une réduction des populations reliques glaciaires. - Sur le grand marais de l'lon ouest : réduction de 15% de la surface ennoyée 75% du temps. Développement d'îlots de saulaie et, en marges, de peupleraies. 	<ul style="list-style-type: none"> - Réduction du flux d'eau souterraine d'environ 60% (ou possiblement 100% selon la configuration hydrogéologique du site). L'lon est reste en eau (en cas de réduction de 60% des apports souterrains) ou ennoyé que quand le canal est en crue (100%). - Le reste des compartiments n'est ennoyé que quand le canal est en crue. - Maintien potentiel de l'engorgement affleurant. Extension de la saulaie et des peupleraies blanches. Réduction encore plus franche des habitats froids (cladaie) et des populations de reliques glaciaires dans l'lon est.
Chanoines	<ul style="list-style-type: none"> - Abondance des espèces liées aux eaux froides. Exutoire de la nappe de la Crau. - Nombreux laurons et résurgences. Croisement de la nappe avec la TN. - Pas d'ennoiement (ou très localisé) mais TN engorgé de manière quasi-permanente. - Importante épaisseur de tourbe. 	<ul style="list-style-type: none"> - Probablement similaire à la situation actuelle : - Apport des eaux souterraines diminue de 10 % et baisse piézométrique négligeable ; - Conservation des flux d'eaux superficielles. 	<ul style="list-style-type: none"> - Réduction des flux d'eau souterraine d'environ 40% et baisse piézométrique potentiellement infra-métrique ; - Baisse significative des « arrivées » d'eau agricole (bout du réseau) ; - « Coupure » de toutes les alimentations latérales hautes (sources latérales de débordement), pertes de certains laurons, conservation du flux d'alimentation par drainance. - Probable maintien de l'engorgement permanent à TN-1 et potentiellement au niveau du terrain naturel dans les parties les plus basses. - Maintien de la signature des milieux froids dans les zones bénéficiant des apports par drainance, dans les parties les plus basses 	<ul style="list-style-type: none"> - Réduction du flux nappe d'environ 75% et baisse piézométrique de l'ordre du mètre ; - Probable maintien du caractère humide (TN-1 reste engorgé) mais probable dessèchement de l'horizon superficiel (entre TN et TN-1). - Réduction du caractère humide froid (colmatage des laurons, assèchement de la partie superficielle du marais) - Evolution vers des prairies humides puis saulaies, avec possible maintien de laurons vers l'aval du marais

ZONE HUMIDE	SITUATION ACTUELLE	SCENARIO 1 (CHANGEMENT CLIMATIQUE)	SCENARIO 6 (CHANGEMENT CLIMATIQUE ET REDUCTION DE 30% DES APPORTS D'EAU D'IRRIGATION DEPUIS LA DURANCE)	SCENARIO 7 (CHANGEMENT CLIMATIQUE ET SUPPRESSION TOTALE DES APPORTS D'EAU D'IRRIGATION DEPUIS LA DURANCE)
Meyranne	<ul style="list-style-type: none"> - Reçoit les apports de Chanoines. - Ennoisement superficiel temporaire dans les compartiments proches des canaux. Principalement lié aux apports d'eaux superficielles par le canal du Chalavert. Gestion hydraulique pour maximiser l'enneisement entre avril et juillet, favorable pour l'avifaune. - Ponctuellement, ennoisement superficiel lié aux eaux souterraines via des laurons (surtout au sud). - Importante épaisseur de tourbe. Engorgement permanent à TN – 1 (altitude 1 m et exutoire de l'hydrosystème) - Influence des eaux froides notable à l'ouest et au sud du marais de Meyranne, où elle est masquée par les activités agricoles (prairies) et par l'enneisement par les eaux de surface, favorables aux cortèges plus tempérés 	<ul style="list-style-type: none"> - Quasi-similaire à la situation actuelle 	<ul style="list-style-type: none"> - Réduction des flux d'eau souterraine d'environ 30%. - Baisse du niveau d'eau dans les canaux ne permettant pas d'enneisement (hors période de crue) sans aménagement des martelières. En cas d'abaissement des martelières, possibilité d'envoyer un tiers de la superficie ennoiyable actuellement. Impact sur herbiers de macrophytes flottants. - Maintien de l'engorgement et des laurons 	<ul style="list-style-type: none"> - Réduction du flux nappe d'environ 70%. - Colmatage des laurons - Disparition de l'enneisement superficiel par les apports du canal en période d'irrigation. Potentiellement possible uniquement en période en crue. - Assèchement possible de l'horizon superficiel (entre TN et TN-1).
Costières de Crau	<ul style="list-style-type: none"> - Compréhension non stabilisée en l'absence de données essentiellement à la compréhension du hydro-système. - Rôle de l'évaporation et du stockage potentiellement très importants. - Fonctionnement hydrologique a priori très complexe et largement influencé par la gestion des milieux. 	<ul style="list-style-type: none"> - Non évaluable en l'état 	<ul style="list-style-type: none"> - Non évaluable en l'état 	<ul style="list-style-type: none"> - Non évaluable en l'état



Légende des cartes suivantes :

- Vert : similaire à la situation actuelle
- Jaune : modifications légères de la distribution des habitats / espèces. L'existence de la zone humide n'est pas menacée.
- Orange pâle : modifications substantielles de la distribution des habitats / espèces. L'existence de la zone humide n'est pas menacée.
- Orange foncé : seules les espèces arbustives hydrophiles dont le système racinaire peut prospecter à des profondeurs supérieures à 2 mètres subsistent. Du point de vue de la végétation, il s'agit encore d'une zone humide.
- Rouge : assèchement total à terme.

Figure 2-2 : Évolution potentielle des zones humides – Scénario 1

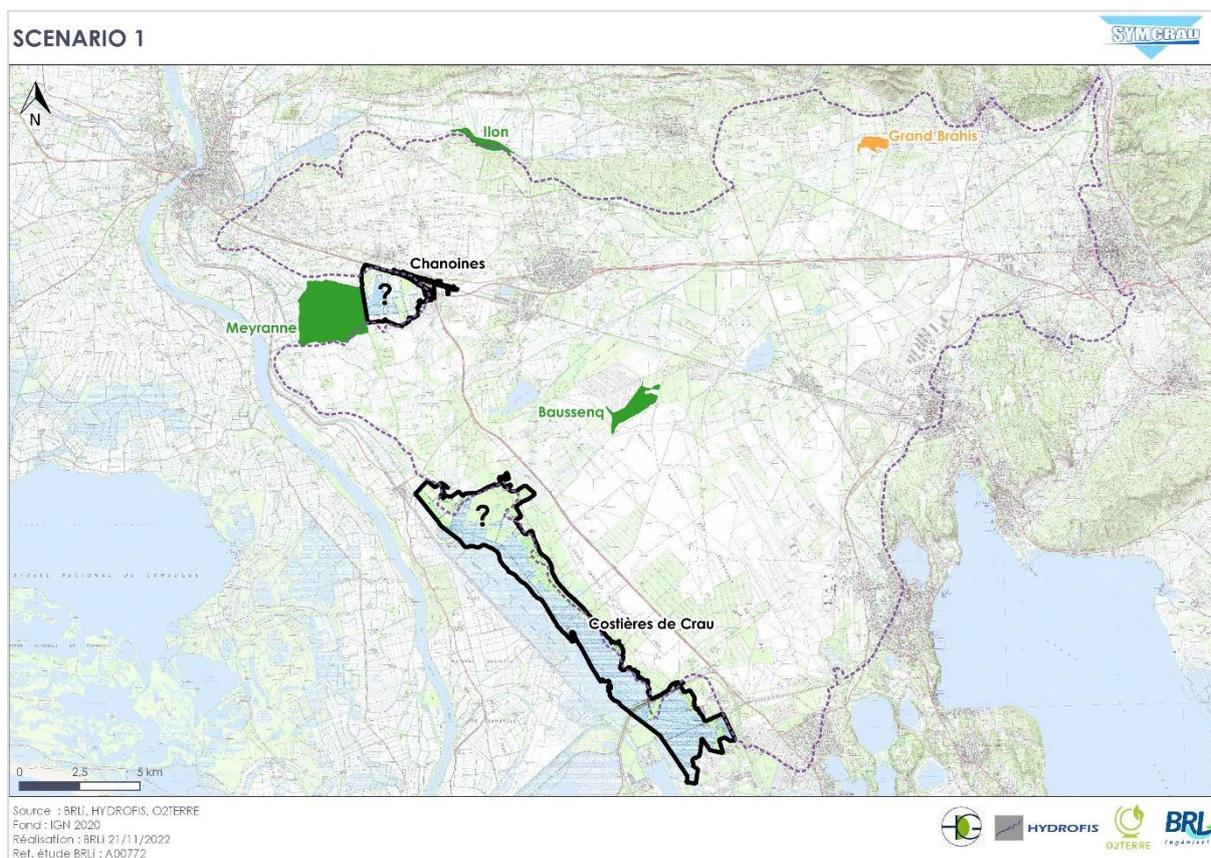


Figure 2-3 : Évolution potentielle des zones humides – Scénario 6

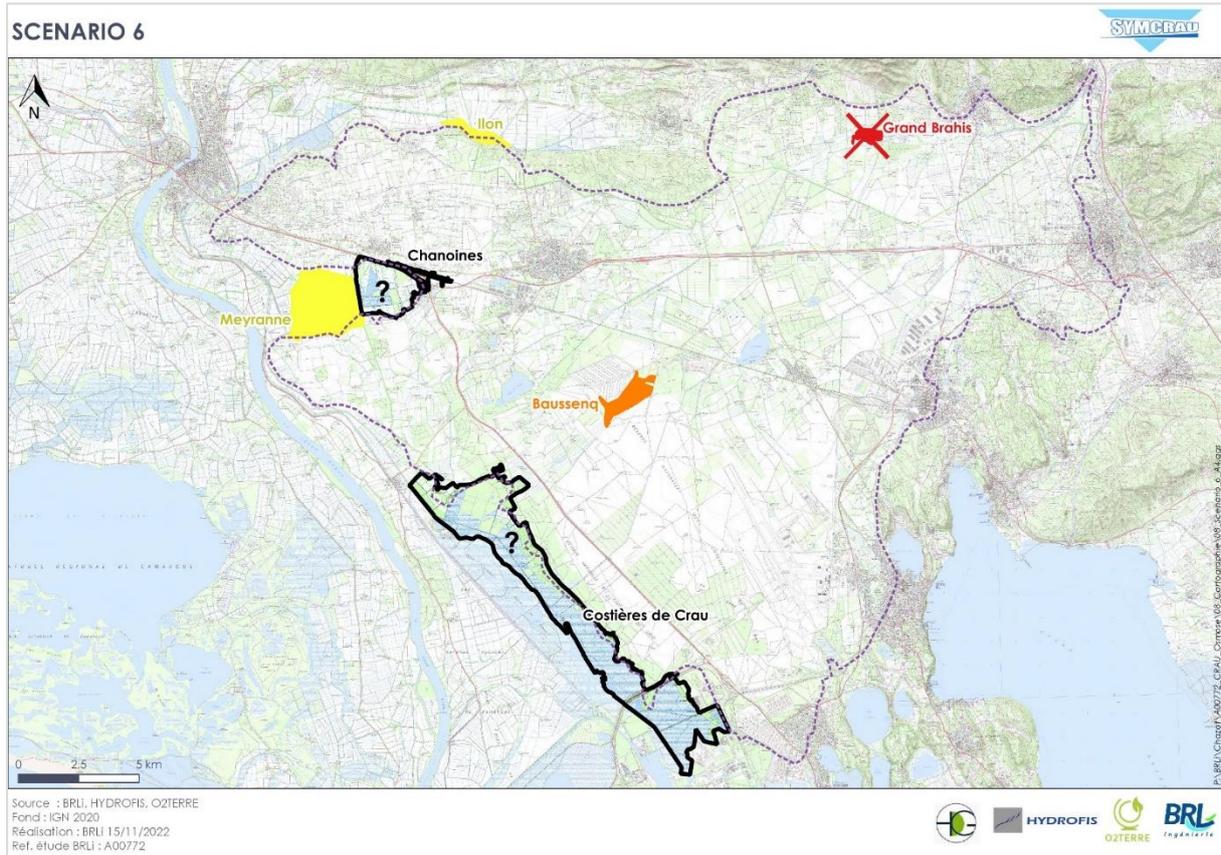
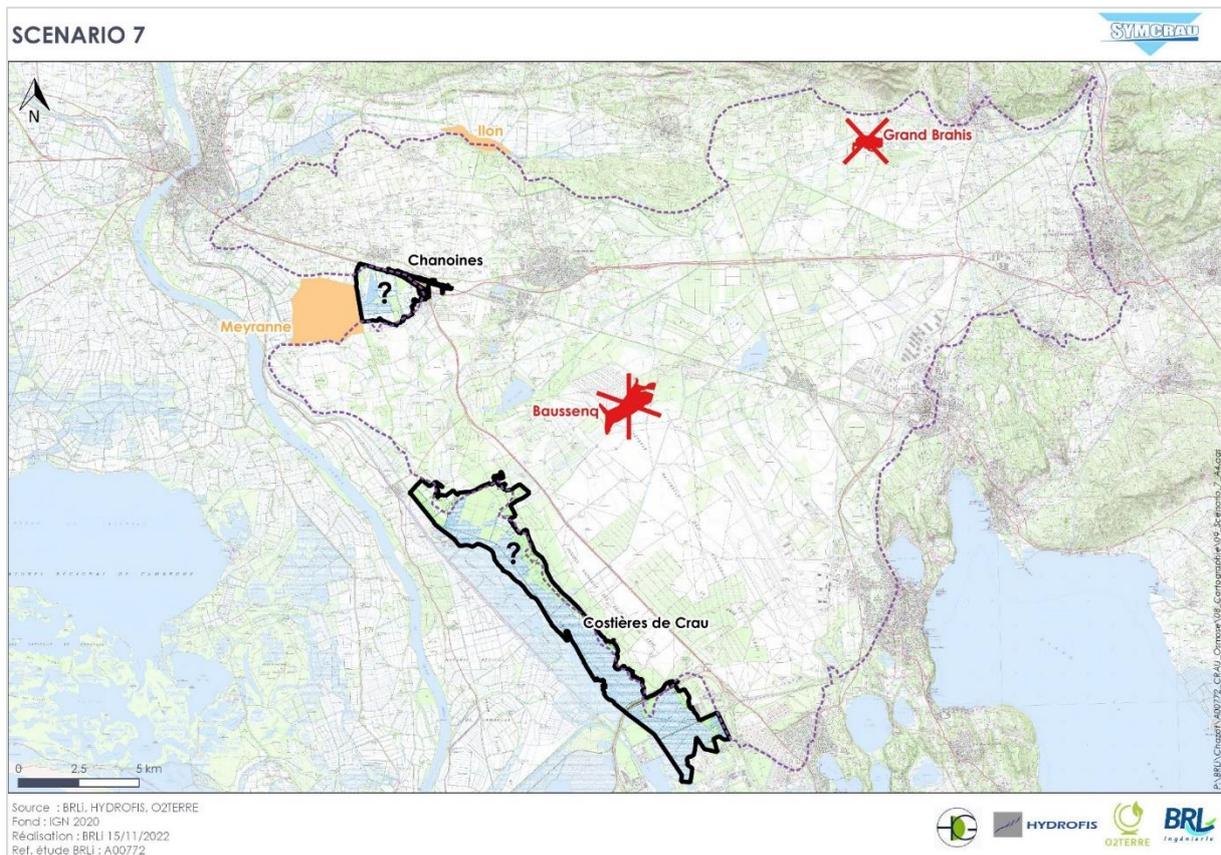


Figure 2-4 : Évolution potentielle des zones humides – Scénario 7







3 RESULTATS SITE PAR SITE

La méthode d'analyse et les résultats détaillés sont présentés dans chacune des annexes thématiques.

3.1 GRAND BRAHIS

3.1.1 Contexte

La zone humide de Grand Brahis est une dépression d'environ 40 ha entourée d'oliviers au nord et de prairies irriguées au sud. Elle est située à 10 km à vol d'oiseau de la prise d'eau dans la Durance. Son altitude moyenne est de 64 mNGF, avec 66 mNGF à l'amont, 62 mNGF à l'exutoire.

La zone humide est traversée d'est en ouest par un canal (ou drain) central. Des apports d'irrigation arrivent également par le sud.

Les habitats présentent un degré d'hygrométrie croissant de l'extérieur vers le centre de la zone humide. Les seules espèces inféodées à des milieux froids se trouvent dans le canal central et sont observables en hiver.

Le site ne dispose pas de document de gestion. Un seuil est présent à l'exutoire. Le site connaît une recolonisation forestière depuis une vingtaine d'années.

Figure 3-1 : Photo aérienne de la zone humide de Grand Brahis





3.1.2 Compréhension, hypothèses et questions formulées en début d'étude

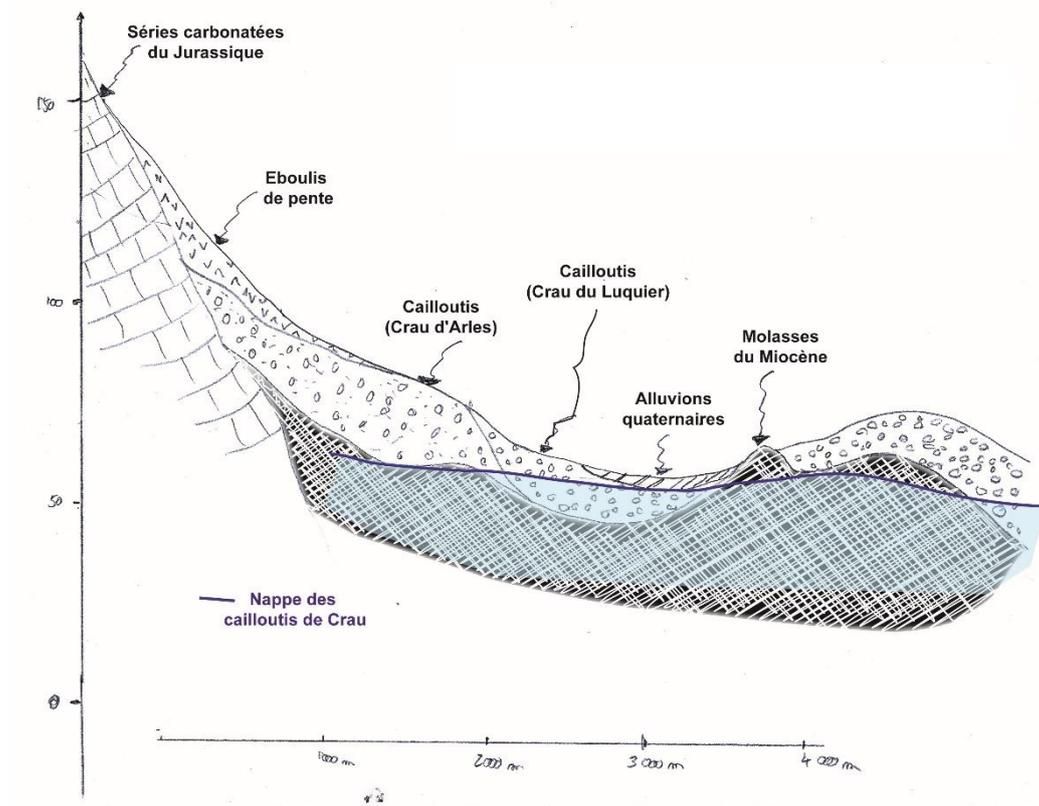
La géologie de ce secteur est complexe. Les cailloutis de Crau sont peu épais et sont en recouvrement de la molasse miocène qui est elle-même aquifère ; localement, cette molasse miocène affleure. Latéralement, des éboulis de pente (colluvions) viennent en recouvrement des cailloutis de Crau. La zone humide elle-même est située dans un creux topographique caractérisé par une accumulation de sédiments quaternaires.

Il en résulte une certaine complexité hydrogéologique ; on a potentiellement trois nappes : une nappe puissante dans les cailloutis de Crau, une nappe plus inerte dans la molasse miocène et une nappe superficielle dans les des horizons argilo-limoneux (à vérifier) liée à la faible perméabilité de ces solums et aux eaux d'irrigation provenant des prairies irriguées au sud ; les interrelations entre ces trois nappes doivent être considérées comme inconnues.

Les variations de niveaux de nappe sont cohérentes entre les différents piézomètres mais les piézomètres existants ne permettent pas de savoir à quel niveau se situe la nappe des cailloutis sous la zone humide.

Cette question a justifié la création d'un piézomètre dans la nappe des cailloutis au droit de la zone humide.

Figure 3-2 : Schéma de la géologie de la zone humide de Grand Brahis selon une coupe nord sud



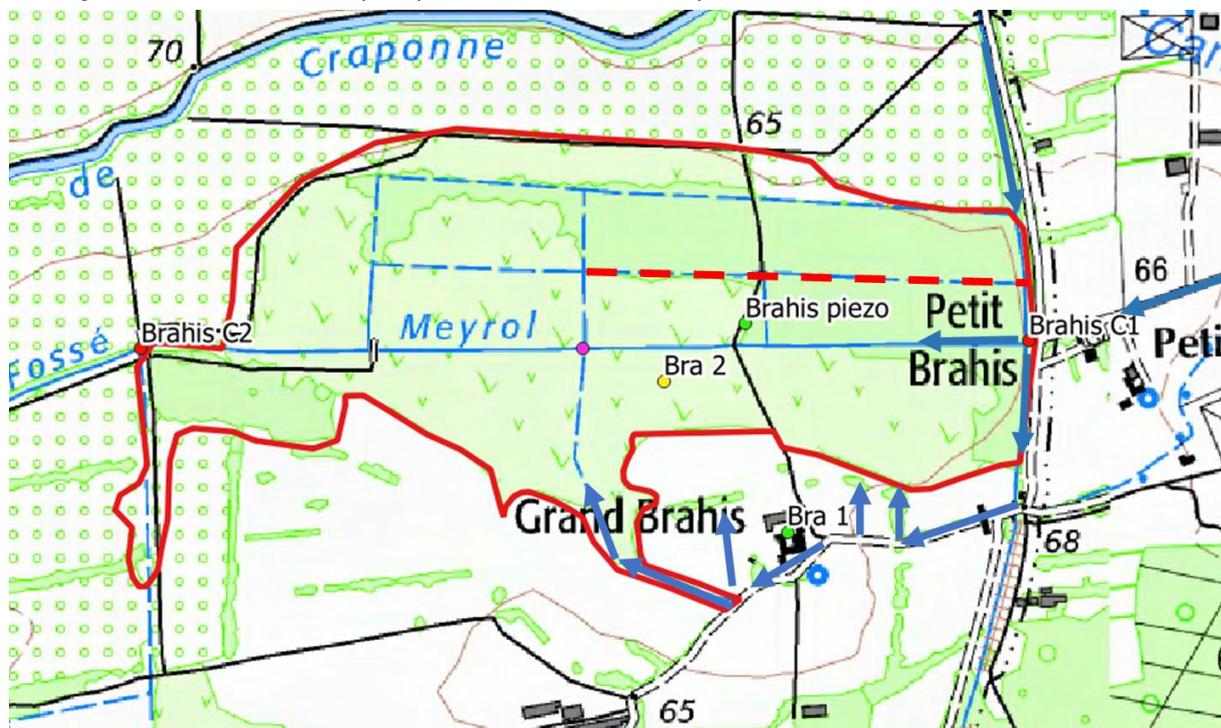


3.1.3 Fonctionnement actuel

FLUX D'EAU

Les principaux flux entrants d'eau superficielle sont représentés sur la carte ci-après.

Figure 3-3 : Localisation des principaux flux entrants d'eau superficielle sur la zone humide de Grand Brahis



Les données collectées permettent d'obtenir la variation temporelle des flux entrants et sortants de juin 2021 à avril 2022 (cf. graphique ci-dessous).

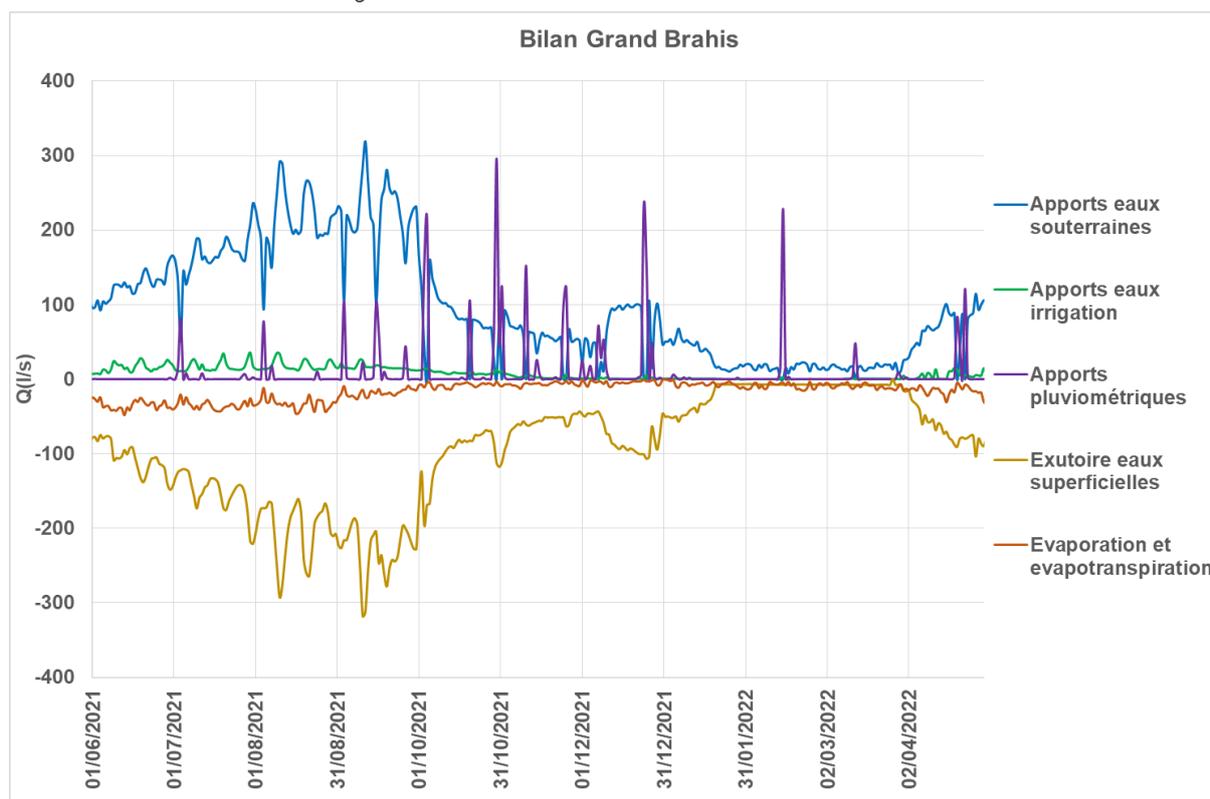
Dans ce graphique (comme pour tous les graphiques de ce type dans ce rapport), la validité des données peut être considérée comme variable :

- Les données de flux entrants et sortants correspondent à des mesures de débit in situ, dont la précision peut être considérée comme forte (imprécision de 5 à 10%).
- Les données de pluie doivent être considérées avec prudence : elles ont été mesurées sur les stations hydrométéorologiques qui peuvent être éloignées de plusieurs kilomètres de la zone humide.
- Les données d'évaporation et d'évapotranspiration sont déduites de formules empiriques ; elles donnent des ordres de grandeur pour ces variables.
- Le flux d'alimentation en provenance de la nappe est déduit de tous les autres paramètres. Il doit donc être considéré avec beaucoup de prudence ; toute erreur, imprécision ou mauvaise interprétation se « répercute » dans l'estimation de ce flux.

La figure de synthèse doit être considérée avec prudence ; elle donne une information brute, utile à l'analyse et l'interprétation.



Figure 3-4 : Flux d'eau entrants et sortants sur la zone



Ce bilan permet de poser les constats suivants :

- L'alimentation principale de la zone humide est constituée par la présence d'eaux souterraines à très faible profondeur (<1 mètre) ;
- Le flux sortant principal correspond aux eaux superficielles qui s'échappent de la zone humide dans sa partie ouest (exutoire de la zone humide) ;
- Les volumes d'eau superficielle sortants à l'exutoire de la zone humide sont très largement supérieurs à ceux entrants dans la zone humide au niveau du canal, ce qui renforce l'identification du rôle de la nappe (228 500 m³ entrant contre 2,7 Mm³ sortant sur la période juin 2021 – avril 2022). Ils sont de l'ordre de 300 l/s au pic de la saison d'irrigation. Les sorties très faibles en hiver mais maintenues autour de 50 l/s. Quand le niveau piézométrique de la nappe des cailloutis sous-passe le TN-1 (3 semaines en février sur la période observée), il est possible et probable que le flux résiduel hivernal corresponde plus à un lent dénoisement, un lent ressuyage des horizons limoneux superficiels, qu'à un apport de la nappe des cailloutis.
- L'évaporation à la surface de l'eau, l'évapotranspiration et les apports depuis le Fossé Meyrol (eaux d'irrigation) sont des phénomènes secondaires en termes de flux (environ 50 l/s pour les phénomènes évaporatoires et les apports d'eau d'irrigation) ;
- Les événements pluvieux ne se traduisent pas forcément par une augmentation simultanée des flux en sortie de la zone humide, ce qui ne peut être expliqué que par l'absence de pluies significatives au droit de la **zone humide**.

À partir de ces données de flux, il est possible de proposer les bilans suivants :

- Bilan sur l'ensemble de la période avec des données de flux disponibles : juin 2021 – avril 2022 ;
- Bilan mensuel ;
- Bilan d'un mois représentatif de la situation estivale / de la période d'irrigation : août 2021 ;
- Bilan d'un mois représentatif de la situation hivernale / hors période d'irrigation : mars 2022.



Nous attirons l'attention du lecteur sur le fait que les figures suivantes ne présentent pas toutes la même échelle en ordonnée.

Figure 3-5 : Bilan des flux sur la période juin 2021 - avril 2022

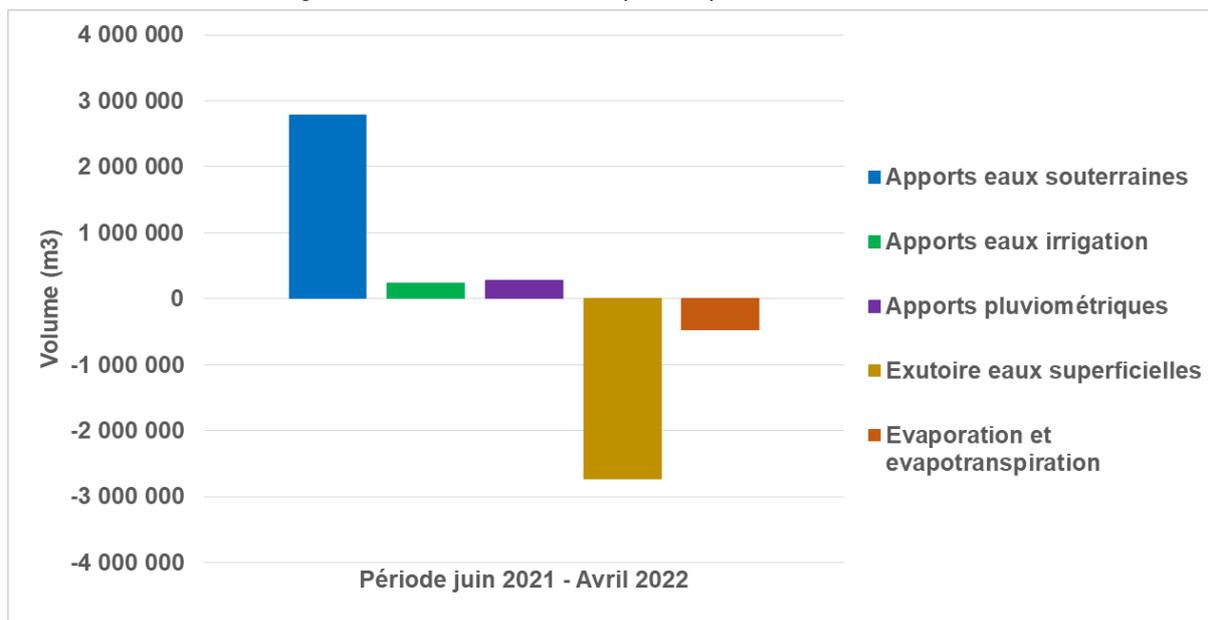


Figure 3-6 : Bilan des flux mensuels

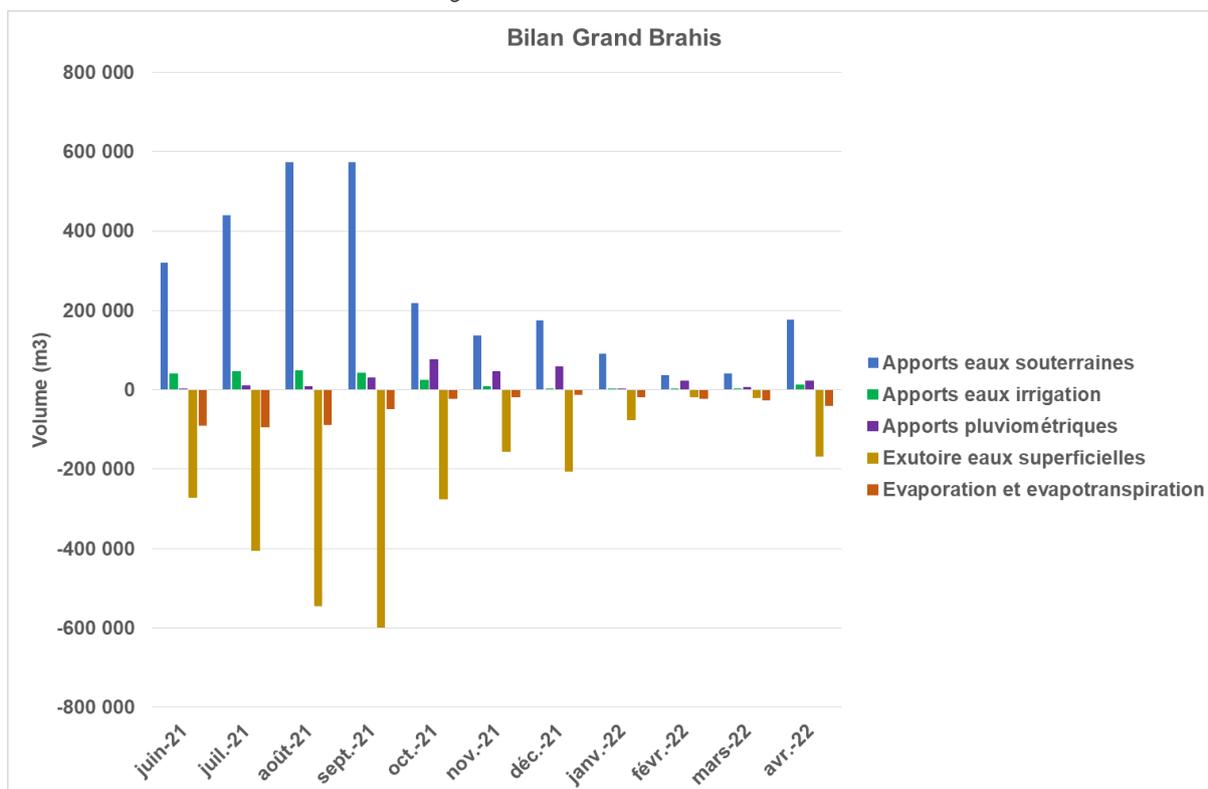




Figure 3-7 : Bilan des flux - Mars 2022

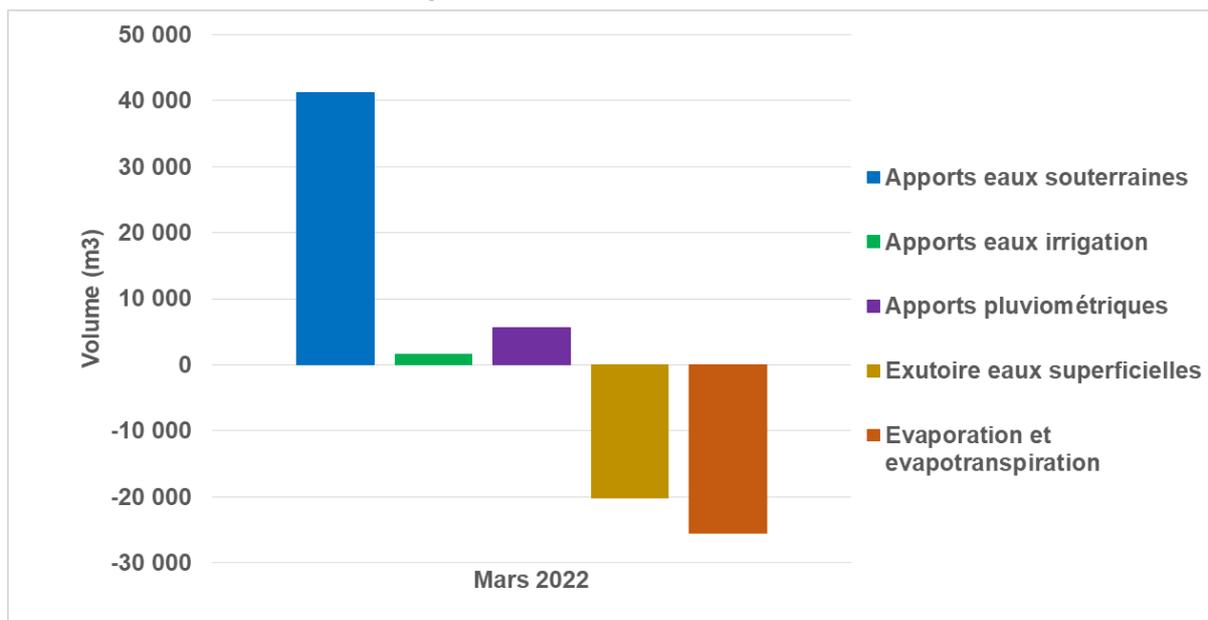
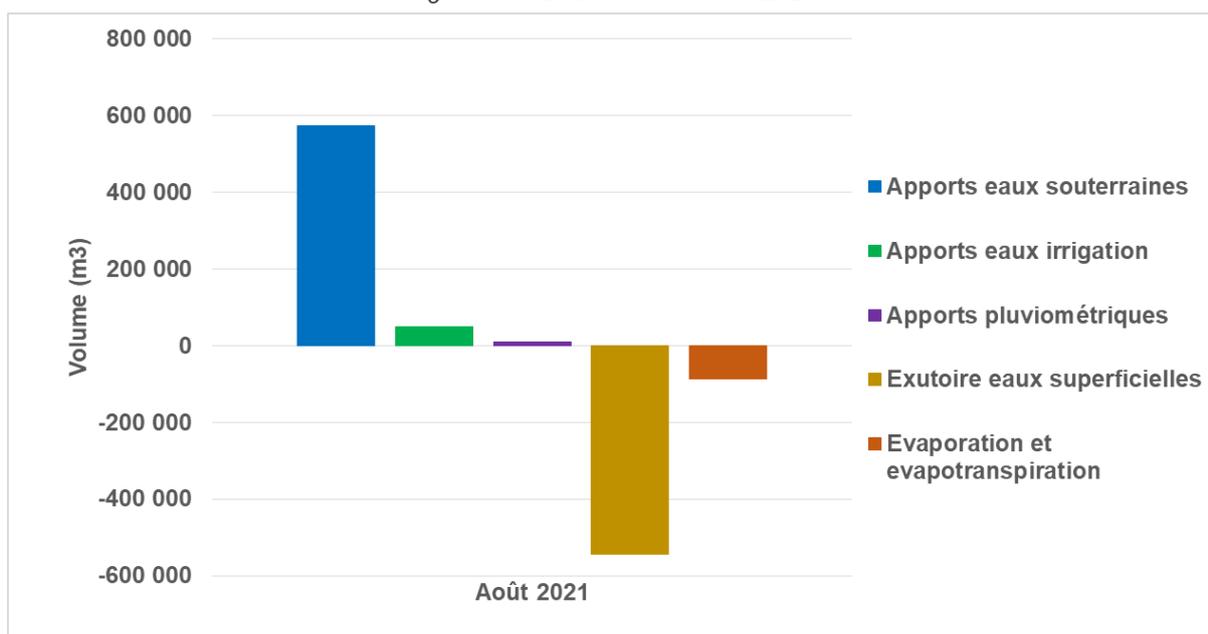


Figure 3-8 : Bilan des flux - Août 2021





NIVEAUX D'EAU (ENNOIEMENT / ENGORGEMENT)

La variation de niveaux dans la zone humide (Bra 2) est dans l'ensemble très corrélée au niveau d'eau dans la nappe de la zone humide et la nappe tout court.

La sonde Bra 2 montre des valeurs supérieures au terrain naturel période d'irrigation. Cet ennoisement, probablement limité en termes de superficie, est probablement dû à une piézométrie haute à cette période et aux apports d'irrigation par le sud.

Entre hiver, le niveau piézométrique de la nappe de la Crau (Brahis_piezo) sous-passe TN-1 très peu de temps (une quinzaine de jours en 2022,).

Malgré l'absence de données pendant la période d'irrigation, on comprend qu'elle se situe globalement entre TN et TN-1 quasiment toute l'année. Cette information est cohérente avec les observations pédologiques qui indiquent du gley (considéré comme étant un sol dont la formation est due à l'action d'une nappe phréatique permanente (Duchaufour, 1977)) sur 75% de la zone humide. Le comportement de Brahis piezo semble donc extrapolable à tout le secteur engorgé de manière quasi permanente à TN-1 et aux autres années.

Figure 3-9 : Évolution des niveaux d'eau dans la zone humide et dans le piézomètre Brahis_piézo

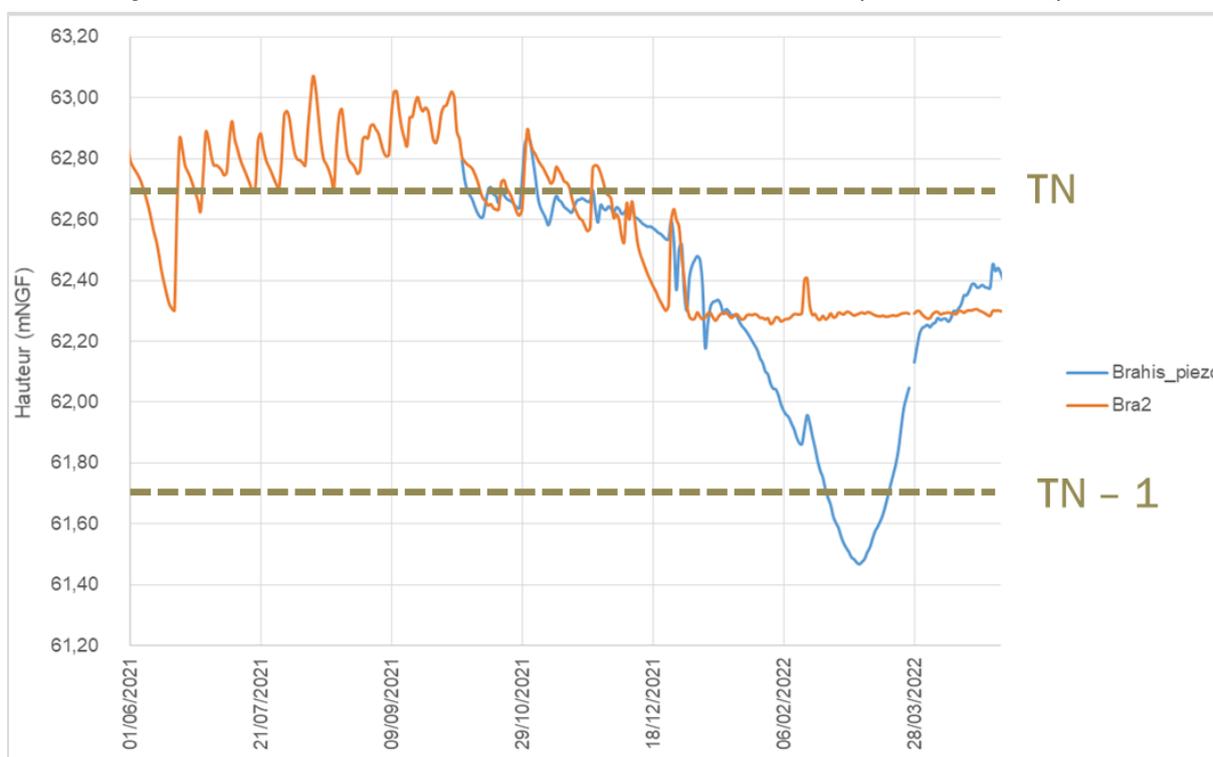




Figure 3-10 : Superficie concernée par un engorgement quasi-permanent du TN-1 d'après les sondages pédologiques



INDICATEURS FLORE / HABITATS

La végétation du site est principalement représentée par des mosaïques de roselières à Roseau commun et Scirpe lacustre. Les secteurs les plus humides accueillent des cariçaies à Laïche des rivières localement colonisée par des saules. Dans les zones d'atterrissement, les scirpaies à Scirpe jonc dominant et sont relayées par les ripisylves à Peuplier blanc et Peuplier noir. La flore comporte très peu d'indicateurs de milieux froids. Cette organisation des groupements végétaux est récente : l'examen des photographies aériennes montrent un site dominé par les prairies humides, avec absence totale de structures ligneuses (ripisylves, fourrés de ronces, cannaies à Canne de Provence...). Cette dynamique rapide résulte très certainement de la déprise agricole.

Les herbiers de Potamot coloré en fond du canal central sont les seuls indices de l'influence d'une nappe d'eau froide, lorsque les saulaies blanches et cariçaies indiquent la proximité d'une nappe d'eau fraîche, mais pas franchement froide. La mention récente de la Fougère des marais en limite nord-ouest de la zone humide est étonnante, dans un contexte franchement thermophile (proximité des vergers d'oliviers). Cette donnée qui mérite d'être complétée par la caractérisation de la population peut être liée à une émergence ponctuelle du réseau karstique des Alpilles, voire à des infiltrations depuis le canal de Craponne.

Sur cette zone humide, l'hydrologie est très parlante mais ne correspond pas en apparence à la réalité des habitats et des espèces telle que décrite plus haut.

La qualité des eaux souterraine peut être approchée par le qualitomètre du mas de la Jas, situé à 1 700 m au sud de la zone humide. On dispose de 8 mesures entre 2014 et 2019, qui montrent que les eaux souterraines, dans ce secteur, présentent des températures qui varient entre 16 et 17°C en période hivernale et entre 18 et 19°C en période estivale.

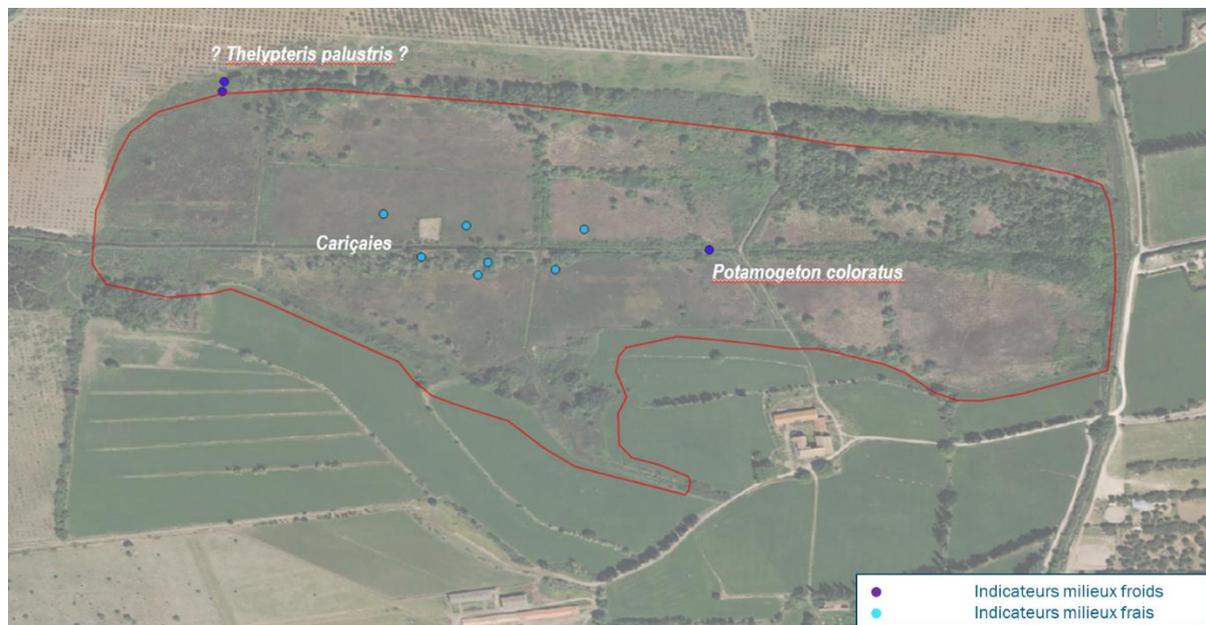
Ces éléments sont cohérents avec les observations des températures très élevées en entrée et sortie dans les eaux superficielles.



Les eaux souterraines alimentant la zone humide arrivent à des températures proches de la température des eaux de surface.

La ripisylve et la roselière résulte certainement de la déprise agricole. Les photographies aériennes des années 40 montrent un site dominé par des prairies humides.

Figure 3-11 : Répartition des indicateurs de milieux froids et frais sur la zone humide de Grand Brahis



3.1.4 Évolution future

PIEZOMETRIE

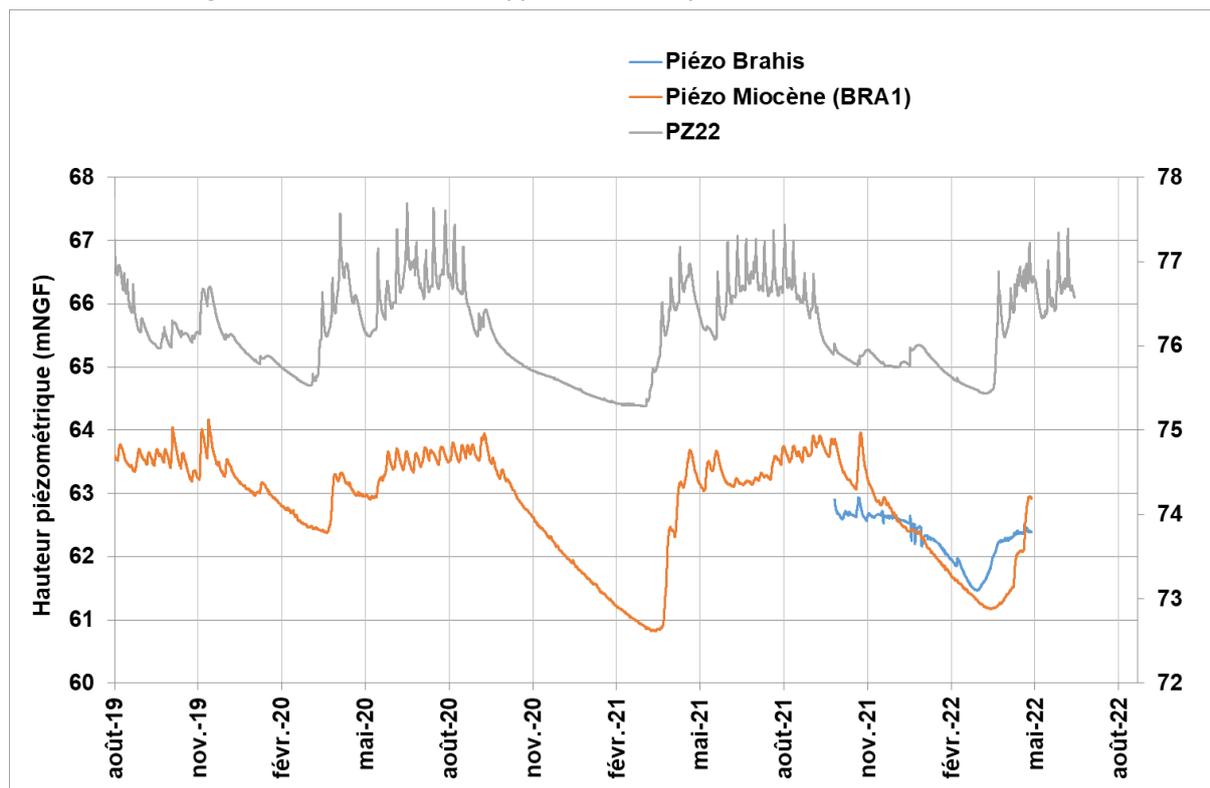
Concernant l'estimation des flux d'eaux souterraines alimentant la zone humide, nous disposons de 3 chroniques piézométriques qui bordent la zone humide.

Sur zone, nous disposons d'un piézomètre installé dans les cailloutis de Crau en octobre 2021 ; les données sont relativement courtes pour être analysées.

Toujours sur site, le piézomètre Bra 1 renseigne sur les variations de piézométrie dans le miocène sous-jacent aux cailloutis. En amont de la zone humide, le PZ 22 renseigne quant à lui sur les variations piézométriques dans les cailloutis ; on peut observer une très bonne corrélation entre les variations piézométriques de Bra 1 et PZ 22.



Figure 3-12 : Hauteur de la nappe mesurée aux piézomètres Brahis, BRA1 et PZ22

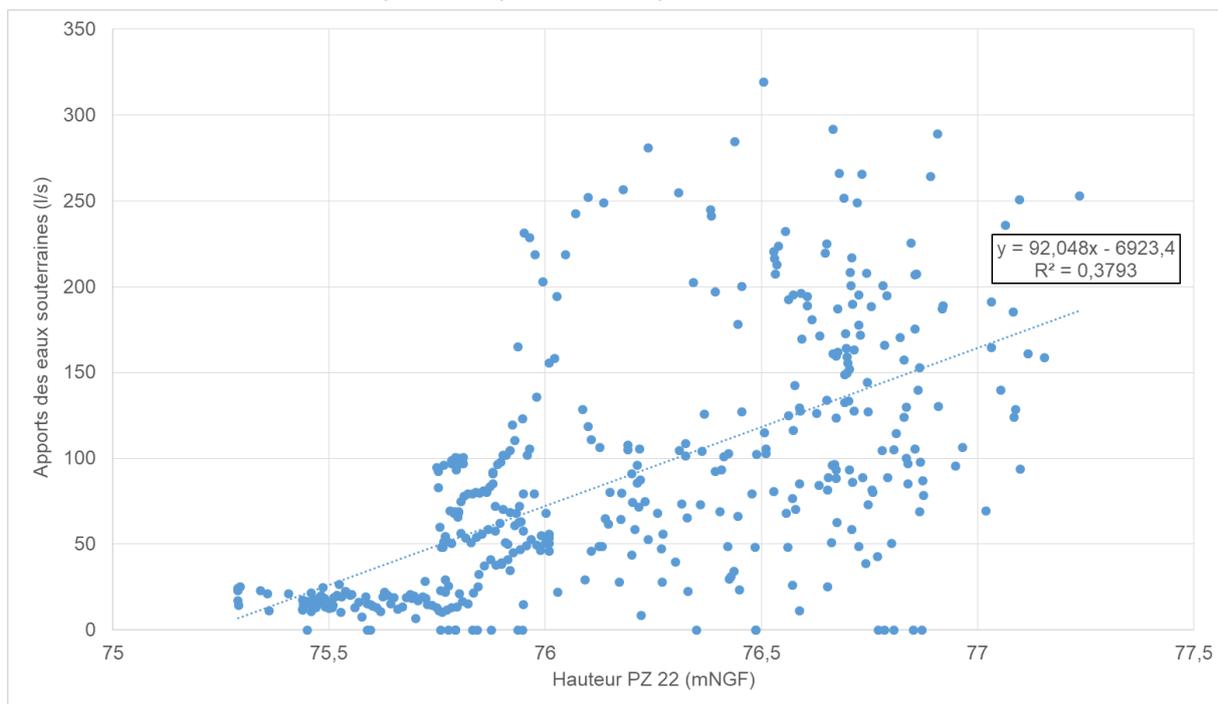




L'analyse du bilan montre que les flux d'eau souterraine deviennent très faibles, voire négligeables sur la période allant de février à fin mars 2022. Sur cette même période, le Piézo Brahis sous-passe 62 mNGF, côte altimétrique qui correspondrait au seuil de coupure d'un flux significatif d'eau souterraine. Cette observation est par ailleurs cohérente avec la topographie du site qui montre un minimum altimétrique en sortie de zone humide à environ 62 mNGF.

À partir de cette observation et compte tenu de la forte corrélation entre les relevés piézométriques, nous proposons de considérer les apports en eau souterraine sur la zone humide comme négligeable sous un niveau piézométrique d'environ 75,6 mNGF pour le PZ 22. Le graphe ci-dessous montre la distribution des apports souterrains de la nappe en fonction du niveau de nappe sur ce piézomètre.

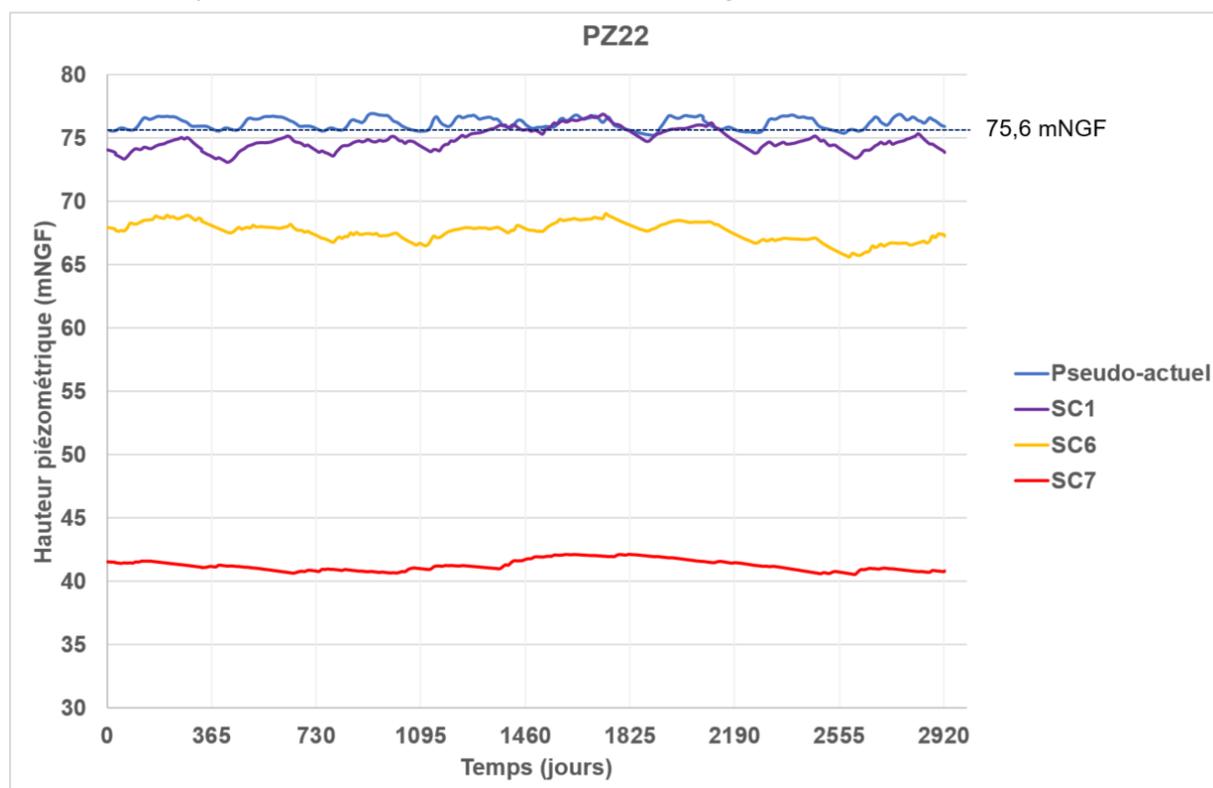
Figure 3-13 : Corrélation entre les apports des eaux souterraines à la zone humide Grand Brahis et la hauteur piézométrique mesurée au piézomètre PZ 22



Avec cette hypothèse de coupure des flux souterrains autour de 75,6 mNGF pour le PZ 22, il est possible d'estimer l'évolution de la zone humide avec les scénarios proposés dans le programme de recherche SINERGI.



Figure 3-14 : Hauteurs piézométriques mesurées dans la situation actuelle et évolution selon les scénarios SC1, SC6 et SC7 d'après les simulations réalisées dans le cadre de Sinergi sur la zone humide de Grand Brahis



On peut faire les observations suivantes :

- Le scénario SC1, basé sur une continuité des apports d'eau depuis la Durance et la seule modification des paramètres hydro-climatiques en 2050, montre que la valeur seuil sera fréquemment sous-passée (potentiellement plusieurs années de suite) et que l'on aura une alimentation par la nappe seulement les années les plus humides ;
- Les scénarios SC6 et SC7, qui cumulent modification des apports d'irrigation et aggravation des conditions climatiques, montrent un effondrement de la nappe qui se traduira par une absence totale d'apports d'eaux souterraines à la zone humide.

FLUX ENTRANTS ET SORTANTS

À partir des hypothèses retenues concernant les estimations de l'évolution hydro-climatique (détaillées dans l'annexe 3), des constats exposés précédemment et de l'évolution des apports d'irrigation, il est possible d'estimer les bilans suivants pour les scénarios SC1, SC6 et SC7 :

- Bilan sur l'ensemble de la période avec des données de flux disponibles : juin 2051 – avril 2052 ;
- Bilan mensuel ;
- Bilan d'un mois représentatif de la situation estivale : août 2051 ;
- Bilan d'un mois représentatif de la situation hivernale : mars 2052.

Seul le bilan mensuel pour chacun des trois scénarios est présenté ci-après. Les autres bilans sont présentés dans l'annexe 3.

Par ailleurs, il a été choisi de faire figurer l'évaporation et l'évapotranspiration qui auraient lieu si l'alimentation en eau était suffisante dans chacun des scénarios. Il est probable que ces termes soient en fait fortement réduits si l'engorgement global diminue.

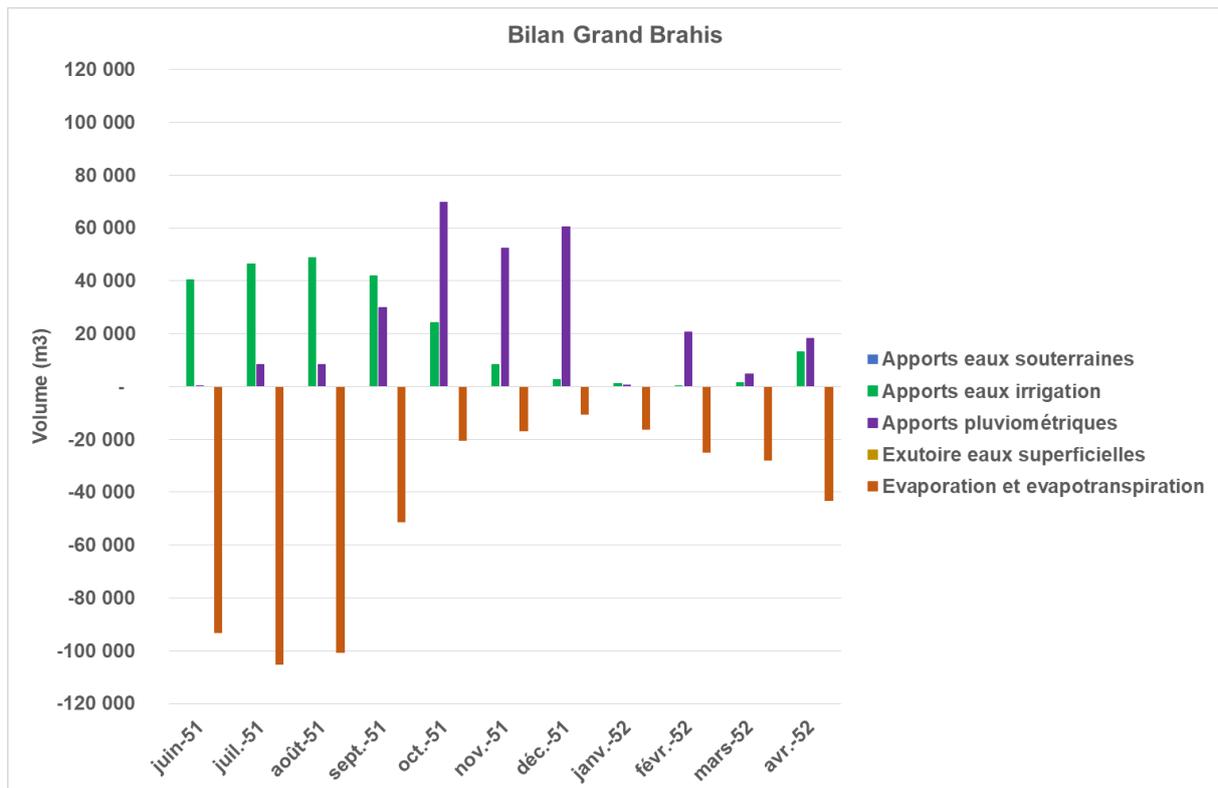


Scénario 1

Pour mémoire, le scénario SC1, montre que la valeur seuil pour les apports en eau souterraine (voir Figure 3-12) sera fréquemment sous-passée et que l'on aura une alimentation par la nappe seulement les années les plus humides. Dans ce cadre, les apports de la nappe sont considérés comme nuls pour la période choisie (juin 2051-avril 2052), tout comme les sorties d'eau à l'exutoire de la zone humide (pour mémoire, ces dernières étaient principalement dues aux apports de la nappe). Cette approximation est discutable à l'échelle mensuelle et dépendra du rapport ruissellement / infiltration et des capacités de stockage de la zone humide.

Les graphiques ci-dessous sont donc à lire avec ces limites en tête.

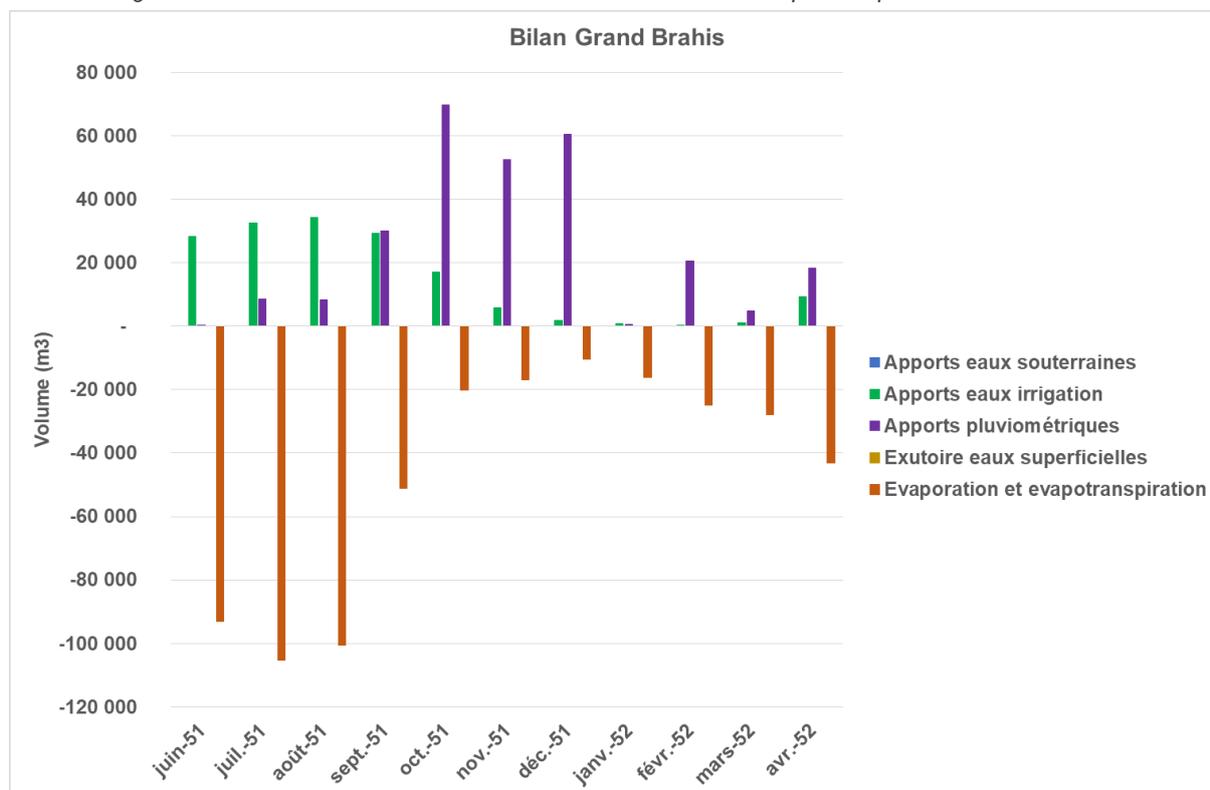
Figure 3-15 : Scénario 1 Grand Brahis. Bilan des flux mensuels – période juin 2051 – avril 2052





Scénario 6

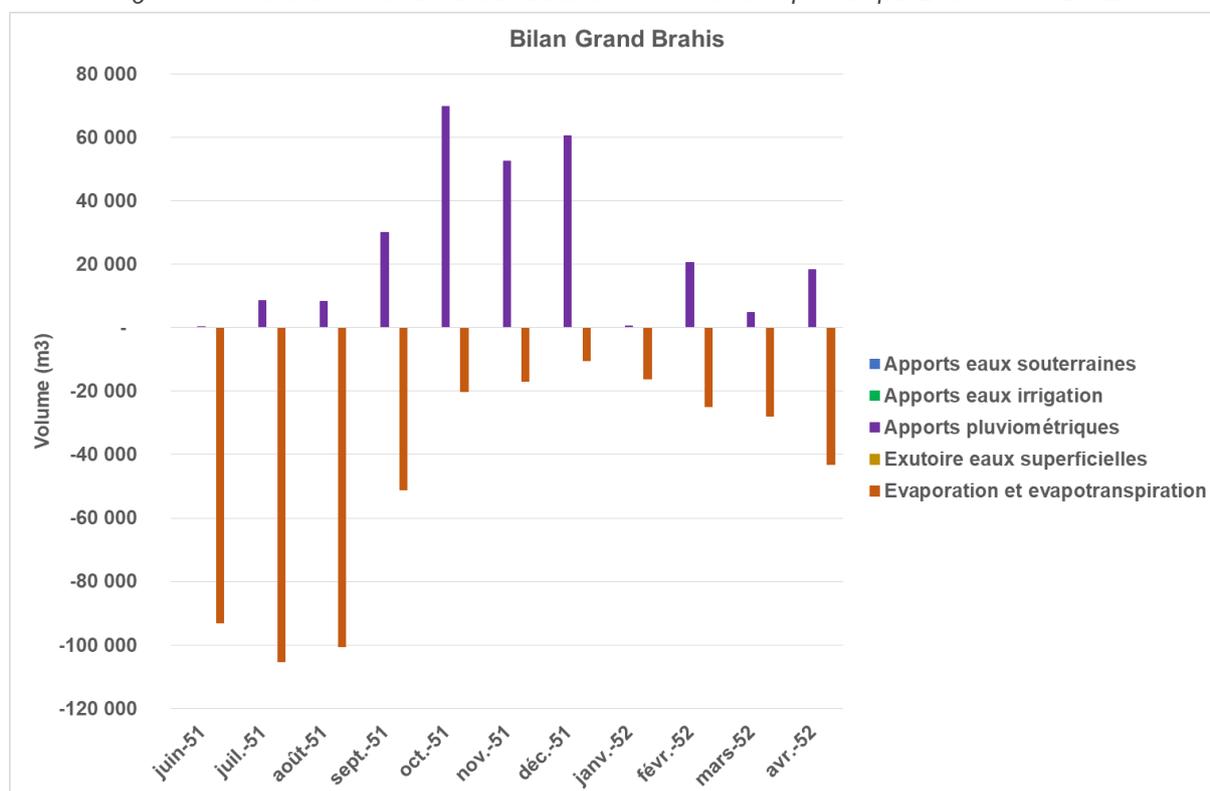
Figure 3-16 : Scénario 6 Grand Brahis. Bilan des flux mensuels – période juin 2051 – avril 2052



26

Scénario 7

Figure 3-17 : Scénario 7 Grand Brahis. Bilan des flux mensuels – période juin 2051 – avril 2052





IMPACT SUR LE FONCTIONNEMENT ET LES HABITATS

Les constats établis précédemment sont traduits en termes d'impacts sur le fonctionnement de la zone humide et sur la distribution des habitats et espèces végétales dans le tableau ci-dessous.

Tableau 3-1 : Évolution potentielle de Grand Brahis selon les différents scénarios retenus

SITUATION ACTUELLE	SCENARIO 1 (CHANGEMENT CLIMATIQUE)	SCENARIO 6 (CHANGEMENT CLIMATIQUE ET REDUCTION DE 30% DES APPORTS D'EAU D'IRRIGATION DEPUIS LA DURANCE)	SCENARIO 7 (CHANGEMENT CLIMATIQUE ET SUPPRESSION TOTALE DES APPORTS D'EAU D'IRRIGATION DEPUIS LA DURANCE)
<ul style="list-style-type: none"> - Ennoisement circonscrit et limité à la période estivale. Flux de l'irrigation très faibles. Surtout alimenté par la nappe. - TN-1 engorgé de manière quasi-permanente sur la quasi-totalité de la zone humide. - Absence d'espèces végétales inféodées aux eaux froides. 	<ul style="list-style-type: none"> - Légère baisse de la nappe mais suffit à réduire très fortement voire supprimer les flux souterrains vers la zone humide. - Substitution des zones engorgées en permanence à TN-1 par un engorgement temporaire. - Disparition de la cariçaie, fragmentation de la roselière, extension des scirpaies à Scirpe jonc. 	<ul style="list-style-type: none"> - La nappe baisse de 8 m environ. Coupure totale et permanente de l'alimentation de la zone humide par les eaux souterraines. - Maintien des apports d'irrigation et des précipitations - Assèchement total à terme. À court et moyen termes : extension des habitats boisés peupleraies blanches et noires au détriment des roselières et cariçaies. Les scirpaies pourraient se maintenir un peu. 	<ul style="list-style-type: none"> - La nappe baisse de 30 m environ. Coupure totale et permanente de l'alimentation de la zone humide par les eaux souterraines. - Assèchement total plus rapide que pour le scénario 6 en l'absence des apports de l'irrigation. Evolution des forêts de bois tendre (saulaies et peupleraies) vers des forêts à bois dur (frênaies et chênaies pubescentes). Possibilité d'infiltration des éléments xérophiles (pinèdes de Pin d'Alep, chênaies vertes, garrigues sclérophylles) par apport depuis les Alpilles.



3.2 BAUSSENQ

3.2.1 Contexte

La zone humide de Baussenq constitue une dépression d'un peu moins de 200 ha (située à une vingtaine de kilomètres de la prise dans la Durance).

Elle s'inscrit au sein d'un sillon humide orienté nord-est sud-ouest bordé par le Coussouls. L'épaisseur de sol est très réduite, notamment en bordure est où le poudingue affleure. Au cœur du marais, on trouve des horizons argilo-limoneux sous l'influence de remontées de nappe. Ces solums plus épais sont liés aux dépôts sédimentaires du quaternaire ainsi qu'aux modes de gestion voués au pâturage de parcelles irriguées par les bovins et les chevaux.

L'altitude moyenne est d'environ 20 mNGF. Le site présente une pente nord-est sud-ouest. À son extrémité amont, l'altitude s'élève à environ 25 mNGF, et présente une altitude d'environ 17 mNGF à son extrémité aval. Les bordures est et ouest se situent à environ 22 et 20 mNGF respectivement.

Le site est irrigué par submersion et gestion de martellières à partir des canaux qui suivent globalement l'axe du sillon. Il est pâturé par des taureaux et des chevaux dans le cadre d'une exploitation agricole familiale.

Au nord-ouest, le site est bordé par un terrain militaire.

Le site fait partie du site Natura 2000 Crau centrale – Crau sèche qui dispose d'un document d'objectif (DOCOB).

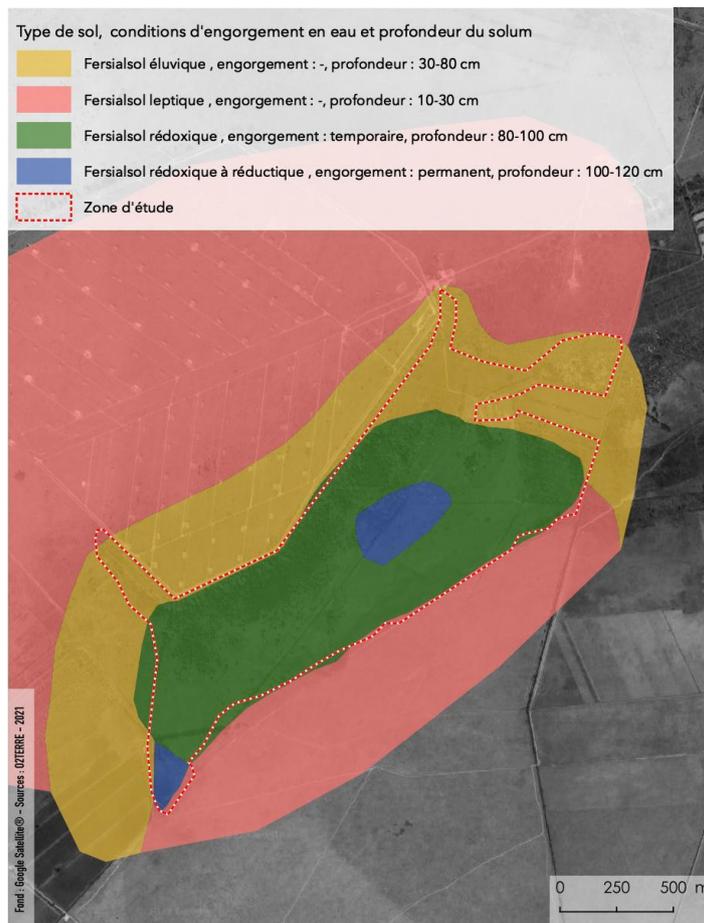
Figure 3-18 : Photo aérienne de la zone humide de Baussenq



Figure 3-19 : Profils topographiques de la zone humide de Baussenq



Figure 3-20 : Distribution tendancielle de la profondeur du sol sur la zone humide de Baussenq (extrapolation des sondages pédologiques réalisés dans le cadre d'Osmose 2)



NB : Attention, à l'extérieur de la zone humide, les contours sont extrapolés et potentiellement inexacts. Ils ont été dessinés ainsi pour faciliter la compréhension du fonctionnement de la zone humide. Les résultats précis des sondages pédologiques sont présentés en annexe.



3.2.2 Compréhension, hypothèses et questions formulées en début d'étude

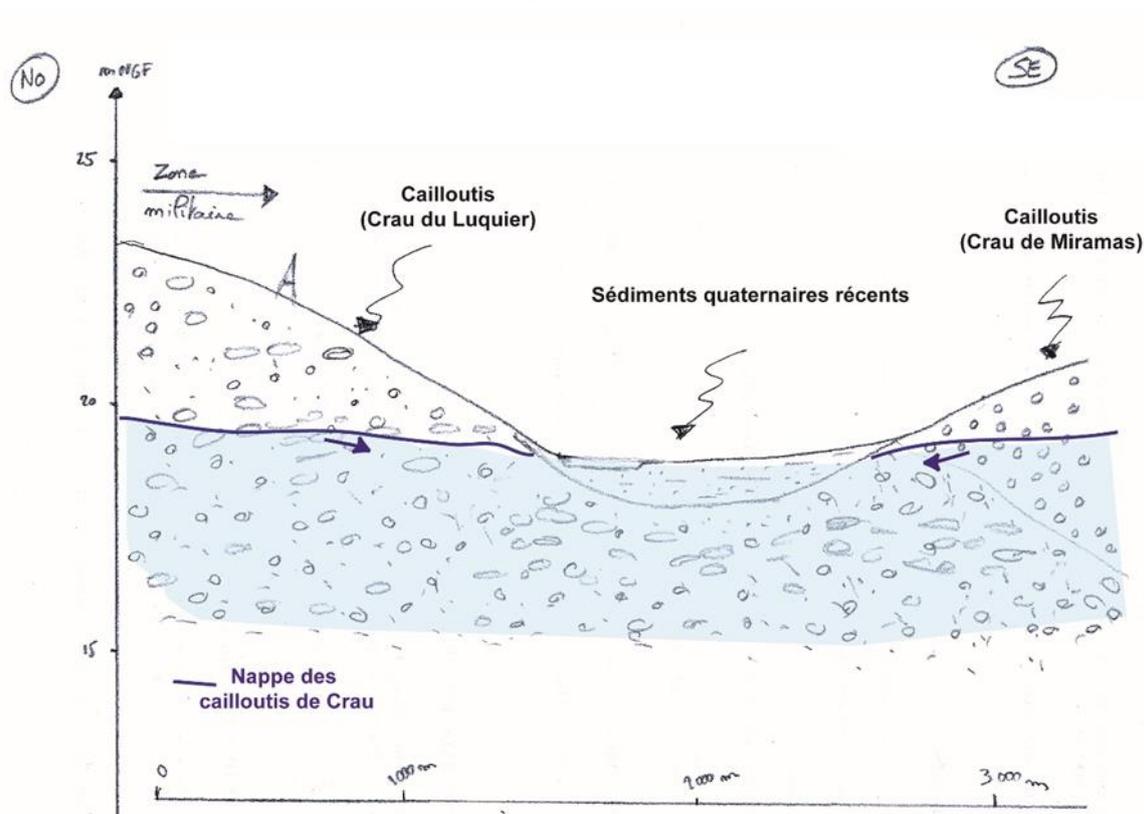
La zone humide repose sur les sédiments quaternaires qui viennent en recouvrement des cailloutis de Crau. Selon la carte géologique, il s'agit de « *limons fluviaux : ces sédiments colmatent les dépressions qui jalonnent les contacts entre les différentes nappes de cailloutis.* ».

En l'état des connaissances en début d'étude, on pose les hypothèses suivantes :

- la zone humide est alimentée préférentiellement par contact avec le toit de la nappe et via des résurgences au niveau des mares ;
- la présence d'eau en surface et le contact de la nappe avec le terrain naturel présente une forte variabilité spatiale et temporelle.

La part des apports et plus-value de l'irrigation locale pour l'alimentation de la zone humide sont interrogées.

Figure 3-21 : Schéma de la géologie de la zone humide de Baussenq



3.2.3 Fonctionnement actuel

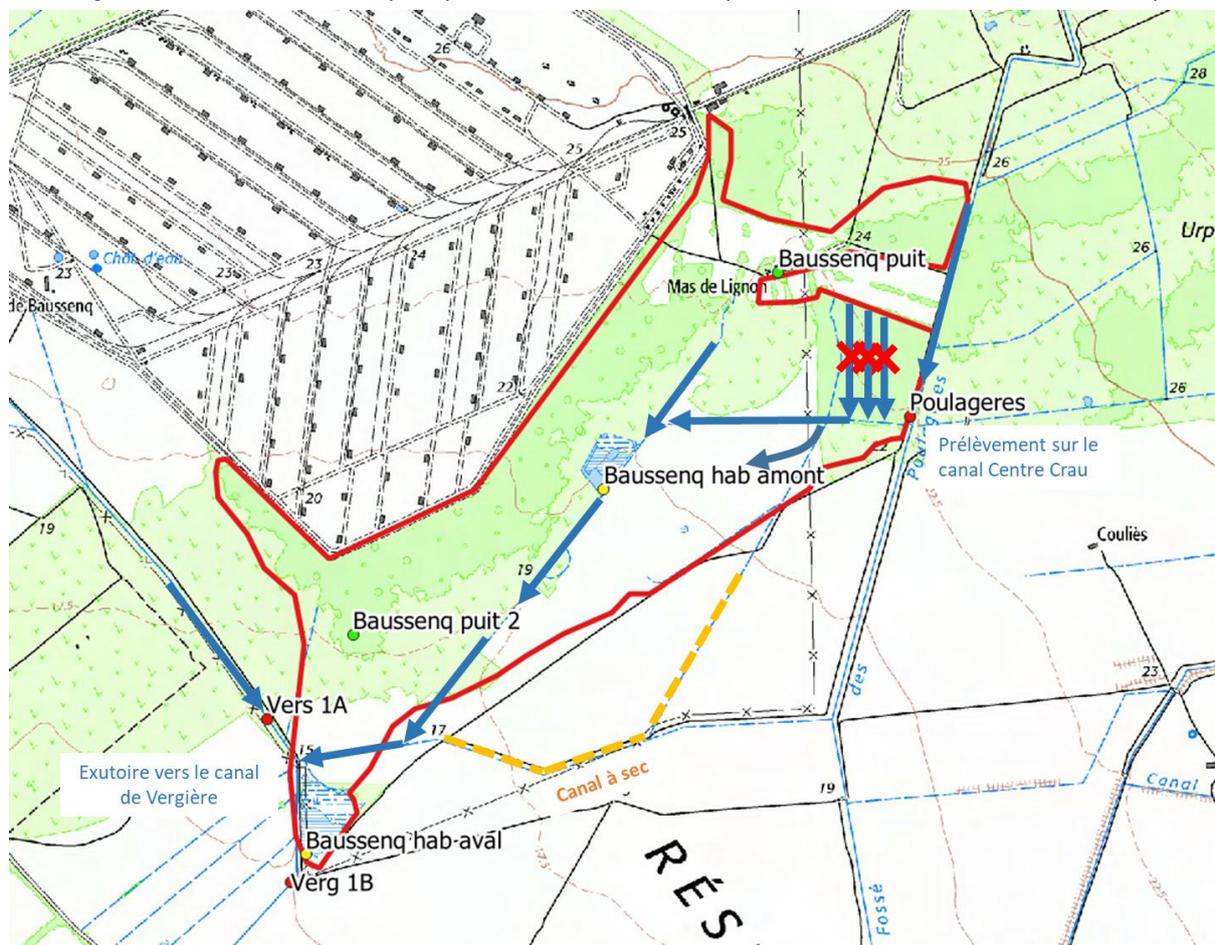
La zone humide de Bausseq présente un comportement particulier avec un mix d'alimentation 50/50 entre eaux superficielles et eaux souterraines en période estivale et 100% d'eaux souterraines en période hivernale. Cette observation doit être nuancée par une caractéristique spécifique à cette zone humide : sa forte pente qui interdit toute accumulation d'eau (les eaux passent, peut-être à l'exception de la partie ouest qui présente un horizon argileux), excepté en sortie de zone humide où les écoulements sont barrés (présence d'une martellière bloquant les écoulements vers le canal de Vergière). Soulignons que le niveau du toit de la nappe reste dans la zone TN-1 la quasi- intégralité du temps, ce qui conforte le rôle de la nappe dans l'alimentation de la zone humide.

Ces constats sont détaillés dans les paragraphes suivants.

FLUX D'EAU

Les principaux flux entrants d'eaux superficielles sont représentés dans la carte ci-après.

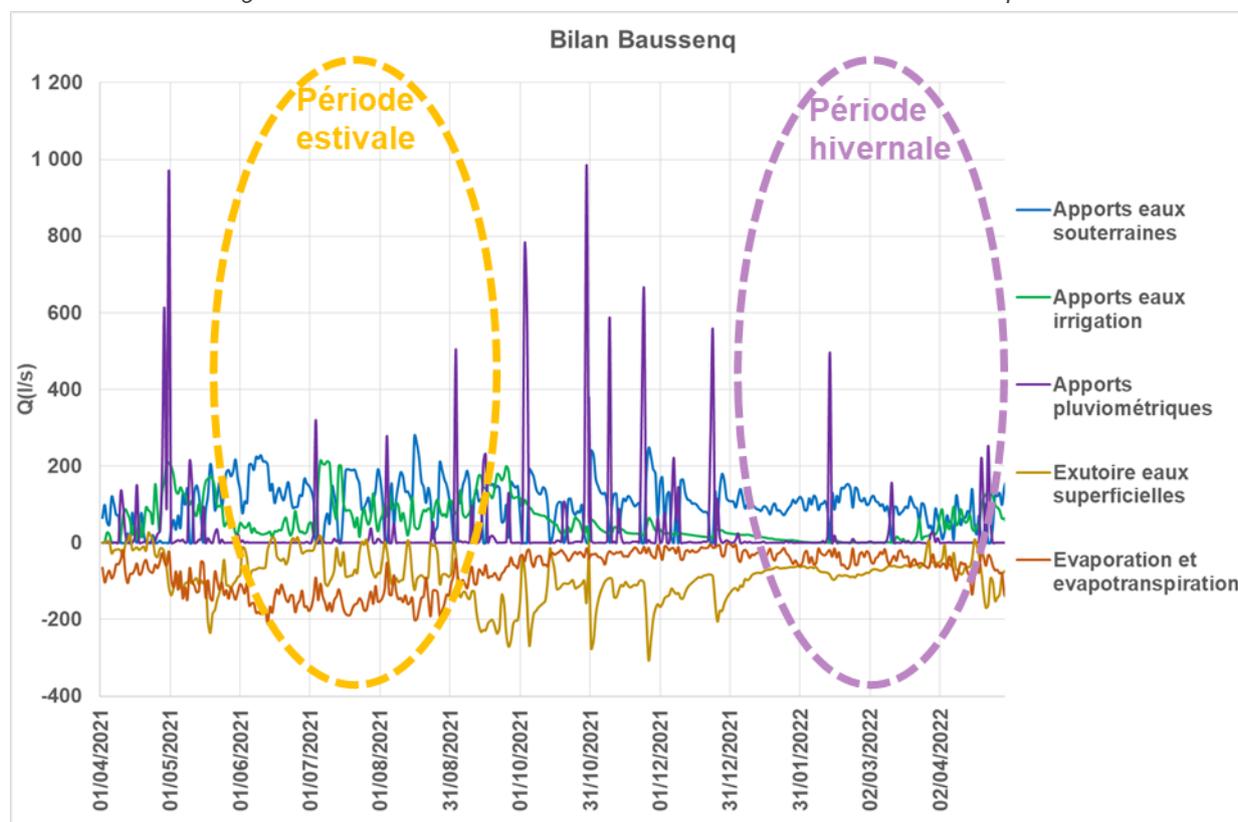
Figure 3-22 : Localisation des principaux flux entrants d'eau superficielle sur la zone humide de Bausseq





Les données collectées permettent d'obtenir la variation temporelle des flux entrants et sortant d'avril 2021 à avril 2022 (cf. graphique ci-dessous).

Figure 3-23 : Flux d'eau entrants et sortants sur la zone humide de Baussenq



Ce bilan permet de distinguer deux périodes :

- La période estivale (de mai à septembre) caractérisée par des apports d'eau par les canaux et une très forte évaporation/évapotranspiration ; le flux superficiel sortant est alors faible, voire nul certains jours. Durant cette période, on peut observer une très forte influence des usages anthropiques (irrigation superficielle, pompages en nappe, mais aussi possiblement une gestion de la martellière aval), qui » gênent » la bonne interprétation des flux mesurés ou déduits.
- La période hivernale, caractérisée par une absence d'entrées d'eaux superficielles et une forte baisse du couple évaporation/évapotranspiration. Les eaux souterraines semblent apporter un débit pseudo-constant à la zone.

A partir de ces données de flux, il est possible de proposer les bilans suivants :

- Bilan sur l'ensemble de la période avec des données de flux disponibles : avril 2021 – avril 2022 ;
- Bilan mensuel ;
- Bilan d'un mois représentatif de la situation estivale : août 2021 ;
- Bilan d'un mois représentatif de la situation hivernale : mars 2022.



Figure 3-24 : Bilan des flux sur la période avril 2021 - avril 2022

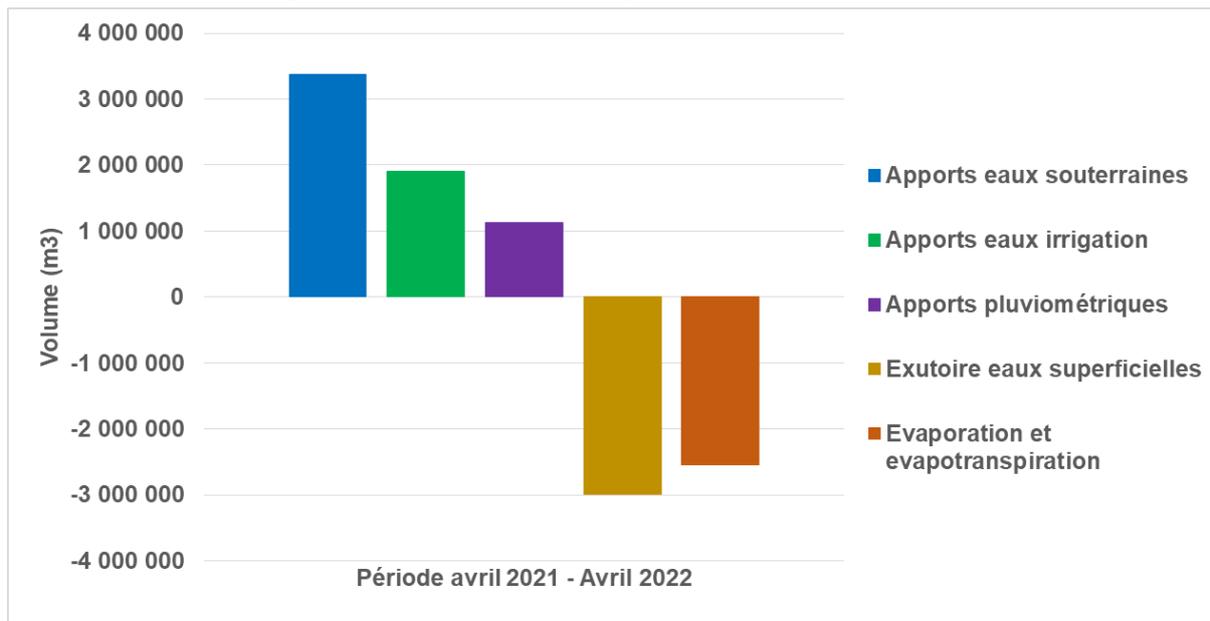


Figure 3-25 : Bilan des flux mensuels

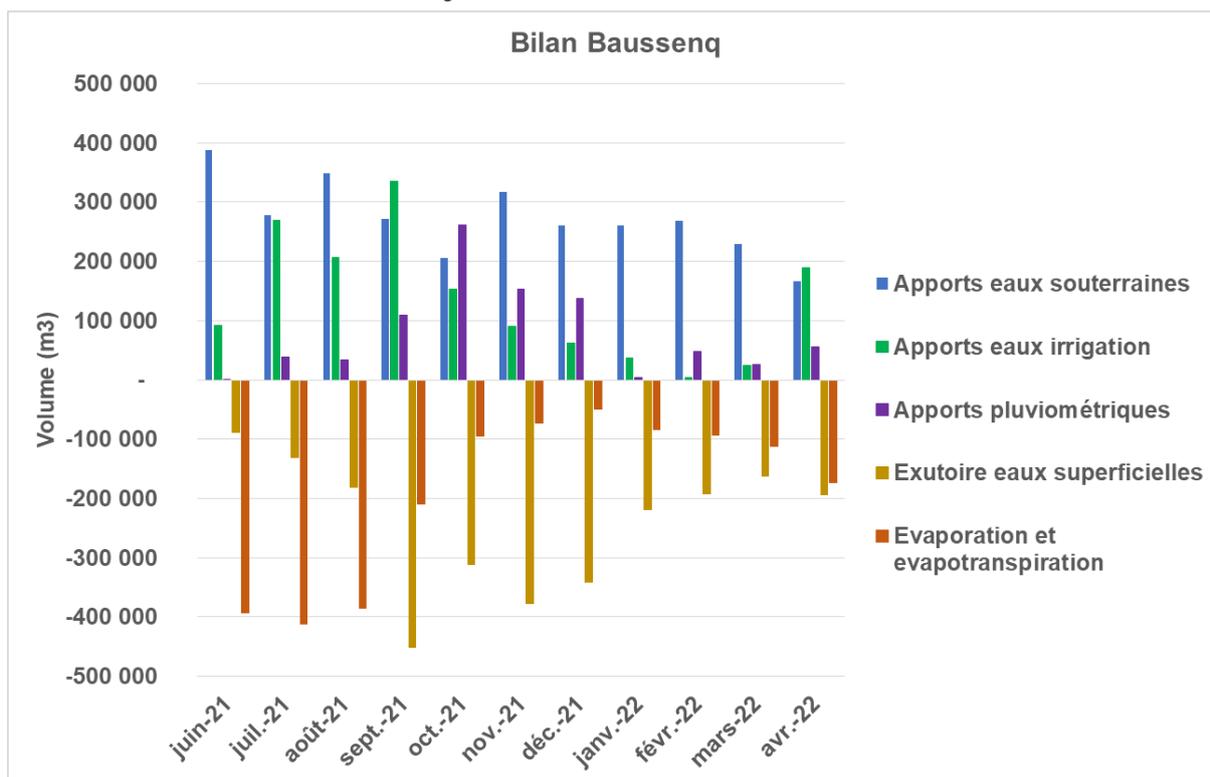




Figure 3-26 : Bilan des flux - Mars 2022

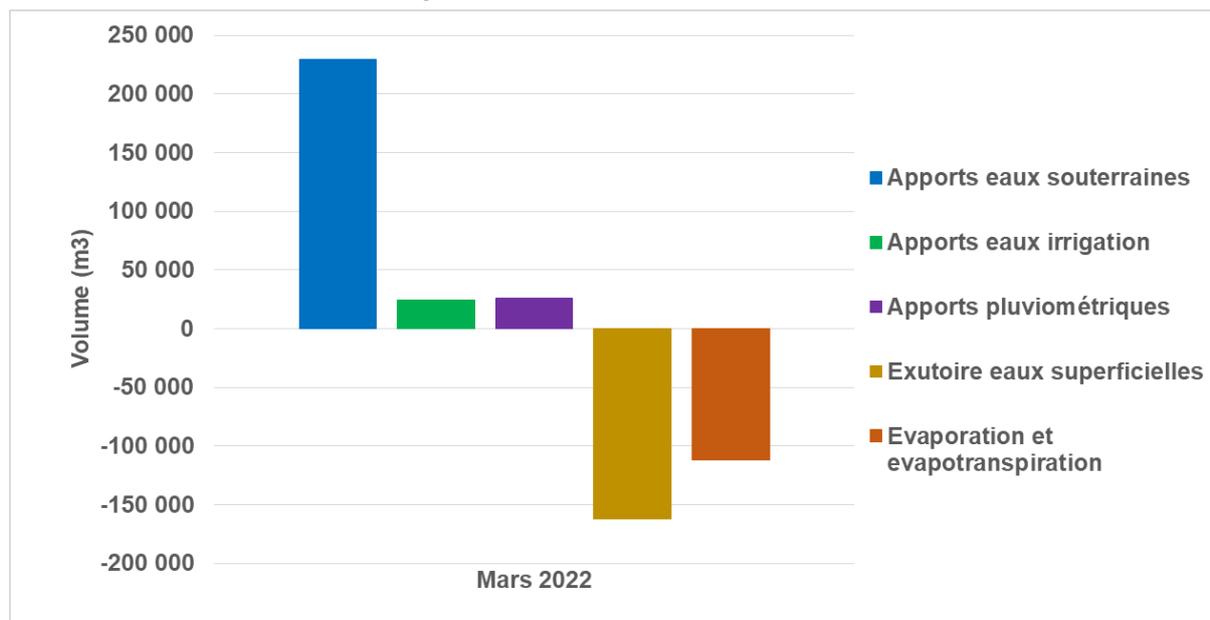
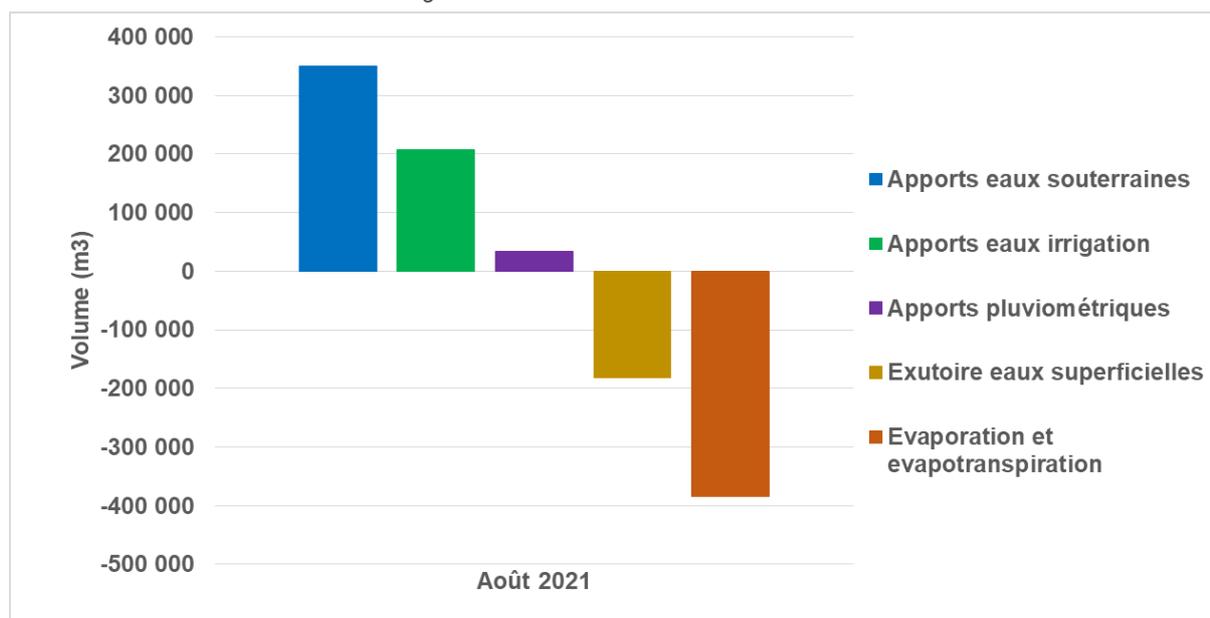


Figure 3-27 : Bilan des flux - Août 2021





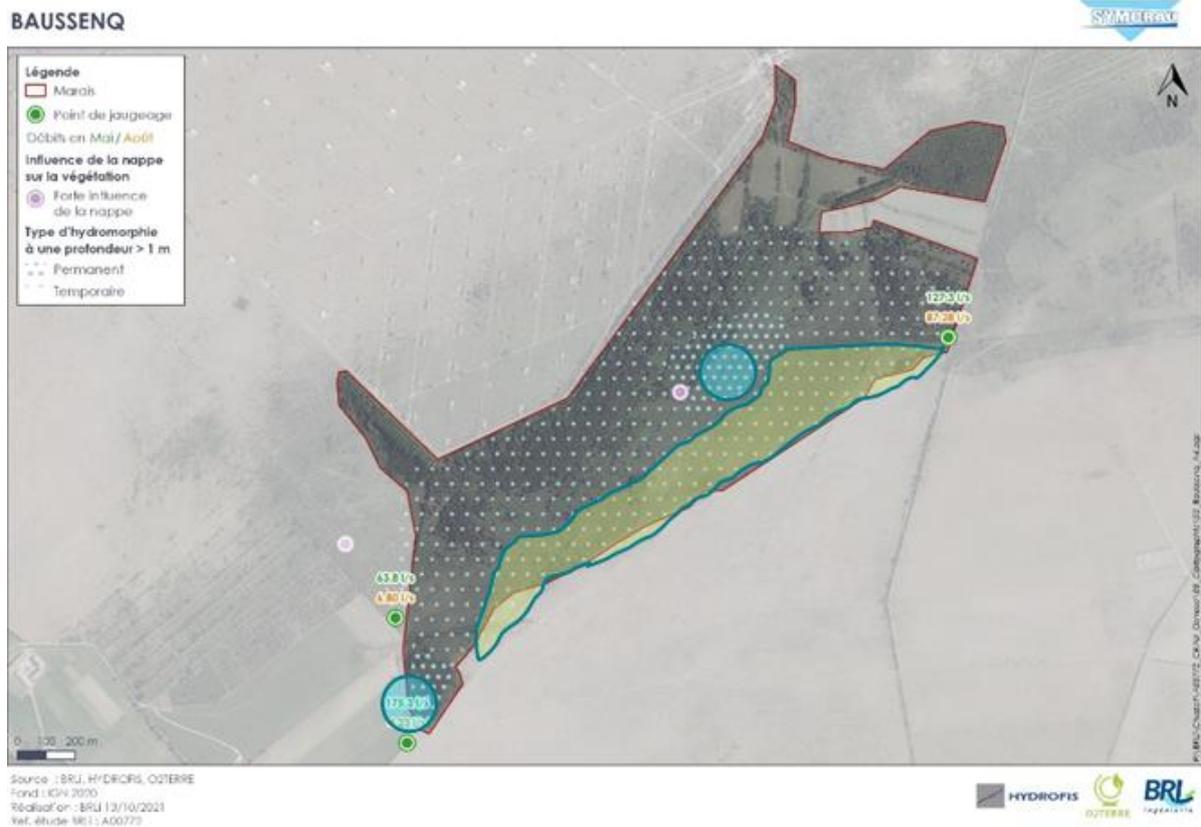
NIVEAUX D'EAU (ENNOIEMENT / ENGORGEMENT)

Ennoiement / croisement de la nappe avec le terrain naturel

L'enneiement permanent est très limité sur ce site. Seules les dépressions (centrale et aval) sont quasiment toute l'année, même sur des superficies très limitées.

La moitié sud-est du site est ennoyée de manière temporaire en période d'irrigation.

Figure 3-28 : Secteurs ennoyés de manière permanente et temporaire sur le site de Baussenq



En bleu : ennoiement quasi-permanent.

En vert clair : ennoiement temporaire.

La taille des cercles bleus est approximative et varie au cours de l'année.

L'alimentation de la mare aval correspond a priori à un mix d'eaux souterraines et d'eaux d'irrigation en été et reste alimentée en hiver par la nappe et les précipitations.

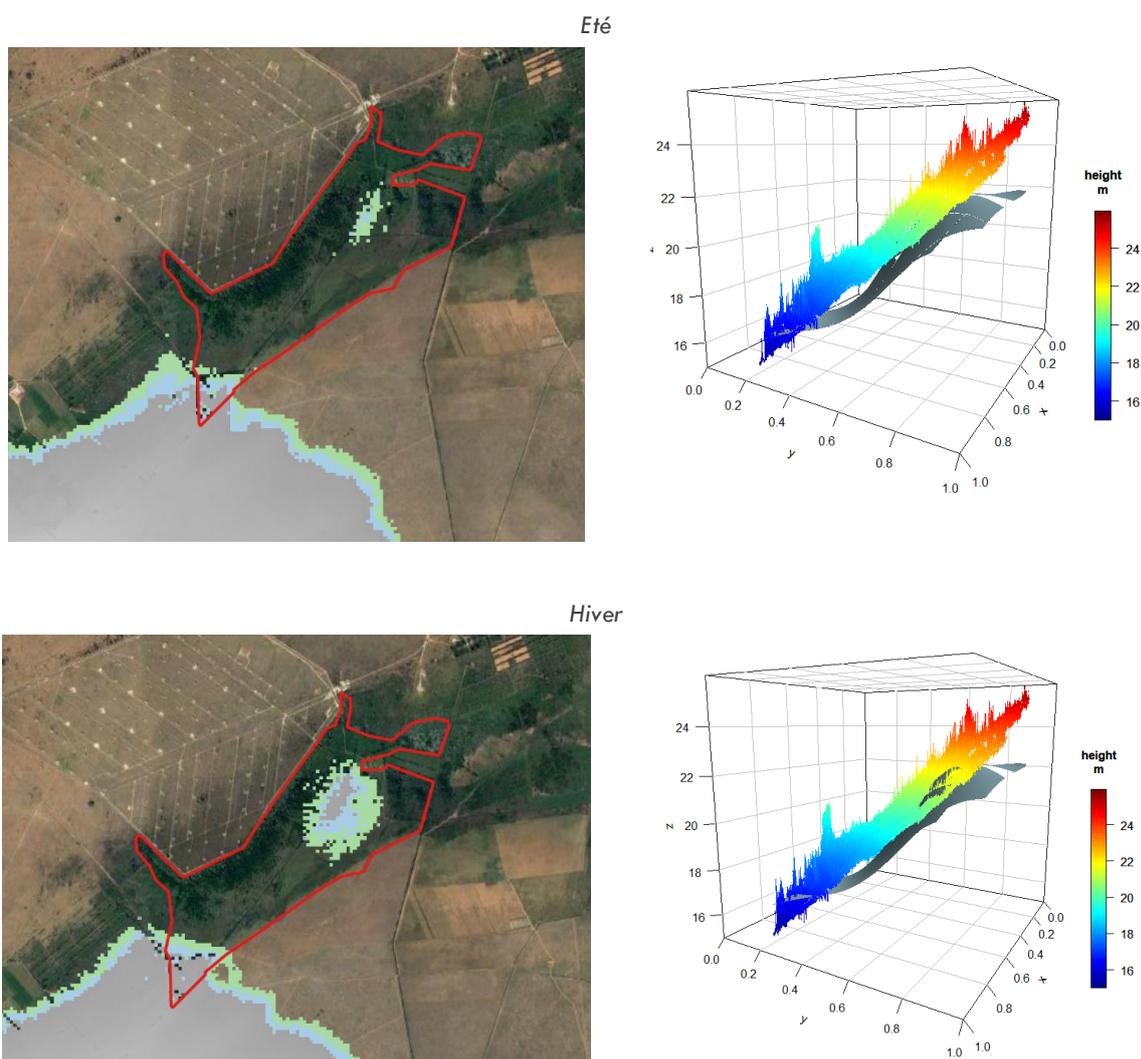
La dépression centrale semble surtout alimentée par les eaux d'irrigation en été et par la nappe et les précipitations en hiver.

Ces constats sont déduits du croisement de la piézométrie interpolée avec le terrain naturel, dont le résultat est présenté dans les figures suivantes.

En été, la nappe croise le terrain naturel sur environ 10% de la zone humide, contre environ 30 % en hiver.



Figure 3-29 : Croisement du terrain naturel (TN) avec la nappe des cailloutis de Crau sur le site de Bausseny



La Figure 3-30 page suivante illustre l'évolution de la hauteur de la nappe au niveau des sites Puits et Puits2 et au niveau du site habitat amont (mare centrale). Du mois d'octobre à mi-janvier, la hauteur d'eau dans le site habitat amont semble réagir de façon similaire à la variation du toit de la nappe. Le reste du temps, on ne décèle aucune similarité de comportement.

La Figure 3-31 présente la relation entre la hauteur d'eau observée dans le site habitat amont et la hauteur de la nappe au niveau du site Puits situé en amont. L'observation de ce graphique montre que :

- Lorsque la hauteur de la nappe au niveau du puits situé en amont est supérieure à 22,10 mNGF, il semble qu'elle contribue à alimenter le site habitat amont. Cependant, il est difficile d'établir une corrélation linéaire franche ;
- Lorsque la hauteur de la nappe au niveau du puits est inférieure à 22,10 mNGF, la nappe ne semble pas alimenter le site habitat amont. Pour autant, le site habitat amont peut présenter des hauteurs d'eau supérieures à 19,59 mNGF (la zone habitat est en eau). Ceci pourrait s'expliquer par une alimentation par des précipitations ou des apports depuis le canal d'irrigation ;
- La Figure 3-31 présente des données de hauteur d'eau au niveau de la zone habitat amont inférieures à 19,59 mNGF. Ces données sont douteuses car le zéro de la sonde se situe à l'altitude 19,59 mNGF, niveau du terrain naturel. Ces données peuvent s'expliquer par un défaut de fonctionnement de la sonde sans toutefois pouvoir le confirmer.



Figure 3-30 : Hauteur d'eau au niveau des sites Puits, Puits 2 et habitat amont

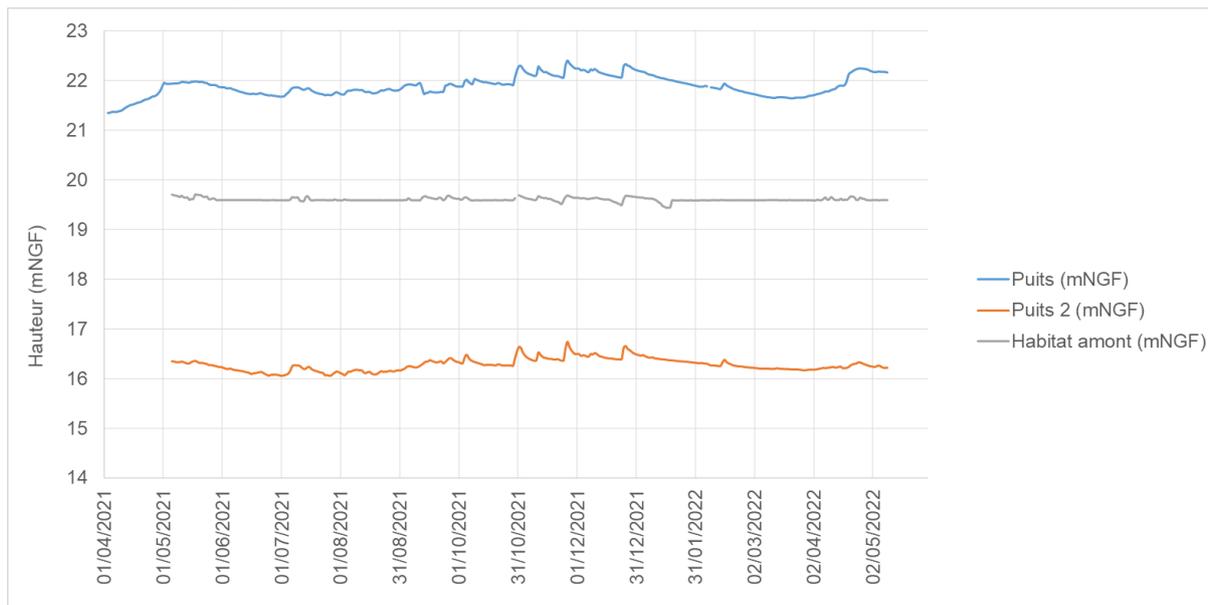
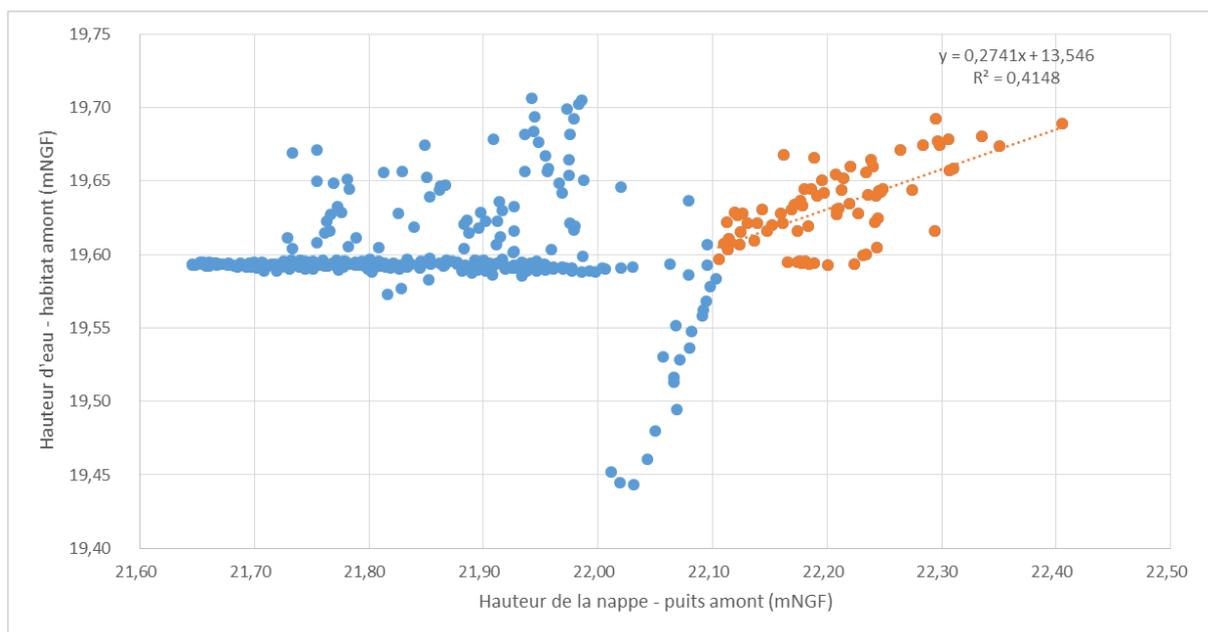


Figure 3-31 : Relation entre la hauteur de la nappe au niveau du site Puits et la hauteur d'eau dans la zone habitat amont



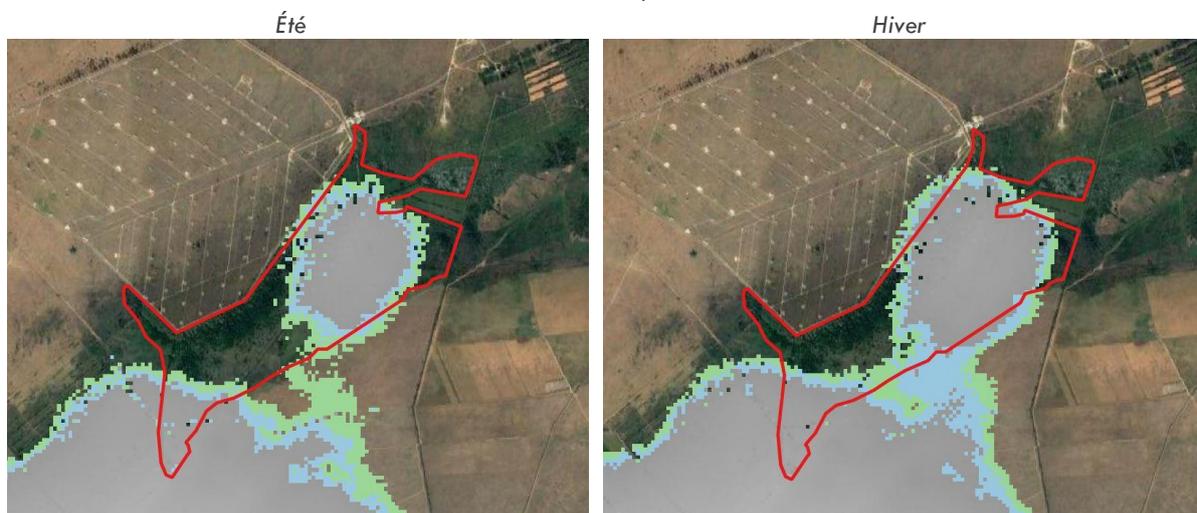
Concernant la zone habitat aval, l'absence de données en mNGF et de corrélation évidente entre les hauteurs d'eau observées à cet endroit et la nappe d'une part et le débit du canal d'autre part ne nous permet pas d'identifier le mode principal d'alimentation de cette zone. Ceci est d'autant plus vrai que l'exutoire du canal de Baussenq est régulé par la présence d'une martellière maintenue en position fermée la plupart du temps.



Situation au TN-1

En été, la nappe croise le terrain naturel – 1 mètre sur environ 50% de la zone humide, contre 75 % en hiver.

Figure 3-32 : Croisement du terrain naturel – 1 mètre (TN-1) avec la nappe des cailloutis de Crau sur le site de Baussenq

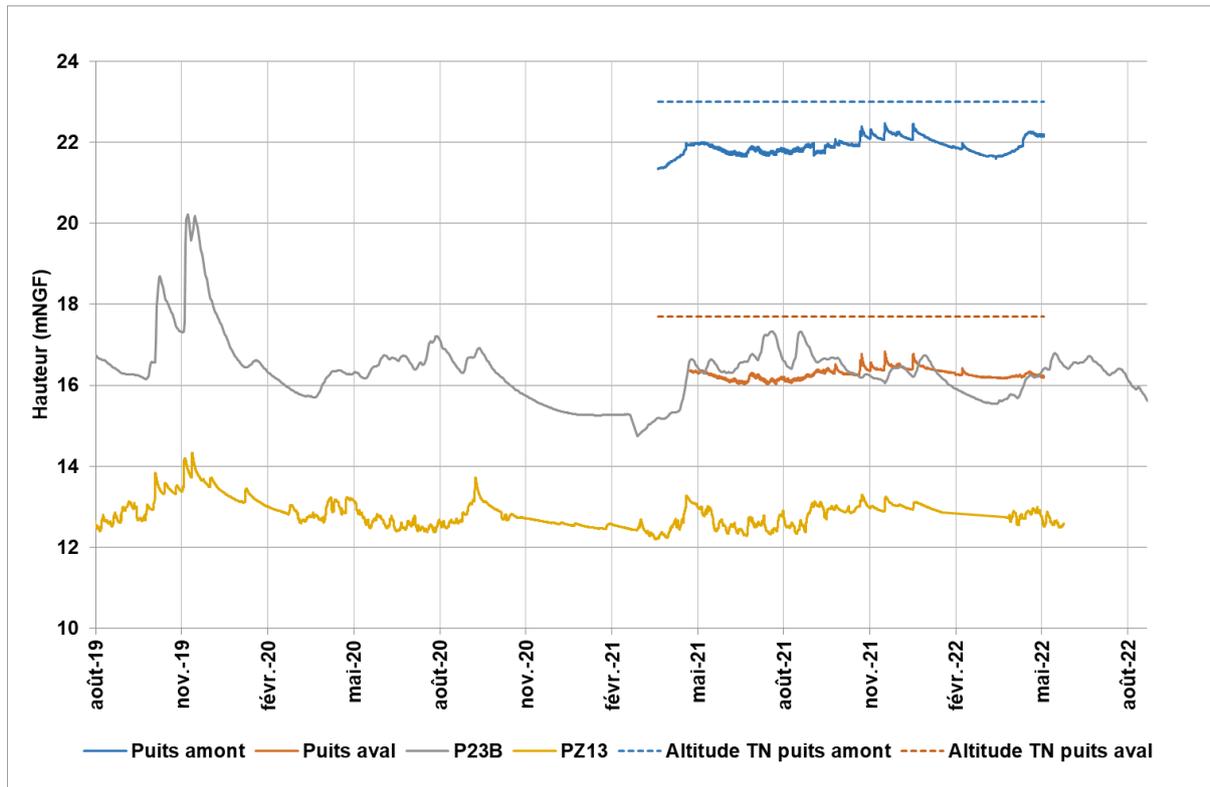


Les variations piézométriques enregistrées sur la période de mesure montrent des battements de nappe d'ordre métrique (faible amplitude). Cette faible variation des niveaux piézométriques est observée autant dans la zone humide (puits amont et aval, P23B) qu'à l'aval immédiat PZ13.

Le terrain naturel des sites « Puits amont » et « Puits aval » se situe à une altitude respective de 23 mNGF et 17,7 mNGF. On observe sur la figure suivante que le toit de la nappe varie dans une amplitude de 1 mètre par rapport au terrain naturel la plus grande partie de l'année.



Figure 3-33 : Variations piézométriques de la nappe au droit des piézomètres Puits amont, puits aval, P23B et PZ13



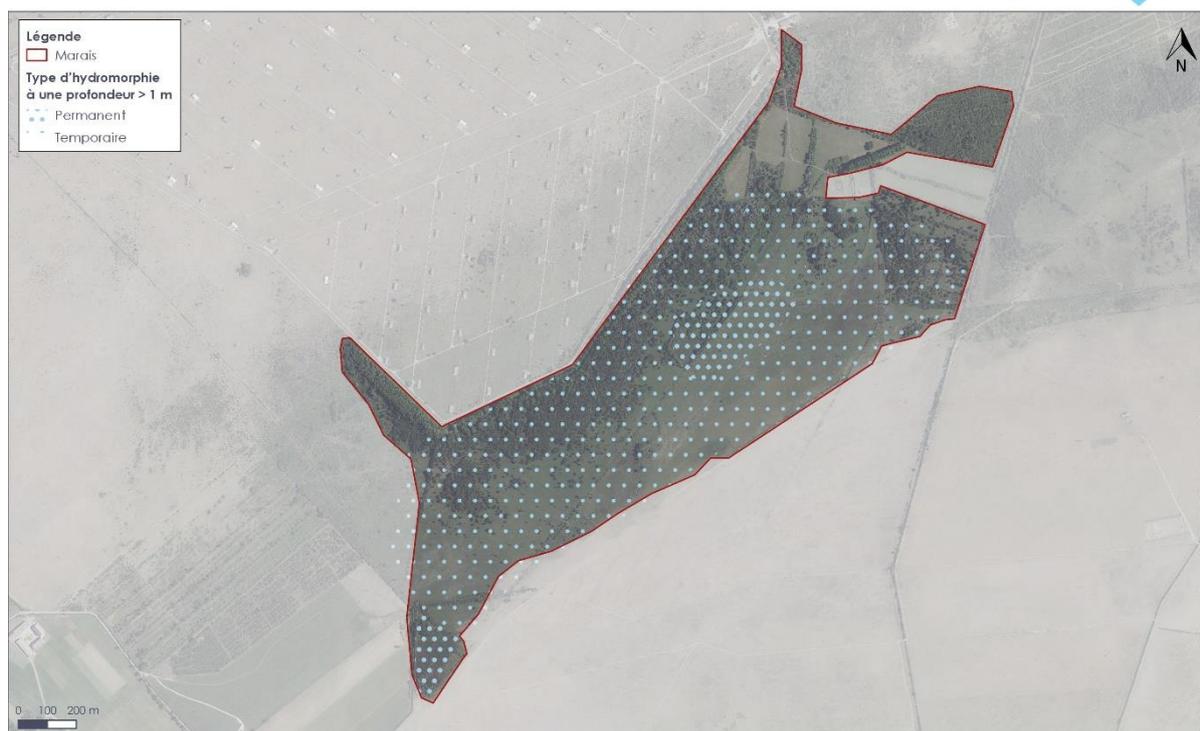
Ces observations sont cohérentes avec les sondages pédologiques. Au niveau des dépressions, les sols sont rattachés à des Fersialsols rédoxique à réductique. Ces sols sont les plus épais de la zone humide et présentent des signes d'engorgement permanent (traits réductiques avec des gleys) entre 100 et 120 cm. Au niveau des prairies méso-hygrophiles et des zones boisées hygrophiles dominées par les Peupliers et les Frênes, les sols sont rattachés à des Fersialsols rédoxiques présentant des signes d'engorgement temporaire (traits rédoxiques liés à des processus d'oxydation des éléments ferriques du sol).



Figure 3-34 : Superficie concernée par un engorgement quasi-permanent à TN-1 d'après les sondages pédologiques

BAUSSENQ

SYMCRAT

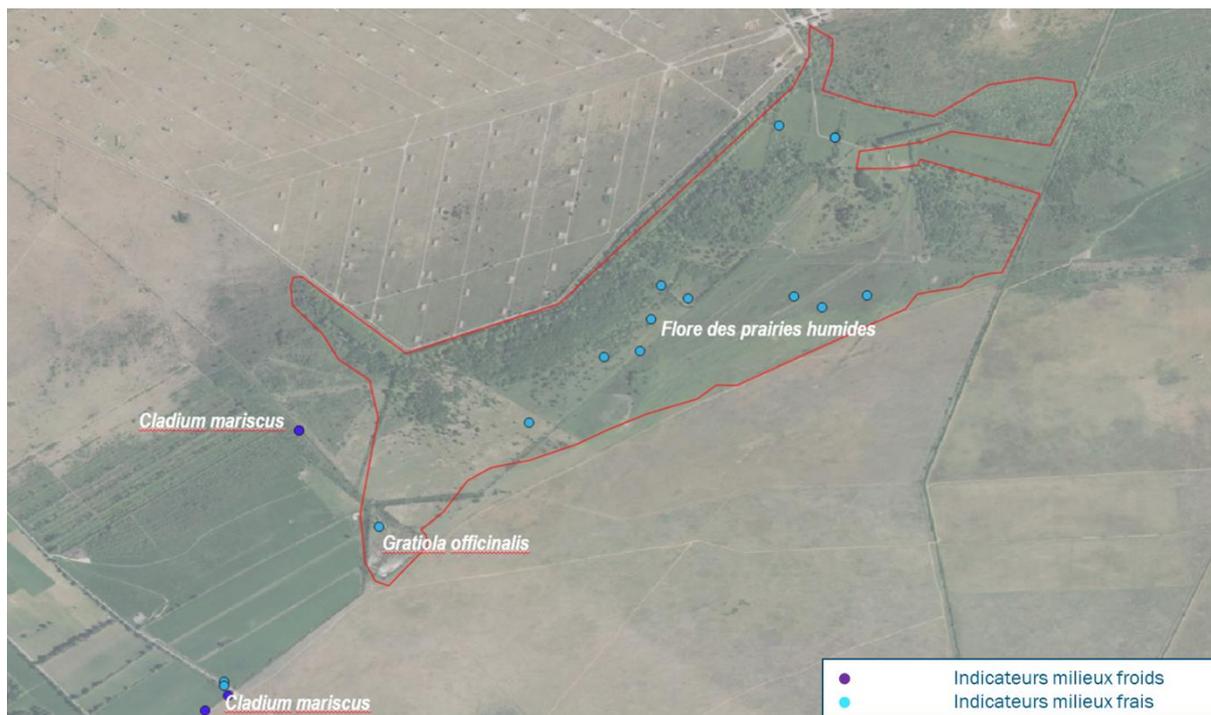


INDICATEURS FLORE ET HABITATS

La végétation de la zone humide présente un contraste marqué entre les habitats herbeux et les boisements. Les prairies humides méditerranéennes se développent sur des sols humides en hiver et au printemps. Elles bénéficient par ailleurs des apports d'eau d'irrigation durant l'été. Les espèces caractéristiques des prairies humides de Crau comme la Molinie bleuâtre, l'Orchis des marais ou l'Œnanthe de Lachenal côtoient des herbiers hygrophiles de Paspale distique, espèce exotique envahissante qui profite de l'apport d'eau estival. Les milieux les plus humides se cantonnent à la zone centrale de la dépression, où se développent des mégaphorbiaies opulentes et quelques circulations d'eau affleurantes. Sans indiquer des milieux froids, la présence du Myosotis cespiteux, de la Gratiolle ou la Baldellie fausse renoncule indiquent une ambiance fraîche, particulièrement remarquable dans le contexte très aride des coussouls de Crau. À l'extrémité de la zone humide, l'accumulation des eaux d'irrigation après ruissellement s'accompagne d'un plan, d'eau quasi-permanent où se développent des herbiers de Renoncule scélérate et Poivre d'eau. Les seuls marqueurs de milieux froids liés à la proximité directe de la nappe se situent en marge du site, au niveau du canal de Vergière, où se maintiennent plusieurs stations de Marisque.

La végétation du site est par ailleurs fortement influencée par l'activité pastorale, qui contient le développement des espèces ligneuses. Lorsque la pression de pâturage est insuffisante, les Scirpaies à Scirpe jonc puis les bois à Frêne et Orme colonisent rapidement les prairies. Les secteurs non pâturés accueillent des ripisylves à Peuplier blanc localement substituées par des plantations de Platane en bordure du terrain militaire.

Figure 3-35 : Répartition des indicateurs de milieux froids et frais sur la zone humide de Baussenq



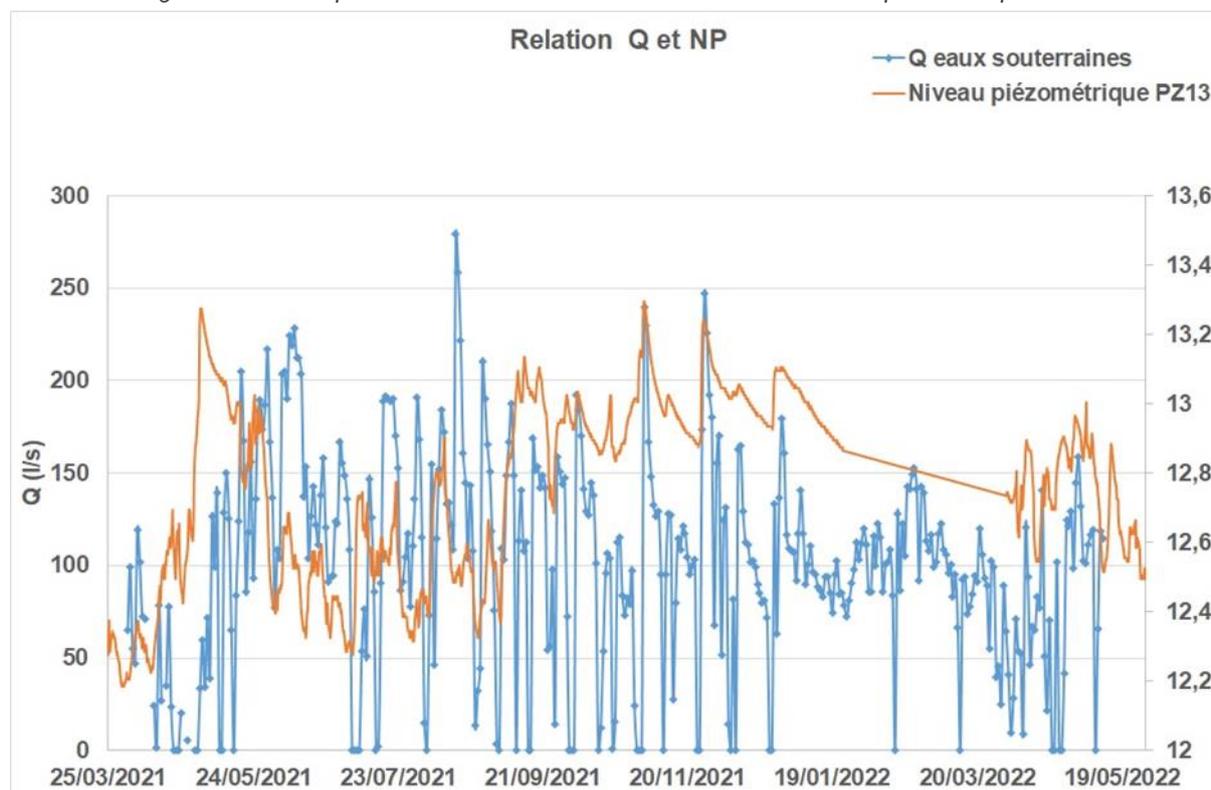


3.2.4 Évolution future

PIEZOMETRIE

La chronique journalière du débit estimé d'alimentation de la zone humide (issue du bilan des flux à l'échelle de la zone humide) comparée à celle du piézomètre de référence (PZ13) est difficile à interpréter.

Figure 3-36 : Comparaison du débit des eaux souterraines et du niveau piézométrique PZ13



On peut proposer les observations suivantes :

- Dans le détail, il est difficile d'établir une relation univoque entre niveau de nappe mesuré et débit estimé des résurgences d'eaux souterraines ; les mesures sont très influencées par les usages anthropiques, en particulier en période estivale.
- De mars à mai 2021, on observe d'abord un déphasage de quinze jours entre variations piézométriques et augmentation du débit.
- Puis, en période estivale de juin à fin septembre, les correspondances sont plus évidentes et sans déphasage ; on peut alors observer que le sous-passement de la cote de 12,4 mNGF, causé probablement par des pompages agricoles se traduit alors quasi systématiquement par un tarissement des alimentations par la nappe de la zone humide.
- D'octobre 2021 à début janvier 2022, la nappe est alors en position haute et on observe des arrêts de l'alimentation de la zone humide qui peuvent s'étaler sur plusieurs jours consécutifs ; de janvier à fin mars 2022, on observe moins ce phénomène. Ces observations interpellent : elles pourraient être expliquées par une intervention non connue à ce jour sur le système hydraulique (ouverture de la vanne de rétention du « plan d'eau » artificiel en aval de la zone humide ? la même explication pourrait expliquer le décalage en début d'été avec un remplissage de cette retenue). C'est la permanence du flux d'eaux souterraines en période automnale et hivernale qui explique l'augmentation des flux d'eaux superficielles en sortie de zone humide.

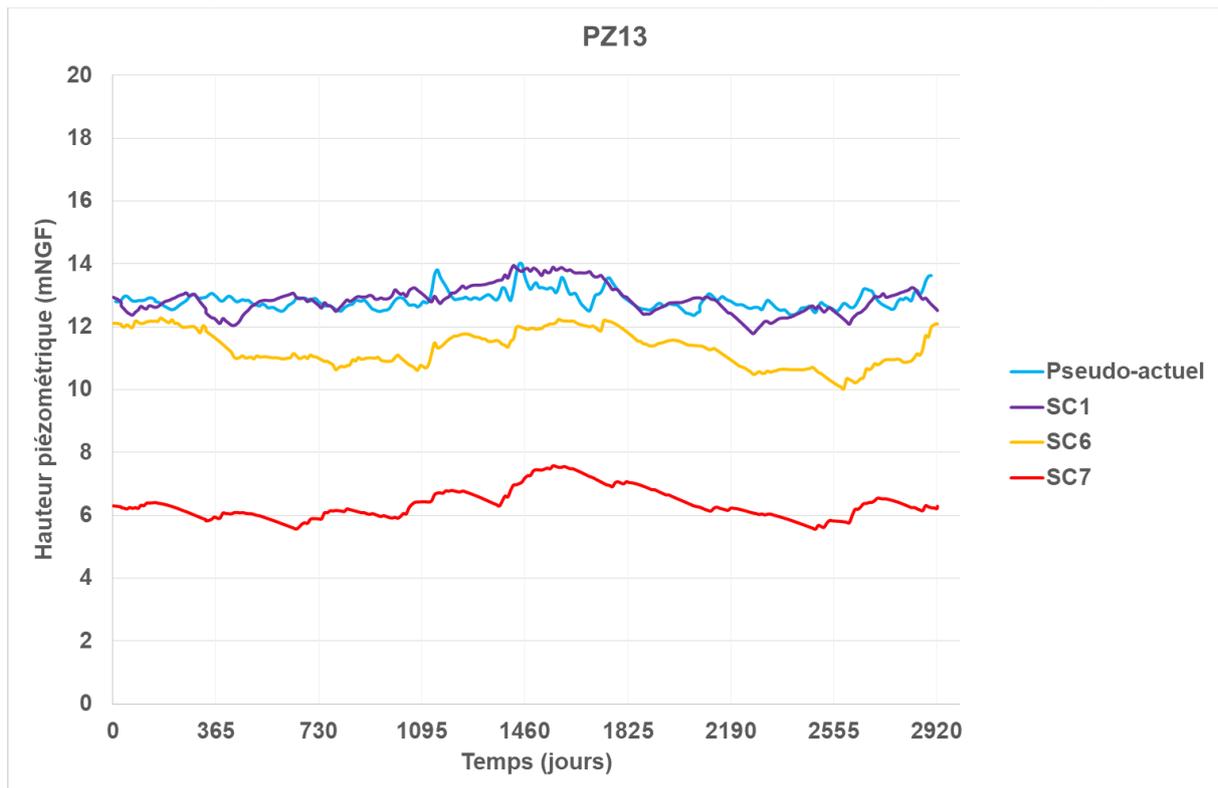


Au vu de ces observations, il n'est pas possible de déduire formellement une cote seuil justifiée pour l'arrêt d'alimentation de la zone humide par les eaux souterraines. On peut toutefois observer malgré les perturbations anthropiques la très grande sensibilité des débits d'alimentation aux variations de nappe. Au vu des valeurs basses de débit observées sur la chronique sous 12,4 mNGF, il est cependant probable que des baisses de piézométrie sous 12 mNGF pour le piézomètre de référence PZ13 se traduisent par un arrêt de ces alimentations. Ceci semble confirmé par l'observation de la Figure 3-33. En effet, lorsque la hauteur de la nappe au niveau du piézomètre PZ13 se rapproche de 12 mNGF (mois de juin, juillet et août 2021), le niveau de la nappe au niveau des sites Puits et Puits2 se rapproche du TN-1.

Ces constats ainsi que les chroniques piézométriques simulées dans le cadre du projet de recherche SINERGI permettent de proposer les observations suivantes quant à l'évolution possible des flux d'eau souterraine alimentant la zone humide :

- Le scénario SC1 ne se traduit pas par des variations significatives du niveau de la nappe dans ce secteur de l'aquifère ; les dynamiques d'alimentation de la ZH par les eaux souterraines seront peu altérées.
- Les scénarios SC6 et SC7 se traduisent par des baisses de niveau de nappe sous 12 mNGF sur le piézomètre de référence. Il est possible et probable que cela entraîne la disparition du flux d'alimentation de la ZH par les eaux souterraines.

Figure 3-37 : Hauteurs piézométriques mesurées dans la situation actuelle et évolution selon les scénarios SC1, SC6 et SC7 d'après les simulations réalisées dans le cadre de SINERGI sur la zone humide de Baussenq

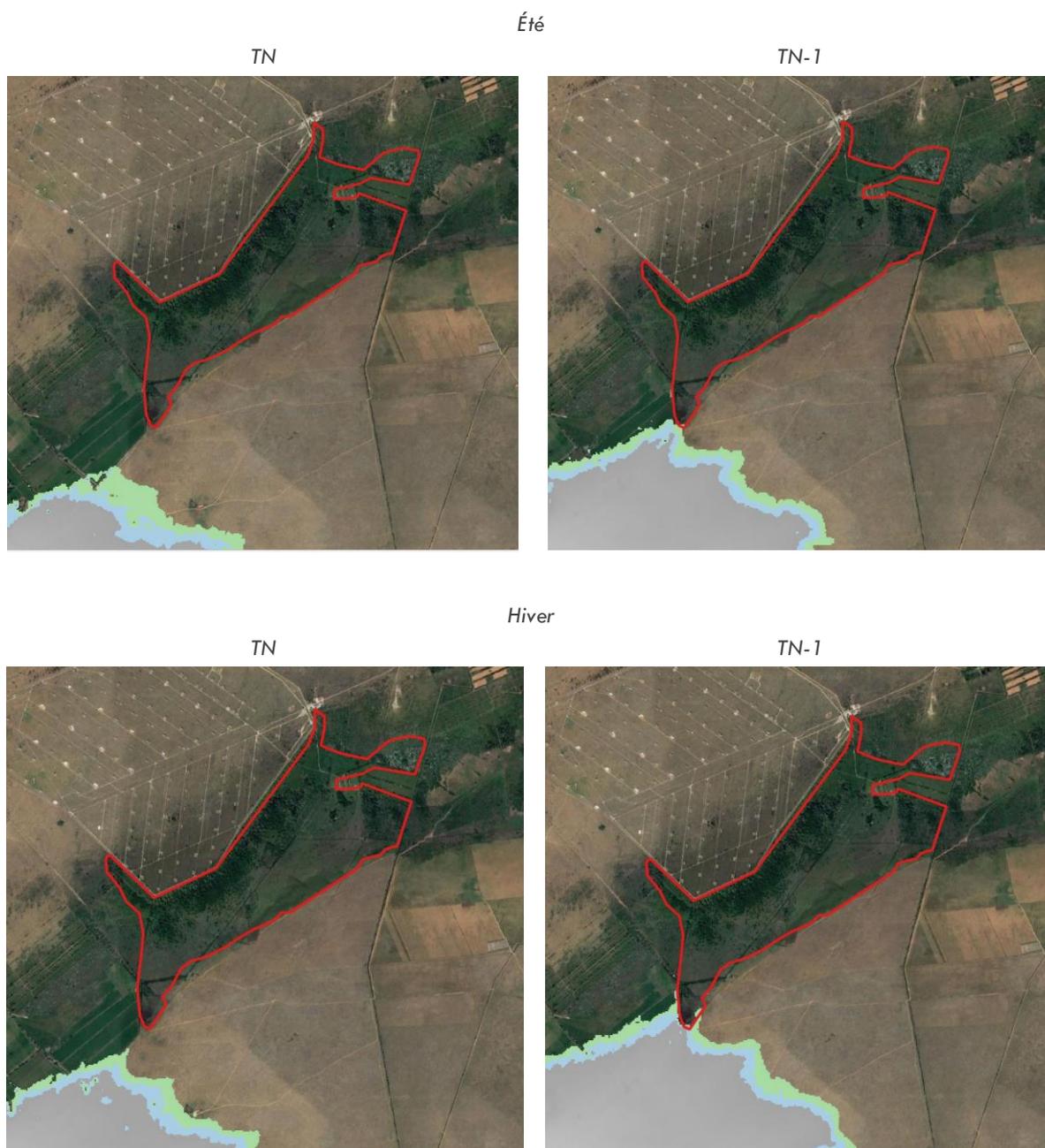


Les croisements du TN et du TN-1 avec la piézométrie actuelle interpolée à l'aide des piézomètres situées dans et autour de la zone humide, à laquelle sont soustrait 2 mètres pour représenter la situation du scénario 6 sont présentés dans les figures ci-dessous.

Dans le scénario 6, la nappe ne croise plus le TN ni le TN-1 quelle que soit la période de l'année.



Figure 3-38 : Croisement du terrain naturel (TN) et du terrain naturel moins 1 mètre (TN-1) avec la nappe des cailloutis de Crau sur le site de Bausseuq pour le scénario 7





À partir des hypothèses retenues concernant les estimations de l'évolution hydro-climatique (détaillées dans l'annexe 3), des constats exposés précédemment et de l'évolution des apports d'irrigation, il est possible d'estimer les bilans suivants pour les scénarios SC1, SC6 et SC7 :

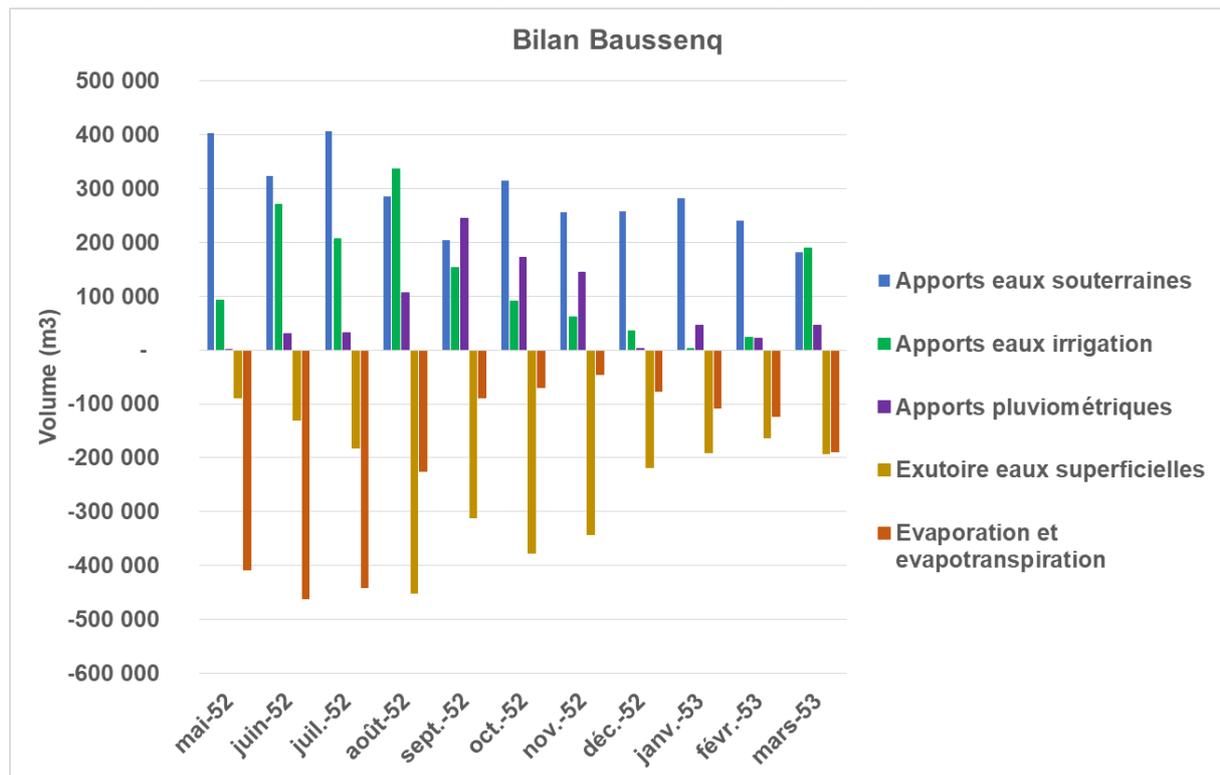
- Bilan sur l'ensemble de la période avec des données de flux disponibles : juin 2051 – avril 2052 ;
- Bilan mensuel ;
- Bilan d'un mois représentatif de la situation estivale : août 2051 ;
- Bilan d'un mois représentatif de la situation hivernale : mars 2052.

Seul le bilan mensuel pour chacun des trois scénarios est présenté ci-après. Les autres bilans sont présentés dans l'annexe 3.

Scénario 1

Le scénario SC1 ne se traduit pas par des variations significatives du niveau de la nappe dans ce secteur de l'aquifère ; les dynamiques d'alimentation de la zone humide par les eaux souterraines seront peu altérées. Les bilans présentés ci-après sont donc très proches de ceux présentés pour la situation actuelle.

Figure 3-39 : Scénario 1 – Baussenq. Bilan des flux mensuels – période juin 2051 – avril 2052





Scénario 6

Le scénario SC6 se traduit par :

- Des baisses de niveau de nappe sous 12 mNGF sur le piézomètre de référence ;
- Une diminution de 30% des apports d'irrigation.

Dans ce scénario, il est possible et probable que la baisse du niveau de la nappe entraîne la disparition du flux d'alimentation de la zone humide par les eaux souterraines.

Sur les figures suivantes, le terme « évaporation et évapotranspiration » a été indiqué en tenant compte des effets potentiels du changement climatique. Toutefois, la nappe ne contribuant plus à l'alimentation de la zone humide et les apports d'irrigation diminuant de 30%, il est probable que :

- L'évaporation à la surface de l'eau et l'évapotranspiration diminue également, le niveau de la nappe étant situé en dessous du TN-1 avec les impacts associés sur la végétation.
- La zone habitat amont et probablement la zone habitat aval ne seraient plus alimentées par les apports de la nappe, ce qui impacterait l'évaporation au niveau des surfaces en eau.

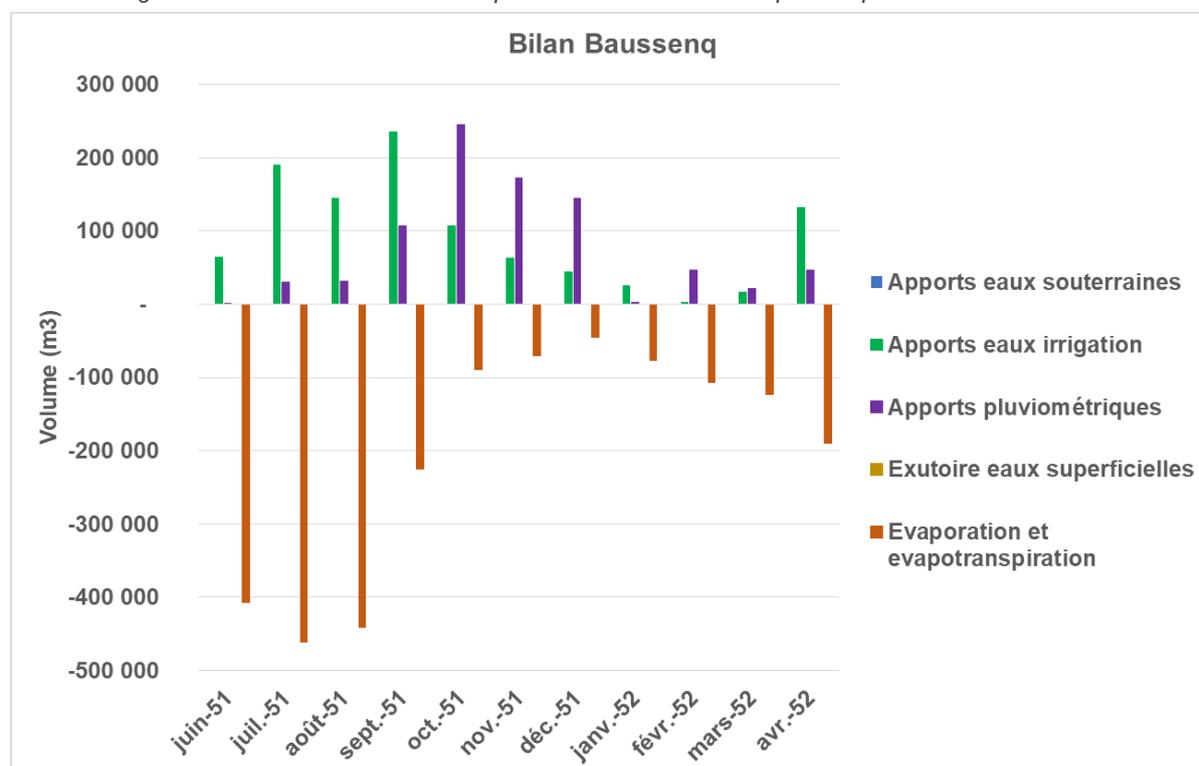
Le terme « exutoire eaux superficielles » est compliqué à estimer en raison :

- du rôle combiné de la nappe et des eaux superficielles dans l'alimentation actuelle de la zone humide ;
- du caractère inconnu du rapport ruissellement / infiltration en cas de nappe sous le TN-1 et des capacités de stockage de la zone humide.

Il a donc été choisi de ne pas le représenter, même s'il peut s'avérer non nul.

Les graphiques ci-dessous sont donc à lire avec ces limites en tête.

Figure 3-40 : Scénario 6 – Baussenq. Bilan des flux mensuels – période juin 2051 – avril 2052





Scénario 7

Le scénario SC7 se traduit par :

- Une baisse du niveau de nappe sous 12 mNGF sur le piézomètre de référence (PZ13) ;
- Un arrêt des apports d'irrigation.

Dans cette situation, il est possible et probable que la baisse de la nappe entraîne la disparition du flux d'alimentation de la zone humide par les eaux souterraines. De plus, en l'absence d'apports d'irrigation, les seuls apports seraient alors météoriques. Cela se traduirait probablement par un assèchement de la zone humide de Baussenq.

IMPACT SUR LE FONCTIONNEMENT ET LES HABITATS

Les constats établis précédemment sont traduits en termes d'impacts sur le fonctionnement de la zone humide et sur la distribution des habitats et espèces végétales dans le tableau ci-dessous.

Tableau 3-2 : Évolution potentielle de Baussenq selon les différents scénarios retenus

SITUATION ACTUELLE	SCENARIO 1 (CHANGEMENT CLIMATIQUE)	SCENARIO 6 (CHANGEMENT CLIMATIQUE ET REDUCTION DE 30% DES APPORTS D'EAU D'IRRIGATION DEPUIS LA DURANCE)	SCENARIO 7 (CHANGEMENT CLIMATIQUE ET SUPPRESSION TOTALE DES APPORTS D'EAU D'IRRIGATION DEPUIS LA DURANCE)
<ul style="list-style-type: none"> - Ennoisement temporaire des prairies humides (en période d'irrigation). Mares central et aval ennoyées quasiment toute l'année (superficie parfois très faible). - Croisement de la nappe et du TN limité à deux secteurs (centre et aval), dont la superficie est supérieure en hiver. - Croisement de la nappe et du TN-1 sur la quasi-totalité de la zone humide en hiver. 	<ul style="list-style-type: none"> - Similaire à la situation actuelle 	<ul style="list-style-type: none"> - La nappe baisse de 2 m environ. - Ennoisement temporaires mares centrales et aval (irrigation + pluies) mais ne sont plus ennoyées en permanence en hiver. - Possibilité de conservation des prairies humides si les périodes d'irrigation sont appropriées et si l'activité de pâturage est maintenue - Maintien de la peupleraie. Réduction surfacique des habitats frais. 	<ul style="list-style-type: none"> - La nappe baisse de 7 m environ. - Assèchement total à terme - Développement durable des fruticées mésophiles (ronciers, fourrés à Prunelliers...) sur les terrains actuellement pâturés.



3.3 ILON

3.3.1 Contexte

Le marais de l'Ilon est situé au pied du massif de l'Annelier, en bordure nord de la Crau, dans la dépression de la vallée des Baux face aux Alpilles. La zone humide couvre environ 75 ha.

Elle correspond à un exutoire nord de la nappe des cailloutis de la Crau, située en surplomb par rapport au marais, qui l'alimente à travers le karst de l'Annelier, sous forme de résurgence, surtout visibles à l'Est et de drainage ascendante sur toute la zone humide.

L'altitude moyenne est d'environ 1 mNGF. Le minimum recensé se situe autour de 0,2 NGF (altitude du miroir d'eau).

Le marais de l'Ilon est contenu dans la réserve naturelle régionale du même nom. Il se situe dans le site Natura 2000 des Trois Marais.

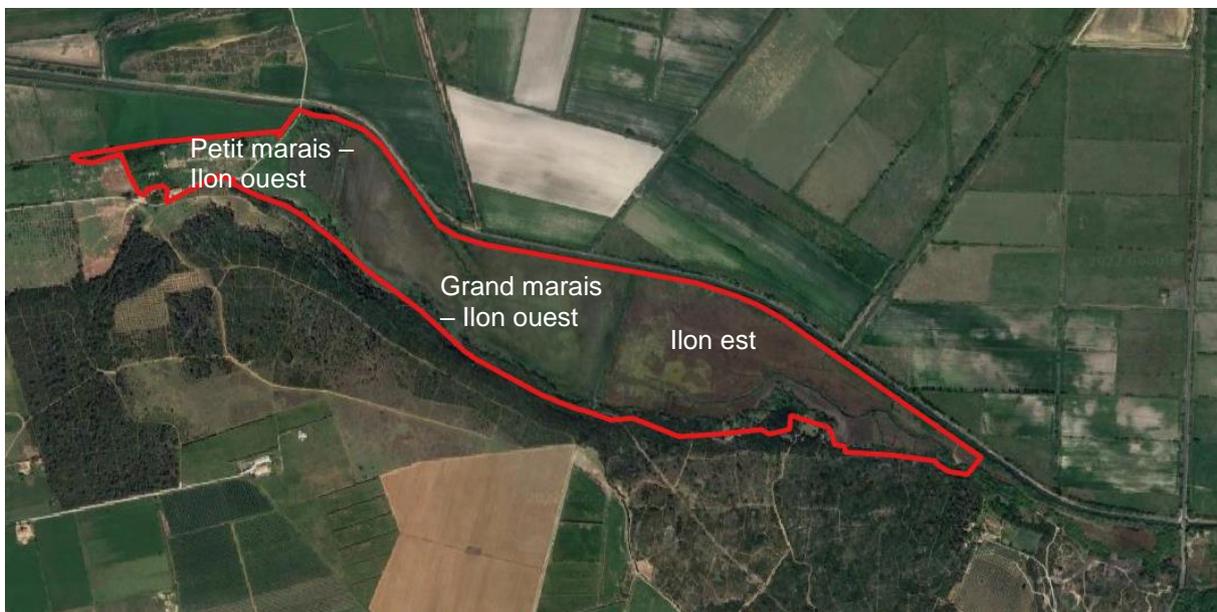
Une partie du site est pâturé par des taureaux.

Le système est compartimenté. On distingue :

- L'ilon est ;
- Le grand marais de l'Ilon ouest ;
- Le petit marais de l'Ilon ouest.

Ces trois compartiments sont délimités au nord par le canal de la vallée des Baux.

Figure 3-41 : Photo aérienne du marais de l'Ilon



3.3.2 Compréhension, hypothèses et questions formulées en début d'étude

La zone humide repose sur les sédiments quaternaires qui forment la dépression des Baux. Au droit de la zone humide, selon carte la géologique, il s'agit « limons d'origine colluviale, parfois tourbeux : il s'agit essentiellement des limons de décantation piégés dans la cuvette allongée des marais des Baux. Les limons gris proviennent du lessivage des formations environnantes ».

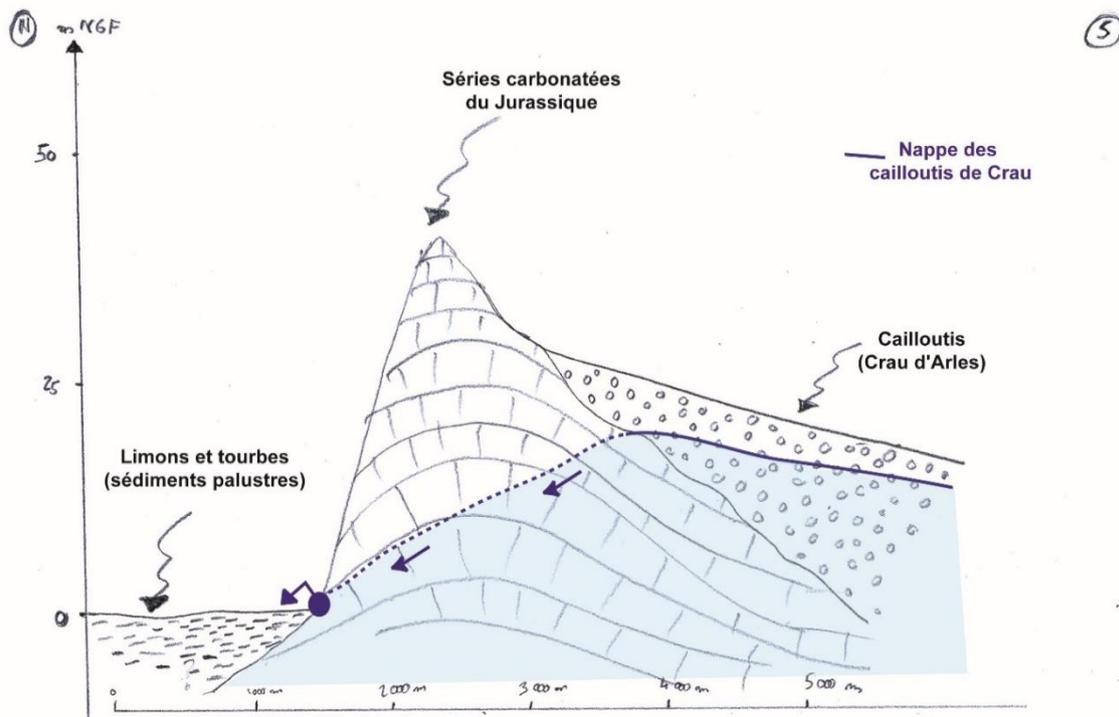
D'un point de vue hydrogéologique, ces limons sont peu perméables ; l'enjeu en termes d'alimentation par les eaux souterraines est de caractériser et quantifier les apports latéraux en provenance des séries carbonatées du massif de l'Anellier qui joue le rôle de relais hydraulique entre la dépression et la nappe des cailloutis de Crau.

En l'état des connaissances en début d'étude, on pose les hypothèses suivantes :

- L'influence de la nappe est limitée en quantité et en surface (apports principaux par débordement franc, drainage ascendante a priori faible) ;
- Le canal a une forte influence sur le fonctionnement de la zone humide, qui se remplirait et se viderait en symétrie du canal.

Les différences de fonctionnement entre les 3 compartiments, la nature et l'épaisseur des sédiments palustres ainsi que la relation entre le niveau de nappe dans les cailloutis de Crau et le débit des sources sont interrogées.

Figure 3-42 : Schéma de la géologie du marais de l'Ilon selon une orientation nord-sud



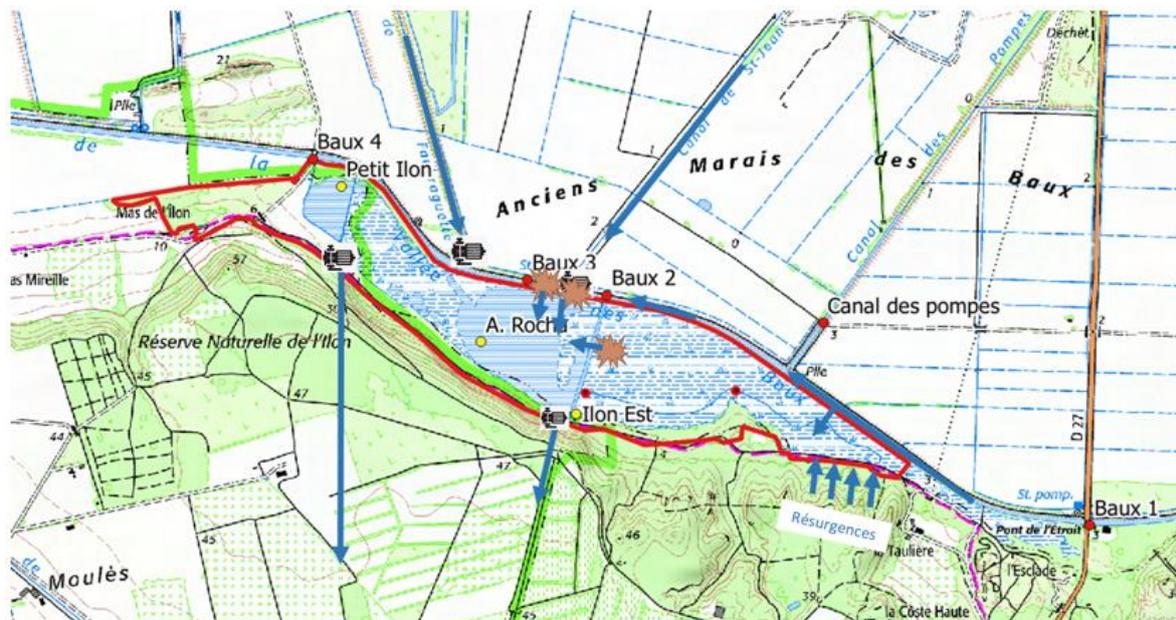


3.3.3 Fonctionnement actuel

FLUX D'EAU

Les principaux flux entrants d'eau superficielle sont représentés dans la carte ci-après.

Figure 3-43 : Localisation des principaux flux entrants d'eau superficielle sur le marais de l'Illon



- Jaugeage au droit d'une sonde sur canal
- Jaugeage sur canal uniquement
- ➔ Flux d'eau
- Pompe
- Brèche

Les données collectées permettent d'obtenir la variation temporelle des flux entrants et sortant de mai 2021 à décembre 2021.

Le graphique suivant présente un bilan des flux à l'échelle du marais de l'Illon. Les flux d'eau de surface entrant et sortant du marais correspondent aux écoulements du canal de la Vallée des Baux. A l'échelle du marais de l'Illon, les écoulements du canal de la Vallée des Baux sont prédominants par rapports aux autres termes du bilan. Or, chacun des compartiments du marais de l'Illon (Illon est, grand marais de l'Illon ouest et petit marais de l'Illon ouest) présente un comportement particulier en termes d'alimentation.

Le bilan présenté sur la figure suivante est donc à considérer avec des pincettes. La compréhension du fonctionnement du marais de l'Illon passe par la compréhension du fonctionnement de chacun de ses compartiments. Nous détaillons le comportement de chaque compartiment plus loin dans ce rapport.



Figure 3-44 : Flux d'eau entrants et sortants dans l'ensemble du système marais de l'Ilon (zone humide + canal)



Ce bilan montre que :

- L'alimentation principale de la zone humide se fait à partir des eaux de surface (entrée dans la zone humide – amont du canal de la vallée des Baux²).
- Le flux sortant principal correspond aux eaux superficielles qui s'échappent de la zone humide dans sa partie ouest (exutoire de la zone humide – aval du canal de la vallée des Baux) ;
- Le flux sortant est très corrélé au flux entrant via le canal de la Vallée des Baux ;
- L'évaporation à la surface de l'eau, l'évapotranspiration et les apports depuis la nappe sont des phénomènes secondaires en termes de flux ;
- En été, le bilan est déficitaire : la somme des entrées (apports irrigation et pluie) est supérieure à la somme des sorties d'eau (exutoire et phénomènes évaporatoires).

Concernant les eaux souterraines, sur la base de bilans détaillés par sous-secteurs (non présentés ici), on observe un apport pseudo-constant d'environ 200 l/s pendant la période de mesure. Cette valeur peut être jugée élevée mais elle cumule les venues « visibles » (sources et laurons) avec les venues masquées à la zone humide (drainance ascendante dans les sédiments palustres).

² Pour mémoire, le canal de la vallée des Baux draine les surplus d'irrigation et probablement la nappe, sur plusieurs kilomètres en amont de l'Ilon



NB : On peut noter qu'il est difficile d'estimer la part de l'alimentation de la zone humide au global par la seule soustraction des flux dans le canal en amont et en aval de la zone humide. Les débits mesurés sont importants avec des marges d'erreur de 5 à 10%. La supériorité des apports d'eau de surface est due aux limites spatiales du système étudié, qui inclue le canal dans le bilan. La contribution réelle des eaux du canal à la zone humide est variable selon les compartiments : prépondérante pour le Grand marais, elle l'est beaucoup moins pour les deux autres compartiments. Les réflexions développées plus loin dans la section sur les niveaux d'eau apportent des éclairages sur ces éléments et tempèrent le rôle des eaux de surface dans l'alimentation de la zone humide.

A partir de ces données de flux, il est possible de proposer les bilans suivants :

- Bilan sur l'ensemble de la période avec des données de flux disponibles : juin 2021 – avril 2022 ;
- Bilan mensuel ;
- Bilan d'un mois représentatif de la situation estivale : août 2021.

Figure 3-45 : Bilan des flux sur la période juin 2021 – décembre 2021 pour l'ensemble du système marais de l'Ilon (zone humide + canal)

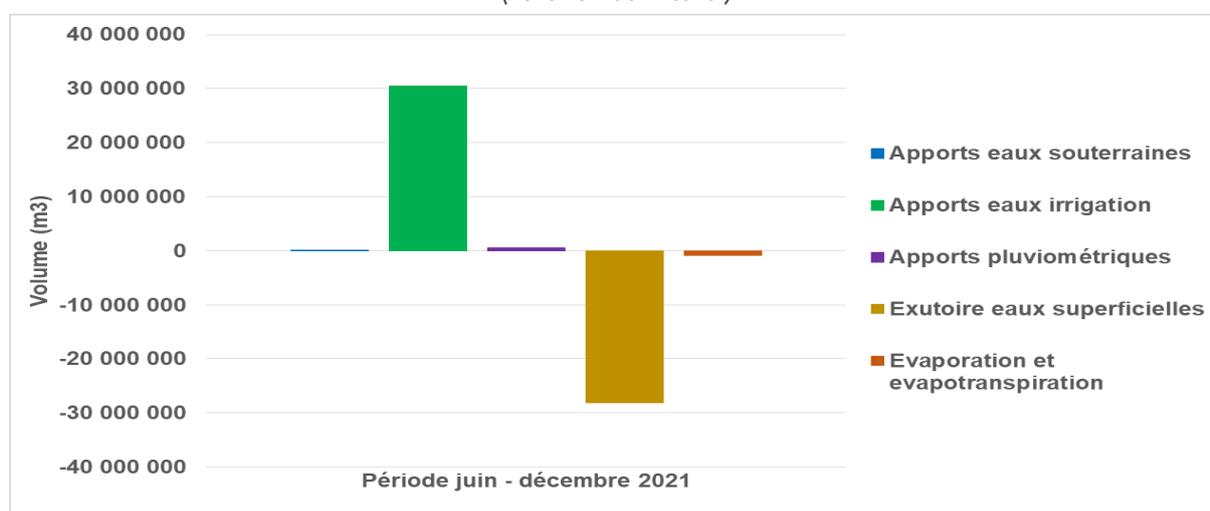




Figure 3-46 : Bilan des flux mensuels 2021 pour l'ensemble du système marais de l'Illon (zone humide + canal)

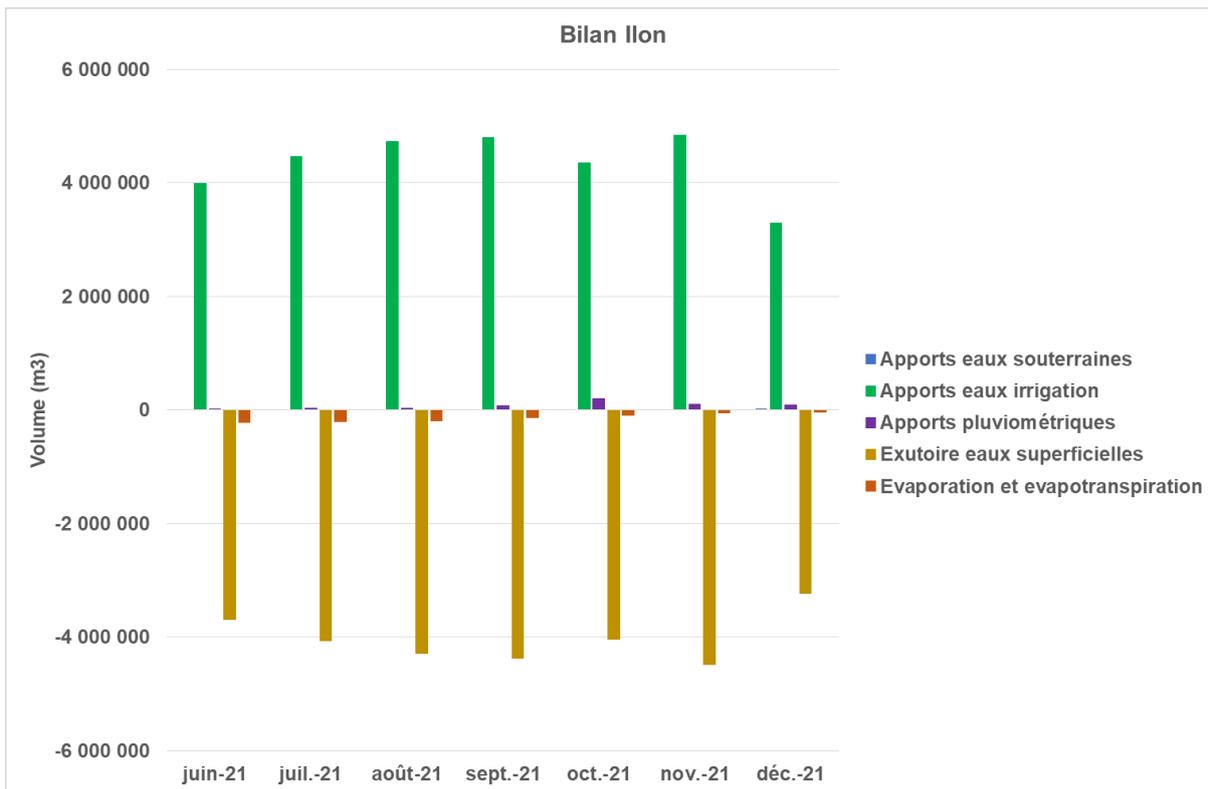
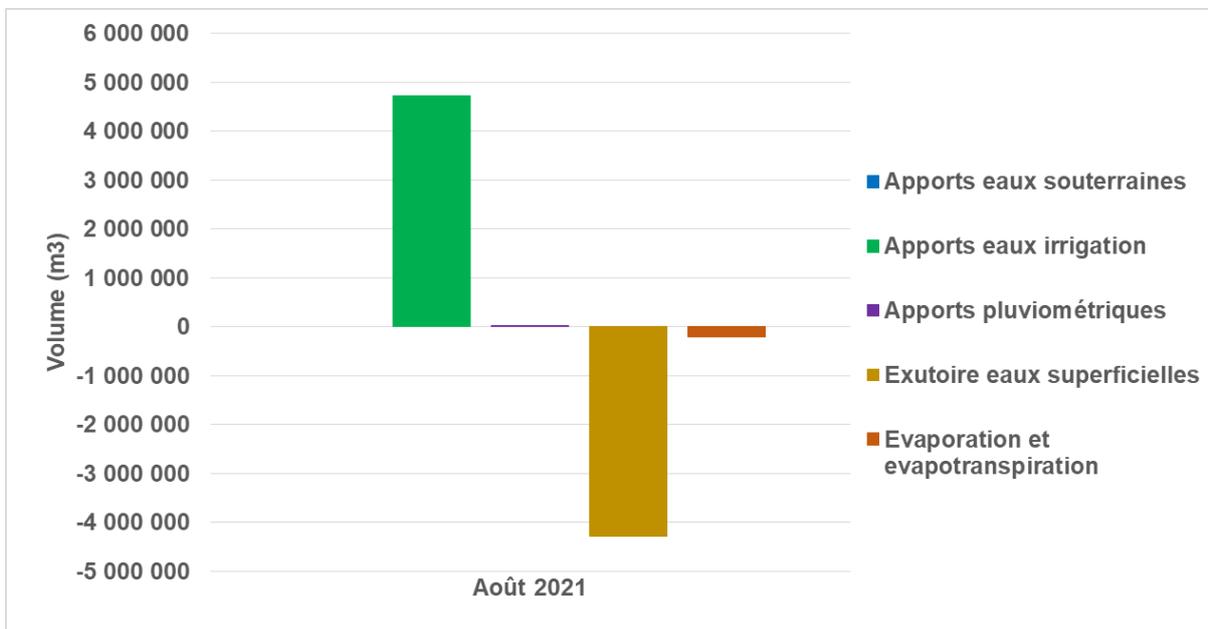


Figure 3-47 : Bilan des flux - Août 2021 2021 pour l'ensemble du système marais de l'Illon (zone humide + canal)





NIVEAUX D'EAU (ENNOIEMENT / ENGORGEMENT)

L'extrapolation et la conversion des données de hauteur d'eau à l'aide des données LIDAR topographiques dans chacun des compartiments du marais de l'Illon (cf. figure ci-après) permettent de donner un ordre de grandeur de l'engorgement du marais.

On note, que la quasi-totalité du marais de l'Illon est engorgé $\frac{3}{4}$ du temps (sur la période mesurée), à l'exception de l'extrémité ouest du Petit marais.

Ces cartes ne peuvent pas être utilisées pour connaître précisément les secteurs engorgés ou déengorgés.

Figure 3-48 : Ennoiement du marais de l'Ilon

Superficie ennoyée 75% du temps de mai à déc 2021



Superficie ennoyée maximale enregistrée



Superficie ennoyée minimale enregistrée



Du fait de l'engorgement dominant, le TN très peu dénoyé, si l'est, c'est uniquement de quelques cm et pour une partie importante de la zone humide, l'eau est supérieure au TN en permanence.

Le TN-1 est engorgé en permanence sur la quasi-totalité de la zone humide comme l'atteste les sondages pédologiques. Ces sols sont rattachés à des Réductisols avec des gleys (G) débutant à 20 cm de profondeur (zone centrale du marais) et Rédoxisols avec des pseudogleys (g) s'intensifiant en profondeur (sur les parcelles cultivées). Il faut aussi noter la présence de d'horizons histiques (tourbe) en profondeur au cœur du marais. Ces conditions attestent la présence d'un engorgement en eau permanent soutenu et alimenté par une nappe.



Figure 3-49 : Superficie concernée par un engorgement quasi-permanent à TN-1 d'après les sondages pédologiques

Ilon



56

Ilon Est

Avec une hauteur d'eau quasi-constante autour de 0,81 mNGF, l'Ilon Est est ennoyé en permanence sur une hauteur d'eau minimum 20 cm (dans les secteurs les plus bas).

Les figures suivantes montrent que l'Ilon est déconnecté du canal de la Vallée des Baux tant que le débit de ce dernier reste inférieur à environ 2 000 l/s. Lorsque le débit du canal de la Vallée des Baux est supérieur à 2 000 l/s, la hauteur d'eau dans l'Ilon varie de façon linéaire en fonction du débit (donc de la hauteur d'eau dans le canal).

La Figure 3-50 montre que, lorsque le débit du canal de la Vallée des Baux est supérieur à 2 000 l/s, celui-ci alimente l'Ilon est. Cependant, lorsque le débit du canal diminue pour repasser en-dessous des 2 000 l/s, l'Ilon est se décharge dans le canal de la Vallée des Baux pour revenir à son état initial. Sur la période de données disponibles, l'alimentation puis la décharge de l'Ilon varient entre 3 et 8 jours.

La constance du niveau d'eau de l'Ilon est assurée par les apports d'eaux souterraines, via des résurgences. En été, ces dernières apportent environ 200 l/s à l'Ilon est et environ 50 l/s en hiver.

Les sorties d'eau de l'Ilon est s'effectuent par débordement dans le canal, évaporation et évapotranspiration (les phénomènes évaporatoires correspondent à 10 à 20 l/s en été).

On en déduit que tant que le flux souterrain sera supérieur 20 l/s, l'Ilon Est sera en grande partie ennoyé.



La température des eaux souterraines peut être approchée par deux qualitomètres situées en bordure sud du massif de l'Annelier. Les eaux souterraines des cailloutis de Crau dans ce secteur montrent des températures hivernales qui varient entre 12 et 16 °C et des températures estivales qui varient entre 16 et 18°C. Les mesures de qualité sur site montrent des eaux superficielles sont globalement supérieures aux eaux souterraines sur ce secteur. En aout, on mesure 16°C en sortie de résurgence dans Ilon Est, 19°C au milieu de l'Ilon Est et 18°C au niveau du pont de l'Étroit. On note une influence décroissante des eaux souterraines à mesure qu'on se rapproche du canal. L'influence sur la température semble très localisée.

Figure 3-50 : Variation due la hauteur d'eau dans l'Ilon est fonction du débit dans le canal de la Vallée des Baux

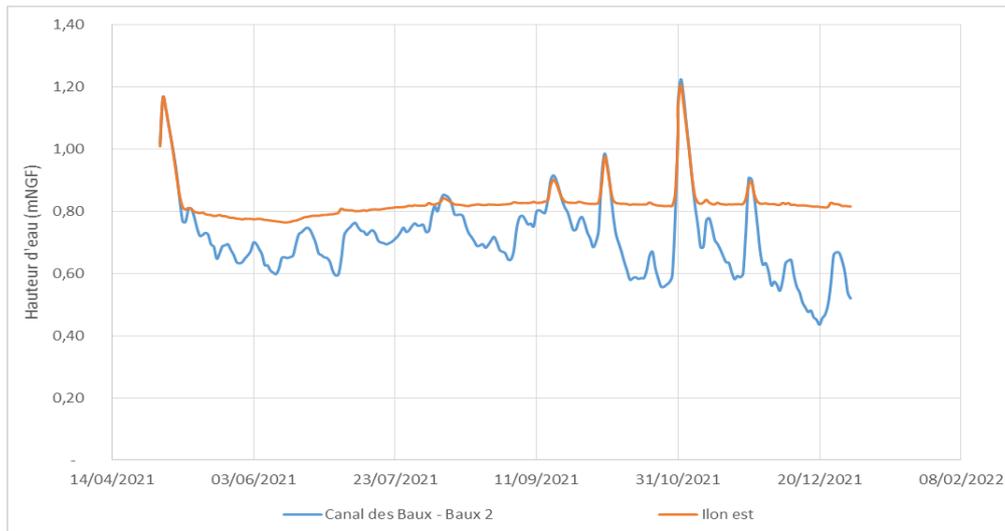
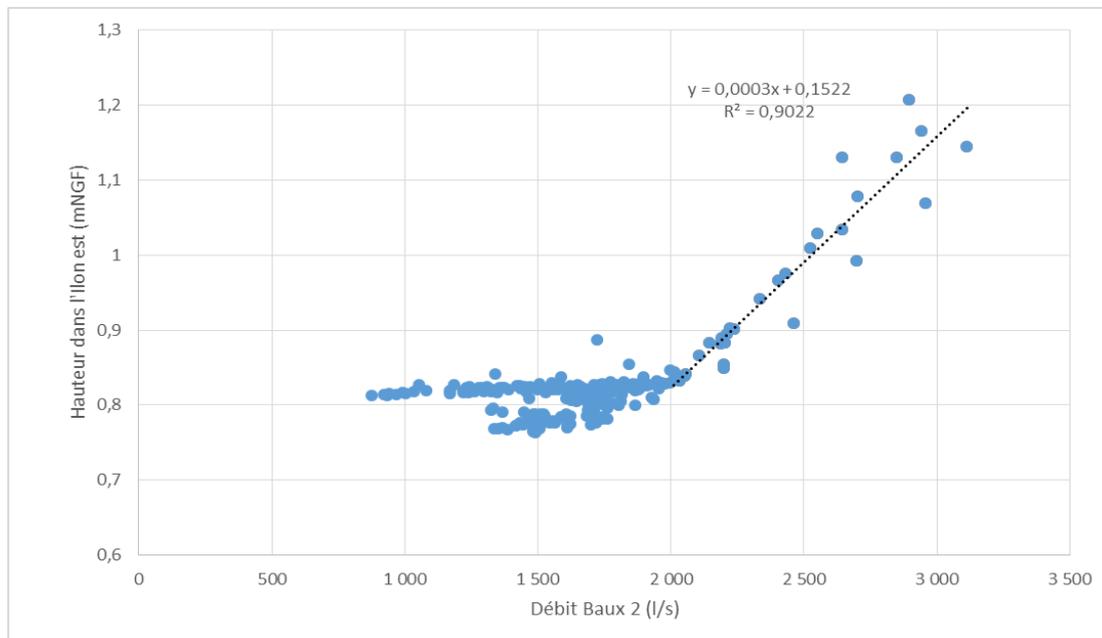


Figure 3-51 : Relation entre le débit dans le canal des Baux et la hauteur d'eau dans l'Ilon est



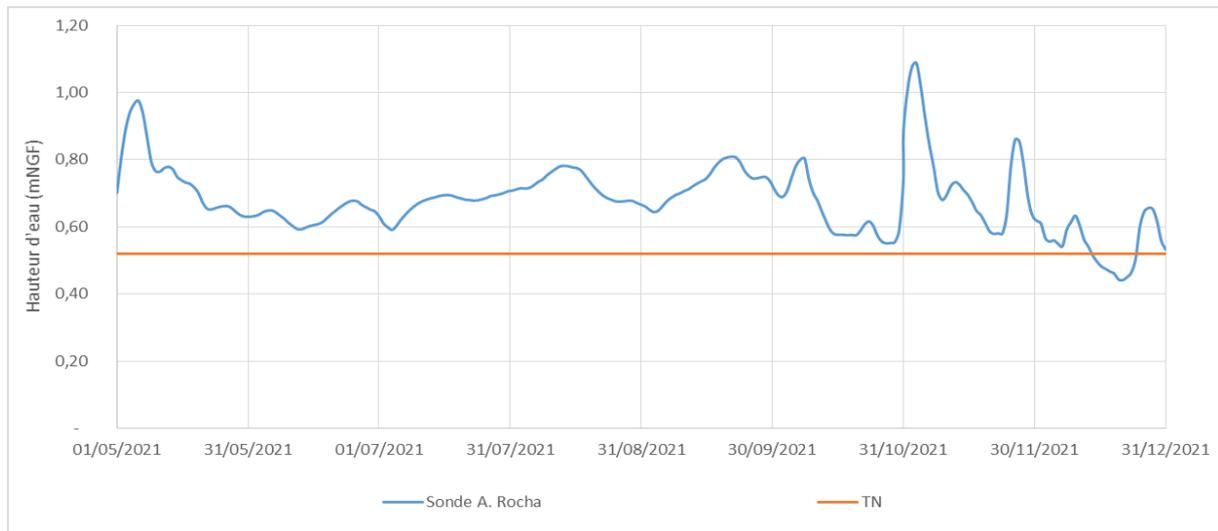
Grand marais

La figure suivante présente la hauteur d'eau mesurée dans le grand marais par la sonde A. Rocha. On affiche également le niveau le plus bas mesuré par le MNT Litto3d, à savoir 0,52 mNGF. Cependant, soulignons que le niveau minimum du terrain naturel du grand marais se situe certainement sous 0,52 mNGF.



En moyenne, la hauteur d'eau du grand marais se situe autour de 0,68 mNGF.

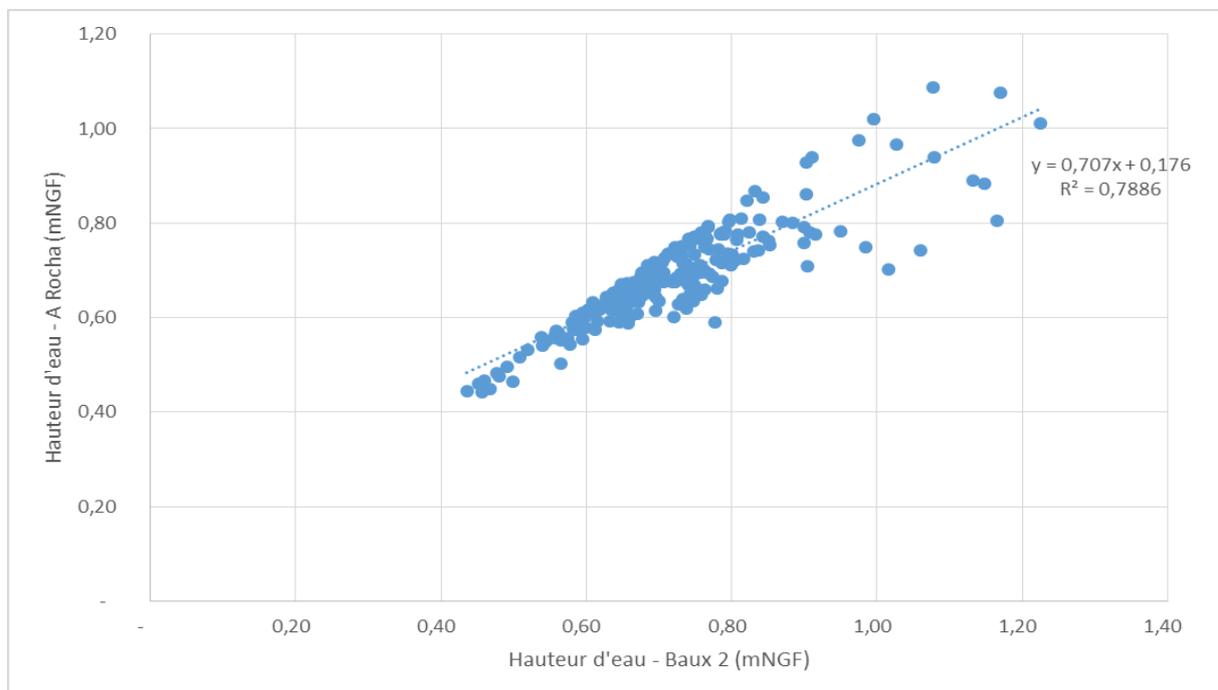
Figure 3-52 : Hauteur d'eau mesurée au niveau de la sonde A. Rocha



La figure suivante montre que la hauteur d'eau dans le Grand marais (donc le volume) varie fortement en fonction de celle (et donc du débit) du canal de la Vallée des Baux.

Le fonctionnement du Grand marais est donc principalement régulé par le débit et la hauteur d'eau du canal de la Vallée des Baux. Le canal de la Vallée des Baux et le Grand marais fonctionnent comme un seul et même réservoir.

Figure 3-53 : Relation entre la hauteur d'eau dans le canal de la vallée des Beaux et la hauteur d'eau dans le Grand marais



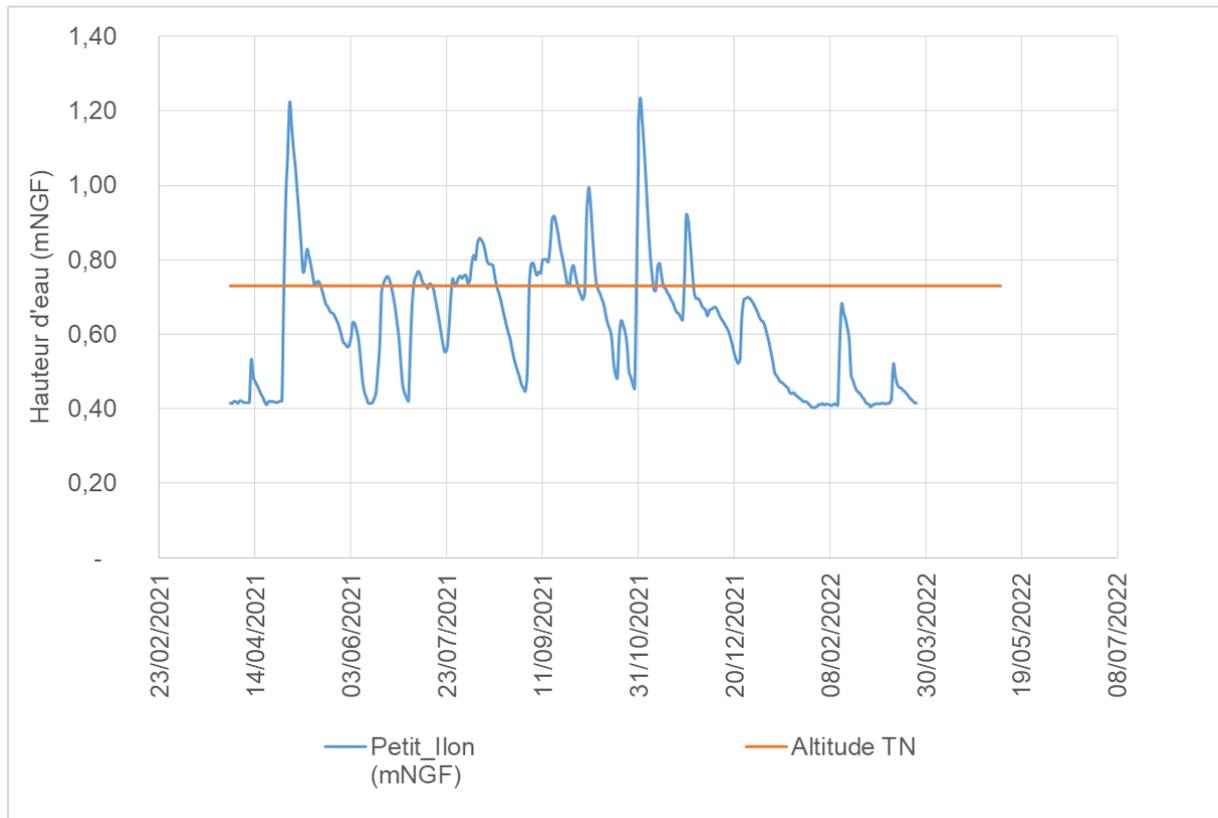
Petit marais

La figure suivante présente la hauteur d'eau dans le Petit marais ainsi que l'altitude du terrain naturel (0,73 mNGF). En faisant le lien avec les observations précédentes, on constate :



- Une alimentation du Petit marais par le canal de la Vallée des Baux lorsque le niveau d'eau de ce dernier dépasse 0,73 mNGF ;
- Une baisse du niveau d'eau dans le Petit marais, sous le TN, en dehors des périodes supposées de crue. Ceci traduit l'infiltration de l'eau dans le sous-sol. Même s'il est difficile d'extrapoler les niveaux d'eau sous 0,40 mNGF, nous pressentons que les périodes où le niveau d'eau est inférieur à 0,40 mNGF sont très limitées dans l'année. Ceci est corroboré par la présence de traces d'hydromorphie permanente à TN-1.

Figure 3-54 : Hauteur d'eau dans le Petit marais et seuil d'influence du canal de la Vallée des Baux



Les figures suivantes présentent la relation entre la hauteur d'eau mesurée dans le Petit marais et celles mesurées dans le canal de la Vallée des Baux au droit du site Baux 2 et dans le Grand marais.

Nous observons que la hauteur dans le Petit marais est corrélée avec celle du canal de la vallée des Baux lorsque cette dernière dépasse 0,73 mNGF environ. En dessous, la hauteur d'eau du Petit marais varie indépendamment du canal de la Vallée des Baux.

Par contre, la variation de hauteur d'eau dans le Petit marais semble indépendante de celle dans le Grand marais.



Figure 3-55 : Relation entre la hauteur du canal de la Vallée des Baux au droit du site Baux 2 et la hauteur d'eau mesurée dans le Petit marais

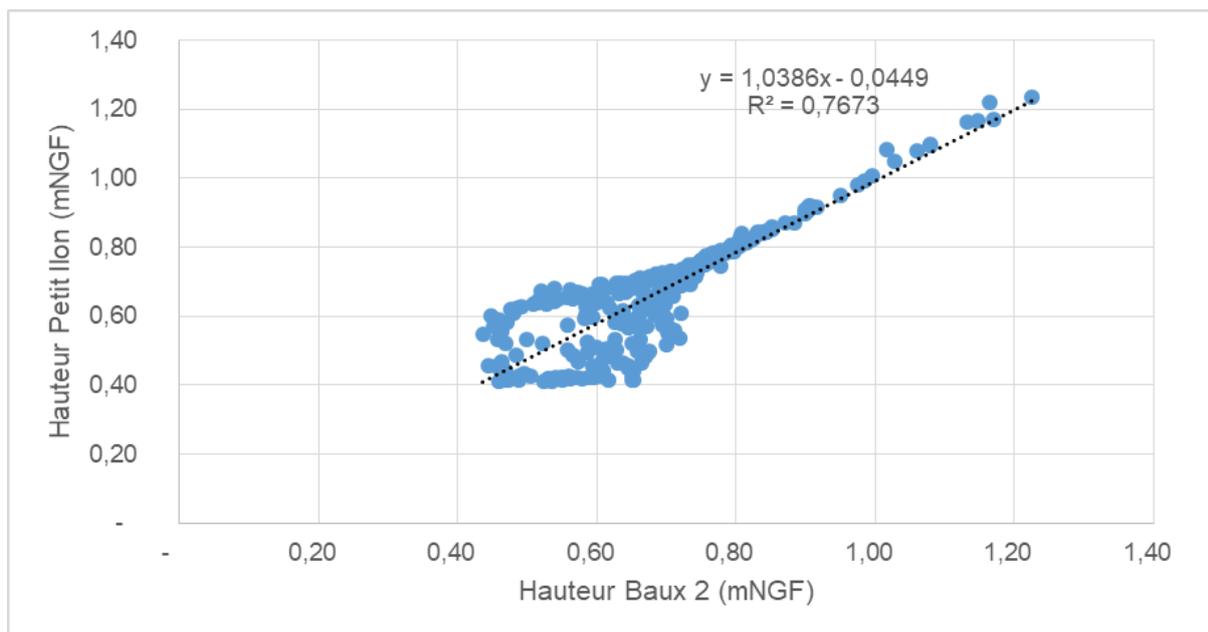
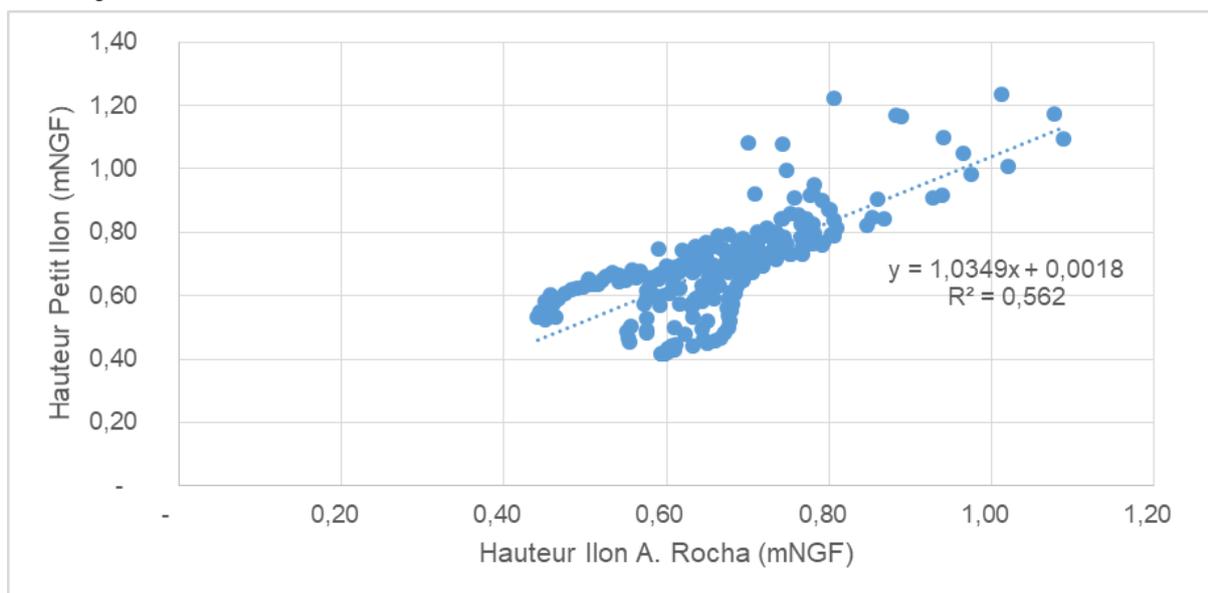


Figure 3-56 : Relation entre la hauteur du Grand marais et la hauteur d'eau mesurée dans le Petit marais



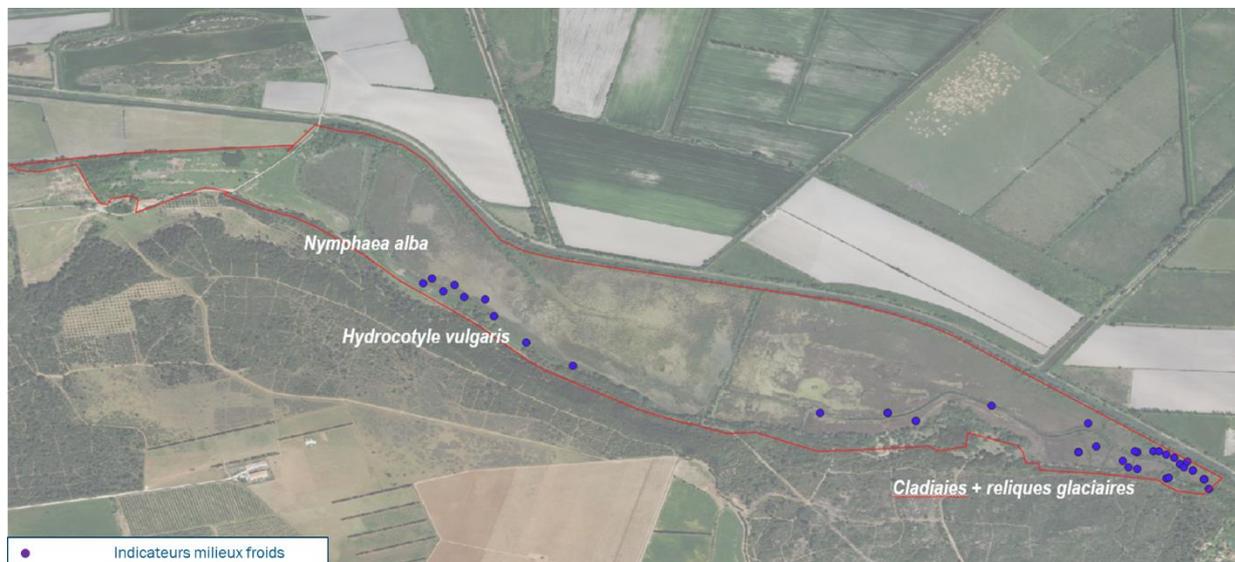


INDICATEURS FLORE ET HABITATS

Le marais de l'Ilon Est montre une très forte influence des résurgences de la nappe d'eau froide, qui se traduit par le développement de la cladiaie à Marisque, accompagnée de plusieurs espèces strictement associées aux marais froids comme la Scutellaire à casque. A l'inverse, les marais ouest (Grand marais et Petit marais) sont caractérisés par les apports d'importantes quantités d'eaux de surface provenant des brèches du canal de la vallée des Baux. La végétation y est radicalement différente, avec développement très important de la cariçaie à Laiche élevée, de plans d'eau à macrophytes comme le Nénuphar jaune, et de ceintures à Roseau commun et à joncs. Dans les marges sud des marais de l'Ilon Ouest, la présence régulière de l'Ecuelle d'eau et, plus localement, la présence du Nénuphar blanc signent la proximité des eaux froides. Le signal d'une nappe froide est bien présent, même si l'influence des eaux chaudes de surface domine et obère le développement des cortèges les plus exigeants de la cladiaie.

Les transitions avec la végétation du bassin versant sont très franches : le marais est par endroit directement contact avec la Chênaie verte xérophile. Un étroit cordon de ripisylve à Frêne et Peuplier blanc s'intercale par endroits entre les zones hygrophiles et la chênaie verte.

Figure 3-57 : Répartition des indicateurs de milieux froids et frais sur le marais de l'Ilon





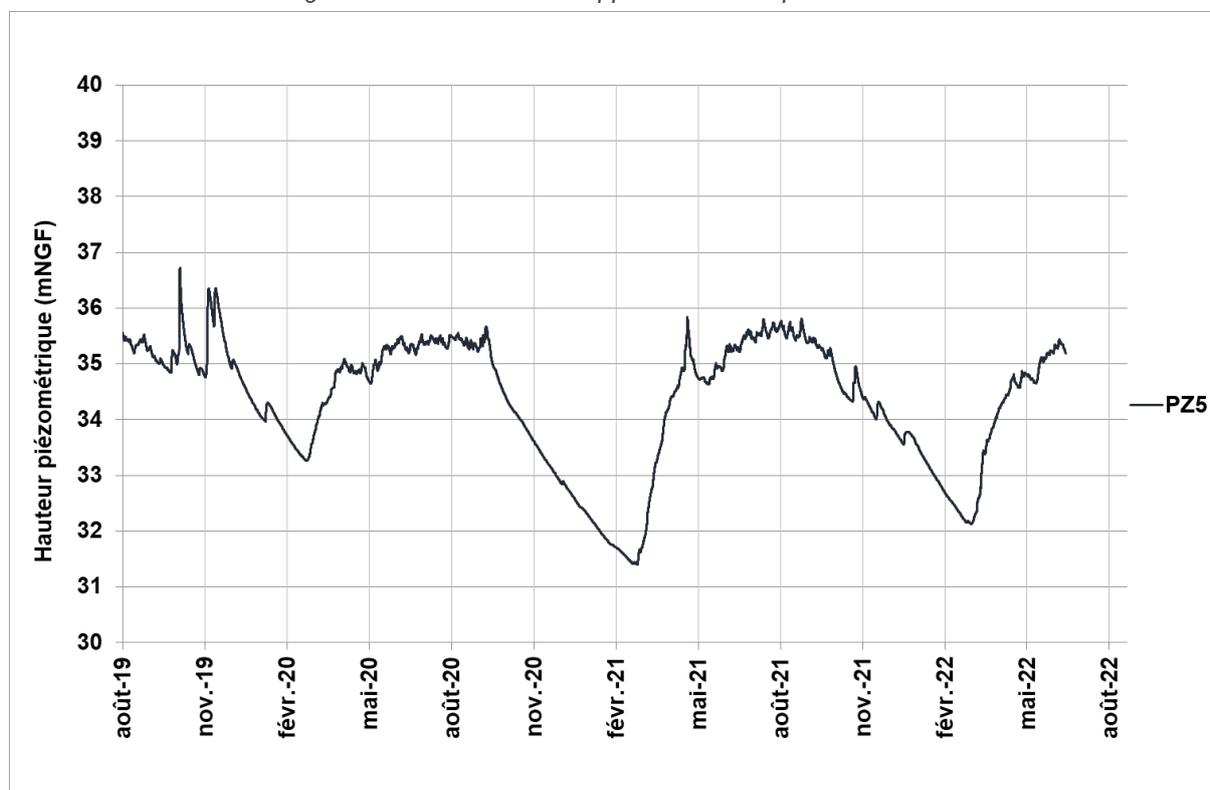
3.3.4 Évolution future

PIEZOMETRIE

La constance du débit d'alimentation de l'Ilon par les eaux souterraines peut s'expliquer par la configuration hydrogéologique. En effet, les apports d'eau se font au droit de la zone humide (cote NGF du sol à environ 1 mNGF) en provenance des cailloutis de Crau à plusieurs kilomètres au Sud et dont la nappe est localisée entre 30 et 35 mNGF, au travers du massif karstique de l'Anelier.

Le piézomètre le plus proche de la zone humide (PZ5) montre des variations pluri-métriques entre hautes et basses eaux ; ceci étant, il faut raisonner en gradient et non en cote absolue dans cette configuration hydrogéologique. Avec une distance d'environ 7 000 m entre PZ5 et la ZH, le passage d'une cote de 36 mNGF à une cote de 31 mNGF implique le passage d'un gradient de 0,5% à 0,4%, soit une baisse de débit attendue de l'ordre de 20% des débits en période hivernale par rapport à la période estivale.

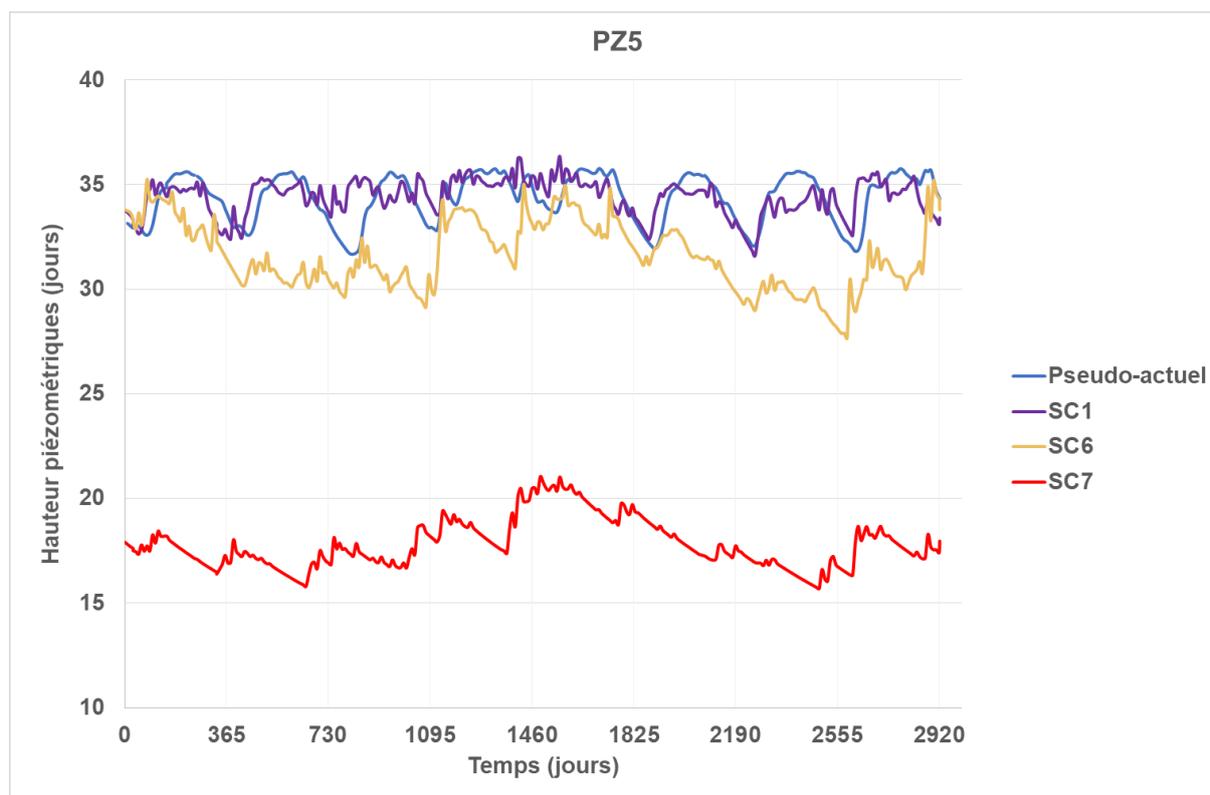
Figure 3-58 : Niveau de la nappe au niveau du piézomètre PZ5



Concernant l'estimation des flux d'eau souterraine alimentant la zone humide, le programme SINERGI a permis d'estimer les niveaux piézométriques sur le PZ5 en bordure de Crau.



Figure 3-59 : Hauteurs piézométriques mesurées dans la situation actuelle et évolution selon les scénarios SC1, SC6 et SC7



On peut faire les observations suivantes :

- Le scénario SC1 basé sur une continuité des apports depuis la Durance et la seule modification des paramètres hydro-climatiques en 2050 montre des cotes piézométriques à peu près équivalentes à la situation actuelle. Les débits d'alimentation en eaux souterraines de la ZH ne devraient que peu varier.
- Le scénario SC6 montre une baisse significative des niveaux de nappe mais en termes de gradient piézométrique, la baisse devrait être modérée (de l'ordre de 20%).
- Le scénario SC7 se traduit par un effondrement des niveaux de nappe. En raisonnant en gradient, on passerait toutes choses étant égales par ailleurs d'un gradient de 0,5% à un gradient de 0,2%, soit une diminution probable des flux de 60%. De plus, au vu de la configuration hydrogéologique, il n'est pas exclu que les eaux en provenance de Crau et à destination de la ZH se tarissent complètement. En effet, les eaux « empruntent » actuellement des réseaux karstiques dont l'altitude n'est pas connue ; on peut envisager qu'une baisse trop importante du niveau de la nappe entraîne un dénoiement de ces réseaux ou qu'à des cotes inférieures à 20 mNGF, on ait des formations peu ou moins perméables (Miocène ou Pliocène) entre les cailloutis de la Crau et les calcaires karstifiés de l'Anellier.



FLUX ENTRANTS ET SORTANTS

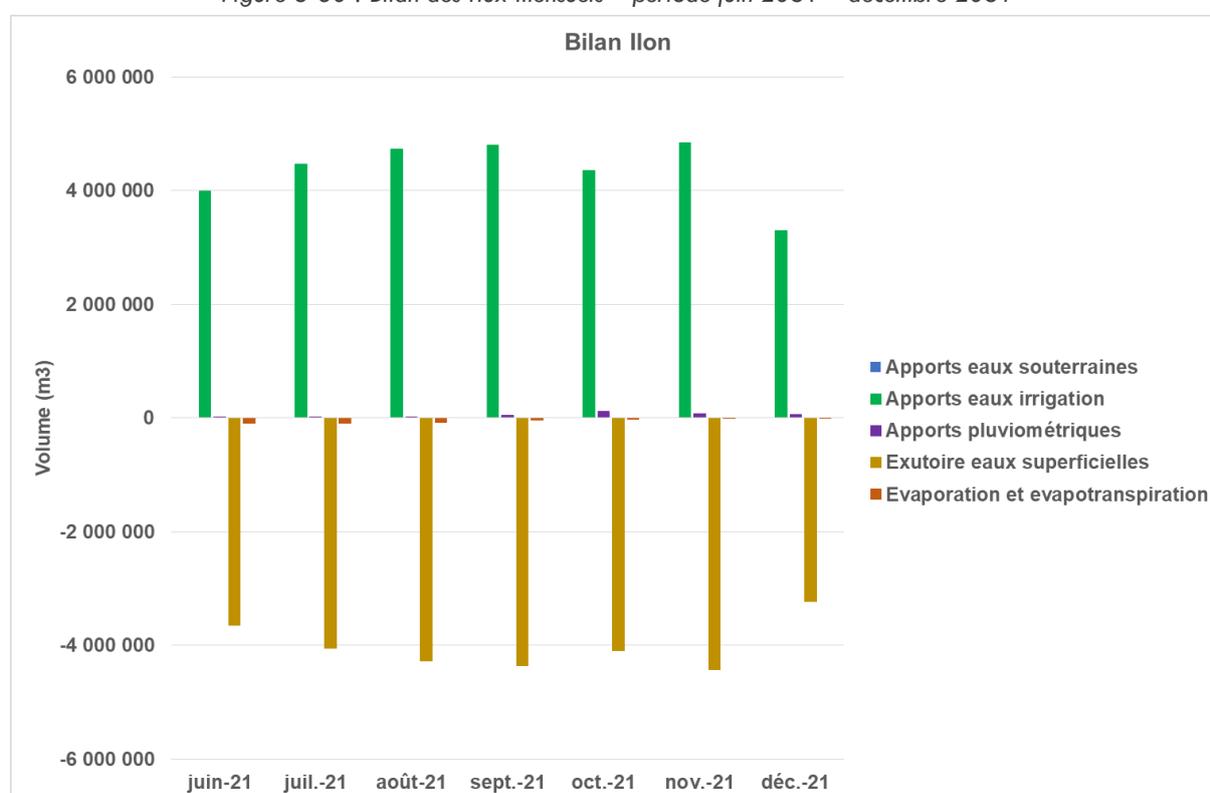
À partir des hypothèses retenues concernant les estimations de l'évolution hydro-climatique (détaillées dans l'annexe 3), des constats exposés précédemment et de l'évolution des apports d'irrigation, il est possible d'estimer les bilans suivants pour les scénarios SC1, SC6 et SC7 :

- Bilan sur l'ensemble de la période avec des données de flux disponibles : juin 2051 – avril 2052 ;
- Bilan mensuel ;
- Bilan d'un mois représentatif de la situation estivale : août 2051 ;
- Bilan d'un mois représentatif de la situation hivernale : décembre 2051.

Seul le bilan mensuel pour chacun des trois scénarios est présenté ci-après. Les autres bilans sont présentés dans l'annexe 3.

Scénario 1

Figure 3-60 : Bilan des flux mensuels – période juin 2051 – décembre 2051





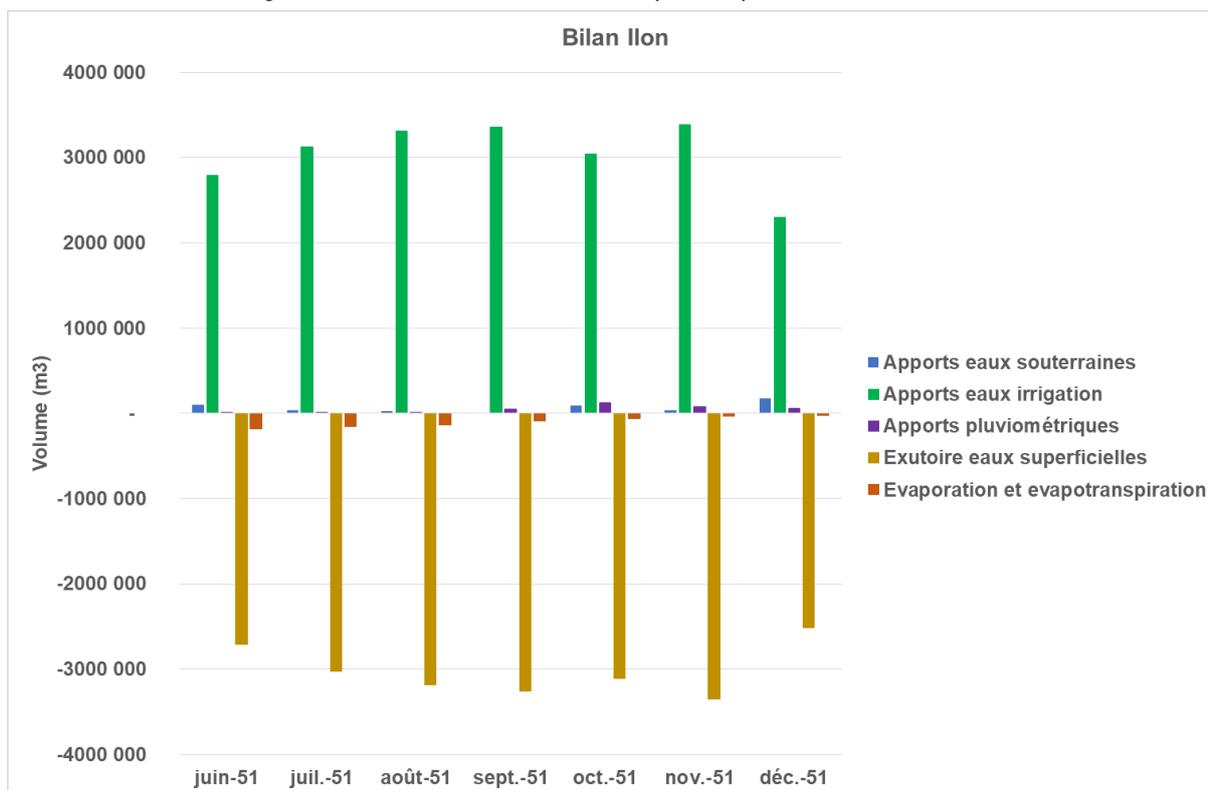
Scénario 6

Pour rappel, le scénario SC6 se traduit par :

- Une baisse significative des niveaux de nappe mais en termes de gradient piézométrique, la baisse devrait être modérée. Cette baisse induirait une diminution du flux d'eau souterraine de l'ordre de 20% ;
- Une diminution des apports d'irrigation de 30%.

Le marais de l'Illon étant principalement alimenté par des apports en eau de surface, une diminution des apports d'irrigation pourrait impacter les volumes à l'exutoire dans un même ordre de grandeur. Les apports en eaux souterraines devraient être légèrement moins importants par rapport à la situation actuelle.

Figure 3-61 : Bilan des flux mensuels – période juin 2051 – avril 2052



Scénario 7

Pour rappel, le scénario SC7 se traduit par :

- Un effondrement des niveaux de nappe conduisant à une diminution probable des flux de 60% ou à un arrêt totale de l'alimentation de l'Illon ;
- Un arrêt des apports de l'irrigation.



IMPACT SUR LE FONCTIONNEMENT ET LES HABITATS

Les constats établis précédemment sont traduits en termes d'impacts sur le fonctionnement de la zone humide et sur la distribution des habitats et espèces végétales dans le tableau ci-dessous.

Tableau 3-3 : Évolution potentielle du marais de l'Illon selon les différents scénarios retenus

SITUATION ACTUELLE	SCENARIO 1 (CHANGEMENT CLIMATIQUE)	SCENARIO 6 (CHANGEMENT CLIMATIQUE ET REDUCTION DE 30% DES APPORTS D'EAU D'IRRIGATION DEPUIS LA DURANCE)	SCENARIO 7 (CHANGEMENT CLIMATIQUE ET SUPPRESSION TOTALE DES APPORTS D'EAU D'IRRIGATION DEPUIS LA DURANCE)
<ul style="list-style-type: none"> - Majorité de la surface ennoyée toute l'année. Influence des eaux souterraines par résurgence (surtout visible sur Illon Est) et par drainance ascendante sur tout l'Illon. Expression des espèces inféodées aux milieux froids en bordure sud du site. - Grand marais de l'Illon ouest, en communication directe et permanente avec le canal via plusieurs brèches. - Illon est et petit marais de l'Illon ouest : alimentés par le canal uniquement en période de crue. - TN-1 engorgé de manière quasi-permanente sur la quasi-totalité de la zone humide. Tourbe à partir de 50cm de profondeur. 	<ul style="list-style-type: none"> - Similaire à la situation actuelle 	<ul style="list-style-type: none"> - Réduction du flux d'eaux souterraines d'environ 20%. A priori pas d'influence sur l'engorgement mais réduction surfacique de la zone d'influence des eaux souterraines au niveau de l'Illon Est. Pourrait se traduire par une réduction surfacique des habitats froids et par une réduction des populations reliques glaciaires. - Sur le grand marais de l'Illon ouest : réduction de 15% de la surface ennoyée 75% du temps. Développement d'ilots de saulaie et, en marges, de peupleraies. 	<ul style="list-style-type: none"> - Réduction du flux d'eau souterraine d'environ 60% (ou possiblement 100% selon la configuration hydrogéologique du site). L'Illon est reste en eau (en cas de réduction de 60% des apports souterrains) ou ennoyé que quand le canal est en crue (100%). - Le reste des compartiments n'est ennoyé que quand le canal est en crue. - Maintien potentiel de l'engorgement affleurant. Extension de la saulaie et des peupleraies blanches. Réduction encore plus franche des habitats froids (cladaie) et des populations de reliques glaciaires dans l'Illon est.



3.4 CHANOINES

3.4.1 Contexte

Le marais des Chanoines constitue la partie amont de l'ensemble « Marais de Raphèle ». Il s'étend sur environ 500 ha et est situé à l'exutoire nord-ouest de la nappe des cailloutis de la Crau.

L'altitude avoisine les 4-5 m NFG en bordure du site et s'élève à environ 1,7 m en moyenne sur la zone humide.

Il est situé dans le site Natura 2000 des Trois Marais.

Figure 3-62 : Photo aérienne du marais de Chanoines





3.4.2 Compréhension, hypothèses et questions formulées en début d'étude

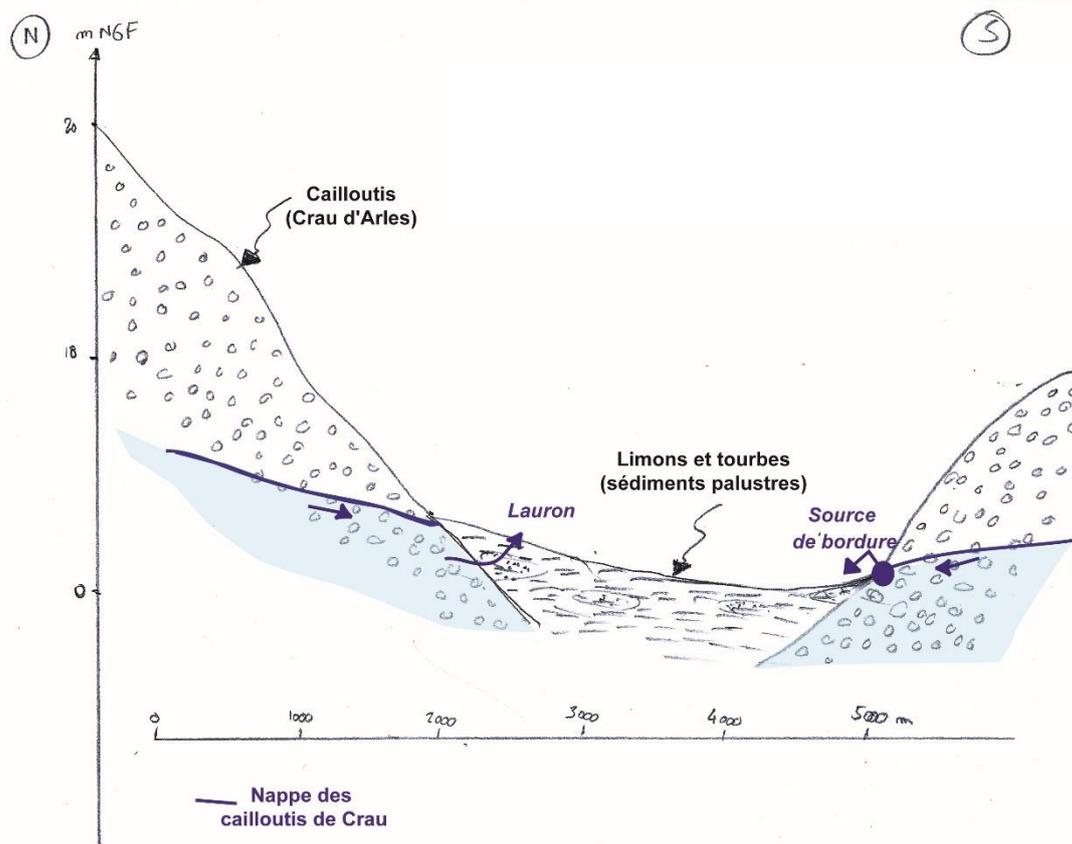
La zone humide repose sur les sédiments quaternaires qui viennent en recouvrement des cailloutis de Crau. Il s'agit principalement de sédiments palustres réputés peu perméables.

D'un point de vue hydrogéologique, les sédiments quaternaires sont peu perméables ; l'alimentation de la zone humide peut se faire deux manières : par des sources de bordure au contact avec les cailloutis de Crau ou par des laurons.

En l'état des connaissances en début d'étude, plusieurs questions se posent :

- Quelle est la nature et l'épaisseur des sédiments palustres ?
- Quelle est la relation entre niveau de nappe dans les cailloutis de Crau et débits des sources et laurons ?
- Quelle est l'origine de l'eau drainée par le réseau superficiel ?
- Quelle est l'influence géographique des canaux ?

Figure 3-63 : Schéma de la géologie du marais des Meyranne et des Chanoines selon une coupe nord sud

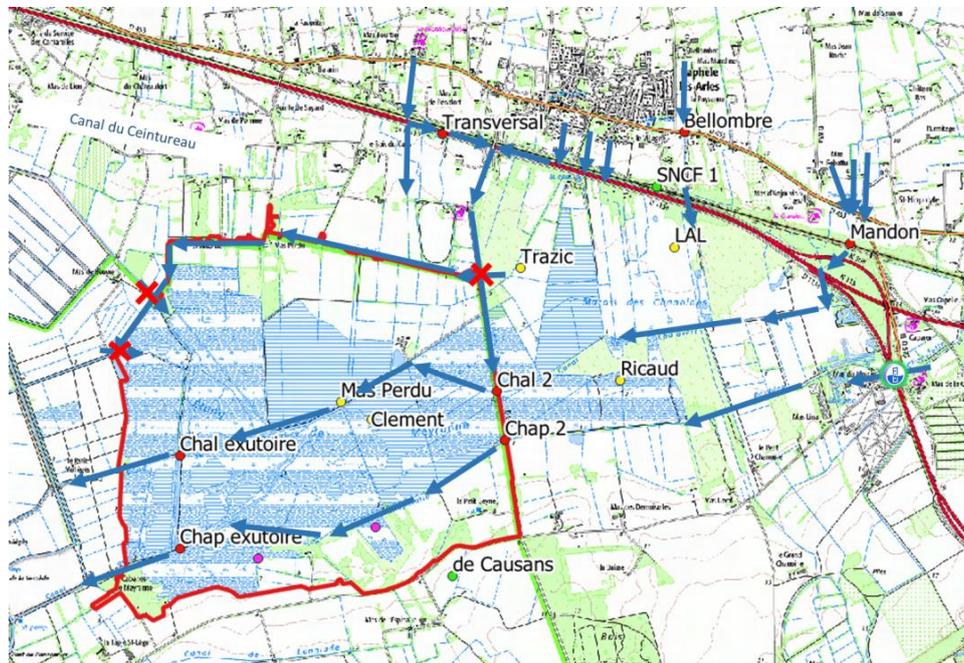


3.4.3 Fonctionnement actuel

FLUX D'EAU

Les principaux flux entrants d'eau superficielle sont représentés dans la carte ci-après.

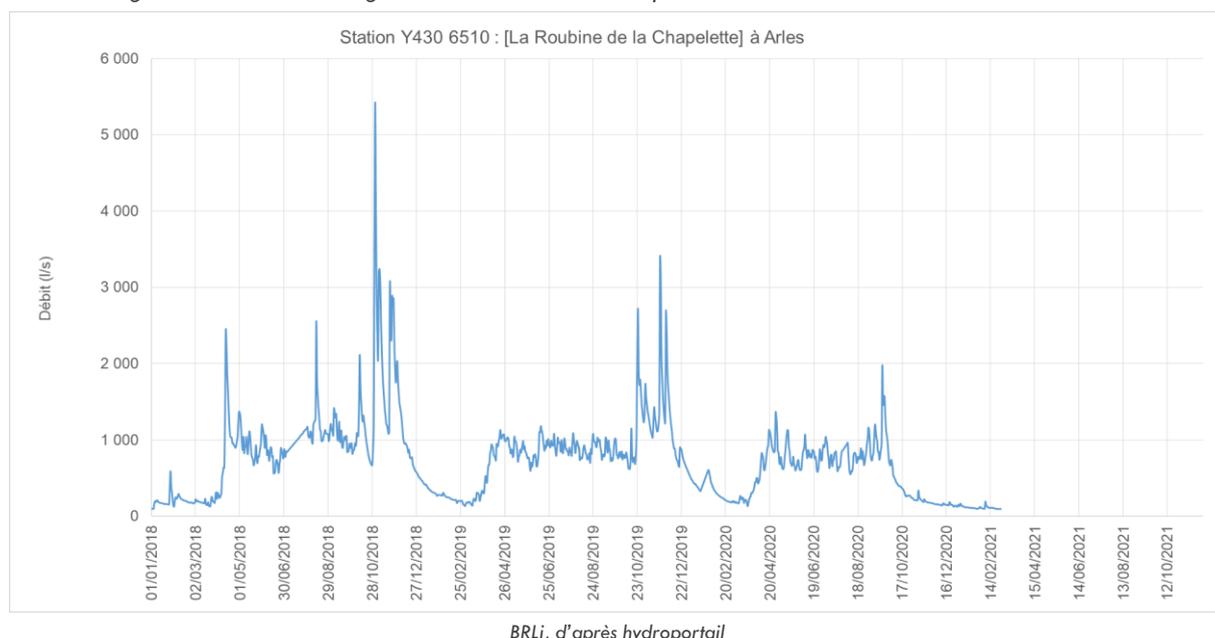
Figure 3-64 : Localisation des principaux flux entrants d'eau superficielle sur le marais des Chanoines



L'arrêt concomitant du fonctionnement de la station hydrométrique de la Chapelette avec le démarrage de l'acquisition des données d'Osmose 2 prive l'étude de l'information relative au principal flux entrant dans la zone humide. En l'absence de ces données il n'est donc pas possible de réaliser un bilan hydrologique complet comme sur les autres zones humides.

L'analyse des données historiques enregistrées au niveau de la station hydrométrique de la Chapelette indique qu'environ 800 l/s entrent dans le marais en été, contre 200 l/s en hiver.

Figure 3-65 : Débit enregistré à la station de la Chapelette entre novembre 2018 et février 2021



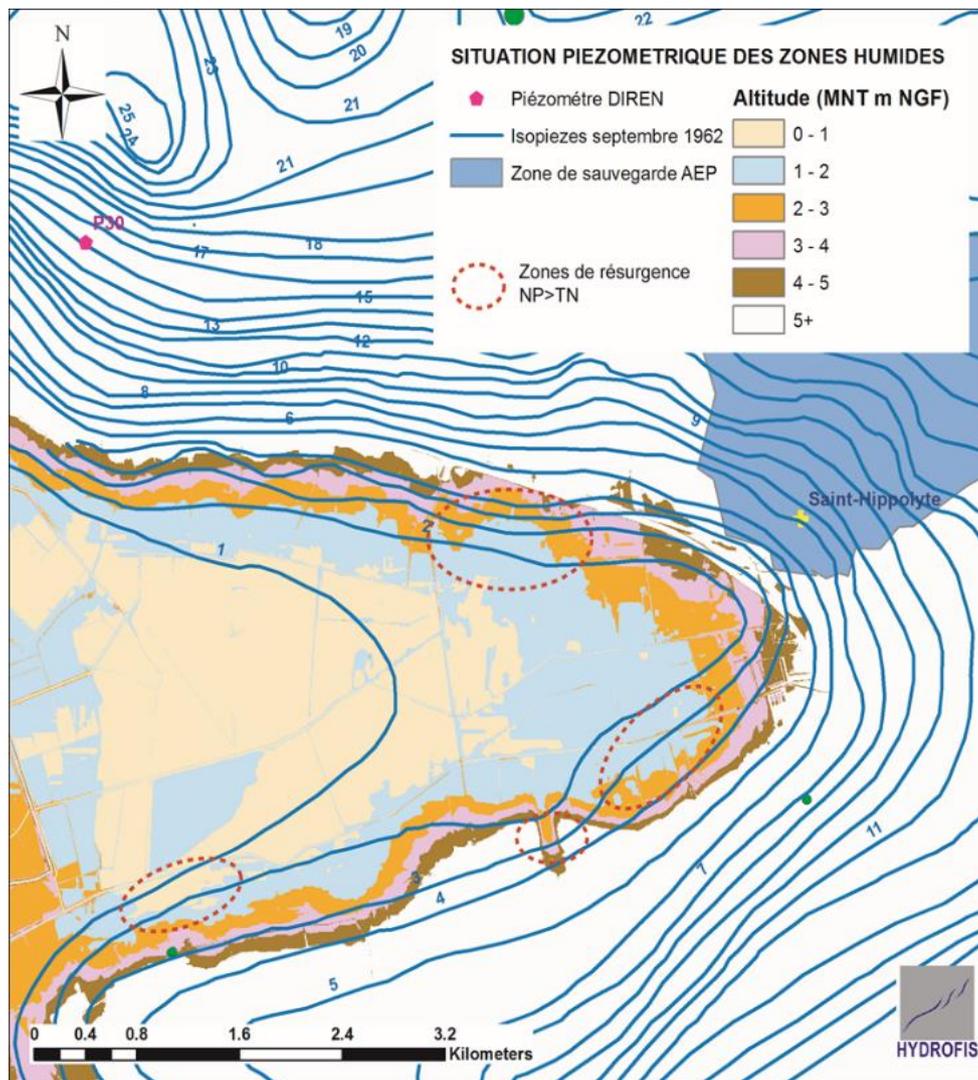
BRLi, d'après hydroportail



En sortie du marais, l'analyse des sondes mesurant en continu la hauteur d'eau (convertie en débit à l'aide des jaugeages réalisés à l'entrée de Meyranne), indique que le marais des Chanoines restitue environ 2 à 3 m³/s en été, contre 600 l/s en hiver.

Cette différence s'explique par un apport massif d'eau souterraine en permanence, avec un pic en été. Cette observation est cohérente avec la piézométrie qui est supérieure au terrain naturel sur plusieurs secteurs et alimente donc la zone humide par des résurgences mais également via des laurons et au travers de la drainance ascendante ailleurs.

Figure 3-66 : Chanoines – situation des isopiezies par rapport au terrain naturel





NIVEAUX D'EAU (ENNOIEMENT / ENGORGEMENT)

Ce site présente peu de superficie ennoyée à l'exception des laurons et de leurs abords.

Le terrain naturel (TN) semble engorgé en permanence comme l'attestent les relevés de végétation, tout comme le TN-1 comme l'attestent les sondages pédologiques. Ces éléments sont corroborés par la piézométrie (cf. ci-dessus). La majeure partie des sols de la zone d'étude sont caractérisés par des engorgements en eau permanent à très faible profondeur. Certains de ces sols sont caractérisés par la présence de tourbe et rattaché à des Histosols. A ce niveau, la cladiaie (habitat dominé par le Marisque *Cladium mariscus*) est dominante. D'autres sols sont rattachés à des Réductisols avec des gleys (G) débutant à 20 cm. A l'Est, les sols sont rattachés à des Fersisols rédoxiques. Les conditions d'engorgement en eau à faible profondeur sont évaluées comme temporaires.

Figure 3-67 : Superficie concernée par un engorgement quasi-permanent à TN-1 d'après les sondages pédologiques

CHANOINE



Source : BRL, HYDROFIS, O2TERRE
Fond : IGN 2020
Rédaction : BRL 22/11/2022
Ref. étude BRL : A00772

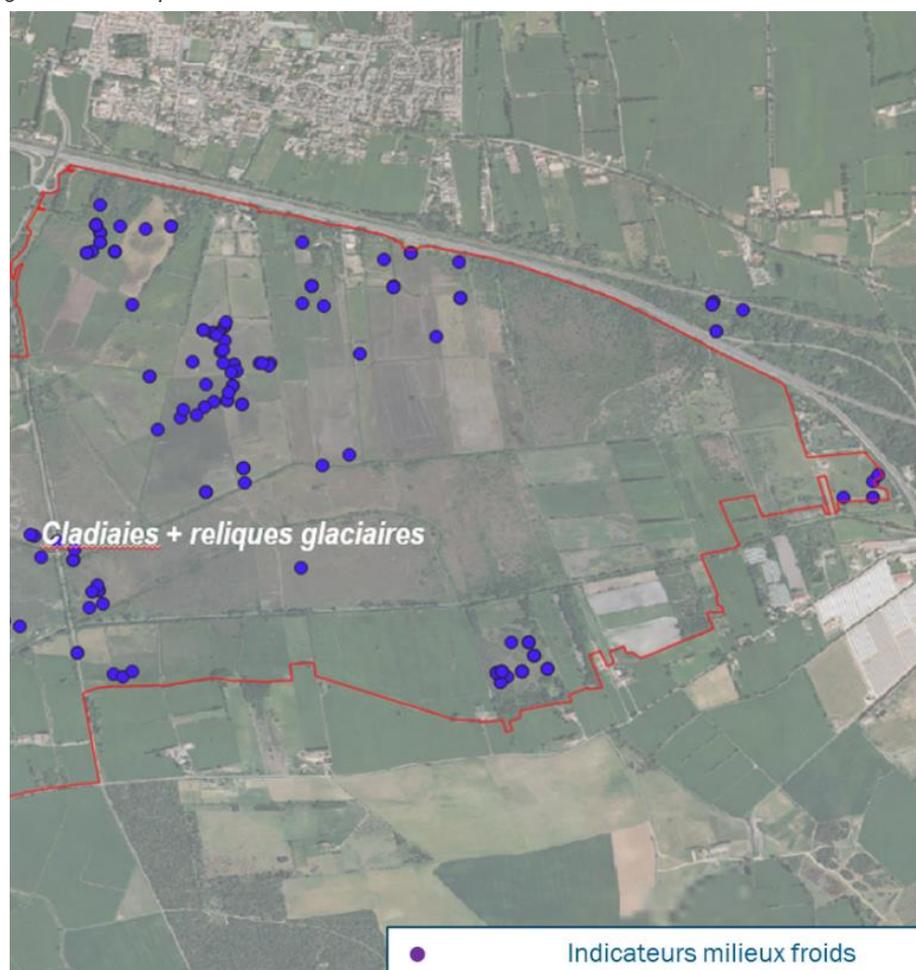




INDICATEURS FLORE ET HABITATS

La végétation est dominée par les groupements typiques des marais froids, avec des mosaïques de cladaïes à Marisque et différents faciès de prairies humides (prairies à Molinie, formations à Choin noir...). La pression pastorale joue un rôle important dans l'organisation de la végétation. Les fragments de cladaïes s'observent principalement aux abords des laurons clôturés pour la protection du bétail. S'y maintiennent de nombreuses espèces typiques des eaux fraîches, dont quelques pieds de Gentiane des marais, espèce emblématique des marais froids de Crau, associée à la Fougère des marais ou au Mouron délicat. C'est dans ce marais qu'était encore cité dans les années 1970 le Liparis de Loesel, considéré aujourd'hui comme disparue, mais dont la mention témoigne de l'intérêt floristique exceptionnel de ce site. Le marais du Petit Beyne, au sud du canal de la Chapellette, accueille des mosaïques de cladaïes et prairies humides pâturées avec une intensité plus faible.

Figure 3-68 : Répartition des indicateurs de milieux froids et frais sur le marais des Chanoines





3.4.4 Évolution future

Comme indiqué précédemment l'arrêt du fonctionnement de la station hydrométrique de la Chapelette prive ce site d'un bilan hydrologique complet. Les impacts sur le fonctionnement de la zone humide et sur la distribution des habitats et espèces végétales présentés dans le tableau ci-dessous constituent donc une appréciation à dire d'experts.

Tableau 3-4 : Évolution potentielle du marais des Chanoines selon les différents scénarios retenus

SITUATION ACTUELLE	SCENARIO 1 (CHANGEMENT CLIMATIQUE)	SCENARIO 6 (CHANGEMENT CLIMATIQUE ET REDUCTION DE 30% DES APPORTS D'EAU D'IRRIGATION DEPUIS LA DURANCE)	SCENARIO 7 (CHANGEMENT CLIMATIQUE ET SUPPRESSION TOTALE DES APPORTS D'EAU D'IRRIGATION DEPUIS LA DURANCE)
<ul style="list-style-type: none"> - Abondance des espèces liées aux eaux froides. Exutoire de la nappe de la Crau. - Nombreux laurons et résurgences. Croisement de la nappe avec la TN. - Pas d'engorgement (ou très localisé) mais TN engorgé de manière quasi-permanente. - Importante épaisseur de tourbe. 	<ul style="list-style-type: none"> - Probablement similaire à la situation actuelle : - Apport des eaux souterraines diminue de 10 % et baisse piézométrique négligeable ; - Conservation des flux d'eaux superficielles. 	<ul style="list-style-type: none"> - Réduction des flux d'eau souterraine d'environ 40% et baisse piézométrique potentiellement infra-métrique ; - Baisse significative des « arrivées » d'eau agricole (bout du réseau) ; - Coupure de toutes les alimentations latérales hautes (sources latérales de débordement), pertes de certains laurons, conservation du flux d'alimentation par drainance. - Probable maintien de l'engorgement permanent à TN-1 et potentiellement au niveau du terrain naturel dans les parties les plus basses. - Maintien de la signature des milieux froids dans les zones bénéficiant des apports par drainance, dans les parties les plus basses 	<ul style="list-style-type: none"> - Réduction du flux nappe d'environ 75% et baisse piézométrique de l'ordre du mètre ; - Probable maintien du caractère humide (TN-1 reste engorgé) mais probable dessèchement de l'horizon superficiel (entre TN et TN-1). - Réduction du caractère humide froid (colmatage des laurons, assèchement de la partie superficielle du marais) - Evolution vers des prairies humides puis saulaies, avec possible maintien de laurons vers l'aval du marais



3.5 MEYRANNE

3.5.1 Contexte

Le marais de Meyranne correspond à la partie aval des marais de Raphèle. Il s'étend sur près de 700 ha. Il constitue l'exutoire du marais des Chanoines dont il reçoit les apports principaux par les canaux du Chalavert et de la Chapelette. Il constitue également l'exutoire de la nappe des cailloutis de Crau et présente également des laurons moins nombreux que sur Chanoines.

Son altitude moyenne est d'environ 1,2 mNGF. La bordure sud est légèrement surélevée (altitude : 3 m). La partie centrale du marais présente une altitude moyenne d'1 m environ.

Il fait partie du site Natura 2000 des trois marais et présente de vastes surfaces en eau.

Les parcelles du Conservatoire du littoral situées au centre du site sont gérées par les amis du Vigueirat qui assurent une gestion hydraulique favorable à l'avifaune et disposent de sondes de niveaux d'eau. De manière générale, le site fait l'objet d'une gestion hydraulique active et différenciée selon les compartiments.

La zone humide est très compartimentée et les circulations d'eau superficielles sont complexes. Son espace de fonctionnalité est vaste.

Figure 3-69 : Photo aérienne du marais de Meyranne





3.5.2 Compréhension, hypothèses et questions formulées en début d'étude

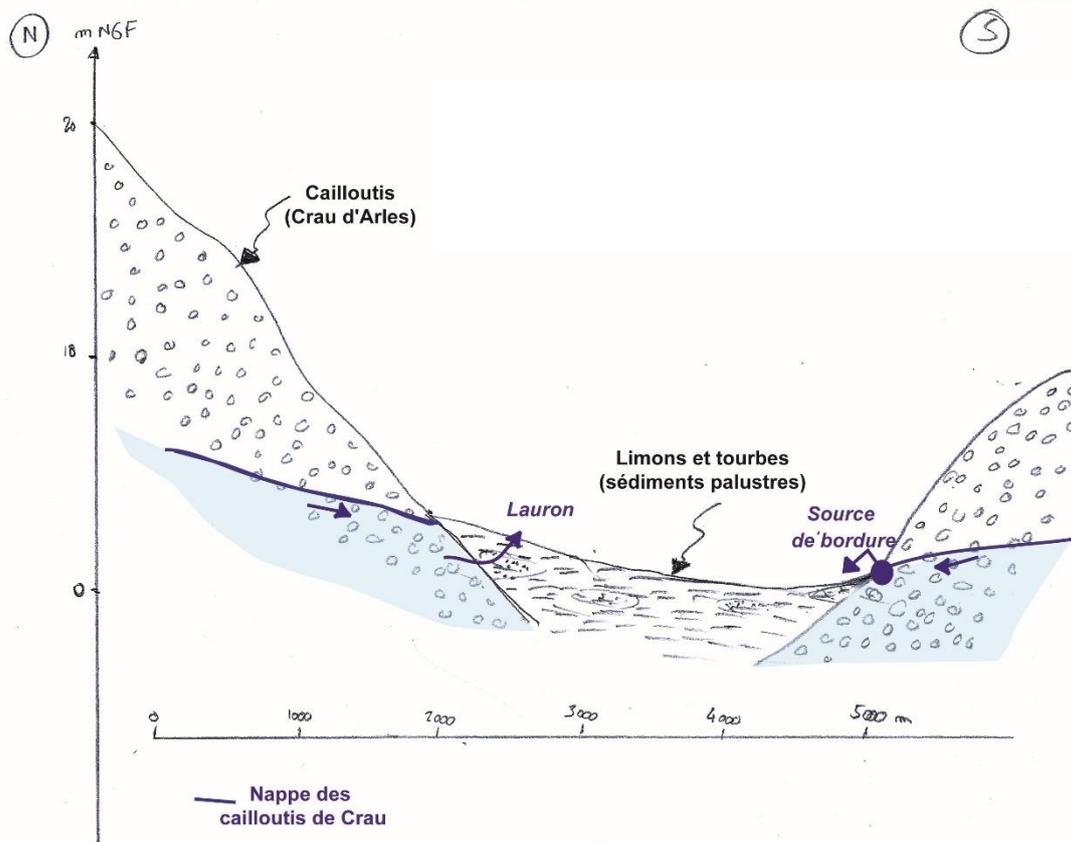
La zone humide repose sur les sédiments quaternaires qui viennent en recouvrement des cailloutis de Crau. Il s'agit principalement de sédiments palustres réputés peu perméables.

D'un point de vue hydrogéologique, les sédiments quaternaires sont peu perméables ; l'alimentation de la zone humide peut se faire deux manières : par des sources de bordure au contact avec les cailloutis de Crau ou par des Laurons.

En l'état des connaissances en début d'étude, le fonctionnement hydrologique du site est perçu comme très complexe, mêlant tous les types d'alimentation (pluvial, canaux, compartimentation, résurgences et contact de la nappe sous la zone humide). Plusieurs questions se posent :

- Quelle est la nature et l'épaisseur des sédiments palustres ?
- Quelle est la relation entre niveau de nappe dans les cailloutis de Crau et débits des sources et laurons ?
- Quelle est l'origine de l'eau drainée par le réseau superficiel ?
- Quelle est l'influence géographique des canaux ?

Figure 3-70 : Schéma de la géologie du marais de Meyranne selon une coupe nord sud



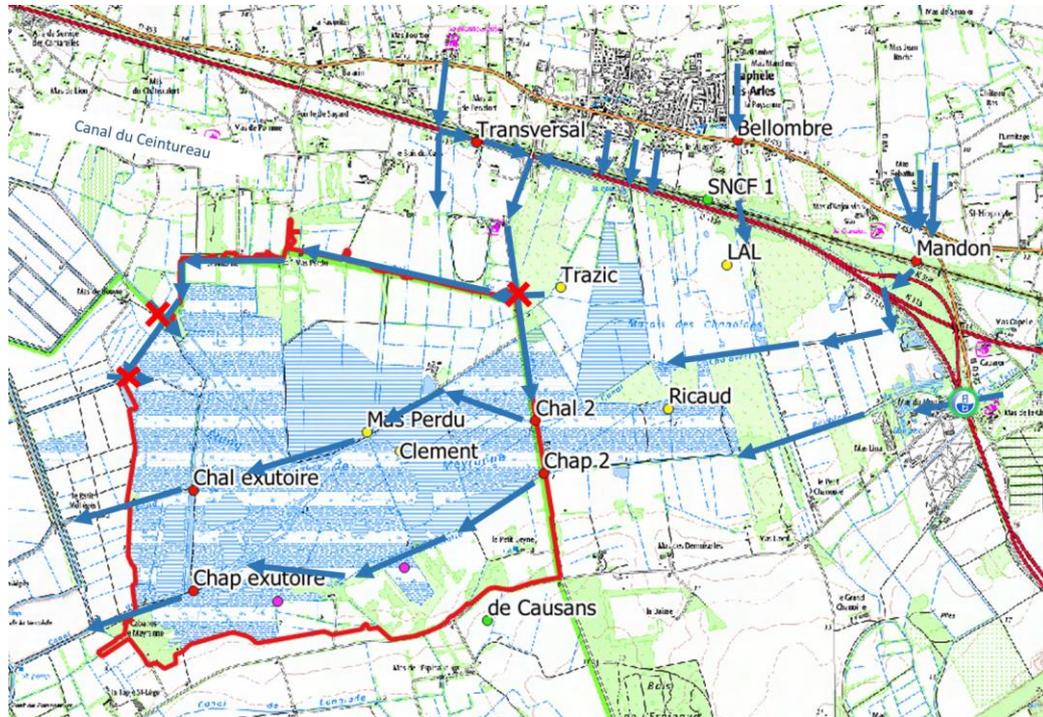


3.5.3 Fonctionnement actuel

FLUX D'EAU

Les principaux flux entrants d'eau superficielle sont représentés dans la carte ci-après.

Figure 3-71 : Localisation des principaux flux entrants d'eau superficielle sur le marais des Meyranne

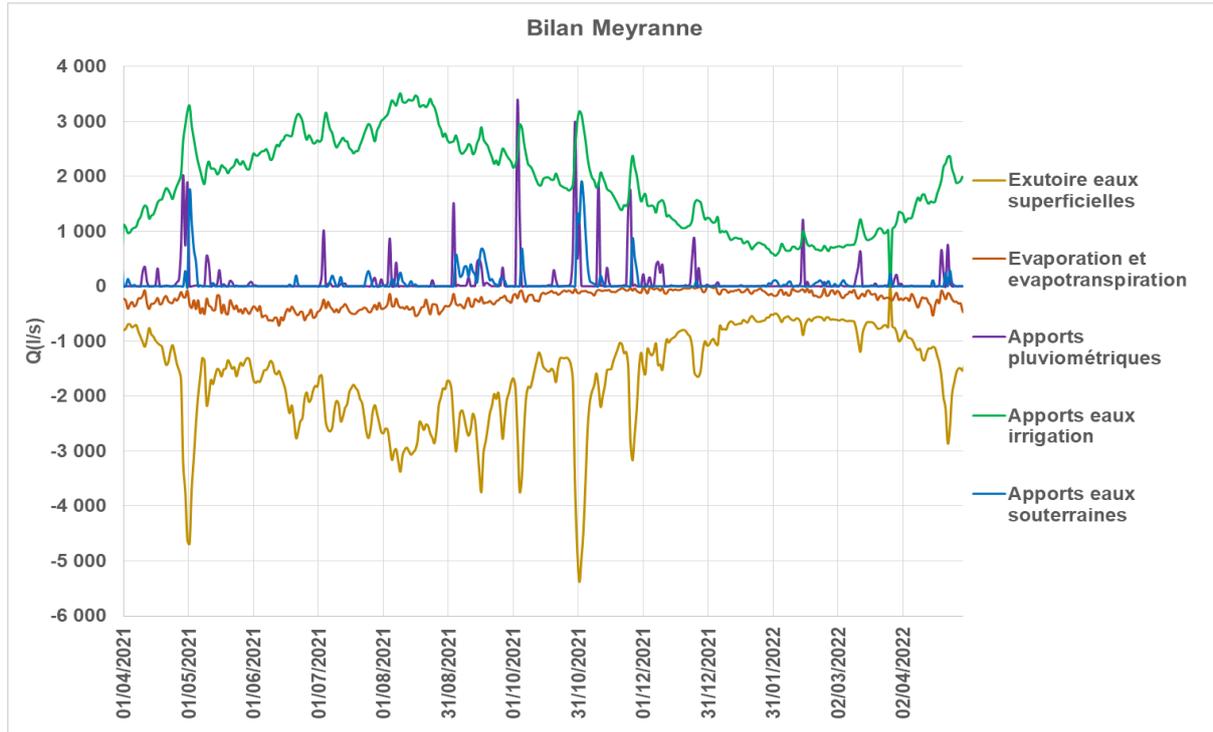


Les données collectées permettent d'obtenir la variation temporelle des flux entrants et sortant de avril 2021 à avril 2022 (cf. graphique ci-dessous).

Le graphique suivant présente un bilan des flux à l'échelle du marais de Meyranne. Les flux d'eau de surface entrant et sortant du marais correspondent aux écoulements des canaux du Chalavert et de la Chapelette. A l'échelle du marais, les écoulements des canaux sont prédominants par rapports aux autres termes du bilan. Or, l'eau des canaux du Chalavert et de la Chapelette traverse le marais d'est en ouest et contribue peu à l'alimentation effective du marais.

Le bilan présenté sur la figure suivante est donc à considérer avec des pincettes.

Figure 3-72 : Flux d'eau entrants et sortants sur le marais de Meyranne



Ce bilan montre que :

- L'alimentation principale de la zone humide se fait principalement à partir des eaux de surface. Les débits d'apport des eaux souterraines sont faibles (quelques centaines de l/s en moyenne) ; c'est un résultat conforme aux connaissances acquises dans le programme de recherche SINERGI qui avait montré que la vidange de la nappe intéresse plutôt les marais de Chanoines que ceux de Meyranne et que les flux d'alimentation en eau souterraine sur Meyranne seraient limités à sa bordure Sud (cf. carte ci-dessous). Ceci étant dit, le signal superficiel intègre ici les eaux de nappe. Comme cela a été démontré sur le site des Chanoines, la zone humide gagne entre 200 l/s à 1,2 m³/s entre les entrées et les sorties en hiver (400 l/s en été). Ces apports rejoignent l'entrée de Meyranne par les canaux du Chalavert et de la Chapelette. Par ailleurs, l'influence géographique des canaux sur les niveaux d'eau est relativement modeste (casiers ennoyés) par rapport à la superficie globale de la zone humide. Les eaux souterraines jouent bien un rôle important voire prépondérant vis-à-vis de l'engorgement du TN et TN-1.
- Le flux sortant principal correspond aux eaux superficielles (qui intègrent le signal souterrain en provenance de Chanoines) au niveau de l'exutoire de la zone humide ;
- L'évaporation à la surface de l'eau, l'évapotranspiration et les apports depuis la nappe sont des phénomènes secondaires en termes de flux.

Notons que les estimations de débit concernant les eaux souterraines doivent cependant être considérées comme peu fiables. Rappelons qu'elles sont déduites de la soustraction entre les termes entrants mesurés du bilan (eaux superficielles et pluies) et les termes sortants mesurés (eaux superficielles) ou estimés (évaporation et évapotranspiration). L'ordre de grandeur du flux souterrain se situe dans la marge d'erreur des mesures de débits des canaux.

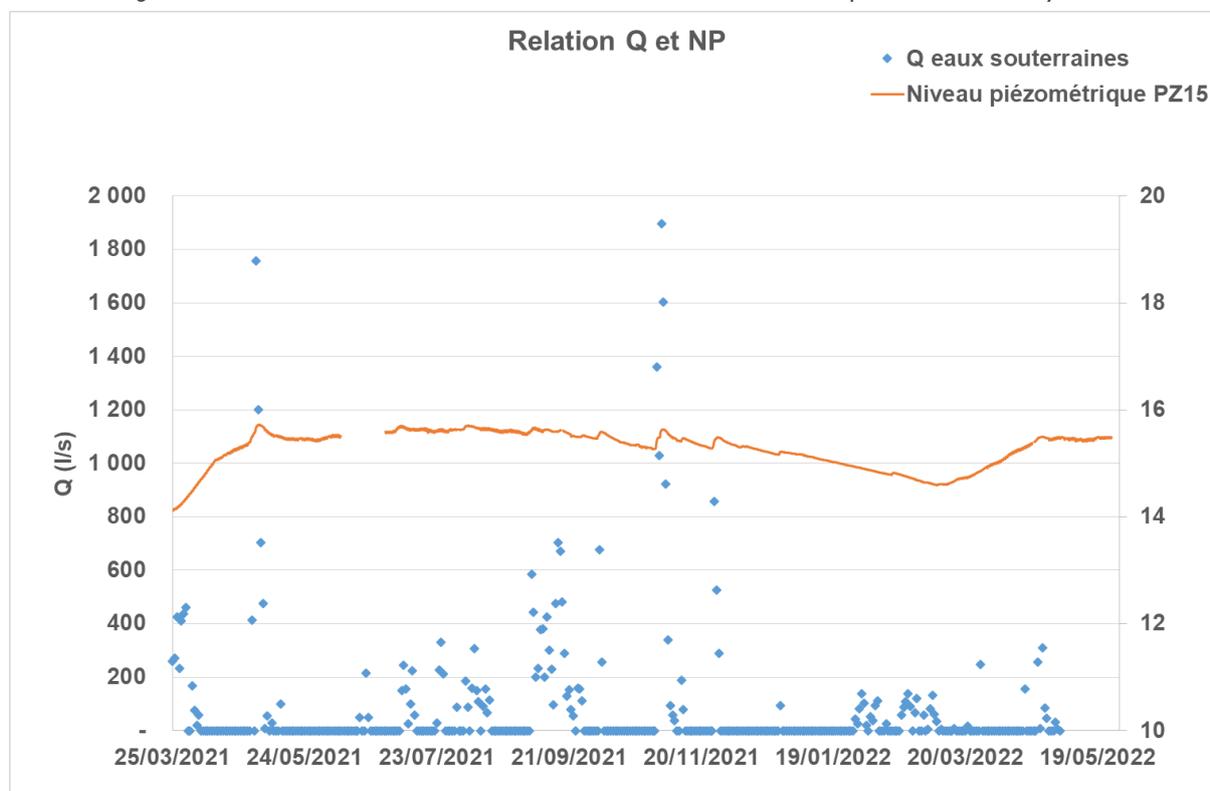
Le graphique ci-dessous montre le caractère de ces estimations et leur absence de corrélation avec le piézomètre de référence des variations de niveaux de nappe en amont de la zone humide.

Cette difficulté à obtenir une estimation fiable des débits d'alimentation peut être expliquée de deux façons :



- Le débit réel d'alimentation de la zone humide par les eaux souterraines est probablement inférieur à l'erreur de mesure sur les débits relatifs aux eaux superficiels, qui sont très importants dans cette zone humide ;
- Étant relativement faibles, ces débits sont « gommés » par les phénomènes de stockage et déstockage des eaux souterraines dans la zone humide.

Figure 3-73 : Relation entre le débit estimé des eaux souterraines et la piézométrie sur Meyranne



À partir de ces données de flux, il est possible de proposer les bilans suivants :

- Bilan sur l'ensemble de la période avec des données de flux disponibles : avril 2021 – avril 2022 ;
- Bilan mensuel ;
- Bilan d'un mois représentatif de la situation estivale : août 2021 ;
- Bilan d'un mois représentatif de la situation hivernale : mars 2022.

Les figures ci-après montrent que les volumes entrants en eau superficielle dans les canaux sont supérieurs aux volumes sortants. De plus, l'ETP n'est pas compensée par les apports en eau souterraine.

Nous attirons l'attention du lecteur sur le fait que les figures suivantes ne présentent pas toutes la même échelle en ordonnée.



Figure 3-74 : Bilan des flux sur la période avril 2021 – avril 2022

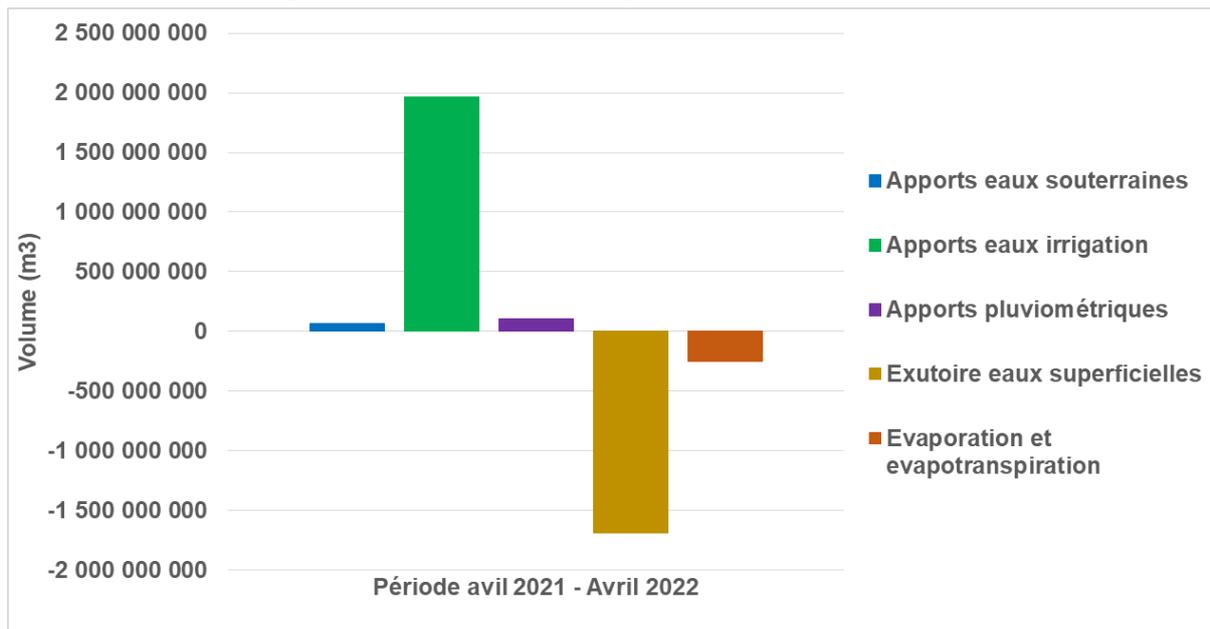


Figure 3-75 : Bilan des flux mensuels

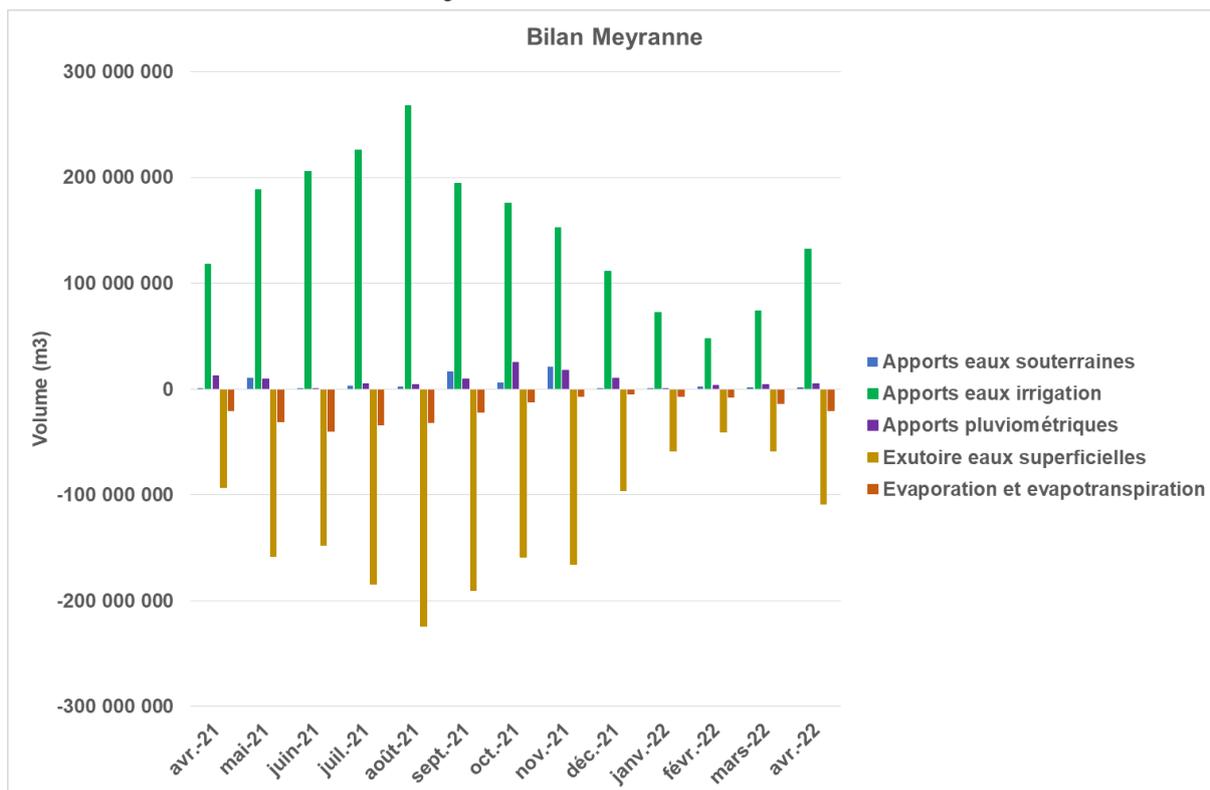




Figure 3-76 : Bilan des flux - Août 2021

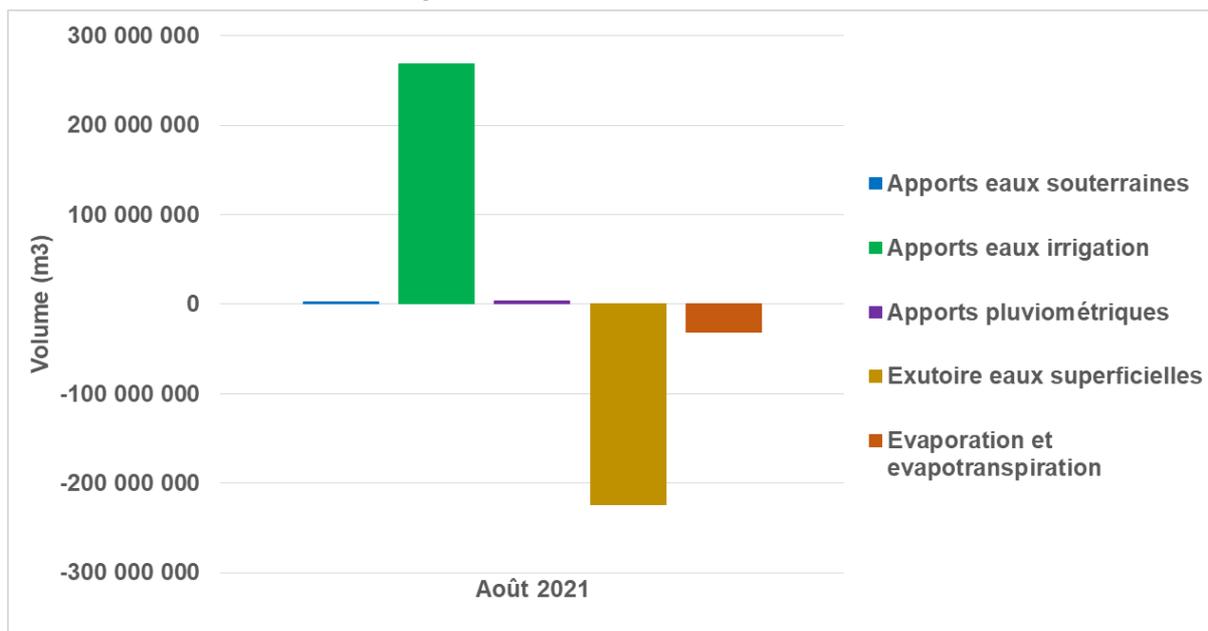
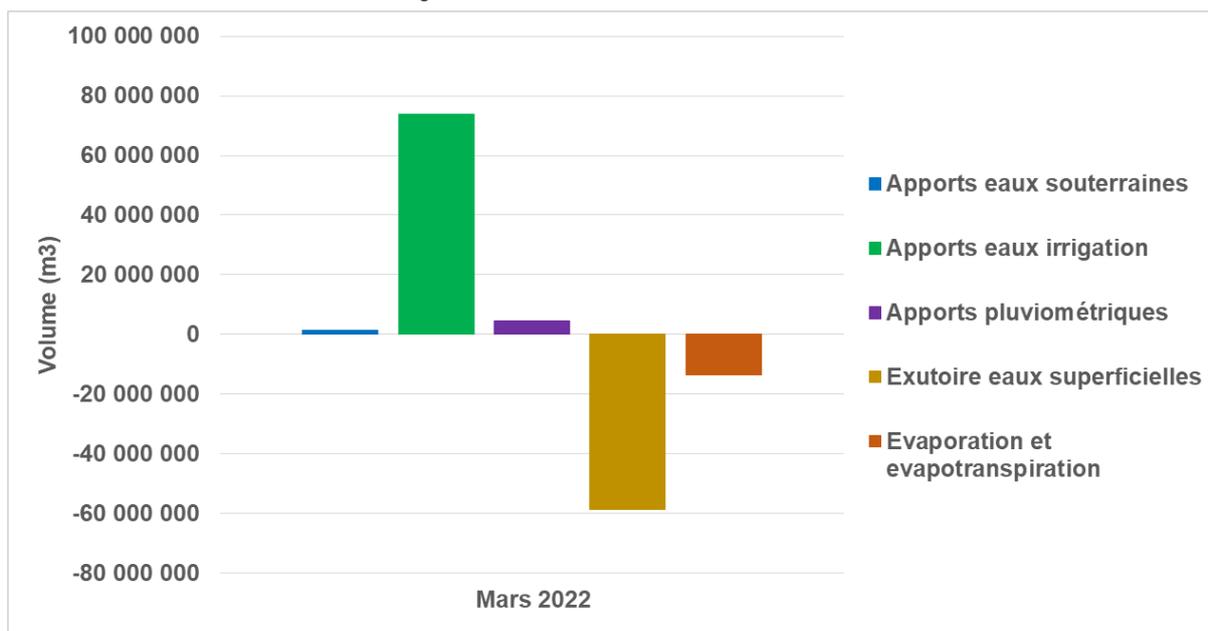


Figure 3-77 : Bilan des flux - Mars 2022





NIVEAUX D'EAU (ENNOIEMENT / ENGORGEMENT)

Ennoiement superficiel

Les informations présentées ci-après reposent sur :

- Des échanges avec l'Association des Amis du Vigueirat ;
- L'Etude sur le rôle de gestion hydraulique dans le maintien du fonctionnement des écosystèmes et des hydrosystèmes sur certains sites du Conservatoire du littoral. Tour du Valat, 2021.

Le marais de Meyranne présente de nombreux bassins dont l'alimentation peut être réalisée de façon artificielle à partir des canaux du Chalavert et de la Chapelette. Par ailleurs, le site présente des ennoiements superficiels ponctuels (localisés principalement au sud du site).

La figure suivante illustre les alimentations artificielles possibles des différents bassins du marais de Meyranne.

Les terrains situés de part et d'autre de la route des Marais sont principalement occupés par des prairies humides et des cladaies. Sur ces terrains, aucune gestion de l'eau n'est réalisée (absence d'ouvrage ou ouvrages défectueux). Ceci est surtout vrai pour la partie ouest où se trouve la sonde "Clément".

En ce qui concerne les roselières qui se trouvent à l'ouest du site (2 bassins situés entre la Chapelette et le Chalavert et 1 autre bassin au nord du Chalavert), ces 3 bassins sont occupés par des roselières où l'AMV vise un niveau d'eau idéal d'environ 0,8 mNGF de début mars à mi-juillet pour la nidification des hérons paludicoles. Ces trois bassins disposent d'au moins une martelière d'un mètre de large et de petits ouvrages secondaires. Lorsque cela est possible, ces bassins sont alimentés en eau depuis le Chalavert. Sur un des deux bassins le plus au sud, il est possible de faire rentrer de l'eau depuis la Chapelette (ceci reste exceptionnel au printemps sauf épisode de pluie intense).

Sur le terrain où est installée la sonde Mas Perdu, une gestion similaire est effectuée par les chasseurs depuis le Chalavert.

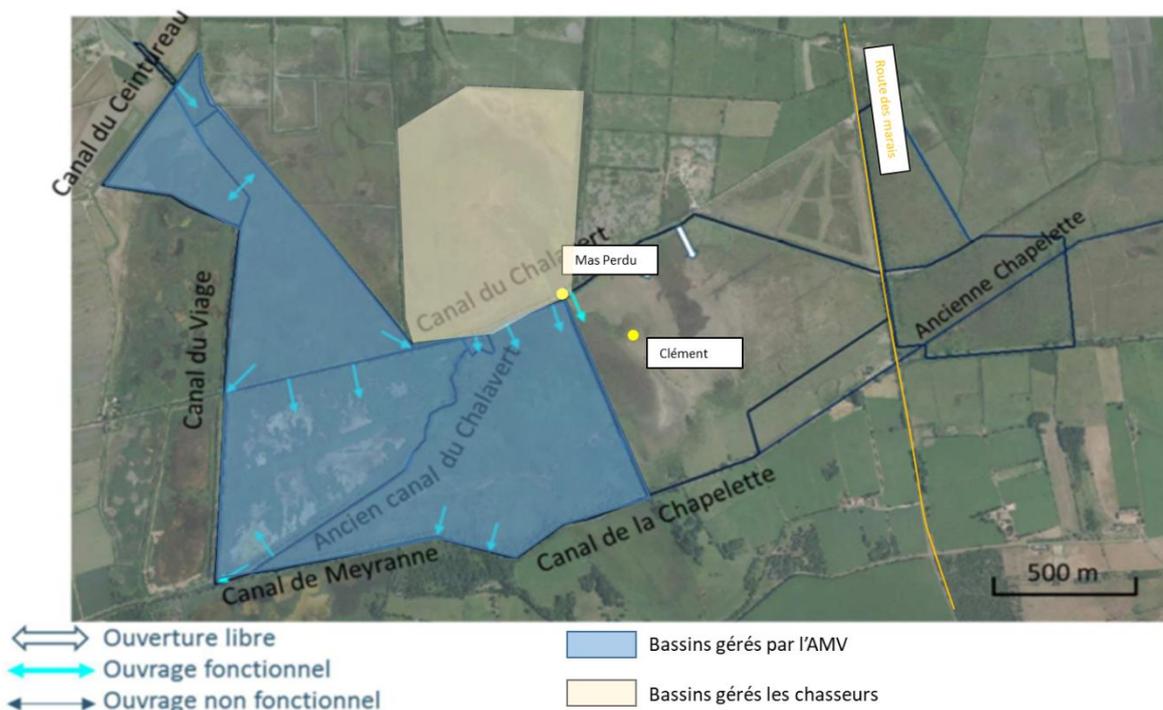
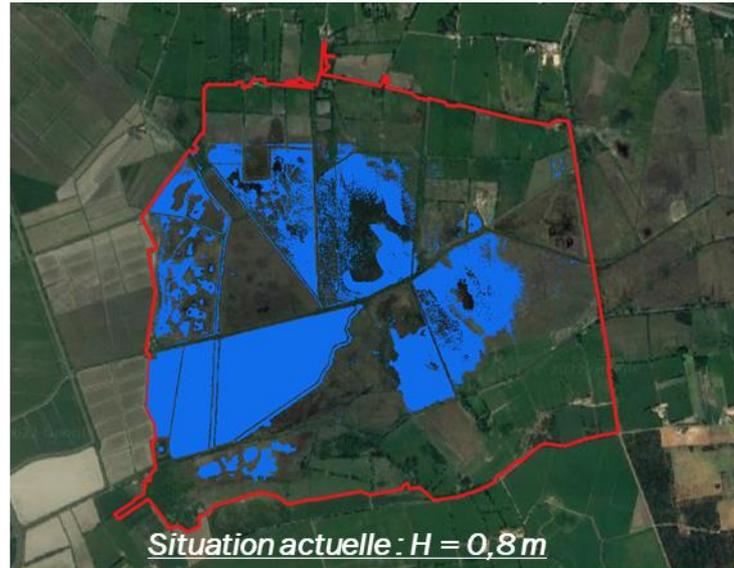




Figure 3-78 : Surface en eau lorsque $h = 0,80$ mNGF (condition remplie 20% du temps sur la période d'analyse)



La figure suivante présente la hauteur d'eau des sondes Mas Perdu et Clément entre avril 2021 et avril 2022.

Mas Perdu est représentatif de la gestion opérée par les chasseurs. Clément aurait un comportement en grande partie naturel. Les deux sondes se comportent de manières très différentes sauf en octobre et novembre 2021. En l'état des connaissances, nous n'avons pas d'explication à apporter à ces observations.

Figure 3-79 : Hauteurs d'eau des sondes Clément et Mas Perdu (en mNGF)





Engorgement au niveau du terrain naturel

Les relevés de végétation et la piézométrie indiquent que le TN semble être engorgé une grande partie de l'année au moins sur la partie centrale.

Engorgement au niveau du terrain naturel – 1 mètre

Les sondages pédologiques indiquent une importante épaisseur de tourbe et un engorgement permanent à TN – 1.

La tourbe se construit à partir de débris végétaux morts qui se transforment lentement, en conditions d'anaérobiose, en raison de son engorgement permanent ou quasi permanent.

L'origine de la tourbe est liée au processus d'atterrissement : les végétations hygrophiles et aquatiques s'installent sur les bordures, dans et au-dessus d'une zone en eau peu profonde, et comblent peu à peu de leurs débris le volume d'eau initial. D'après le Référentiel pédologique, l'estimation moyenne de croissance des histosols est de 0,5 à 1 mm·an⁻¹, pour un apport d'un centimètre de matières organiques fraîches. Les données bibliographiques (BRGM) attestent l'épaisseur de tourbe à une dizaine de mètres au niveau du marais de Meyranne. Cette information est cohérente avec l'estimation du début de processus d'atterrissement qui se sont développés à partir de 7000 à 5000 an avant la période Atlantique.

Figure 3-80 : Superficie concernée par un engorgement quasi-permanent à TN-1 d'après les sondages pédologiques



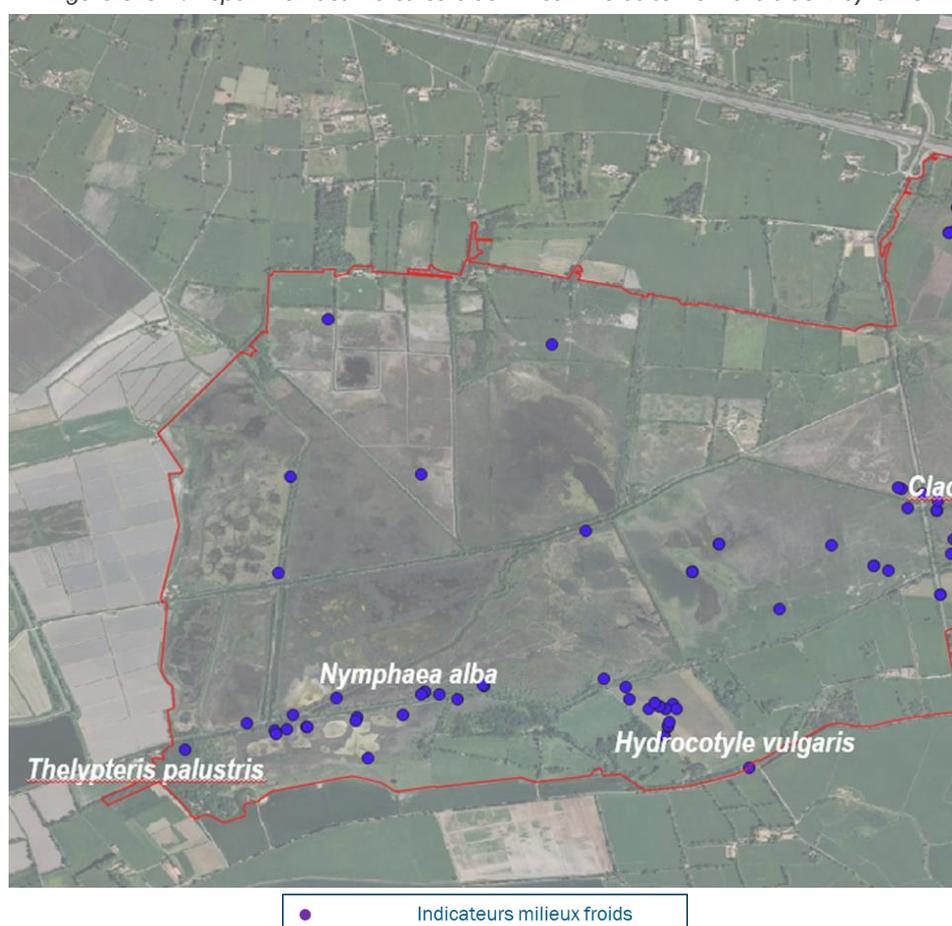


INDICATEURS FLORE ET HABITATS

L'organisation de la végétation est fortement influencée par la gestion pratiquée sur le site. L'enneigement périodique par les eaux de surface se traduit par le développement de grandes surface en eau localement occupées par des herbiers de Nénuphar jaune, et bordées de diverses ceintures hygrophiles : roselières à Roseau commun, Scirpaies à Scirpe lacustre, typhaies à Massette à feuilles étroites... Les ripisylves à Frêne et Peuplier blanc se développent dans les stations surélevées.

L'influence des eaux froides reste notable à l'ouest et au sud du marais de Meyranne, où elle est masquée par les activités agricoles (prairies) et par l'enneigement par les eaux de surface, favorables aux cortèges plus tempérés. Cette proximité de la nappe se manifeste notamment par le développement important de la fougère des marais dans les roselières, par l'apparition ponctuelle du Nénuphar blanc dans les Scirpaies et par l'abondance de l'Ecuelle d'eau dans les zones cultivées.

Figure 3-81 : Répartition des indicateurs de milieux froids sur le marais de Meyranne



3.5.4 Evolution future

EVOLUTION PIEZOMETRIQUE

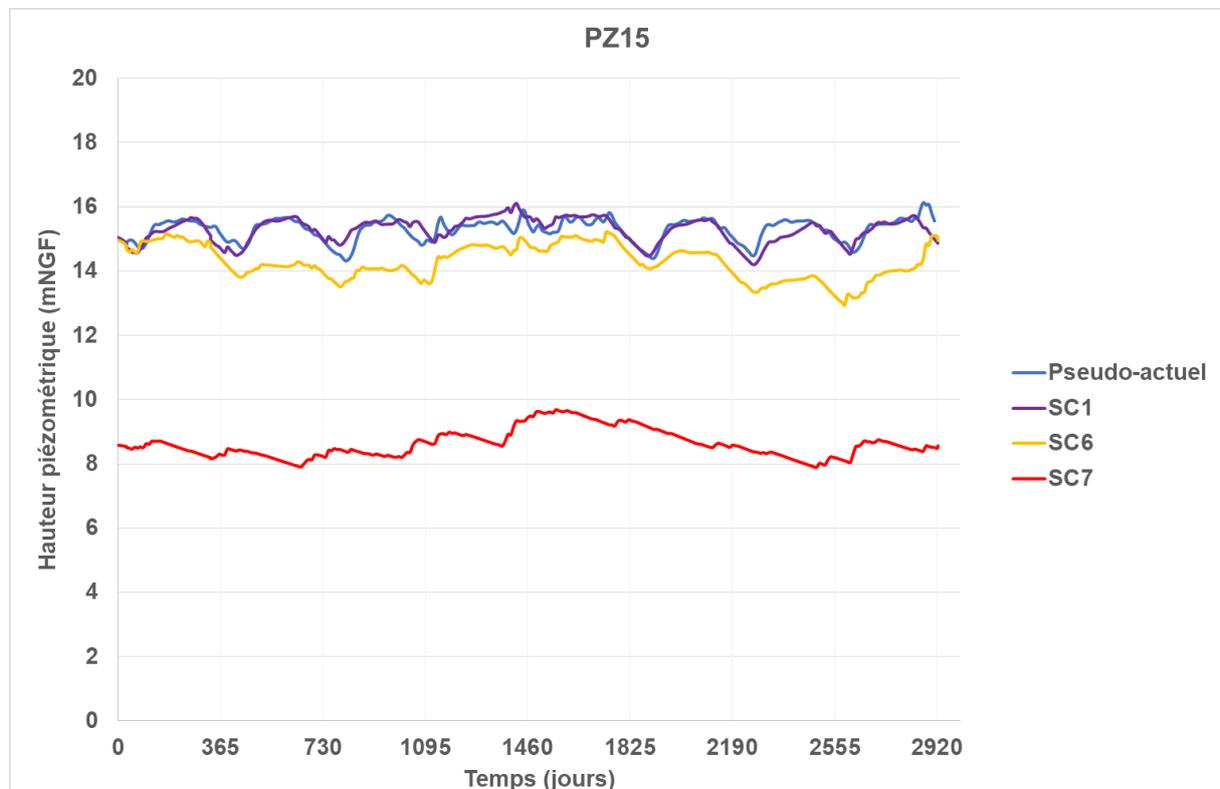
Les modélisations réalisées dans le cadre du projet de recherche SINERGI permettent d'estimer les variations de hauteur de nappe des cailloutis de Crau à proximité de la zone humide.

En prenant comme référence le PZ15 situé à l'amont de la zone humide, à proximité de Saint-Martin de Crau, on peut constater sur le graphe ci-dessous que le scénario 1 se traduira par l'absence d'impacts significatifs en termes de baisses piézométriques.



Les scénarios 6 et 7 se traduisent par contre par des baisses importantes, respectivement de 2 et 8 m.

Figure 3-82 : Hauteurs piézométriques mesurées dans la situation actuelle et évolution selon les scénarios SC1, SC6 et SC7



Il est difficile de quantifier précisément les impacts de ces baisses piézométriques sur le fonctionnement de la zone humide. En effet, rappelons que dans son fonctionnement actuel, les volumes colossaux d'eau superficielle alimentant la zone humide n'ont pas permis d'estimer précisément les volumes d'eau souterraine alimentant la zone humide.

Ceci étant, il est possible de qualifier l'impact de ces baisses piézométriques en raisonnant par gradient hydraulique. Rappelons que la zone humide affleure entre 1 et 3 mNGF sur les bordures. Toute chose égale par ailleurs, une baisse piézométrique de 2 mètres (SC6) devrait théoriquement se traduire par une diminution du flux d'alimentation par les eaux souterraines d'environ 30% ; selon cette même logique, une baisse de 8 m (SC7) impliquera théoriquement une diminution du flux d'alimentation par les eaux souterraines d'environ 60%.

Il reste délicat de qualifier spatialement les impacts de ces baisses de débit attendues. Il est cependant possible de proposer que ces baisses de flux impacteront les zones périphériques de la zone humide : on commencera probablement par assécher les sources de débordement latéral, puis les laurons les plus excentrés tariront.

IMPACT SUR LE FONCTIONNEMENT ET LES HABITATS

Les constats établis précédemment sont traduits en termes d'impacts sur le fonctionnement de la zone humide et sur la distribution des habitats et espèces végétales dans le tableau ci-dessous.



Figure 3-83 : Évolution potentielle du marais de Meyranne selon les différents scénarios retenus

SITUATION ACTUELLE	SCENARIO 1 (CHANGEMENT CLIMATIQUE)	SCENARIO 6 (CHANGEMENT CLIMATIQUE ET REDUCTION DE 30% DES APPORTS D'EAU D'IRRIGATION DEPUIS LA DURANCE)	SCENARIO 7 (CHANGEMENT CLIMATIQUE ET SUPPRESSION TOTALE DES APPORTS D'EAU D'IRRIGATION DEPUIS LA DURANCE)
<ul style="list-style-type: none"> - Reçoit les apports de Chanoines. - Ennoisement superficiel temporaire dans les compartiments proches des canaux. Principalement lié aux apports d'eaux superficielles par le canal du Chalavert. Gestion hydraulique pour maximiser l'enneisement entre avril et juillet, favorable pour l'avifaune. - Ponctuellement, ennoisement superficiel lié aux eaux souterraines via des laurons (surtout au sud). - Importante épaisseur de tourbe. Engorgement permanent à TN - 1 (altitude 1 m et exutoire de l'hydrosystème) - Influence des eaux froides notable à l'ouest et au sud du marais de Meyranne, où elle est masquée par les activités agricoles (prairies) et par l'enneisement par les eaux de surface, favorables aux cortèges plus tempérés 	<ul style="list-style-type: none"> - Quasi-similaire à la situation actuelle 	<ul style="list-style-type: none"> - Réduction des flux d'eau souterraine d'environ 30%. - Baisse du niveau d'eau dans les canaux ne permettant pas d'enneisement (hors période de crue) sans aménagement des martelières. En cas d'abaissement des martelières, possibilité d'envoyer un tiers de la superficie ennoyée actuellement. Impact sur herbiers de macrophytes flottants. - Maintien de l'engorgement et des laurons 	<ul style="list-style-type: none"> - Réduction du flux nappe d'environ 70%. - Colmatage des laurons - Disparition de l'enneisement superficiel par les apports du canal en période d'irrigation. Potentiellement possible uniquement en période en crue. - Assèchement possible de l'horizon superficiel (entre TN et TN-1).

3.6 COSTIERES DE CRAU

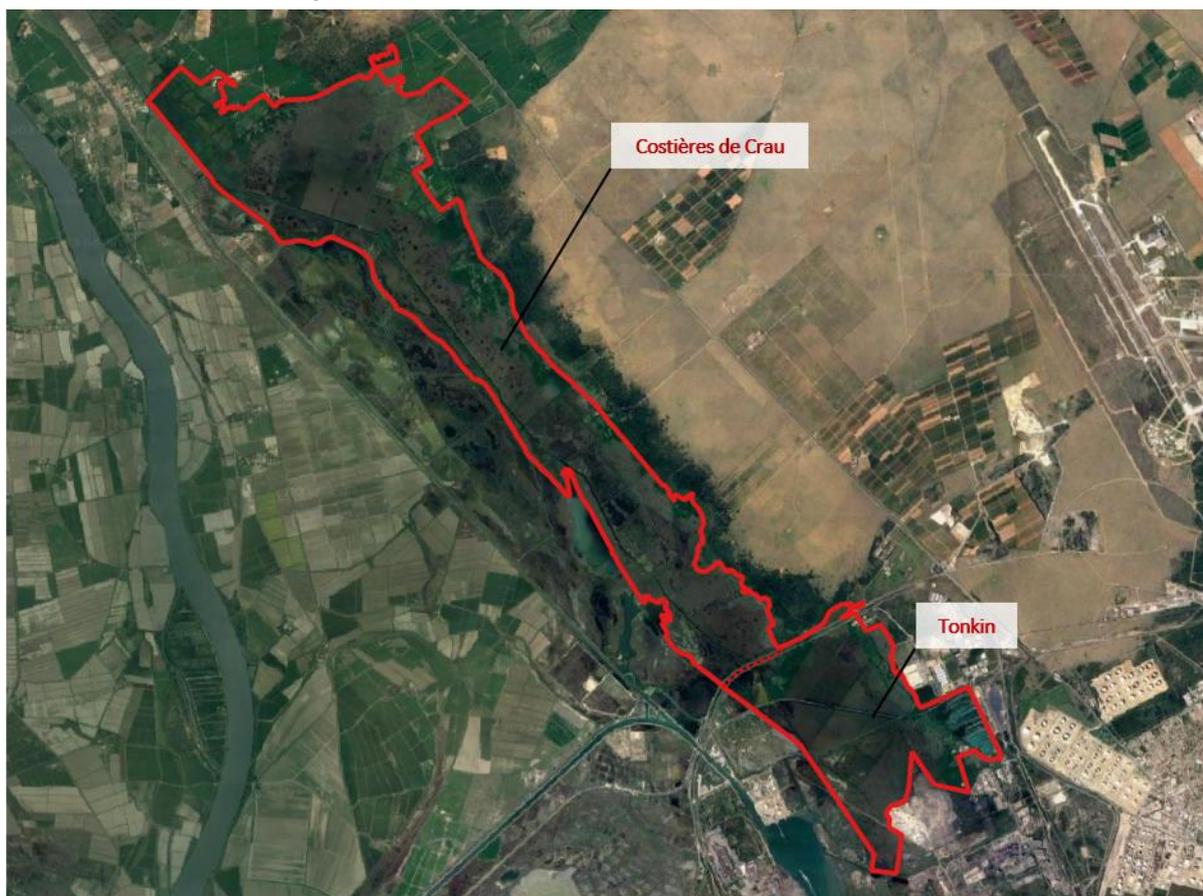
3.6.1 Contexte

La figure suivante présente l'emprise du marais des Costières de Crau retenue dans le cadre de l'étude. Il se situe au sud-ouest de la plaine de la Crau. Cette emprise comprend le marais des Costières de Crau à proprement parlé et celui du Tonkin. Ces deux entités sont déconnectées et présentent des fonctionnements différents. L'ensemble s'étend sur une superficie de 2 700 ha.

La topographie du marais est caractérisée par une pente d'orientation nord-est sud-ouest. Sur sa bordure nord-est, la zone humide présente une altitude de 2 à 3 mNGF. Elle varie entre 0,5 et 0,7 mNGF dans l'emprise du marais.

La zone humide est très compartimentée et les circulations d'eau superficielle sont complexes. Son espace de fonctionnalité est vaste.

Figure 3-84 : Photo aérienne du marais des Costières de Crau



3.6.2 Compréhension, hypothèses et questions formulées en début d'étude

La zone humide repose sur les sédiments (limons et tourbes) quaternaires qui viennent en recouvrement des cailloutis de Crau (Crau du Luquier). Il s'agit principalement de sédiments palustres réputés peu perméables (voir schéma ci-dessous).

D'un point de vue hydrogéologique, les sédiments quaternaires sont peu perméables ; l'alimentation de la zone humide peut se faire deux manières : par des sources de bordure au contact avec les cailloutis de Crau ou par des Laurons.

En l'état des connaissances en début d'étude, le fonctionnement hydrologique du site est perçu comme très complexe. Le marais des Costières de Crau est alimenté par les canaux de drainage (Centre Crau et Vigueirat par exemple), par les résurgences de la nappe de la Crau dont il constitue un des exutoires, ainsi que par les apports pluviaux. Notre compréhension initiale du fonctionnement du marais nous permet de penser que la nappe et les canaux jouent un rôle équivalent dans l'alimentation de la zone humide ; les proportions pouvant varier selon la période de l'année (météo, irrigation de la Crau, ...). De plus, une forte relation existerait entre la topographie du marais et l'alimentation de celui-ci par la nappe.

A cette complexité liée aux sources d'alimentation s'ajoutent :

- 1) la compartimentation importante du marais. Celle-ci se traduit par la présence de nombreux canaux et plans d'eau et l'existence d'un effet de vases communicants entre ces différents compartiments ;
- 2) le contrôle du débit sortant par le GPMM via le barrage du Galéjon ;

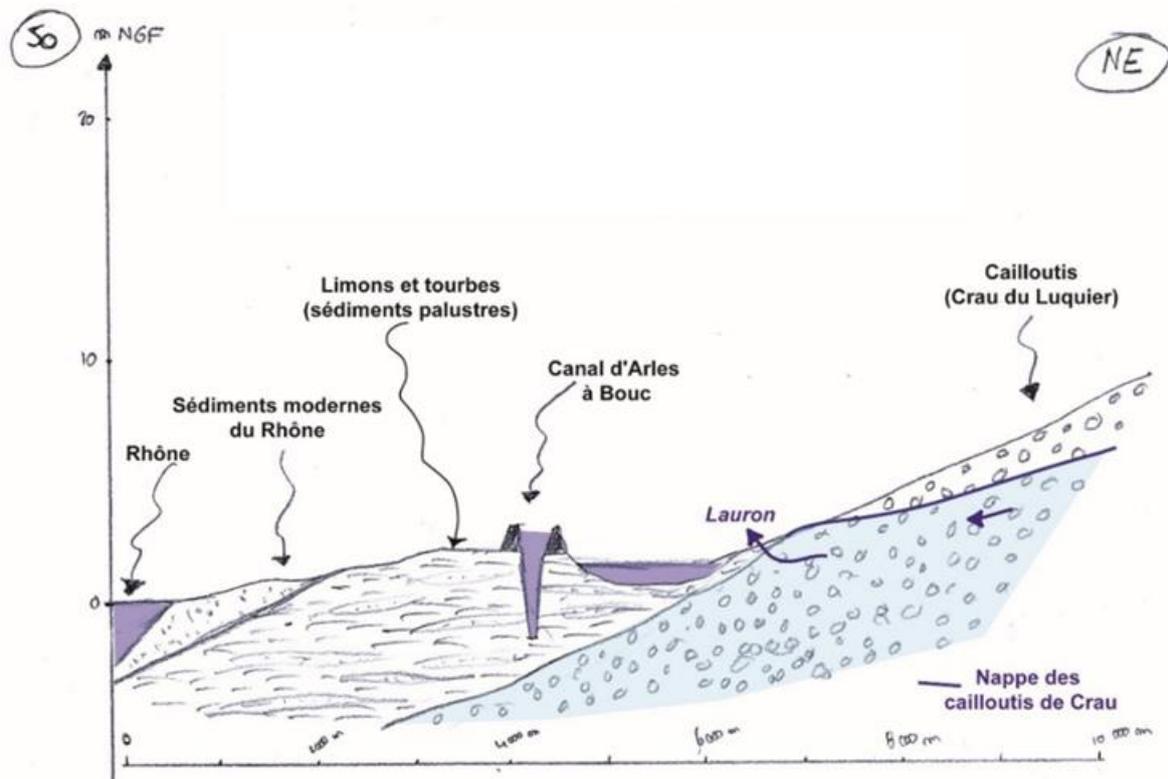


- 3) la présence du canal d'Arles à Bouc qui longe le marais sur sa bordure sud-ouest. Ce canal pourrait avoir des échanges avec le marais.

Cette première compréhension nous conduit à nous poser les questions suivantes :

- Les canaux drainent-ils la nappe ?
- Les canaux alimentent-ils la zone humide par débordement lors des épisodes pluvieux ?
- Quel degré de compartimentation du système ?
- Quelle épaisseur et quelle nature des sédiments palustres ?
- Quelle est la relation entre niveau de nappe dans les Cailloutis de Crau et débit des sources et laurons ?

Figure 3-85 : Schéma de la géologie du marais des Costières de Crau selon une coupe Nord-Est Sud-Ouest



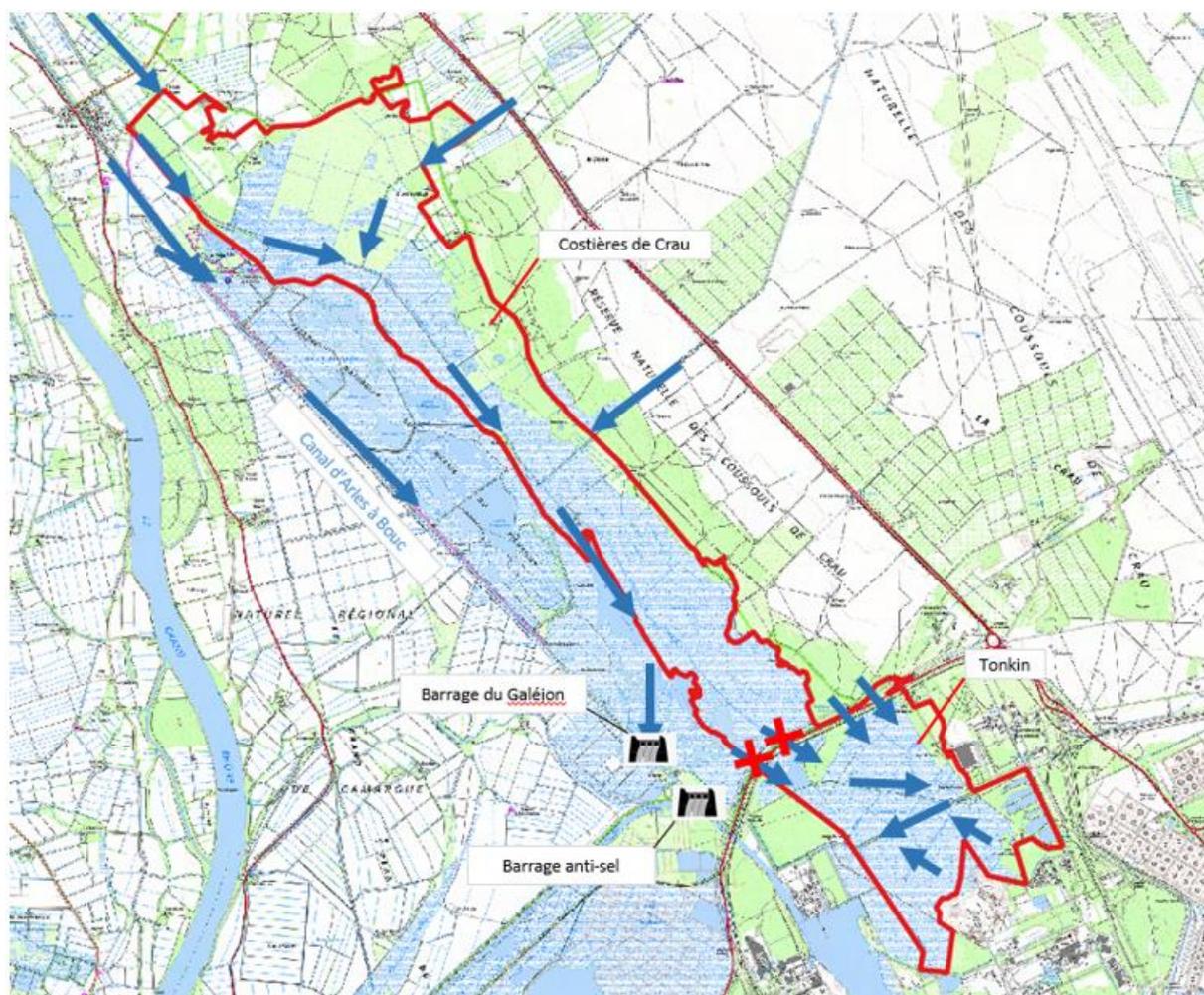
3.6.3 Fonctionnement actuel

FLUX D'EAU

Les principaux flux entrants d'eau superficielle sont représentés sur la carte ci-après.



Figure 3-86: Localisation des principaux flux entrants d'eau superficielle dans les marais des Costières de Crau et du Tonkin



Une analyse détaillée des flux et du fonctionnement des marais n'a pu être réalisée et ce, pour plusieurs raisons. Nous détaillons ces raisons ci-après.

Difficultés dans l'établissement d'un bilan des flux

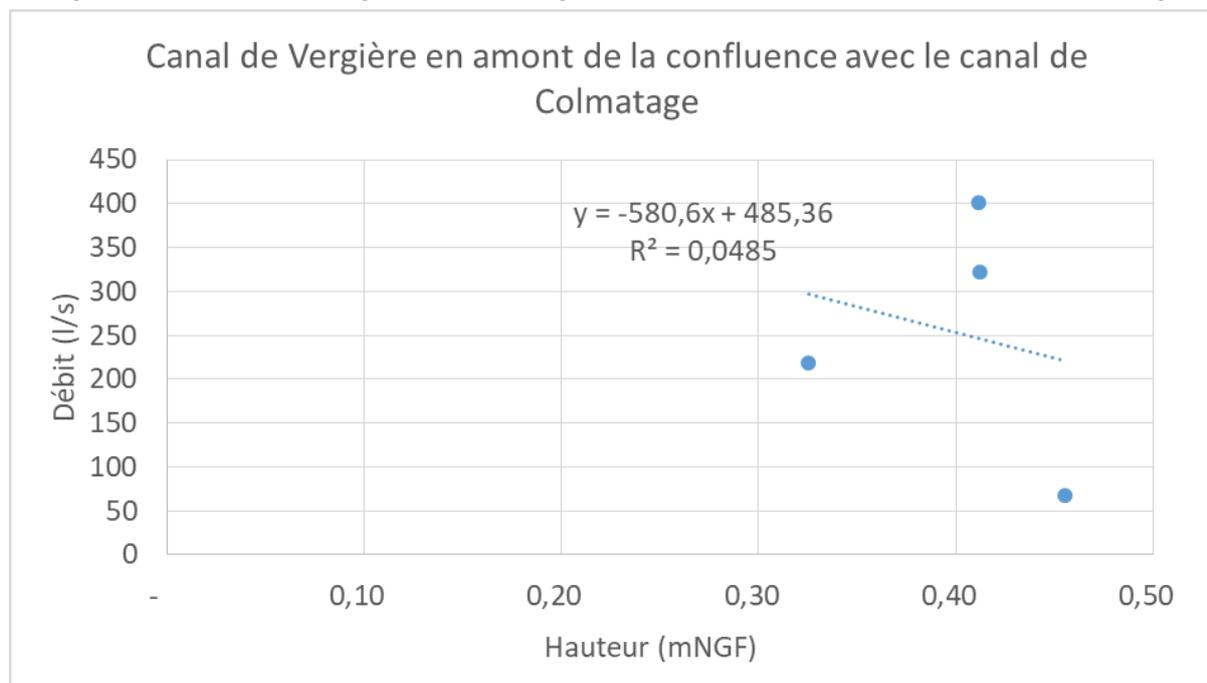
L'annexe 2 de ce rapport rappelle le système de suivi mis en place afin de suivre et quantifier les flux dans les marais des Costières de Crau et du Tonkin. Rappelons qu'un suivi du débit a été envisagé :

- En amont et en aval du canal d'Arles à Bouc afin de caractériser les potentiels échanges avec le marais ;
- En 7 sites du marais des Costières de Crau afin de caractériser les flux entrants, la circulation de ces flux dans le marais et le flux sortant du marais ;
- En 3 sites du marais du Tonkin afin de caractériser les flux entrants et sortants.

Les données obtenues à l'issue du protocole de suivi ne nous ont pas permis d'établir des courbes de tarage pertinentes pour la majorité des sites suivis. La figure suivante illustre un exemple de courbe de tarage obtenue.



Figure 3-87 : Courbe de tarage du canal de Vergière en amont de la confluence avec le canal du Colmatage



Bien qu'inutilisable pour les besoins de l'étude, les courbes de tarage obtenues et similaires à celle présentée ci-dessus nous renseignent sur la complexité des écoulements du marais. En effet, ce type de courbe de tarage nous indique une absence de relation entre la hauteur d'eau et le débit mesuré. Pour une même hauteur d'eau, nous pouvons mesurer des débits différents.

90

L'influence du barrage du Galéjon et de façon indirecte, celle du barrage anti-sel, sur la régulation des débits sortants du marais pourrait expliquer en partie ce phénomène. Ces deux barrages sont constitués de vannes et clapets dont la variation de hauteur varie en permanence en fonction de la hauteur d'eau de la mer et de celle du canal d'Arles à Bouc. En régulant le débit sortant du marais des Costières de Crau, ces deux ouvrages font varier artificiellement la répartition de l'eau dans le marais, indépendamment des flux entrants. Les écoulements dans le marais des Costières de Crau n'est plus naturel. A cette explication s'ajoute le rôle de zone tampon des zones humides que comprend le marais ; ces zones humides pourraient réguler les écoulements. Les gestionnaires indiquent par ailleurs que le vent pourrait également contribuer à déplacer les masses d'eau.

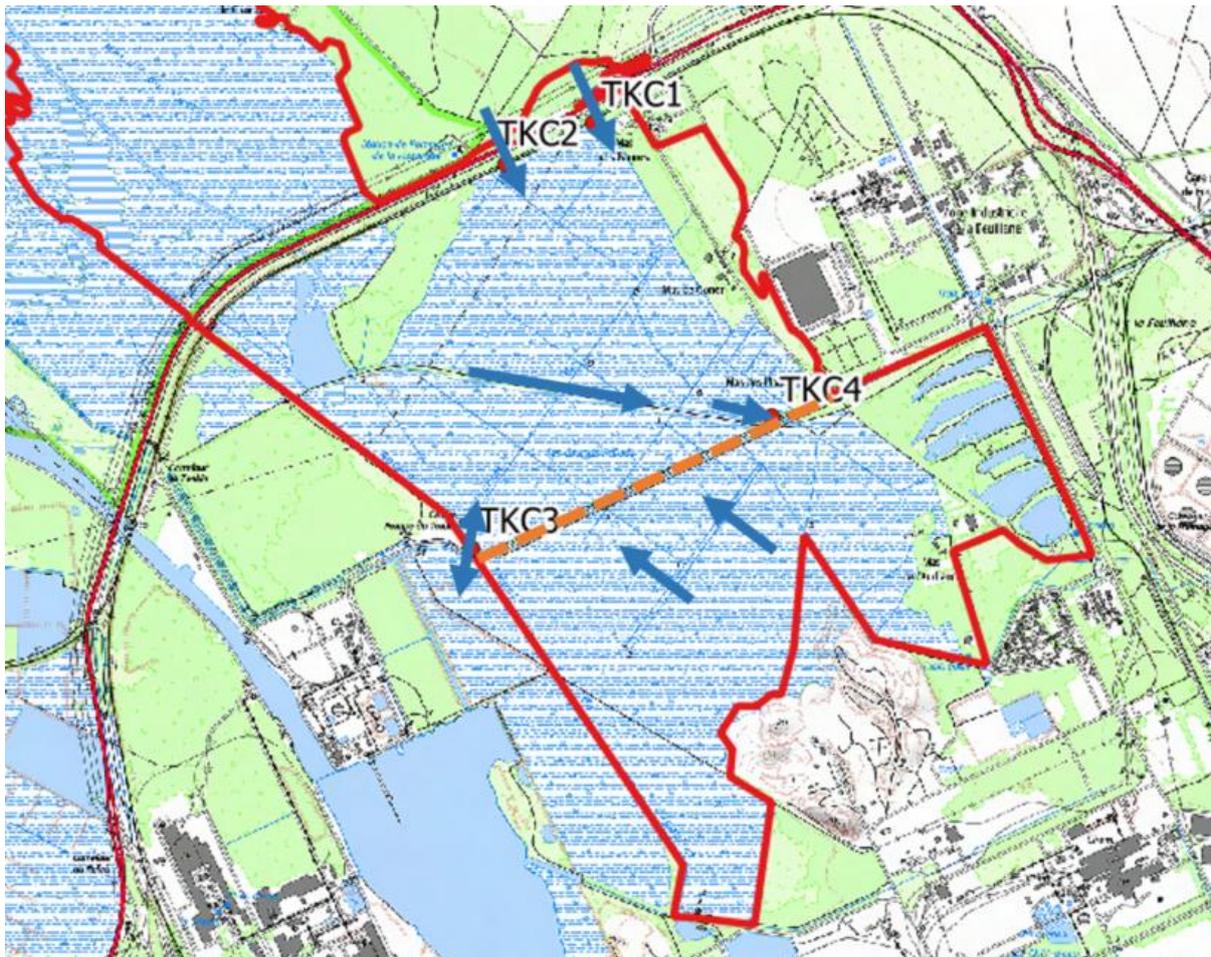
Enfin, le protocole de suivi incluait l'utilisation des données de hauteur d'eau et/ou de débit des barrages pour le calcul des flux sortants du marais des Costières de Crau et du canal d'Arles à Bouc. Ces données n'ont pu être collectées auprès du GPMM pour l'ensemble de la période d'étude.

Comme pour le marais des Costières de Crau, les courbes de tarage obtenues aux exutoires du marais du Tonkin ne sont pas toutes pertinentes. Ceci est particulièrement vrai au niveau des exutoires du marais.

Le marais du Tonkin est divisé centralement en deux par la présence d'un canal matérialisé en orange sur la figure suivante. Au niveau de l'exutoire TKC3, nous avons observé des flux d'eau dans les deux sens, selon le niveau de la mer.



Figure 3-88 : Flux d'eau au niveau du marais du Tonkin



Analyse des flux sur la base des données disponibles

Malgré les difficultés rencontrées, nous proposons ci-après une analyse des flux des marais des Costières de Crau sur la base des données disponibles.

La figure suivante fait la synthèse des principaux débits entrants et sortants du marais des Costières de Crau pour 2 dates :

- Le 15/08/2021, représentative de la période d'irrigation. Durant cette période, le toit de la nappe est bas ; les apports des canaux sont plus faibles et composés majoritairement d'eau d'irrigation superficielle ;
- Le 10/02/2022, représentative de la période hivernale. Durant cette période, en l'absence d'irrigation, le toit de la nappe est plus haut (phénomène probablement expliqué par le temps de latence des eaux d'irrigation infiltrées durant l'été en partie nord de la plaine, pour rejoindre les zones humides bordières au sud) ; les débits drainés par les canaux sont plus faibles mais la proportion d'eau souterraine dans ces flux est plus importante.

Les apports du canal de Vergière et de Centre Crau ne sont pas représentés sur la figure suivante car ils sont minimes par rapport à ceux du canal du Vigueirat. Pour information, ces deux canaux apportent environ 135 l/s en août 2021 et 220 l/s en février 2022.

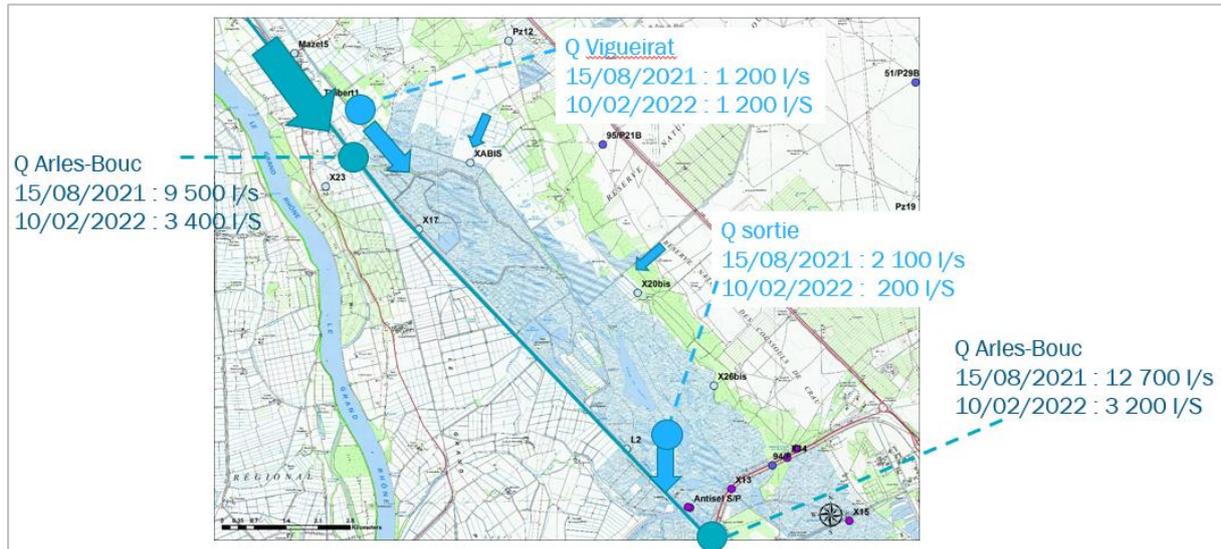
Ce bilan montre que le marais des Costières de Crau restitue plus d'eau en été qu'en hiver. En effet, les mesures permettent d'estimer un débit sortant de la zone humide de l'ordre de 2 m³/s en été et de 200 l/s en hiver, en rappelant que les pertes liées à l'évapotranspiration sont théoriquement maximales en période estivale et que les apports d'eau souterraine sont certainement plus importants en période hivernale.



C'est un constat majeur : on observe donc une situation totalement inversée par rapport à la théorie.

Attention, ce constat repose sur 2 mesures ponctuelles dans un contexte très influencé.

Figure 3-89 : Principaux flux d'eau mesurés en août 2021 et en février 2022



La Figure 3-90 illustre les variations de nappe à proximité (X20bis, XA BIS et X 26 BIS) et en champ proche (piézomètre PZ19 et piézomètres 95/P21B). En comparant la piézométrie moyenne dans la zone d'émergence et les niveaux de nappe au lointain (entre 2 et 4 km), ces chroniques permettent de confirmer des gradients de nappe plus importants en période hivernale qu'en période estivale.

Un examen plus détaillé de ces courbes permet d'identifier 3 temporalités sur la période de suivi :

- De début juillet à début septembre 2021, les gradients sont faibles et les flux d'alimentation de la zone humide par les eaux souterraines sont les moins importants ;
- De début septembre 2021 à fin janvier 2022, le niveau de la nappe à proximité de la zone humide augmente tout doucement d'une trentaine de centimètres ; en champ lointain, les augmentations sont plus importantes, environ 1 mètre ;
- A partir de la fin février 2022, les niveaux de nappe recommencent à diminuer.

Les hauteurs d'eau mesurées dans les canaux (voir Figure 3-91) confirment ce fonctionnement :

- De début juillet à début septembre 2021, les hauteurs varient peu dans les canaux ;
- On observe une augmentation de la hauteur d'eau de début septembre 2021 à fin janvier 2022.

Figure 3-90 : Niveau de la nappe mesuré en bordure du marais des Costières de Crau (X20bis, XA BIS et X 26 BIS) et en champ proche (piézomètre PZ19 et piézomètres 95/P21B)

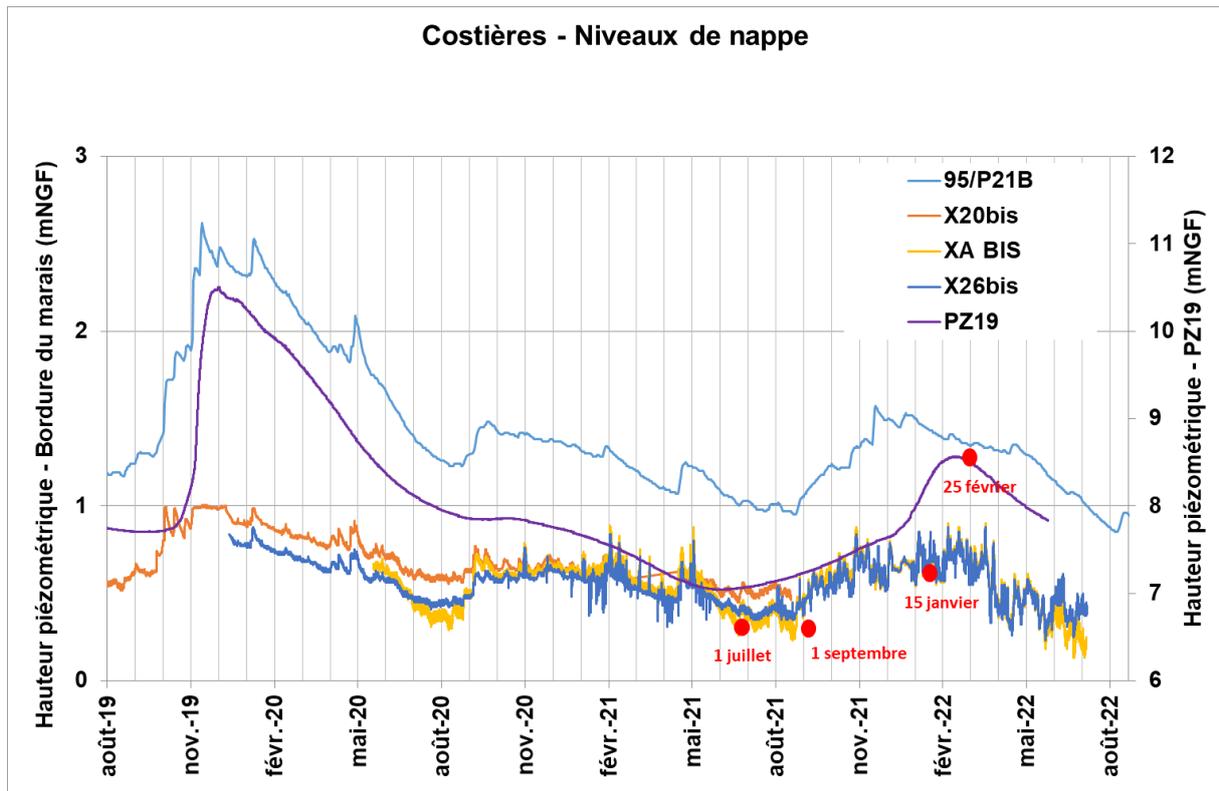
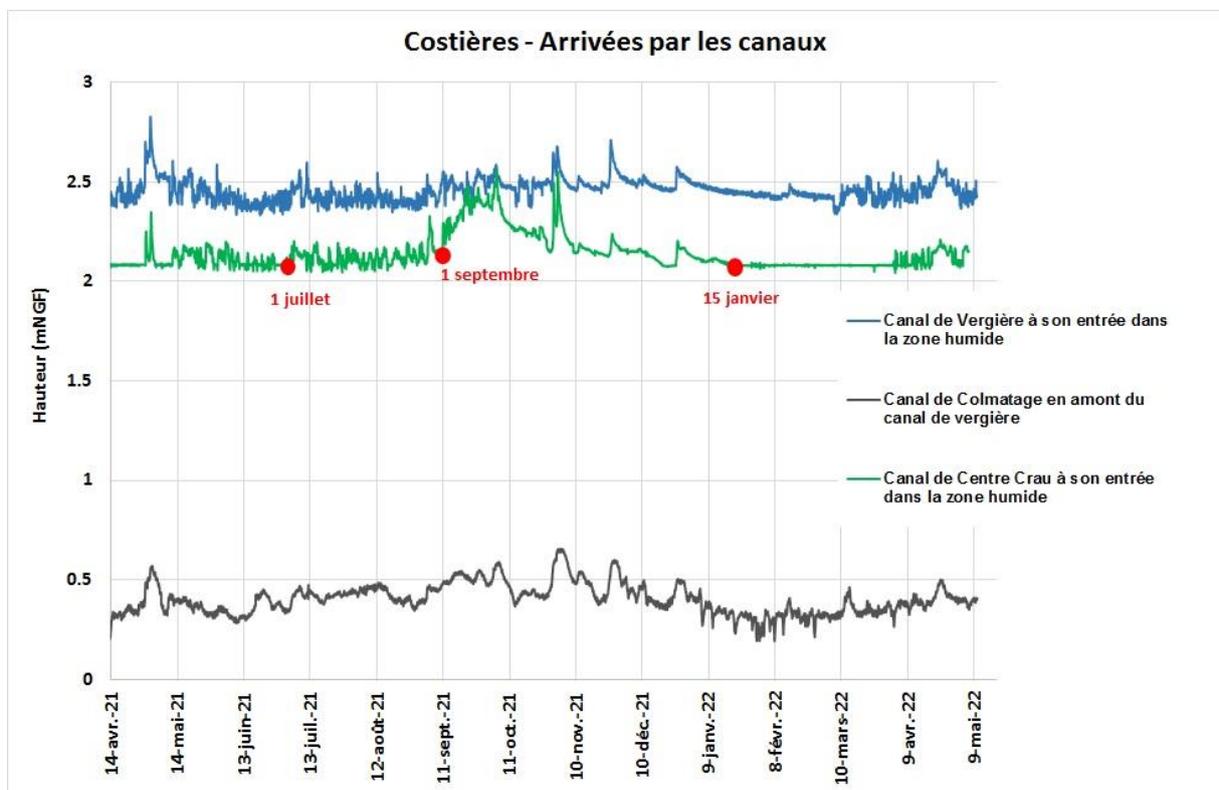


Figure 3-91 : Hauteurs d'eau mesurées au niveau du canal de Vergière, du canal du Colmatage et du canal Centre Crau à leur entrée dans la zone humide





Nous avons essayé de corréler ces dynamiques d'alimentation par la nappe avec des mesures hydrologiques dans la zone humide.

Concernant les arrivées d'eau superficielle dans la zone humide, les mesures de niveau d'eau dans le canal du Vigueirat et celui d'Arles à Bouc (Figure 3-92) montrent un fonctionnement synchrone. Les arrivées d'eau commencent à croître à partir du 1^{er} juillet et vont augmenter très fortement entre le 1^{er} septembre et le 15 janvier.

Les variations de hauteur d'eau dans les zones humides (Figure 3-93) montrent que ces arrivées d'eau superficielle se traduisent par un ennoiment d'environ 20 cm de la zone humide entre le 1^{er} septembre et le 15 janvier. Les chroniques montrent une très bonne corrélation entre les pics d'arrivées d'eau superficielle et les pics de variation de hauteur d'eau dans la zone humide.

Il est difficile d'identifier sur ces chroniques les apports d'eau souterraine car ils sont concomitants des apports d'eau superficielle.

Figure 3-92 : Hauteurs d'eau dans le canal d'Arles à Bouc et dans le canal du Vigueirat en amont de la zone humide

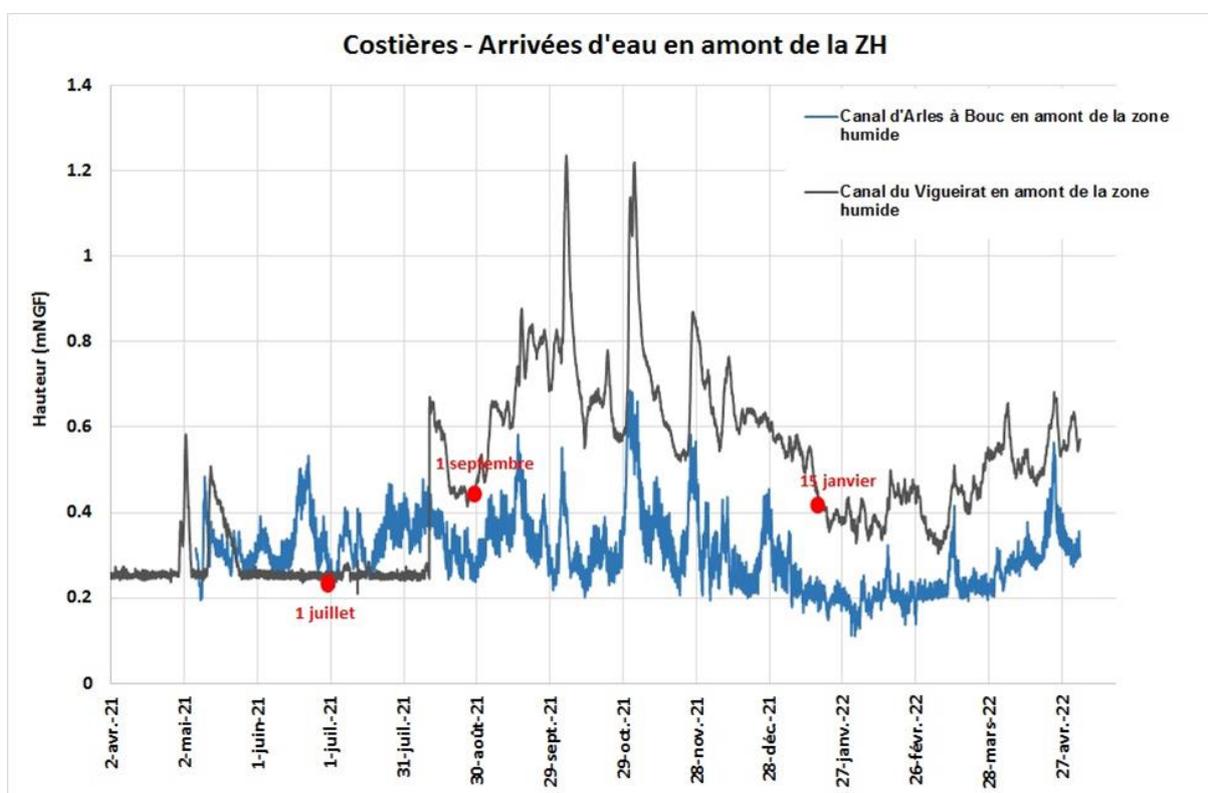
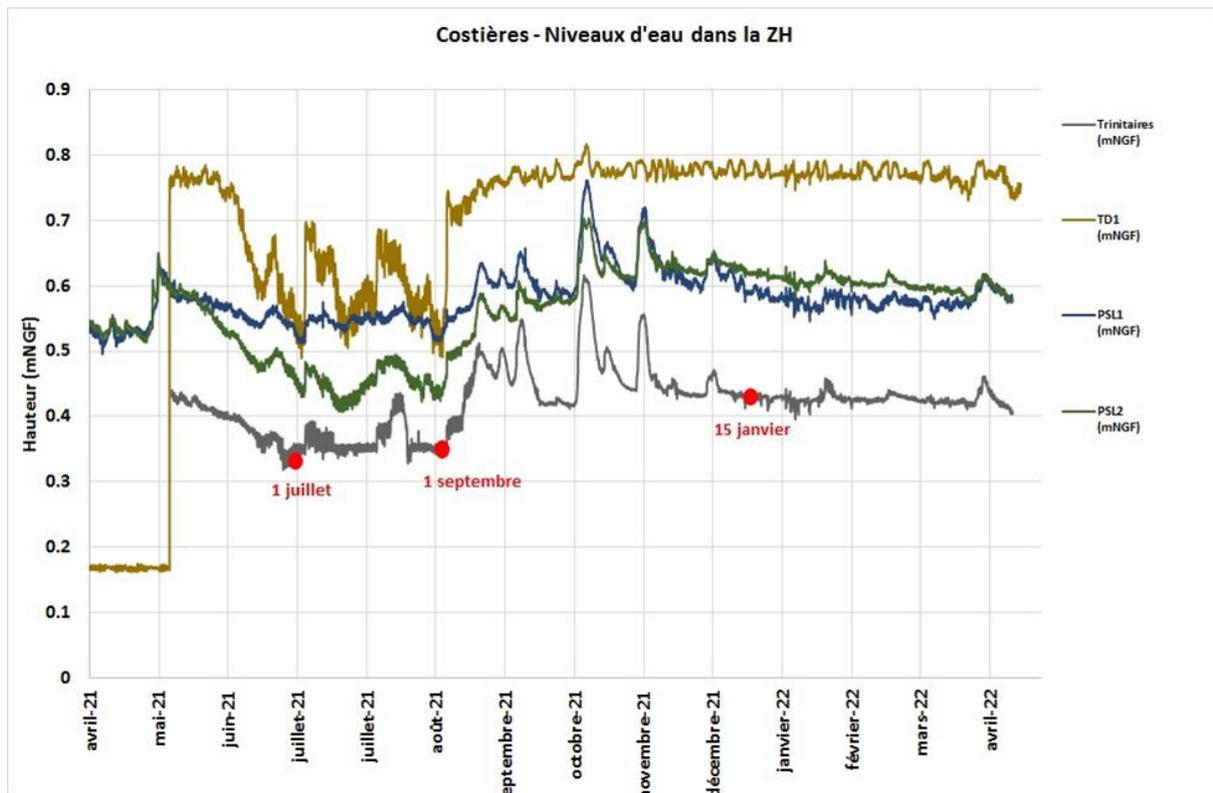




Figure 3-93 : Variation de hauteur d'eau dans le marais des Costières de Crau



En première conclusion, il est donc difficile de quantifier ou même de qualifier les dynamiques de restitution des eaux souterraines dans cette zone humide. Les modélisations SINERGI prédisaient des flux moyens d'eau souterraine de l'ordre de 3 à 4 m³/s sur le secteur Costières et Tonkin, et préférentiellement en période hivernale. Ce n'est pas ce que nous observons et l'explication la plus logique serait un manque de mesures pertinentes pour capter ce signal ; il est aussi possible que ces dynamiques de restitution soient très complexes spatialement avec une hypothèse de flux majeurs dans le secteur du Tonkin plutôt que celui des Costières (avec une hypothèse supplémentaire d'un flux souterrain direct vers la mer qui échapperait ainsi aux zones humides).

NIVEAUX D'EAU (ENNOIEMENT / ENGORGEMENT)

Le terrain naturel (TN) semble engorgé en permanence comme l'attestent les relevés de végétation, tout comme le TN-1 comme l'attestent les sondages pédologiques. La majeure partie des sols de la zone d'étude sont caractérisés par des engorgements en eau permanente à très faible profondeur. Les sondages pédologiques sur la partie du marais du Tonkin ont mis en évidence la présence d'horizons histiques (tourbe). Ces sols sont rattachés à des **Histosols**. Ce type de formation atteste la présence d'une nappe à faible profondeur de manière quasi permanente. D'après le Référentiel pédologique (2008) de l'AFES, la présence d'horizons histiques témoigne que « **le niveau de la nappe ne doit pas descendre au-dessous de 80 cm sur une durée de plus de deux mois** ». A ce niveau, la végétation qui s'y développe est dominée par des Cladiaies.

A proximité, les sols sont caractérisés par la dominance et l'intensification en profondeur de gley (G). Ces sols sont rattachés à des **Réductisols**. La végétation qui s'y développe est dominée par des Roselières. Des refus liés à la présence de poudingue dès 70 cm de profondeur ont été rencontrés à l'extrémité sud-est. Ces formations se retrouvent également sur le secteur du marais du Vigueirat. Elles attestent la présence d'une nappe quasi-permanente à très faible profondeur (<1 m).

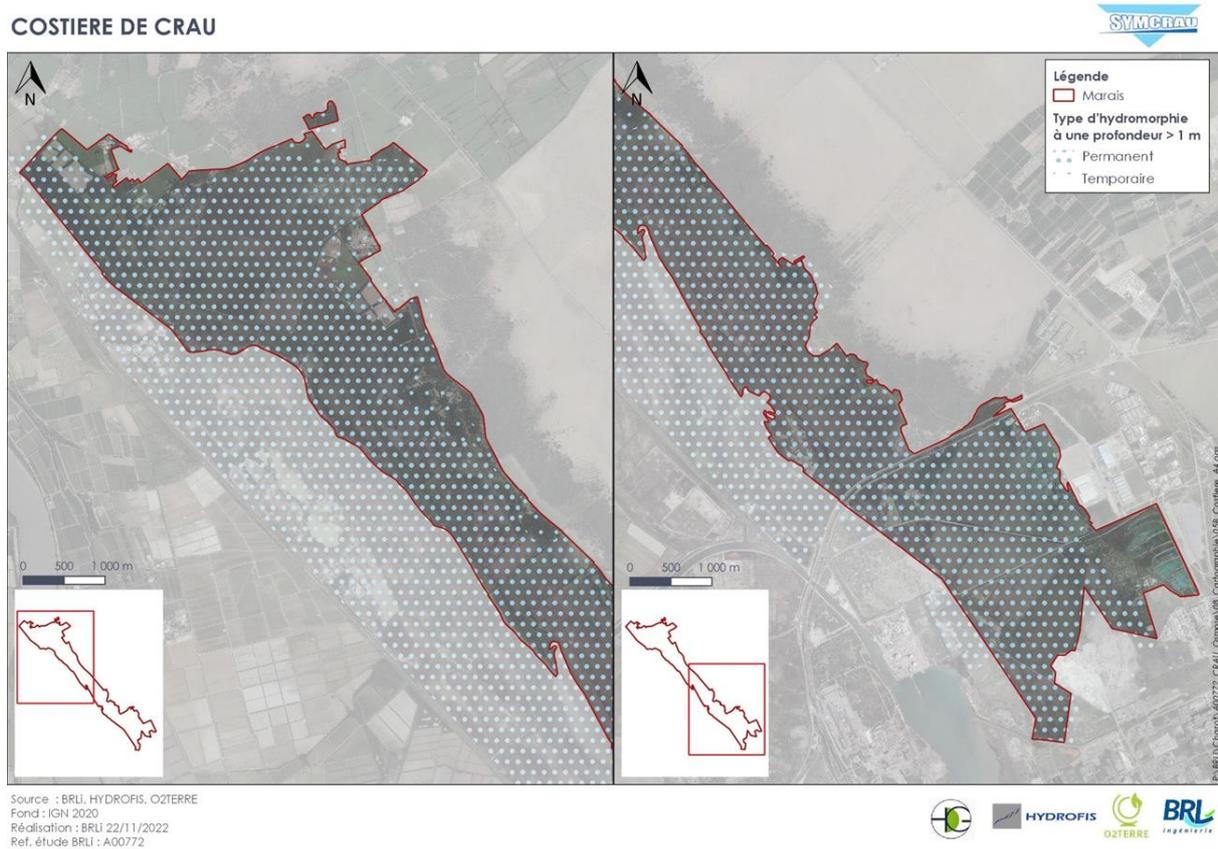


A proximité de ces milieux d'eau douce, des solums avec un horizon surfacique salique ou sodique (accumulation marquée de sels plus solubles ou de sodium) peuvent se distinguer. Ces caractéristiques pédologiques sont généralement à l'origine du développement d'une végétation plus halophile : sansouïre et prés salés méditerranéens. Ces sols sont rattachés à des **Sodisols**.

En limite du marais, les sols sont rattachés à des **Fersialsols rédoxiques**. Ces formations sont moins soumises à l'influence des remontées de nappe. L'engorgement en eau est qualifié de temporaire et se distingue par des pseudogleys.

Figure 3-94 : Superficie concernée par un engorgement quasi-permanent à TN-1 d'après les sondages pédologiques

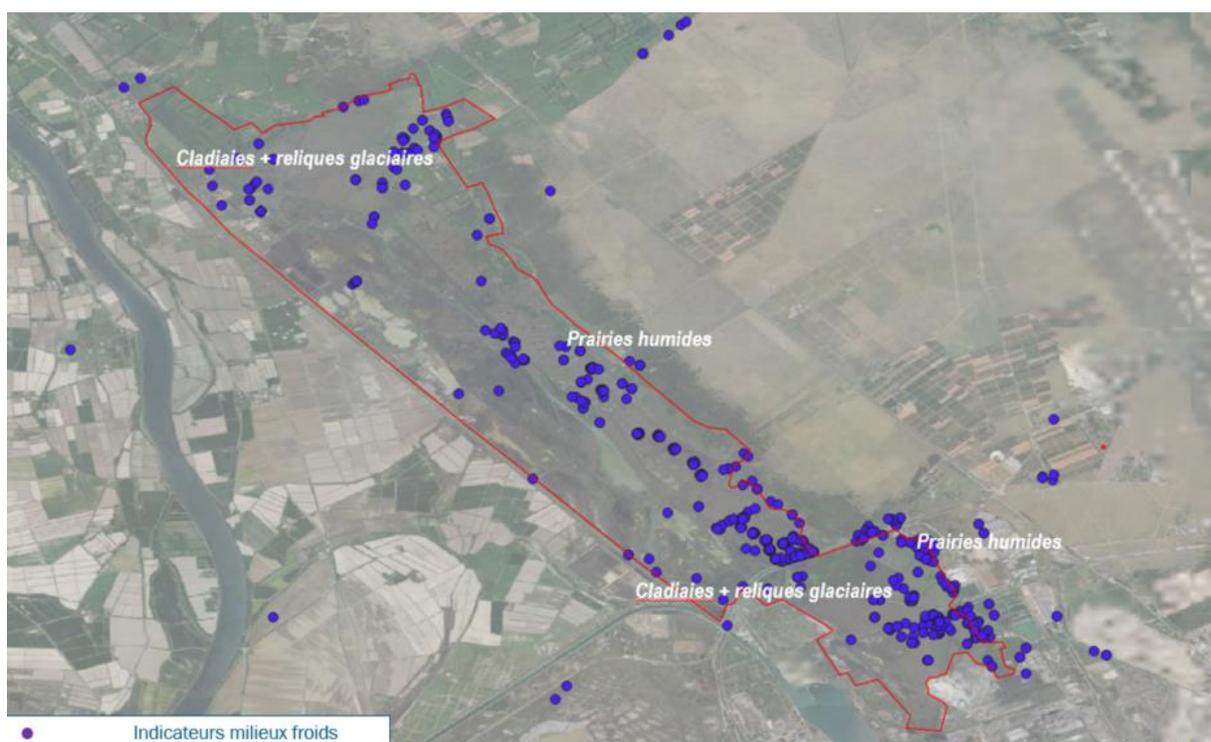
COSTIERE DE CRAU



INDICATEURS FLORE ET HABITATS

La végétation s'organise principalement en fonction des gradients d'humidité et de température des substrats. Différents faciès de prairies humides (prairies à Molinie, formations à Choin noir...) laissent la place à des marais froids à Marisque dans les zones d'affleurement de la nappe. S'y maintiennent de nombreuses espèces typiques des eaux fraîches, notamment de remarquables populations de Gentiane des marais, espèce emblématique des marais froids de Crau, associées à la Fougère des marais, à la Scutellaire en casque ou au Mouron délicat. La pression pastorale joue également un rôle important dans l'organisation de la végétation.

Figure 3-95 : Répartition des indicateurs de milieux froids et frais sur le marais des Costières de Crau



3.6.4 Evolution future

En l'absence d'une compréhension complète du fonctionnement de la zone humide, il nous est difficile d'évaluer les évolutions possibles de la zone humide selon les différents scénarios considérés (SC1, SC6 ou SC7).

Figure 3-96 : Évolution potentielle du marais des Costières de Crau selon les différents scénarios retenus

SITUATION ACTUELLE	SCENARIO 1 (CHANGEMENT CLIMATIQUE)	SCENARIO 6 (CHANGEMENT CLIMATIQUE ET REDUCTION DE 30% DES APPORTS D'EAU D'IRRIGATION DEPUIS LA DURANCE)	SCENARIO 7 (CHANGEMENT CLIMATIQUE ET SUPPRESSION TOTALE DES APPORTS D'EAU D'IRRIGATION DEPUIS LA DURANCE)
<ul style="list-style-type: none"> - Compréhension non stabilisée en l'absence de données essentiellement à la compréhension du hydro-système. - Rôle de l'évaporation et du stockage potentiellement très importants. - Fonctionnement hydrologique a priori très complexe et largement influencé par la gestion des milieux. 	<ul style="list-style-type: none"> - Non évaluable en l'état 	<ul style="list-style-type: none"> - Non évaluable en l'état 	<ul style="list-style-type: none"> - Non évaluable en l'état



4 SYSTEME DE SUIVI HYDROLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE

La plaine de la Crau est alimentée par le système Durance-Verdon. En 2022, les conditions climatiques exceptionnelles (chute de neige faibles, précipitations observées déficitaires de janvier à juin, températures supérieures à la moyenne sur mai et juin) ont engendré un déficit en eau sur le territoire durancien. Face à ce déficit, la Commission Exécutive de la Durance a dû mettre en œuvre des mesures de restriction des prélèvements agricoles. Cela s'est traduit par une baisse des prélèvements pour l'irrigation agricole en basse Durance de -25% à partir du 20 juin (-30 à -35% pour l'irrigation gravitaire) (Syndicat Mixte d'Aménagement de la Vallée de la Durance, 2022).

Avec les effets potentiels du changement climatiques et l'évolution des besoins en eau, cette situation exceptionnelle pourrait devenir monnaie courante dans les années à venir.

Comme indiqué dans ce rapport, une diminution des prélèvements des canaux d'irrigation de la Crau engendrerait une diminution des apports à la nappe de la Crau, donc une diminution des apports aux zones humides faisant l'objet de l'étude. Ceci se traduirait, selon les zones humides, par une évolution, voire une disparition des habitats et/ou du caractère humide.

Si l'on souhaite se prévenir de la modification, voire de la disparition des zones humides, il est donc nécessaire de définir des conditions (hydrologiques et hydrogéologiques) à respecter.

Le système de suivi détaillé dans le tableau suivant définit les conditions hydrologiques et hydrogéologiques à respecter pour le maintien des habitats tels qu'on les connaît actuellement et du caractère humide des zones humides. Pour chaque zone humide sont indiqués :

- Les sondes hydrométriques ou piézométriques qui constituent le système de suivi ;
- Un seuil de vigilance et un seuil d'alerte associé au maintien des habitats tels qu'on les connaît actuellement ;
- Un seuil de vigilance et un seuil d'alerte associé au maintien du caractère humide.

Les seuils de vigilance et d'alerte sont traduit par des niveau d'eau en mNGF à ne pas sous-passer sur des durées définis au droit des sondes retenues pour composer le système de suivi. Le choix des sondes composant le système de suivi est justifié.

Ces seuils se basent sur une année d'observation ou moins. Les valeurs seuil proposées sont donc à lire avec cette limite en tête.

Figure 4-1 : Système de suivi des zones humides

Zone humide	Paramètre à suivre	Sonde	Justification	Maintenance des habitats tels qu'on les connaît aujourd'hui		Maintenance du caractère humide	
				Vigilance	Alerte	Vigilance	Alerte
Grand Brahis	Hauteur de la nappe	PZ22	Le marais est principalement alimenté par la nappe.	Sous-passement de la cote 75,5 mNGF plus de 15 jours	Sous-passement de la cote 75,5 mNGF plus d'un mois	Sous-passement de la cote 75,2 mNGF (valeur minimale observée au cours des 10 dernières années) pendant plus d'un mois	Sous-passement de la cote 75,2 mNGF (valeur minimale observée au cours des 10 dernières années) pendant plus de 3 mois (à corréliser avec des observations éventuelles de descente de cime)
	Hauteur de la nappe	Brahi piezo	Le marais est principalement alimenté par la nappe.	Sous-passement du TN-1 calculé au niveau de Bra2 (61,7 mNGF) plus de 15 jours consécutifs entre janvier et juin.	Sous-passement du TN-1 calculé au niveau de Bra2 (61,7 mNGF) plus d'1 mois d'affilée entre janvier et juin.	Sous-passement du TN-2,5 calculé au niveau de Bra2 (60,2 mNGF) pendant plus d'un mois	Sous-passement du TN-2,5 calculé au niveau de Bra2 (60,2 mNGF) pendant plus de 3 mois (à corréliser avec des observations éventuelles de descente de cime)
Baussenq	Hauteur de la nappe	PZ 13, puits amont et puits aval	La zone comprise entre le TN et le TN-1 est alimentée par la nappe. Nécessité d'avoir 3 points de mesure au vu de la topographie marquée du site. Très faible rôle du canal.	Sous-passement de la cote 22 mNGF au niveau du puit amont plus de 3 mois consécutifs au printemps. Le reste de l'année, sous-passement de la cote 21,5 mNGF plus de 15 jours.	Sous-passement de la cote 22 mNGF au niveau du puit amont plus de 2 mois consécutifs à partir de mai. Sous-passement de la cote 21,5 mNGF au niveau du puit amont plus de 1 mois consécutif au printemps.	Sous-passement de la cote 20 mNGF au niveau du puit amont plus de 3 mois consécutifs au printemps. Le reste de l'année, sous-passement de la cote 19 mNGF plus de 15 jours.	Sous-passement de la cote 19 mNGF au niveau du puit amont plus de 1 mois consécutif au printemps. Sous-passement de la cote 19 mNGF pendant plus de 3 mois (à corréliser à observations éventuelles de descente de cime).
			Ennoiement des prairies situées en bordure sud-est du marais (important d'un point de vue écologique). Attention : alimentation artificielle de la prairie	Régularisation du prélèvement dans canal centre Crau et établissement d'une convention pour la conservation du niveau d'ennoiement actuel en hiver et au printemps. En été, maintenir l'irrigation mais la réduire par rapport à la situation actuelle.			
Ilon - Grand marais	Hauteur	Baux 1	La hauteur d'eau dans le canal de la vallée des Baux conditionne l'alimentation de l'Ilon central	Sous-passement de la valeur 0,643 mNGF pendant plus de 6 mois de l'année. On ne veut pas que la surface en eau observée dans la zone humide 9 mois sur 12 dans la situation actuelle diminue de plus de 30% plus de 6 mois dans l'année.	Sous-passement de la valeur 0,535 mNGF plus de 3 mois de l'année. On ne veut pas que la surface en eau observée dans la zone humide 9 mois sur 12 dans la situation actuelle diminue de plus de 50% plus de 3 mois dans l'année.	A priori amené à perdurer même si suppression des apports d'eau souterraine car précipitations suffisantes pour maintenir des forêts humides au moins pendant un temps vu le sol.	
Ilon - Ilon est	Hauteur de la nappe	PZ5	La nappe de Crau apporte un flux d'eau important pour le bon état écologique du Marais. Ce flux est proportionnel au gradient de charge entre le NP dans le secteur du PZ5 et le Marais (1 mNGF environ)	Sous-passement de 35 mNGF plus de 5 mois consécutifs	Sous-passement de 31 mNGF plus de 3 mois consécutifs (indicateur d'un dysfonctionnement)	A priori amené à perdurer même si suppression des apports d'eau souterraine car précipitations suffisantes pour maintenir des forêts humides au moins pendant un temps vu le sol.	



Zone humide	Paramètre à suivre	Sonde	Justification	Maintien des habitats tels qu'on les connaît aujourd'hui		Maintien du caractère humide	
				Vigilance	Alerte	Vigilance	Alerte
Meyranne	Hauteur de la nappe	SNCF1	Le débordement des laurons est contraint par l'altitude de la nappe qui doit être supérieure à la côte sol. Connaissance insuffisante pour privilégier le suivi d'un ouvrage en particulier. Suivi piézométrique actuel peu adapté : PZ15 un peu loin, CAUSSANS fortement influencé par les usages agricoles ; seul le piézomètre SNCF1 peut être jugé représentatif pour suivre les flux en provenance de la bordure Nord	Sous-passement de la côte 4,2 mNGF pendant plus de 15 jours entre mi-avril et mi-octobre.	Sous-passement de la côte 4,2 mNGF pendant plus d'un mois entre mi-avril et mi-octobre.	Zone humide a priori amenée à perdurer car exutoire de la nappe de la Crau.	
	Hauteur d'eau du canal du Chalavert	Sonde de l'association des Amis du Vigueirat	Si la hauteur d'eau est supérieure à 0,80 mNGF => alimentation possible des casiers pour la reproduction des hérons paludicoles. Aujourd'hui, sur-passement de la côte 0,80 deux mois sur cinq (période avril-août).	Sous-passement d'une hauteur d'eau de 0,8 mNGF plus de 3 mois sur la période avril-août*	Sous-passement d'une hauteur d'eau de 0,8 mNGF plus de 4 mois sur la période avril-août*	Zone humide a priori amenée à perdurer car exutoire de la nappe de la Crau.	
Chanoines	Hauteur de la nappe	SNCF1	Le débordement des laurons est contraint par l'altitude de la nappe qui doit être supérieure à la côte sol. Connaissance insuffisante pour privilégier le suivi d'un ouvrage en particulier. Suivi piézométrique actuel peu adapté : PZ15 un peu loin, CAUSSANS fortement influencé par les usages agricoles ; seul le piézomètre SNCF1 peut être jugé représentatif pour suivre les flux en provenance de la bordure Nord	Sous-passement de la côte 4,2 mNGF pendant plus de 15 jours entre mi-avril et mi-octobre	Sous-passement de la côte 4,2 mNGF pendant plus d'un mois entre mi-avril et mi-octobre	Zone humide a priori amenée à perdurer car exutoire de la nappe de la Crau.	
Costières de Crau	Hauteur de la nappe	X20bis, XA bis et X26 bis	Les piézomètres X20bis, XA bis et X26 bis portent la même information et indiquent le niveau de la nappe au droit de la zone de débordement de la nappe ; ils sont influencés par les variations de niveaux d'eau dans les marais.	Sous-passement de la côte 0,4 mNGF pendant plus de 2 mois entre mai et octobre.	Sous-passement de la côte 0,25 mNGF pendant plus d'1 mois entre mai et octobre	Zone humide a priori amenée à perdurer car exutoire de la nappe de la Crau.	



ANNEXES

Annexe 1. Observations pédologiques

1. CONTEXTE DE L'ETUDE

1.1. Cadre général

Dans le cadre de l'étude des besoins d'alimentation en eau des zones humides de la Crau (OSMOSE 2), le bureau d'études O2TERRE a mené des expertises pédologiques.

Les protocoles scientifiques s'inspirent de la méthode détaillée dans l'arrêté ministériel du 24 juin 2008 du Code de l'environnement et la circulaire du 18 janvier 2010. Les points de mesure ont été positionnés en amont de la campagne de terrain à partir de l'analyse des conditions hydrologiques et de l'occupation des sols. Par ailleurs, ces points ont été situés à proximité des points de mesure de débits en eau des canaux. Le semis de points de sondages a été densifié en fonction des conditions d'accessibilité et de l'occupation des sols. Un total de 237 sondages et observations pédologiques a été réalisé au cours de cette étude.

A partir de ces observations, des expertises et des analyses spatiales ont permis de distinguer les conditions d'engorgement en eau des solums et de cartographier des entités hydromorphes en distinguant le caractère d'engorgement en eau (temporaire ou permanent) des solums à faible profondeur (moins de 1,20 m).

Cette synthèse présente, pour les cinq zones humides, les résultats des expertises pédologiques menées entre les mois d'avril et octobre 2021. Les sondages et les observations pédologiques ont été réalisés par Jérémie CUVELIER, expert en zones humides et pédologie appliquée. Il a été assisté par Théo RAMBEAU, étudiant-stagiaire en master 1 Sciences de l'eau de l'Université d'Aix-Marseille.

1.2. Cadrage méthodologique

La circulaire du 18 janvier 2010 précise les protocoles scientifiques pour délimiter les zones humides en application des articles L. 214-7-1 et R. 211-108 du Code de l'environnement.

Un espace est considéré comme caractéristique des zones humides s'il présente l'un des critères suivants :

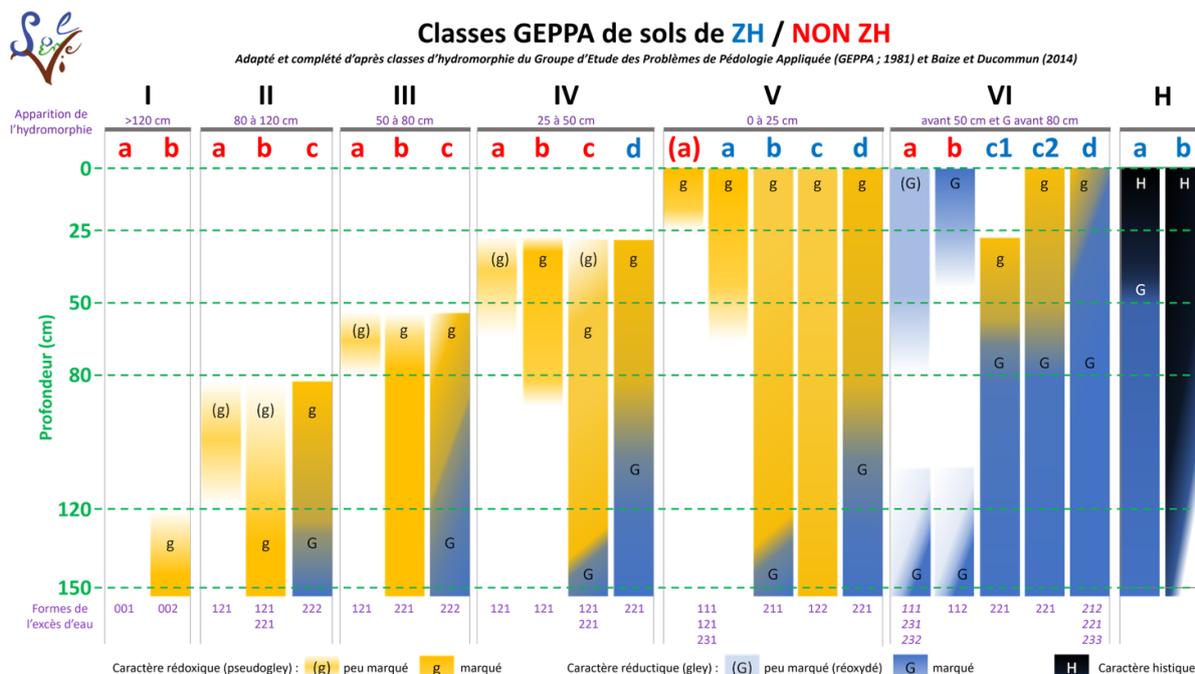
- les sols sont hydromorphes et témoignent d'un engorgement en eau,
- la végétation, si elle existe, est caractérisée par la présence et le recouvrement d'espèces végétales hygrophiles ou d'habitats (ensemble des communautés d'espèces végétales) caractéristiques des zones humides.

La liste des sols hydromorphes, des espèces végétales et des habitats caractéristiques des zones humides se basent sur des référentiels scientifiques :

- pour les sols : la classification du Groupe d'Etude des Problèmes de Pédologie Appliquée (GEPPA) modifié/extrapolé par le bureau d'études SOLENVIE ;
- pour les espèces végétales hygrophiles : liste des espèces définie à l'échelle nationale, applicable en France métropolitaine et en Corse, qui peut être abondée par le Préfet de Région sur proposition du conseil scientifique régional du patrimoine naturel ;
- pour les habitats : la nomenclature CORINE Biotope et le Prodrome des végétations de France.



Pour les sols, les conditions d'engorgement prolongé ou temporaire en eau peuvent se témoigner par des traces d'hydromorphie dans les différents horizons. Dès lors, pour apprécier si un sol est hydromorphe, la classification du GEPPA permet de distinguer les sondages pédologiques en fonction de la présence et l'intensification en profondeur des traits rédoxiques (traces de rouille - pseudogley) ou des traits réductiques (couleur gris-bleu - gley) au cours des carottages effectués à la tarière à main sur une profondeur de 120 cm. Le caractère histique définit les sols tourbeux. A ce niveau, les sols sont gorgés d'eau et disposent d'une très forte teneur en matière organique, peu ou pas décomposée, d'origine végétale.



De par les conditions d'engorgement en eau et de l'intensification en profondeur des traits d'hydromorphie, les classes annotées en bleu (IVd, Va, Vb, Vc, Vd, VIc1, VIc2, VID et H) correspondent à des sols hydromorphes et caractéristiques des zones humides. Les classes annotées en rouge ne sont pas considérées comme des sols hydromorphes.

2. RESULTATS DES EXPERTISES

2.1. Marais du Grand Brahis

2.1.1. Conditions d'observations

Les conditions de perforation et d'analyses des sols ont été globalement bonnes pour diagnostiquer les conditions d'hydromorphie. Les conditions d'accessibilité au coeur de la zone d'étude ont été limitées par l'embroussaillage et les niveaux d'eau.

Les prospections ont toutefois permis de mettre en évidence des conditions d'engorgement en eau à faible profondeur.

2.1.2. Résultats des relevés pédologiques

Un total de 37 sondages et observations pédologiques a été réalisé.

Sur la zone centrale du marais, les sondages pédologiques montrent des horizons hydromorphes de gley (G) dès 10 cm de profondeur et s'intensifient en profondeur. Les sols sont rattachés à des **Réductisols**. Ces formations laissent supposer la présence quasi permanente d'eau à faible profondeur. La végétation qui s'y développe est dominée par des Roselières et des prairies à joncs.

En limite de ces milieux, et certainement sous l'influence du canal central et des drains latéraux, les conditions d'engorgement en eau paraissent plus temporaires. Les traits d'hydromorphie sont caractérisés par des pseudogleys (g) et sont caractéristiques des **Rédoxisols**. Au niveau de certains sondages, il faut noter la présence de colluvions en profondeur. Ces sondages ont alors un rattachement double : **Rédoxisols-Colluviosols**.

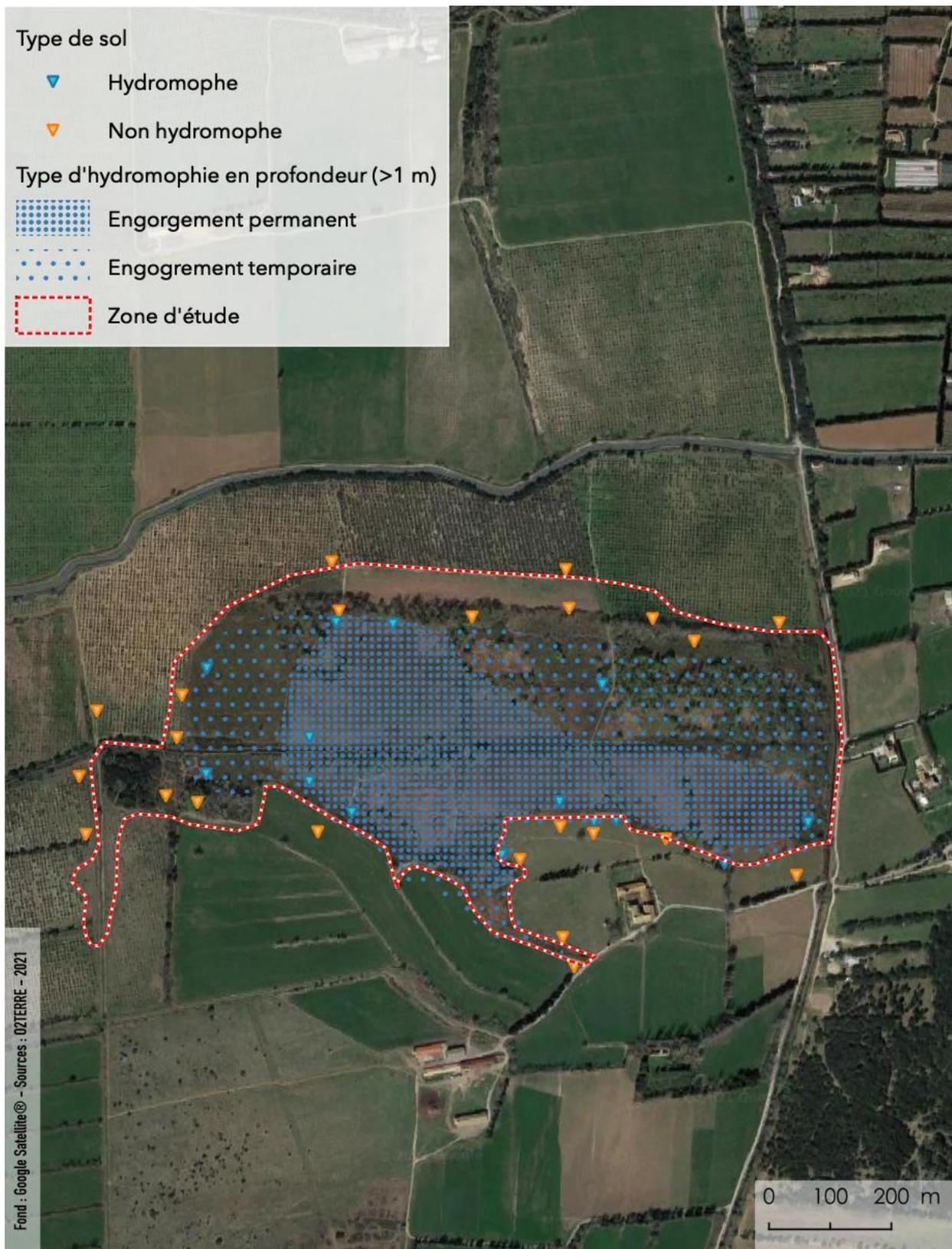
Ces trois types de sols sont caractéristiques des zones humides.

En périphérie du marais, les sols sont majoritairement constitués de **Fersiasols calciques** issus des alluvions rissiennes de la Crau. Les sols sont très caillouteux, ne présentent pas de traces d'hydromorphie. La végétation qui s'exprime est dominée par les Chênes verts et la culture d'Oliviers. **Ces formations ne sont pas caractéristiques des zones humides.**

La cartographie des sols selon le référentiel pédologique de l'AFES réalisée atteste de la présence de conditions caractéristiques des zones humides au niveau de la zone d'étude.

Sol caractéristiques des zones humides	Classe d'hydromorphie	Type de sol	Type d'engorgement en eau
Oui	6d 6c	Réductisols Réductisols rédoxique	Permanent
Oui	5b	Rédoxisols Rédoxisols-Colluviosols	Temporaire
NON	/	Fersiasols calciques	Pas d'influence de remontées de nappe

Carte A- 1 : Synthèse des sondages pédologiques - Marais du Grand Brahis





Réductisol



Cariçaie en eau sur la partie centrale du marais



Réductisol



Roselière sur la partie nord-ouest du marais



Rédoxisol-Colluviosol



Prairie de fauche irriguée par submersion



2.2. Marais de Baussenq

2.2.1. Conditions d'observations

Les conditions de perforation et d'analyses des sols ont été globalement limitées par la présence de cailloutis à très faible profondeur. Sur les marges de la zone d'étude des refus ont été rencontrés à partir de 10 cm. Au centre de la zone d'étude, la texture des sols est de type argilo-limoneux est permet de sonder plus profondément.

Malgré les difficultés rencontrées, les prospections ont permis de mettre en évidence des conditions d'engorgement en eau à faible profondeur.

2.2.3. Résultats des relevés pédologiques

Un total de 22 sondages et observations pédologiques a été réalisé au niveau du marais de Baussenq au cours du printemps (mai 2021).

Les sondages effectués sur la partie centrale et l'extrémité sud du marais montrent des horizons réductiques en profondeur (> 80 cm). Ces formations attestent la circulation d'une nappe à une profondeur de 100 à 150 cm. Ces sols sont rattachés à des **Fersialsols rédoxiques à réductiques**. A ce niveau, les prairies pâturées sont dominées par des espèces végétales hygrophiles.

En s'éloignant perpendiculairement au fossé/canal central, les conditions d'hydromorphie sont moins marquées et les conditions d'hydromorphie plus temporaires. Les sols sont rattachés à des **Fersialsols rédoxiques**. La végétation qui se développe est constituée par des complexes d'habitats imbriquant des prairies humides et des boisements de Peupliers et de Frênes.

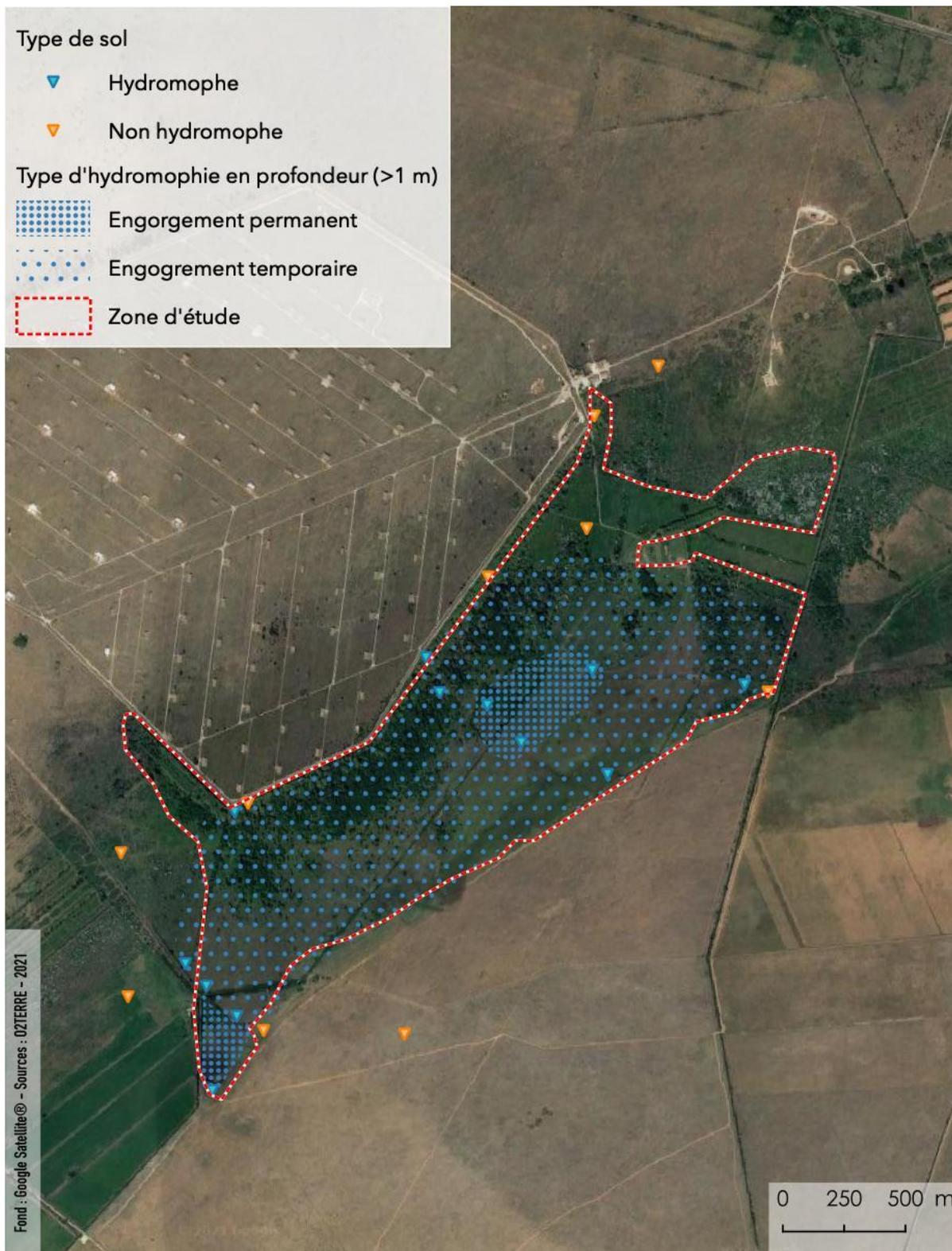
Ces deux types de sols sont caractéristiques des zones humides.

Sur les marges de la zone d'étude, les sondages pédologiques sont rattachés à des **Fersialsols calciques et leptiques**, issus des alluvions de la moyenne Crau. Ces sols sont caractérisés par la densité de cailloutis, leur texture argileuse compacte et la présence de poudingue à moins 50 cm de profondeur. Avec la présence de ce conglomérat imperméable constitué par le poudingue, les horizons superficiels ne sont pas sous l'influence de remontées de nappe. La végétation qui se développe sur ces milieux est caractéristique des habitats xérophiles.

La cartographie des sols selon le référentiel pédologique de l'AFES réalisée atteste de la présence de conditions caractéristiques des zones humides au niveau de la zone d'étude.

Sol caractéristiques des zones humides	Classe d'hydromorphie	Type de sol	Type d'engorgement en eau
Oui	5d	Fersialsols rédoxiques à réductiques	Permanent
Oui	5b	Fersialsols rédoxiques	Temporaire
NON	/	Fersialsols calciques	Pas d'influence de remontées de nappe

Carte A- 2 : Synthèse des sondages pédologiques - Marais de Baussenq





Fersialsol rédoxique à réductique

Prairie humide pâturée au centre du marais



Fersialsol rédoxique

Prairie méso-hygrophile pâturée par les taureaux



Fersialsol calcique (refus à faible profondeur)

Friche herbacée sèche en marge de la zone d'étude

2.3. Marais de Ilon

2.3.1. Conditions d'observations

Les conditions de perforation et d'analyses des sols ont été globalement bonnes pour diagnostiquer les conditions d'hydromorphie. Sur les marges sud de la zone d'étude, compte-tenu de la présence de cailloutis, des refus ont été rencontrés à partir de 10 cm.

Les prospections ont permis de mettre en évidence des conditions d'engorgement en eau à faible profondeur au niveau de la zone d'étude et en périphérie.

2.3.2. Résultats des relevés pédologiques

Un total de 71 sondages et observations pédologiques a été réalisé.

Les sols de la partie centrale et au nord de la zone d'étude sont caractérisés par des engorgements en eau permanent à très faible profondeur. Malgré la présence d'un réseau de drainage et d'irrigation en périphérie, les sols témoignent de conditions hydromorphes. Ces sols sont rattachés à des **Réductisols** avec des gleys (G) débutant à 20 cm de profondeur (zone centrale du marais) et **Rédoxisols** avec des pseudogleys (g) s'intensifiant en profondeur (sur les parcelles cultivées). Il faut aussi noter la présence de d'horizons histiques (tourbe) en profondeur au coeur du marais. Ces conditions attestent la présence d'un engorgement en eau permanent soutenu et alimenté par une nappe. **Ces deux types de sols sont caractéristiques des zones humides.** A ce niveau, les formations végétales présentent des successions (gradient thermophile et hygrophile) d'est en ouest : Cladiaie (extrémité est), Roselière (zone centrale), Caricaie et prairie à Joncs (à l'ouest) et Boisement de Peupliers (extrémité ouest).

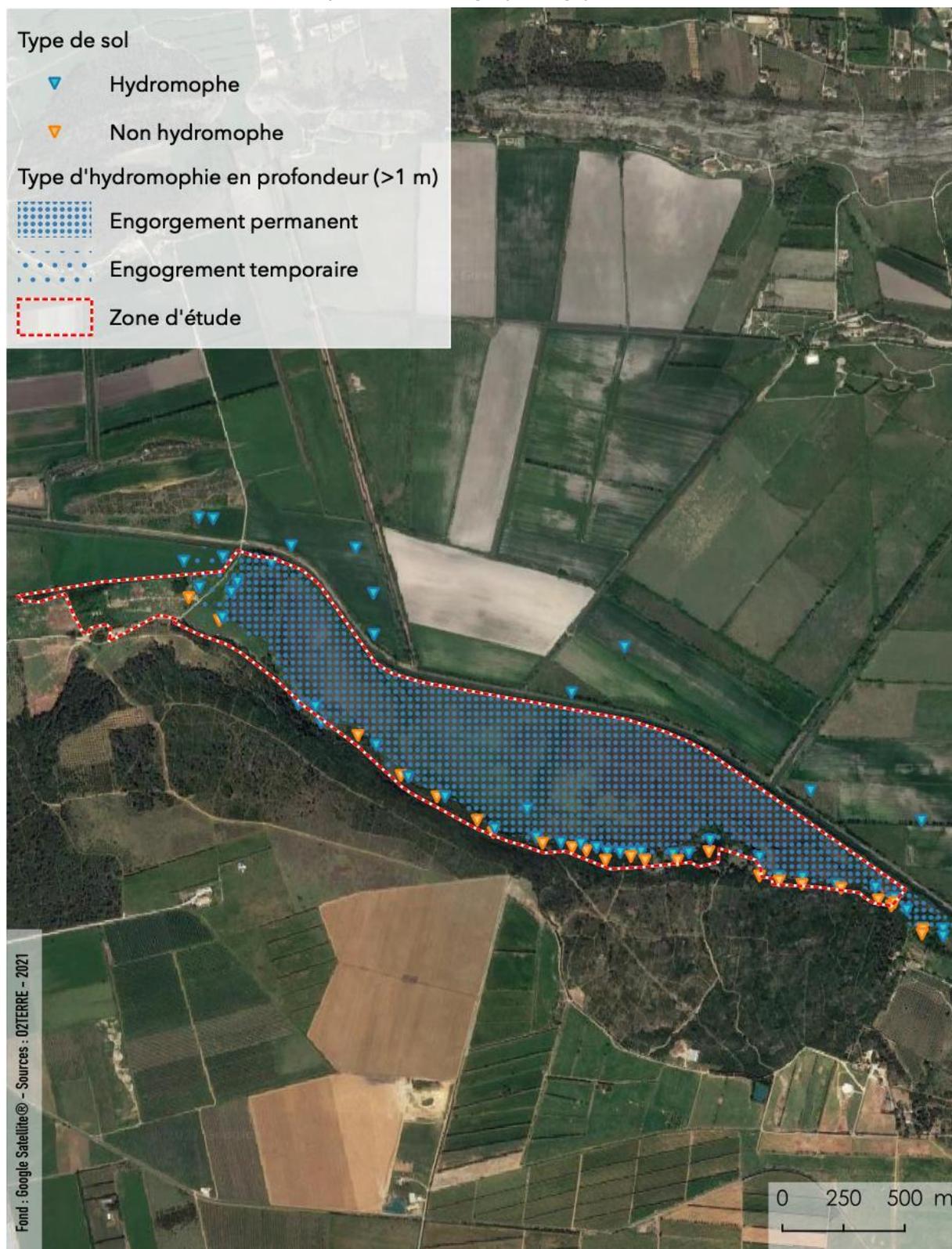
Les sols en limite sud et à l'est de la zone d'étude sont rattachés à des **Fersialsols calciques**. Ces sols se sont formés par la dégradation du matériau parental des massifs alentours, composés de roches et de cailloutis calcaires. Les sondages pédologiques effectués ne montrent pas de traces d'hydromorphie. A ce niveau, la végétation est dominée par des Chênes verts. D'après la classification des sols de « zones humides » (GEPPA, 1981), **ces formations ne sont pas caractéristiques des zones humides.**

La cartographie des sols selon le référentiel pédologique de l'AFES réalisée atteste de la présence de conditions caractéristiques des zones humides au niveau de la zone d'étude.

Sol caractéristiques des zones humides	Classe d'hydromorphie	Type de sol	Type d'engorgement en eau
Oui	6d Ha	Réductisols Réductisols histiques	Permanent
Oui	6c 5b	Rédoxisols Fersialsols rédoxiques	Temporaire
NON	/	Fersialsols calciques	Pas d'influence de remontées de nappe



Carte A- 3 : Synthèse des sondages pédologiques - Marais de Ilon





Réductisol historique , horizon tourbeux à partir de 50 cm Zone centrale du marais



Rédoxisol, avec pseudogley de type couleur rouille s'intensifiant en profondeur

Prairie méso-hygrophile pâturée à l'ouest



Ferralsol rédoxique

Prairie mésophile pâturée au sud-ouest



2.4. Marais de Meyranne et Chanoines

2.4.1. Conditions d'observations

Les conditions de perforation et d'analyses des sols ont été globalement bonnes pour diagnostiquer les conditions d'hydromorphie. L'accessibilité des terrains (parcelles privées, pâtures à taureaux) a nécessité quelques adaptations du protocole.

Les prospections ont toutefois permis de mettre en évidence des conditions d'engorgement en eau à faible profondeur.

2.4.2. Résultats des relevés pédologiques

Un total de 20 sondages et observations pédologiques a été réalisé.

La majeure partie des sols de la zone d'étude sont caractérisés par des engorgements en eau permanent à très faible profondeur. Certains de ces sols sont caractérisés par la présence de tourbe et rattaché à des **Histosols**. A ce niveau, la cladiaie (habitat dominé par le Marisque *Cladium mariscus*) est dominante. D'autres sols sont rattachés à des **Réductisols** avec des gleys (G) débutant à 20 cm. En limite ouest de la zone d'étude, les sols sont caractéristiques des **Réductisols typiques fluviqes**. Ces sols sont caractérisés par leur texture limono-sableuse se sont développés sur les alluvions du Rhône. Ils présentent des signes d'engorgement en eau quasi permanent ou permanent et débutent à moins de 50 cm de profondeur.

En périphérie sud de cette entité, les conditions d'engorgement en eau à faible profondeur sont jugées temporaires. Les sols sont rattachés à des **Fersialsols rédoxiques**.

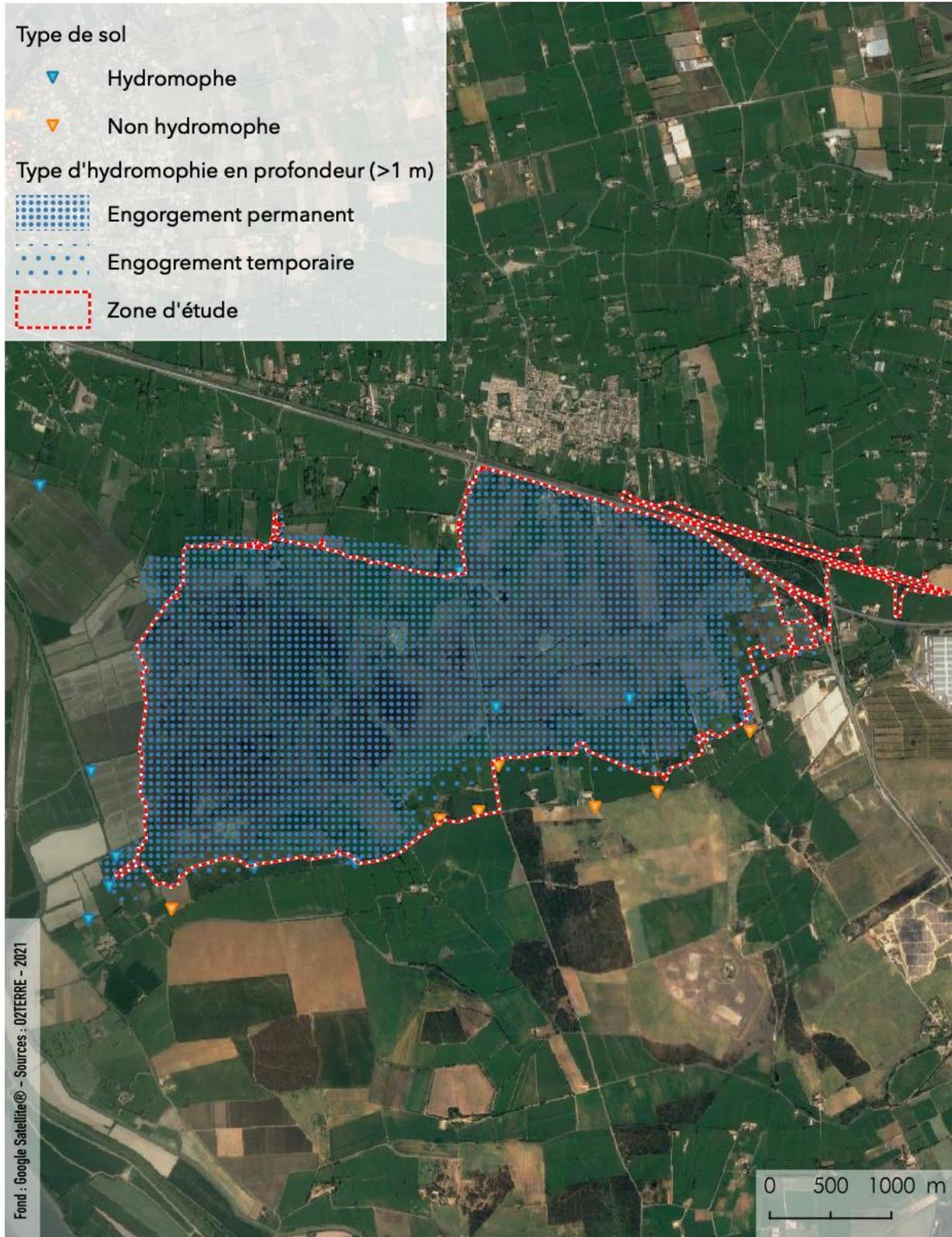
Ces quatre types de sols sont caractéristiques des zones humides.

Les sols en limite sud et à l'est de la zone d'étude sont rattachés à des **Fersialsols calciques**. Les sondages pédologiques effectués ne montrent pas de traces d'hydromorphie. A ce niveau, les parcelles sont cultivées. D'après la classification des sols de « zones humides » (GEPPA, 1981), **ces formations ne sont pas caractéristiques des zones humides.**

La cartographie des sols selon le référentiel pédologique de l'AFES réalisée atteste de la présence de conditions caractéristiques des zones humides au niveau de la zone d'étude.

Sol caractéristiques des zones humides	Classe d'hydromorphie	Type de sol	Type d'engorgement en eau
Oui	Ha 6d 6c	Histosols Réductisols Réductisols typiques fluviqes	Permanent
Oui	5b	Fersialsols rédoxiques	Temporaire
NON	/	Fersialsols calciques	Pas d'influence de remontées de nappe

Carte A- 4 : Synthèse des sondages pédologiques - Marais de Meyranne et Chanoines





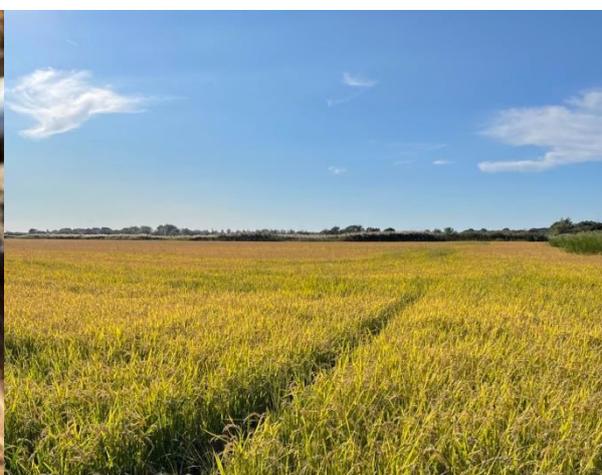
Histosol



Cladonia après incendie au centre du marais



Réductisol typique fluvioclastique



Rizière à l'ouest de la zone d'étude



Parcels cultivées et drainées par un réseau de fossés

2.5. Marais des costières de Crau

2.5.1. Protocole et conditions d'observations

Les conditions de perforation et d'analyses des sols ont été globalement bonnes pour diagnostiquer les conditions d'hydromorphie. L'accessibilité des terrains (parcelles privées, pâtures à taureaux) a nécessité quelques adaptations du protocole.

Les prospections ont toutefois permis de mettre en évidence des conditions d'engorgement en eau à faible profondeur.

2.5.2. Résultats des relevés pédologiques

Un total de 87 sondages et observations pédologiques a été réalisé.

Les sondages pédologiques sur la partie du marais du Tonkin ont mis en évidence la présence d'horizons histiques (tourbe). Ces sols sont rattachés à des **Histosols**. Ce type de formation atteste la présence d'une nappe à faible profondeur de manière quasi permanente. D'après le Référentiel pédologique (2008) de l'AFES, la présence d'horizons histiques témoigne que « **le niveau de la nappe ne doit pas descendre au-dessous de 80 cm sur une durée de plus de deux mois** ». A ce niveau, la végétation qui s'y développe est dominée par des Cladiaies.

A proximité, les sols sont caractérisés par la dominance et l'intensification en profondeur de gley (G). Ces sols sont rattachés à des **Réductisols**. La végétation qui s'y développe est dominée par des Roselières. Des refus liés à la présence de poudingue dès 70 cm de profondeur ont été rencontrés à l'extrémité sud-est. Ces formations se retrouvent également sur le secteur du marais du Vigueirat. Elles attestent la présence d'une nappe quasi-permanente à très faible profondeur (<1 m).

A proximité de ces milieux d'eau douce, des solums avec un horizon surfacique salique ou sodique (accumulation marquée de sels plus solubles ou de sodium) peuvent se distinguer. Ces caractéristiques pédologiques sont généralement à l'origine du développement d'une végétation plus halophile : sansouïre et prés salés méditerranéens. Ces sols sont rattachés à des **Sodisalisols**.

En limite du marais, les sols sont rattachés à des **Fersialsols rédoxiques**. Ces formations sont moins soumises à l'influence des remontées de nappe. L'engorgement en eau est qualifié de temporaire et se distingue par des pseudogleys.

Ces formations sont donc caractéristiques des zones humides.

Au niveau du Tonkin, dans le cadre de la création des darses portuaires dans les années 1960, des remblais ont été déposés à proximité. Ces sols sont rattachés à des **Anthroposols**. L'influence d'une nappe à faible profondeur est nettement moins marquée pour ces milieux. La végétation qui s'y développe est caractéristique des friches sablonneuses et des boisements de Pins.

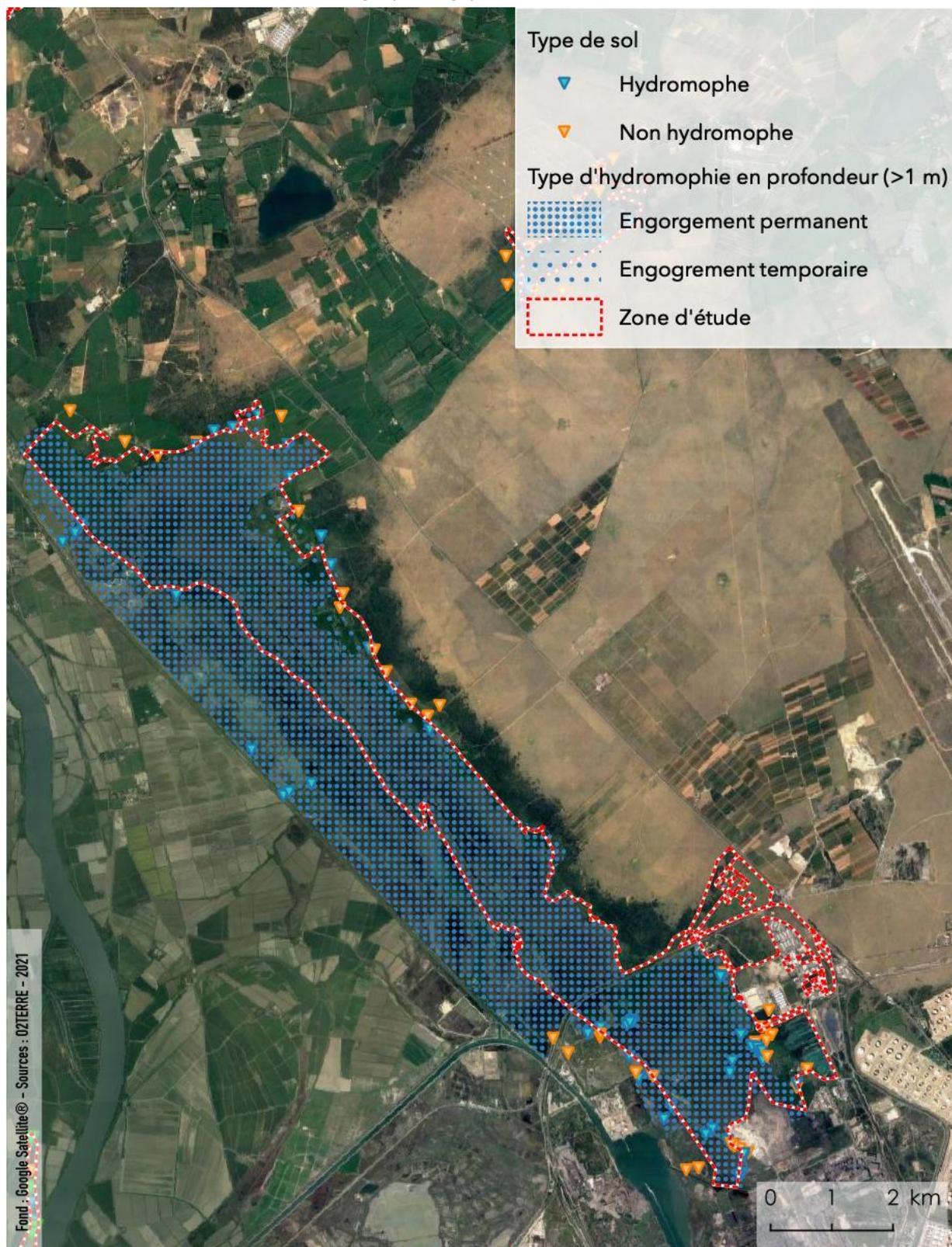
Enfin sur la frange est du marais, les sols sont caractéristiques des **Fersialsols** (Fersialsols calciques et leptiques lorsque le poudingue affleure), difficilement perforables à la tarière à main. La végétation est majoritairement composée de friches méditerranéennes et de boisements de Chênes verts *Quercus ilex*.

Ces formations ne sont donc pas caractéristiques des zones humides.

Sol caractéristiques des zones humides	Classe d'hydromorphie	Type de sol	Type d'engorgement en eau
Oui	Hb 6d 6c	Histosols Réductisols Sodisalisols	Permanent
Oui	5b	Rédoxisols Fersialsols rédoxique	Temporaire
NON	/	Fersialsols calciques Anthroposols	Pas d'influence de remontées de nappe



Carte A- 5 : Sondages pédologiques - Marais des costières de Crau

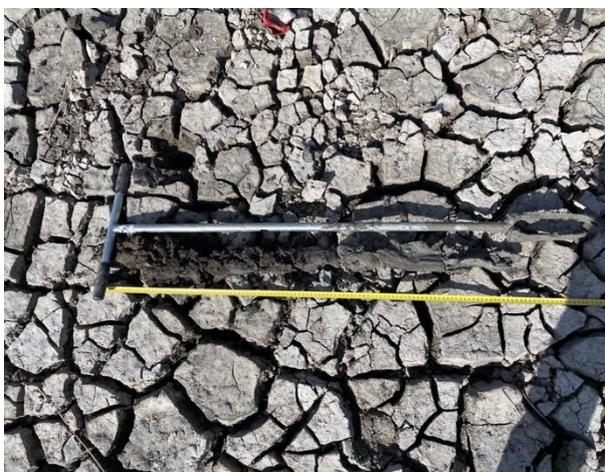




Histosol



Complexe de Cladiaie et de Roselière



Réductisol



Roselière



Sodisalisols dans la partie sud du marais



Pré salé et sansouïre



Annexe 2. Méthode de modélisation simple

Le projet Osmose 2 comprend la réalisation d'un bilan hydrologique au niveau des zones humides suivantes :

- Marais de l'Ilon ;
- Marais de Meyranne ;
- Marais du Grand Brahis ;
- Marais de Baussenq.

Pour chaque zone humide, le projet OSMOSE 2 prévoit le calcul des termes du bilan en eau suivants :

- Les écoulements de surface entrants, sortants et circulants dans les marais ;
- L'évaporation au niveau des surfaces en eau des zones humides ;
- L'évapotranspiration réelle au niveau des surfaces végétalisées non inondées ;
- Les apports pluviométriques directs sur l'emprise des zones humides ;
- Les apports pluviométriques par ruissellement des bassins versants contributifs des zones humides.

Après avoir présenté les emprises retenues au niveau des zones humides (section 0) et rappelé les systèmes de suivis installés dans chacune des zones humides (section 0), nous détaillons la méthode et les hypothèses retenues pour le calcul de :

- L'évaporation à la surface de l'eau (section 0) ;
- L'évapotranspiration réelle (section 0) ;
- Des apports pluviométriques directs (section 0) ;
- Des apports pluviométriques par ruissellement des bassins versants contributifs (section 0).

1. EMPRISE DES ZONES HUMIDES

Le SYMCRAU a fourni une emprise pour chacune des zones humides étudiées sur la base de l'inventaire des zones humides des Bouches-du-Rhône. Pour les besoins de l'étude, il a été nécessaire de redéfinir l'emprise de certaines zones humides pour le bilan hydrologique. Nous présentons ci-après les emprises retenues et, lorsque cela est nécessaire, la méthode pour les définir.

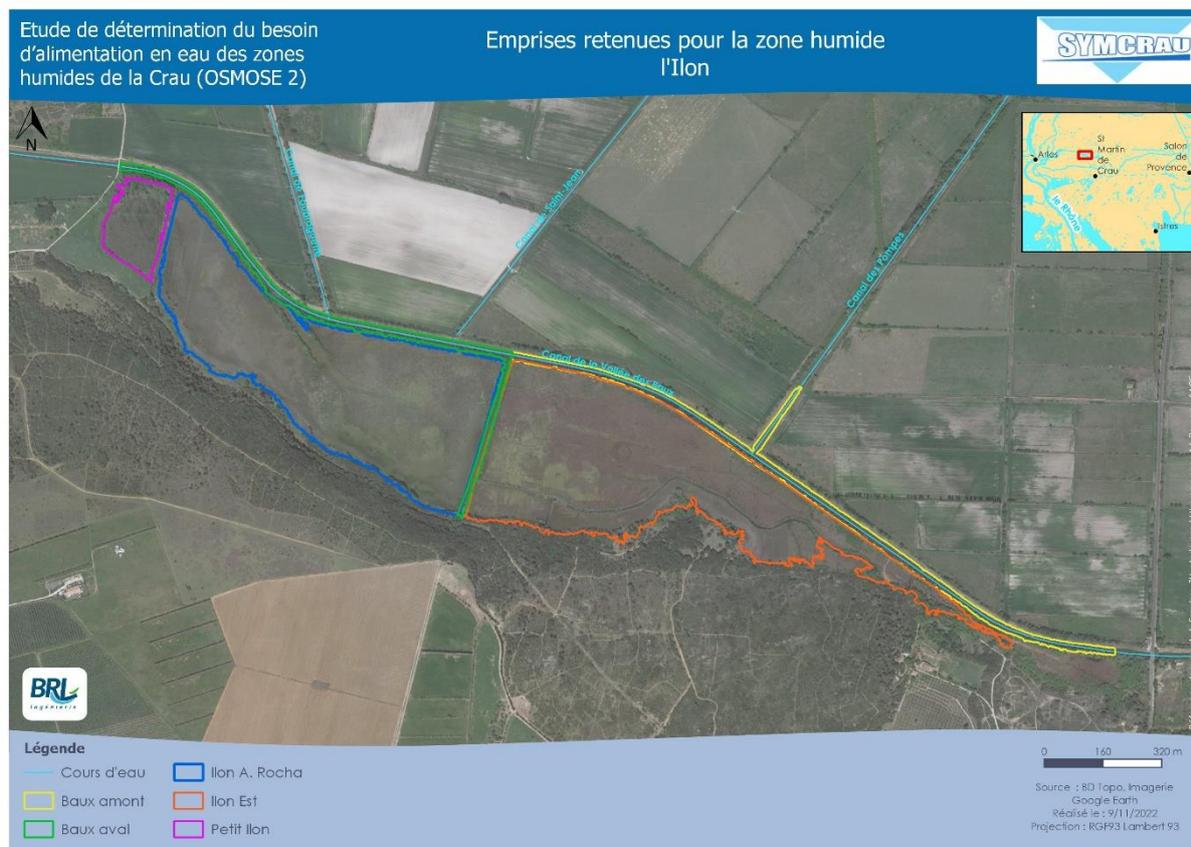
1.1. Marais de l'Ilon

L'analyse du fonctionnement du marais de l'Ilon nous conduit à découper le marais selon 5 sous-emprises :

- Le canal de la Vallée des Baux amont ;
- Le canal de la Vallée des Baux aval ;
- L'Ilon est ;
- L'Ilon A. Rocha ;
- Le Petit Ilon.

La figure suivante présente les emprises définies pour ces 5 compartiments.

Figure A- 1 : Emprises retenues pour le marais de l'Ilon



Les emprises du marais de l'Ilon ont été définies en utilisant le Modèle Numérique de Terrain (MNT) Litto 3d. Les paragraphes suivants détaillent la méthode pour chaque emprise.

Canal de la vallée des Baux

Le canal de la vallée des Baux a été scindé en 2 :

- Canal de la Vallée des Baux amont ;
- Canal de la Vallée des Baux aval.

Le MNT indique une altitude de 0,6 mNGF sur l'ensemble du canal de la Vallée des Baux. Cette valeur correspond sûrement à l'altitude de l'eau le jour des mesures. L'emprise du canal de la Vallée des Baux a été définie comme la couche présentant l'altitude 0,6 mNGF.

Ilon est

Sur l'Ilon est, nous disposons d'une sonde mesurant la variation de hauteur d'eau sur la période 27/03/2019 16:00:00 - 09/05/2022 10:00:00. L'emprise de l'Ilon est a été définie comme étant la surface en eau lorsque la hauteur d'eau maximale est atteinte sur la période de mesure.

Ilon A. Rocha

Sur l'Ilon A. Rocha, nous disposons d'une sonde mesurant la variation de hauteur d'eau sur la période 05/02/2021 10:00:00 - 13/06/2022 01:00:00. L'emprise de l'Ilon A. Rocha a été définie comme étant la surface en eau lorsque la hauteur d'eau maximale est atteinte sur la période de mesure.

Petit Ilon

Sur le Petit Ilon, nous disposons d'une sonde mesurant la variation de hauteur d'eau sur la période 17/03/2021 15:00:00 - 09/05/2022 10:00:00. L'emprise du Petit Ilon a été définie comme étant la surface en eau lorsque la hauteur d'eau maximale est atteinte sur la période de mesure.



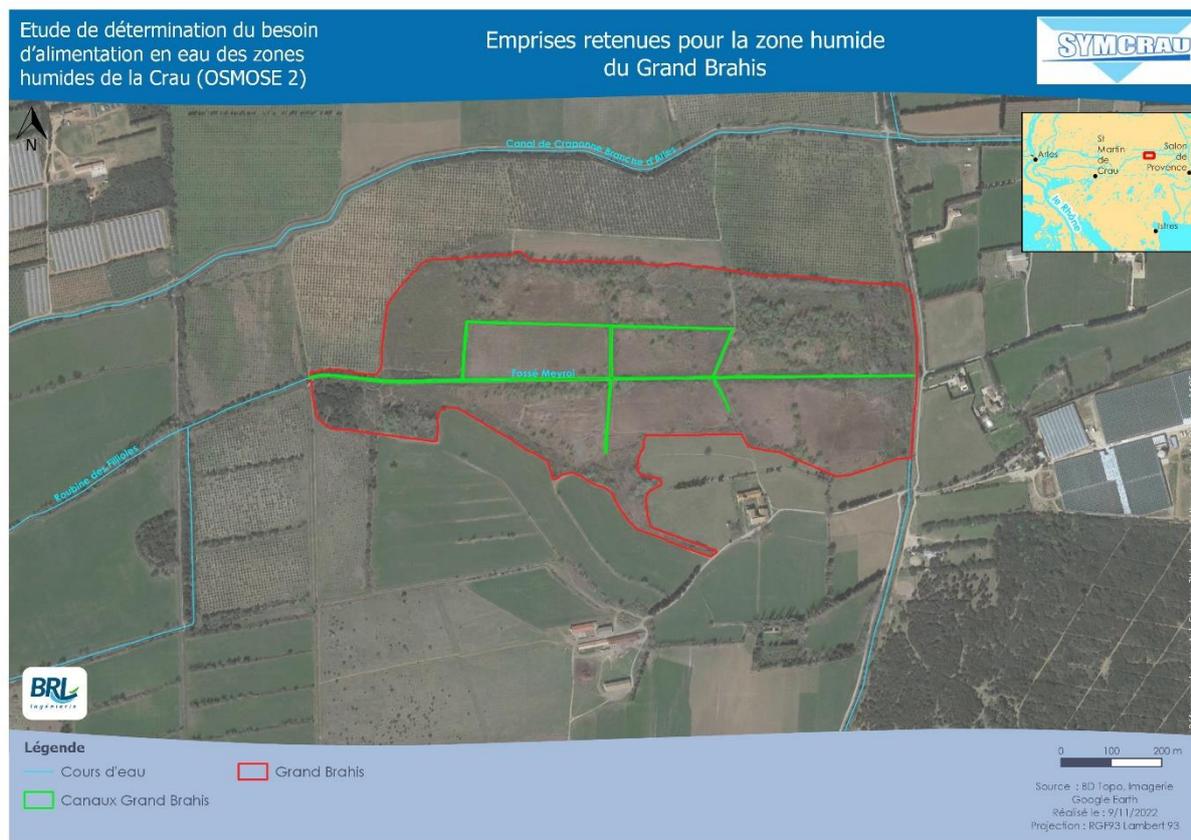
1.2. Grand Brahis

Afin de distinguer les surfaces en permanence en eau des surfaces temporairement ou jamais en eau du marais du Grand Brahis, nous avons distingué 2 emprises :

- L'emprise de la partie canalisée du Grand Brahis ;
- L'emprise du marais du Grand Brahis, hors canaux.

La figure suivante présente les emprises retenues pour le marais du Grand Brahis.

Figure A- 2 : Emprise retenues pour le marais du Grand Brahis



Les paragraphes suivants détaillent la méthode pour chaque emprise.

Partie canalisée du Grand Brahis

L'emprise canalisée du Grand Brahis, considérée comme en permanence en eau, a été délimitée manuellement par observation sur Google Earth.

Emprise du marais du Grand Brahis

L'emprise globale considérée pour le marais du Grand Brahis diffère de celle transmise par le SYMCRAU. En effet, l'emprise a été redessinée en retirant les parcelles agricoles au nord et au sud-ouest.

Afin de considérer les parties non en eau du marais, l'emprise de la partie canalisée a été soustraite à l'emprise globale.

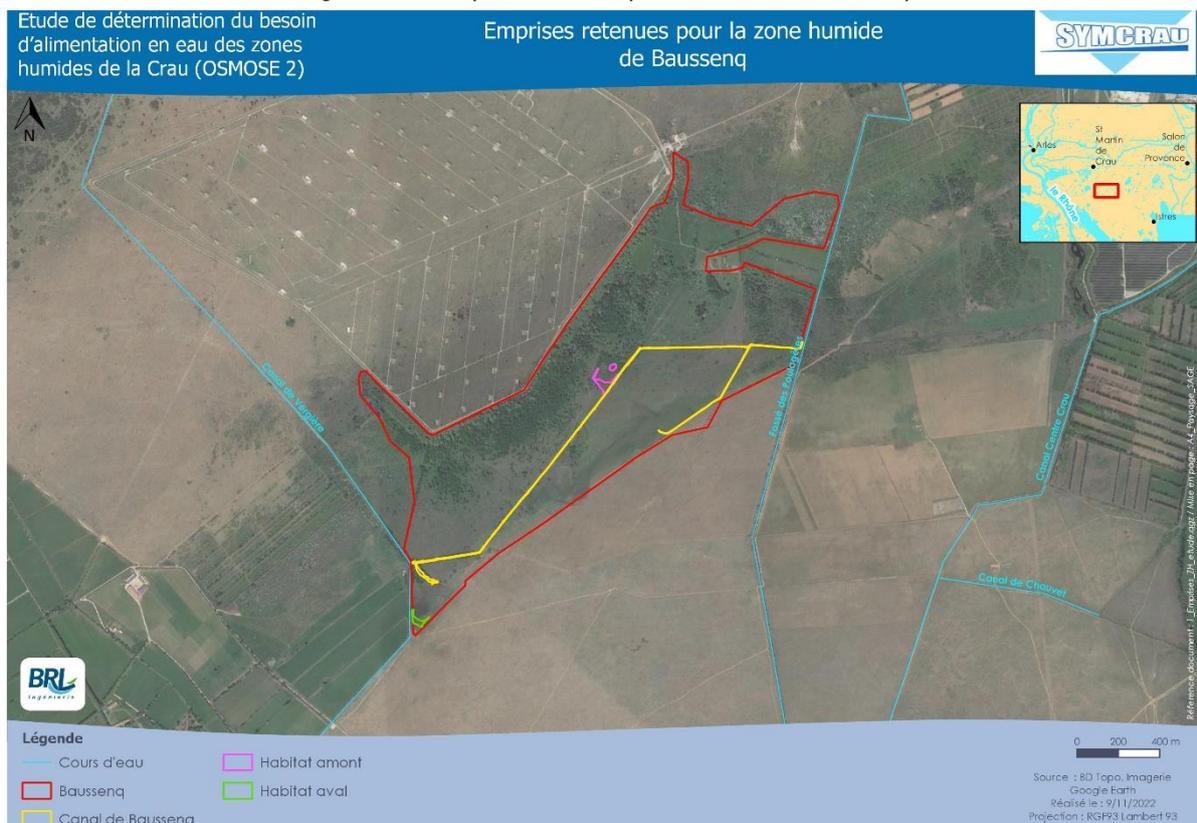
1.3. Baussenq

Afin de distinguer les surfaces en permanence en eau des surfaces temporairement ou jamais en eau du marais de Baussenq, nous avons distingué :

- L'emprise de la partie canalisée du marais de Baussenq ;
- L'emprise de la zone habitat amont, située centralement par rapport au marais ;
- L'emprise de la zone habitat aval, située en aval du marais ;
- L'emprise globale du marais de Baussenq.

La figure suivante présente les emprises retenues pour le marais de Baussenq.

Figure A- 3 : Emprises retenues pour le marais de Baussenq



Les paragraphes suivants détaillent la méthode pour chaque emprise.

Emprise de la partie canalisée du marais de Baussenq

L'emprise de la partie canalisée du marais de Baussenq, considérée comme étant en permanence en eau, a été délimitée manuellement par observation sur Google Earth ;

Emprise de la zone habitat amont, située centralement par rapport au marais

Sur la zone habitat amont, nous disposons d'une sonde mesurant la variation de hauteur d'eau sur la période 05/05/2021 07:00:00 - 11/05/2022 10:00:00. L'emprise de cette zone a été définie comme étant la surface en eau lorsque la hauteur d'eau maximale est atteinte sur la période de mesure.

Emprise de la zone habitat aval, située en aval du marais

Nous disposons des données d'une sonde installée dans la zone habitat aval. Toutefois, nous ne disposons pas des données de hauteur en mNGF. Il est donc impossible d'analyser la variation de hauteur d'eau dans cette zone humide.

L'emprise de la zone habitat aval du marais de Baussenq, considérée comme en permanence en eau, a été délimitée manuellement par observation sur Google Earth.



Emprise globale du marais de Baussenq

L'emprise globale du marais de Baussenq a été définie en s'appuyant sur l'emprise fournie par le SYMCRAU. La partie sud-ouest de l'emprise a toutefois été redessinée afin d'inclure l'intégralité du canal de Baussenq.

Enfin, l'emprise finale a été définie en soustrayant les emprises des deux zones humides et celle du canal.

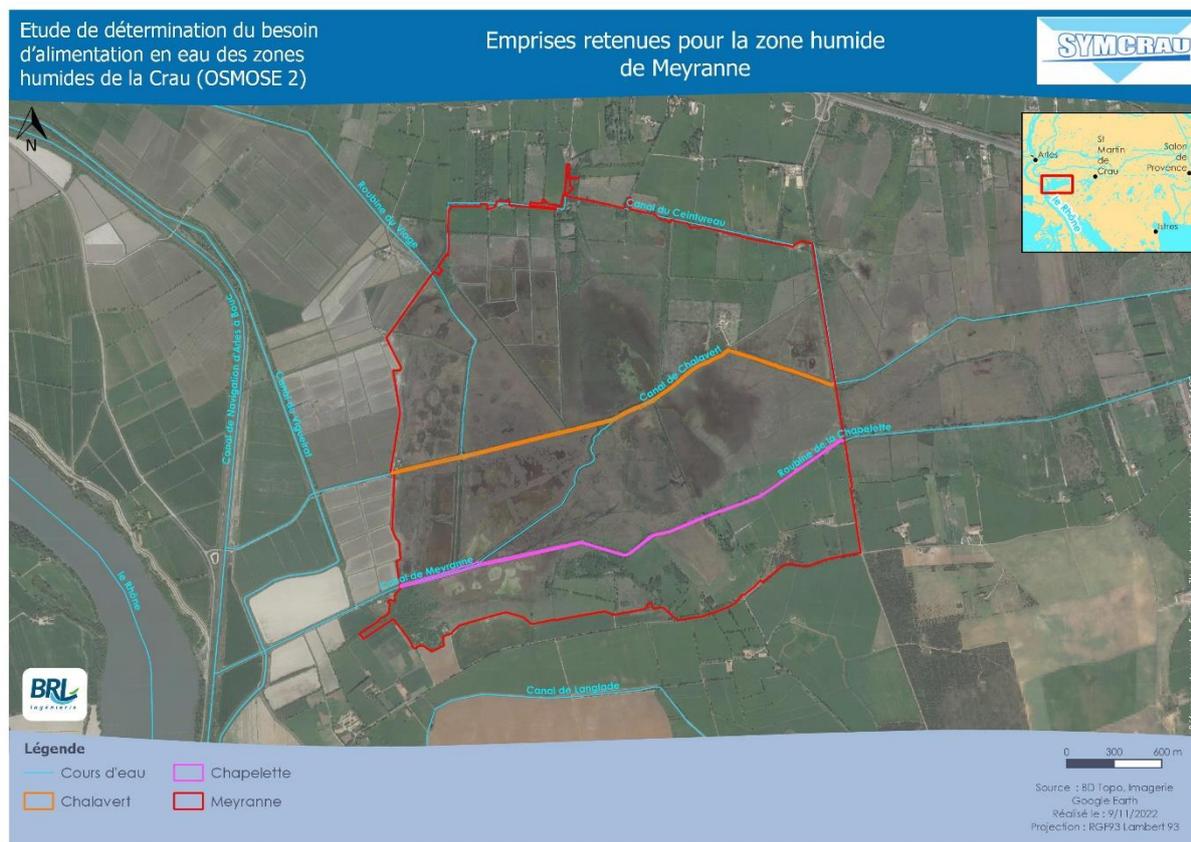
1.4. Meyranne

Afin de distinguer les surfaces en permanence en eau des surfaces temporairement ou jamais en eau du marais de Meyranne, nous avons distingué :

- L'emprise du canal du Chalavert ;
- L'emprise du canal de la Chapelette ;
- L'emprise globale du marais de Meyranne.

La figure suivante présente les emprises retenues pour le marais de Meyranne.

Figure A- 4 : Emprises retenues pour le marais de Meyranne



Les paragraphes suivants détaillent la méthode pour chaque emprise.

Emprise du canal du Chalavert et du canal de la Chapelette

Les emprises des canaux du Chalavert et de la Chapelette ont été définies par observations des surfaces en eau sur Google Earth.

Emprise du marais de Meyranne

L'emprise du marais de Meyranne a été définie à partir de l'emprise fournie par le SYMCRAU. A cette emprise ont été soustraits celles des canaux du Chalavert et de la Chapelette.

2. SUIVI DE LA RESSOURCE EN EAU

Dans le cadre du projet Osmose 2, un système de suivi a été mis en place pour chacune des zones humides. L'acquisition de données in situ prévue dans le projet a permis la collecte de données concernant les compartiments et termes du bilan en eau suivants :

- Les écoulements de surface entrants, sortants et circulants dans les marais ;
- Les niveaux d'eau dans les marais ;
- De manière ponctuelle, les niveaux d'eau dans la nappe (création de piézomètres).

Nous détaillons ci-après les systèmes de mesures mis en place au niveau de chaque zone humide.

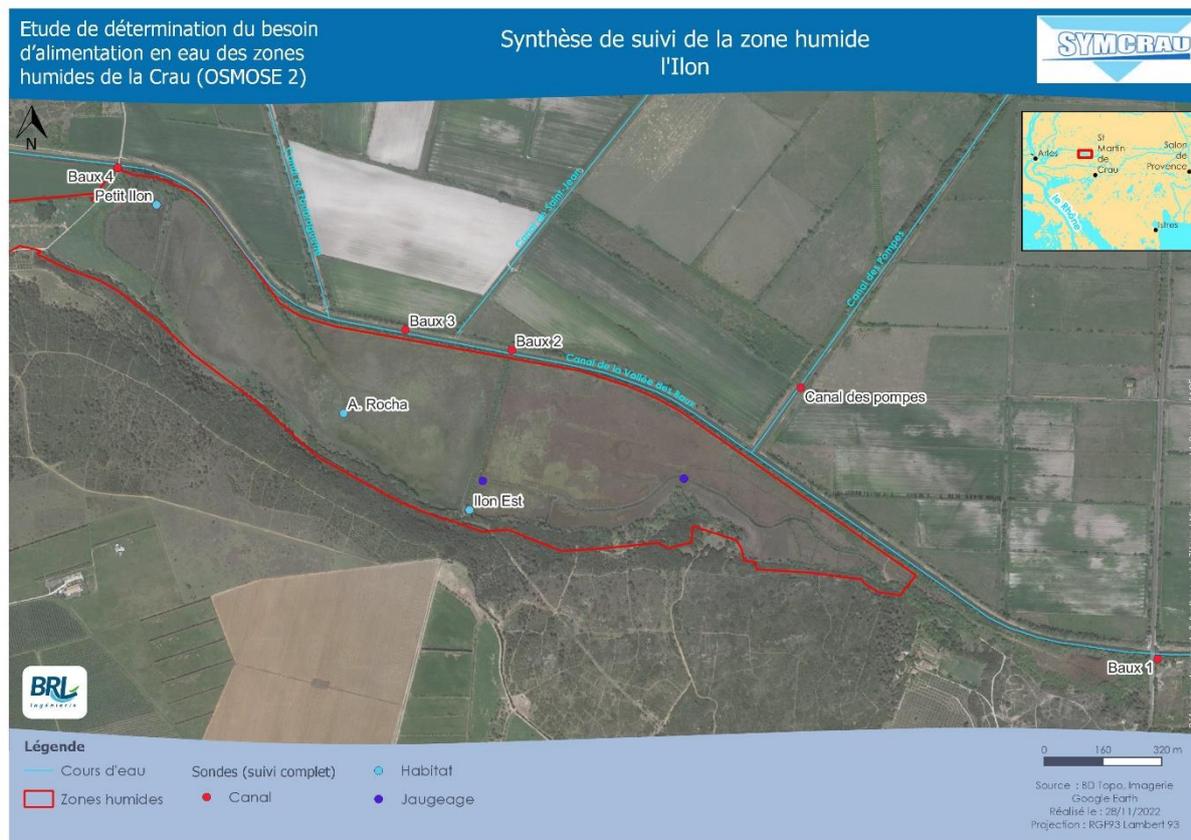
2.1. Marais de l'Ilon

Le système de suivi du marais de l'Ilon comprend :

- 4 sondes sur le canal de la Vallée des Baux :
 - Une sonde (Baux 1) vise à suivre le débit entrant dans le périmètre du marais ;
 - Une sonde (Baux 2) vise à déterminer le débit sortant de la partie est du marais de l'Ilon. Le canal de la Vallée des Baux présente des brèches permettant des échanges avec la partie est du marais ;
 - Une sonde (Baux 3) sera positionnée en face d'une brèche entre le canal de la Vallée des Baux et la partie ouest du marais. En comparant les hauteurs d'eau mesurées par cette sonde avec celles mesurées par une sonde habitat, nous pourrions suivre les échanges entre le canal et le marais ;
 - Une sonde (Baux 4) sur le canal de la Vallée des Baux permettra de suivre le débit sortant du marais.
- 1 sonde (Canal des Pompes) sur le canal des pompes vise à suivre le débit entrant dans le périmètre du marais ;
- Une sonde pour le suivi des habitats dans l'Ilon est (Ilon est) ;
- Une sonde pour le suivi des habitats dans l'Ilon A. Rocha (Ilon A. Rocha) ;
- Une sonde pour le suivi des habitats dans le Petit Ilon (Petit_Ilon).



Figure A- 5 : Système de suivi du marais de l'Illon



SYNTHESE DES DONNEES DISPONIBLES

Le tableau suivant fait la synthèse des données disponibles au niveau des sondes.

Tableau A- 1 : Données disponibles au niveau des sondes installées sur le marais de l'Illon

Nom SYMCRAU	Période disponible
Baux 1	03/02/2022 17:00:00 - 09/05/2022 09:00:00
Canal des Pompes	08/04/2021 11:00:00 - 09/05/2022 12:00:00
Baux 2	30/04/2021 12:00:00 - 09/05/2022 13:00:00
Baux 3	08/04/2021 12:00:00 - 08/02/2022 17:00:00
Baux 4	08/04/2021 15:00:00 - 09/05/2022 11:00:00
Petit Illon	17/03/2021 15:00:00 - 09/05/2022 10:00:00
A. Rocha	05/02/2021 10:00:00 - 13/06/2022 01:00:00
Illon Est	27/03/2019 16:00:00 - 09/05/2022 10:00:00

Remarques :

- Sonde Baux1 : on ne dispose pas des données en mNGF sur la période 01/04/2021 16:00 - 03/08/2021 13:00:00. On ne peut pas établir de courbe de tarage au droit de ce site ;
- Sonde Baux 3 : On ne dispose pas des données en mNGF. La sonde a été détruite ; il est impossible de la niveler.

PERIODE D'ANALYSE

Au vu des données disponibles, l'analyse sur le marais de l'Illon est réalisée sur la période allant de mai 2021 à décembre 2021.

2.2. Grand Brahis

SYSTEME DE SUIVI

Le système de suivi du marais du Grand Brahis comprend :

- Une sonde de suivi du débit entrant dans le marais via le Fossé Meyrol (Brahis_C1) ;
- Une sonde de suivi du débit sortant du marais via le Fossé Meyrol (Brahis_C2) ;
- une sonde pour le suivi des niveaux d'eau dans les habitats (Bra2) ;
- Deux sondes de suivi de la nappe (Bra1 et Brahis_piezo).

Figure A- 6 : Système de suivi du marais du Grand Brahis



SYNTHESE DES DONNEES DISPONIBLES

Le tableau suivant fait la synthèse des données disponibles.

Tableau A- 2 : Données disponibles pour les sondes du marais du grand Brahis

Nom SYMCRAU	Période disponible
Brahis C1	12/03/2021 16:00:00 - 05/05/2022 11:00:00
Brahis C2	12/03/2021 16:00:00 - 05/05/2022 10:00:00
Bra 2	22/03/2019 17:00:00 - 05/05/2022 10:00:00
Brahis piezo	05/10/2021 10:00:00 - 05/05/2022 10:00:00
Bra 1	22/03/2019 17:00:00 - 05/05/2022 12:00:00

Remarque : nous ne disposons pas des données en mNGF pour la sonde Brahis_C1. La sonde étant installée dans un passage en galerie, il est impossible de mesurer la hauteur du zéro de la sonde avec un appareil. Ceci n'empêche pas la production d'une courbe de tarage.



PERIODE D'ANALYSE

Au vu des données disponibles, l'analyse sur le marais du Grand Brahis est réalisée sur la période allant de juin 2021 à avril 2022.

2.3. Baussenq

SYSTEME DE SUIVI

Le système de suivi du marais de Baussenq comprend :

- Une sonde à l'entrée du fossé des Poulagères dans le marais. Cette sonde permet de suivre le débit prélevé sur le canal Centre Crau et entrant dans le marais (Poulagères) ;
- Deux sondes sur le canal de Vergière, en amont (Verg1A) et en aval (Verg1B) de la traversé du périmètre du marais. Elles permettront de quantifier le débit sortant du marais ;
- Une sonde centrale par rapport au marais, pour le suivi des habitats (Baussenq_hab_amont) ;
- Une sonde située dans une zone qui semble en eau de façon permanente, et située à l'exutoire du marais (Baussenq_hab_aval) ;
- Deux sondes pour le suivi de la nappe (Baussenq_puit et Baussenq_puit2).

Figure A- 7 : Système de suivi du marais de Baussenq



SYNTHESE DES DONNEES DISPONIBLES

Le tableau suivant fait la synthèse des données disponibles.

Tableau A- 3 : Synthèse des données disponibles au niveau des sondes du marais de Baussenq

Nom SYMCRAU	Période disponible
Poulageres	02/04/2021 09:00:00 - 11/05/2022 09:00:00
Verg 1A	02/04/2021 13:00:00 - 11/05/2022 12:00:00
Verg 1B	02/04/2021 14:00:00 - 11/05/2022 13:00:00
Baussenq hab amont	05/05/2021 07:00:00 - 11/05/2022 10:00:00
Baussenq hab aval	05/05/2021 14:00:00 - 03/08/2021 12:00:00
Baussenq puit	02/04/2021 12:00:00 - 11/05/2022 09:00:00
Baussenq puit2	05/05/2021 12:00:00 - 11/05/2022 12:00:00

Remarque :

- Sonde Baussenq_hab_aval : on ne dispose pas des données en mNGF.

PERIODE D'ANALYSE

Au vu des données disponibles, l'analyse sur le marais de Baussenq est réalisée sur la période allant d'avril 2021 à avril 2022.

2.4. Meyranne

SYSTEME DE SUIVI

Le système de suivi du marais de Meyranne comprend :

- Une sonde au croisement du canal du Chalavert avec la D83d (chal2). Elle permet de suivre le débit sortant du marais des Chanoines via le canal du Chalavert ;
- Une sonde au croisement du canal de la Chapelette avec la D83d (Chap2). Elle permet de suivre le débit sortant du marais des Chanoines via le canal de la Chapelette ;
- Une sonde en aval du canal du Chalavert (Chal_exutoire) permettant de suivre les débits sortant du marais de Meyranne via le canal du Chalavert ;
- Une sonde en aval du canal de la Chapelette (Chap_exutoire) permettant de suivre les débits sortant du marais de Meyranne via le canal du Chalavert ;
- Deux sondes pour suivre les niveaux d'eau des habitats dans le marais de Meyranne (Masperdu et Clément).

3. EVAPORATION A LA SURFACE DE L'EAU

Cette section présente la méthode et les hypothèses retenues pour le calcul de l'évaporation à la surface de l'eau au niveau des zones humides. Ce calcul repose sur l'utilisation de la formule de Rohwer.

Après avoir présenté la formule de Rohwer, nous présentons les données climatologiques retenus pour le calcul de l'évaporation. Enfin, nous détaillons la méthode d'application de la formule de Rohwer au niveau de chaque zone humide.

3.1. Formule de Rohwer

La formule de Rohwer permet de calculer le pouvoir évaporant à la surface d'un plan d'eau en fonction de la vitesse du vent, de la pression de vapeur saturant et de la pression de vapeur actuelle de l'air. La formule est la suivante :

$$E = 0,484 * (1 + 0,6 u) * (ps - pe)$$

Avec :

- E : pouvoir évaporant de l'air [mm] ;
- u : vitesse du vent [m/s] ;
- ps : pression de vapeur saturant [kPa] ;
- pe : pression de vapeur actuelle de l'air [kPa].

Humidité relative de l'air

L'humidité relative est le rapport entre la pression partielle de vapeur d'eau et la pression de vapeur saturante pour une température et un volume d'air donnés. Elle s'exprime comme suit :

$$Hr = 100 * \frac{pe}{ps}$$

Avec :

- pe : pression effective ou réelle de vapeur d'eau dans l'air [kpa] ;
- ps : pression de vapeur d'eau saturée (ou tension de vapeur) à la température de la surface évaporante [kpa].

On en déduit :

$$pe = \frac{Hr * ps}{100}$$

Pression de vapeur saturant et température de la surface évaporante

La pression de vapeur saturante augmente avec la température. Elle peut s'exprimer comme suit (en Pa et avec la température en degrés Celsius) :

$$ps = 0,611 * \exp\left(\frac{17,27 * T}{237,3 + T}\right)$$

Avec :

- ps : pression de vapeur d'eau saturée (ou tension de vapeur) à la température de la surface évaporante [kpa]
- T : température à la surface de l'eau [°C].



Évaporation à la surface d'un plan d'eau

Au final, on peut exprimer l'évaporation à la surface d'un plan d'eau selon la formule suivante :

$$E = 0,295724 * (1 + 0,6 u) * \exp\left(\frac{17,27 * T}{237,3 + T}\right) * \left(1 - \frac{Hr}{100}\right)$$

Avec :

- E : pouvoir évaporant de l'air [mm] ;
- u : vitesse du vent [m/s] ;
- T : température à la surface de l'eau [°C] ;
- Hr : Humidité relative [-].

3.2. Données météorologiques

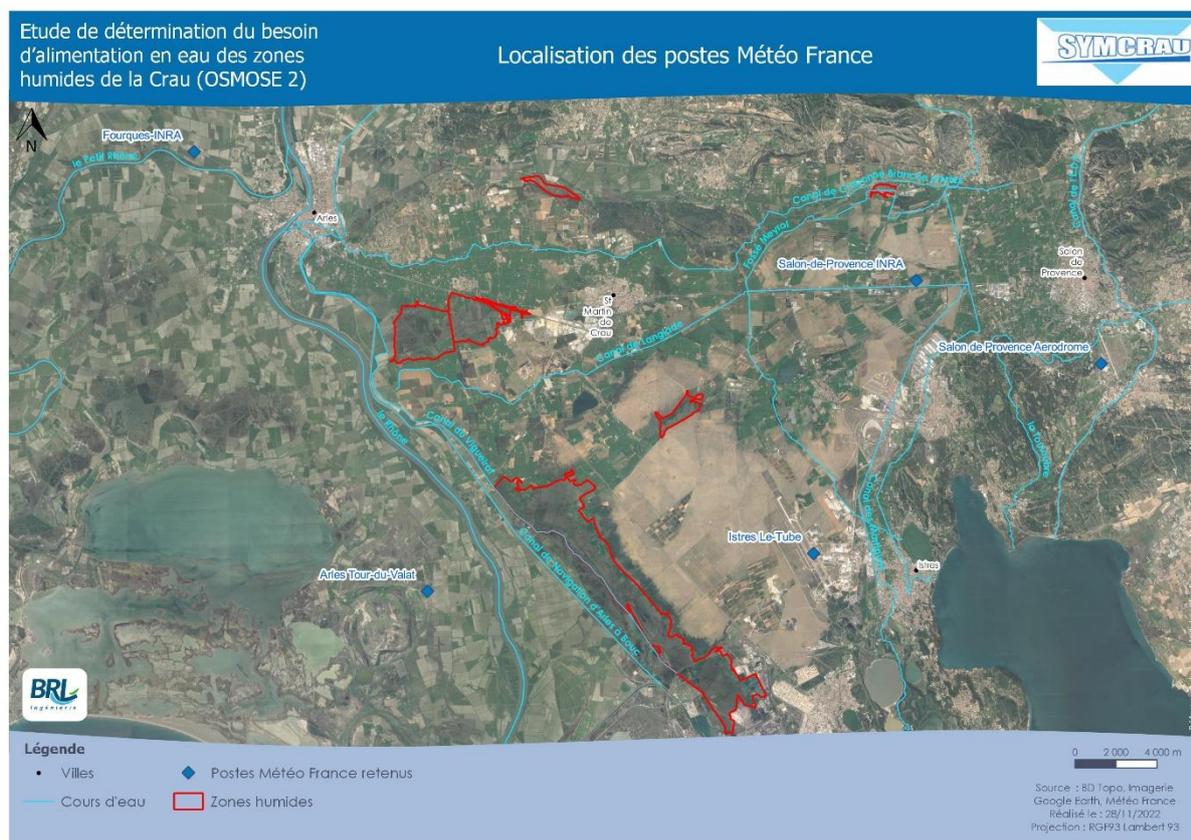
Données Météo France

Les données de vitesse du vent, de température et d'humidité relative ont été collectées au niveau des postes Météo France suivants. La figure suivante présente la localisation des postes.

Tableau A- 5 : Postes Météo France et données disponibles au niveau de chaque poste

Données disponibles	13103004 - Salon de Provence INRA	13004003 - Arles Tour du Valat	13047001 - Istres Le Tube	13103001 - Salon de Provence aéroport	30117002 - Fourques - Inra
Vent	NA	01/01/2021 – 31/05/2022			
Humidité	01/01/2021 – 31/05/2022				
Température	01/01/2021 – 31/05/2022				

Figure A- 9 : Localisation des postes Météo France



Notons que la localisation des postes permet d'avoir une bonne représentativité spatiale de l'humidité et de la température au niveau des zones humides. Le poste 13103004 Salon-de-Provence INRA ne dispose pas de données de vent. Ceci est compensé par le poste 13103001 Salon-de-Provence aérodrome.

Spatialisation des données

Les données de vent, d'humidité et de température ont été spatialisées par la méthode inverse distance sur l'ensemble de la plaine de la Crau.

3.3. Calcul de la surface en eau

Comme indiqué précédemment, la formule de Rohwer permet de calculer le pouvoir évaporant à la surface d'un plan d'eau. Celui-ci est calculé en millimètres.

Pour chaque zone humide, l'évaporation à la surface de l'eau a été calculée en m³ en ramenant le pouvoir évaporant calculé avec la formule de Rohwer aux surfaces effectivement en eau dans les zones humides.

Les sections suivantes précisent la méthode appliquée pour le calcul de la surface en eau pour chaque emprise (voir section 0).

3.3.1. Marais de l'Illon

Canal de la vallée des Baux amont

Pour l'emprise du canal de la Vallée des Baux amont, la surface en eau a été calculée en utilisant :

- Le MNT Litto3D ;
- La chronique de hauteur de la station Baux 2.

Sur l'emprise du canal de la Vallée des Baux amont, le MNT Litto3D indique une altitude minimale de 0,60 mNGF.

- Lorsque la hauteur d'eau mesurée par la station Baux 2 est supérieure à 0,60 mNGF, la surface en eau correspondante a été calculée à l'aide d'un outil cartographique ;
- Lorsque la hauteur d'eau mesurée par la station Baux 2 est inférieure ou égale à 0,60 mNGF, la surface en eau correspondante a été considérée égale à celle de la hauteur 0,60 mNGF.

Canal de la Vallée des Baux aval

Pour l'emprise canal de la Vallée des Baux aval, la surface en eau a été calculée en utilisant :

- Le MNT Litto3D ;
- La chronique de hauteur de la station Baux 4.

Sur l'emprise du canal de la Vallée des Baux aval, le MNT Litto3D indique une altitude minimale de 0,60 mNGF.

- Lorsque la hauteur d'eau mesurée par la station Baux 4 est supérieure à 0,60 mNGF, la surface en eau correspondante a été calculée à l'aide d'un outil cartographique ;
- Lorsque la hauteur d'eau mesurée par la station Baux 4 est inférieure ou égale à 0,60 mNGF, la surface en eau correspondante a été considérée égale à celle de la hauteur 0,60 mNGF.



Ilon Est

Pour l'emprise de l'Ilon Est, la surface en eau a été calculée en utilisant :

- Le MNT Litto3D ;
- La chronique de hauteur de la station Ilon Est.

Sur l'emprise de l'Ilon Est, le MNT Litto3D indique une altitude minimale de 0,60 mNGF.

- Lorsque la hauteur d'eau mesurée par la station Ilon Est est supérieure à 0,60 mNGF, la surface en eau correspondante a été calculée à l'aide d'un outil cartographique ;
- Lorsque la hauteur d'eau mesurée par la station Ilon Est est inférieure ou égale à 0,60 mNGF, la surface en eau correspondante a été considérée égale à celle de la hauteur 0,60 mNGF.

Ilon A. Rocha

Pour l'emprise de l'Ilon A. Rocha, la surface en eau a été calculée en utilisant :

- Le MNT Litto3D ;
- La chronique de hauteur de la station Ilon A. Rocha.

Sur l'emprise de l'Ilon A. Rocha, le MNT Litto3D indique une altitude minimale de 0,52 mNGF.

- Lorsque la hauteur d'eau mesurée par la station Ilon A. Rocha est supérieure à 0,52 mNGF, la surface en eau correspondante a été calculée à l'aide d'un outil cartographique ;
- Lorsque la hauteur d'eau mesurée par la station Ilon A. Rocha est inférieure ou égale à 0,52 mNGF, la surface en eau correspondante a été considérée égale à celle de la hauteur 0,52 mNGF.

Petit Ilon

Pour l'emprise du Petit Ilon, la surface en eau a été calculée en utilisant :

- Le MNT Litto3D ;
- La chronique de hauteur de la station Petit Ilon.

Sur l'emprise du Petit Ilon, le MNT Litto3D indique une altitude minimale de 0,60 mNGF.

- Lorsque la hauteur d'eau mesurée par la station Petit Ilon est supérieure à 0,60 mNGF, la surface en eau correspondante a été calculée à l'aide d'un outil cartographique ;
- Lorsque la hauteur d'eau mesurée par la station Petit Ilon est inférieure ou égale à 0,60 mNGF, la surface en eau correspondante a été considérée égale à celle de la hauteur 0,60 mNGF.

3.3.2. Grand Brahis

L'évaporation à la surface de l'eau a été calculée pour la partie canalisée du marais du Grand Brahis (emprise « Partie canalisée du Grand Brahis »).

Le MNT disponible pour cette zone humide (RGE ALTI 1m) n'est pas assez précis pour distinguer la partie canalisée du marais et éventuellement calculer une surface en eau en fonction de la variation de hauteur d'eau.

Pour cette raison, nous avons considéré la surface en eau constante, égale à la superficie de l'emprise « Partie canalisée du Grand Brahis ». Soit 0,69 ha.

3.3.3. Baussenq

L'évaporation à la surface de l'eau, donc la surface en eau ont été calculées pour :

- La partie canalisée du marais de Baussenq ;
- La zone habitat amont ;
- La zone habitat aval.

Partie canalisée du marais de Baussenq

Le MNT disponible pour cette zone humide (RGE ALTI 1m) n'est pas assez précis pour distinguer la partie canalisée du marais et éventuellement calculer une variation de surface en eau en fonction de la variation de hauteur d'eau.

Pour cette raison, nous avons considéré la surface en eau constante, égale à la superficie de l'emprise « Partie canalisée du marais de Baussenq ». Soit 1,08 ha

Emprise de la zone habitat amont, située centralement par rapport au marais

Pour l'emprise de la zone habitat amont, la surface en eau a été calculée en utilisant :

- Le MNT RGE ALTI 1m ;
- La chronique de hauteur de la station Baussenq hab amont.

Sur l'emprise Baussenq hab amont, le MNT indique une altitude minimale de 19,6 mNGF.

- Lorsque la hauteur d'eau mesurée par la station Emprise hab amont est supérieure à 19,6 mNGF, la surface en eau correspondante a été calculée à l'aide d'un outil cartographique ;
- Lorsque la hauteur d'eau mesurée par la station Emprise hab amont est inférieure ou égale à 19,6 mNGF, la surface en eau correspondante a été considérée égale à celle de la hauteur 19,6 mNGF.

Emprise de la zone habitat aval, située en aval du marais

Nous ne disposons pas de données de hauteur d'eau en mNGF pour la station Baussen hab aval.

Pour cette raison, nous avons considéré la surface en eau constante, égale à la superficie de l'emprise « la zone habitat aval ». Soit 0,18 ha

3.3.4. Meyranne

L'évaporation à la surface de l'eau, donc la surface en eau ont été calculées pour :

- Le canal du Chalavert ;
- Le canal de la Chapelette.

Canal du Chalavert

Pour l'emprise du canal du Chalavert, la surface en eau a été calculée en utilisant :

- Le MNT Litto3D ;
- La chronique de hauteur de la station Chal2.

Sur l'emprise du canal du Chalavert, le MNT indique une altitude minimale de 0,27 mNGF.

- Lorsque la hauteur d'eau mesurée par la station Chal 2 est supérieure à 0,27 mNGF, la surface en eau correspondante a été calculée à l'aide d'un outil cartographique ;
- Lorsque la hauteur d'eau mesurée par la station chal 2 est inférieure ou égale à 0,27 mNGF, la surface en eau correspondante a été considérée égale à celle de la hauteur 0,27 mNGF.



Canal de la Chapelette

Le MNT disponible pour cette zone humide (Litto3d) n'est pas assez précis pour distinguer la partie canalisée et éventuellement calculer une variation de surface en eau en fonction de la variation de hauteur d'eau.

Pour cette raison, nous avons considéré la surface en eau constante, égale à la superficie de l'emprise « canal de la Chapelette ». Soit 3,13 ha

4. EVAPOTRANSPIRATION AU NIVEAU DES ZONES HUMIDES

Le calcul de l'évapotranspiration au niveau des zones humides repose sur les étapes suivantes :

- Le calcul de la surface qui n'est pas en eau pour chaque emprise des zones humides ;
- Le calcul de l'évapotranspiration réelle.

Nous présentons ci-après chacune des étapes permettant le calcul de l'évapotranspiration.

4.1. Calcul des surfaces qui ne sont pas en eau

La section 0 présente la méthode appliquée pour le calcul de la surface en eau des différentes emprises retenues pour les zones humides. A partir des résultats de la section 0, nous avons calculé la surface émergée des zones humides selon la formule :

$$\text{Surface émergée} = \text{surface de l'emprise} - \text{surface immergée}$$

138

4.2. Calcul de l'évapotranspiration réelle

Le calcul de l'évapotranspiration réelle repose sur la formule :

$$\text{ETR} = k_c * \text{ETP}$$

Avec :

- ETR : EvapoTranspiration Réelle ;
- Kc : coefficient cultural ;
- ETP : EvapoTranspiration Potentielle.

4.2.1. Choix des données Météo France

Les données d'évapotranspiration potentielles ont été collectées sur la période 01/01/2021 – 31/05/2022 au niveau des postes Météo France suivants :

- 13103004 : Salon de Provence INRA ;
- 30117002 : Fourques INRA.

4.2.2. Coefficients culturaux

Selon les zones humides, nous avons considéré les coefficients culturaux suivants :

- Marais de roseaux, sol humide ;
- Prairies.

Les données concernant les coefficients culturaux sont issues :

- De la FAO (<https://www.fao.org/3/x0490e/x0490e0b.htm>);
- Du memento irrigation développé par BRL.

Tableau A- 6 : Coefficients culturaux

Végétation	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembr e	Octobre	Novembre	Décembre
Prairie	0,6	0,6	1,1	1,1	1,1	1,1	0,6	0,6	1,1	0,6	0,6	0,6
Marais de roseaux, sol humide	0,9	0,9	0,9	0,9	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	0,7	0,9	0,9

5. APPORTS PLUVIOMETRIQUES

DONNEES METEO FRANCE

Les données de pluie ont été collectées au niveau des postes Météo France suivants. La **Erreur ! source du renvoi introuvable.** présente la localisation des postes.

Tableau A- 7 : Postes Météo France et données disponibles au niveau de chaque poste

Données disponibles	13103004 - Salon de Provence INRA	13004003 - Arles Tour du Valat	13047001 - Istres Le Tube	13103001 - Salon de Provence aérodrome	30117002 - Fourques - Inra
Pluie	01/01/2021 – 31/05/2022				

SPATIALISATION DES DONNEES

Les données de pluie ont été spatialisées par la méthode inverse distance sur l'ensemble de la plaine de la Crau.

CALCUL DES APPORTS PLUVIOMETRIQUES DIRECTS SUR L'EMPRISE DES ZONES HUMIDES

Les apports pluviométriques ont été calculés pour chacune des emprises des zones humides (voir section 0) à l'aide d'un outil géographique.



6. RUISSELLEMENT DES BASSINS VERSANTS CONTRIBUTIFS

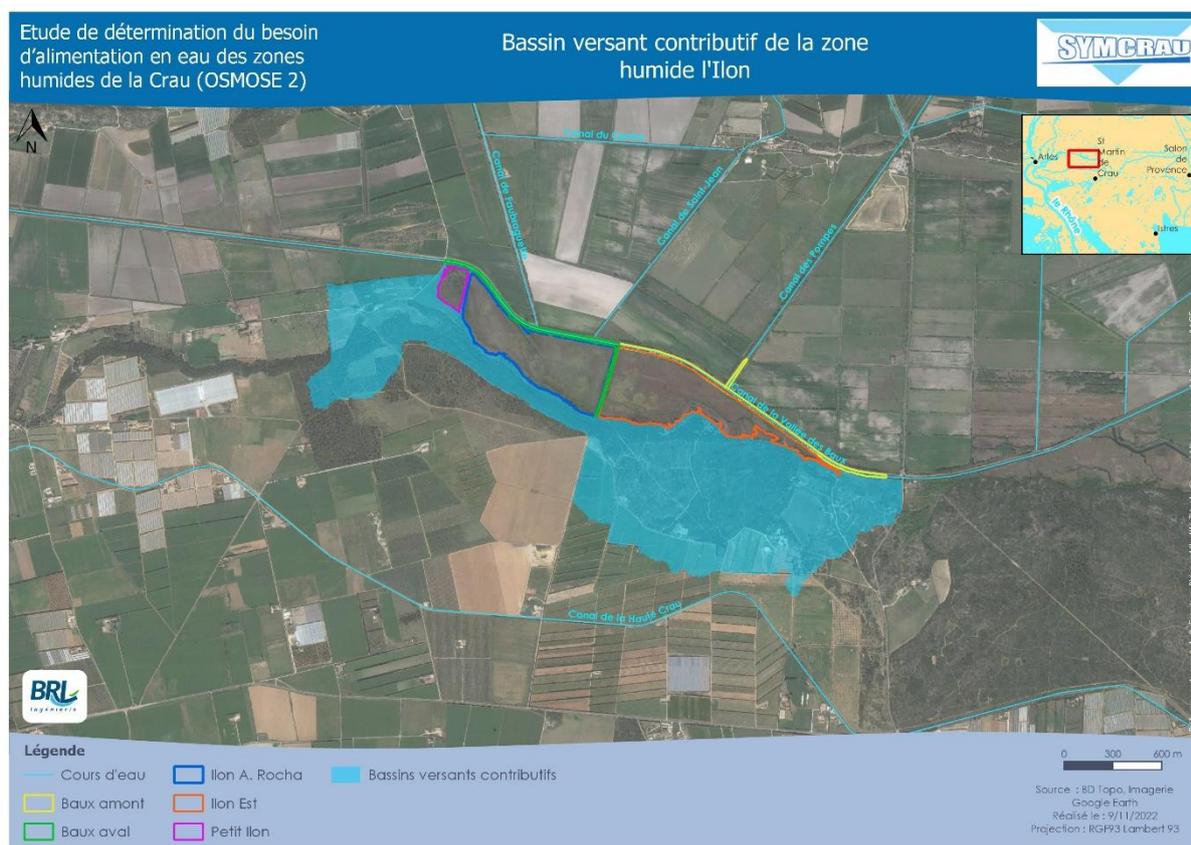
6.1. Emprise des bassin-versants contributifs

Pour chacun des zones humides, la première étape a consisté à délimiter les bassins versants contributifs. Nous présentons ci-après les bassins-versants contributifs délimités pour chacune des zones humides.

6.1.1. Marais de l'Ilon

Les bassins versants contributifs du marais de l'Ilon ont été déterminés à l'aide d'un outil de cartographie et du MNT Litto3d. La figure suivante représente, en bleu, le bassin-versant contributif du marais de l'Ilon. Notons que le marais de l'Ilon est délimité au nord par une voie carrossable en surplomb de la zone humide. Par conséquent, le marais ne présente aucun bassin-versant contributif.

Figure A- 10 : Bassins versants contributifs de la zone humide de l'Ilon



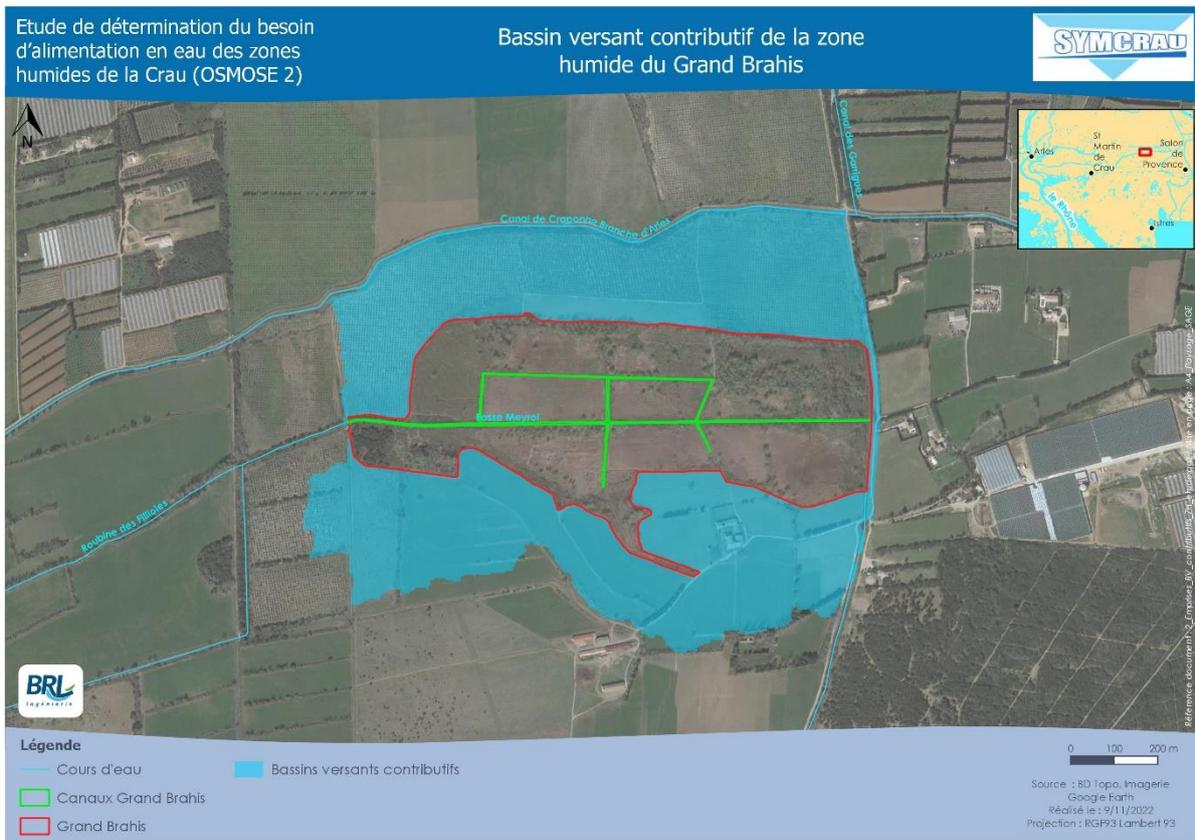
6.1.2. Grand Brahis

La figure suivante présente le bassin-versant contributif du marais du Grand Brahis. Les bassins versants contributifs ont été délimités manuellement, par connaissance du terrain.

Notons que nous pouvons distinguer deux zones dans le bassin-versant contributif du marais du Grand Brahis :

- Une zone, correspondant à la moitié nord du bassin-versant contributif, essentiellement constitué de cultures d'oliviers ;
- Une zone, correspondant à la moitié sud du bassin-versant contributif, essentiellement constitué de cultures de prairies de foin de Crau.

Figure A- 11 : Bassins versants contributifs du marais du Grand Brahis

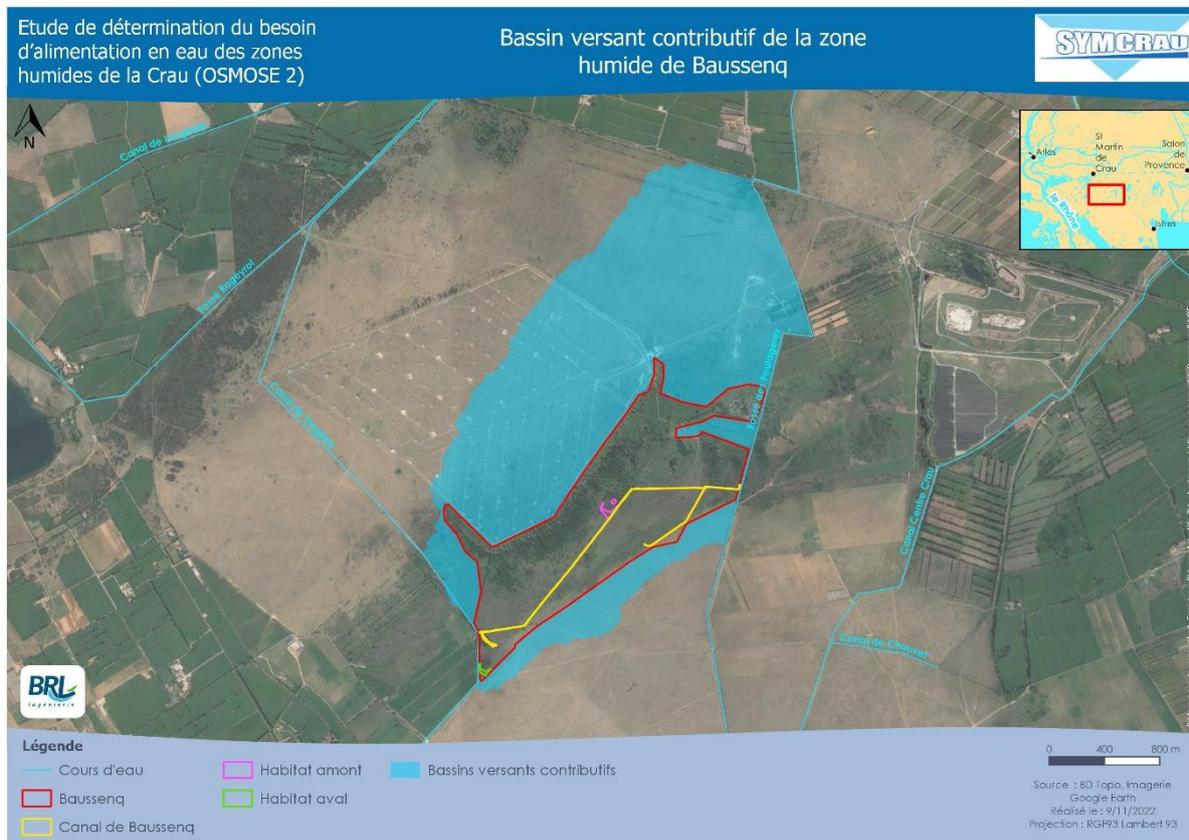




6.1.3. Baussenq

La figure suivante présente les bassins-versants contributifs de la zone humide de Baussenq. Ces bassins versants ont été délimités à l'aide du MNT RGE Alté 1m.

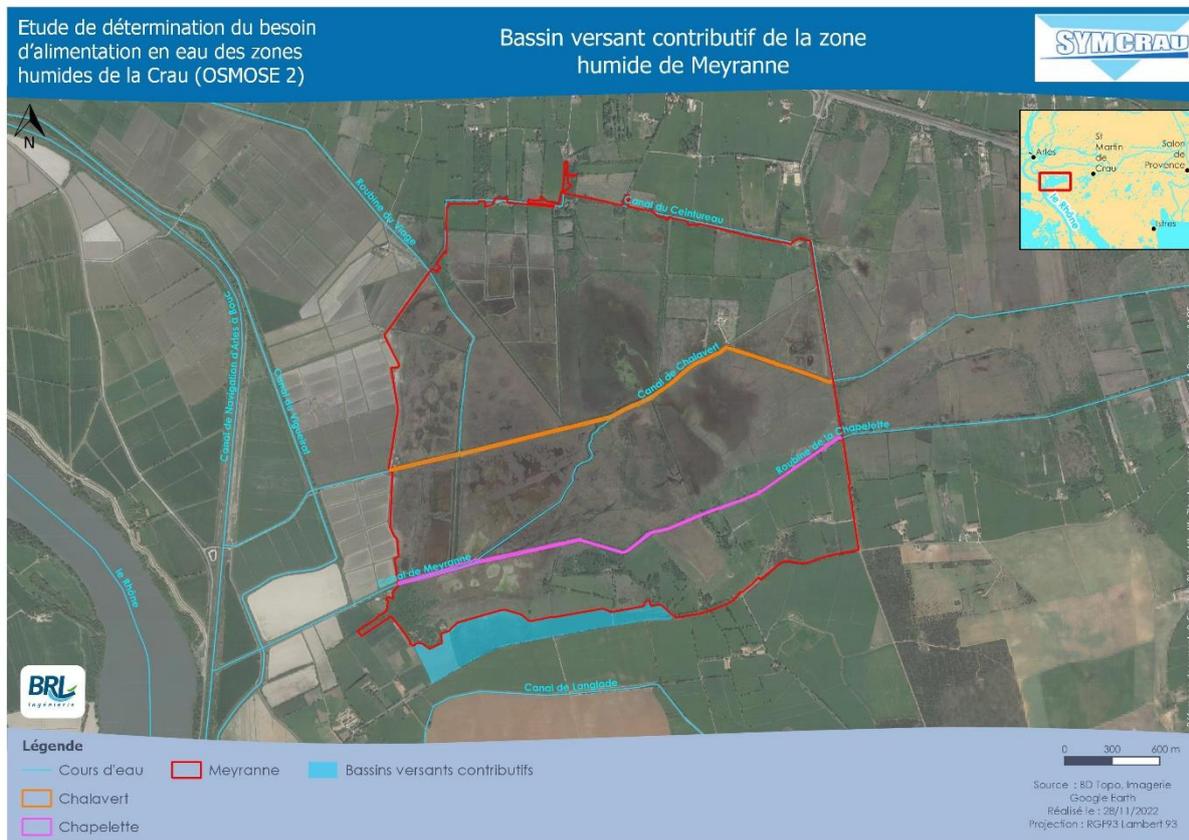
Figure A- 12 : Bassins versants contributifs de la zone humide de Baussenq



6.1.4. Meyranne

La figure suivante présente le bassin-versant contributif du marais de Meyranne. Celui-ci a été délimité en croisant les informations issues du MNT Litto3d et de la connaissance de terrain.

Figure A- 13 : Bassin-versant contributif du marais de Meyranne



6.2. Calcul de l'ETR

L'évapotranspiration réelle des bassins versants contributifs a été calculée en appliquant une méthode similaire à celle présentée en section 0.

Selon les bassins versants contributifs, nous avons considéré les coefficients cultureux suivants :

- Marais de roseaux, sol humide ;
- Prairies ;
- Olivier

Tableau A- 8 : Coefficients cultureux

Végétation	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre
Prairie	0,6	0,6	1,1	1,1	1,1	1,1	0,6	0,6	1,1	0,6	0,6	0,6
Marais de roseaux, sol humide	0,9	0,9	0,9	0,9	1,2	1,2	1,2	1,2	1,2	0,7	0,9	0,9
Olivier				0,55	0,55	0,55	0,55	0,55	0,55			



6.3. Calcul du ruissellement

Le calcul des apports par ruissellement des bassins versants contributifs repose sur :

- Le calcul des précipitations efficaces ;
- Le calcul des apports par ruissellement selon la nature du sol et l'application d'un seuil de pluie.

CALCUL DES PRÉCIPITATIONS EFFICACES

Pour chacun des bassins versants contributifs, les précipitations efficaces ont été calculées selon la formule :

$$\text{Précipitations efficaces [mm]} = \text{Précipitation [mm]} - \text{ETR [mm]}$$

CALCUL DES APPORTS PAR RUISSELLEMENT

A partir des précipitations efficaces, les apports par ruissellement des bassins versants contributifs ont été calculés en considérant :

- Un seuil de pluie ;
- Un pourcentage de ruissellement fonction des propriétés du sol.

La figure 36 du rapport Synergi (SYMCRU, Septembre 2020) fournit une cartographie des sols de la Crau selon l'épaisseur de l'horizon superficiel et l'hydromorphie. Cette carte distingue :

- Les sols hydromorphes ;
- Les sols fersiallitiques avec un horizon superficiel de 50 cm ;
- Les sols fersiallitiques avec un horizon superficiel de 35 cm ;
- Les sols fersiallitiques avec un horizon superficiel de 10 cm ;
- Les sols fersiallitiques.

Pour chacun des bassins versants contributifs, le pourcentage des précipitations qui ruisselle a été défini en tenant compte de la nature du sol et d'un seuil de pluie. Le tableau suivant présente les seuils de pluie et pourcentages de ruissellement retenus. Ainsi, pour les bassins versants de Baussenq :

- Si la pluie efficace est inférieure à 80 mm, nous considérons que 10% de la pluie efficace ruisselle et participe à l'alimentation de la zone humide de Baussenq ;
- Si la pluie efficace est supérieure à 80 mm, nous considérons que 30% de la pluie efficace ruisselle et participe à l'alimentation de la zone humide de Baussenq.

Tableau A- 9 : Seuil de pluie et pourcentage de ruissellement

Zone humide	Seuil de pluie (mm)	% des précipitations efficaces qui ruissellent	
		Peff < seuil	Peff > seuil
Baussenq	80	10	30
Grand Brahis	90	40	60
Ilon	90	40	60
Meyranne	90	40	60



BRL
Ingénierie



www.brl.fr/brli

Société anonyme au capital de 3 183 349 euros
SIRET : 391 484 862 000 19 - RCS : NÎMES B 391 484 862
N° de TVA intracom : FR 35 391 484 862 000 19

1105, avenue Pierre Mendès-France
BP 94001 - 30 001 Nîmes Cedex 5
FRANCE
Tél. : +33 (0) 4 66 84 81 11
Fax : +33 (0) 4 66 87 51 09
e-mail : brli@brl.fr