



Document à accès immédiat Version
provisoire

Projet S.A.L.I.N – Salinisation des Aquifères Littoraux de la Narbonnaise

Rapport intermédiaire – année 2

BRGM/RP-71251-FR

Version 0 du 15 octobre 2021

Étude réalisée dans le cadre des opérations de service public du BRGM

Fleury P., Dewandel B., Lanini S., Marien L., Colin F., Bergé F., Crabit A.

Vérificateur :

Nom :

Fonction :

Date : *189 3 16 625 5*
Cliquez ou appuyez ici
pour entrer une date

Signature :

Approbateur :

Nom :

Fonction :

Date : Cliquez ou appuyez ici
pour entrer une date

Signature :

Le système de management de la qualité et de l'environnement du BRGM
est certifié selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.

Contact : qualite@brgm.fr

Avertissement

Ce rapport est adressé en communication exclusive au demandeur, au nombre d'exemplaires prévu.

Le demandeur assure lui-même la diffusion des exemplaires de ce tirage initial.

La communicabilité et la réutilisation de ce rapport sont régies selon la réglementation en vigueur et/ou les termes de la convention.

Le BRGM ne saurait être tenu comme responsable de la divulgation du contenu de ce rapport à un tiers qui ne soit pas de son fait et des éventuelles conséquences pouvant en résulter.

Votre avis nous intéresse

Dans le cadre de notre démarche qualité et de l'amélioration continue de nos pratiques, nous souhaitons mesurer l'efficacité de réalisation de nos travaux.

Aussi, nous vous remercions de bien vouloir nous donner votre avis sur le présent rapport en complétant le formulaire mis à votre disposition.

Mots clés : Salinisation, basse plaine de l'Aude, aquifère quaternaire, bilan hydrologique

En bibliographie, ce rapport sera cité de la façon suivante :

Fleury P., Dewandel B., Lanini S., Marien L., Colin F., Bergé F., Crabit A. (2021) – Projet S.A.L.I.N – Salinisation des Aquifères Littoraux de la Narbonnaise. Rapport intermédiaire – année 2 V0. BRGM/RP-71251-FR, 98 p.

© BRGM, 2021, ce document ne peut être reproduit en totalité ou en partie sans l'autorisation expresse du BRGM.
IM003-MT008-P2-21/09/2021

Synthèse

Le projet S.A.L.I.N (Salinisation des Aquifères Littoraux de la Narbonnaise) a débuté en 2019 pour une durée de 3 ans. Il a pour ambition d'améliorer les connaissances relatives aux phénomènes de salinisation sur la zone des basses plaines de l'Aude pour, à terme, permettre de proposer des pistes d'évolution de la gestion de la ressource en eau en lien avec les pratiques agricoles, les prélèvements AEP et la gestion hydraulique des terrains naturels ou semi naturels.

Il est conduit par un partenariat entre le Parc Naturel Régional de la Narbonnaise en Méditerranée, l'agglomération « Le Grand Narbonne », le BRGM, Montpellier SupAgro, la Région Occitanie, l'Union Européenne et l'Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse. L'ensemble de ces partenaires cofinancent le projet.

La zone d'étude correspond au bassin sédimentaire de Narbonne-Sigean et plus particulièrement l'aquifère quaternaire dit de la basse plaine de l'Aude.

Ce rapport présente l'avancement du projet à l'issue de la deuxième année d'activité. Il s'attache ainsi à présenter les résultats en terme de spatialisation de la minéralisation au sein des sols, et propose également des indicateurs de cette salinisation accompagnés d'une analyse d'outils de gestion. Concernant l'aquifère, l'objectif de cette seconde année a été de proposer un premier bilan hydrogéologique. Ce dernier repose sur la caractérisation des différents termes. Dans un premier temps, l'analyse du contexte hydro-climatique a permis de caractériser la recharge de la nappe par les précipitations. Ensuite, grâce à l'interprétation des cartes piézométriques sur le secteur de la plaine (superficie de 75,5 km²), il a été possible de définir les ordres de grandeur des flux aux limites (massif des Corbières, de la Clape et des étangs) et au niveau du réseau hydrographique principal (Aude, canal de la Robine). Enfin, le suivi des submersions sur deux parcelles et la simulation du comportement de la nappe pendant ces périodes a permis d'évaluer l'ordre de grandeur du flux annuel qui recharge l'aquifère à l'échelle de la plaine. Les prélèvements AEP sur la nappe sont également pris en compte pour l'établissement de ce bilan.

L'estimation des flux aux limites de l'aquifère et au niveau de l'Aude et du canal de la Robine sont assujettis à une incertitude assez forte qui dépend de la qualité des cartes piézométriques, et des paramètres hydrodynamiques de l'aquifère et du réseau hydrographique. Les différents flux sont donc à manipuler avec précaution. Nous proposons ainsi pour les termes du bilan hydrologique fournis ci-dessous de retenir les ordres de grandeur et non les valeurs « précises ».

Les différents termes du bilan sont :

- Bilan Corbières : 1,7 Mm³ ;
- La Clape : 4 Mm³ ;
- Aude : 0,4 Mm³ ;
- Robine : 0,6 Mm³ ;
- Etangs : - 5,3 Mm³.
- Prélèvements AEP : - 6,6 Mm³.
- Recharge par les précipitations : 4,1 Mm³.

Il en résulte un bilan déficitaire d'environ 1,1 Mm³, qui pourrait correspondre en première approche à la recharge par les submersions, fossés et les différents canaux. **Les travaux sur ces estimations se poursuivront en 2022 afin de confirmer les valeurs et / ou les préciser.**

Dans ce bilan, les prélevements dans la nappe hors AEP n'ont pas été pris en compte. Il sont jugés limités du fait de l'utilisation quasi généralisée de l'eau des canaux pour l'irrigation.

Enfin, dans le cadre du changement climatique, la recharge de la nappe par les précipitations a été évaluée à moyen et long terme. **Malgré des incertitudes importantes dans les estimations, la baisse des pluies efficaces est prévue quel que soit le scénario d'émissions de gaz à effet de serres. Elle pourrait être réduite de 15 à 25% à l'horizon 2050, et de 5 à 40% à l'horizon 2080.**

La recharge sur les massifs en bordure devrait également suivre cette tendance, les flux en provenance de la Clape et des Corbières seraient alors diminués. Un déficit dans le bilan devrait donc apparaître au cours des prochaines années, engendrant probablement une diminution du flux d'eau douce vers les étangs et donc une possible salinisation de la plaine notamment dans sa partie Sud (intrusion du biseau salé).

Sommaire

1. Introduction	11
1.1. Problématique	11
1.2. Présentation du projet SALIN	11
1.3. Présentation des travaux réalisés lors de la deuxième année du projet.....	11
2. Contexte hydro-climatique de la Basse-Plaine de l'Aude et évaluation de la recharge par les précipitations	13
2.1. Évolution climatique	13
2.1.1. <i>Evolution de la pluviométrie</i>	13
2.1.2. <i>Évolution de l'évapotranspiration de référence</i>	14
2.1.3. <i>Évolution du déficit hydrique climatique</i>	15
2.2. Estimation de la recharge par infiltration des précipitations	16
2.2.1. <i>Zone d'étude</i>	17
2.2.2. <i>Données</i>	17
2.2.3. <i>Estimation de la Recharge potentielle Par infiltration des précipitations</i>	18
2.2.4. <i>Estimation de la recharge future</i>	20
2.3. Évolution des débits de l'Aude	21
2.3.1. <i>Occurrence des crues</i>	22
2.3.2. <i>Débits mensuels</i>	23
2.3.3. <i>Débits d'étiage</i>	24
2.3.4. <i>Modélisation des débits de l'Aude</i>	26
2.4. Conclusion	26
3. Salinité des sols, des eaux de surface et indicateurs de la salinisation des sols.....	29
3.1. Salinité à l'échelle de la Basse-Plaine	30
3.1.1. <i>Salinité des sols</i>	30
3.1.2. <i>Salinité des eaux de surface</i>	31
3.1.3. <i>Salinité à l'échelle de parcelles</i>	32
3.1.4. <i>Parcelle viticole de plaine – parcelle dite de « Grands-Vignes »</i>	33
3.1.5. <i>Prairies naturelles</i>	36
3.2. Indicateurs et gestion de la salinisation	38
3.2.1. <i>Végétations</i>	39
3.2.2 <i>Pratiques agricoles</i>	39
3.2.3. <i>Perceptions</i>	42
3.2.4. <i>Conclusion</i>	44
4. Cartes piézométriques de la plaine Narbonne-Salin	45
4.1. Données disponibles	45
4.2. Cartes piézométriques dans le Quaternaire	45
4.2.1. <i>Méthodologie</i>	45
4.2.2. <i>Résultats</i>	45
4.2.3. <i>Conclusions</i>	50
4.3. Propriétés hydrodynamiques du Quaternaire	51
4.4. Estimation du champ de transmissivité du Quaternaire	55
4.4.1. <i>Principe de la méthode</i>	55
4.4.2. <i>Application à la plaine Narbonne-Salin</i>	55
4.5. Flux aux limites de l'aquifère du Quaternaire et au niveau de l'Aude et du canal de la Robine	59
4.5.1. <i>Flux aux limites des aquifères</i>	59
4.5.2. <i>Flux au niveau de l'Aude et du canal de la Robine</i>	63
4.5.3. <i>Conclusions</i>	67

5. Fonctionnement en période de submersion	69
5.1. Présentation du suivi sur les deux parcelles expérimentales du Cercle et de Grands-Vignes (GV).....	69
5.2. Caractérisation des différentes nappes au cours de l'été 2021	70
5.3. Caractérisation du fonctionnement lors des submersions de la parcelle	74
5.3.1. <i>Parcelle du Cercle, submersion de juin 2021</i>	74
5.3.2. <i>Seconde submersion du Cerce – juillet 2021</i>	77
5.3.3. <i>Parcelle de Grands-Vignes, submersion d'août 2021</i>	78
5.4. Modélisation du dôme piézométrique liés aux submersions de parcelle	82
5.4.1. <i>Modèle utilisé</i>	82
5.4.2. <i>Evaluation du flux d'infiltration au droit de la parcelle</i>	83
5.4.3. <i>Résultats sur les niveaux piézométriques</i>	84
5.4.4. <i>Résultats de l'impact sur le canal</i>	87
6. Bilan hydrologique	91
6.1. Bilan actuel	91
6.2. Impact des submersions dans les termes du bilan.....	92
6.3. Bilan futur	92
7. Conclusions et perspectives.....	93
Bibliographie	95

Liste des figures

Illustration 1. Organigramme des traitements statistiques des données climatiques (en haut analyse de tendance, en bas analyse de rupture).....	13
Illustration 2. Pluviométrie annuelle entre 1960 et 2019 et test de rupture dans la série.....	14
Illustration 3. Evapotranspiration de référence annuelle entre 1960 et 2019, test de rupture et courbe de tendance. La courbe bleue indique la tendance calculée sur toute la période ; la courbe jaune la tendance sur la période 1981-2019, les limites vertes indiquent la rupture identifiée dans la série.	15
Illustration 4. Déficit hydrique climatique théorique annuel entre 1960 et 2019, analyse de tendance et test de rupture. La courbe bleue indique la tendance calculée sur toute la période ; la courbe jaune la tendance sur la période 1970-2019, les limites vertes indiquent la rupture identifiée dans la série.	16
Illustration 5. Contour de l'entité hydrogéologique des alluvions récentes de l'Aude en aval d'Olonzac (n°718BG13).	17
Illustration 6. Maillage SAFRAN sur la zone d'étude.	18
Illustration 7. Normales météorologiques (données SAFRAN).	18
Illustration 8. Ratio d'Infiltration de la Pluie Efficace sur la zone d'étude (d'après Lanini et al., 2019).	18
Illustration 9. Pluie efficace annuelle sur la zone d'étude depuis 1960.	19
Illustration 10. Recharge moyenne par période de 30 ans, selon trois formules de bilans hydriques du sol.	19
Illustration 11. Moyennes mensuelles inter-annuelles (1960-2019) de la pluie efficace sur la zone d'étude.	20
Illustration 12. Estimation des anomalies de recharge futures.....	21

Illustration 13. Stations de mesure de débits recensées dans la Banque HYDRO.....	22
Illustration 14. Débits journaliers mesurés à la station de Moussan (écluse de Moussoulens) données Banque HYDRO.	23
Illustration 15. Évolution entre 1989 et 2020 du nombre de jours et nombre de crues dépassant un débit journalier seuil (donnée Banque Hydro).	23
Illustration 16. Débits mensuels (QM) à la station de Moussan, test de rupture et de tendance sur la période 1989-2020. La courbe jaune indique les tendances identifiées avant et après 2003, les limites vertes indiquent la rupture identifiée dans la période 1989-2020.	24
Illustration 17. Débits mensuels minimums par année (QMNA) pour les stations de stations de Belvianes-et-Cavirac, Carcassonne (Pont neuf), Moussan et Coursan (Arminis). Les lignes bleues représentent les débits mensuels minimums de période de retour 5 ans (QMNA5).	25
Illustration 18. Débits minimums mensuels par année (QMNA) à la station de Moussan, test de rupture et de tendance sur la période 1989-2020. La courbe jaune indique la tendance identifiée après 2007, les limites vertes indiquent la rupture identifiée dans la série.	26
Illustration 19. Interprétation des niveaux de salinité des sols à partir de la conductivité électrique sur extraits de pâte saturée (d'après FAO, 1988).	30
Illustration 20. Localisation de l'ensemble des sondages des campagnes 2018-2019-2020....	31
Illustration 21. Mesures de conductivité électrique des eaux de surface (juillet 2020), (a) dans le fleuve Aude, (b) dans le canal de la Robine, (c) dans les canaux de la Basse-Plaine et (d) ensemble des mesures réalisées. Les valeurs de conductivité électrique sont données en mS/cm.	32
Illustration 22. Localisation des ouvrages du réseau piézométrique et des sites expérimentaux.	33
Illustration 23. Localisation des sondages effectués sur la parcelle viticole de « Grands-Vignes ».	34
Illustration 24. Interpolation spatiale de la conductivité électromagnétique mesurée à l'aide de l'EM38. VH pour Voie de mesure Horizontale et VV pour Voie de mesure Verticale. NB : les valeurs de conductivité données par l'EM38 ne doivent pas être interprétées comme des valeurs de conductivité sur extract de pâte saturée de sol.	35
Illustration 25. Évolution des limites parcellaires (Source Géoportail : www.geoportail.gouv.fr).35	
Illustration 26. Intensité des pratiques de submersion d'après le plan de gestion du Domaine du Grand Castelou et localisation des parcelles étudiées.	36
Illustration 27. Localisation des sondages effectués et végétation des parcelles d'après le plan de gestion du Domaine du Grand Castelou.	37
Illustration 28. Conductivités Électriques (converties en équivalent sur pâte saturée) mesurées sur les parcelles du Domaine du Grand Castelou. Les parcelles D1 et C5 en gris reçoivent moins d'eau de submersion que les parcelle H et C5 en bleu.	38
Illustration 29. Typologie des pratiques viticoles.	40
Illustration 30. Représentation spatiale des îlots enquêtés et des groupes de pratiques correspondants.....	41
Illustration 31. Thèmes et interactions identifiés dans l'analyse des perceptions de la salinité/salinisation.	42
Illustration 32. Schématisation des correspondances entre types de pratique, perceptions et localisation des îlots viticoles.....	44

Illustration 33. Données disponibles pour l'établissement des cartes piézométriques ; mesures réalisées sur forage et puits.	45
Illustration 34. Cartes piézométriques du Quaternaire, années 1960.	47
Illustration 35. Carte piézométrique du Quaternaire, été 2019.....	48
Illustration 36. Carte piézométrique du Quaternaire, hiver 2021.....	49
Illustration 37. Carte piézométrique du Quaternaire, été 2021.....	50
Illustration 38. Données disponibles sur la perméabilité et la transmissivité de l'aquifère du Quaternaire.....	52
Illustration 39. Localisation des données de perméabilité et de transmissivité. Ronds rouges : Thèse Cambon (1963), carrés verts : BSS, et croix rouge (cette étude).....	53
Illustration 40. Distribution des perméabilités (en Log ; gauche) et des transmissivités (en Log ; droite) de l'ensemble des forages.	53
Illustration 41. Evolution de la perméabilité en fonction de la profondeur des ouvrages. Tendance à avoir les formations les plus superficielles les moins perméables. Le tableau Illustration 38 renseigne sur le numéro des ouvrages.	54
Illustration 42. Distribution des perméabilités (en Log ; gauche) et des transmissivités (en Log ; droite) sur les forages les plus profonds.....	54
Illustration 43. Relation entre la piézométrie et l'altitude, piézométrie durant l'été 2019. MNT : modèle numérique de terrain. La carte montre les points qui ont été retenus pour l'analyse (n=78). La zone rouge correspond à la zone d'intérêt où le champ de transmissivité est évalué.	56
Illustration 44. Gauche, piézométrie résiduelle et gauche pente de la piézométrie résiduelle ; été 2019 (cellules de 500x500m). Triangles noirs : mesures ponctuelles de la piézométrie.	56
Illustration 45. Carte de transmissivité en Log calculée à partir de la piézométrie de l'été 2019 (cellules de 500x500m).	58
Illustration 46. Comparaison entre les valeurs locales estimées par la carte (LogT_calc.) et les estimations locales de transmissivité faites à partir de tests hydrauliques (LogT_mes.).....	59
Illustration 47. Calculs des flux entrants et sortants (en m ³ /s) aux limites de l'aquifère du Quaternaire. Années 1960, été 2019, hiver 2021 et été 2021.	61
Illustration 48. Comparaison des calculs de flux entrant et sortant de la plaine au niveau des Corbières, du massif de la Clape et de l'étang (été 2019, hiver 2021 et été 2021).	62
Illustration 49. Comparaison des calculs de flux entrant et sortant dans la partie nord de la plaine au niveau des Corbières et du massif de la Clape (années 1960, été 2019 et hiver 2021).....	62
Illustration 50. Estimations des flux entrant et sortant au niveau de l'aquifère du Quaternaire de la Plaine de Narbonne (2019, 2021 et années 1960).	63
Illustration 51. Schéma de calcul pour les flux sous les cours d'eau. Ici les flux horizontaux sont négligés.	64
Illustration 52. Cartes des flux entrant et sortant (en m ³ /s) au niveau de l'Aude et du canal de la Robine. Années 1960, été 2019 et hiver 2021.	66
Illustration 53. Evolution des flux souterrains du Quaternaire au niveau des cours d'eau. Aude et canal de la Robine (en Mm ³ /an).	67
Illustration 54. Flux souterrains entrant et sortant au niveau de l'Aude et du canal de la Robine. Années 1960, été 2019, hiver 2021 et été 2021.	67

Illustration 55. Représentation schématique et log géologique des piézomètres en flûte de pan réalisés sur les parcelles expérimentales du Cercle et de Grands-Vignes.....	70
Illustration 56. Niveaux piézométriques sur les 3 piézomètres des parcelles du Cercle et de Grands-Vignes (été 2021)	71
Illustration 57. Conductivité électrique sur les 3 piézomètres des parcelles du Cercle et de Grands-Vignes (été 2021)	73
Illustration 58. Conductivité électrique sur les 3 nappes superposées lors des périodes de submersion sur les parcelles expérimentales du Cercle et de Grands-Vignes.....	74
Illustration 59. Localisation des 3 parcelles du Cercle.....	75
Illustration 60. Représentation schématique en coupe du fossé et du piézomètre Cercle 3.....	75
Illustration 61. Submersion 1 parcelle du Cercle.....	77
Illustration 62. Submersion 2 parcelle du Cercle.....	78
Illustration 63. Parcelle expérimentale de Grands-Vignes et photo de la submersion en cours.	79
Illustration 64. Chroniques de niveau et conductivité électrique sur GV3 et dans le fossé de drainage	80
Illustration 65. Coupe sur la parcelle de Grands-Vignes.	80
Illustration 66. Schéma de la solution analytique utilisée pour modéliser les hausses piézométriques liées aux périodes de submersion (Dewandel et al., 2021).....	83
Illustration 67. Modélisation au Cercle de la submersion sur la grande parcelle située au Nord du 09 au 12/06/2021.	85
Illustration 68. Modélisation au Cercle de la submersion sur la grande parcelle située au Nord du 16 au 18/07/2021.	85
Illustration 69. Modélisation à Grands-Vignes de la submersion du 02 au 05/08/2021.	86
Illustration 70. Modélisation de la géométrie du dôme piézométrique après l'arrêt des submersions (scénario de débit : modèle 2, avec flux après la submersion). En haut : Cercle, submersion du 09 au 12/06/2021, au milieu : Cercle, submersion du 16 au 18/07/2021, et en bas : Grands-Vignes, submersion du 02 au 05/08/2021.....	87
Illustration 71. Modélisation au Cercle de la submersion sur la grande parcelle située au Nord du 09 au 12/06/2021. Impact de la submersion sur le canal de la Robine.	88
Illustration 72. Modélisation au Cercle de la submersion sur la grande parcelle située au Nord du 16 au 18/07/2021. Impact de la submersion sur le canal de la Robine.	89
Illustration 73. Modélisation à Grands-Vignes de la submersion du 02 au 05/08/2021. Impact de la submersion sur le canal de la Robine.	90

Liste des annexes

Aucune entrée de table des matières n'a été trouvée.

1. Introduction

1.1. PROBLEMATIQUE

La salinisation des eaux et des sols en zone côtière constitue une menace pour la plupart des cultures et pour la forme de biodiversité actuelle des zones naturelles. Dans la zone de la basse plaine de l'Aude, la salinisation est un phénomène ancien, géré par des pratiques de lutte en favorisant la submersion des terres par de l'eau douce et en assurer le drainage des eaux de lixiviation. Plusieurs acteurs du territoire avancent que l'intensité de la salinisation serait en augmentation ces dernières années.

1.2. PRESENTATION DU PROJET SALIN

Lancé en 2019 pour une durée de 3 ans, le projet SALIN a pour ambition d'améliorer les connaissances relatives aux phénomènes de salinisation sur la zone de la basse plaine pour, à terme, permettre de proposer des pistes d'évolution de la gestion de la ressource en eau en lien avec les pratiques agricoles, les prélevements AEP et la gestion hydraulique (submersion) des terrains naturels ou semi naturels. Selon le type de parcelles les submersions ont lieu à différentes périodes de l'année.

Le périmètre de la zone d'étude couvre un total d'environ 280 km² dont le massif de la Clape (environ 90 km²), des étangs, une frange littorale et des zones urbanisées (communes de Fleury d'Aude, Salles d'Aude, Coursan, Vinassan, Armissan, Narbonne et Gruissan).

1.3. PRESENTATION DES TRAVAUX REALISES LORS DE LA DEUXIEME ANNEE DU PROJET

Dans un premier temps une analyse du contexte hydroclimatique est proposée. Elle permet d'évaluer les grandes tendances depuis les années 1960 ainsi que la recharge de la nappe par les précipitations. Aussi, une projection de cette recharge à moyen et long termes (2050, 2080) en contexte de changement climatique est réalisée.

Dans une seconde partie, dédiée à la minéralisation des sols, une spatialisation de la minéralisation au sein des sols est proposée, ainsi que des indicateurs de cette salinisation et une analyse d'outils de gestion.

Concernant les travaux sur la caractérisation hydrogéologique de la nappe, ils ont pour objectif de réaliser un bilan hydrologique. Pour ce faire des cartes piézométriques ont été réalisées et interprétées.

Enfin, le suivi des submersions sur deux parcelle (été 2021) est analysé avec pour objectif la caractérisation du flux de recharge vers la nappe.

A l'issu de ce travail un premier bilan hydrologique est proposé.

2. Contexte hydro-climatique de la Basse-Plaine de l'Aude et évaluation de la recharge par les précipitations

L'objectif de cette partie du projet est de poser un cadre général de l'évolution hydro-climatique en lien avec la dynamique de la salinisation de la Basse-Plaine sur les dernières décennies. Cette évolution concerne les grands termes du bilan hydrologique : pluie, évapotranspiration et débit du fleuve Aude. Les résultats obtenus concernent les pluies et évapotranspirations de références d'une part et les débits de l'Aude à l'entrée de la basse-plaine.

2.1. ÉVOLUTION CLIMATIQUE

Les données utilisées dans cette approche sont issues du catalogue CEDA (Center for Environmental Data Analysis) et correspondent au produit CRU TS4.04 (Climatic Research Unit (CRU) Time-Series (TS) version 4.04). Ces données sont disponibles pour des dalles de $0,5^{\circ}$ de côté, à un pas de temps mensuels, sur la période 1901-2019. Elles sont issues de méthodes d'interpolation spatiale et temporelle de mesures climatiques, scientifiquement publiée (Harris et al., 2014).

Les données de la dalle centrée sur Narbonne (CRUTS 43.25N, 3.25E) ont été extraites sur la période 1960-2019 pour les variables Pluie (PRE) et évapotranspiration de référence (PET).

L'analyse statistique avait pour objectif d'analyser les tendances et ruptures dans les séries temporelles. Elle a donc été construite pour répondre à :

- Question 1 : existe-t-il dans la série une(des) tendance(s) croissante(s) ou décroissante(s) ?
- Question 2 : la série temporelle est-elle composée de sous-séries n'appartenant pas à la même population et quelle est la date qui permet de les différentier ?

L'organigramme de la méthode est montré à l'Illustration 1. Les traitements ont été réalisés à l'aide des scripts R de l'outil HYPE (Croiset et Lopez, 2013).

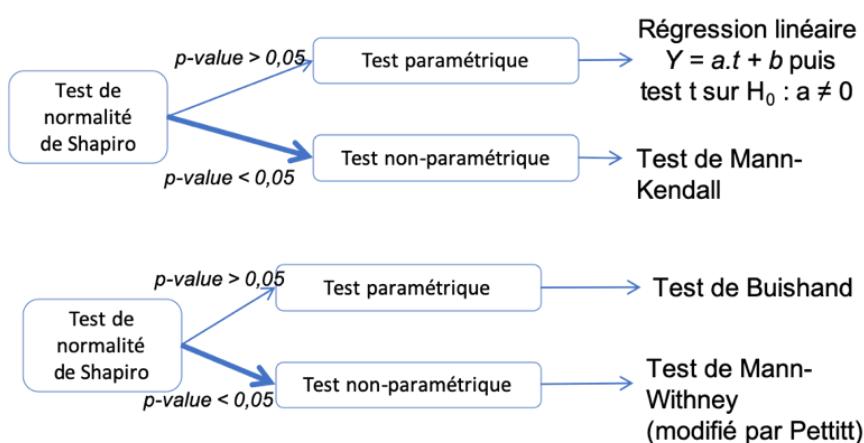


Illustration 1. Organigramme des traitements statistiques des données climatiques (en haut analyse de tendance, en bas analyse de rupture).

2.1.1. Evolution de la pluviométrie

La série de précipitations annuelles ne présente pas de tendance significative. Par contre le test de Buishand indique une rupture significative ($p\text{-value} < 0,05$) avec un changement de moyenne annuelle de 648 mm à 594 mm en décembre 2010 (Illustration 2).

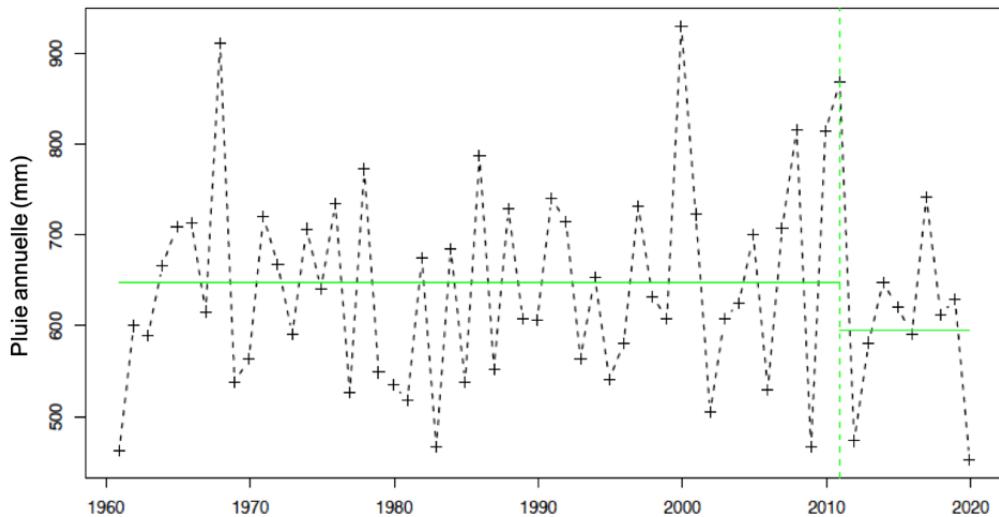


Illustration 2. Pluviométrie annuelle entre 1960 et 2019 et test de rupture dans la série.

Sur la période 1960-2019, la série des précipitations mensuelles ne présente pas de tendance générale ou de rupture. Une augmentation significative ($p\text{-value} = 5e03$) de 3,7 mm/an est détectée entre 1960 et 1967.

L'analyse des séries mois par mois permet d'identifier ($p\text{-value}<0,01$) :

- les mois pour lesquels la pluie n'a pas significativement évolué : janvier, février, mai, septembre, novembre, décembre ;
- les mois pour lesquels la pluie a augmenté : mars (+0,48 mm/an sur toute la période), août (+3,32 mm/an entre 1960 et 1981) ;
- les mois pour lesquels la pluie a diminué : avril (- 1,46 mm/an entre 1960 et 1991), juin (-1,9 mm/an entre 1995 et 2019), octobre (-3,1 mm/an entre 1960 et 1983) ;
- le mois de juillet avec une augmentation (+1,94 mm/an entre 1960 et 1995) puis une diminution (- 3,82 mm/an depuis 1995).

On note donc particulièrement une diminution des pluies marquée depuis 1995 pour les deux mois d'été de juin et juillet.

2.1.2. Évolution de l'évapotranspiration de référence

L'analyse de la série d'évapotranspiration de référence annuelle montre une tendance significative à l'augmentation sur toute la période 1960-2019 (+3,01 mm/an, $p\text{-value } 2,4e-13$) et une augmentation plus forte depuis 1981 (+3,56 mm/an, $p\text{-value } 9e-09$). Une rupture est également identifiée en 1988 avec une moyenne annuelle de 917 mm avant et 1014 mm après (Illustration 3).

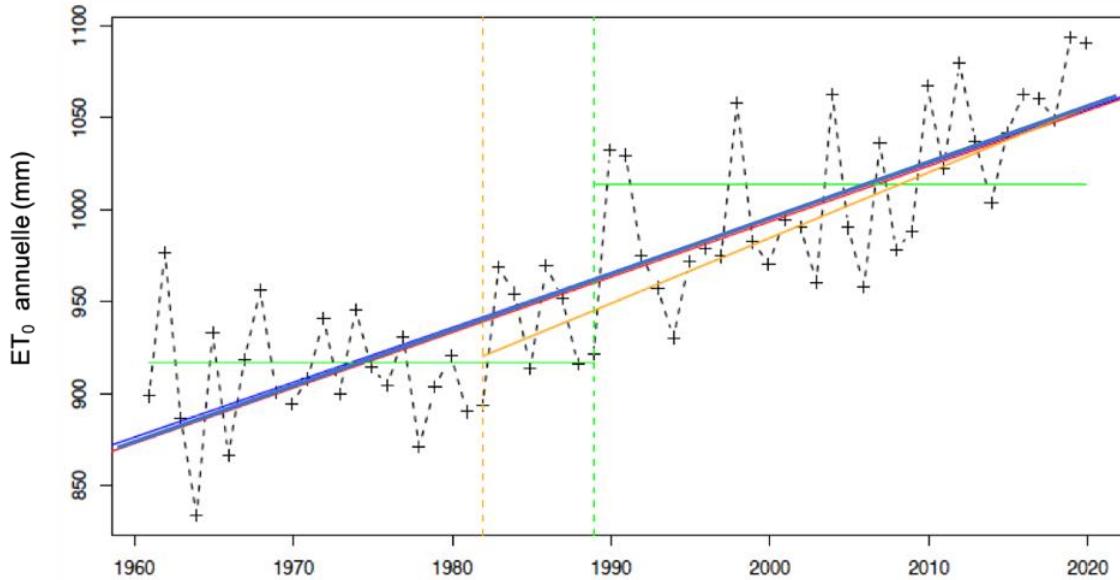


Illustration 3. Evapotranspiration de référence annuelle entre 1960 et 2019, test de rupture et courbe de tendance. La courbe bleue indique la tendance calculée sur toute la période ; la courbe jaune la tendance sur la période 1981-2019, les limites vertes indiquent la rupture identifiée dans la série.

L'analyse de la série d'évapotranspiration de référence mensuelle révèle également une tendance à l'augmentation sur l'ensemble de la période.

L'analyse des séries mois par mois a permis d'identifier ($p\text{-value} < 0,01$) :

- le mois pour lequel les valeurs d'évapotranspiration de référence n'ont pas significativement évolué : février ;
- les mois pour lesquels les valeurs d'évapotranspiration de référence ont augmenté : janvier (+0,053 mm/an sur 1960-2019), mars (+0,258 mm/an sur 1960-2019), avril (+0,5 mm/an depuis 1980), mai (+0,424 mm/an depuis 1972), juin (+0,666 mm/an depuis 1969), juillet (+0,517 mm/an sur 1960-2019), août (+0,582 mm/an sur 1960-2019), septembre (+0,286 mm/an sur 1960-2019), octobre (+0,33 mm/an depuis 1976), novembre (+0,094 mm/an sur 1960-2019), décembre (+0,134 mm/an sur 1960-2019) ;
- aucun mois pour lesquels les valeurs d'évapotranspiration de référence ont diminué.

L'augmentation des valeurs d'évapotranspiration de référence est quasi-systématique mois par mois et cette augmentation est plus forte pour les mois d'été.

2.1.3. Évolution du déficit hydrique climatique

La pluviométrie (P) représente les apports d'eau météoriques naturels et l'évapotranspiration de référence (ET_0) une limite maximale de retour d'eau vers l'atmosphère. La différence entre les deux valeurs ($ET_0 - P$) peut être interprétée comme un déficit maximal imposé par le climat et peut donc, sur une période donnée, fournir une information sur les notions de stress ou confort hydrique des plantes. Cette valeur appelée ici déficit hydrique climatique théorique (DHC) a été calculée aux pas de temps annuel et mensuel.

L'analyse de la série ($ET_0 - P$) annuelle montre une tendance significative à l'augmentation sur toute la période 1960-2019 (+2,86 mm/an, $p\text{-value } 1,5\text{e-}03$) et une augmentation un peu plus forte depuis 1970 (3,39 mm/an, $p\text{-value } 2,4\text{e-}03$). Une rupture est également identifiée en 2000 avec une moyenne annuelle de 294 mm avant et 400 mm après (voir Illustration 4). Cet écart de plus de 100 mm sur une année est notable.

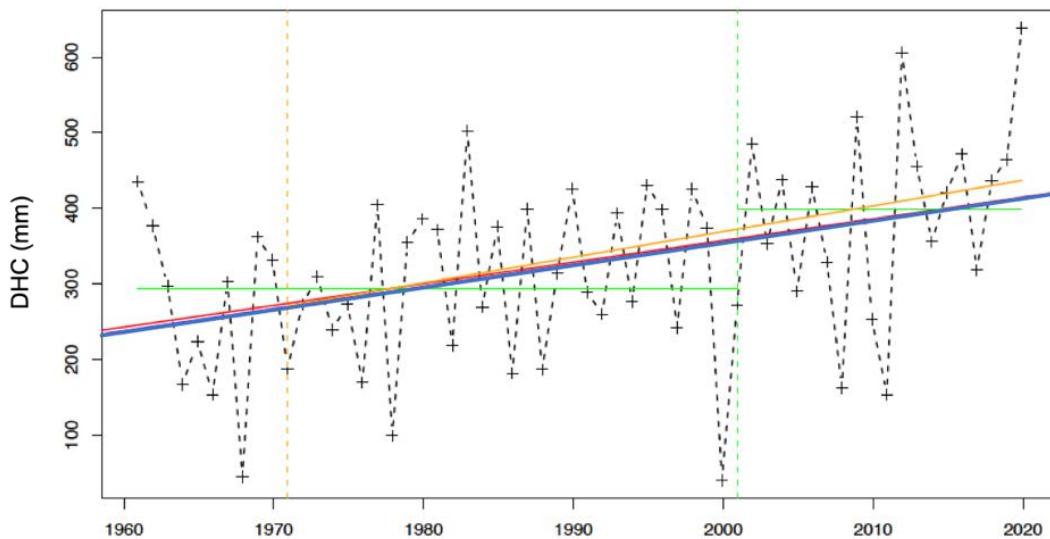


Illustration 4. Déficit hydrologique climatique théorique annuel entre 1960 et 2019, analyse de tendance et test de rupture. La courbe bleue indique la tendance calculée sur toute la période ; la courbe jaune la tendance sur la période 1970-2019, les limites vertes indiquent la rupture identifiée dans la série.

L'analyse de la série mensuelle (ET_0-P) révèle également une tendance à l'augmentation sur l'ensemble de la période.

L'analyse des séries mois par mois a permis d'identifier :

- les mois pour lesquels les valeurs (ET_0-P) n'ont pas significativement évolué : janvier, février, mars, mai, septembre, octobre, novembre, décembre ;
- les mois pour lesquels les valeurs (ET_0-P) ont montré une augmentation significative de moyenne : avril (de 30,4 mm avant 1979 à 58 mm après, p-value 7,4e-03) ; juin (de 95 mm avant 1983 à 130 mm après, p-value 2,8e-04) ; juillet (de 107 mm avant 2009 à 175 mm après, p-value 6,4e-03 avec une forte croissance significative à partir de 1995 de + 5,3 mm/an) ; août (de 86 mm avant 2009 à 134 mm après, p-value 2e-02 avec une croissance significative à partir de 1981 de + 1,4 mm/an) ;
- aucun mois pour lesquels les valeurs (ET_0-P) ont diminué.

Comme pour les variables précédentes, les résultats montrent des changements plus marqués durant la période estivale avec des dates clés au début des années 1980 et 2010.

La méthodologie utilisée pour estimer la recharge potentielle des aquifères par infiltration des précipitations repose sur le calcul de la pluie efficace au pas de temps journalier, puis sur l'application d'un coefficient d'infiltration. La pluie efficace est calculée à partir des données météorologiques en appliquant plusieurs méthodes de bilan hydrique du sol.

2.2. ESTIMATION DE LA RECHARGE PAR INFILTRATION DES PRÉCIPITATIONS

Le logiciel ESPERE (Lanini and Caballero, 2021) a été utilisé avec les données de réanalyse météorologique SAFRAN pour estimer la pluie efficace et la recharge potentielle sur la zone d'étude et analyser son évolution temporelle depuis 1960.

2.2.1. Zone d'étude La zone d'étude de la plaine Narbonne-Salin correspond à l'aquifère des alluvions récentes de l'Aude en aval d'Olonzac (Illustration 5), limité au nord par l'Aude et au Sud par les étangs de Bagés et Ayrolles. Sa superficie est de 90,3 km².

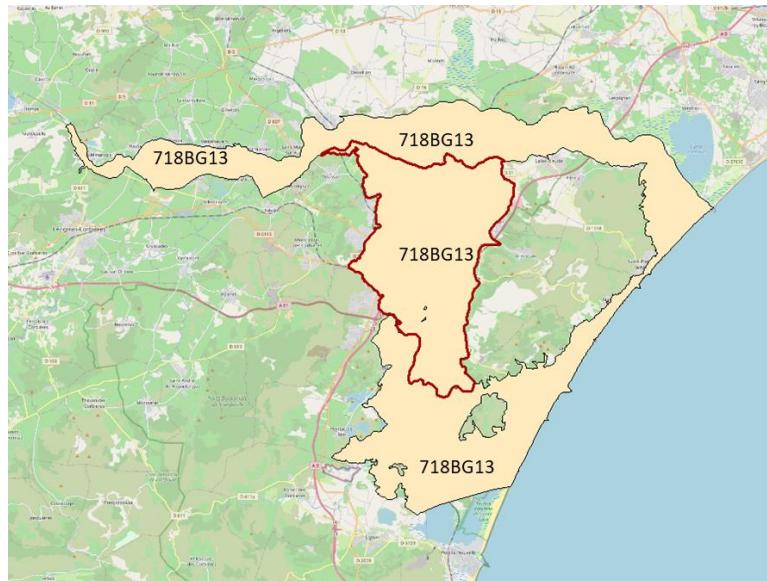


Illustration 5. Contour de l'entité hydrogéologique des alluvions récentes de l'Aude en aval d'Olonzac (n°718BG13).

2.2.2. Données

a) Capacité de stockage du sol

La capacité de stockage du sol est fournie par la carte INRA des sols au 1/1^e6 [base de données DoneSol INRA, 2014]. Sa valeur est de 175 mm sur toute la zone d'étude. Cette valeur élevée permet un stockage important dans le sol, ce qui limite les pluies efficaces.

b) Données météorologiques

Les données météorologiques utilisées sont les données de réanalyse SAFRAN produites par MétéoFrance sur toute la France métropolitaine sur une grille de résolution 8*8 km² (Vidal et al., 2010), Illustration 6. Les séries sont disponibles au pas de temps horaire, et couvrent la période depuis 1960.



Maille	Surface en km2
9268	0.6
9335	30.3
9336	29.8
9400	12.4
9401	17.2
TOTAL	90.3 km2

Illustration 6. Maillage SAFRAN sur la zone d'étude.

Pour la zone d'étude, les valeurs moyennes inter-annuelles des variables météorologiques sur des périodes de 30 ans depuis 1960 sont reportées dans l'Illustration 7.

	1961 - 1990	1971 - 2000	1981 - 2010	1990 - 2019	1960 - 2019
Précipitations (mm/an)	570	615	605	596	582
ETP (mm/an)	1105	1130	1186	1225	1162
Température	14.5°C	14.7°C	15°C	15.2°C	14.9°C

Illustration 7. Normales météorologiques (données SAFRAN).

c) Ratio d'Infiltration de la Pluie Efficace

Une carte du ratio d'infiltration de la pluie efficace a été générée pour toute la France métropolitaine (Illustration 8) en exploitant la relation existant entre le BaseFlow Index (BFI) et l'Indice de Développement et de Persistance des Réseaux (IDPR, Mardhel et al., 2021). Pour la France, cette carte a été produite à la résolution des unités hydrogéologiques BD Lisa de niveau 3.

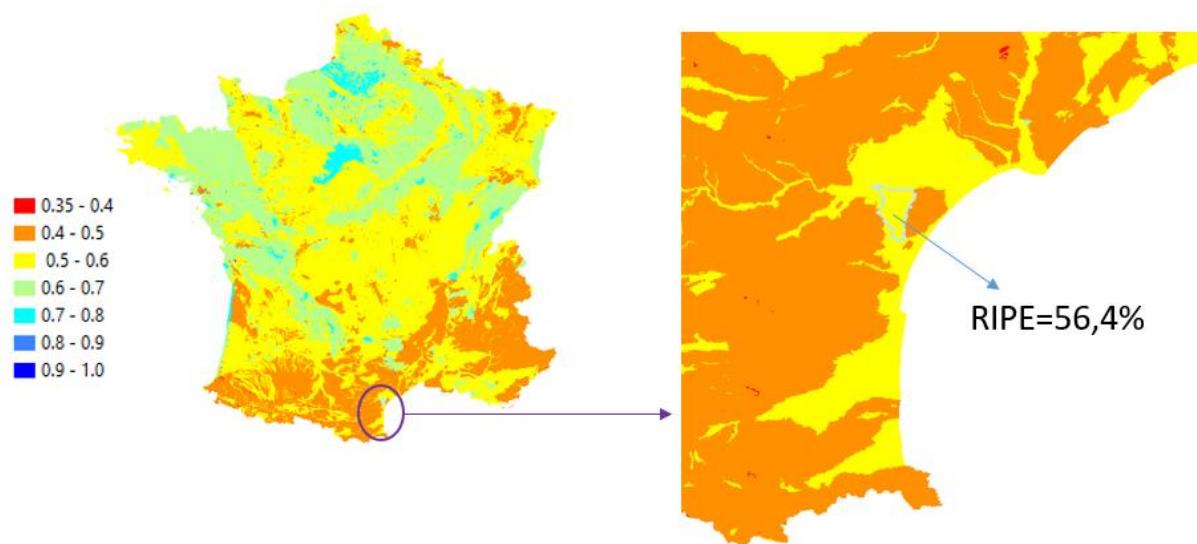


Illustration 8. Ratio d'Infiltration de la Pluie Efficace sur la zone d'étude (d'après Lanini et al., 2019).

La valeur du RIPE pour l'entité hydrogéologique des alluvions récentes de l'Aude à l'aval d'Olonzac, et donc pour toute la zone d'étude, est de 56,4% (Illustration 8). Par définition de ce coefficient, cela signifie que 43,6% de la pluie efficace ruisselle directement vers les cours d'eau de surface, et que 56,4% s'infiltra. Ce flux peut recharger les aquifères sous-jacents (s'il y en a), ou participer aux écoulements de subsurface. C'est pourquoi on parle de recharge potentielle.

2.2.3. Estimation de la Recharge potentielle Par infiltration des précipitations

a) Evolution 1960-2019

La pluie efficace journalière a été calculée à l'aide du logiciel ESPERE (version 2.44). Trois modèles différents de bilan hydrique du sol ont été mis en œuvre (Thorntwaite, 1948, Edijatno & Michel, 1989 et Dingman, 2002). Ces trois modèles de bilan hydrique utilisent les mêmes données d'entrée, à savoir les

données SAFRAN au pas de temps journalier (pluie, température et évapo-transpiration potentielle). Pour chaque variable, la chronique utilisée est la moyenne pondérée (par les surfaces, voir Illustration 6) des chroniques de chaque maille SAFRAN intersectant la zone d'étude. Le seul paramètre, commun aux trois modèles, est la capacité de stockage du sol. Une méthode alternative, basée sur la formule empirique de Turc, et fournit une estimation de la pluie efficace uniquement au pas de temps annuel, a également été appliquée. Les résultats obtenus par les quatre méthodes sont du même ordre de grandeur. On présente l'évolution des cumuls de pluie efficace annuels sur la zone d'étude depuis 1960 sur l'Illustration 9.

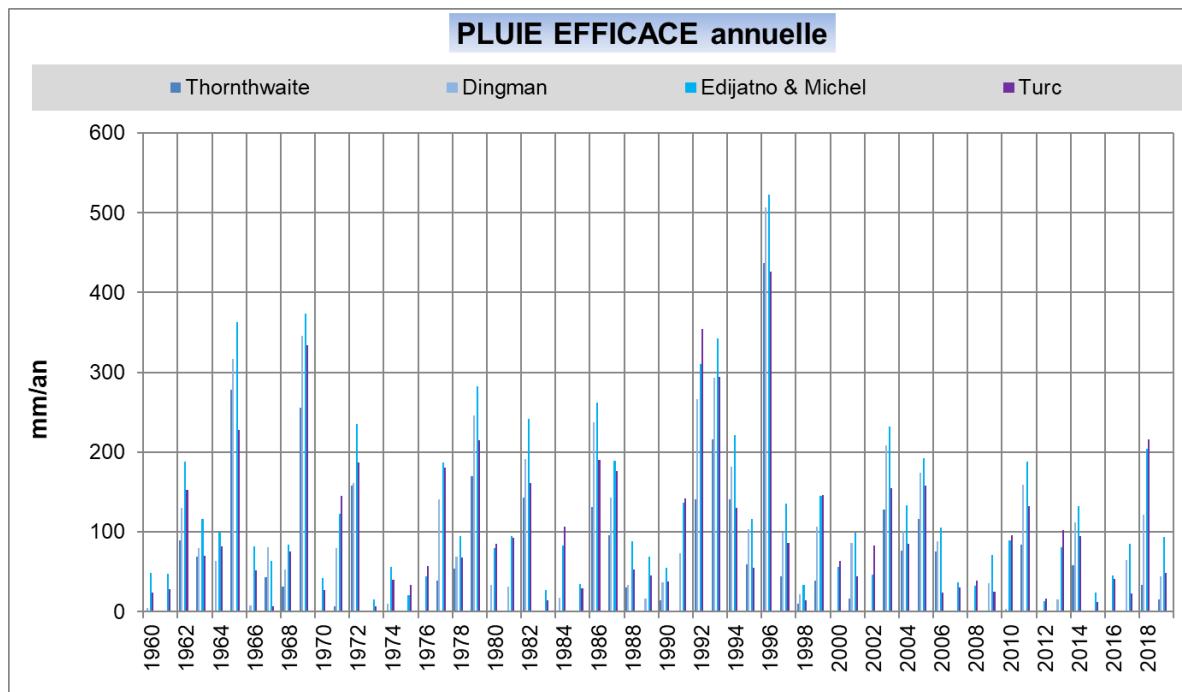


Illustration 9. Pluie efficace annuelle sur la zone d'étude depuis 1960.

A partir de ces pluies efficaces, on peut proposer une estimation de la recharge potentielle par infiltration en appliquant le ratio d'infiltration (RIPE) de 56.4% (cf. Illustration 6). Les moyennes inter-annuelles obtenues avec les trois méthodes de bilan hydrique pour plusieurs périodes de 30 ans sont présentées dans l'Illustration 10.

Recharge moyenne mm/an	1961 - 1990	1971 - 2000	1981 - 2010	1990 - 2019	1960 - 2019
Thornthwaite	30.2	36.2	35.9	32	31
Dingman	47.5	58.3	57.5	54.6	50.7
Edijatno&Michel	70	81	79	75	73
Moyenne (mm/an)	49.4	58.5	57.5	53.8	51.4

Illustration 10. Recharge moyenne par période de 30 ans, selon trois formules de bilans hydriques du sol.

Avec une superficie de 90,3 km², la recharge potentielle de l'aquifère Quaternaire du secteur Narbonne-Salin par infiltration des précipitations est estimée à 4,8 Mm³/an sur la période 1990 – 2019.

Pour les années 1960 et 1961 qui était particulièrement sèches (cumul annuel de précipitations respectivement de 390 et 429 mm), la recharge potentielle était inférieure à 1 Mm³/an.

A noter que la valeur de recharge estimée pour la plaine Narbonne-Salin sur la période 1981-2010 (57,5 mm/an) est tout à fait cohérente avec la valeur de 82,6 mm/an fournie par la carte de France de la Recharge potentielle des aquifères par infiltration de la pluie efficace (Lanini et al., 2019) pour l'ensemble de l'entité hydrogéologique des alluvions récentes de l'Aude en aval d'Olonzac. En effet, la capacité de stockage du sol n'est pas uniforme sur toute cette entité hydrogéologique. Elle est plus faible dans la partie Sud que dans la plaine Narbonne-Salin, ce qui induit une pluie efficace (et donc une recharge, puisque le RIPE est défini à l'échelle de l'entité hydrogéologique) presque deux fois plus importante dans la partie Sud de l'entité hydrogéologique que sur la plaine.

b) Distribution mensuelle de la recharge potentielle

La pluie efficace calculée au pas de temps journalier permet d'observer sa distribution (et donc celle de la recharge potentielle) au cours de l'année (Illustration 11). On constate que de mai à septembre, tous les modèles de bilan hydrique du sol estiment une pluie efficace inférieure à 5 mm/mois (et donc une recharge inférieure à 2,8 mm/mois). Elle est quasi nulle sur la période estivale (juin – juillet – août).

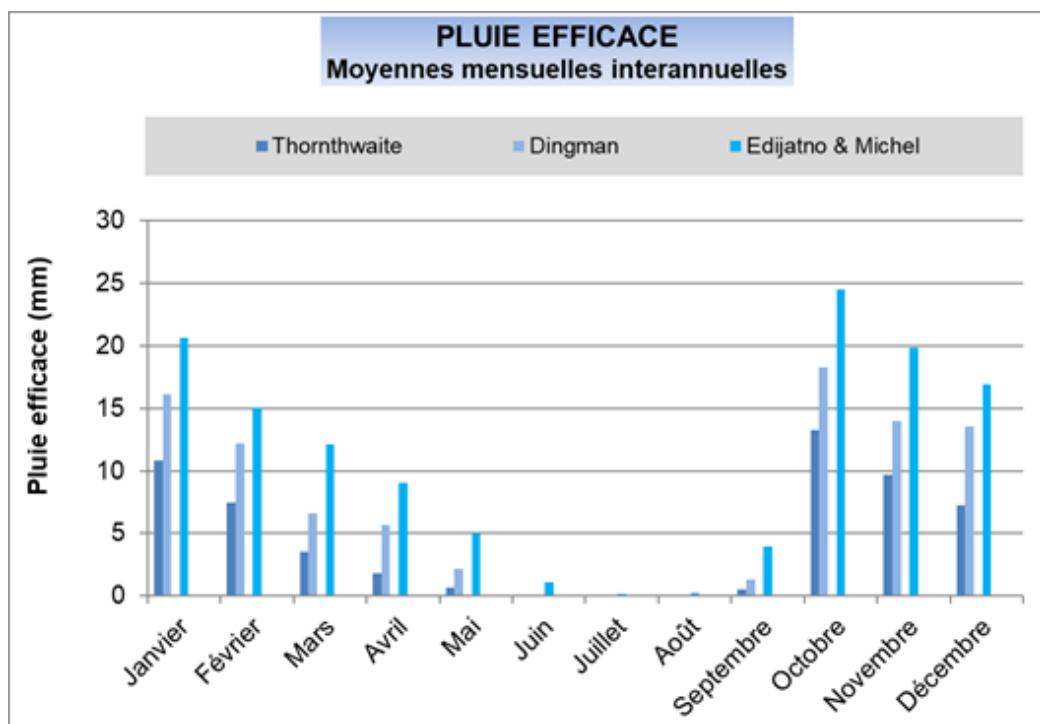


Illustration 11. Moyennes mensuelles inter-annuelles (1960-2019) de la pluie efficace sur la zone d'étude.

2.2.4. Estimation de la recharge future

La même méthode de calcul de la recharge a été appliquée en utilisant comme chroniques météorologiques d'entrée des projections climatiques (Lanini et al., 2019). Ces projections résultent de la mise en œuvre d'un modèle climatique global sous contrainte d'un scénario de forçage radiatif, puis de l'application d'une méthode de régionalisation pour obtenir des données à l'échelle des mailles SAFRAN.

Deux scénarios d'émission de gaz à effet de serre sont appliqués ici : le scénario RCP2.6, particulièrement optimiste puisqu'il suppose que les mesures appliquées auront un impact positif sur le climat dès 2040 et permettront de maintenir le réchauffement en deça de 1,5°C ; et le scénario RCP8.5 qui est le plus pessimiste puisqu'il suppose que les émissions continuent à augmenter au rythme actuel.

Pour chaque scénario, considérant que les résultats d'un seul modèle ne permettent pas de prévoir de manière fiable le climat futur, les climatologues réalisent des prévisions d'ensemble, en utilisant plusieurs modèles. La moyenne des résultats obtenus est considérée comme la valeur la plus probable. Les résultats présentés ici sont ainsi la **moyenne de 30 simulations (24 pour le scénario RCP8.5)**, réalisées en combinant **5 (respectivement 4) modèles climatiques globaux** (BCC_CSM1-1-m, CanESM2, IPSL, NorESM1), deux

méthodes de descente d'échelle statistiques (Pagé et al., 2009 et Dayon, 2015), et trois méthodes de bilan hydrique du sol (Thornthwaite, Dingman et Edijatno&Michel).

Les résultats sont présentés (Illustration 12) en moyennes inter-annuelles pour différentes périodes futures de 20 ans : Horizon 2030 (période 2021-2040), Horizon 2050 (période 2041-2060) et Horizon 2080 (période 2071-2090). Les anomalies de pluie efficace sont définies comme les écarts relatifs entre la pluie efficace future et la pluie efficace sur une période de référence actuelle (1981-2010).

On utilise la moyenne des écarts absolus à la moyenne (MAD) comme indicateur de la dispersion et donc de l'incertitude sur l'estimation des pluies efficaces futures. Les incertitudes associées aux calculs de pluie efficace sont importantes, de l'ordre de 40 à 50%.

Périodes	1981-2010	2021-2040	2041-2060	2071-2090
RCP2.6	Actuel	Horizon 2030	Horizon 2050	Horizon 2080
Pluie efficace (mm/an)	120.6	103.7	102.8	112.9
MAD (30 simulations)	37%	46%	35%	48%
Anomalie		-14%	-15%	-6%

Périodes	1981-2010	2021-2040	2041-2060	2071-2090
RCP8.5	Actuel	Horizon 2030	Horizon 2050	Horizon 2080
Pluie efficace (mm/an)	114.8	89.3	87.8	67.8
MAD (24 simulations)	40%	46%	42%	38%
Anomalie		-22%	-23%	-41%

Illustration 12. Estimation des anomalies de recharge futures.

Malgré l'incertitude importante associée aux résultats, quel que soit le scénario, une tendance à la baisse se dégage. Néanmoins, dans le scénario optimiste, cette tendance s'inverse à partir de 2040. La pluie efficace pourrait diminuer de 15 à 25% à l'horizon 2050, et de 5 à 40% d'ici la fin du siècle. En faisant l'hypothèse que le ratio d'infiltration de la pluie efficace restera constant au cours du temps, on peut en première approche considérer que les anomalies de recharge seront égales à ces anomalies de pluie efficace.

2.3. ÉVOLUTION DES DEBITS DE L'AUDE

Les données analysées sont celles disponibles dans la Banque HYDRO du Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie. Les stations sur le fleuve Aude pour lesquelles des chroniques sont disponibles sont présentées Illustration 13.

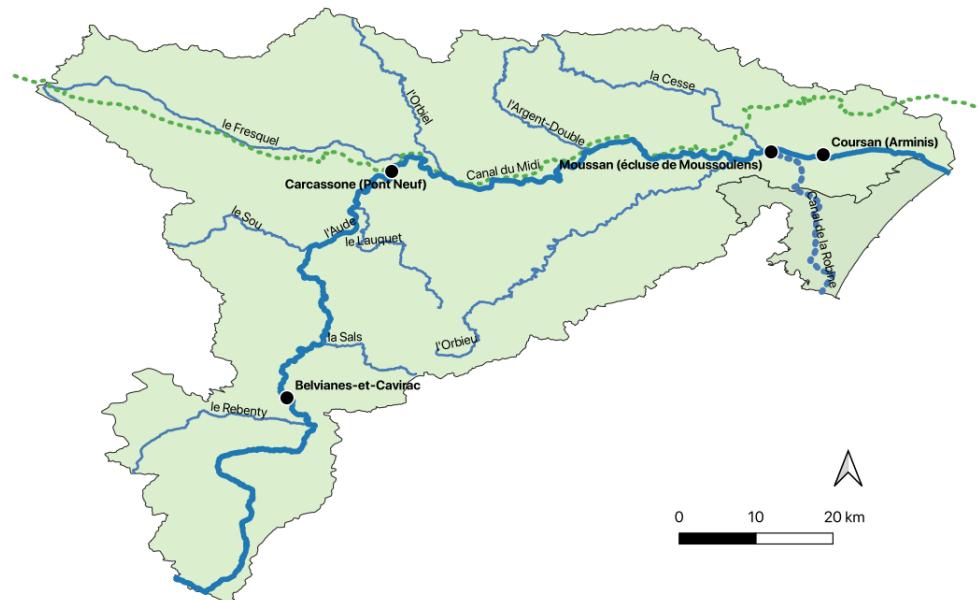


Illustration 13. Stations de mesure de débits recensées dans la Banque HYDRO.

La station de Moussan (écluse de Moussoulens), code Y1612040, est située en amont de la zone d'étude au niveau de la dérivation du Canal de la Robine. A cet endroit la surface du bassin versant amont drainée est 4 838 km². A partir des données post 1987, la Banque HYDRO indique que les débits mensuels moyens présentent une distribution uni-modale, sont maximaux en février (73,1 m³/s soit 37 mm) et minimaux en août (7,9 m³/s soit 4 mm). A l'échelle annuelle, le module est de 40,4 m³/s, la quinquennale sèche est de 26 m³/s et la quinquennale humide de 55 m³/s.

Trois axes ont été privilégiés pour l'analyse en lien avec le phénomène de salinisation :

- l'occurrence des crues, décrite à partir des valeurs de débit journalier (QJ), pouvant être en lien avec des débordements dans la basse-plaine favorables au dessalement des sols ;
- l'évolution globale des débits, décrite à partir des débits mensuels (QM) pouvant être révélatrice des équilibres généraux entre nappe alluviale et cours d'eau et de l'influence des prélèvements par rapport à un régime naturel du cours d'eau ;
- l'évolution des étiages, décrite à partir des débits minimums mensuels par année (QMNA), pouvant être révélatrice des équilibres entre nappe alluviale et cours d'eau en conditions critiques sèches.

La station de Moussan affiche des données manquantes par conséquent (i) la chronique journalière et mensuelle a pu être exploitée entre janvier 1989 et mai 2000 et entre mai 2005 et novembre 2020 et (ii) les valeurs de QMNA ont pu être analysées entre 1965 et 2019.

2.3.1. Occurrence des crues

La chronique des débits journaliers à la station de Moussan est montrée à l'Illustration 14. Le nombre de jours et le nombre de crues dépassant des valeurs seuils de débit journalier ont été comptabilisés sur la période 1989-2020 et par tranches de 5 ans (cf. Illustration 15).

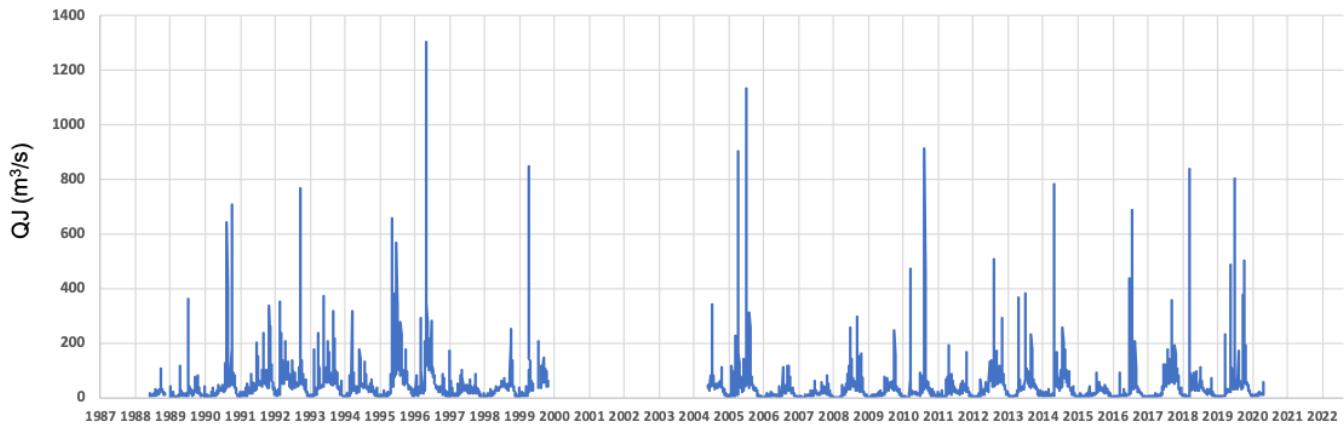


Illustration 14. Débits journaliers mesurés à la station de Moussan (écluse de Moussoulens) données Banque HYDRO.

	nbre jours au dessus du seuil							
	Qseuil (m³/s)	1000	800	600	400	300	200	100
période 1989-2020		4	11	20	36	63	138	655
sept.90-août95		0	0	4	6	12	31	187
sept.95-août00		3	4	6	11	17	39	166
sept.05-août10		1	2	2	2	6	15	73
sept.10-août15		0	1	2	7	12	23	105
sept.15-août20		0	3	5	9	12	23	83

	nbre de crues dépassant le seuil							
	Qseuil (m³/s)	1000	800	600	400	300	200	100
période 1989-2020		2	7	14	21	35	63	137
sept.90-août95		0	0	3	3	8	17	39
sept.95-août00		1	1	3	5	7	14	17
sept.05-août10		1	2	2	2	3	7	18
sept.10-août15		0	1	2	4	6	10	26
sept.15-août20		0	2	3	6	8	11	25

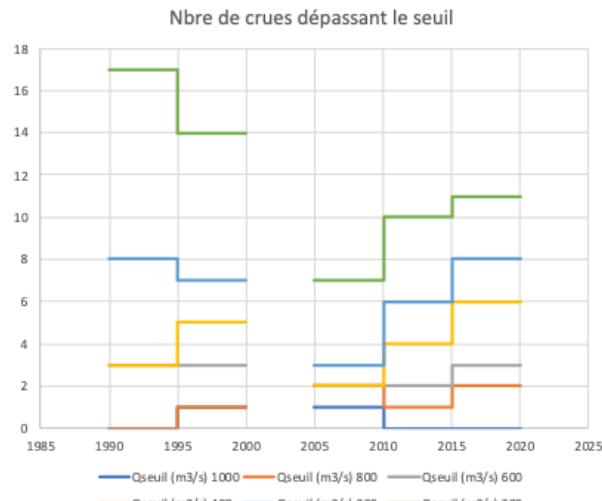


Illustration 15. Évolution entre 1989 et 2020 du nombre de jours et nombre de crues dépassant un débit journalier seuil (donnée Banque Hydro).

Les crues de plus faible amplitude (débit seuil de 200 à 300 m³/s) sont plus fréquentes avant les années 2000 qu'après 2005. Pour les plus fortes crues (débit seuil de 400 à 800 m³/s), il n'y a pas de différence notable entre ces deux périodes. Il faut noter la période de 2005 à 2010, pour laquelle l'occurrence des crues a diminué quel que soit le seuil de débit (à l'exception du seul événement de janvier 2006 ayant dépassé les 1000 m³/s).

2.3.2. Débits mensuels

L'analyse statistique sur les données de débit mensuel, (QM cf. Illustration 16) entre 1989 et 2020 montre que :

- les QM sont significativement différents (p-value 6,2e-07) en terme de moyenne avant 2000 (22,8 mm) et après 2005 (13,3 mm) ;
- il existe une tendance significative de diminution des QM entre 1989 et 2000 (-8,76 mm/an, p-value 7,6e-08) et d'augmentation des QM depuis 2005 (+4,57 mm/an, p-value 2,2e-06).

La série de donnée indique donc 2 périodes différentes avant 2000 et après 2005.

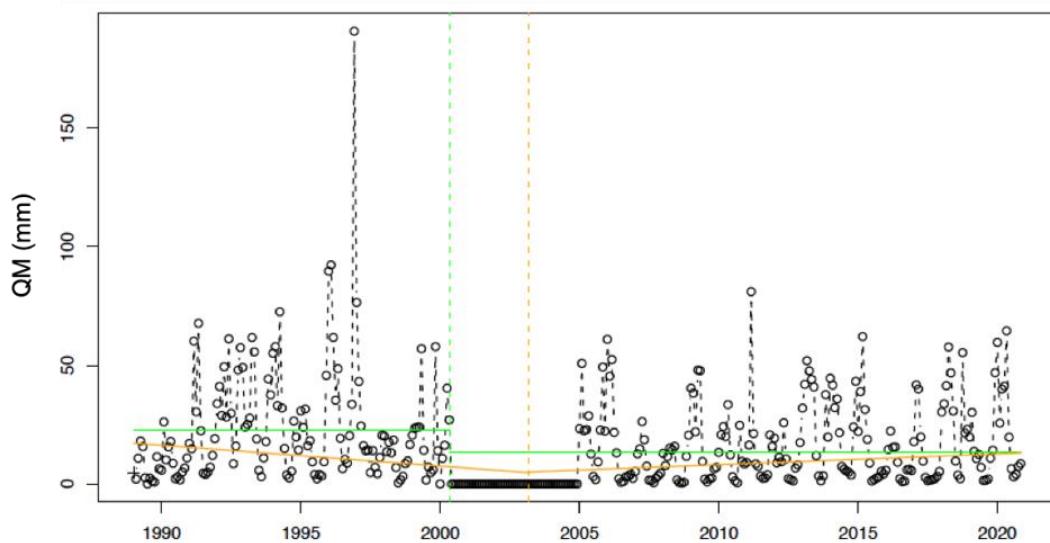


Illustration 16. Débits mensuels (QM) à la station de Moussan, test de rupture et de tendance sur la période 1989-2020. La courbe jaune indique les tendances identifiées avant et après 2003, les limites vertes indiquent la rupture identifiée dans la période 1989-2020.

2.3.3. Débits d'étiage

Les débits mensuels minimums par année (QMNA) à la station de Moussan sont représentés avec ceux de 2 stations situées en amont (Belvianes-et-Cavirac, code station Y1112010, surface amont drainée de 692 km² et Carcassonne-Pont neuf, code station Y1232010, surface amont drainée de 1754 km²) et une station située en aval (Coursan-Arminis, code station Y1612040, surface amont drainée de 4965 km²). Les débits de ces stations sont fournis dans l'Illustration 17.

Sur la période de 1965 à 2019, les QMNA à Moussan apparaissent globalement plus variables en comparaison aux stations plus en amont. Les valeurs de période de retour 5 ans sont comparables entre Belvianes-et-Cavirac et Carcassonne (3,92 et 4,05 m³/s) et sont supérieures à celles établies à Moussan (2,8 m³/s). On remarque également à la station de Moussan que la plupart des années à partir de 2005 présentent des étiages en dessous de la valeur quinquennale sèche alors que cela ne se produit jamais avant. Enfin les variations inter-annuelles des QMNA à la station de Moussan sont plus faibles après 2005 en comparaison avec la période antérieure.

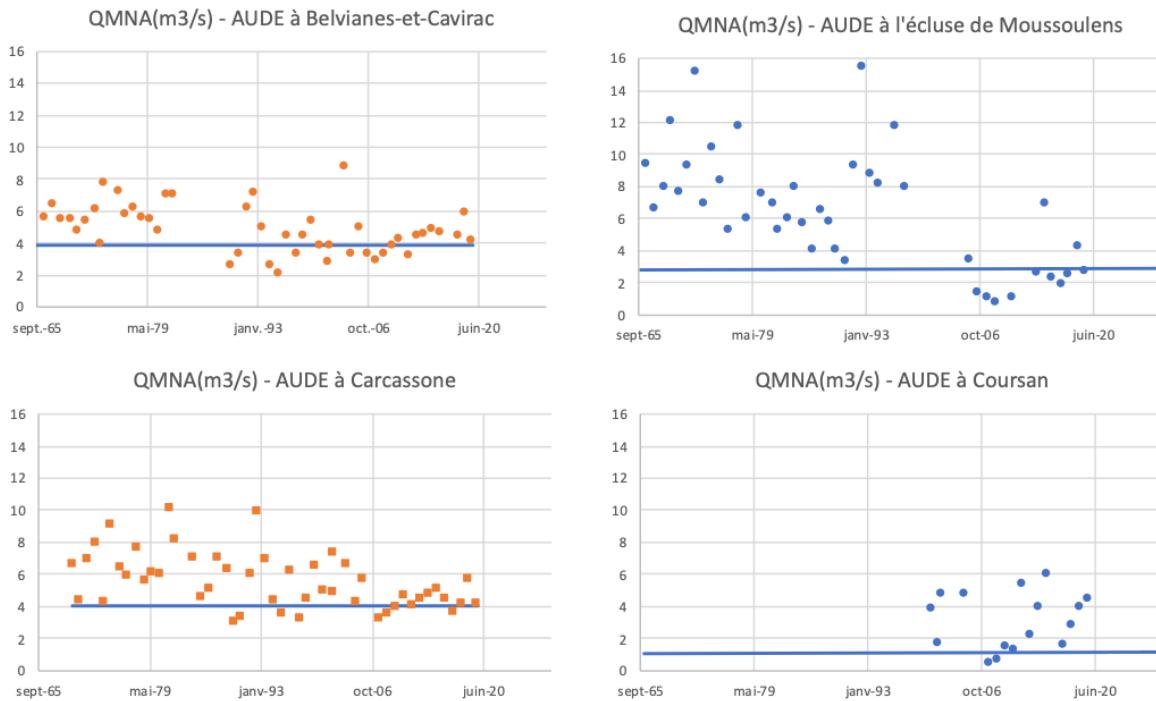


Illustration 17. Débits mensuels minimums par année (QMNA) pour les stations de Belvianes-et-Cavirac, Carcassone (Pont neuf), Moussan et Coursan (Arminis). Les lignes bleues représentent les débits mensuels minimums de période de retour 5 ans (QMNA5).

L'analyse statistique sur les données de débit minimum mensuel par année entre 1989 et 2020 (cf. Illustration 18) montre que :

- les QMNA sont significativement différents (p-value 2,5e-02) en terme de moyenne avant 2000 (3,76 mm) et après 2005 (1,45 mm) ;
- il existe une tendance significative d'augmentation des QMNA depuis 2007 (+0,121 mm/an, p-value 7e-03).

Il est probable que la rupture observée soit la traduction de la régulation des prélèvements en basses-eaux sur le cours de l'Aude.

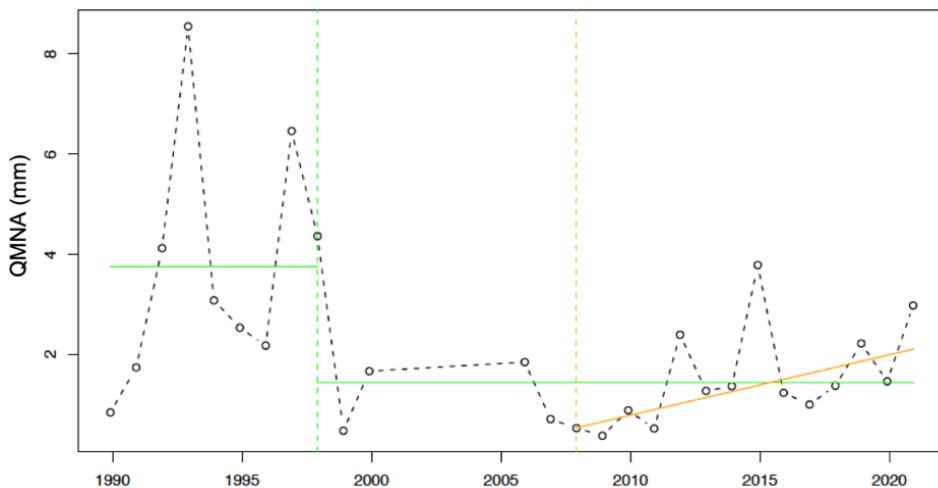


Illustration 18. Débits minimums mensuels par année (QMNA) à la station de Moussan, test de rupture et de tendance sur la période 1989-2020. La courbe jaune indique la tendance identifiée après 2007, les limites vertes indiquent la rupture identifiée dans la série.

2.3.4. Modélisation des débits de l'Aude

L'analyse des débits mesurés à la station de Moussan montre des tendances et des ruptures utiles pour la compréhension du phénomène de salinisation de la Basse-Plaine. Elle soulève également deux questions :

- le manque de données avant 1989 pourrait-il masquer des évolutions sur un temps plus long et entre 2000 et 2005 et masquer une date précise de changement de régime du cours d'eau ?
- est-il possible d'identifier la cause des changements entre impact hydrologique direct de l'évolution climatique et impact de l'évolution des logiques de prélèvements et/ou de régulation des prélèvements ?

L'utilisation d'un modèle hydrologique peut être un outil pertinent face à ces deux questions.

Une première approche a été engagée avec le modèle GR2M. Le modèle à deux paramètres a été calibré dans plusieurs situations à la station de Moussan en prenant comme données d'entrée climatiques les données CRU-TS 4.04.

La première tentative de calibration a porté sur la totalité des données de débits disponibles entre 1989 et 2020. L'objectif était de s'assurer que le modèle avait la capacité à simuler les principales tendances de la série afin de pouvoir combler les lacunes et reconstruire des chroniques de données continues. Les résultats obtenus, avec un critère de Nash-Sutcliffe de 0,70 calculé sur les débits, sont encourageants.

Deux périodes ont été identifiées précédemment comme différentes, au sens des débits mensuels, avant 2000 et après 2005. On peut poser l'hypothèse que cette différence est, soit due à une variation des forçages climatiques, soit due à une modification profonde du bassin en lien avec l'anthropisation (notamment les usages de l'eau en amont de l'exutoire). Une deuxième approche a donc consisté à réaliser une calibration sur chacune des 2 périodes en choisissant le critère de Nash-Sutcliffe calculé sur le logarithme des débits afin d'optimiser le modèle dans sa représentation des faibles débits. Les résultats ont montré que les paramètres optimisés étaient bien différents. Les chroniques simulées peuvent donc être confrontées aux données observées en dehors de la période de calibration afin d'analyser les écarts par rapport aux logiques d'évolution des usages de l'eau en amont de la zone d'étude.

2.4. CONCLUSION

L'analyse à partir des données climatiques CRU-TS 4.04 (1960-2019) et des débits de la Banque HYDRO à Moussan (1989-2020) a permis de faire émerger des tendances et ruptures dans les séries qui sont importantes pour la compréhension du phénomène de salinisation.

Cette analyse a conduit à six résultats marquants :

- une diminution de la pluviométrie annuelle à partir de 2010 (-50 mm) accompagnée d'une baisse de la pluviométrie des mois d'été sur la période ;
- une augmentation de l'évapotranspiration de référence particulièrement notable à partir des années 1980 (+ 100 mm en moyenne annuelle entre les années 1960 et aujourd'hui et forte augmentation au cours des mois d'été) ;
- l'occurrence des crues a fortement diminué entre 2000 et 2005 pour ré-augmenter par la suite sans atteindre les niveaux observés dans les années 1990 ;
- les débits d'étiage ont fortement baissés (QMNA moyen de 3,76 mm soit 7 m³/s avant 2000 à 1,45 mm soit 2,7 m³/s après 2000) ;
- les débits mensuels ont diminués jusqu'en 2010 et augmentent légèrement depuis ;

- pas de tendance significative à la baisse de la recharge entre les périodes 1961-1990, dite période ancienne et récente (1990-2019), avec une recharge autour de 50 mm/an.

L'analyse climatique présentent l'intérêt de porter sur une longue chronique, elle méritera d'être finalisée en comparant avec des données, plus partielles, issues de stations de mesure plus locales. L'analyse des débits pourra être affinée en intégrant des résultats de modélisation hydrologique et gagnerait à être comparée à une évaluation de la redistribution dans la Basse-Plaine des prélèvements par la Canal de la Robine et le long de l'Aude.

Ainsi, le traitement des données climatique a permis d'évaluer la recharge par les précipitations sur la zone d'étude. Pour la période actuelle (1990-2019) elle est évaluée à 53,8 mm/an soit environ 4,8 Mm³/an. Il n'y a pas depuis les années 1960 une tendance marquée à la baisse de cette recharge. Aussi, l'utilisation des modèles climatiques pour l'évaluation des paramètres hydroclimatiques futurs met en évidence, malgré l'incertitude importante associée aux résultats, une tendance nette à la diminution de la recharge future sur la zone étudiée. Peu marquée dans les décennies à venir, elle s'accentue à partir du milieu du siècle (-20 à -40% de recharge à horizon 2080).

3. Salinité des sols, des eaux de surface et indicateurs de la salinisation des sols

L'objectif est d'évaluer la salinité des sols afin de produire un état des lieux des niveaux de salinité, de leur hétérogénéité spatiale et d'identifier les grands forçages explicatifs associés. Des campagnes de mesure sur l'ensemble de la Basse-Plaine sont menées en parallèle de relevés d'informations à haute densité spatiale. Ces dernières doivent permettre de percevoir l'homogénéité et/ou hétérogénéité de la salinité à courte distance et en fonction de différents usages des terres.

A ce stade, les pratiques de submersion paraissent impacter la salinité sur les parcelles. Cette spécificité du territoire de la narbonnaise sera intégré à l'analyse. Le calendrier des submersions évolue selon le type de parcelle (naturelle, semi-naturelle ou agricole). Sur les parcelles viticoles, trois submersions sont généralement pratiquées, pour répondre à différentes attentes :

- Submersion hivernale : l'objectif est de repousser le sel des sols en profondeur ;
- Submersion en mars – avril : permet de lutter contre le gel ;
- Submersion estivale : apport d'eau à la végétation pour permettre une bonne croissance de la plante.

Afin d'interpréter les mesures de conductivité électrique faites sur les sols, il est nécessaire de positionner les résultats obtenus par rapport à des référentiels établis.

De manière standardisée, la salinité des sols est établie à partir de mesure sur extrait de pâte saturée, méthode longue et nécessitant une forte technicité. Afin d'augmenter le nombre de mesure, la salinité a été appréhendée par une mesure sur une dilution de sol 1/5. Il est possible de rapporter les résultats à des équivalents d'extrait de pâte saturée en appliquant une relation issue soit de références bibliographiques, soit d'une calibration à partir de données locales. Pour la suite, les résultats de conductivité électrique des sols montrés sont corrigés à l'aide de la relation mise au point dans les travaux d'Elen Bless sur des sols du delta de l'Orb (Bless, 2019) :

$$EC_{sp} = 6,74 \cdot EC_{1:5} \quad (\text{Equation 1})$$

Cette relation a été construite à partir de 11 points, pour des valeurs de $EC_{1:5}$ comprises entre 0,1 et 1,5 mS/cm (EC_{sp} compris entre 0,5 et 10 mS/cm), et présente un coefficient de détermination égal à 0,93.

Les valeurs de salinité des sols peuvent être interprétés par rapport aux conséquences sur la végétation, ces éléments sont fournis dans l'Illustration 19.

Etat du sol	Conductivité (dS/m)	Effets
Non salé	0-2	Effets négligeables
Faiblement salé	2-4	Affecte le rendement des plantes sensibles (vigne)
Moyennement salé	4-8	Chute des rendements pour la plupart des plantes
Fortement salé	8-16	Seules les plantes résistantes poussent
Très salé	>16	Seules quelques plantes très résistantes poussent

Illustration 19. Interprétation des niveaux de salinité des sols à partir de la conductivité électrique sur extraits de pâte saturée (d'après FAO, 1988).

3.1. SALINITE A L'ECHELLE DE LA BASSE-PLAINE

Les campagnes de mesure sur l'ensemble de la Basse-Plaine de la salinité des eaux et des sols doivent permettre de produire un état des lieux de niveaux de salinité actuels, de leur hétérogénéité spatiale et d'identifier les grands forçages explicatifs.

3.1.1. Salinité des sols

Les mesures consistent en sondages à la tarière et prélèvements à 4 profondeurs : 0-20 cm (surface), 30-40 cm (au-dessus d'éventuels drains), 70-80 cm (au-dessous d'éventuels drains) et 90-120 (profond). Chaque sondage est repéré par ses coordonnées et chaque prélèvement est décrit (couleur Munsell, test HCl, humidité estimée, traces d'hydromorphie, texture). Pour chaque échantillon, une dilution 1/5 a été effectuée et a donné lieu à une mesure de la conductivité électrique, du pH et de la concentration en Na^+ et Ca^{2+} . A partir des coordonnées géographiques et du MNT de l'IGN (à 5 m de résolution spatiale), l'altitude au niveau sol a été calculé ainsi que pour chaque profondeur d'échantillonnée.

Trois campagnes spatialisées ont été conduites :

- une en fin saison sèche (septembre 2018) avec un groupe de 13 étudiants de l'Option d'ingénieur agronome « Eau-Sol-Environnement » et du Master 3A parcours « Sol » promotion 2018-2019 ;
- une en fin de saison humide (mai-juin 2019) au cours du stage de M1 Master EAU parcours « Eau & Agriculture » de Jérôme Pinta ;
- une en fin de saison humide (juin 2020) par François Colin, Armand Crabit et Laurène Marien.

A ces campagnes spatialisées s'ajoutent des suivis plus denses dans l'espace. De plus, une dizaine de sondages additionnels ont été conduits à l'aide d'une tarière à rallonge afin de prospecter à une plus grande profondeur (0-4 m) jusqu'à atteindre le toit de l'aquifère (zone saturée en eau).

Au total, la base de données contient 1256 échantillons correspondant à 314 positions représentées Illustration 20. Parmi ces positions, 15 points proches géographiquement (*ie* séparés d'une distance inférieure à 50 m) ont fait l'objet d'un échantillonnage pour différentes campagnes afin d'analyser la variation saisonnière des paramètres mesurés.

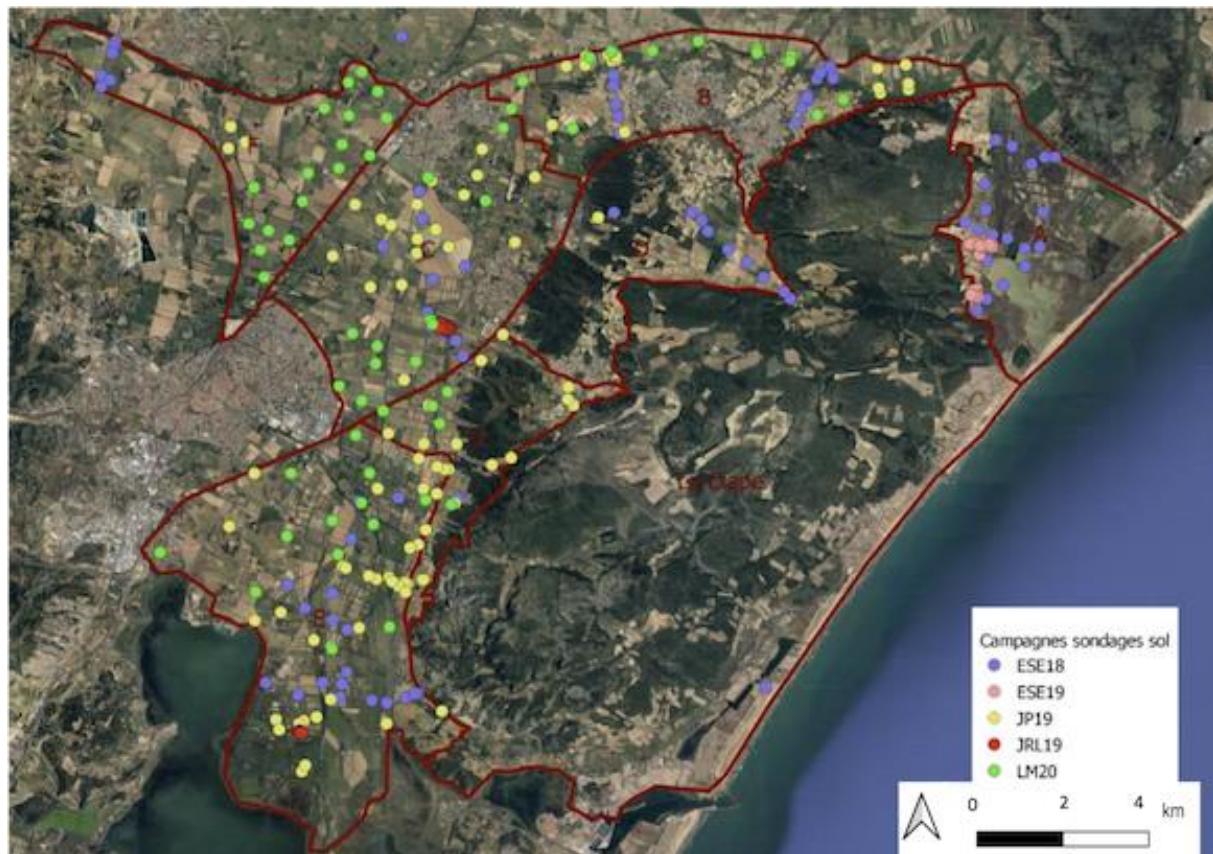


Illustration 20. Localisation de l'ensemble des sondages des campagnes 2018-2019-2020.

3.1.2. Salinité des eaux de surface

La salinité des eaux de surface a été appréhendée par des mesures de conductivité électrique (CE) le long du fleuve Aude, du Canal de la Robine et de canaux de drainage de la Basse-Plaine. Les points échantillonnés sont localisés (Illustration 21). Cette campagne a été effectuée en juillet 2020.

Les résultats montrent une faible conductivité électrique ($0,6 \text{ mS/cm}$) de l'eau de l'Aude jusqu'au barrage anti-sel. La conductivité électrique est également faible dans le Canal de la Robine ($0,6 \text{ à } 0,7 \text{ mS/cm}$). La conductivité électrique est faible dans les canaux d'aménée d'eau issue de la Robine et plus forte dans les canaux de drainage et avec la proximité des étangs au sud-ouest de la zone d'étude.

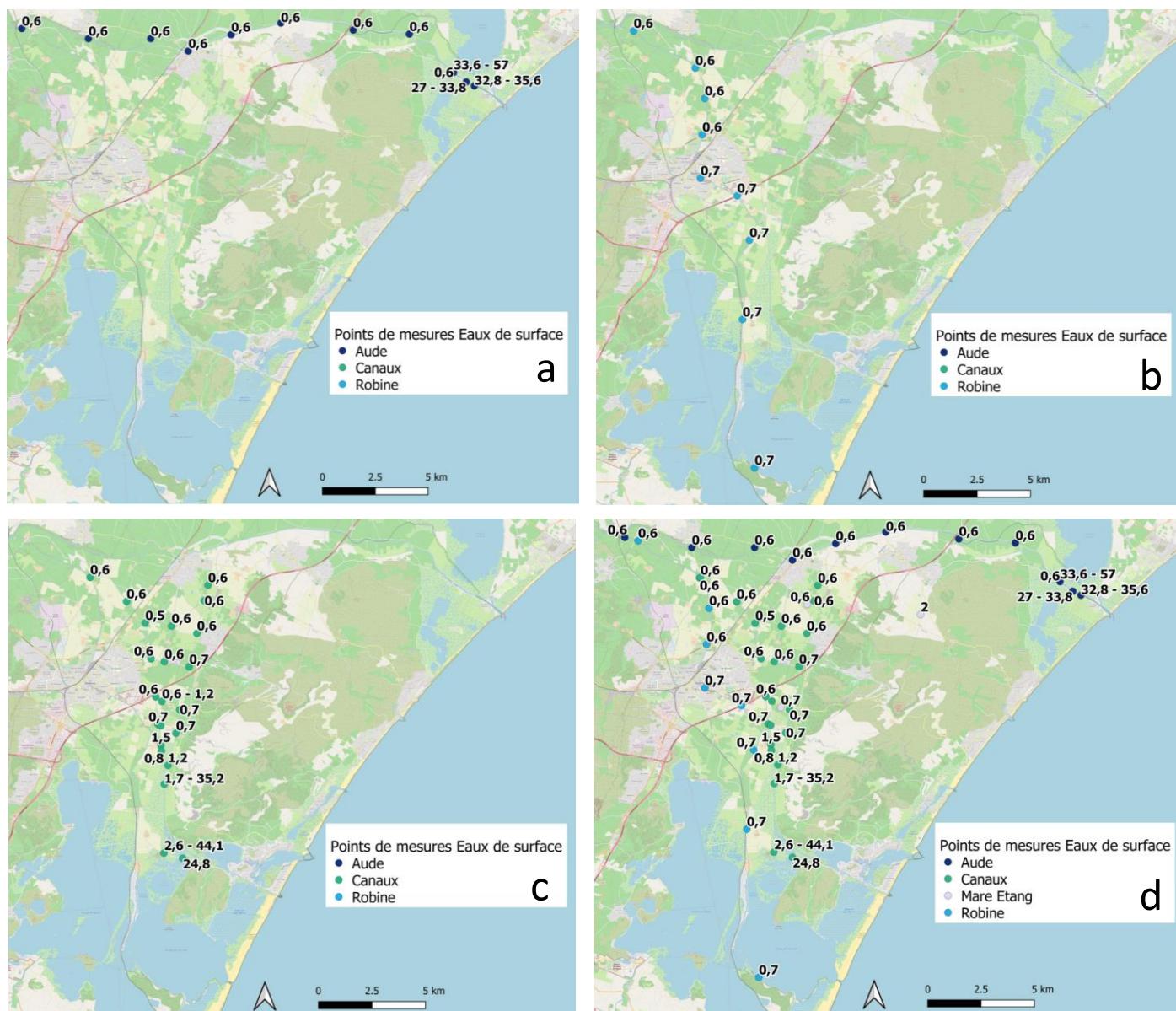


Illustration 21. Mesures de conductivité électrique des eaux de surface (juillet 2020), (a) dans le fleuve Aude, (b) dans le canal de la Robine, (c) dans les canaux de la Basse-Plaine et (d) ensemble des mesures réalisées. Les valeurs de conductivité électrique sont données en mS/cm.

3.1.3. Salinité à l'échelle de parcelles

Trois sites expérimentaux font l'objet d'un suivi plus poussé. Il s'agit des parcelles dites de Grands-Vignes, du Cercle et du Grand-Castelou. Sur ces parcelles un dispositif de suivi des niveaux piézométriques a été installé (doublon de piézomètres ou dispositif en flûte de pan). Ces 3 sites sont localisés dans l'Illustration 22.

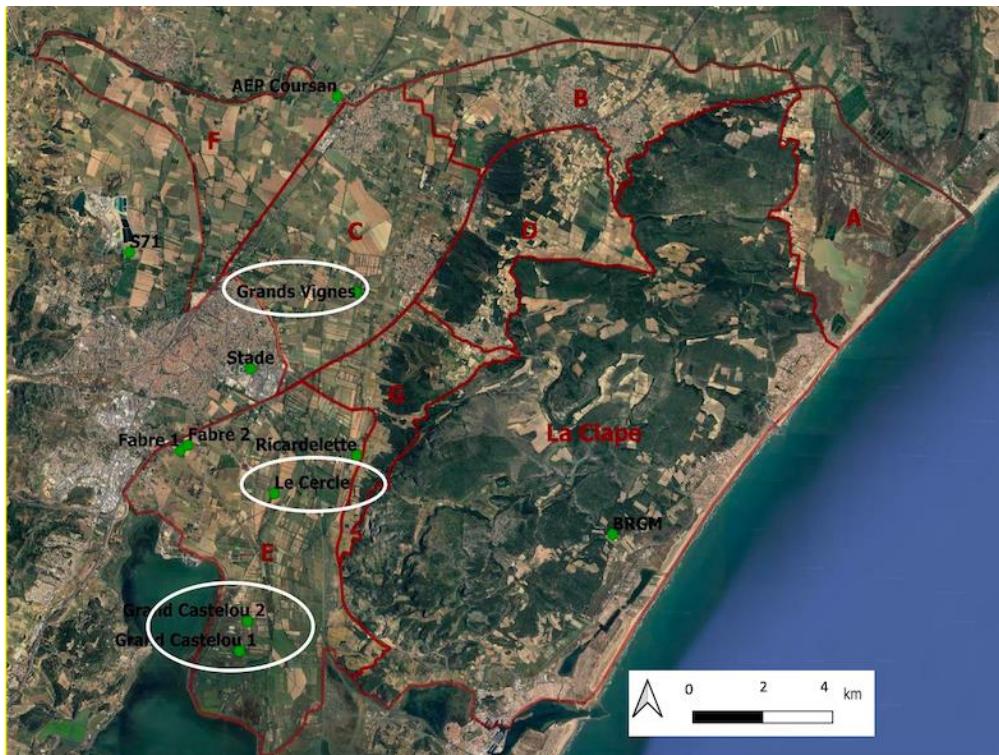


Illustration 22. Localisation des ouvrages du réseau piézométrique et des sites expérimentaux.

Deux campagnes de prélèvements de sol avaient été réalisées et avaient fait l'objet d'une description dans le rapport année 1 du projet (2020). Pour rappel, elles consistaient en :

- un échantillonnage répété de trois parcelles : vigne ($43,195848^\circ$; $3,06074^\circ$), friche ($43,195197^\circ$; $3,06085^\circ$) dans la plaine de Vinassan, prairie ($43,123660^\circ$; $3,025089^\circ$) au Domaine du Grand Castelou ;
- deux transects recoupant vignes et friches sur le Domaine de la Négly (Fleury d'Aude).

Deux nouvelles campagnes ont été conduites en 2020 sur les parcelles de Grands-Vignes (GV) et du domaine du Grand-Castelou avec le support d'un groupe de 10 étudiants de l'Option d'ingénieur agronome « Eau-Sol-Environnement » et du Master 3A parcours « Sol » promotion 2020-2021 encadrés par la doctorante Laurène Marien et supervisés par les enseignants-chercheurs François Colin, Armand Crabit et Julien Fouché.

Un contexte viticole de plaine et un de végétation naturelle ont été explorés. Pour chaque position au sein des parcelles, un échantillonnage systématique a été réalisé pour 7 profondeurs : 0-10 cm, 10-20cm, 20-40cm, 40-60cm, 60-80 cm, 80-100 cm, 100-120 cm. Chaque échantillon a été décrit suivant les propriétés : couleur Munsell, test HCl, traces d'hydromorphie, texture. Pour chaque échantillon, une dilution 1/5 a été effectuée et pour laquelle ont été mesurées la conductivité électrique, les concentrations en Na^+ , Ca^{2+} et NO_3^- à l'aide d'électrodes spécifiques (LAQUAtwin series, HORIBA Advanced Techno Co., Ltd.) et le pH. Un relevé de conductivité électro-magnétique à l'aide d'un EM38-MK2 (GEONCIS LTD) a permis des mesures suivant un pas d'espace de 5 à 10 m. Enfin des relevés de végétation ont été réalisés.

3.1.4. Parcalle viticole de plaine – parcelle dite de « Grands-Vignes »

La parcelle de vigne « Grands-Vignes (GV) étudiée dans la plaine agricole de l'Aude, fait l'objet d'une conversion en Agriculture Biologique. Le viticulteur présente un intérêt pour une meilleure compréhension du fonctionnement de système « sols et flux d'eau » afin d'optimiser ses pratiques. La parcelle de 2,6 ha, établie sur une formation d'alluvions récentes (Fz-C) est plane, à une altitude d'environ 3m NGF, les submersions y sont effectuées 1 à 3 fois par an. La parcelle a fait l'objet de 20 sondages (cf. localisation

Illustration 23). A noter que la parcelle est située au nord d'une zone dénommée « Etang salin » sur la carte d'Etat Major (1820-1866), très proche du lieu-dit « Grands Vignes » sur la Carte de Cassini (XIII^e s.).

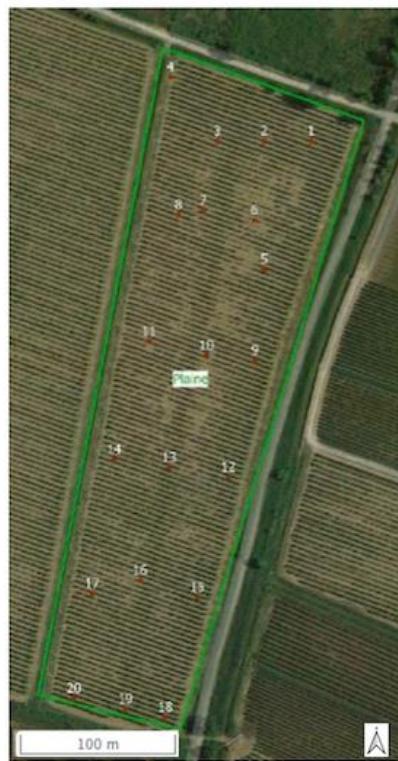


Illustration 23. Localisation des sondages effectués sur la parcelle viticole de « Grands-Vignes ».

Les valeurs de conductivités électriques de sol déduites des mesures en laboratoire et exprimées en équivalent de pâte saturée (EC_{sp}) sont quasi-systématiquement supérieures à 2 mS/cm, variables entre les points et le champ des valeurs augmente avec la profondeur : 0-4 ms/cm pour des profondeurs < 20 cm, 2-5 ms/cm pour des profondeurs comprises entre 30 cm et 50 cm, 2-6,3 ms/cm pour des profondeurs comprises entre 60 cm et 90 cm et 2-7,5 ms/cm pour la profondeurs 120 cm.

Ces valeurs de conductivités électriques sont positivement corrélées aux mesures de concentration en Na^+ et négativement corrélées au rapport Ca^{2+}/Na^+ . Ceci tend donc à montrer que les fortes valeurs de EC_{sp} sont expliquées par un pôle d'origine sodique, très probablement d'origine marine. Des échantillons d'eau de la nappe sur cette parcelle ont été prélevés durant l'été 2021 en vue d'analyses géochimiques. Ces dernières devraient permettre de caractériser l'origine de l'eau. Les résultats de ces analyses sont attendus pour la fin de l'année 2021.

Les mesures électro-magnétiques à haute densité spatiale révèlent un double motif assez stable sur une profondeur d'environ 1,5 m, identifiable sur les 2 voies de mesures de l'EM38 (cf. Illustration 24) : (i) des patchs concentriques d'une dimension de 20-25 m entre lesquels la conductivité varie d'un facteur 2 et (ii) deux sous-ensembles très clairement différents avec une plus forte conductivité au Nord qu'au Sud.

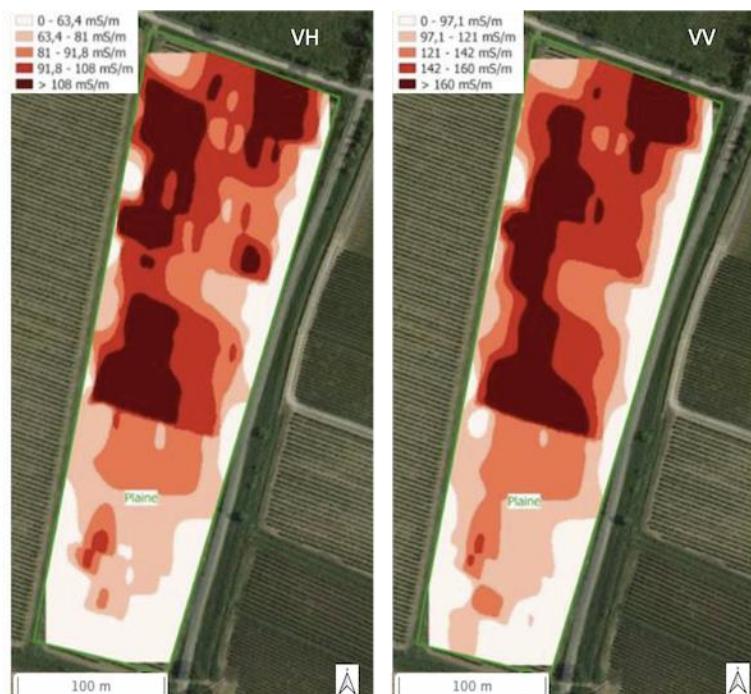


Illustration 24. Interpolation spatiale de la conductivité électromagnétique mesurée à l'aide de l'EM38. VH pour Voie de mesure Horizontale et VV pour Voie de mesure Verticale. NB : les valeurs de conductivité données par l'EM38 ne doivent pas être interprétées comme des valeurs de conductivité sur extract de pâte saturée de sol.

La segmentation nette des valeurs conductivités électromagnétiques Nord-Sud se retrouve dans l'examen de l'évolution des limites parcellaires dans le temps (cf. Illustration 25). La parcelle a aujourd'hui les mêmes limites qu'en 1950-1965. Elle a été sous-découpée en 2000-2005 en deux parties correspondant à la segmentation précédente puis se retrouve à nouveau ses limites antérieures à partir de 2006. Une hypothèse est donc que le sous-découpage a pu induire des pratiques différentes, il y a une quinzaine d'année et pour une durée inférieure à 5 ans, qui ont pu conduire à des niveaux de salinité actuels fortement différents.



Illustration 25. Évolution des limites parcellaires (Source Géoportail : www.geoportail.gouv.fr).

3.1.5. Prairies naturelles

Les quatre parcelles de prairie étudiées se situent sur le Domaine du Grand Castelou. Il s'agit d'un ancien domaine viticole d'environ 200 ha, actuellement propriété du Conservatoire du Littoral, faisant l'objet d'une gestion partagée entre le PNR et la Mairie de Narbonne.

Cette zone d'étude, établie sur des formations vaseuses sablées et de dépôts laguno-marins récents (Mz), est bordée à l'Est par l'étang de Bages-Sigean et à l'Ouest par le canal de la Robine. L'occupation des sols présente une diversité caractéristique des milieux de zones humides composée de sansouires, de roselières et de prés salés. Les sansouires se trouvent en zone humide salée. Elles hébergent une faible diversité de végétation et sont principalement colonisées par des salicornes. Les roselières sont des zones humides essentiellement colonisées par des roseaux. Les prés salés sont des zones inondées périodiquement par des eaux saumâtres ou salées mais sont moins salées que les sansouires. Elles sont en effet alimentées en eau douce naturellement ou par des apports d'origine anthropique. Il existe quatre types de prés salés : les prés salés à Junc maritime et Junc aigu, les prés salés à Junc de Gérard et carex et les prés salés à chiendent armoise. Les pratiques de submersion ont pour objectif de créer des conditions différentes favorables à la biodiversité au sein du Domaine. Suivant les secteurs, les parcelles sont submergées avec des lames d'eau comprises entre 0 et 35 cm, pour des durées allant de 1 jours à plusieurs semaines. Les submersions sont en général réalisées entre octobre et mars et représentent des apports d'eau moyens de 10 000 m³/ha.

Les quatre parcelles ont été choisies en concertation avec E. Voque et A. Segalen (PNR La Narbonnaise), afin de recouper un gradient de proximité à l'étang (de 1,15 à 1,8 km), deux intensités dans les pratiques de submersion (forte, *i.e.* apport d'eau de 30 cm au-dessus du niveau de la parcelle et modérée, *i.e.* apport d'eau de 4 cm au-dessus du niveau de la parcelle) et plusieurs conditions de végétation (cf. Illustration 26 et Illustration 27). Sur certaines des parcelles du Domaine, comme sur celles choisies, la végétation a été caractérisée plus finement par le PNR grâce à des relevés floristiques le long de transects établis antérieurement à la campagne de mesure.

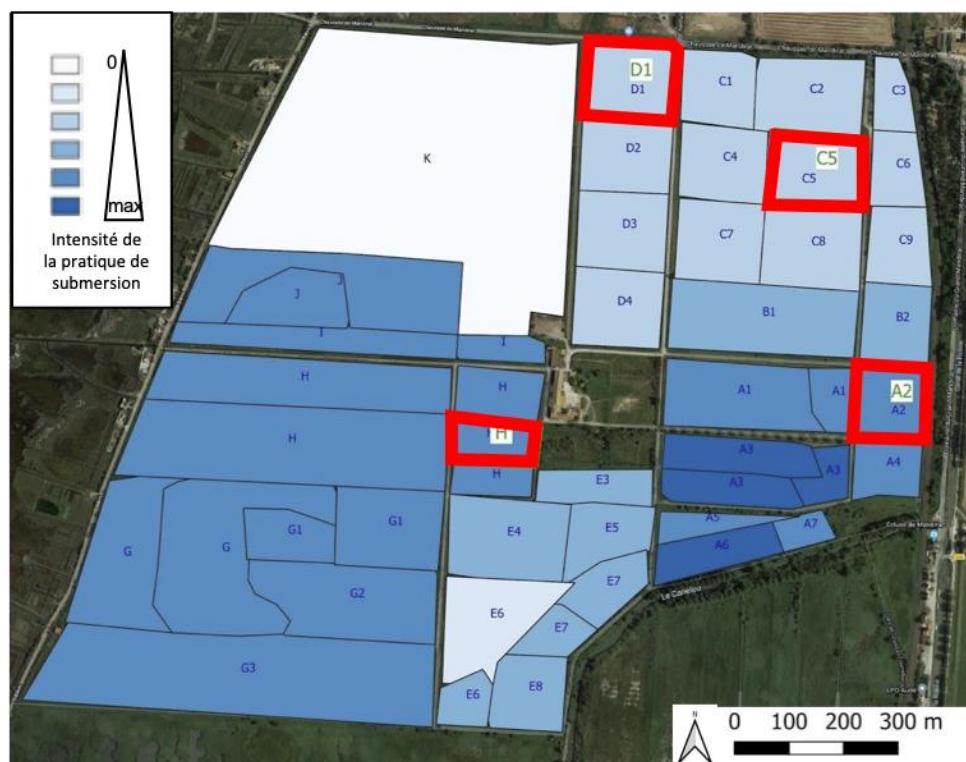


Illustration 26. Intensité des pratiques de submersion d'après le plan de gestion du Domaine du Grand Castelou et localisation des parcelles étudiées.

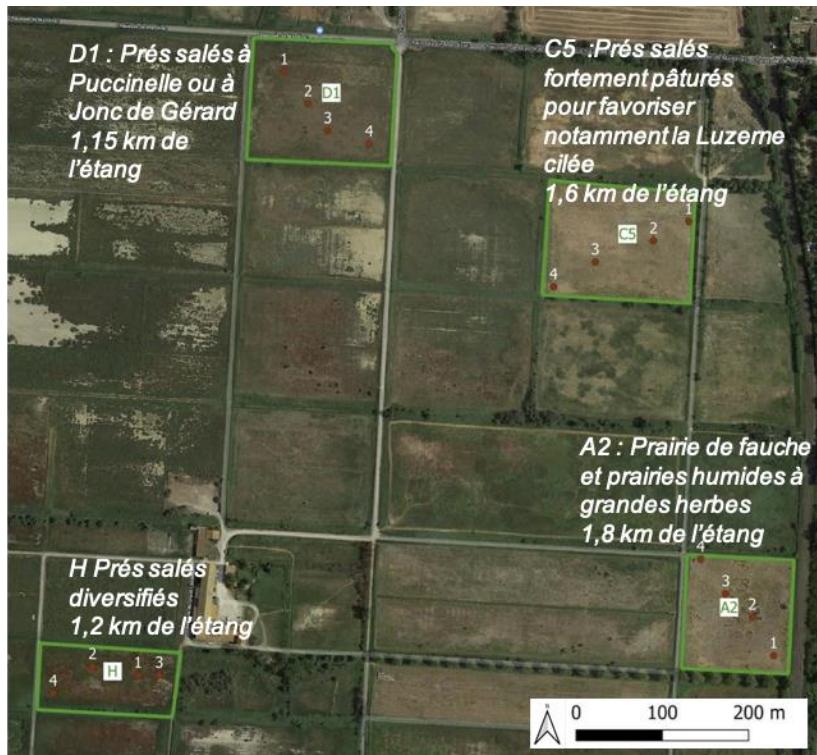


Illustration 27. Localisation des sondages effectués et végétation des parcelles d'après le plan de gestion du Domaine du Grand Castelou.

Les prélevements de sols sont tous effervescents à HCl et ne présentent pas d'éléments grossiers. Les parcelles diffèrent toutefois entre elles d'un point de vue de la morphologie des sols et de la salinité (cf. Illustration 28). Les principaux éléments à retenir, en classant les parcelles par leur éloignement décroissant à l'étang, sont :

- parcelle A2 (coordonnées : 43,124320° ; 3,029766°) : la parcelle reçoit un fort apport d'eau par submersion ; le sol limoneux en surface évolue vers argileux en profondeur, les marqueurs d'hydromorphie temporaire sont présents à partir de 10 cm et jusqu'à 60 cm, les marqueurs d'hydromorphie permanente apparaissent entre 60 et 100 cm ; les conductivités électriques mesurées sont les plus faibles (environ 1,5 mS/cm) et peu variables avec la profondeur ;
- parcelle C5 (coordonnées : 43,128215° ; 3,027930°) : la parcelle reçoit un apport d'eau modéré par submersion ; le sol limoneux sur la partie Est évolue vers argileux sur la partie Ouest, les marqueurs d'hydromorphie temporaire sont présents à partir de 40 cm, les marqueurs d'hydromorphie permanente ne sont pas présents ; les conductivités électriques mesurées sont comparables à celle de la parcelle A2 (environ 3 mS/cm) et peu variables avec la profondeur ;
- parcelle D1 (coordonnées : 43,129765° ; 3,023859°) : la parcelle reçoit un apport d'eau modéré par submersion ; le sol limono-argileux en surface évolue vers argilo-limoneux en profondeur, les marqueurs d'hydromorphie temporaire sont présents dès la surface et jusqu'à 100 cm, les marqueurs d'hydromorphie permanente sont présents au-delà de 100 cm ; les conductivités électriques mesurées sont très fortes (20 mS/cm en moyenne), dès la surface, et augmentent avec la profondeur ;
- parcelle H (43,123828° ; 3,021066°) : la parcelle reçoit un fort apport d'eau par submersion ; le sol change de texture avec la profondeur de limoneux à argileux puis sableux avec présence de débris coquilliers, les marqueurs d'hydromorphie temporaire sont présents dès la surface et jusqu'à 50 cm, les marqueurs d'hydromorphie permanente sont présents au-delà de 50 cm dans l'horizon sableux ; les conductivités électriques mesurées sont très fortes (18 mS/cm en moyenne), dès la surface, et augmentent avec la profondeur.

En première approche, il semble que la salinité des sols s'explique plus par la proximité à l'étang que par l'intensité des pratiques de submersion. Il faut également noter que des contrôles locaux peuvent être induits par l'organisation des différents dépôts : la présence d'horizons argileux peut isoler les horizons de surface d'une salinité en profondeur. Aussi, la présence d'horizons sableux peut favoriser les circulations latérales depuis une source salée vers les horizons où sont présentes les racines des plantes. Il semble également que les niveaux de salinité observés ne soient pas en correspondance directe avec les relevés fins de végétation établi par le PNR (donnée antérieure au projet SALIN). Ce point méritera d'être approfondi dans le futur.

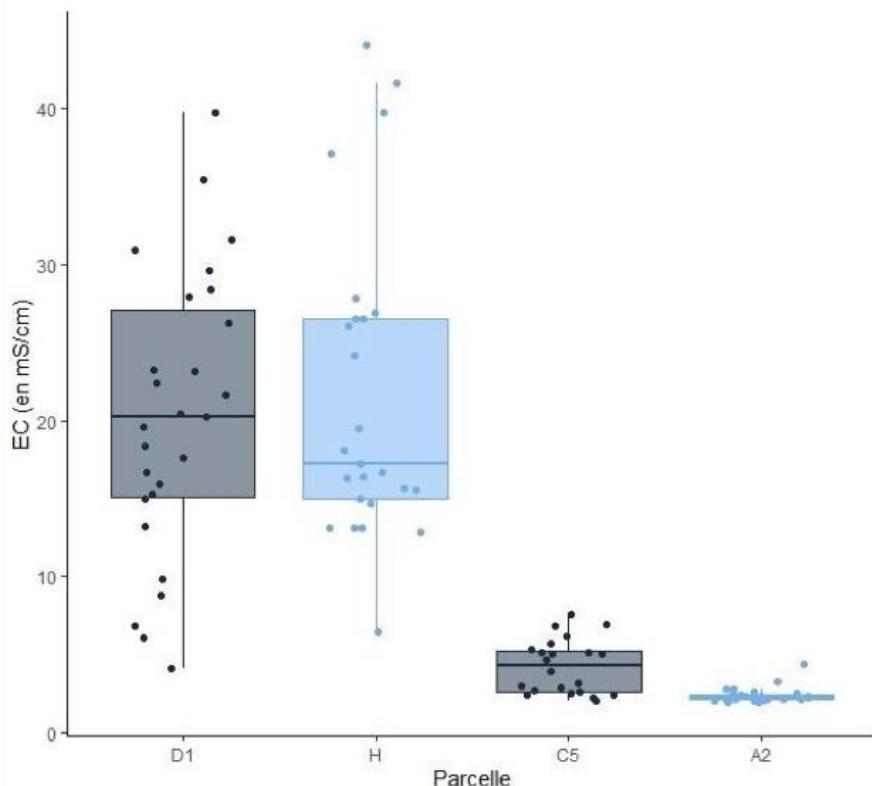


Illustration 28. Conductivités Électriques (converties en équivalent sur pâte saturée) mesurées sur les parcelles du Domaine du Grand Castelou. Les parcelles D1 et C5 en gris reçoivent moins d'eau de submersion que les parcelles H et C5 en bleu.

3.2. INDICATEURS ET GESTION DE LA SALINISATION

L'objectif de cette partie, qui présentait la nature la plus incertaine et prospective lors du montage du projet, est de proposer des indicateurs utiles pour appréhender et assurer un suivi de la dynamique spatio-temporelle de la salinisation et de ses conséquences dans la Basse-Plaine.

Une première piste de réflexion concerne l'analyse de la végétation sous contraintes de salinité et d'actions anthropiques de gestion.

Une seconde piste portait au moment de la conception du projet sur l'identification de l'activité microbiologique des sols et de son intensité en contextes variablement salés. Cette piste a été abandonnée pour privilégier celle de l'étude des pratiques de gestion de la salinité et la perception des acteurs de terrain de la salinisation. Ces études originales, permettent un positionnement inclusif vis-à-vis du territoire (les acteurs sont amenés à produire les données de base des indicateurs) et amorçant une projection dans l'action plus évidente (par l'identification des relations entre perception, pratiques de gestion et réalité du phénomène de salinisation). L'étude des pratiques et de la perception a été conduite, avec un focus particulier sur la viticulture. Ce travail fût réalisé par Florian Bergé (élève-ingénieur à Montpellier SupAgro

dans le cursus Systèmes Agricoles et Agroalimentaires et Développement au Sud) au cours de son stage de fin d'étude. L'encadrement a été réalisé par François Colin, Armand Crabit, Laurène Marien (Montpellier SupAgro) et Camille Grentzinger (Le Grand Narbonne).

3.2.1. Végétations

Un premier travail repose sur les relevés de végétation effectués en contexte de vignes et de friches suivant un transect d'intensité croissante de salinité (cf. Rapport année 1 : BRGM/RP-69860-FR). Cet axe de travail s'est intensifié en 2021 grâce aux travaux de thèse de Victor Berteloot (2020-2023, direction François Colin (UMR G-EAU), Elena Kazakou (CEFE), encadrement Armand Crabit (UMR G-EAU), Karim Barkaoui (UMR ABSYS)). Le sujet de thèse s'intitule : *Dynamique des interactions eau-communautés végétales et usages des terres en zone littorale méditerranéenne : Etude du cas des Basses plaines de l'Aude*.

Ce travail porte sur l'étude des interactions eau-sol-communautés végétales en lien avec les problématiques de salinisation des zones côtières méditerranéennes et de conservation de la biodiversité des communautés herbacées. L'objectif affiché dans cette thèse est de développer une approche pluridisciplinaire issue des sciences du sol, de l'eau et de l'écologie fonctionnelle. Cet angle de vue permettra d'étudier, dans un contexte de salinisation, les interactions entre le compartiment biotique (communautés végétales) et le compartiment abiotique (sol, eau) et leurs implications en terme de ressources à l'échelle du territoire. L'inventaire, la nature et la quantification de ces interactions constituent donc le verrou scientifique majeur de ce projet de thèse. Les questions scientifiques posées sont de nature cognitive et méthodologique avec un fort potentiel applicatif : avec quelle intensité les communautés végétales, les processus hydrologiques et la salinisation interagissent-ils en zone côtière méditerranéenne ? Peut-on décrire ces interactions à l'aide des traits des plantes, et quel est le rôle de la diversité fonctionnelle des communautés ? Comment formaliser ces interactions au travers d'un modèle et inclure plus explicitement les traits des plantes dans les modèles hydrologiques ? Quelle trajectoire rétro- et prospective de la redistribution des flux d'eau et de la dynamique des communautés végétales peut-on en déduire dans le bassin méditerranéen ?

Les sites d'étude sont situés dans la Basse-Plaine de l'Aude afin de constituer un double gradient de situations fonction des conditions de salinité et d'anthropisation. Les sites concerneront des friches agricoles de différents âges, des espaces naturels gérés et non gérés.

3.2.2 Pratiques agricoles

Les pratiques agricoles, et en particulier les pratiques viticoles, constituent à la fois un indicateur de la gestion actuelle de la salinité permettant de mieux comprendre le phénomène de salinisation des eaux et des sols et sa dynamique spatio-temporelle et à la fois un levier d'action fondamental à l'échelle de la Basse-Plaine dans sa totalité (espace naturels compris). Un important travail de caractérisation pratiques viticoles a été effectué suivant une logique d'enquêtes en trois étapes :

- construction d'un guide d'entretien et échantillonnage d'une population de viticulteurs issus des différentes unités paysagères de la zone d'étude à partir d'échanges avec des experts de la Chambre d'Agriculture de l'Aude, de l'Agglomération Le Grand Narbonne, de l'Union d'ASA de l'Est Audois, du PNR La Narbonnaise, des techniciens des caves coopératives, du Centre expérimental Pech Rouge de l'INRAE ;
- inventaire des pratiques présentes sur le territoire à l'échelle de l'îlot et de la parcelle selon 3 dimensions : gestion de l'eau, travail du sol et matériels végétaux¹ ; au total 28 entretiens directifs ont été menés concernant 45 îlots parcellaires comprenant au total 168 parcelles et représentant une surface de 307 hectares, soit environ 10% des vignobles de la Basse-Plaine ;

¹ L'analyse sur les matériels végétaux (cépages et porte-greffes) n'est pas reprise dans la synthèse proposée dans ce rapport mais pourra être intégrée dans une phase ultérieure du projet.

- analyse statistique des résultats (Analyse des Correspondances Multiples et Classification Ascendante Hiérarchique) afin de déterminer une typologie des pratiques et une représentation spatialisé associée.

En terme de résultats, les 300 variables récoltées, synthétisées en 13 indicateurs ont permis d'identifier 5 groupes de pratiques. Ces 5 groupes, chacun associé à un qualificatif général, sont schématiquement représentés à l'

Illustration 29 en fonction de l'intensité du travail du sol et de l'apport d'eau effectués par les groupes de viticulteurs. Les îlots correspondant à chaque groupe de pratiques sont cartographiés à l'Illustration 30.

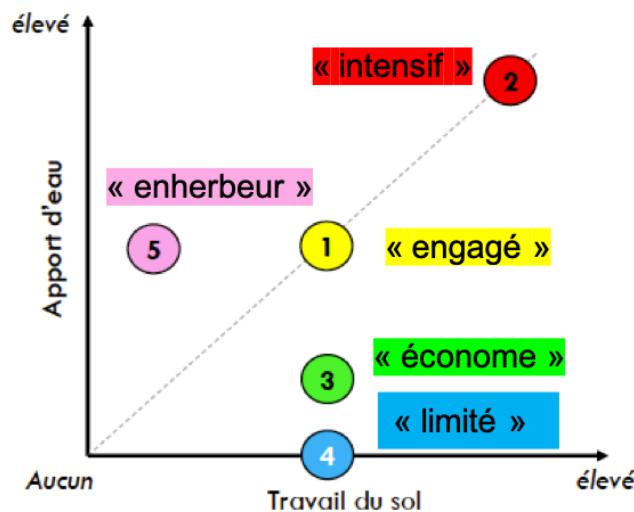


Illustration 29. Typologie des pratiques viticoles.

Une description étendue des groupes de pratiques est disponible dans le mémoire de fin d'étude de Florian Bergé (Bergé, 2020), une description synthétique est donnée ci-dessous :

- **Groupe 1** : qualifié d'« engagé », intermédiaire entre des pratiques de travail du sol intensives et simplifiées, sans labour profond avant la plantation, il vise une pratique de submersion efficace, avec un apport d'eau associé à un drainage enterré systématique. La production est intégralement apportée en Cave Coopérative (60% en IGP, 40% en mixte IGP/AOC) dont 40% sans label, 40% en HVE² et Terra Vitis³ et 20% en Terra Vitis ; ce groupe est exclusivement présent dans la plaine entre Narbonne et le massif de la Clape, concentré dans la zone basse à l'Ouest de Vinassan et une partie du plateau de Quatourze au Sud de Narbonne ;
- **Groupe 2** : qualifié de plus « intensif » en termes de travail du sol, il submerge systématiquement, en général plusieurs fois par an, sans utiliser de système de drainage enterré et présentant en général un réseau de fossés de drainage en mauvais état. La production est intégralement apportée en Cave Coopérative (60% IGP, 40% mixte IGP/AOC) dont 40% sans label et 60% en HVE3 ; ce groupe est exclusivement situé sur une zone de plaine proche du fleuve de l'Aude qui permet une alimentation en eau directe à partir de stations de pompage, sur les communes de Coursan, Salles d'Aude et Fleury d'Aude ;

² Certification Haute Valeur Environnementale (HVE) Niveau 3 du Ministère de l'Agriculture, cf. <https://dicoagroecologie.fr/encyclopedie/agriculture-a-haute-valeur-environnementale/>

³ Terra Vitis est certification environnementale présente dans toutes les régions viticoles françaises, reconnue par le Ministère de l'agriculture, ayant obtenu l'équivalence du niveau 2 de la Certification Environnementale

- **Groupe 3** : qualifié d' « économe » sur le travail du sol et sur l'utilisation de l'eau (même si tous les îlots sont submergés), il diffère des deux précédents car il possède moins de variables significatives pour le caractériser. La production est intégralement apportée en Cave Coopérative (40% IGP, 60% mixte IGP/AOC) et entièrement labélisée HVE3 ; ce groupe est situé sur la même zone que le groupe 2 ;
- **Groupe 4** : qualifié de « limité » dans l'accès à l'eau, il est le seul groupe où les îlots ne sont jamais submergés (et donc sans drainage enterré) mais recourt à l'irrigation au goutte-à-goutte. Il s'explique peu par les pratiques d'entretien du sol. La production (22.2% IGP, 11.1% AOC, 66.6% mixte IGP/AOC) est apportée en Cave Coopérative (56%), en Cave Particulière (33%) ou mixte (11%) et 44% est sans label, 34% en HVE3, 11% en HVE3 et Terra Vitis, 11% en Terra Vitis ; ce groupe est établi sur les pieds de pente du massif de la Clape jusqu'aux bords d'étangs, sur des terres en coteaux, ou "semi-coteaux" occasionnant des rendements généralement plus bas et une valorisation des vins différente des deux premiers groupes ;
- **Groupe 5** : qualifié d' « alternatif » sur la base des pratiques d'entretien du sol qui favorisent l'enherbement et le travail mécanique, il compte le plus petit effectif mais représente autant de surface que les autres. La production (75% IGP, 25% mixtes IGP/AOC) est apportée en Cave Coopérative (75%) et en Cave Particulière (25%), 50% est sans label, 25% en Terra Vitis, 25% en Agriculture Biologique ; ce groupe ne présente pas d'organisation spatiale à la même échelle que les précédents, il est présent dans tous les paysages de plaine, ainsi que sur le plateau du Quatourze et absent sur les pentes du massif de la Clape.

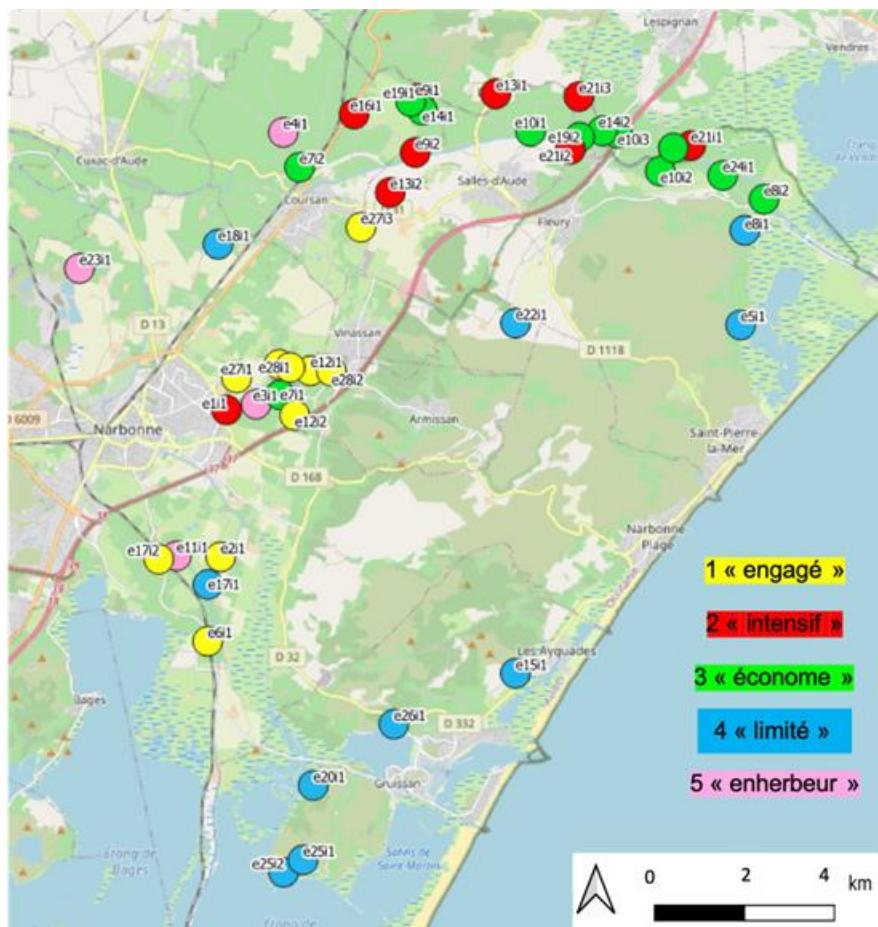


Illustration 30. Représentation spatiale des îlots enquêtés et des groupes de pratiques correspondants.

Cette typologie des pratiques fait apparaître une gestion différenciée de la salinité spatialement structurée. On peut penser en première approche qu'elle est expliquée par les contraintes d'accès à l'eau et aux

structures de drainage en place. L'analyse complète des pratiques révèle toutefois que ces contraintes liées à l'eau s'accompagnent de logiques identiques d'entretien du sol pouvant s'expliquer par l'existence de réseaux d'agriculteurs favorisant les échanges et l'adoption d'itinéraires techniques communs.

Le groupe 5 fait exception à la structuration spatiale ce qui tend à indiquer que des pratiques alternatives peuvent exister que les précédents modèles ne sont pas totalement contraints.

Ces résultats sont donc très précieux à la fois pour mieux comprendre les actions agricoles influant sur le phénomène de salinité et à la fois pour amorcer une première réflexion sur les changements éventuels possibles de pratiques.

Une dernière étape est envisagée pour cette partie et consiste à confronter les viticulteurs de la zone aux résultats obtenus. Cette confrontation permettra de valider si l'ensemble des types de pratiques a bien été identifié. De plus, dans une démarche de recherche inclusive, elle permettra les échanges et le questionnement commun sur l'explicitation des raisons pour lesquelles il existe une structuration spatiale (ou non) des pratiques.

3.2.3. Perceptions

Les perceptions de la salinité actuelle et de la dynamique de salinisation peuvent être interprétées comme indicateurs d'état et d'évolution du phénomène. Elles fournissent également des clés pour mieux comprendre la mise en place des pratiques de gestion et mieux identifier les leviers de l'adaptation. Ces perceptions ont été récoltées et analysées auprès des acteurs viticoles de la Basse-Plaine.

Les données analysées ont été récoltées par des entretiens semi-directifs auprès des mêmes viticulteurs que ceux de l'enquête sur les pratiques afin de pouvoir croiser les résultats obtenus.

Les données étaient constituées de verbatim, de citations ou de fragments d'entretiens et d'observation terrain (*ie.* lors d'une visite, des marques blanches sur le sol sont désignées par le viticulteur enquêté). Elles ont été organisées en un corpus en fonction des thèmes présents pour pouvoir les analyser (Wanlin, 2007). C'est une approche subjective qui vise à reformuler, à interpréter et à théoriser des phénomènes, à la différence d'une analyse de contenu qui consiste à faire un travail au niveau des mots et de leur signification. Les thèmes identifiés et leurs interactions sont présentés à l'Illustration 31. Les données ont été ordonnées dans une matrice où chaque ligne représente un individu enquêté et chaque colonne un thème. L'interprétation données a été conduite par une lecture verticale (regroupement par thème) et horizontale (associations d'idées) de la matrice.

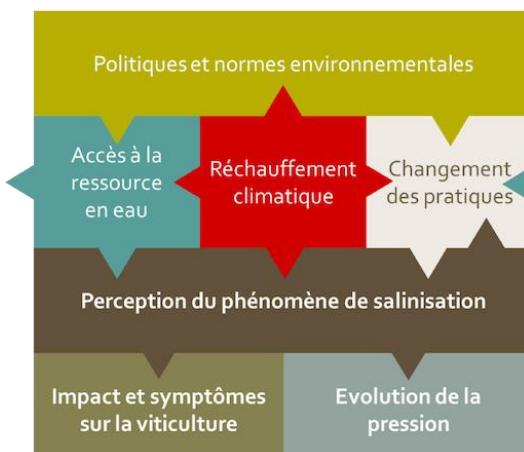


Illustration 31. Thèmes et interactions identifiés dans l'analyse des perceptions de la salinité/salinisation.

Les résultats présentés concernent les perceptions de la salinisation en lien avec les symptômes et l'évolution de la pression. Ces deux thèmes étaient ceux visés au début de l'enquête, les autres étant apparus au cours des entretiens. Les résultats complets sont donnés dans (Bergé, 2020) et quelques éléments concernant les types de symptômes et l'évolution de la salinité sont synthétisés ci-dessous.

La plupart des viticulteurs constatent des symptômes de salinité en lien avec :

- la végétation de la vigne : "*grillure*", "*dépérissement*", "*coloration rouge au bord des feuilles*", "*diminution de la surface foliaire totale*", "*ralentissement de la croissance de la vigne*" sont des expressions retrouvées régulièrement ;
- la mortalité : pour environ 2/3 des cas sous la forme de rond de sel, de 3 à 15 m de diamètre, pour 1/3 restant sous forme épars ou en ligne ;
- la perte de rendement : de faible à négligeable ("*une dizaine de cep à l'hectare*"), à conséquente (estimée entre 20% et 30% du rendement visé), à catastrophique ("*Ça peut détruire une récolte, du simple à rien ! de 90 à 15 hL, on abandonne*") ;
- la topographie ("*les parcelles basses sont les plus touchées*") ;
- les formes de végétations autres que la vigne : "*On le voit aux adventices, je ne les connais pas mais ça change*". "*Quand il y a du tamarin, là, c'est qu'il y a du sel !*" ;
- plus marginalement, le sol : fissures, craquellements et tâches blanchâtres visibles à la surface.

Une minorité d'individu ne perçoit pas d'impact. Les symptômes sont inexistant ou à peine perceptibles, et aucune perte de production n'est reliée au sel. Le phénomène demeure néanmoins connu et perçu comme une menace ("*Je n'ai pas de problème sur mes parcelles mais les ronds apparaissent sur la zone*"). L'efficacité des pratiques est en général un argument de la part des viticulteurs qui justifient qu'il n'y ait pas de symptômes ressentis ("*Je ne perçois pas le sel car je fais du préventif, j'envoie assez d'eau*").

L'évolution de la salinisation est perçue de manière cohérente entre beaucoup d'entretiens. Les viticulteurs constatent d'abord une première phase d'apparition des symptômes puis d'augmentation de la pression.

Bien que le phénomène soit perçu comme très ancien ("*il y a toujours eu du sel dans la Basse-Plaine*"), l'émergence d'un "*problème*" lié au sel apparaît entre 2010 et 2016 (la date de 2015 est citée 5 fois). Les justifications sont liées à une dimension climatique : périodes de sécheresse et/ou de stress hydrique, réchauffement climatique ("*Après les grosses chaleurs, on voit le sel*", "*La sécheresse a bougé les sols, et là, c'est terminé !*", "*Le climat s'est déréglé, ça a joué sur le sel*").

Après 2016, nous pouvons constater la formation de deux types de perception posant comme constat :

- une phase de stabilité, voire de diminution de 2017 à 2020 ("*Il y a moins de sel depuis 3 ans*", "*On a vu un des plantiers reprendre sur des ronds de sel, ils ont disparu à St-Cécile*"), justifiée par une augmentation perçue de la pluviométrie ("*Cette année, on a eu 130 mm d'eau de plus au printemps, je peux te dire qu'on ne voit pas le sel. Il n'y a que ça, il faut de l'eau !*") ;
- une augmentation continue depuis 2010 ("*On voit de plus en plus d'endroit avec du sel*", "*Au Pouzet, c'est le début, ça gagne du terrain*"), justifiée par la raréfaction perçue des inondations naturelles ("*Les inondations sont de plus en plus rares, à part cette année ! Avant c'était très régulier*") et/ou en lien avec pratiques de submersion ("*On a vraiment vu qu'il y avait des soucis de sel à cause de la diminution des submersions et de l'augmentation de la pression*").

Les perceptions ont été regroupées et introduites sous la forme d'une variable supplémentaire dans l'Analyse des Correspondances Multiples des pratiques agricoles.

Les résultats, schématisés à l'Illustration 32, indiquent par groupe de pratique que :

- les groupes 1 et 2 de pratiques, qui utilisent les plus fortes lames d'eau pour les submersions, partagent une perception d'augmentation de la pression du phénomène et se sentent les plus touchés par des symptômes sous forme de "ronds de sel" ;

- les groupes 3 et 5 de pratiques ont une perception de stabilisation de la pression depuis 2016-2017, ces groupes ont en commun de submerger avec des hauteurs d'eau plus modérées, diffèrent sur les pratique d'entretien du sol et ne partagent pas systématiquement le même environnement ;
- le groupe 4 perçoit soit des symptômes causés par les "coups de mer", soit par l'absence de symptôme sur des îlots en majorité sur les flancs du massif de la Clape.

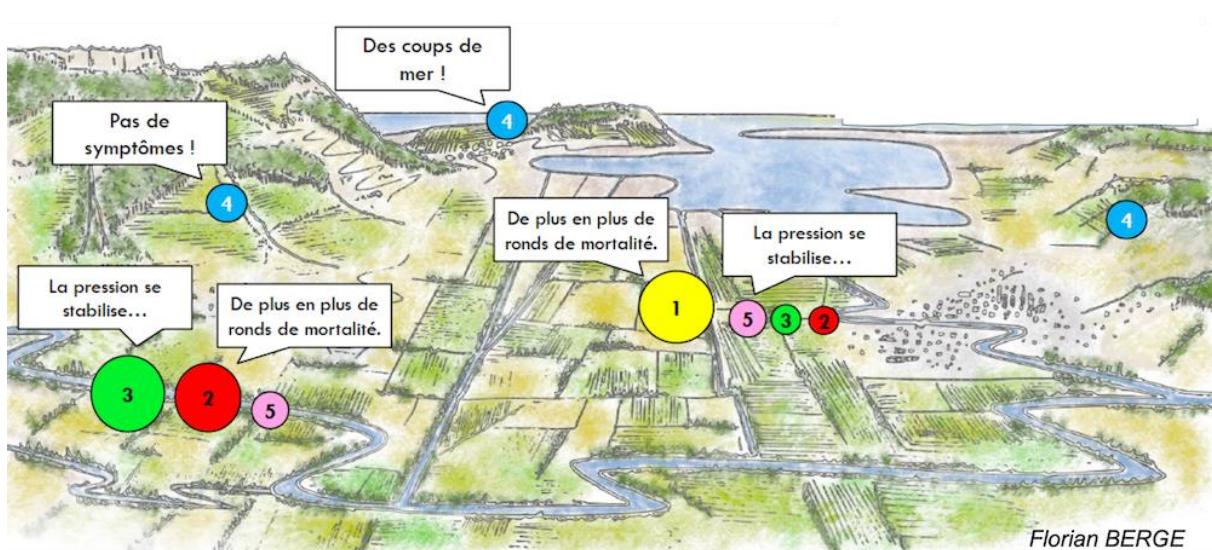


Illustration 32. Schématisation des correspondances entre types de pratique, perceptions et localisation des îlots viticoles.

3.2.4. Conclusion

Cette dernière partie a présenté différents indicateurs permettant de mieux comprendre et de qualifier les actions agricoles influant sur la salinisation de la Basse-Plaine issus de l'analyse des pratiques viticoles. La phase de validation par les acteurs de terrain aura lieu en début d'année 2021.

Les groupes de perceptions identifiés constituent des indicateurs originaux de la salinité et de son évolution. Ces groupes apparaissent structurés dans l'espace et liés à la typologie des pratiques.

L'analyse des correspondances et des distorsions entre les pratiques, les perceptions et les mesures de salinité constitue une perspective prometteuse tant pour la compréhension du phénomène de salinisation que pour l'identification des actions potentielles à adopter.

Ce travail doit se poursuivre en 2022 par l'analyse des couvertures herbacées en lien avec l'état de salinité et sa gestion (ou non gestion). L'objectif est double (i) tester la pertinence d'indicateurs de salinité basés sur l'identification d'espèces et/ou de communautés, (ii) approfondir les interactions entre fonctionnement de la végétation et processus physico-chimiques de salinisation afin d'évaluer le poids de l'enherbement dans la lutte anti-sel.

4. Cartes piézométriques de la plaine Narbonne-Salin

Les paragraphes qui suivent présentent les cartes piézométriques de l'aquifère du Quaternaire du secteur Narbonne-Salin établies à partir des données disponibles depuis les années 60.

4.1. DONNEES DISPONIBLES

L'Illustration 33 présente les données disponibles pour la réalisation des cartes piézométriques. Les plus anciennes données (début des années 1960), correspondant à l'état de référence du système, proviennent des travaux de la thèse de Cambon (Cambon, 1963), mais ne couvrent que la partie Nord de la plaine. Les données les plus récentes (été 2019, hiver 2021 et été 2021) fournies en annexe 1, acquises dans le cadre de cette étude, couvrent par contre l'intégralité de la zone.

Les données piézométriques ont été acquises sur des ouvrages non exploités.

Source	Périodes	Nombre de mesures	Secteur
Thèse Cambon	Octobre 1961	124	Nord de la plaine
Thèse Cambon	Février 1962	150	Nord de la plaine
Thèse Cambon	Mai 1962	139	Nord de la plaine
Cette étude	mi-Juill.-finSept.2019	107	Toute la plaine
Cette étude	finFév-débutMars2021	111	Toute la plaine
Cette étude	finJuill.-débutAoût2021	104	Toute la plaine

Illustration 33. Données disponibles pour l'établissement des cartes piézométriques ; mesures réalisées sur forage et puits.

4.2. CARTES PIEZOMETRIQUES DANS LE QUATERNaire

4.2.1. Méthodologie

Afin de produire les cartes piézométriques les plus pertinentes possibles, il a été choisi d'utiliser l'outil géostatistique, c'est-à-dire de procéder à une analyse variographique de chaque jeu de données (établissement et modélisation du variogramme), puis d'interpoler les mesures par méthode de krigage. Par contre, comme l'aquifère du Quaternaire est un aquifère libre il a été choisi d'interpoler les profondeurs du niveau piézométrique plutôt que les côtes piézométriques. La carte piézométrique a ensuite été obtenue par simple différence au MNT. Cette opération explique notamment le caractère irrégulier des courbes de niveaux. L'avantage de cette méthode est qu'elle constraint l'interpolation à la topographie, évitant ainsi de faire passer la piézométrie d'un aquifère libre au-dessus du niveau d'un talweg ou d'un autre type de dépression. De plus, car les eaux de surface sont en relation avec cet aquifère, les principaux systèmes (Aude et canal de la Robine) ont servi à contraindre la carte en imposant la carte à passer par leur côte piézométrique. De façon volontaire et afin de n'émettre aucune hypothèse sur les échanges Nappe-Etang/Mer aucune condition n'a, par contre, été imposée. Ceci permettra de visualiser, s'ils s'existent, les secteurs où le niveau piézométrique est en dessous du niveau de la mer, et donc les lieux potentiels d'une éventuelle intrusion marine au sein de l'aquifère du Quaternaire.

4.2.2. Résultats

L'analyse variographique des données de chacune des périodes montrent des variogrammes bien structurés avec des portées s'établissant entre 3 et 4 km, montrant ainsi que dans un rayon de plusieurs kilomètres la donnée est très fortement corrélée et que l'interpolation, dans ce périmètre, est en moyenne fiable.

Sur les cartes ci-dessous (Illustration 35 à Illustration 38), les secteurs libellés « non fiable », notamment le long de la Méditerranée et l'embouchure de l'Aude indiquent les zones où les cartes piézométriques, fautes de points de mesure, ne sont pas fiables. Les cartes d'écart type associées à ces cartes sont disponibles en annexe 2.

En règle générale et pour un même secteur, les cartes piézométriques sont relativement similaires d'une année à l'autre, et ne montrent pas de fortes différences à minima pour la partie Nord de la zone d'étude (au sud de l'Aude) entre les années 1960 et aujourd'hui. Dans la plaine, la côte piézométrique fluctue entre 10 m NGF en bordure des Corbières et du massif de la Clape et quelques dizaines de cm lorsque l'on se rapproche de la zone des étangs.

En moyenne, durant l'été 2019 les profondeurs des niveaux piézométriques par rapport au sol étaient de 2,80 m, de 2,57 m en durant l'hiver 2021 et de 3,17 m au cours de l'été 2021. Au cours de cette dernière période, les profondeurs de niveaux piézométriques sont plus prononcées en raison des faibles recharges automnale et printanière (automne 2020 et printemps 2021). Du point vu de la direction de l'écoulement des eaux souterraines, ces cartes mettent en évidence, l'alimentation par les Corbières et le Massif de la Clape, mais aussi très nettement l'alimentation de la nappe par l'Aude et le canal de la Robine, identifiable par la présence de dômes piézométriques de part et d'autre de leurs tracés ([sur l'Illustration 34 les valeurs piézométriques plus fortes en couleur claires suivent bien le tracé des cours d'eau](#)). Lorsque l'on se déplace vers le sud de la plaine, la piézométrie tend à passer sous le niveau de la mer à proximité de l'étang, mais toujours avec un flux d'eaux souterraines vers l'étang et/ou dans l'aquifère sous l'étang suggérant l'absence de biseau salé. La comparaison des deux cartes réalisées en été (2019 et 2021) montre qu'à proximité de l'étang, localement, le niveau piézométrique '0 m NGF' a reculé d'environ 1 km dans les terres, et est expliqué par le peu de recharge dans l'aquifère automnale et printanière sur la période 2020-2021.

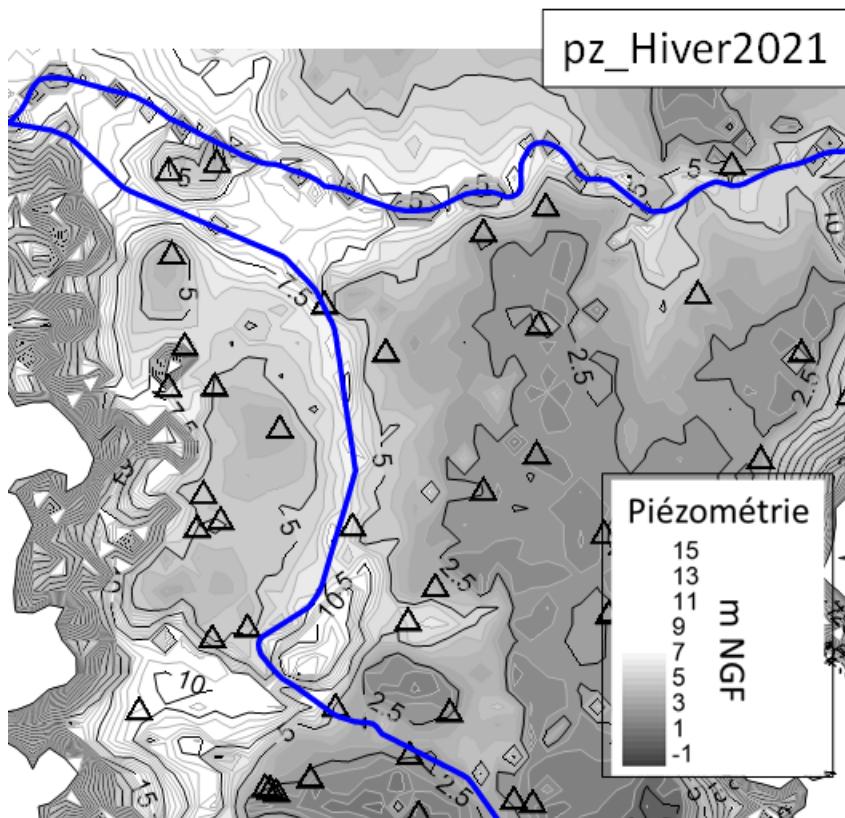


Illustration 34. Zoom de la carte piézométrique de l'hiver 2021 au niveau de l'Aude et de la Robine.

L'effet de la recharge de l'aquifère par les submersions de parcelles n'est pas clairement visible sur les cartes. Néanmoins, on notera en particulier dans le quart Nord-Est de la plaine une sorte de dôme

piézométrique en partie liée à la topographie du secteur, mais aussi, car toujours bien développée en été, potentiellement liée à la recharge de l'aquifère par les submersions.

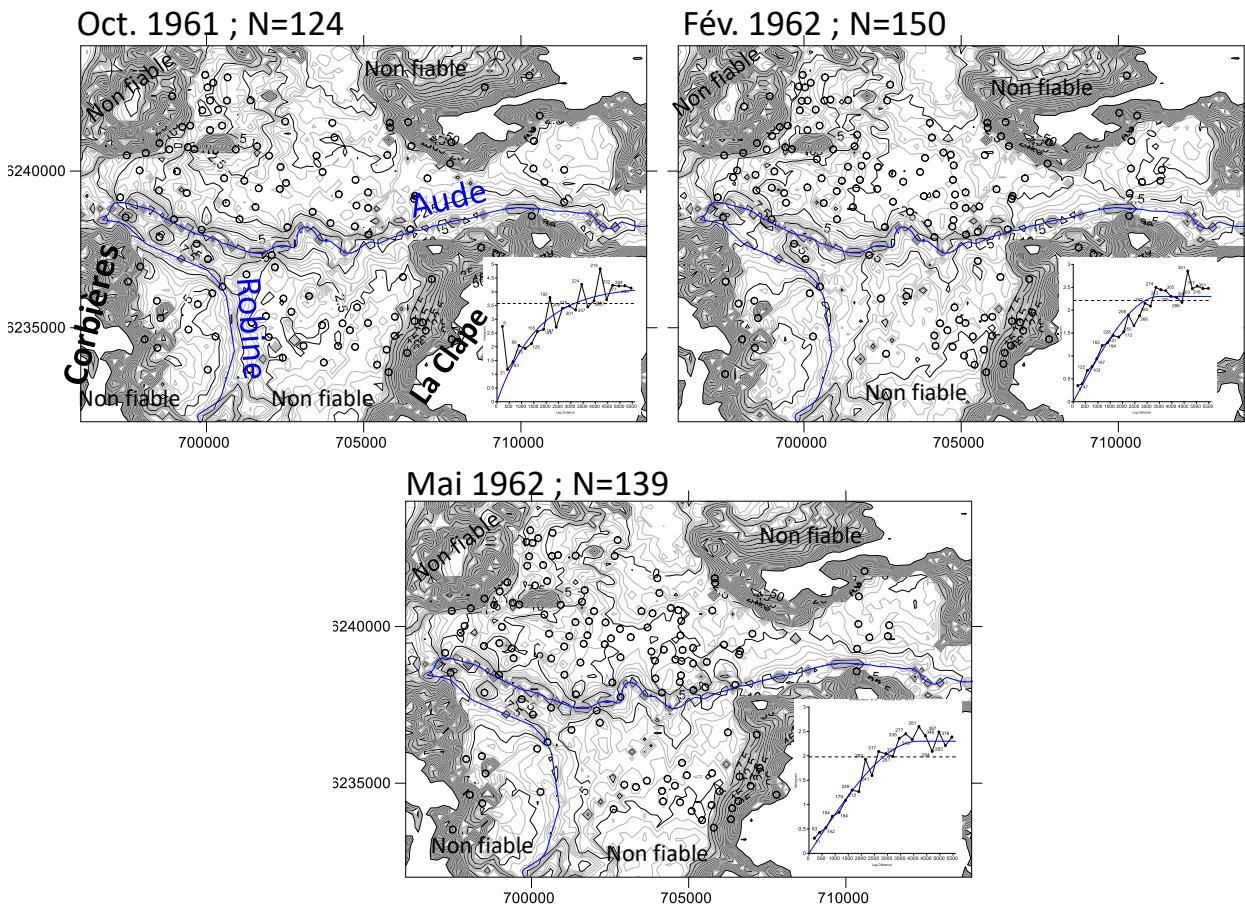


Illustration 35. Cartes piézométriques du Quaternaire, années 1960.

Point : mesures (124 à 150). Bleu : cours d'eau. Isovaleurs tous les 5 mètres (mNGF). Cartes en 200x200m.

Insert : variogramme de la profondeur du niveau piézométrique. Oct.1961 modèle Gaussien (var. : 4,2 ; portée : 1 650 m) ; Fév.1962 modèle sphérique (var. : 2,3 ; portée : 3 500 m) et Mai1962 modèle sphérique (var. : 2,3 ; portée : 4 200 m).

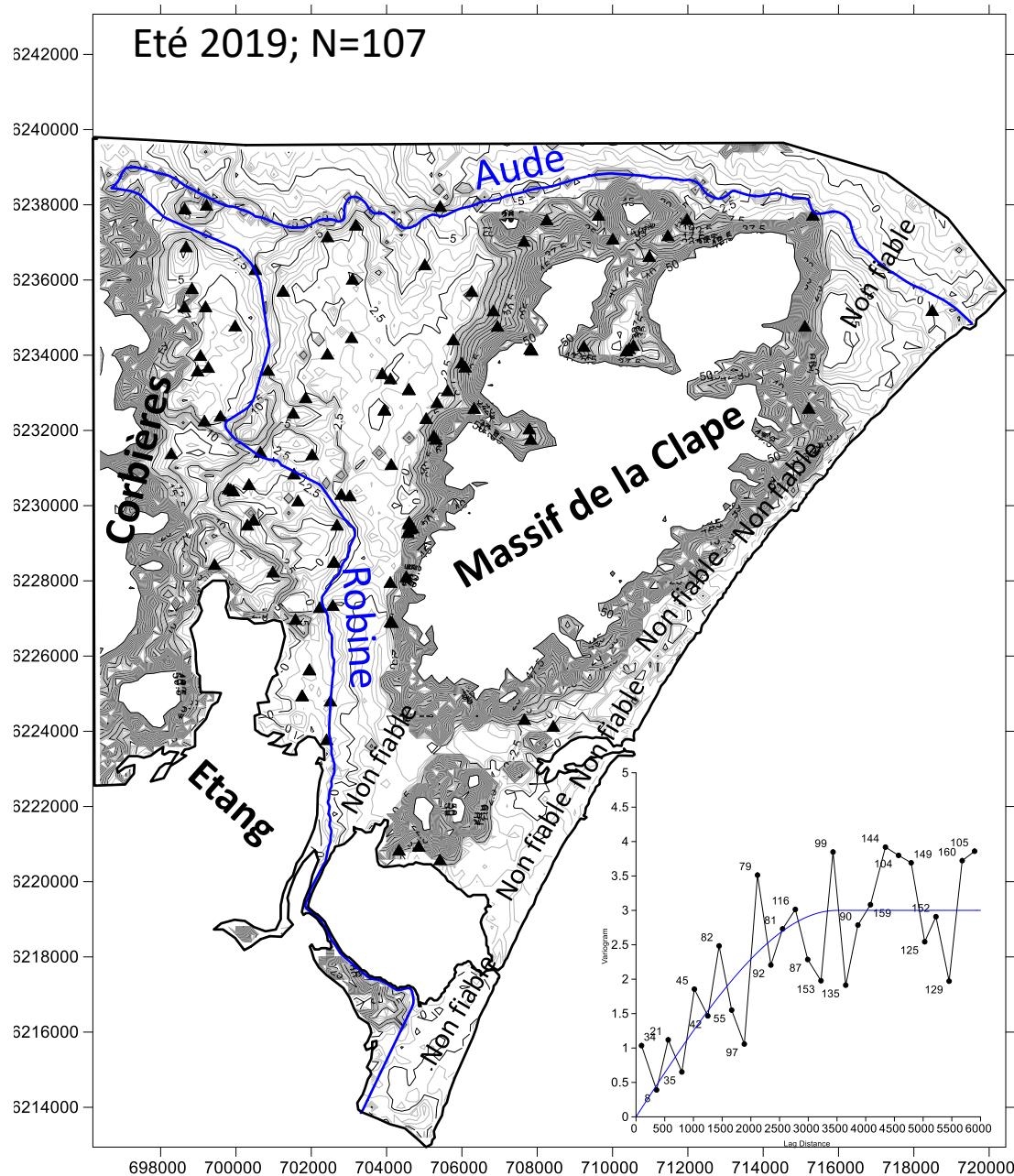


Illustration 36. Carte piézométrique du Quaternaire, été 2019.

Point : mesures (n=107). Bleu : cours d'eau. Isovaleurs tous les 5 mètres (mNGF). Cartes en 200x200m.

Insert : variogramme de la profondeur du niveau piézométrique, modèle sphérique (var. : 3,0 ; portée : 3 500 m).

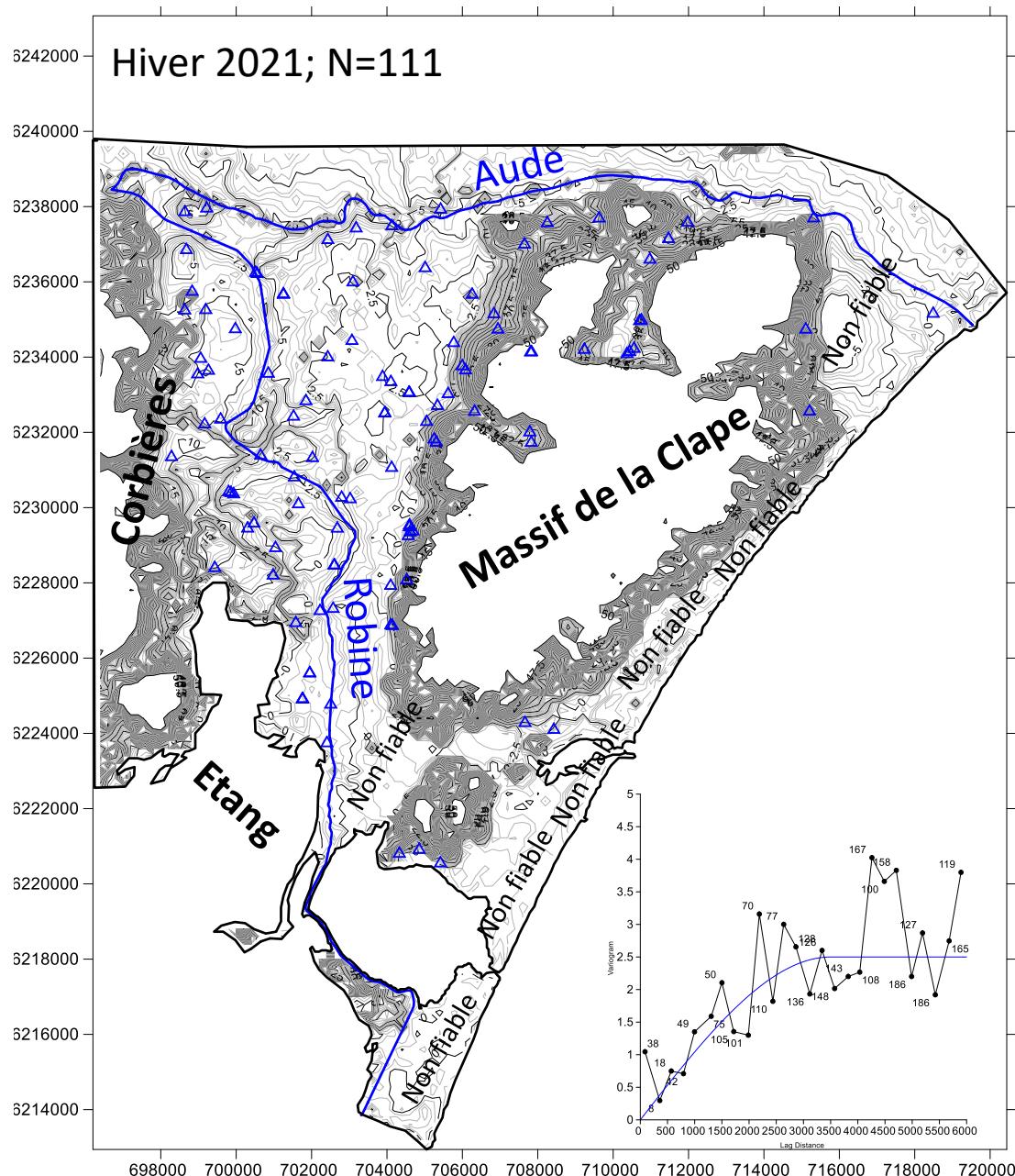


Illustration 37. Carte piézométrique du Quaternaire, hiver 2021.

Point : mesures ($n=111$). Bleu : cours d'eau. Isovaleurs tous les 5 mètres (mNGF). Cartes en 200x200m.

Insert : variogramme de la profondeur du niveau piézométrique, modèle sphérique (var. : 2,5 ; portée : 3 500 m).

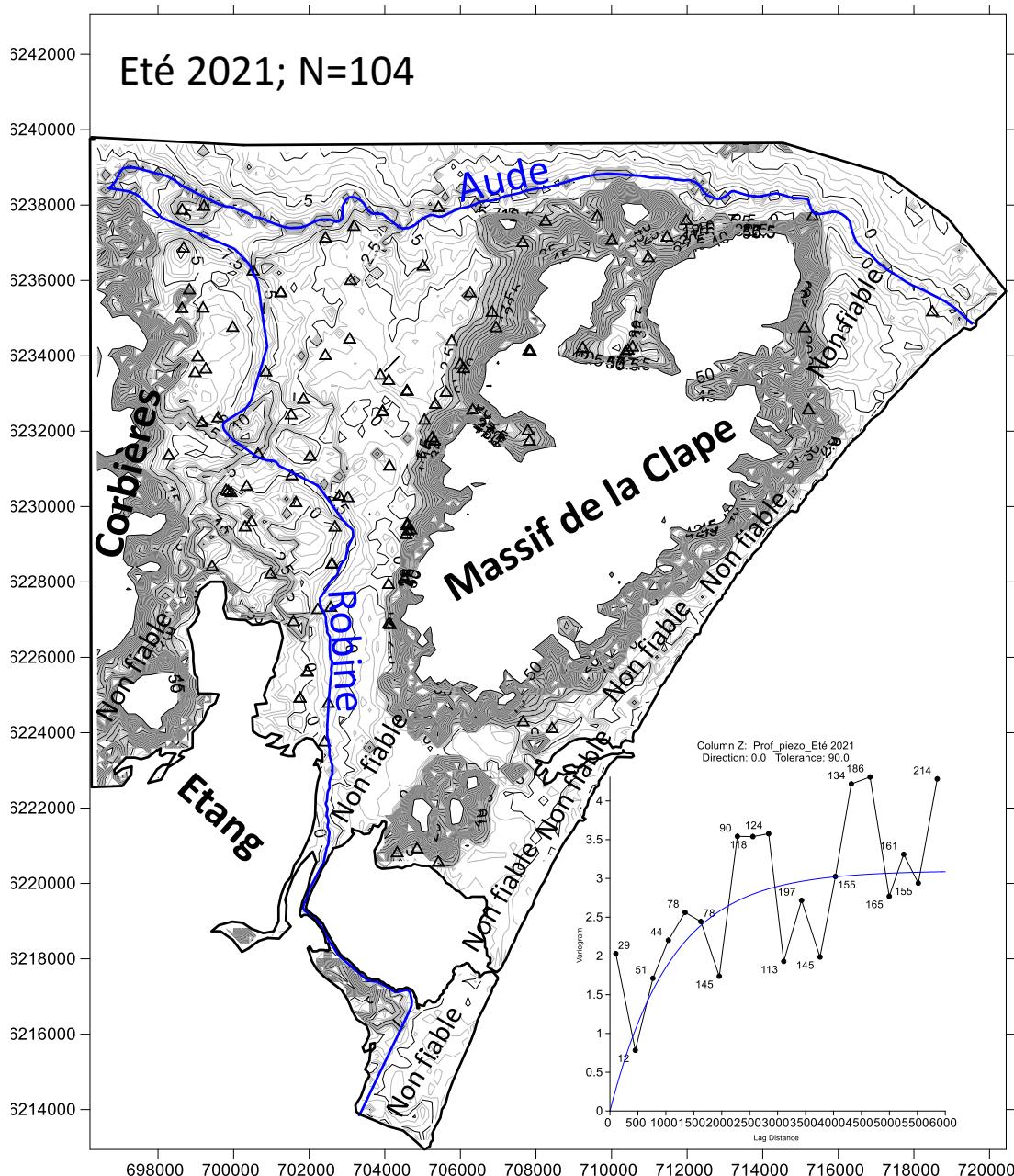


Illustration 38. Carte piézométrique du Quaternaire, été 2021.

Point : mesures (n=119). Bleu : cours d'eau. Isovaleurs tous les 5 mètres (mNGF). Cartes en 200x200m.

Insert : variogramme de la profondeur du niveau piézométrique, modèle exponentiel (var. : 3,1 ; portée : 1 100 m).

4.2.3. Conclusions

- Les données permettent une interpolation fiable,
- Les cartes piézométriques dans le Quaternaire sont, en moyenne, assez comparables pour les mêmes secteurs, et ne montrent pas, en moyenne de différences significatives entre les années 1960, et aujourd'hui,
- A noter néanmoins des niveaux piézométriques plus profonds de 0,3-0,4 m en été 2021 par rapport à l'été 2019, avec un recul local de la piézométrie dans les terres, jusqu'à un 1 km, au niveau de l'étang. Ces niveaux plus bas sont expliqués par les faibles recharges automnale et printanière de l'aquifère par les précipitations (automne 2020 et printemps 2021),

- Les Corbières et le massif de la Clape alimentent l'aquifère de la plaine,
- Le canal de la Robine et l'Aude alimentent la plaine,
- Le flux d'eaux souterraines vers l'étang est sortant, suggérant l'absence de biseau salé,
- Les effets de la recharge de l'aquifère induite par les submersions de parcelles ne sont pas nettement visibles sur les cartes. Toutefois, elles semblent avoir un impact positif sur le niveau de la nappe durant les étés, à minima dans le quart Nord-Est de la plaine.

4.3. PROPRIETES HYDRODYNAMIQUES DU QUATERNaire

Les données disponibles localisées dans l'Illustration 40 viennent de trois sources, la BSS (essais Lefranc [4] et pompages d'essai [19]), la thèse de Cambon (pompages d'essai [4] ; Cambon (1963)) et de petits tests hydrauliques réalisés dans le cadre de cette étude (essais slug test [12]). L'Illustration 39 présente les données. Ces essais renseignent sur la perméabilité et la transmissivité de l'aquifère du Quaternaire, en moyenne et sur l'ensemble des données disponibles (Illustration 41) : la perméabilité est de $1,4 \times 10^{-4}$ m/s ($\text{LogK} : -3,85 \pm 1,6$) et la transmissivité de $6,0 \times 10^{-4}$ m²/s ($\text{LogT} : -3,22 \pm 1,9$). Cependant comme le montre l'Illustration 42, les essais slug tests, réalisés dans la plupart des cas sur des piézomètres peu profonds (quelques m de profondeur) et crépinés sur des intervalles très courts (environ 1 m), donnent des valeurs de perméabilité et de transmissivité globalement plus faibles que pour le reste des ouvrages. Ces plus faibles valeurs peuvent provenir d'un état relativement colmaté de ces ouvrages (piézomètres réalisés à la tarière et sans massif filtrant) et/ou de formations superficielles plus argileuses et donc moins perméables. Pour évaluer la perméabilité moyenne du Quaternaire il n'a donc été retenu que les ouvrages atteignant environ une dizaine de mètres profondeur (Illustration 43), jugés plus représentatifs de la perméabilité moyenne de l'aquifère car pouvant intercepter plusieurs niveaux perméables de l'aquifère ; ceux sont les ouvrages à partir de S71 dans l'Illustration 39 ; soit 25 forages. Les distributions des perméabilités et des transmissivités restent néanmoins peu structurées, vraisemblablement à cause du peu de données disponibles, la moyenne de la perméabilité est de $6,7 \times 10^{-4}$ m/s ($\text{logK} : -3,17 \pm 1,3$) et celle de la transmissivité de $5,4 \times 10^{-3}$ m²/s ($\text{LogT} : -2,26 \pm 1,3$). Ceux-sont ces valeurs qui sont retenues comme valeurs représentatives de l'aquifère. Ces données ont servi à établir une carte de la transmissivité de l'aquifère (voir paragraphe suivant).

nom	X_RGF93	Y_RGF93	position crépine (m)/sol	Perméabilité (m/s)	Transmissivité (m ² /s)	Type d'essai	Source	n°
Castelou Joncs1	701756	6224952	2-3	1.5E-06	1.5E-06	Slug test	cette étude	Castelou Joncs1
Castelou Joncs2	701758	6224955	0.93-1.43	1.2E-04	6.1E-05	Slug test	cette étude	Castelou Joncs2
Cercle1	702604	6228516	3.5-4.5	4.3E-07	4.3E-07	Slug test	cette étude	Cercle1
Cercle2	702601	6228507	3.6-4.6	5.1E-07	5.1E-07	Slug test	cette étude	Cercle2
Cercle3	702603	6228511	1.59-2.59	1.1E-06	1.1E-06	Slug test	cette étude	Cercle3
GVigne1	704590	6233104	6.8-7.8	1.4E-07	1.4E-07	Slug test	cette étude	GVigne1
GVigne2	704588	6233092	3.5-4.5	6.0E-07	6.0E-07	Slug test	cette étude	GVigne2
GVigne3	704589	6233099	1.0-2.0	1.5E-07	1.5E-07	Slug test	cette étude	GVigne3
Prairie1	701952	6225641	3.0-4.0	5.9E-06	5.9E-06	Slug test	cette étude	Prairie1
Prairie2	701952	6225649	1.0-1.5	1.1E-05	5.4E-06	Slug test	cette étude	Prairie2
S71	699057	6234003	3-9	4.4E-04	7.7E-06	Slug test	cette étude	S71
Stade	702024	6231365	3-9	1.5E-04	9.3E-04	Slug test	cette étude	Stade
43	706605	6239110	2.2-12	1.0E-05	9.8E-05	essai par pompage	Thèse Cambon	43 (Cambon)
160	702446	6235930	2.8-12	1.0E-04	9.2E-04	essai par pompage	Thèse Cambon	160 (Cambon)
164	702073	6237320	5-13	7.0E-04	5.6E-03	essai par pompage	Thèse Cambon	164 (Cambon)
171	698505	6237890	7.1-13.5	3.7E-04	2.3E-03	essai par pompage	Thèse Cambon	171 (Cambon)
10396X0075/F2	704133	6237549	5.1-10.4	2.5E-03	1.3E-02	essai par pompage	BSS	AEP (Coursan)
10612X0023/S23	701800	6224982	4.9-9.6	5.0E-05	4.8E-04	essai Lefranc	BSS	A
10612X0021/S21	701379	6225793	2-7.64	7.0E-06	5.3E-05	essai Lefranc	BSS	B
10612X0022/S22	700691	6224202	3.9-4.18	1.1E-05	4.6E-05	essai Lefranc	BSS	C
10612X0024/S24	701814	6224377	5.4-9.3	5.9E-05	5.5E-04	essai Lefranc	BSS	D
10612X0186/F1	704060	6230471	15-19.5	3.3E-04	1.5E-03	essai par pompage	BSS	E
10397X0057/F2	705381	6235701	9.2-14	1.5E-04	7.2E-04	essai par pompage	BSS	F
10396X0231/F3	700801	6235668	11.8-13.8	1.3E-01	2.6E-01	essai par pompage	BSS	G
10396X0161/F4	699846	6234141	7.5-9.6	3.6E-03	7.5E-03	essai par pompage	BSS	H
10396X0162/F5	698677	6236892	8.8-11.6	9.3E-02	2.6E-01	essai par pompage	BSS	I
10396X0235/F4	699463	6237546	9.38-17	1.3E-02	1.0E-01	essai par pompage	BSS	J
10396X0055/111111	699778	6238124	4-14	7.6E-04	7.6E-03	essai par pompage	BSS	K
10396X0230/PZE071	698770	6237972	?-15	3.3E-02	2.0E-01	essai par pompage	BSS	L
10396X0065	698321	6238596	8.8-14.8	6.7E-02	5.0E-02	essai par pompage	BSS	M
10396X0056/111111	698555	6238596	0-13.5	3.1E-03	2.0E-02	essai par pompage	BSS	N
10396X0081/MOUS5	698221	6238596	?-18.9	2.5E-02	3.5E-01	essai par pompage	BSS	O
10396X0070/BOULOD	699915	6238596	?-14.5	1.1E-02	7.5E-02	essai par pompage	BSS	P
10396X0071/SAFER	701962	6238596	2-4.4	4.5E-02	7.0E-02	essai par pompage	BSS	Q
10397X0021/GRAPPE	706263	6238596	0-13	3.7E-04	4.0E-03	essai par pompage	BSS	R

Illustration 39. Données disponibles sur la perméabilité et la transmissivité de l'aquifère du Quaternaire.

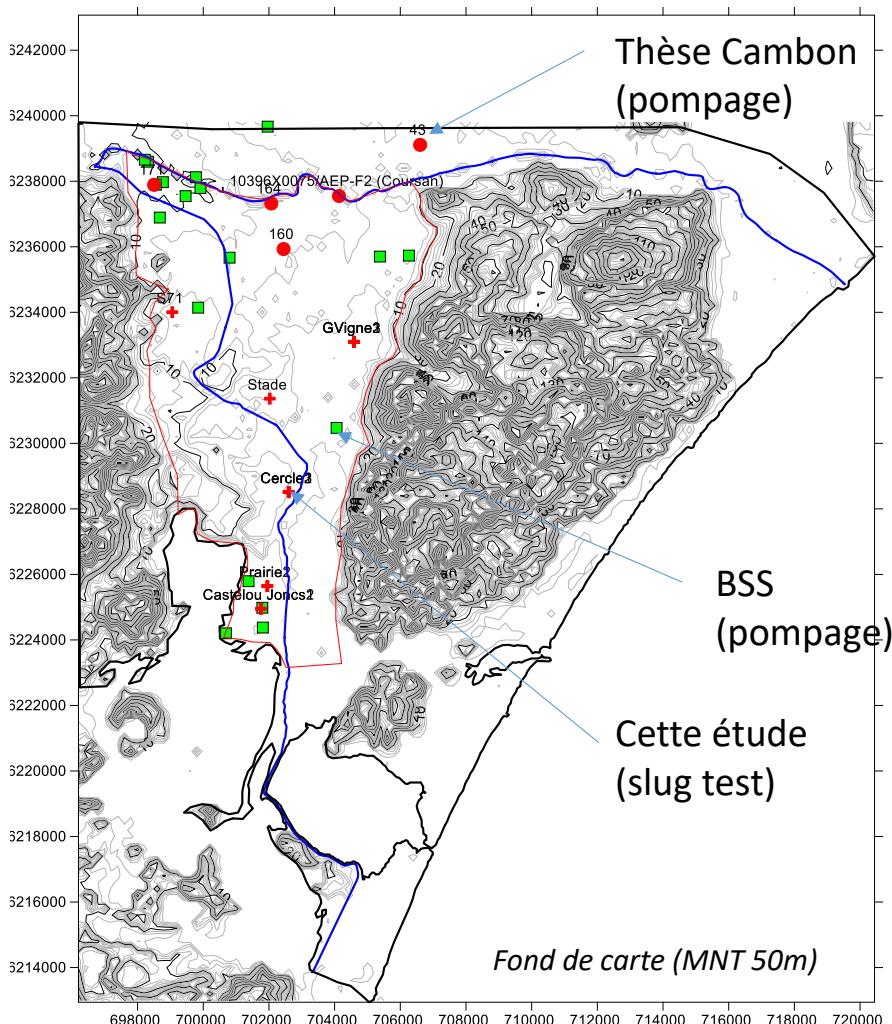


Illustration 40. Localisation des données de perméabilité et de transmissivité. Ronds rouges : Thèse Cambon (1963), carrés verts : BSS, et croix rouge (cette étude).

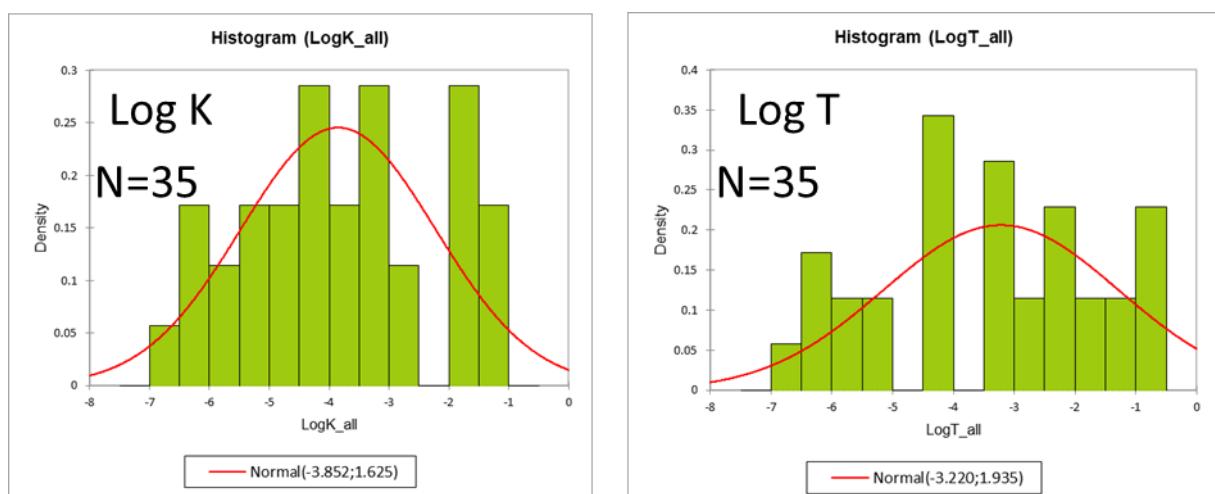


Illustration 41. Distribution des perméabilités (en Log ; gauche) et des transmissivités (en Log ; droite) de l'ensemble des forages.

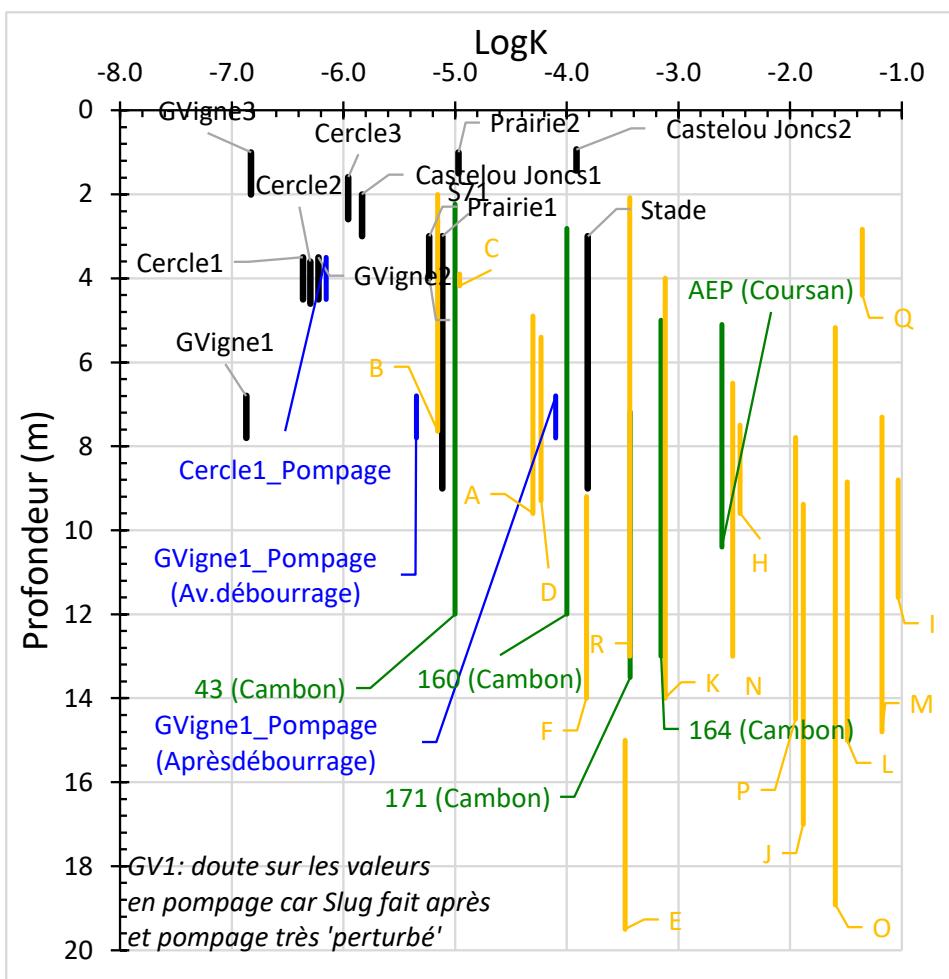


Illustration 42. Evolution de la perméabilité en fonction de la profondeur des ouvrages. Tendance à avoir les formations les plus superficielles les moins perméables. Le tableau Illustration 39 renseigne sur le numéro des ouvrages.

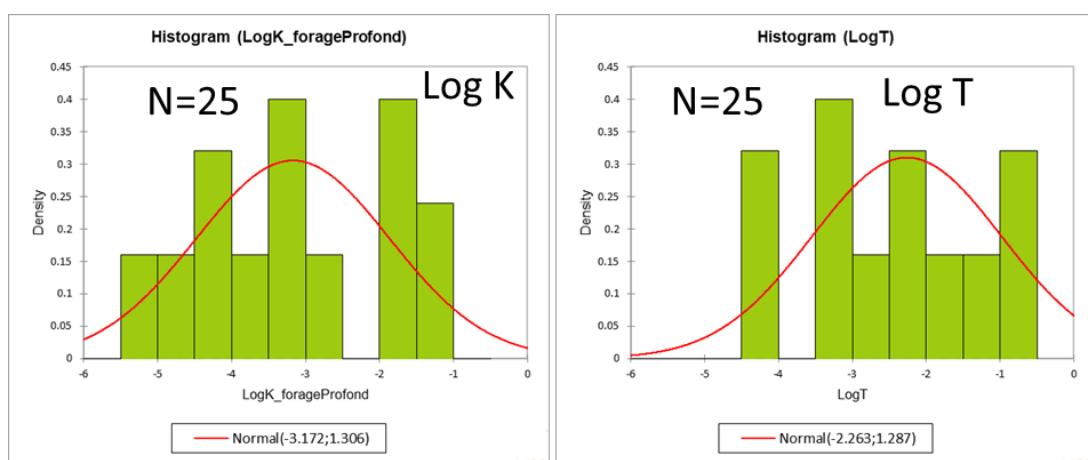


Illustration 43. Distribution des perméabilités (en Log ; gauche) et des transmissivités (en Log ; droite) sur les forages les plus profonds.

4.4. ESTIMATION DU CHAMP DE TRANSMISSIVITE DU QUATERNaire

4.4.1. Principe de la méthode

Cette méthode a été développée récemment afin d'estimer le champ de perméabilité dans des aquifères de socle libre (Dewandel et al., 2017 ; 2020) dans des secteurs où il n'y a pas ou peu d'ouvrages exploités et où l'on dispose d'une importante densité de piézomètres d'observation permettant l'établissement de cartes piézométriques détaillées. La méthode proposée pour évaluer le champ de transmissivité, ou de perméabilité, a été appliquée pour cette étude sur la plaine de Narbonne. Elle est basée sur le concept que les variations à grande échelle de la charge hydraulique peuvent donner des informations sur les propriétés à grande échelle de l'aquifère. Dans le cas où l'aquifère est naturellement drainé (absence de pompage dans les eaux souterraines), où le flux vertical souterrain peut être négligé, où le niveau de la nappe est en état pseudo-permanent et est principalement contrôlé par la topographie plutôt que par la recharge de l'aquifère (Haitjema et Mitchell-Bruker, 2005), on peut supposer que le gradient de la nappe dépend à la fois de la pente topographique et de la transmissivité horizontale de l'aquifère.

A titre d'exemple, dans le cas d'une topographie relativement plane et où l'écoulement des eaux souterraines est horizontal, l'application de l'équation de continuité le long d'une même ligne de courant (loi de Darcy ; $Q=T_1\text{grad}h_1=T_2\text{grad}h_2\dots$; T_i : transmissivité du compartiment i et $\text{grad}h_i$ le gradient hydraulique) montre de faibles gradients hydrauliques là où la transmissivité est élevée et de forts gradients là où elle est faible. Par conséquent, lorsque la topographie varie peu la variation du gradient hydraulique dépend en première approximation des variations de la transmissivité de l'aquifère, en fait de manière inversement proportionnelle au gradient hydraulique. Par contre, dans le cas où les variations d'altitude sont non négligeables, il faudra, avant d'obtenir des informations sur la transmissivité, « éliminer » l'influence de l'altitude sur la piézométrie, à l'aide en général, d'une relation linéaire piézométrie-altitude. Une fois cette tendance enlevée, la pente de la piézométrie résiduelle est calculée puis comparée de manière statistique aux données de transmissivité locales afin de produire un champ de transmissivité, ou de perméabilité si l'information sur l'épaisseur de l'aquifère est disponible (voir Dewandel et al., 2017a pour plus de détails).

Puis, on cherchera à évaluer la meilleure relation empirique possible entre les deux distributions statistiques (transmissivité [ou perméabilité] mesurée et calculée à partir du gradient) tout en respectant les propriétés statistiques de la transmissivité (ou perméabilité) mesurée. Pour que l'analyse soit pertinente, il faut que les deux ensembles de données décrivent la plus large gamme possible de transmissivités que l'on peut rencontrer dans le système étudié. Enfin, la transmissivité (ou perméabilité) calculée est spatialisée et la pertinence de la carte produite jugée sur la base des mesures locales de transmissivité. Ce qui est pertinent puisque ces mesures directes ne rentrent pas dans l'établissement de la carte. Cette méthode, simple, montre des résultats très pertinents. Cependant, elle peine à reproduire les valeurs locales extrêmes (valeurs très fortes et très faibles). Elle est néanmoins capable de fournir des informations sur l'hétérogénéité des aquifères et donc de définir les secteurs où les formations géologiques sont les plus et les moins perméables.

La présente méthodologie a été appliquée sur la plaine Narbonne-Salin le champ de transmissivité établi servira de guide à l'estimation des flux entrant et sortant de l'aquifère en limite de la zone d'étude.

4.4.2. Application à la plaine Narbonne-Salin

c) Relation piézométrie - topographie et calcul du gradient de la piézométrie résiduelle

L'Illustration 44 présente la relation entre la piézométrie et l'altitude pour les données piézométriques durant l'été 2019. Ces données ont été choisies car représentative d'une condition basses eaux. La suite consiste à enlever l'influence de l'altitude (cf. droite de régression sur cette figure) aux données piézométriques pour obtenir la piézométrie résiduelle, puis analyser son gradient (Illustration 45). Dans ce cas, les valeurs de forts gradients indiquent les zones les moins transmissives et les valeurs faibles les zones les plus transmissives.

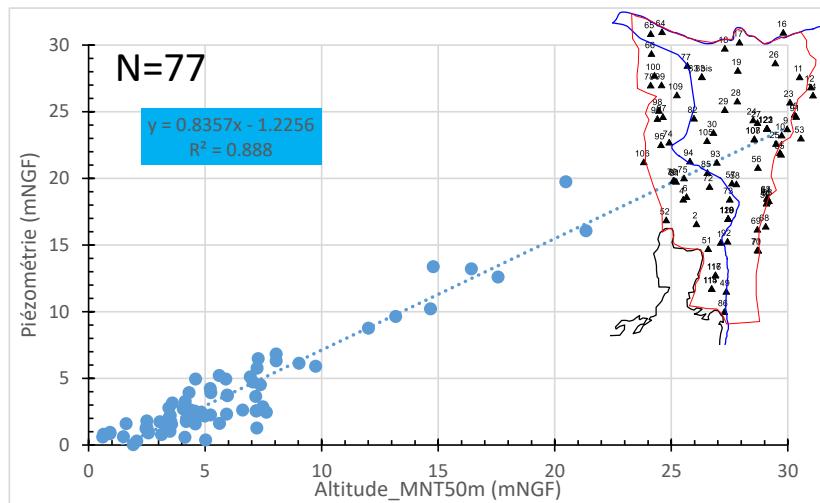


Illustration 44. Relation entre la piézométrie et l'altitude, piézométrie durant l'été 2019. MNT : modèle numérique de terrain. La carte montre les points qui ont été retenus pour l'analyse (n=78). La zone rouge correspond à la zone d'intérêt où le champ de transmissivité est évalué.

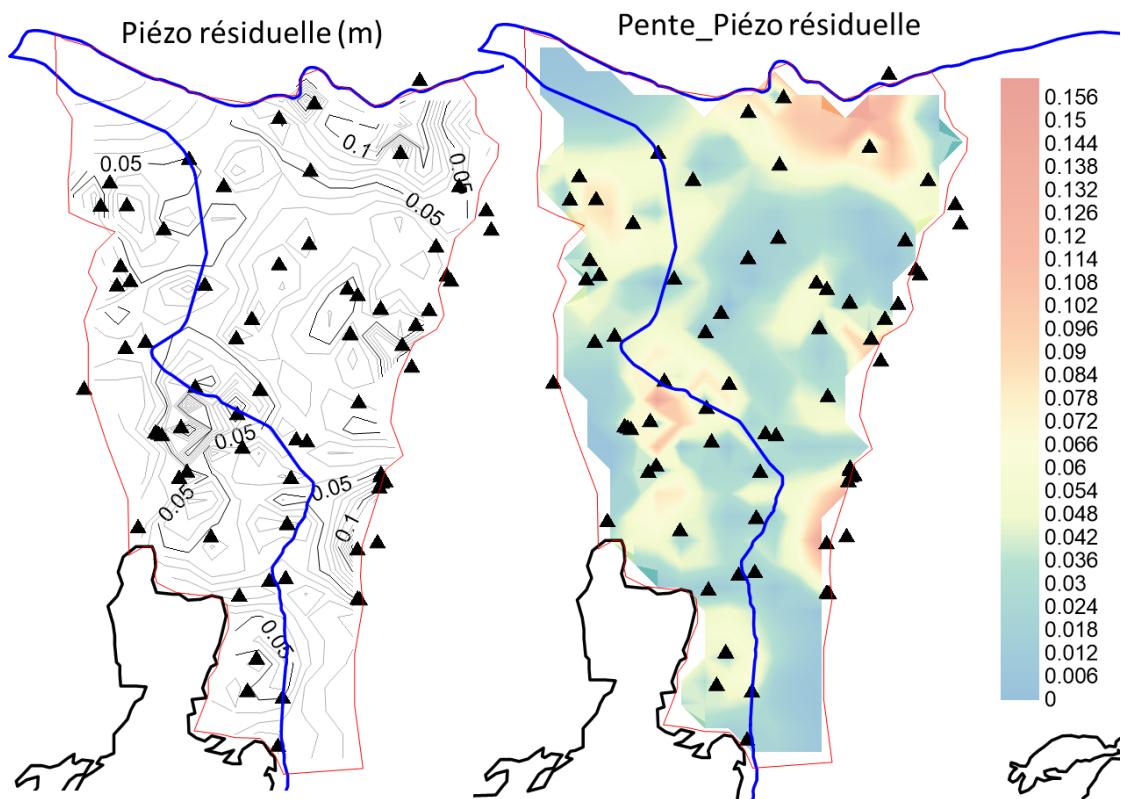


Illustration 45. Gauche, piézométrie résiduelle et gauche pente de la piézométrie résiduelle ; été 2019 (cellules de 500x500m). Triangles noirs : mesures ponctuelles de la piézométrie.

d) Régionalisation du champ de perméabilité

Suivant la procédure expliquée précédemment, la meilleure relation statistique entre les distributions de la transmissivité et de l'inverse de la pente de la piézométrie résiduelle est : $T_{\text{calc.}} = 5,8 \times 10^{-6} \times (1/\text{Pente}) - 5,2 \times 10^{-3}$, $T_{\text{calc.}}$ étant la transmissivité calculée à partir du rapport $(1/\text{Pente})$, avec un coefficient de corrélation entre les deux distributions de $r^2 = 0,09$ (Illustration 46). Le résultat est médiocre, et est a priori

lié à la faible qualité de la distribution des estimations locales de transmissivité (mesures ; Illustration 43) ; de fait la qualité de la carte de transmissivité déduite en est affectée. Bien qu'empirique, cette relation satisfait pour partie loi de Darcy car elle suppose une relation linéaire entre la transmissivité et le gradient. La constante, $-5,2 \times 10^{-3}$, faible au regard des autres paramètres, traduit le fait que certaines valeurs extrêmes n'ont pas pu être prises en compte (valeurs de gradient extrêmement faibles essentiellement). Ces valeurs extrêmes correspondent à moins de 16% de la surface de la zone. Ceci montre la limite de l'exercice lorsqu'il s'agit d'obtenir des valeurs de transmissivité sur des zones singulières très transmissives. Néanmoins la géométrie de ces zones pourra tout de même être évaluée.

La carte de transmissivité déduite de cette approche est présentée en Illustration 46. L'analyse variographique du log de la transmissivité (calculée) montre qu'elle est bien structurée dans l'espace (effet pépite de 17% de la variance totale, Illustration 46). La portée s'établit aux environs de 2 400 m montrant que les secteurs d'une transmissivité voisine couvrent des surfaces de l'ordre de quelques km². Les valeurs de transmissivité couvrent 4 ordres de grandeur (10^{-5} à 10^{-1} m²/s ; valeurs extrêmes) pour une valeur moyenne à l'échelle du bassin versant de $1,3 \times 10^{-3}$ m²/s. Même si cette carte n'a pas vocation à être exacte, elle permet d'identifier des secteurs plus perméables que d'autres.

Afin de confronter cette carte aux données de terrain, une validation a été menée en comparant les données locales de la carte (grille de 500x500 m) aux valeurs de transmissivité déduites d'essais hydrauliques (Illustration 47), soit 23 valeurs ; deux valeurs n'ont pas été retenues puisqu'en dehors de la zone d'étude. Cette analyse montre que dans 30% des cas l'erreur est moins de 20% soit une estimation de la carte à $\pm 0,36$ en LogT et que dans 52% des cas l'erreur est moins de 40% soit une estimation de la carte à $\pm 0,54$ en LogT. Ces résultats montrent que la carte de transmissivité déduite est de qualité approximative, elle reproduit probablement bien les géométries des secteurs les plus transmissifs et des moins transmissifs, par contre les valeurs estimées en un point ne sont pas très fiables et sont représentatives, au mieux, de l'ordre de grandeur de la transmissivité locale.

La carte Illustration 45 montre des secteurs plus perméables (couleurs chaudes) en particulier autour de l'actuel Robine. Si l'on s'en réfère aux travaux de Verdeil, 1970, ce secteur correspond à l'ancien cours de l'Aude (N-S), associé à des dépôts sédimentaires plus grossier (probablement localement de type paléochenal). Notons que l'actuel tracé W-E de l'Aude apparaît également plus perméable, en lien avec les dépôts sédimentaires de l'Aude au cours des derniers siècles.

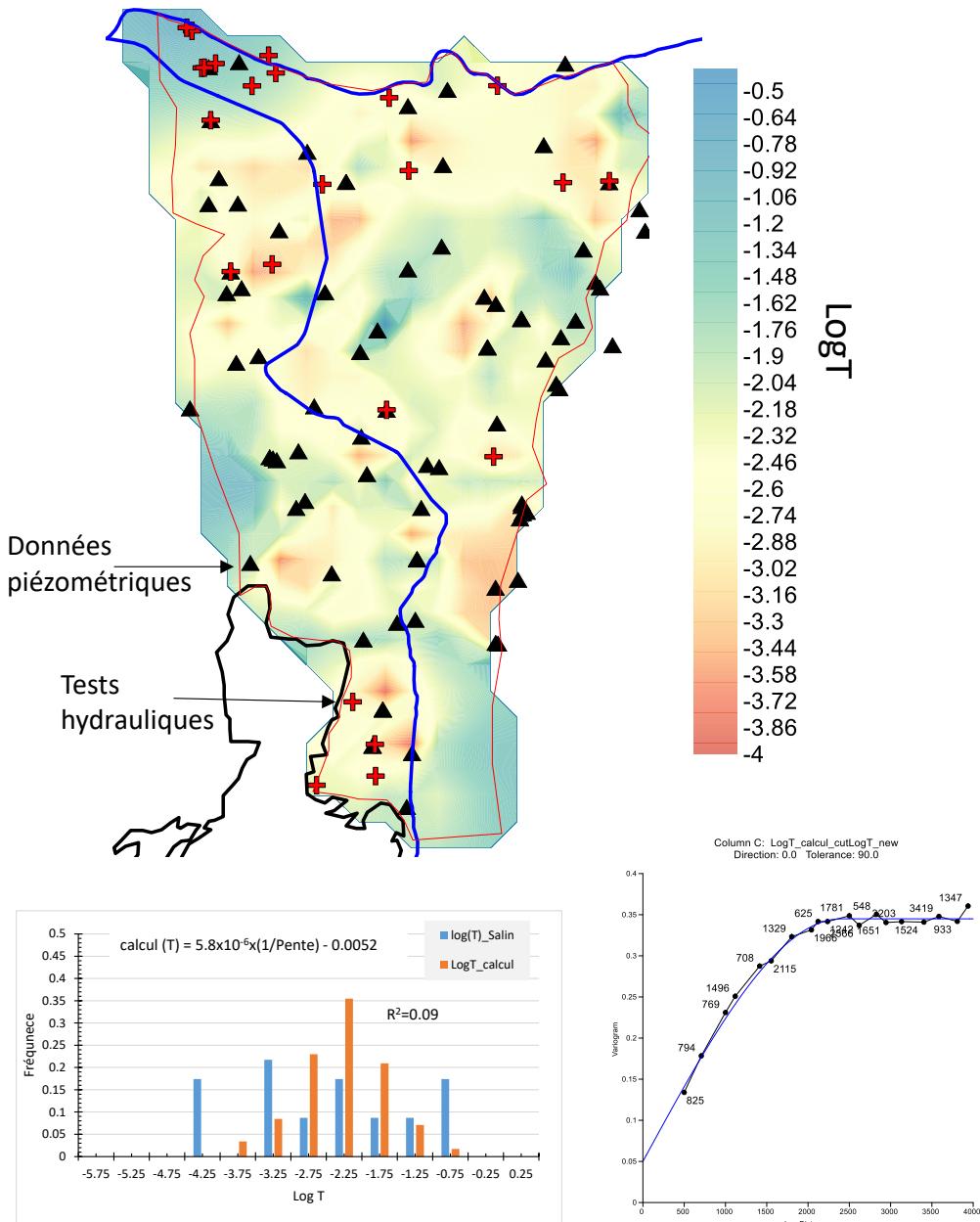


Illustration 46. Carte de transmissivité en Log calculée à partir de la piézométrie de l'été 2019 (cellules de 500x500m).

Haut : carte (LogT). Triangles noirs : mesures ponctuelles piézométriques, croix rouges : valeurs de transmissivité locale déduites de type hydraulique. Bas-gauche : établissement de la meilleure relation statistique entre les deux distributions (LogT_salin : transmissivité en Log de l'aquifère de la plaine (mesures), LogT_calcul : transmissivité en Log calculée à partir du ratio [1/Pente], $r^2=0,09$. Bas-droite : variogramme du Log de la transmissivité calculée (modèle : sphérique, variance : 0,295 portée : 2 400 m, pépite : 0,05).

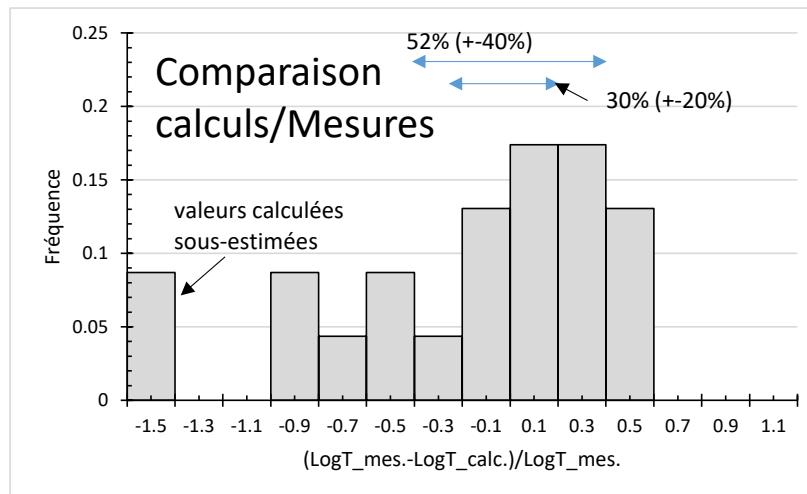


Illustration 47. Comparaison entre les valeurs locales estimées par la carte ($\text{Log}T_{\text{calc.}}$) et les estimations locales de transmissivité faites à partir de tests hydrauliques ($\text{Log}T_{\text{mes.}}$).

4.5. FLUX AUX LIMITES DE L'AQUIFERE DU QUATERNaire ET AU NIVEAU DE L'AUDE ET DU CANAL DE LA ROBINE

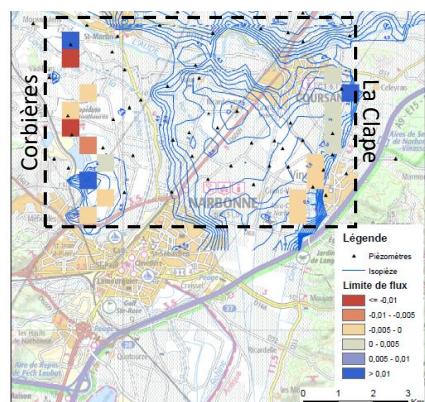
4.5.1. Flux aux limites des aquifères

Les flux entrants et sortants en limites des aquifères ont été calculés à l'aide des cartes piézométriques et de la carte de transmissivité précédemment établie en appliquant la loi de Darcy. Les flux >0 indiquent des flux entrants aux limites de l'aquifère et les flux <0 indiquent des flux sortants aux limites de l'aquifère.

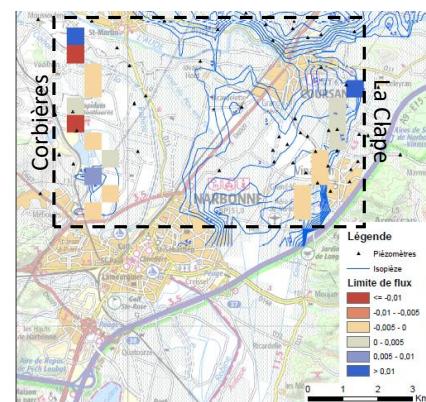
Notons, que les valeurs de flux calculées sont à considérer avec beaucoup de précaution puisque les cartes piézométriques ne sont pas fiables sur toute la plaine, en particulier en limite d'aquifère (par ex. au Sud), et que la carte de transmissivité déduite (cf. paragraphe précédent) n'est pas d'une grande fiabilité. Ces estimations sont donc entachées d'une forte incertitude. On s'attachera donc plus à leurs évolutions dans le temps et leurs ordres de grandeur qu'à leurs valeurs propres. Les cartes ci-dessous (Illustration 48) présentent ces calculs pour les années 1960, l'été 2019, l'hiver 2021 et l'été 2021.

L'Illustration 49 montre qu'entre l'été 2019 (étiage) et l'été 2021, il n'y a quasiment pas de différence entre les évaluations de flux. D'après ces calculs, les Corbières et le massif de la Clape alimentent l'aquifère de la plaine d'environ **1,7 Mm³/an** et **4,0 Mm³/an** respectivement (flux déduit de la somme des flux entrant et sortant). Les flux estimés en 2019-2021 sont comparés à ceux estimés durant les années 1960 pour la partie Nord de la plaine (Illustration 50). Ils sont similaires, montrant, à partir de ces données, qu'il n'y a pas eu d'évolution significative de flux dans la partie Nord de la plaine. Au niveau de l'étang, le flux d'eau souterraine est sortant, indiquant un flux d'eaux vers l'étang et/ou dans l'aquifère sous l'étang. A partir des données disponibles, ce flux d'eau vers l'étang est estimé à **5,3 Mm³/an** (données été 2019, hiver 2021 et été 2021, Illustration 49).

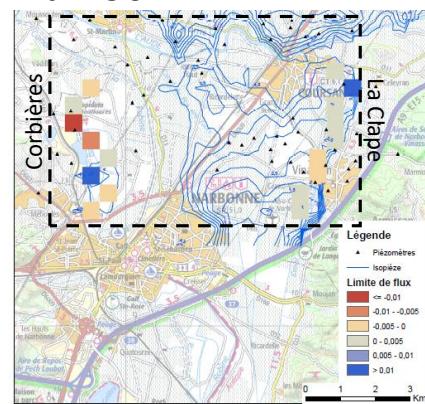
Octobre 1961



Février 1962



Mai 1962



Légende

▲ Piezomètres

— Isopiezé

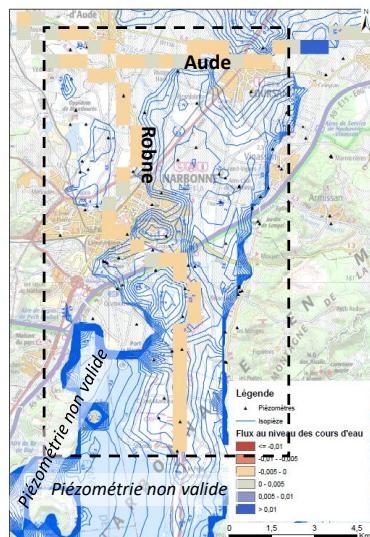
Limité de flux

≤ -0.01	Flux <0: sortant de l'aquifère
$-0.01 - -0.005$	
$-0.005 - 0$	

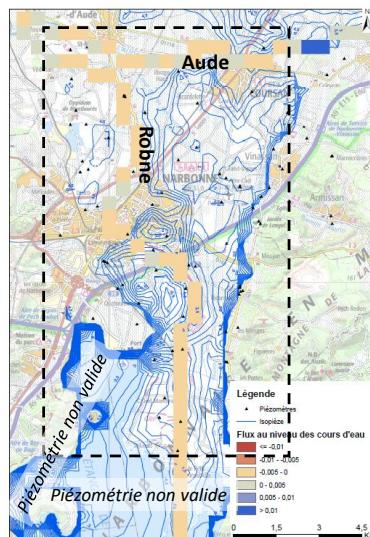
$0 - 0.005$	Flux >0: entrant dans l'aquifère
$0.005 - 0.01$	
> 0.01	

— Zone de calcul des flux

Eté 2019



Hiver 2021



Eté 2021

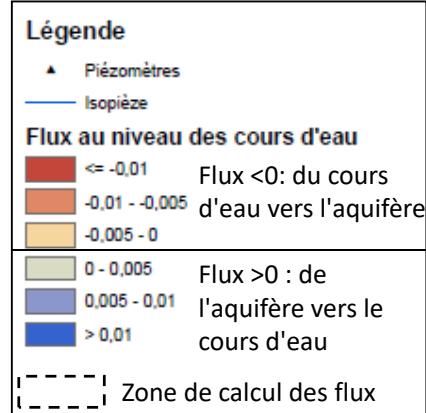
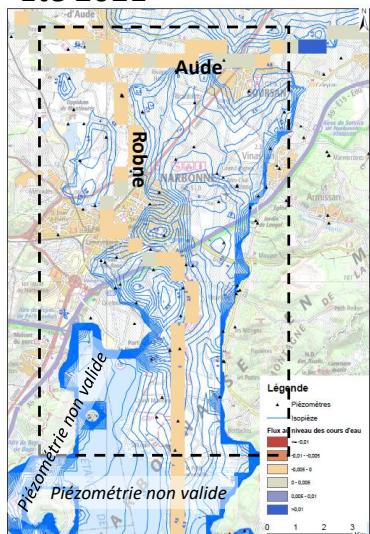


Illustration 48. Calculs des flux entrants et sortants (en m^3/s) aux limites de l'aquifère du Quaternaire. Années 1960, été 2019, hiver 2021 et été 2021.

Sont également représentés les cartes piézométriques et les points qui ont servi à leur établissement ; ces informations permettent de juger de la qualité des calculs de flux.

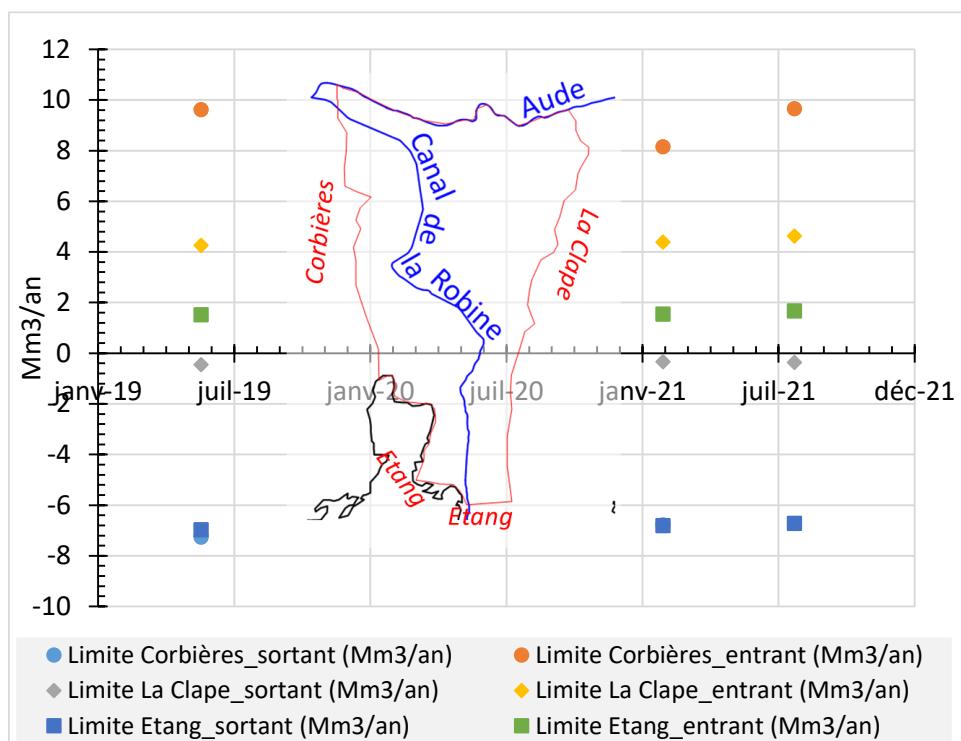


Illustration 49. Comparaison des calculs de flux entrant et sortant de la plaine au niveau des Corbières, du massif de la Clape et de l'étang (été 2019, hiver 2021 et été 2021).

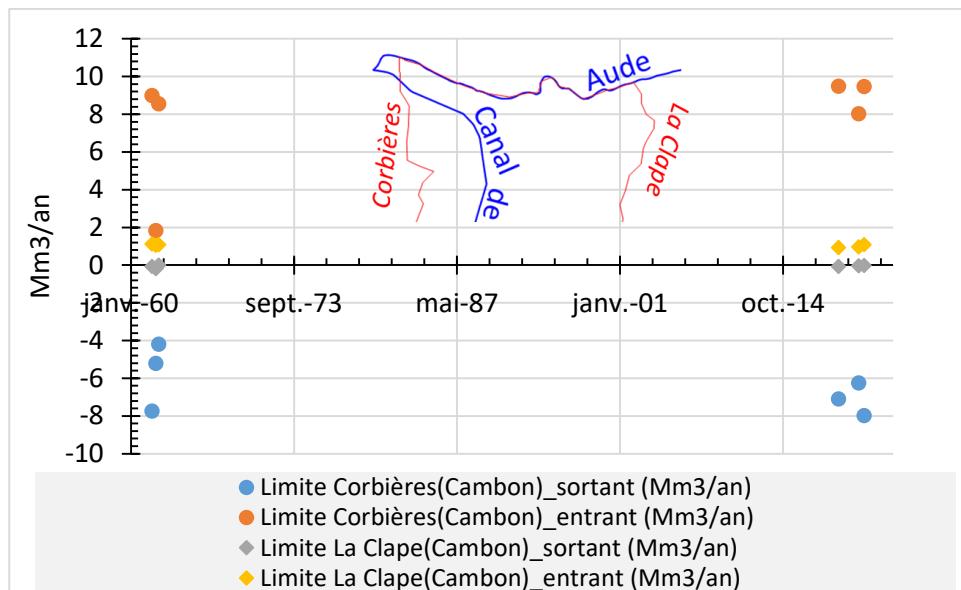


Illustration 50. Comparaison des calculs de flux entrant et sortant dans la partie nord de la plaine au niveau des Corbières et du massif de la Clape (années 1960, été 2019 et hiver 2021).

	Limite Corbières_sortant (Mm³/an)	Limite Corbières_entrant (Mm³/an)	Limite La Clape_sortant (Mm³/an)	Limite La Clape_entrant (Mm³/an)	Limite Etang_sortant (Mm³/an)	Limite Etang_entrant (Mm³/an)
juin-19	-7.27	9.6	-0.46	4.3	-6.98	1.51
févr-21	-6.79	8.1	-0.35	4.4	-6.82	1.54
juil-21	-8.20	9.64	-0.37	4.62	-6.72	1.66

	Limite Corbières(Carbon)_sortant (Mm3/an)	Limite Corbières(Carbon)_entrant (Mm3/an)	Limite La Clape (Carbon)_sortant (Mm3/an)	Limite La Clape (Carbon)_entrant (Mm3/an)
juin-19	-7.09	9.50	-0.06	0.94
févr-21	-6.23	8.04	-0.02	0.98
juil-21	-7.96	9.48	-0.01	1.09
01/10/1961	-7.74	9.01	-0.06	1.13
01/02/1962	-5.20	1.84	-0.17	1.06
01/05/1962	-4.18	8.56	0.00	1.10

Illustration 51. Estimations des flux entrant et sortant au niveau de l'aquifère du Quaternaire de la Plaine de Narbonne (2019, 2021 et années 1960).

Haut : flux entrant et sortant de la plaine au niveau des Corbières, du massif de la Clape et de l'étang (été 2019, hiver 2021 et été 2021), bas : flux entrant et sortant dans la partie nord de la plaine au niveau des Corbières et du massif de la Clape (années 1960, été 2019, hiver 2021 et été 2021).

4.5.2. Flux au niveau de l'Aude et du canal de la Robine

Les flux entrant et sortant au niveau de l'Aude et du canal de la Robine ont été calculés à l'aide des cartes piézométriques et de la loi de Darcy.

Le calcul des flux est réalisé en considérant un flux vertical sous le cours d'eau suivant le schéma de l'Illustration 52. Dans ce cas on suppose, car la largeur du cours d'eau est grande devant sa profondeur, que les flux horizontaux sont négligeables. L'équation qui donne l'estimation du flux est :

$$\text{Flux}_{\text{vertical}} = (Pz_2 - Pz_1) * b * k'' / b'' * L;$$

Où, Pz1 et Pz2 sont les niveaux piézométriques (Pz1=charge du cours d'eau⁴; Pz2: charge dans l'aquifère ; en m), b la largeur du cours d'eau (m), k'' (m/s) et b'' (m) respectivement la perméabilité verticale et l'épaisseur du lit du cours d'eau et L la longueur du cours d'eau (m). L vaut 500 m conformément au maillage utilisé pour la réalisation des cartes piézométriques. Cependant, afin ne pas avoir une valeur erronée et exagérée de variation piézométrique (Pz1-Pz2), car les cartes ont été établies sur grille de 500x500 m et que les cours d'eau ne sont larges de quelques dizaines de mètres en moyenne, une linéarisation de la piézométrie dans l'aquifère a été réalisée afin d'avoir une valeur approchée au niveau du cours d'eau. L'équation précédente devient :

$$\text{Flux}_{\text{vertical}} = (\Delta Pz_{\text{lin}}) * b * k'' / b'' * L$$

avec $\Delta Pz_{\text{lin}} = (Pz_2 - Pz_1) * (b/2) / L$ (cf. Théorème de Thalès).

Les flux au niveau des cours d'eau indiquent si l'aquifère draine ou est drainé par le cours d'eau. Les flux >0 indiquent des flux d'alimentation du cours d'eau par la nappe et les flux <0 indiquent des flux d'alimentation de la nappe par le cours d'eau. Pour les besoins du calcul la largeur des cours d'eau (b) a été fixée constante à l'échelle de la plaine, elle est de 50 m pour l'Aude et de 17,5 m pour la Robine.

Il existe peu de données sur la perméabilité du lit de l'Aude et de la Robine. Seule la réinterprétation d'un essai par pompage réalisé sur le puits de pompage AEP de Coursan (n° BSS : 10396X0075/F2) situé à environ 80 m de l'Aude a permis de faire une estimation de ce paramètre, k'' : 4×10^{-6} m/s, ce qui correspond à environ 50-100 fois moins que la perméabilité moyenne de l'aquifère du Quaternaire. L'annexe présente la réinterprétation de cet essai qui a permis à aboutir à cette valeur. Dans les calculs qui suivent, faute d'avoir plus d'information sur la variation spatiale de ce paramètre, cette valeur est supposée identique sur le long

⁴ Rappelons que les cartes piézométriques ont été construites en les contraignant par les cours d'eau, donc la valeur du niveau piézométrique au niveau du cours d'eau égale, nécessairement, la côte de ce dernier.

de l'Aude et du canal de la Robine. L'épaisseur du lit du cours d'eau (b'') est supposée constante dans les deux cas, égale à 1 m.

Comme dans les calculs précédents, notons que les valeurs de flux calculées sont à considérer avec beaucoup de précaution puisque les cartes piézométriques ne sont pas fiables sur toute la plaine, et qu'elles sont assujetties aux valeurs assignées aux paramètres hydrodynamiques (k'' , b'' , b) et à la modalité du calcul (flux verticaux négligés). Ces estimations sont donc entachées d'une forte incertitude. On s'attachera donc plus à leurs évolutions et aux ordres de grandeur qu'à leurs valeurs propres. Les cartes ci-dessous (Illustration 53**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) présentent ces calculs pour les années 1960, l'été 2019, l'hiver 2021 et l'été 2021, et l'Illustration 54 l'évolution de ces flux depuis les années 1960.

Au niveau de l'Aude, on note depuis les années 1960, assez peu de différences entre les flux de l'aquifère alimentant le cours d'eau, de l'ordre de 0,1-0,2 Mm³/an. Par contre les flux de l'Aude alimentant l'aquifère semblent avoir diminué, de l'ordre de 1 Mm³/an dans les années 1960 à 0,6 Mm³/an aujourd'hui. Cette baisse peut être un artefact expliqué par des cartes piézométriques moins précises au niveau de l'Aude en 2019 et 2021, mais aussi par des conditions piézométriques d'étiage plus prononcés en 2019/2021 (très peu de pluie durant l'hiver 2021) comparée à celle des années 1960. **Aujourd'hui, en moyenne, l'Aude, d'après ces calculs alimente la nappe d'un flux de 0,4 Mm³/an.** Pour le canal de la Robine, les estimations faites (partie commune des années 1960) entre 1960 et aujourd'hui sont très comparables : flux de l'aquifère alimentant le cours d'eau, de l'ordre de 0,2 Mm³/an et flux de la Robine alimentant la nappe de l'ordre de 0,3 Mm³/an. D'après ces estimations il semble que dans sa partie amont, la Robine soit en partie alimentée par la nappe ce qui n'est pas le cas plus en aval où la Robine alimente systématiquement la nappe. A l'échelle de la plaine et en moyenne, le Canal de la Robine (tout son linéaire), d'après ces calculs, alimenterait la nappe d'un flux de 0,6 Mm³/an (somme des flux entrants et sortants).

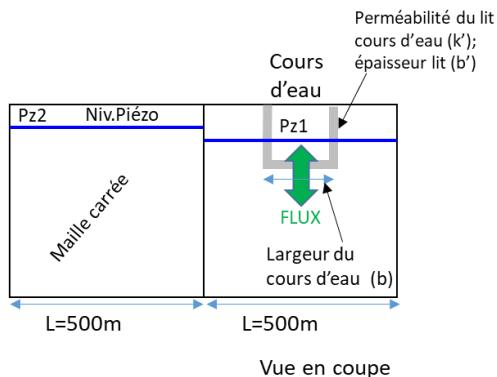
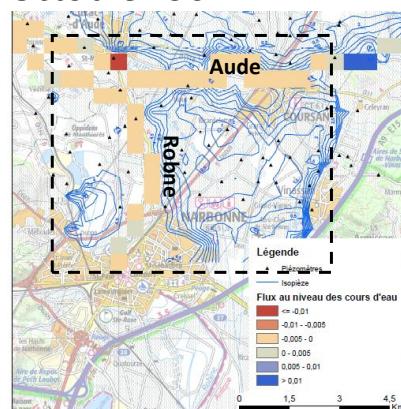
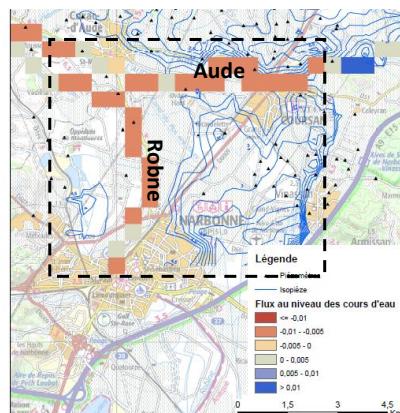


Illustration 52. Schéma de calcul pour les flux sous les cours d'eau. Ici les flux horizontaux sont négligés.

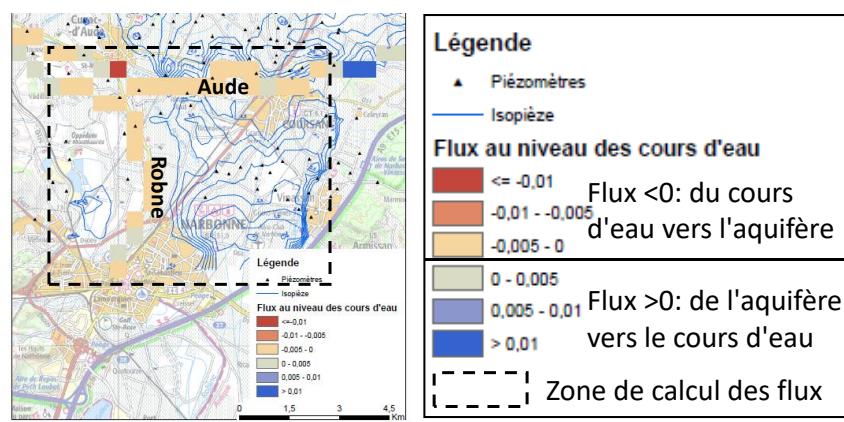
Octobre 1961



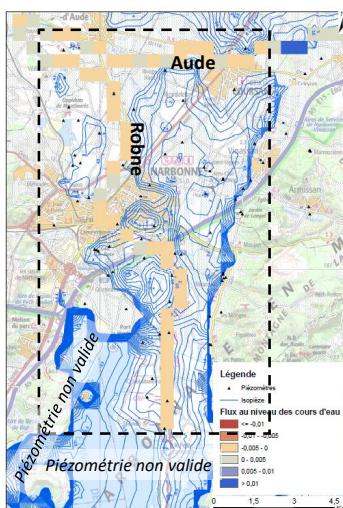
Février 1962



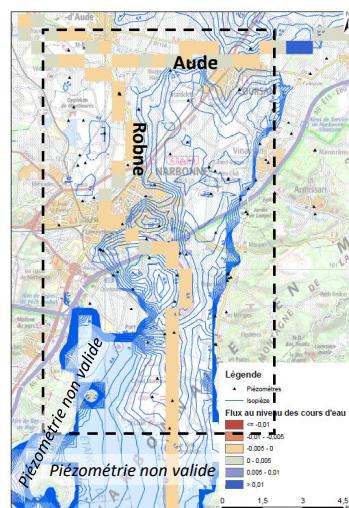
Mai 1962



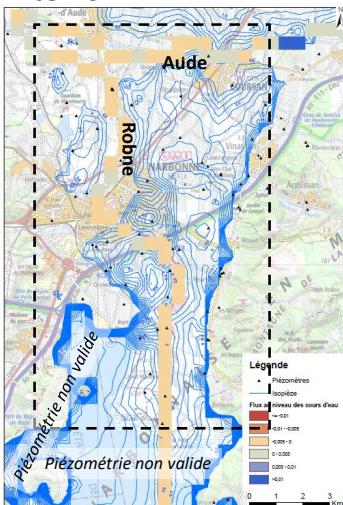
Eté 2019



Hiver 2021



Eté 2021

**Légende**

- ▲ Piézomètres
- Isopiezies

Flux au niveau des cours d'eau

$\leq -0,01$	Flux <0: du cours d'eau vers l'aquifère
-0,01 à -0,005	
-0,005 à 0	
0 à 0,005	Flux >0 : de l'aquifère vers le cours d'eau
0,005 à 0,01	
> 0,01	

Zone de calcul des flux

Illustration 53. Cartes des flux entrant et sortant (en m^3/s) au niveau de l'Aude et du canal de la Robine. Années 1960, été 2019 et hiver 2021.

Sont également représentés les cartes piézométriques et les points qui ont servi à leur établissement ; ces informations permettent de juger de la qualité des calculs de flux.

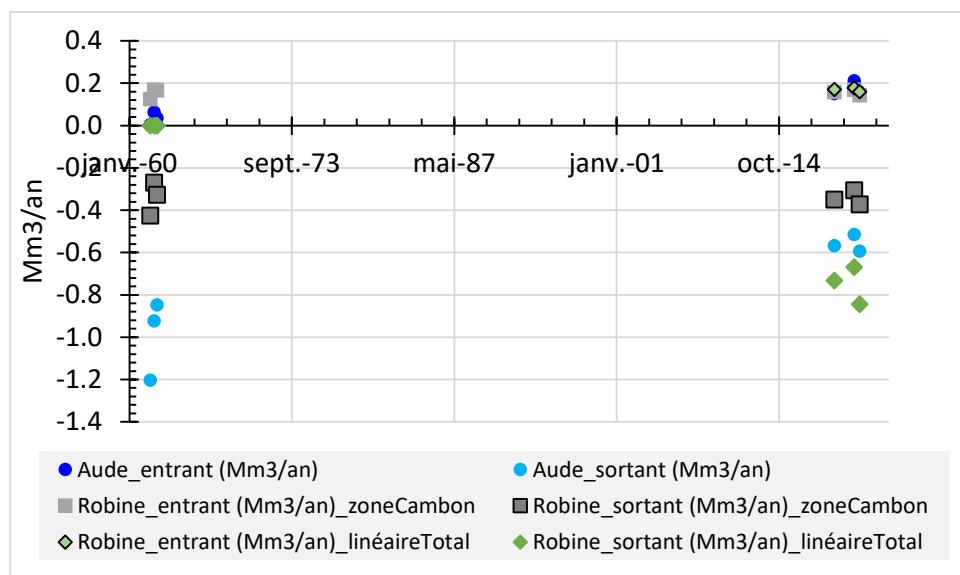


Illustration 54. Evolution des flux souterrains du Quaternaire au niveau des cours d'eau. Aude et canal de la Robine (en Mm³/an).

Flux sortant : le cours d'eau alimente la nappe, flux entrant : la nappe alimente le cours d'eau.

	Aude_entrant (Mm ³ /an)	Aude_sortant (Mm ³ /an)	Robine_entrant (Mm ³ /an)_linéaireTotal	Robine_sortant (Mm ³ /an)_linéaireTotal	Robine_entrant (Mm ³ /an)_zoneCambon	Robine_sortant (Mm ³ /an)_zoneCambon
01/06/2019	0.2	-0.6	0.2	-0.7	0.2	-0.3
01/02/2021	0.2	-0.5	0.2	-0.7	0.2	-0.3
25/07/2021	0.2	-0.6	0.2	-0.8	0.1	-0.4
	Aude_entrant (Mm ³ /an)	Aude_sortant (Mm ³ /an)	Robine_entrant (Mm ³ /an)_linéaireTotal	Robine_sortant (Mm ³ /an)_linéaireTotal	Robine_entrant (Mm ³ /an)	Robine_sortant (Mm ³ /an)
01/10/1961	0.0	-1.2	-	-	0.1	-0.4
01/02/1962	0.1	-0.9	-	-	0.2	-0.3
01/05/1962	0.0	-0.8	-	-	0.2	-0.3
Flux entrant= de l'aquifère vers le cours d'eau						
Flux sortant= du cours d'eau vers l'aquifère						

Illustration 55. Flux souterrains entrant et sortant au niveau de l'Aude et du canal de la Robine. Années 1960, été 2019, hiver 2021 et été 2021.

4.5.3. Conclusions

Ainsi, il faut retenir de l'estimation des flux aux limites de l'aquifère et au niveau de l'Aude et du canal de la Robine que les calculs présentés sont assujettis une incertitude assez forte qui dépend de la qualité des cartes piézométriques, et des paramètres hydrodynamiques de l'aquifère et des berges de l'Aude et du canal de la Robine qui ont été prescrits dans les calculs. Ils sont donc à manipuler avec beaucoup de précaution.

Les ordres de grandeur montrent que :

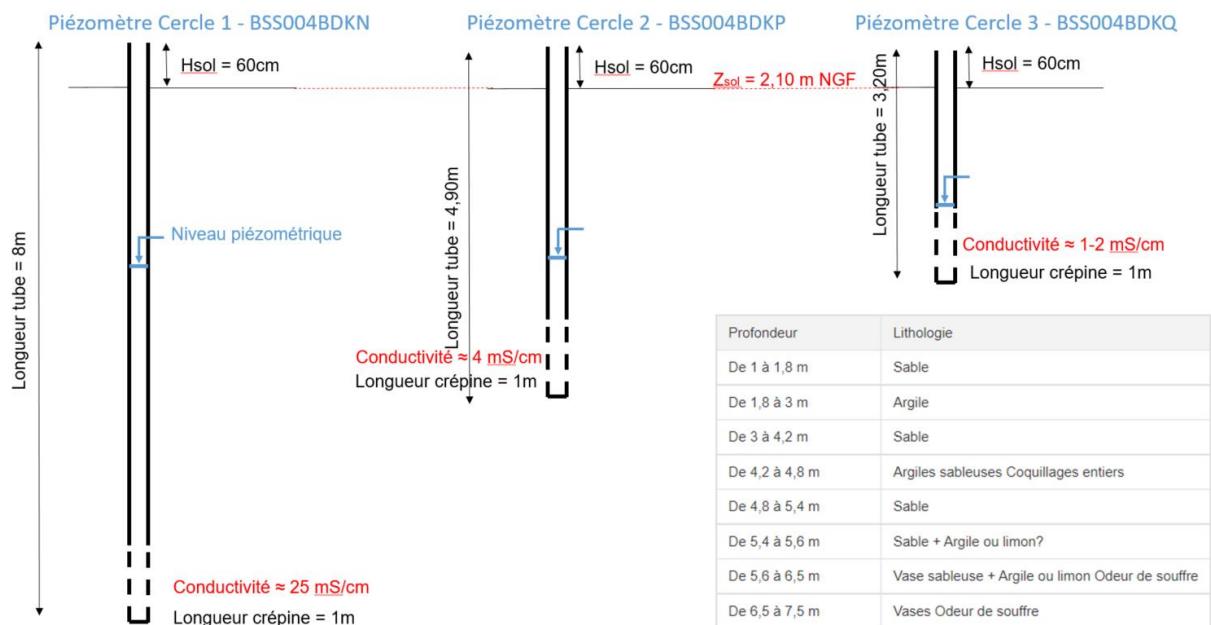
- sur les secteurs communs à la thèse de Cambon réalisée dans les années **1960**, il n'y a pas de forte différence sur les flux aux limites de l'aquifère, la contribution de l'alimentation de la Robine (pour la partie commune) est similaire. **Seules les valeurs pour l'alimentation par l'Aude sont plus fortes**, ce qui peut être lié à des conditions hydrologiques différentes, mais aussi à des cartes piézométriques moins précises à proximité de l'Aude en 2019-2021, néanmoins les valeurs calculées sont du même ordre de grandeur,

- les flux alimentant l'aquifère de la plaine par les **Corbières et le massif de la Clape sont, d'après ces calculs, de l'ordre de 1,7 et 4,0 Mm³/an** respectivement,
- les flux alimentant l'aquifère de la plaine par l'Aude et le canal de la Robine sont, d'après ces calculs **de 0,4 Mm³/an pour l'Aude et de 0,6 Mm³/an pour le canal**,
- **les flux sortants de l'aquifère vers l'étang**, et/ou l'aquifère sous l'étang sont de l'ordre de **5,3 Mm³/an**,
- Ces estimations sont à comparer aux **volumes prélevés pour l'AEP** (AEP Coursan (env. 0,3 Mm³/an), AEP Moussoulens (env. 6,0 Mm³/an) et AEP Cuxac (env. 0,3 Mm³/an)), totalisant environ **6,6 Mm³/an**, données Grand-Narbonne,
- dans ces termes de bilan, ni la recharge de l'aquifère par les précipitations, ni la recharge induite par les submersions de parcelles, ni l'infiltration par le réseau de petits canaux et ni les volumes prélevés par les pompages agricoles et industriels ne sont pris en compte.

5. Fonctionnement en période de submersion

5.1. PRÉSENTATION DU SUIVI SUR LES DEUX PARCELLES EXPÉIMENTALES DU CERCLE ET DE GRANDS-VIGNES (GV)

Deux parcelles viticoles expérimentales ont été équipées afin de comprendre le fonctionnement à l'échelle de la parcelle en période de submersion. Il s'agit des parcelles dites du Cercle et de Grands-Vignes. Pour mémoire elles sont localisées dans l'Illustration 22. Elles comprennent chacune un dispositif en flûte de pan composé de 3 piézomètres étagés (voir représentation schématique Illustration 56) profonds à Grands-Vignes de 7,80, 4,50 et 2 m et au Cercle de 7,4, 4,3 et 2,60 m. Ces piézomètres sont crépinés sur le dernier mètre de l'ouvrage. Ces ouvrages sont équipés de sonde de mesures en continu au pas de temps horaire de la conductivité électrique, la température et du niveau.



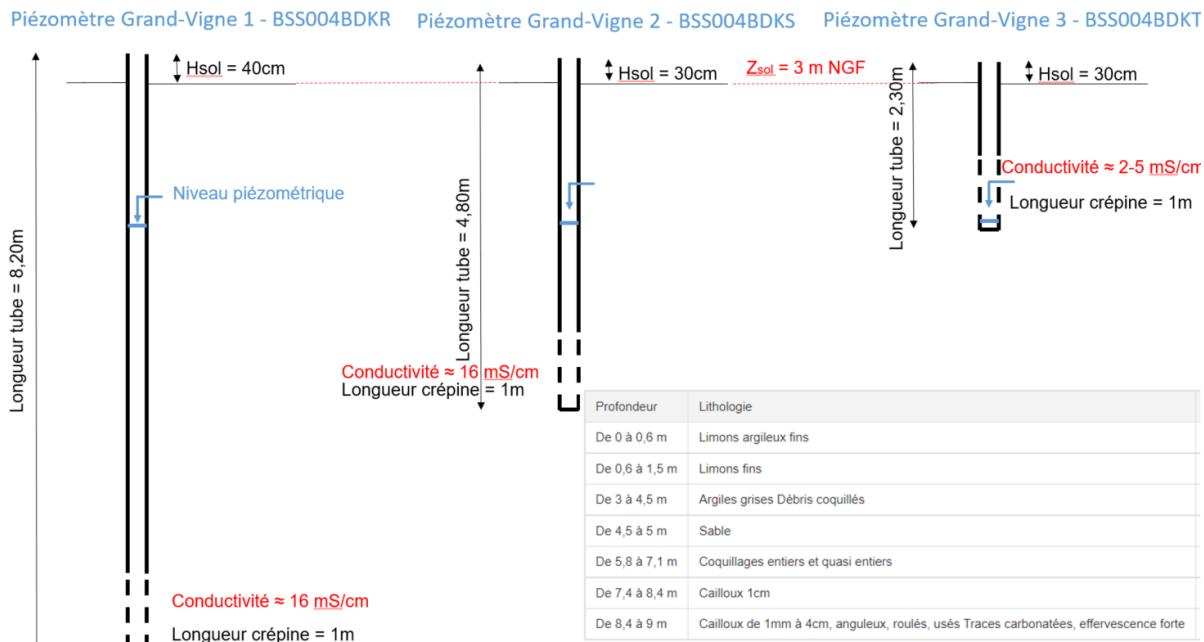


Illustration 56. Représentation schématique et log géologique des piézomètres en flûte de pan réalisés sur les parcelles expérimentales du Cercle et de Grands-Vignes.

Les terrains rencontrés lors de la foration ont révélé la présence de niveaux aquifères séparés par des niveaux argileux peu perméables. Les piézomètres étagés permettent ainsi de suivre des nappes superposées partiellement isolées les unes des autres. L'aquifère quaternaire de la plaine de la narbonnaise est en effet un aquifère dit « multi-couche ».

Lors des submersions des parcelles une sonde autonome de type CTD (Conductivité, Température, Depth/Profondeur) disposée dans le fossé de drainage vient compléter le dispositif de suivi.

5.2. CARACTERISATION DES DIFFERENTES NAPPES AU COURS DE L'ETE 2021

Sur les 2 parcelles, les suivis présentés sur la période estivale montrent que les niveaux piézométriques sont proches sur les différents horizons captés et qu'ils évoluent de façon synchrone (Illustration 57). La chronique complète n'est pas présentée afin de focaliser sur les épisodes de submersion. Cette dernière révèle sur l'ensemble du cycle hydrologique la relative homogénéité de la piézométrie sur les 3 niveaux suivis.

La période estivale 2021 a été caractérisée par une absence de précipitation. L'évolution de la piézométrie devrait donc refléter le tarissement de la nappe. Des hausses piézométriques importantes sont cependant observées. Elles correspondent à des périodes d'irrigation ou de submersion de parcelles agricoles. Trois de ces périodes ont ainsi été suivies, deux sur la parcelle du Cercle en juin et juillet et une sur la parcelle Grands-Vignes en août.

Sur la parcelle Grands-Vignes, deux hausses piézométriques successives ont été observées début juin et fin juillet liées aux submersions de parcelles voisines. Seule la hausse piézométrique d'août correspond à la submersion de la parcelle. Notons que la hausse piézométrique de juin a été bien marquée sur les deux ouvrages les moins profonds (GV2 et GV3), l'augmentation a été moins importante sur GV1, le piézomètre le plus profond.

Que ce soit sur le secteur du Cercle ou de Grands-Vignes, les submersions sur les parcelles voisines engendrent des augmentations piézométriques sur l'ensemble du secteur.

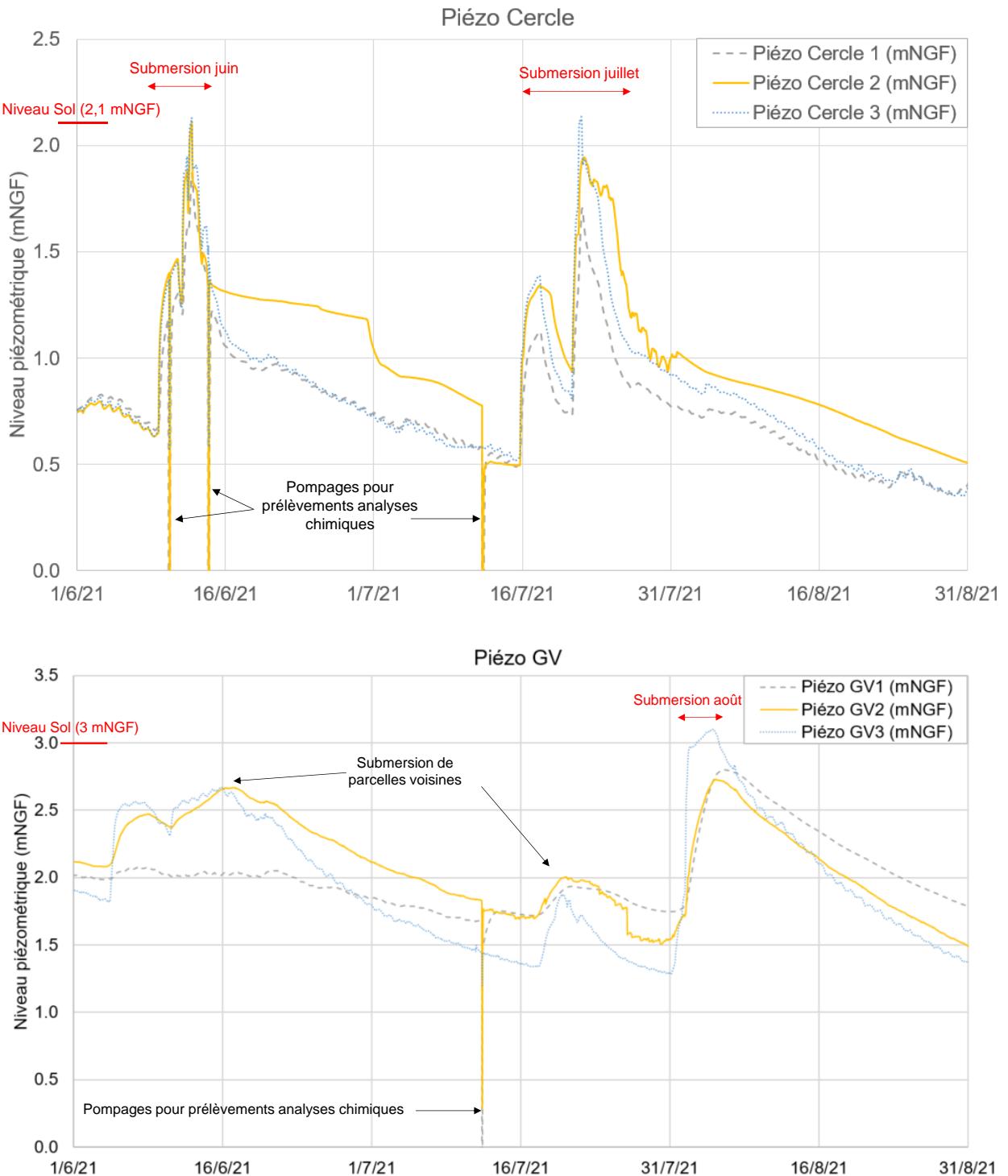


Illustration 57. Niveaux piézométriques sur les 3 piézomètres des parcelles du Cercle et de Grands-Vignes (été 2021).

Signalons également que plusieurs campagnes de prélèvements en vue de réaliser des analyses géochimiques et impliquant un pompage dans les ouvrages, ont été réalisées. Elles engendrent

une chute instantanée du niveau piézométrique. Ce dernier retrouve son niveau avant pompage quelques heures après le prélèvement.

Il y a également un artefact sur la mesure de conductivité des piézomètres profonds (GV1 et Cercle 1), suite aux pompages (Illustration 58). Les valeurs mesurées après pompage diffèrent de la valeur avant pompage. Il est probable que la sonde n'ait pas été remise en place exactement à la même profondeur, plaçant visiblement la sonde en dehors de la zone des crépines ou bien que l'eau qui arrive dans l'ouvrage suite au renouvellement ait des caractéristiques légèrement différentes.

Les prélèvements ont été envoyés pour analyse. Les résultats des analyses et leur interprétation seront fournis dans le rapport final du projet (année 3).

Concernant le suivi de la conductivité électrique, il permet de qualifier le type d'eau présent dans les différents horizons (Illustration 58). Ainsi, sur la parcelle du Cercle, la conductivité électrique est très forte sur l'horizon le plus profond (environ 7 m de profondeur), les valeurs sont comprises entre 25 et 33 mS/cm, relatant de la présence d'une eau salée en profondeur. Elles sont beaucoup plus faibles sur les horizons moins profonds (4 et 2 m de profondeur) avec respectivement des valeurs d'environ 5 et 2 mS/cm. La minéralisation est ainsi beaucoup plus faible sur l'horizon superficiel.

Sur la parcelle de Grands-Vignes, les minéralisations sont assez proches sur les 2 horizons les plus profonds (7 et 4 m) avec des valeurs de 15 à 16 mS/cm, relatant ainsi la présence d'une eau saumâtre en profondeur. Sur l'horizon superficiel (horizon capté entre 1 et 2 m de profondeur), la conductivité électrique évolue entre 2 et 6 mS/cm relatant la présence d'une eau moins minéralisée.

Ainsi, la minéralisation sur le secteur du Cercle est très forte en profondeur (7m) avec une conductivité électrique d'environ 25-33 mS/cm. Elle est moins forte mais reste significative sur les horizons 4 et 7 m à Grands-Vignes (15-16 mS/cm). Ces éléments montrent la présence d'une eau saumâtre à des profondeurs faibles (4-7 m). La nappe superficielle est quant à elle impactée par la présence de sel sur le secteur de Grands-Vignes avec des valeurs de 4 à 5 mS/cm une grande partie de l'été. Les valeurs plus faibles (1 à 2 mS/cm) sur la nappe superficielle du secteur du Cercle, montre que l'aquifère présente beaucoup moins de sel dans sa partie superficielle qu'en profondeur.

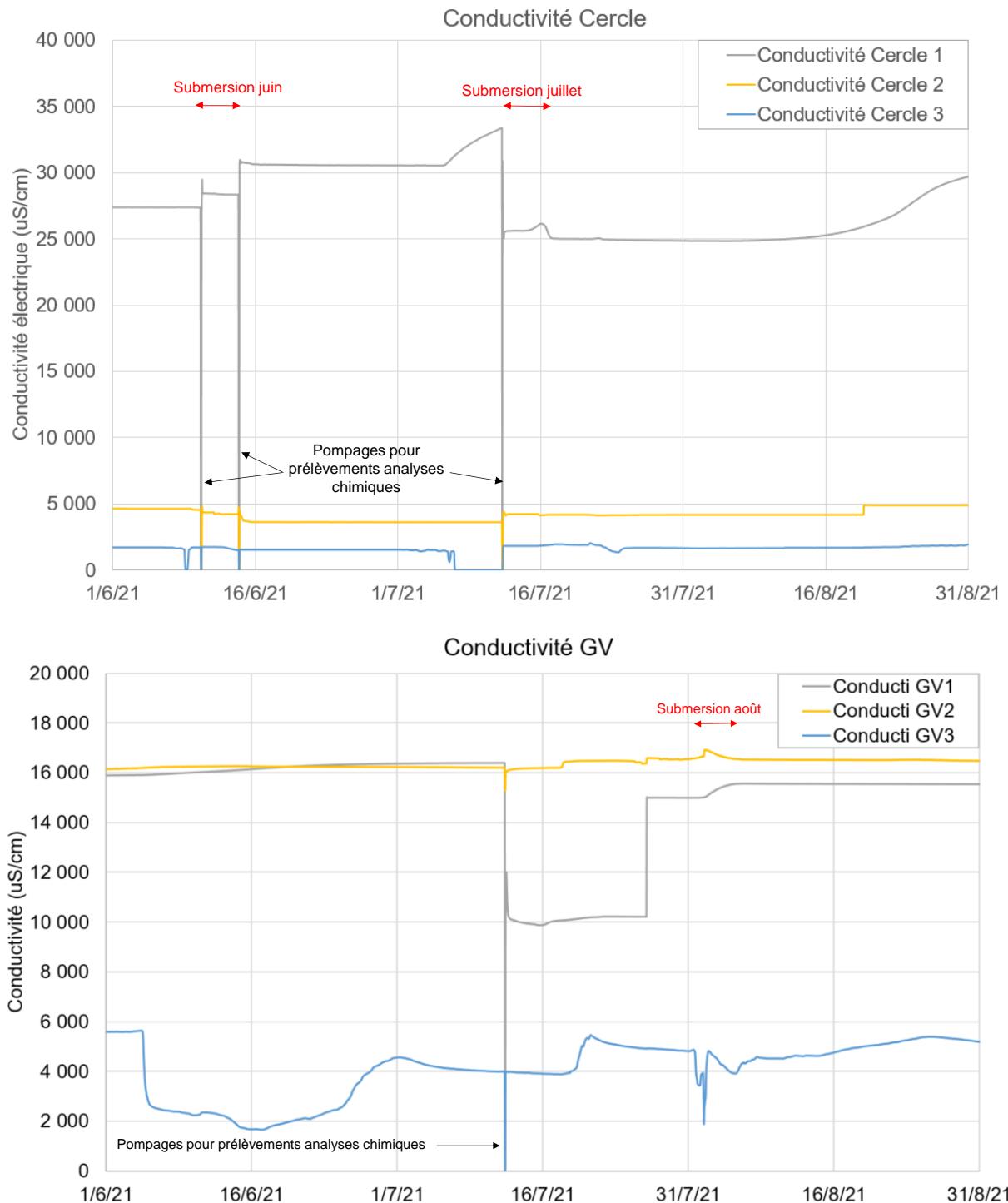


Illustration 58. Conductivité électrique sur les 3 piézomètres des parcelles du Cercle et de Grands-Vignes (été 2021).

Ces parcelles sont soumises à des épisodes de submersion, réalisée à partir d'un pompage dans les canaux d'irrigation (Robine pour le Cercle et un canal alimenté par le canal de Sainte Marie pour Grands-Vignes). L'eau utilisée provient de l'Aude, sa minéralisation est d'environ $600 \mu\text{S}/\text{cm}$. Les enregistrements réalisés sur ces 2 dispositifs expérimentaux permettent de caractériser les fonctionnements qui prennent place.

Lors de ces submersions, il a été vérifié que les conductivités électriques des 2 ouvrages les plus profonds réagissaient assez peu par rapport au piézomètre superficiel (n°3) (voir Illustration 59). A l'inverse, les amplitudes de variations piézométriques sont comparables. Ceci implique qu'il existe un transfert de pression au sein de cet aquifère multicouche mais que les apports d'eau douce en surface n'ont effet mesurable que sur l'horizon le plus superficiel. Le transfert de masse vers les niveaux profonds existe bien, mais il doit prendre plus de temps et être dilué. Au vu de ces éléments, par soucis de clarté, l'analyse et les graphiques ne prendront en compte que les données issues de piézomètres superficiels (n°3). Dans ce cadre, dans l'étude du fonctionnement lors des périodes de submersion, seul un focus sera réalisé sur les données issues de l'ouvrage le moins profond (n°3).

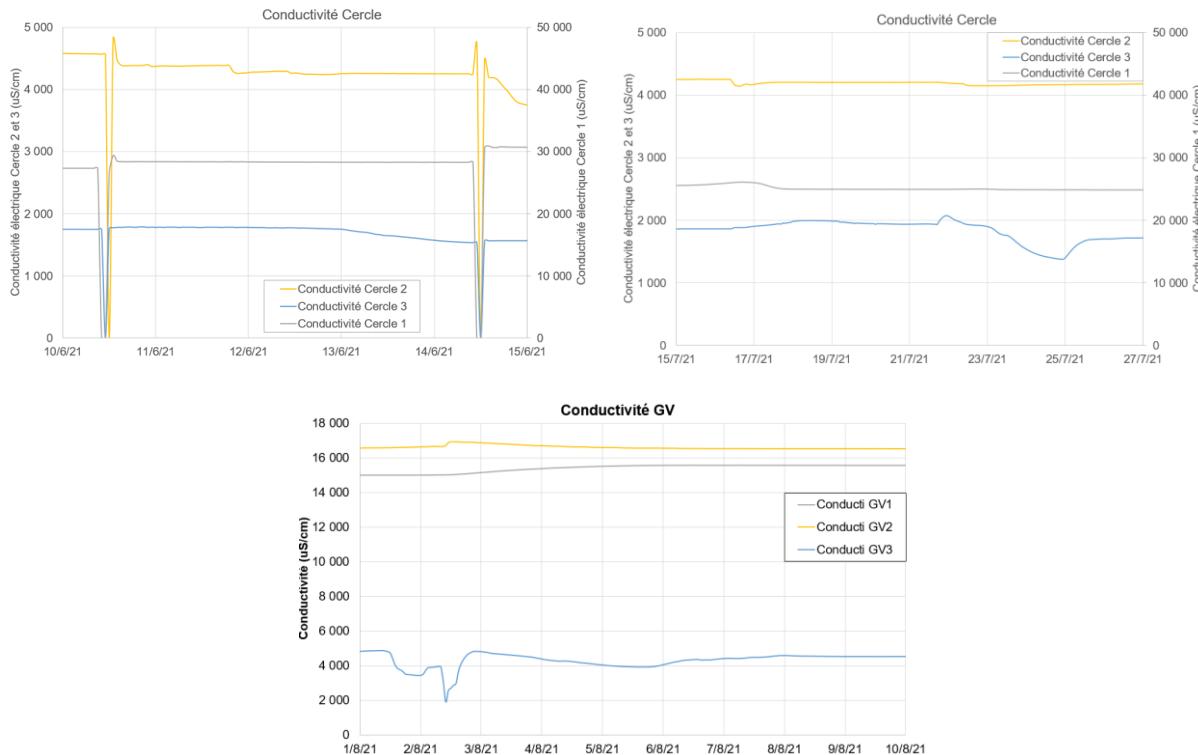


Illustration 59. Conductivité électrique sur les 3 nappes superposées lors des périodes de submersion sur les parcelles expérimentales du Cercle et de Grands-Vignes.

5.3. CARACTERISATION DU FONCTIONNEMENT LORS DES SUBMERSIONS DE LA PARCELLE

Les submersions vont ainsi être analysées séparément sur les deux parcelles.

5.3.1. Parcalle du Cercle, submersion de juin 2021

Le viticulteur propriétaire de la parcelle expérimental (superficie 1,9 Ha) est également propriétaire de la grande parcelle au Nord (2,4 Ha) et de la petite parcelle à l'Ouest (0,6 Ha). Ces parcelles sont localisées Illustration 60. Il réalise des submersions successives de ces 3 parcelles en utilisant l'eau de la Robine pompée à l'aide d'une pompe camarguaise. Le débit de cette pompe a été évalué sur le terrain à environ 120 l/s.

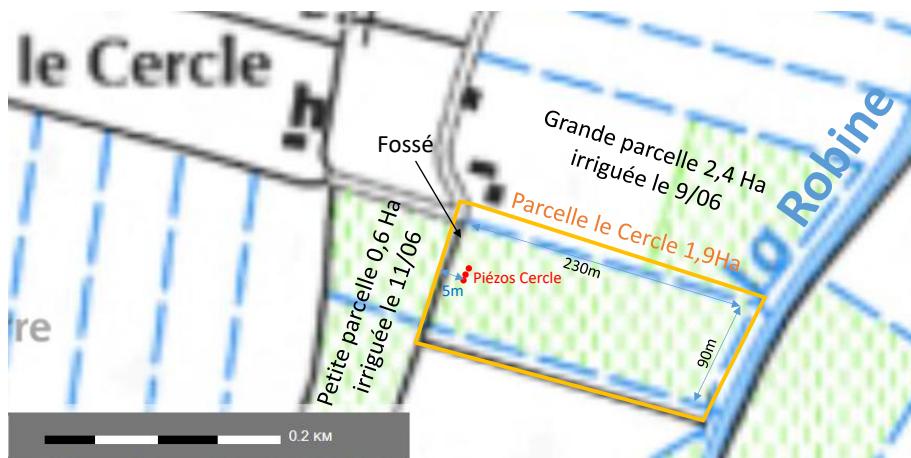


Illustration 60. Localisation des 3 parcelles du Cercle.

Lors de cette submersion le protocole a été le suivant :

- Submersion grande parcelle pendant 48h (démarrage le 9/06 8:00)
- Submersion petite parcelle pendant 13h (démarrage le 11/06 8:00)
- Submersion parcelle expérimentale pendant 9h (démarrage le 12/06 10:00)
- Le pompage a duré environ 70h au débit de 120 l/s, ce qui représente un volume de 30 000 m³ sur une superficie de près de 5 Ha, soit un volume de 6 000 m³/Ha.

Sur l'Illustration 61, les niveaux et la conductivité électrique mesurés sur le piézomètre superficiel (Cercle 3) et dans le fossé sont présentés. L'altitude du sol et du fond du fossé sont respectivement de 2,1 et 1,1 m. Le fossé est ainsi profond d'environ 1m. Pendant toute la submersion, le fossé d'évacuation est fermé (palplanche) permettant de conserver l'eau douce issue du canal d'irrigation.

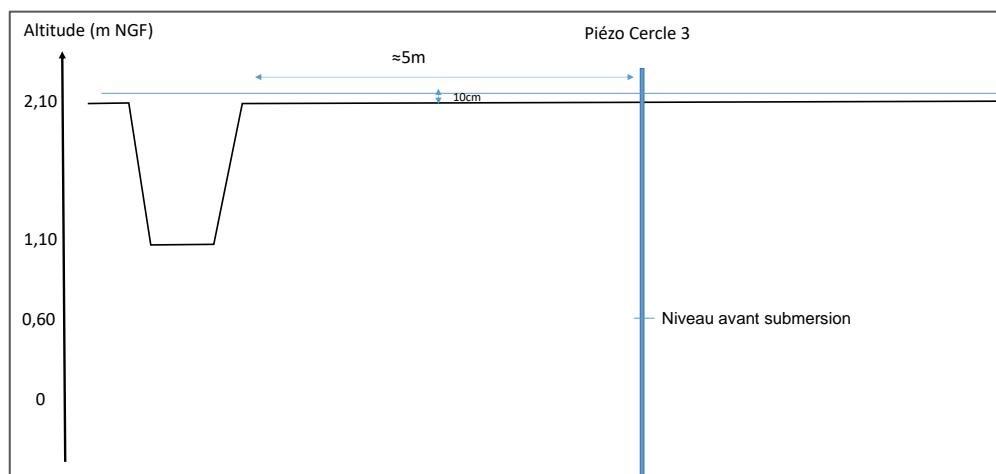


Illustration 61. Représentation schématique en coupe du fossé et du piézomètre Cercle 3.

Une représentation schématique du comportement de la nappe durant la recharge est présentée ci-dessous (Illustration 62).

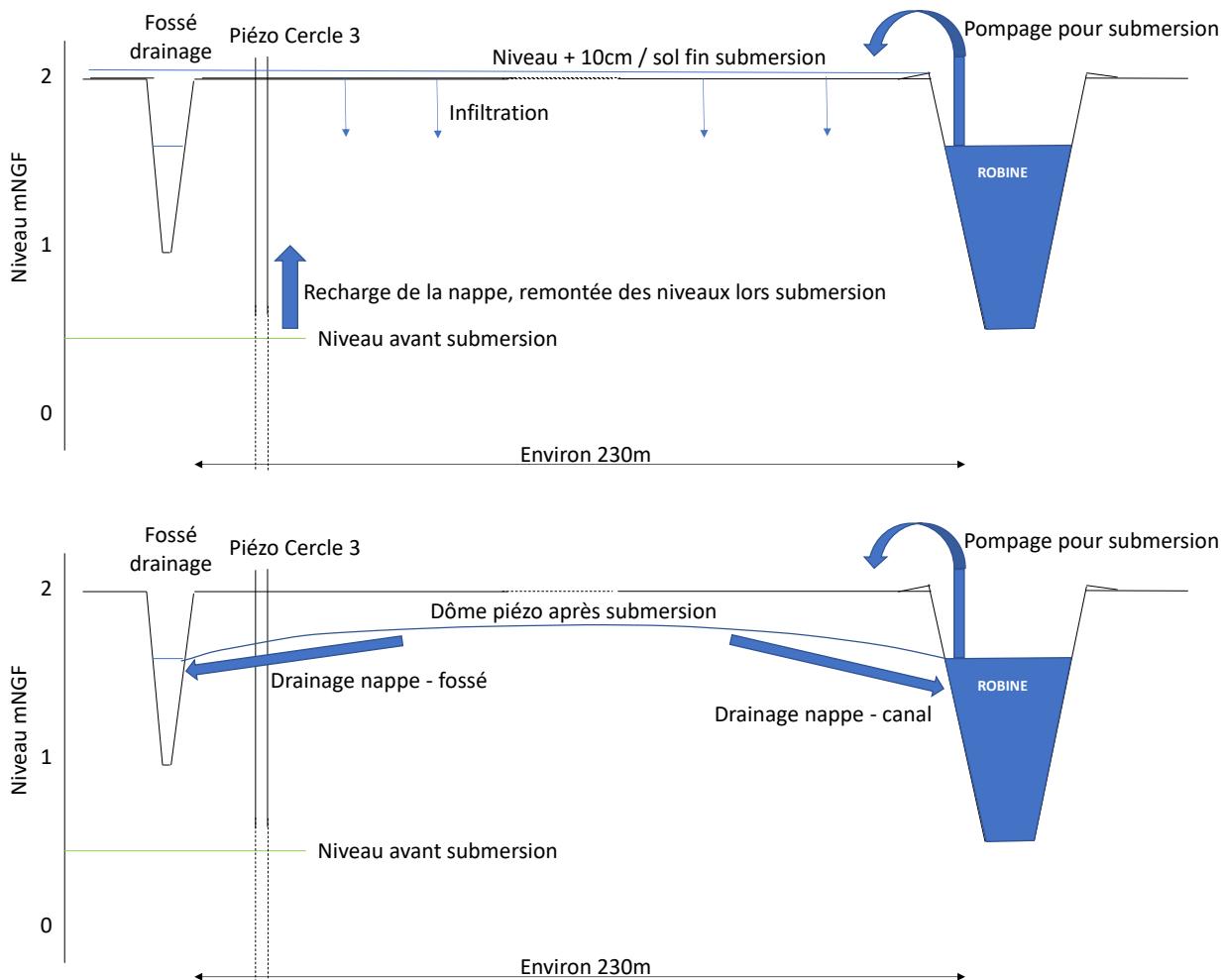


Illustration 62. Représentation schématique de la recharge sur la parcelle du Cercle lors de la submersion.

Ainsi lors des 3 phases de submersion le niveau augmente dans l'aquifère par paliers successifs. La sonde mise en place dans le fossé le 10 juin (submersion en cours sur la parcelle nord [grande parcelle]), permet de suivre les niveaux dans le fossé (Illustration 63). Ces derniers sont très proches du niveau de la nappe superficielle. Toutefois la minéralisation diffère, attestant de la nature différente des eaux dans le canal et dans l'aquifère. Ainsi durant les 2 premières submersions, l'eau dans le fossé est restée douce ($600 \mu\text{S}/\text{cm}$). Durant l'arrêt de la submersion de la parcelle Ouest (petite parcelle), le niveau a diminué de 30 cm et la minéralisation dans le canal a augmenté ($1 \text{ mS}/\text{cm}$), attestant du drainage de l'eau de l'aquifère de surface par le fossé. Ensuite lors de la 3^e submersion qui a été réalisée sur la parcelle expérimentale, il y a eu 10 cm d'eau sur la parcelle la submergeant entièrement ainsi que le fossé qui la jouxte. La minéralisation de l'eau dans le fossé diminue alors. Durant les 3 phases de submersion, la minéralisation de la nappe superficielle est restée à environ $1800 \mu\text{S}/\text{cm}$. Lors de l'arrêt de la 3^e submersion, les niveaux diminuent à la fois dans le fossé et dans le piézomètre. La minéralisation dans le fossé augmente ($1500 \mu\text{S}/\text{cm}$) et s'approche de la minéralisation du piézomètre Cercle 3.

Quelques jours après la submersion la conductivité électrique diminue, elle passe de $1750 \mu\text{S}/\text{cm}$ à $1550 \mu\text{S}/\text{cm}$ montrant la dilution de l'eau de la nappe par l'eau de la Robine. La dilution reste somme toute assez faible pour cette submersion.

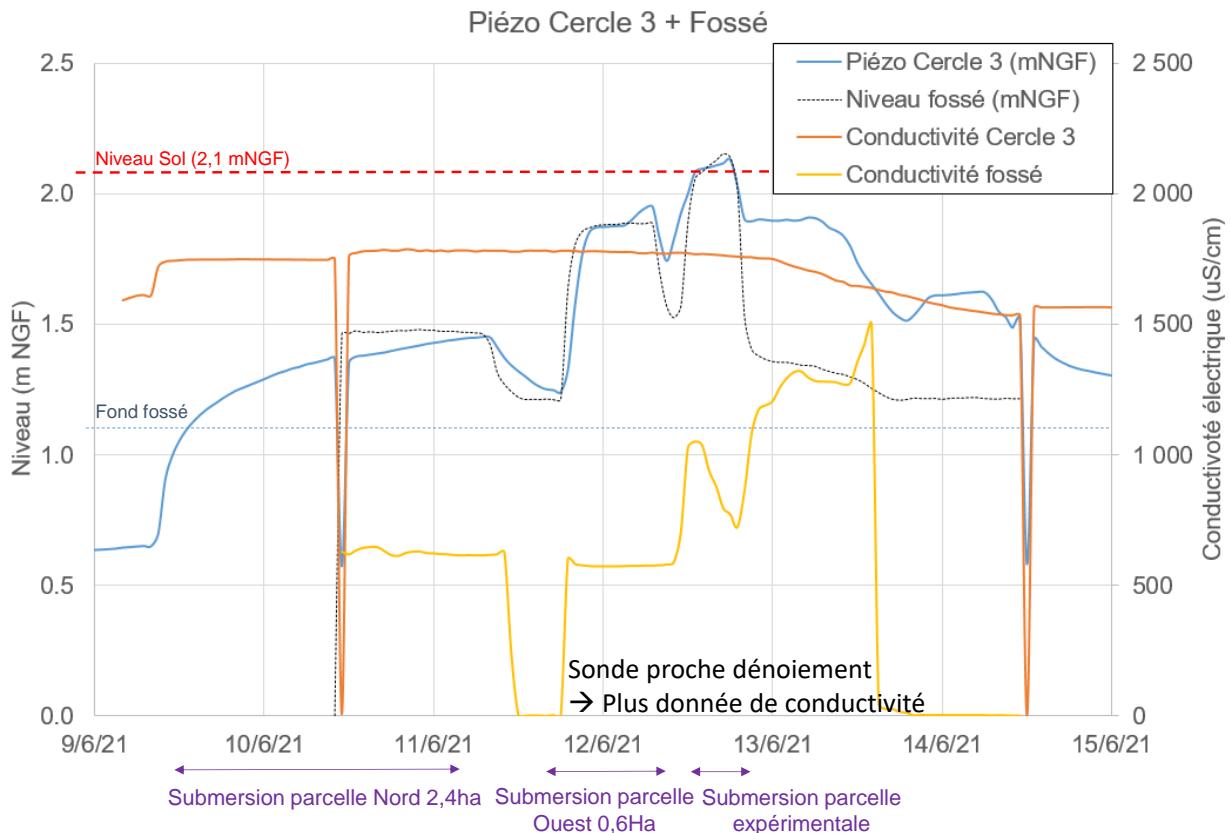


Illustration 63. Submersion 1 parcelle du Cerce.

5.3.2. Seconde submersion du Cerce – juillet 2021

Le déroulé de cette submersion est le suivant :

- Submersion grande parcelle pendant 50h (démarrage le 16/07/2021 9:00)
- Submersion petite parcelle pendant 9h (démarrage le 21/07/2021 17:00)
- Submersion parcelle expérimentale pendant 10h (démarrage le 22/07/2021 7:00)

La sonde de mesure dans le canal a été mise en place au début de la submersion de la parcelle expérimentale (22/07/2021). La submersion de la Grande parcelle au Nord conduit à une augmentation du niveau de près de 90 cm de la nappe superficielle (Illustration 64). Ensuite, le niveau diminue rapidement. Il remonte de près de 1m lors de la submersion de la petite parcelle à l'Ouest. Ensuite lors de la submersion de la parcelle expérimentale, le niveau passe de 1,7 m à 2,15 m soit au-dessus du niveau du sol (2,10 m NGF). Le niveau d'eau dans le fossé suit cette fluctuation. L'eau est d'abord faiblement minéralisée ($600 \mu\text{S}/\text{cm}$), il s'agit de l'eau de la Robine. L'eau de la nappe avant cette submersion était proche de $2 \text{ mS}/\text{cm}$. Suite à la submersion, la conductivité électrique dans la nappe diminue pendant un peu plus de 2 jours et atteint la valeur de $1300 \mu\text{S}/\text{cm}$. Cette diminution correspond à un phénomène de dilution de l'eau de l'aquifère de surface par l'eau faiblement minéralisée de la Robine.

Après les 10 h de submersion, le fossé est à nouveau ouvert, il se vidange rapidement : de 17h à 22h l'eau douce provenant de la submersion est évacuée. Ensuite lorsque le niveau dans le canal est à environ 1,5 m l'eau dans le fossé provient du drainage de la nappe superficielle. En effet sur cette période le niveau de la nappe est compris entre 1,3 m et 2 m (au-dessus du fond du fossé). La conductivité dans le fossé est alors proche de $1500 \mu\text{S}/\text{cm}$, issue du drainage de la parcelle.

Il y a ainsi, un export d'eau plus minéralisée. Le débit de vidange du fossé n'ayant pas été mesuré, il est difficile de quantifier cet export. Cet élément est nécessaire pour caractériser le flux de la nappe superficielle drainée par le fossé. Un suivi complémentaire sera réalisé lors de l'été 2022 afin d'évaluer ce flux.

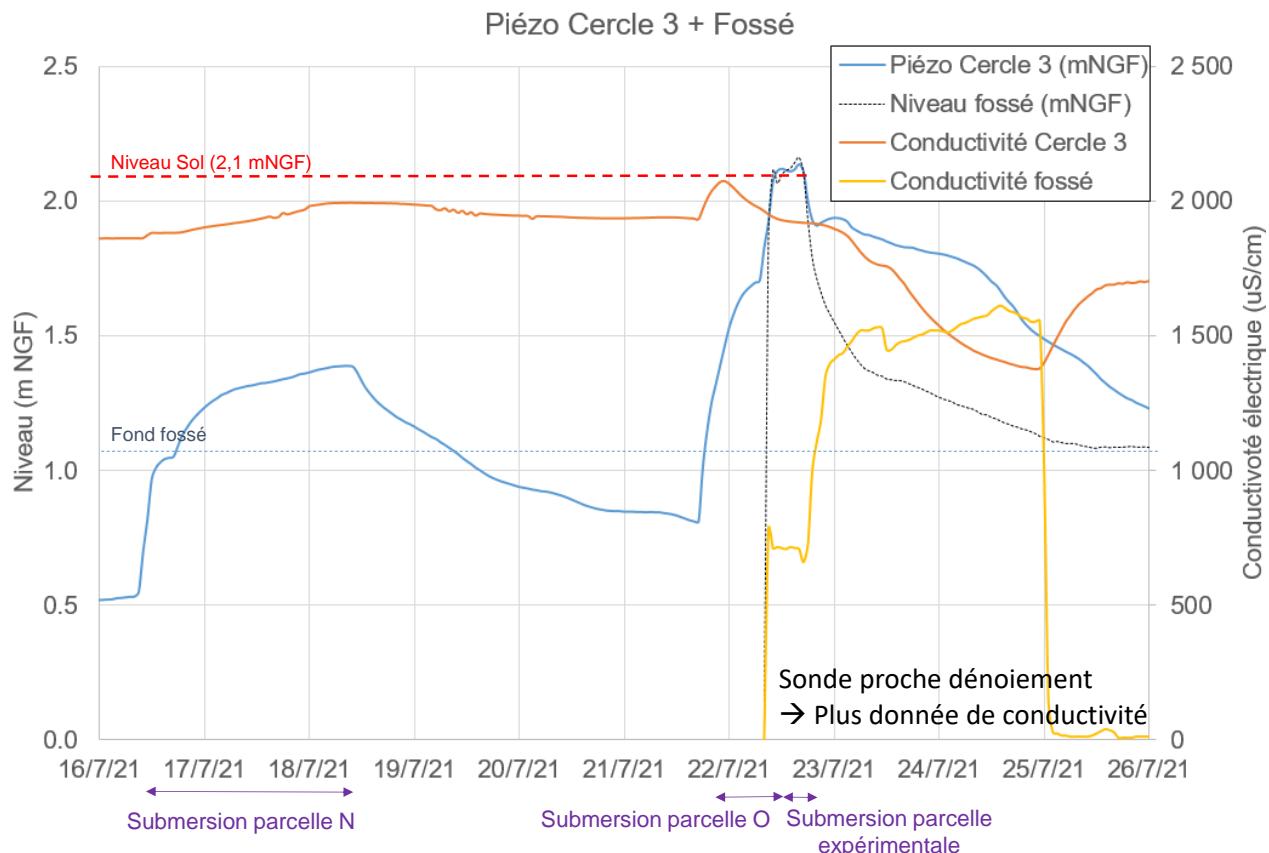


Illustration 64. Submersion 2 parcelle du Cercle.

5.3.3. Parcalle de Grands-Vignes, submersion d'août 2021

Une description de la parcalle expérimentale de Grands-Vignes d'une surface d'environ 3 Ha est proposée dans l'Illustration 65. Une photo présentant la submersion en cours de la parcalle réalisée à partir d'une pompe camarguaise permet de voir l'ennoiement des ceps de vigne.

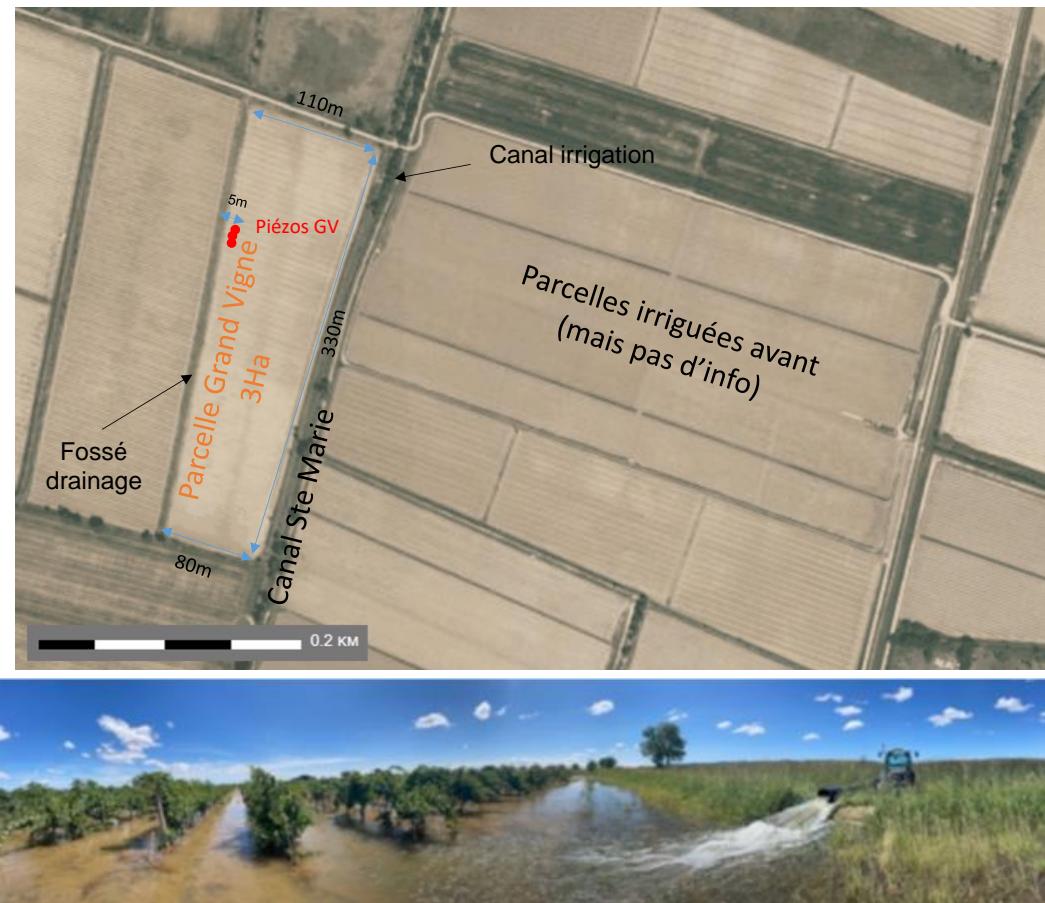


Illustration 65. Parcelle expérimentale de Grands-Vignes et photo de la submersion en cours.

La submersion a débuté le 1^{er} août vers 8h. Le viticulteur ne nous a pas prévenu. Le 2 août lors d'une visite de contrôle du matériel, le début de la submersion a été constatée, le fossé a ainsi été équipé d'une sonde CTD diver. La submersion s'est poursuivie jusqu'au 5 août vers 8h. Le pompage a eu lieu au débit de 25 l/s pendant une durée de 4 jours soit un volume de 8 640 m³. Les chroniques de niveau et conductivité électrique acquises sur le piézomètre superficiel GV3 et sur le fossé sont présentés ci-après (Illustration 66).

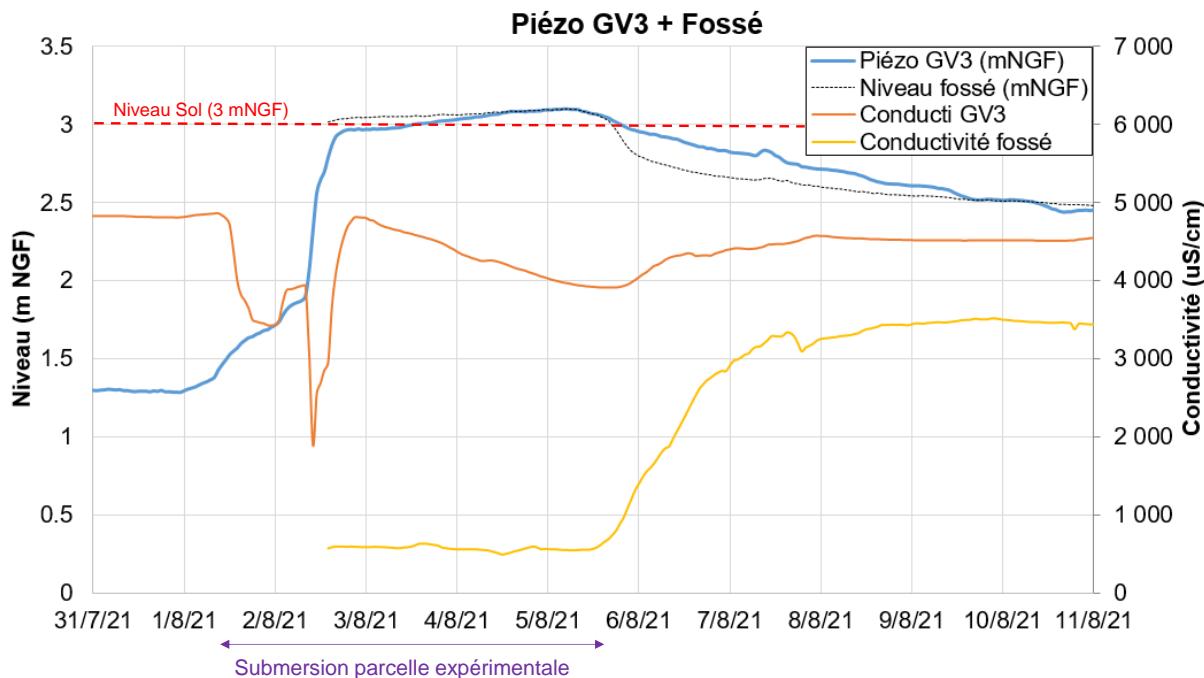


Illustration 66. Chroniques de niveau et conductivité électrique sur GV3 et dans le fossé de drainage.

Par ailleurs, une coupe présentant le fossé et ce piézomètre est fournie dans l'Illustration 67.

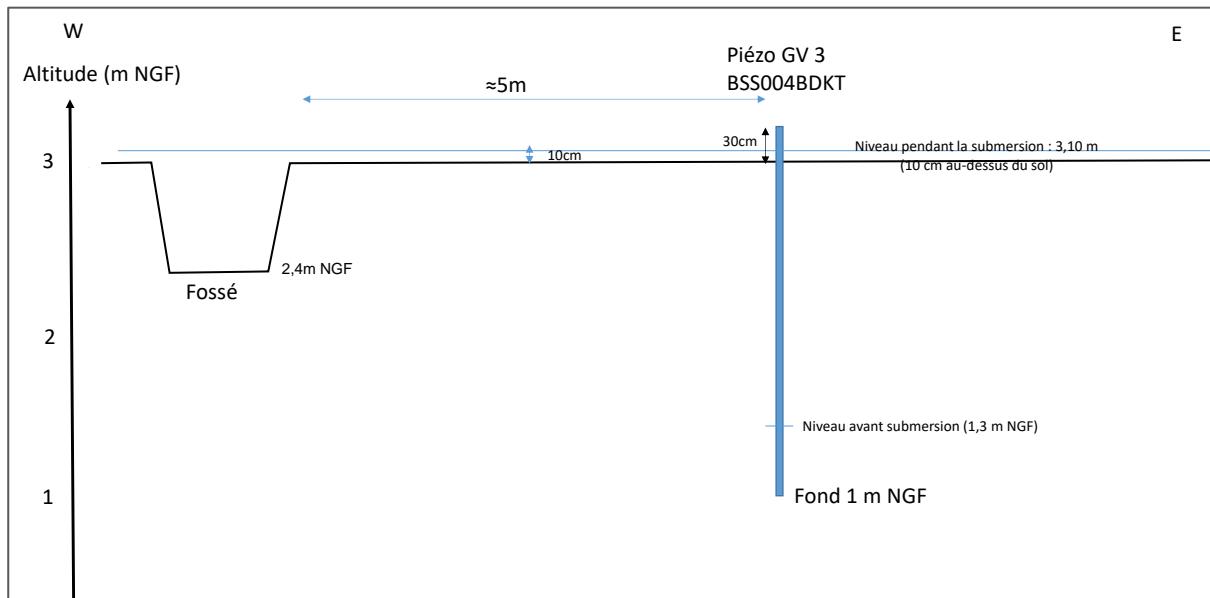


Illustration 67. Coupe sur la parcelle de Grands-Vignes.

Une représentation schématique d'évolution du niveau de la nappe suite à la submersion est proposée ci-après (Illustration 68).

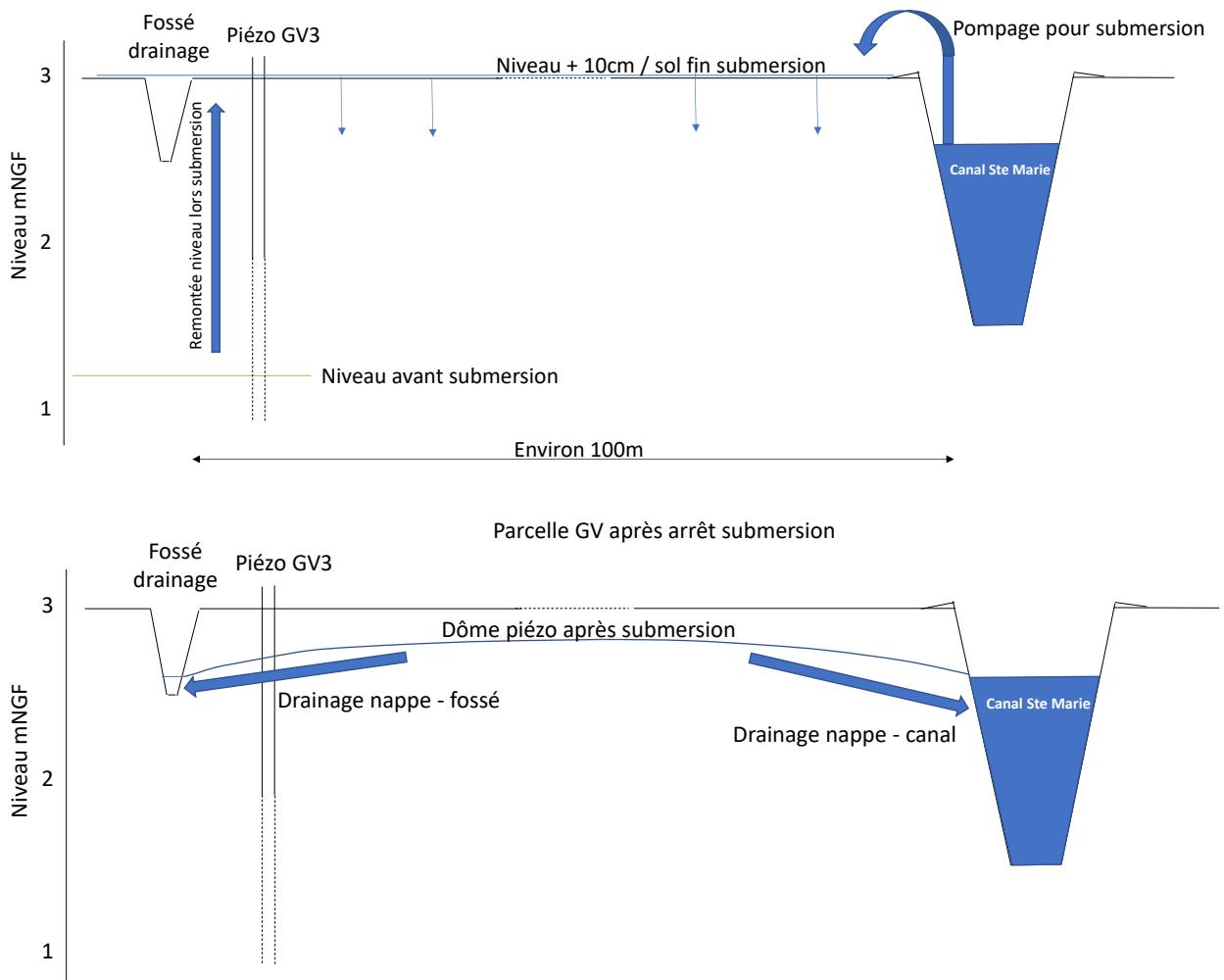


Illustration 68. Représentation schématique de la recharge sur la parcelle de Grands-Vignes lors de la submersion.

Ainsi au début de la submersion, l'eau dans le fossé était faiblement minéralisée ($600 \mu\text{S}/\text{cm}$) correspondant à l'eau d'irrigation du canal de Ste Marie. Cette eau était présente dans le fossé durant toute la période de pompage. La submersion s'accompagne d'une augmentation progressive des niveaux dans la nappe superficielle. Il passe de $1,3 \text{ m}$ à plus de 3 m en moins de 2 jours. En parallèle la conductivité électrique diminue passant de $4,9$ à $2 \text{ mS}/\text{cm}$, mettant en évidence le phénomène de dilution de l'eau de la nappe par l'eau douce d'irrigation.

Le 4 août, le niveau mesuré dans le piézomètre atteint $3,1 \text{ m}$. Le niveau dans le fossé est comparable. La parcelle est ainsi complètement submergée (niveau du sol à 3 mNGF), et il y a une lame d'eau douce d'une dizaine de cm sur la parcelle. La minéralisation augmente alors rapidement, la conductivité est comprise entre 4 et $5 \text{ mS}/\text{cm}$, soit une valeur comparable à l'avant submersion. Il est probable que lors de l'arrivée de l'eau de submersion sur la parcelle un flux direct s'infiltre au niveau du piézomètre et dilue l'eau minéralisée du piézomètre. Une fois que la parcelle est submergée on atteint une sorte de stationnarité et on retrouve l'eau minéralisée de la nappe. Durant cette période où la parcelle est ennoyée (du 3 au 5 août), la minéralisation diminue progressivement de $4,9$ à $4 \text{ mS}/\text{cm}$.

A l'arrêt de la submersion le 5 août, les niveaux diminuent, logiquement plus rapidement dans le fossé que dans la nappe superficielle. Durant cette période, le fossé draine alors la nappe de

surface. La conductivité dans le fossé passe de 600 µS/cm (eau d'irrigation) à 3,5 mS/cm. La conductivité mesurée dans le piézomètre est proche, à environ 4,5 mS/cm. Ainsi après cette phase de légère dilution (lorsque la parcelle est ennoyée), on retrouve une minéralisation proche d'avant submersion. A partir du 12 août, le fossé est dénoyé (niveau à 2,4 m) et le niveau de la nappe passe également en dessous de ce niveau.

Le flux de drainage passant par le fossé n'a pas été mesuré. Il est prévu lors de la prochaine submersion estivale (été 2022) de mesurer le débit d'exhaure du fossé. En intégrant la minéralisation durant la période de drainage, il sera possible d'évaluer la quantité de sel évacuée à l'issue de la submersion.

5.4. MODELISATION DU DOME PIEZOMETRIQUE LIES AUX SUBMERSIONS DE PARCELLE

Dans cette partie est présentée la modélisation des variations piézométriques liées aux submersions. Sur le secteur du Cercle, deux périodes ont été analysées du 09 au 12/06/2021 et du 16 au 18/07/2021 lors de deux submersions de la grande parcelle au Nord de la parcelle expérimentale. Ces périodes ont été choisies car peu influencées par des submersions précédentes, ce qui n'est pas le cas lors des submersions sur la parcelle expérimentale du Cercle. En effet, la submersion de la parcelle expérimentale intervient systématiquement après la submersion des deux autres parcelles (Nord et Ouest). Sur le secteur de Grands-Vignes, c'est la submersion du 02 au 05/08/2021 qui a été modélisée. Dans ce cas, la modélisation a porté sur les niveaux les plus profonds, le premier niveau de surface sur Grands-Vignes étant trop influencé par l'infiltration au droit du point de suivi.

5.4.1. Modèle utilisé

Le modèle utilisé provient des travaux de Dewandel et al. (2021), l'illustration ci-dessous présente le schéma de calcul. Ce modèle décrit la fluctuation piézométrique induite par un bassin de recharge rectangulaire, ici représentant la parcelle submergée, sous l'effet d'une infiltration pouvant être variable dans le temps mais uniforme à l'échelle de la parcelle. L'aquifère est libre, et est caractérisé par son épaisseur, sa perméabilité et sa porosité (ou emmagasinement libre). Pour les modélisations ci-dessous, l'épaisseur aquifère est supposée constante et, est fixée à 15 m en fonction de la connaissance sur la plaine de l'épaisseur du Quaternaire. La parcelle est située à une certaine distance d'un cours d'eau d'extension infinie (charge imposée), qui ici représente le canal d'irrigation. **En plus des variations de charge hydraulique au cours du temps, le modèle calcule aussi l'impact en terme de flux sur le cours d'eau (canal).**

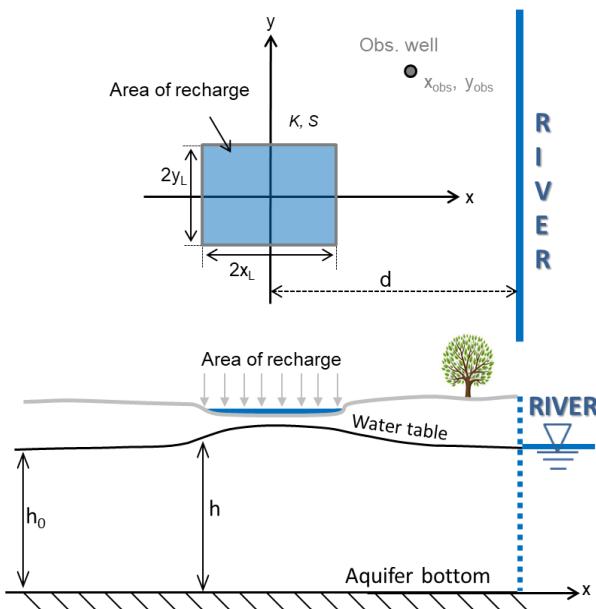


Illustration 69. Schéma de la solution analytique utilisée pour modéliser les hausses piézométriques liées aux périodes de submersion (Dewandel et al., 2021).

5.4.2. Evaluation du flux d'infiltration au droit de la parcelle

Cette évaluation est assez délicate car on ne connaît pas exactement le **débit de pompage** qui alimente la parcelle submergée, ni sa fluctuation au cours du temps. On sait, d'après les informations transmises par les agriculteurs, **qu'il est de l'ordre de 120 l/s au Cercle et de l'ordre de 25 l/s à Grands-Vignes.**

Sur le secteur du Cercle, la fluctuation de niveau d'eau libre (par ex. dans un fossé) au droit de la parcelle submergée (grande parcelle au Nord) n'est pas connue, il n'a donc pas été possible dans ce cas d'estimer la variation du flux d'infiltration. Par contre, cette information est disponible pour Grands-Vignes où le suivi dans le fossé a permis de préciser la variation du flux d'infiltration au moyen d'une simple loi de bilan à partir du moment où le niveau d'eau excédé celui de la surface de la parcelle (flux= [vol.pompé-variation hauteur fossé x surface parcelle]/Δt). Il en résulte pour chacune des deux submersions de 48 heures sur la grande parcelle du Cercle qu'environ 19 000 m³ ont été infiltrés, et environ 4 100 m³ pour la parcelle de Grands-Vignes en août (durée de la submersion :73 h). Ces chiffres sont un peu moins importants que les volumes pompés car les flux d'eau liés à l'ouverture des canaux après submersion ont été déduits ; ils correspondent approximativement à l'évacuation d'une lame d'eau d'une dizaine de cm sur la parcelle au moment de l'ouverture des fossés.

De plus, il est fortement probable, pour ne pas dire quasi certain, que le flux d'infiltration ne stoppe pas directement après l'arrêt du pompage, une partie de l'eau présente sur la parcelle et dans le sol de sub-surface pouvant encore s'égoutter dans l'aquifère sous-jacent. Afin de reproduire au mieux les variations de niveaux piézométriques, deux scénarios de débit ont été testés. Le premier, **Modèle 1, considère que le flux d'infiltration n'est présent qu'au moment de la submersion et le deuxième, Modèle 2, qu'il persiste encore après.** On notera que quel que soit le scénario le volume infiltré reste le même. Pour le premier scénario, au Cercle, le flux d'infiltration est constant et à Grands-Vignes variable car fonction de la hauteur d'eau sur la parcelle. Pour le deuxième scénario, il a été supposé qu'une partie de l'eau apportée durant la submersion pouvait encore s'égoutter quelques heures après l'arrêt de la submersion, **cette partie a été fixée arbitrairement à 20%** afin de prévoir un tarissement de la parcelle durant environ 15 à 20 d'heures

après la submersion ce qui correspond approximativement à la durée de vidange des fossés. Durant cette période, la baisse du flux d'infiltration suit une loi exponentielle.

5.4.3. Résultats sur les niveaux piézométriques

Les illustrations suivantes présentent les modélisations de différentes submersions sur les secteurs du Cercle et de Grands-Vignes. Y sont également présentées les schémas de dispositif et les paramètres de calage. L'ensemble des modélisations sont de qualité acceptable et reproduisent plus ou moins précisément les variations observées.

Pour la parcelle du **Cercle, la perméabilité de l'aquifère est évaluée entre 4 et 8×10^{-4} m/s** suivant les modèles. Cette variabilité est liée au calage de la période de juillet sur des temps plus longs afin de mieux évaluer l'abaissement de la piézométrie suite à l'arrêt de la submersion. Comparée aux valeurs de perméabilité déduites des essais slug tests (de $0,4$ à 1×10^{-6} ms ; Illustration 39) celle-ci est beaucoup plus importante suggérant que les piézomètres d'observation sont soit partiellement colmatés, soit situés dans une zone moins perméable que la moyenne du secteur. Par contre, la transmissivité de l'aquifère, de $0,6$ à $1,2 \times 10^{-2}$ m²/s, est cohérente des valeurs de transmissivité rencontrée sur la plaine (voir Illustration 39 et Illustration 43). L'emmagasinement de l'aquifère est estimé entre $0,015$ et $0,05$ suivant les modélisations ce qui est attendu pour ce type de milieu.

Pour la parcelle de **Grands-Vignes, la perméabilité de l'aquifère est évaluée 1×10^{-5} m/s**, et est toujours plus importante que les perméabilités déduites par essais slug tests (de l'ordre de 10^{-7} m/s ; Illustration 39). Les raisons de cette différence sont les mêmes que précédemment. Par contre, la transmissivité de l'aquifère, de $1,5 \times 10^{-4}$ m²/s, est cohérente des valeurs de transmissivité rencontrée sur la plaine (Illustration 39 et Illustration 43). L'emmagasinement de l'aquifère est estimé à $0,07$, ce qui est aussi attendu pour ce type de milieu.

Les deux scénarios de débit testés, arrêt de l'infiltration suite à l'arrêt de la submersion (modèle 1), et poursuite de l'infiltration suite à l'arrêt (modèle 2), donnent des paramètres hydrodynamiques proches, voire identique sur Grands-Vignes. On notera un meilleur calage avec le deuxième scénario d'infiltration après l'arrêt de la submersion (Cercle en juin et Grands-Vignes) suggérant que le flux d'infiltration vers l'aquifère continu durant plusieurs heures après l'arrêt de la submersion. Néanmoins, sur le long terme les modélisations sont quasi identiques quel que soit le scénario. Les Illustration 70 à Illustration 73 ci-après montrent les évolutions théoriques des dômes piézométriques (scénario de débit : Modèle 2) après les submersions de juin et juillet sur le Cercle, et d'août sur Grands-Vignes. Elles montrent que sur le Cercle le dôme disparaît très rapidement en environ 1 semaine, alors que sur le secteur de Grands-Vignes celui-ci se maintient pendant environ 2 mois.

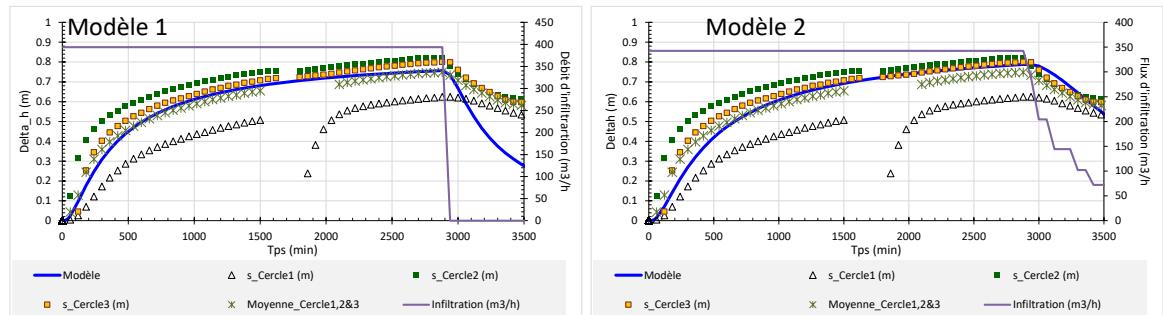
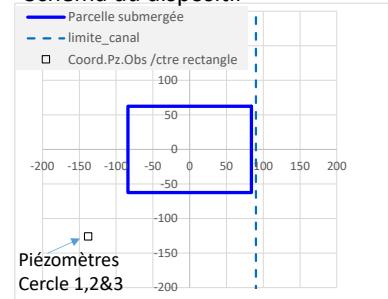


Schéma du dispositif



Paramètres des modèles

Cercle	Surf.parcelle (Ha)	Perméabilité (m/s)	Emmagasinement (-)	Epaisseur aquifère (m)	distance canal (m)*	x_obs (m)**	y_obs**
Modèle 1	2.1	8.00E-04	0.015	15	90	-138	-126
Modèle 2	2.1	6.50E-04	0.015	15	90	-138	-126

*: distance au canal / au centre de la parcelle
**: coordonnée du piézomètre d'observation / au centre de la parcelle
Modèle1: pas de flux après l'arrêt de la submersion
Modèle2: flux après l'arrêt de la submersion

Illustration 70. Modélisation au Cercle de la submersion sur la grande parcelle située au Nord du 09 au 12/06/2021.

En haut : gauche, modèle avec flux uniquement durant la période submersion, droite à décroissance exponentielle après la période de submersion.

En bas : gauche, schéma du dispositif, droite, paramètres du modèle.

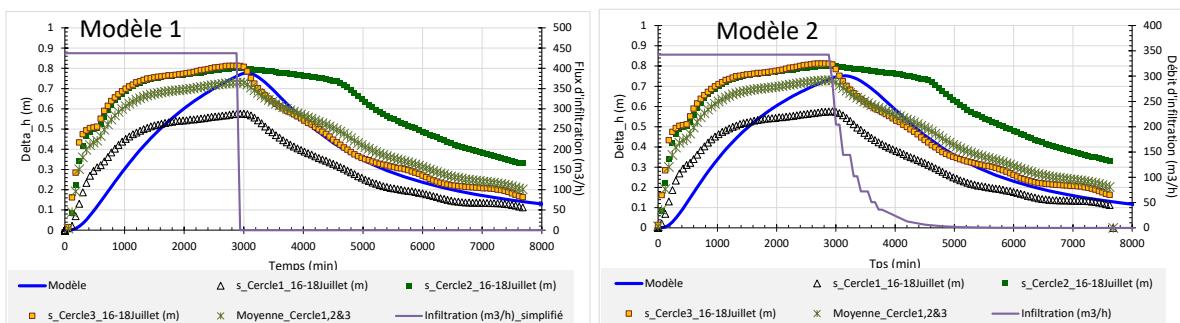
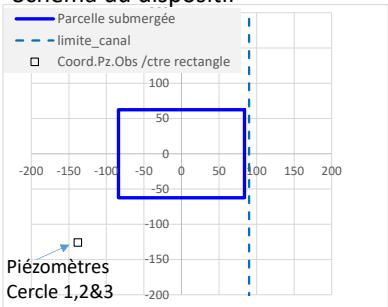


Schéma du dispositif



Paramètres des modèles

Cercle	Surf.parcelle (Ha)	Perméabilité (m/s)	Emmagasinement (-)	Epaisseur aquifère (m)	distance canal (m)*	x_obs (m)**	y_obs**
Modèle 1	2.1	5.50E-04	0.055	15	90	-138	-126
Modèle 2	2.1	4.00E-04	0.04	15	90	-138	-126

*: distance au canal / au centre de la parcelle
**: coordonnée du piézomètre d'observation / au centre de la parcelle
Modèle1: pas de flux après l'arrêt de la submersion
Modèle2: flux après l'arrêt de la submersion

Illustration 71. Modélisation au Cercle de la submersion sur la grande parcelle située au Nord du 16 au 18/07/2021.

En haut : gauche, modèle avec flux uniquement durant la période submersion, droite à décroissance exponentielle après la période de submersion.

En bas : gauche, schéma du dispositif, droite, paramètres du modèle.

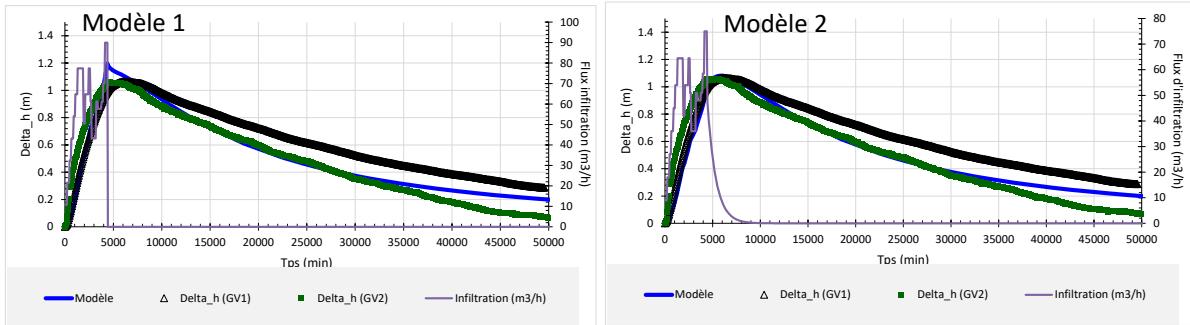
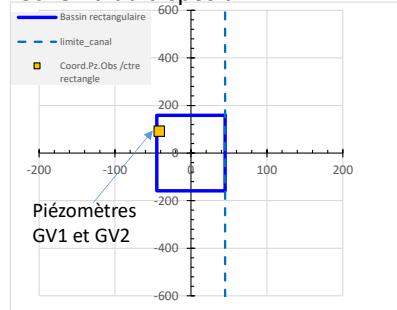


Schéma du dispositif



Paramètres des modèles

Cercle	Surf.parcelle (Ha)	Perméabilité (m/s)	Emmagasinement (-)	Epaisseur aquifère (m)	distance canal (m)*	x_obs (m)**	y_obs**
Modèle 1	2.86	1.00E-05	0.07	15	45	-41.7	92.2
Modèle 2	2.86	1.00E-05	0.07	15	45	-41.7	92.2

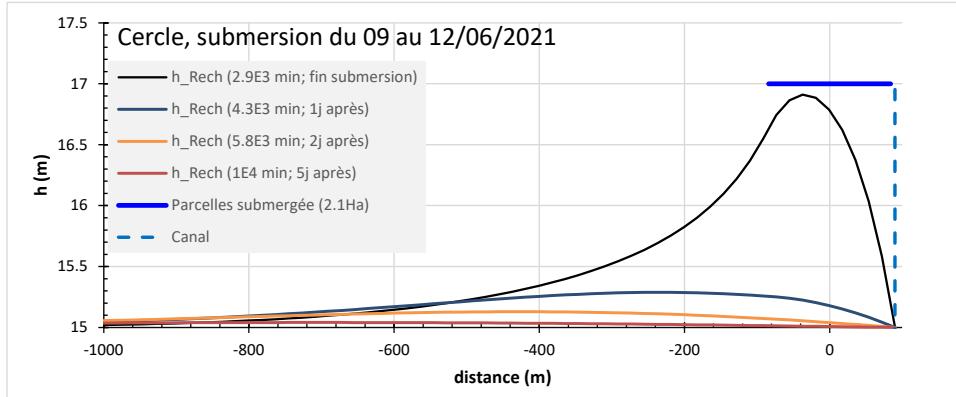
*: distance au canal / au centre de la parcelle
 **: coordonnée du piézomètre d'observation / au centre de la parcelle
 Modèle1: pas de flux après l'arrêt de la submersion
 Modèle2: flux après l'arrêt de la submersion

Illustration 72. Modélisation à Grands-Vignes de la submersion du 02 au 05/08/2021.

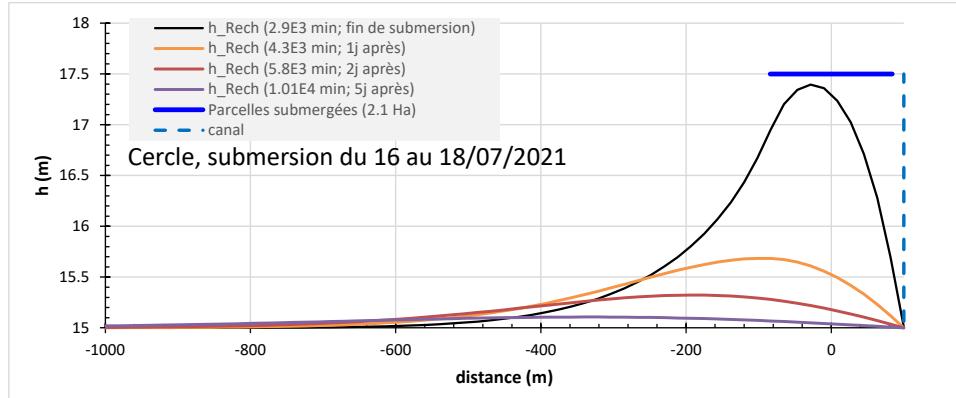
En haut : gauche, modèle avec flux uniquement durant la période submersion, droite à décroissance exponentielle après la période de submersion.

En bas : gauche, schéma du dispositif, droite, paramètres du modèle.

Modèle 2: évolution du dôme piézométrique après l'arrêt de la submersion



Modèle 2: évolution du dôme piézométrique après l'arrêt de la submersion



Modèle 2: évolution du dôme piézométrique après l'arrêt de la submersion

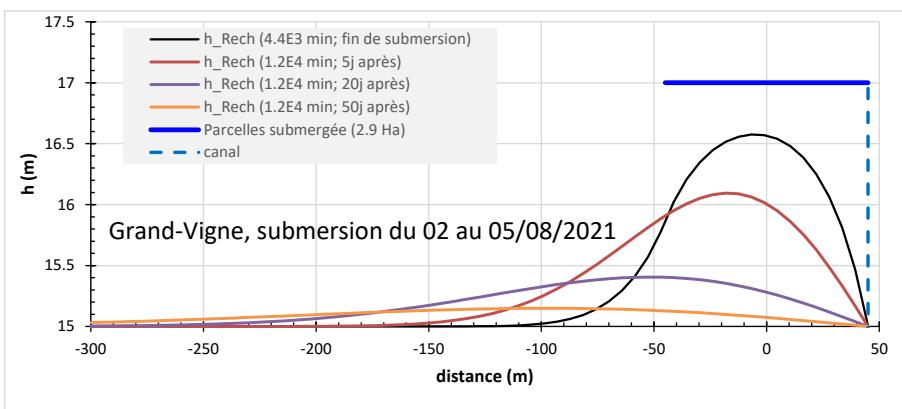


Illustration 73. Modélisation de la géométrie du dôme piézométrique après l'arrêt des submersions (scénario de débit : modèle 2, avec flux après la submersion). En haut : Cercle, submersion du 09 au 12/06/2021, au milieu : Cercle, submersion du 16 au 18/07/2021, et en bas : Grands-Vignes, submersion du 02 au 05/08/2021.

5.4.4. Résultats de l'impact sur le canal

Un des avantages du modèle utilisé est qu'il permet de calculer l'impact en terme de volume ou de débit de l'infiltration sur une parcelle vers le canal. Les Illustration 74 à Illustration 76 présentent le calcul du volume cumulé d'eau qui retourne de l'aquifère vers le canal.

Pour la parcelle du Cercle, du fait de la relativement forte perméabilité du secteur, les calculs montrent que l'essentiel de l'eau infiltrée lors de la submersion retourne vers le canal dans la journée qui suit l'arrêt de la submersion (60 à 80% en 7h et environ 90% au bout de 19j). Pour la parcelle de Grands-Vignes, comme l'aquifère est moins perméable mais aussi plus poreux, les calculs montrent que l'eau reste stockée beaucoup plus longtemps dans l'aquifère. Cependant, au bout d'environ 2 mois plus de 75% de l'eau infiltrée est restituée au canal.

Ces calculs montrent que l'impact sur l'aquifère en terme de stockage d'eau à un effet limité dans le temps qui dépend des propriétés hydrodynamiques de l'aquifère du lieu de la submersion, mais aussi de la distance de la parcelle aux canaux. Suivant les cas traités, le stockage de l'eau des submersions dans l'aquifère dure de la journée à une semaine (cas du Cercle) à plusieurs semaines voire mois (cas de Grands-Vignes). On notera que ces calculs sont cohérents les observations piézométriques et les simulations des dômes piézométriques, qui montrent elles-aussi un retour aux niveaux piézométriques avant submersion dans les mêmes gammes de temps. Ces premières estimations montrent qu'à l'échelle de la plaine, seule une petite partie de l'eau des canaux utilisée pour la submersion reste durablement dans l'aquifère.

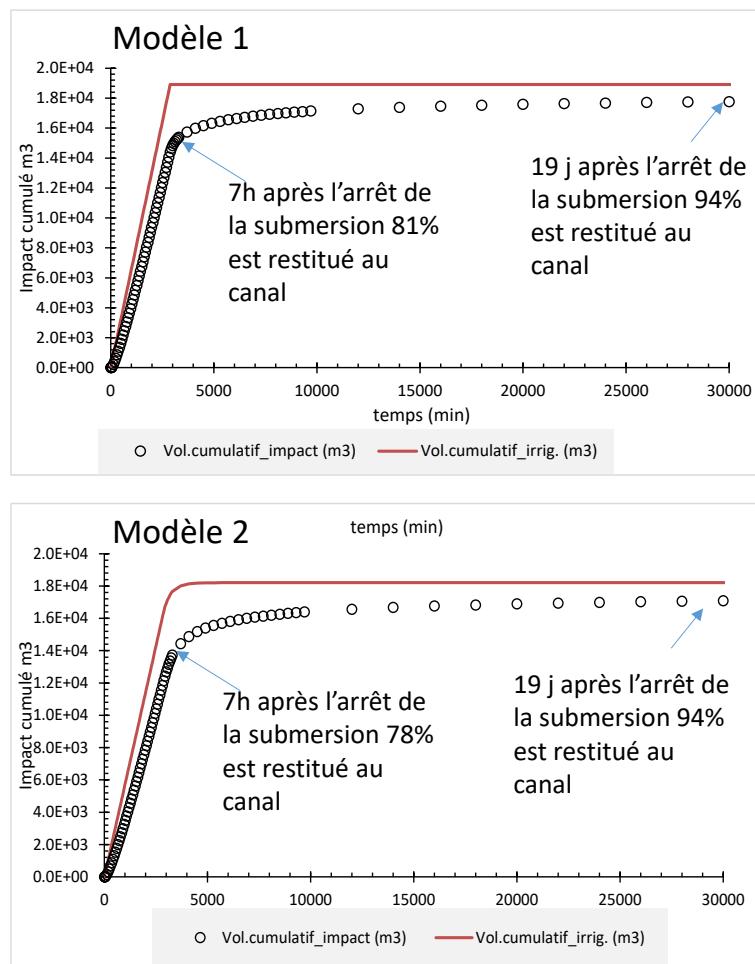


Illustration 74. Modélisation au Cercle de la submersion sur la grande parcelle située au Nord du 09 au 12/06/2021. Impact de la submersion sur le canal de la Robine.

En haut : modèle avec flux uniquement durant la période submersion, droite à décroissance exponentielle après la période de submersion.

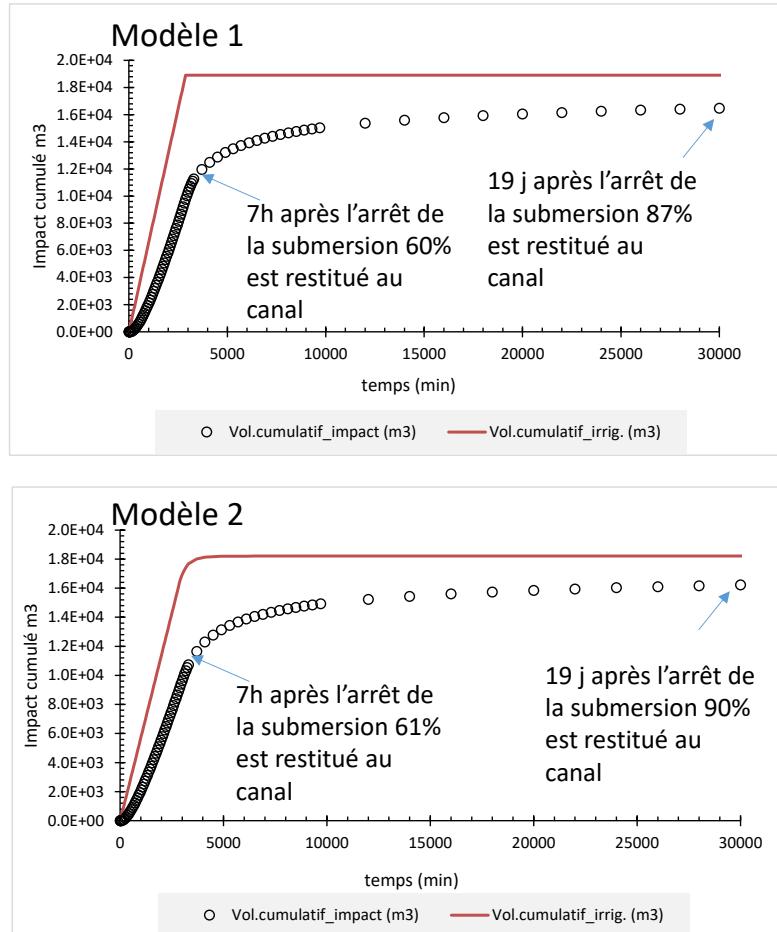


Illustration 75. Modélisation au Cercle de la submersion sur la grande parcelle située au Nord du 16 au 18/07/2021. Impact de la submersion sur le canal de la Robine.

En haut : modèle avec flux uniquement durant la période submersion, droite à décroissance exponentielle après la période de submersion.

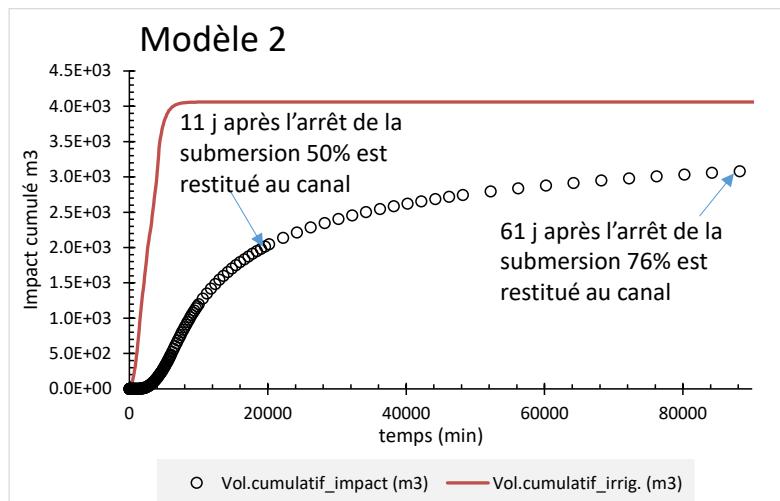
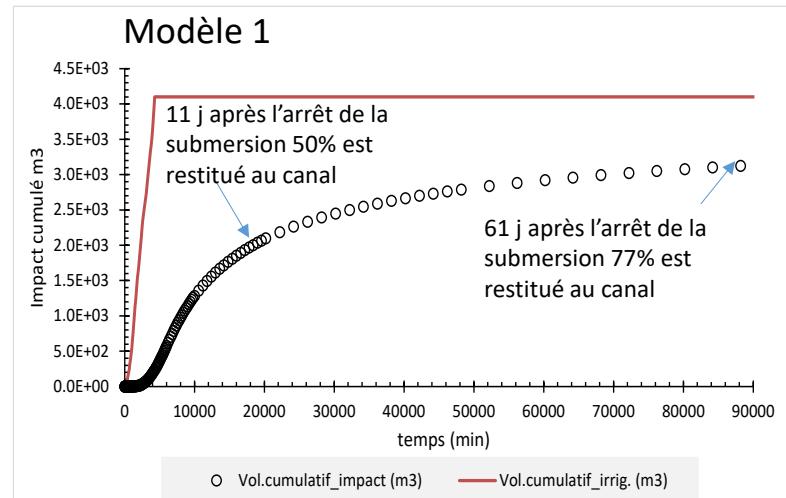


Illustration 76. Modélisation à Grands-Vignes de la submersion du 02 au 05/08/2021. Impact de la submersion sur le canal de la Robine.

En haut : modèle avec flux uniquement durant la période submersion, droite à décroissance exponentielle après la période de submersion.

6. Bilan hydrologique

A partir des éléments disponibles, il est possible de réaliser un premier bilan hydrogéologique sur la basse plaine de Narbonne. Il est réalisé sur une superficie de 75,5 km² correspondant à l'emprise des cartes piézométriques. Elle est inférieure à la surface de l'entité définie dans l'Illustration 6 (superficie de 90,3 km²). En effet la réalisation de la carte a nécessité l'utilisation de données piézométriques, or ces données ne sont pas présentes sur l'ensemble du territoire, notamment sur les bordures à proximité des massifs des Corbières et de la Clape. Il en résulte une réduction de la superficie dans la partie périphérique.

Aussi, nous rappelons que l'estimation des flux aux limites de l'aquifère, et au niveau de l'Aude et du canal de la Robine sont assujettis à une incertitude assez forte, qui dépend de la qualité des cartes piézométriques, et des paramètres hydrodynamiques de l'aquifère et des berges de l'Aude et du canal de la Robine qui ont été prescrits dans les calculs. Ils sont donc à manipuler avec précaution. Nous proposons ainsi pour les termes du bilan hydrogéologique de ne retenir que les ordres de grandeur et non les valeurs « précises ».

6.1. BILAN ACTUEL

L'ensemble des travaux réalisés sur le volet hydrogéologique permet de définir les différents termes du bilan. Ainsi, l'interprétation des trois cartes piézométriques de 2019 et 2021 fournit l'ordre de grandeur des volumes annuels de l'alimentation de la nappe (superficie de 75,5 km²) :

- Corbières : 1,7 Mm³ ;
- La Clape : 4 Mm³ ;
- Aude : 0,4 Mm³ ;
- Robine : 0,6 Mm³ ;

Le flux sortant de la nappe vers la zone des étangs (noté en négatif dans le bilan) a également été estimé :

- Etangs : - 5,3 Mm³.

L'ensemble des prélèvements annuels pour l'AEP sur notre zone d'étude (également notés en négatif dans le bilan) ont été fournis par le Grand Narbonne :

- Prélèvements AEP : - 6,6 Mm³.

Les prélèvements hors AEP réalisés directement sur la nappe (puits et forages agricoles ou domestiques) sont d'après la Chambre d'Agriculture et l'union d'ASA limités. Ils ne sont donc pas pris en compte dans le présent bilan.

La recharge de la nappe par les précipitations a été évaluée sur la période actuelle (1990-2019), elle est évaluée à 53,8 mm/an. Intégrée sur la superficie de 75,5 km², nous obtenons :

- Recharge par les précipitations : 4,1 Mm³.

Dans ce bilan, les prélèvements hors AEP dans la nappe n'ont pas pu être estimés. Cependant il sont jugés limités du fait de l'utilisation prioritaire de l'eau provenant des canaux d'irrigation.

Ainsi, l'ajout des différents termes du bilan, met en évidence un excédent de 1,1 Mm³/an, qui à priori est lié à la recharge vers la nappe induite par les eaux d'irrigation issues des fossés, canaux et submersion des parcelles. **Cette hypothèse sera à confirmer en dernière année du programme, notamment avec l'Union**

d'ASA et la Chambre d'agriculture, en affinant les volumes d'eau utilisés pour la submersion, les surfaces de parcelles concernées, le débit de la Robine et des canaux.

6.2. IMPACT DES SUBMERSIONS DANS LES TERMES DU BILAN

Une analyse globale « simplifiée » à l'échelle de la plaine est ainsi proposée afin d'évaluer si ce flux est en adéquation avec la recharge agricole qui s'effectue notamment lors des submersions des parcelles. A l'échelle de la plaine on évalue entre 1 000 et 2 000 Ha la surface des parcelles irriguées. Lors des submersions réalisées durant l'été 2021 sur les parcelles expérimentales du Cercle et de Grands-Vigne, le volume utilisé pour les submersion a été d'environ 6 000 m³/Ha au Cercle (70 h au débit de 120 l/s soit 30 000 m³ pour 5 Ha) et 3 000 m³/Ha à Grands-Vignes (96 h au débit de 25 l/s soit 8 640 m³ pour 3 Ha). La différence de volume sur ces deux parcelles s'explique par une porosité beaucoup plus forte sur le Cercle que sur Grands-Vignes. Une valeur moyenne est proposée ici pour évaluer l'ordre de grandeur du volume de submersion, soit 4 500 m³/Ha. Selon les secteurs, une (parcelle Grands-Vignes) à deux submersions annuelles (parcelle du Cercle) sont réalisées. En affectant le ratio de 1,5 au volume d'une submersion, on obtient une évaluation du volume annuel qui représente alors 6 750 M³/an. Ainsi, intégré sur la surface des parcelles submergées (1 000 à 2 000 Ha), on obtient un volume annuel de 6,8 Mm³ à 13,5 Mm³.

Aussi, le bilan hydrogéologique présente un déficit de 1,1 Mm³/an que l'on associe, **à ce stade**, à la recharge par les eaux agricoles. Pour retrouver ce flux, il faudrait ainsi un pourcentage d'infiltration lors des périodes de submersions de 8 à 16 %.

Les taux d'infiltration vers la nappe ont été déduits de la modélisation des périodes de submersion. En effet, sur la parcelle du Cercle après 19j, 90% du volume de la submersion est restitué au canal (Illustration 75) et sur Grands-Vignes plus de 75% du volume est restitué après 61j (Illustration 76). Ces valeurs sont ainsi en accord avec le flux d'infiltration issu des submersions déduit du bilan hydrogéologique.

6.3. BILAN FUTUR

Les scénari climatiques futurs informent sur une réduction de **5 à 40 %** de la recharge par les précipitations d'ici le milieu – fin du siècle (Illustration 12). Dans ce contexte la recharge par les précipitations sur la plaine serait réduite de **0,2 à 1,6 Mm³**, ce qui engendrera inévitablement un déficit dans le bilan hydrologique proposé ci-dessus.

Dans ce contexte, une réduction de la recharge est également à prévoir sur les massifs karstiques bordiers (Corbières et Clape). Ainsi l'alimentation souterraine vers la nappe (actuellement 5,7 Mm³) sera très probablement réduite.

Cette diminution de la recharge de la nappe dans le futur conduira à une réduction des écoulements de la nappe vers la zone des étangs, avec un risque accru d'intrusion du biseau salé au moins dans la partie proximale des étangs.

7. Conclusions et perspectives

Le travail réalisé au cours de cette année 2 du projet a permis de spatialiser la salinité des sols à l'échelle de la plaine de la narbonnaise et également de proposer des outils pour la caractérisation de la salinisation des sols.

Aussi, un premier bilan hydrogéologique de la nappe a été conduit à partir des cartes piézométriques et d'une évaluation de la recharge. Ce dernier est caractérisé par un déficit de **l'ordre de 1,1 Mm³/an**. Ce flux permet d'appréhender, en première approche, l'ordre de grandeur de la recharge de la nappe par les eaux d'irrigation via les canaux, fossés et pratiques de submersion. Par ailleurs, cet ordre de grandeur est en accord avec le pourcentage du flux d'infiltration vers la nappe qui a été définie lors de la caractérisation des submersions. **Ce travail visant à caractériser la recharge par les submersions se poursuivra l'année prochaine afin de confirmer et ou préciser ces résultats, avec notamment une analyse des données de débit de la Robine, mais aussi des volumes utilisés pour la submersion, le parcellaire concerné, les pratiques agricoles etc...**

Une évolution de ce bilan est proposée à moyen (2050) et long terme (2080) en contexte de changement climatique. Il laisse d'ors et déjà entrevoir une diminution de la recharge, ce qui impliquera inévitablement une réduction du flux d'eau douce s'écoulant vers les étangs et à terme un risque accrue d'intrusion du biseau salé au moins localement à proximité des étangs.

La poursuite du projet en 2022 permettra de consolider le bilan hydrogéologique.

Un travail sur l'évaluation de la recharge sera notamment entrepris à partir des chroniques piézométriques en cours d'acquisition (1 à 2 cycles hydrologiques complets) du réseau piézométrique SALiN comprenant une douzaine de points. Les analyses chimiques actuellement en cours seront interprétées et permettront de caractériser l'origine de la salinité sur les différents secteurs. Enfin, le fonctionnement de la zone non saturée (premiers horizons du sol) sera étudié, en particulier sur les parcelles expérimentales (Cercle, Grands-Vignes, Grand Castelou), afin de caractériser les différents phénomènes (transferts de minéraux, export, lessivage etc...) qui prennent place entre la partie superficielle des sols et la nappe sous-jacente.

Bibliographie

Bergé F, 2020, Analyse des pratiques de gestion de la salinisation des sols dans le bassin viticole de la Basse Plaine de l'Aude. Mémoire de fin d'études, Ingénieur agronome, parcours Ressources, Systèmes Agricoles et Développement, Institut Agro | Montpellier SupAgro, 94p.

Bless E, 2019. Agricultural land salinisation in coastal area : soil and water analysis from landscape to soil aggregate. Thèse de doctorat Montpellier SupAgro, 192 pp.

Campon, J-P., 1963. Contribution à l'étude hydrogéologique de la Basse vallée de l'Aude (secteur Nord). Thèse 3^{ème} cycle. 77p.

Croiset N, Lopez B, 2013. HYPE : Outil d'analyse statistique des séries temporelles d'évolution de la qualité des eaux souterraines – Manuel d'utilisation. BRGM/RP-63066-FR. 64 p.

Dayon G. (2015) *Evolution du cycle hydrologique continental en France au cours des prochaines décennies*. Thèse de doctorat de l'Université Toulouse 3 Paul Sabatier.

Dewandel B., Lanini S., Hakoun V., Caballero Y., Maréchal J.-C., 2021. Artificial aquifer recharge and pumping: transient analytical solutions for hydraulic head and impact on streamflow rate based on the spatial superposition method. Hydrogeol. Journ. <https://doi.org/10.1007/s10040-020-02294-9>

Dewandel B., Jeanpert J., Ladouche B., Join J.-L., Maréchal J.-C., 2017. Inferring the heterogeneity, transmissivity and hydraulic conductivity of crystalline aquifers from a detailed water-table map. J. Hydrol., 550, 118–129. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.03.075>.

Dewandel B., Amraoui N., Baltassat J.M., Boisson A., Caballero Y., Mougin B., 2020. Projet de recherche MORPHEUS - Méthodologie de Régionalisation des Propriétés HydrogÉologiques des aquifères de Socle. BRGM/RP 69431-FR -FR, p. 131, 61 fig.,5 tabl., 1 ann.

Dingman S. L. (2002) Physical Hydrology, pp.575, Waveland Press, 2nd edition, ISBN: 978-1-57766-561-8

DoneSol INRA (2014) Dictionnaire de données, INRA, Version du 1er mai 2014, <https://dw3.gissol.fr/login>, last accessed 13/04/2016

Edijatno et Michel C. (1989) Un modèle pluie-débit journalier à trois paramètres. La Houille Blanche, n°2, pp 113-122.

FAO, 1988. Salt-Affected Soils and their Management. FAO Soil Bulletin 39. <http://www.fao.org/3/x5871e/x5871e00.htm>

Haitjema H.M., Mitchell-Bruker S., 2005. Are water tables a subdued replica of the topography? Ground Water, 43, 781–786. doi: 10.1111/j.1745-6584.2005.00090.x

Harris I, Jones PD, Osborn TJ, Lister DH, 2014. Updated high-resolution grids of monthly climatic observations – the CRU TS3.10 Dataset. Int. J. Climatol., 34: 623–642. (doi: 10.1002/joc.3711)

Hunt B., 1999. Unsteady stream depletion from ground water pumping. Ground Water, 37(1), 98–102.

Lanini, S. and Caballero, Y. (2021), ESPERE, a Tool for Multimethod Aquifer Recharge Estimation: What's New with Version 2?. Groundwater, 59: 5-6. <https://doi.org/10.1111/gwat.13049>

Lanini, S., Caballero, Y., Le Cointe, P., Beranger, S., Arnaud, L., Pinson, S. (2019) Recharge des aquifères à l'échelle de la France : estimation, évolution et incertitudes associées. Colloque UNESCO-SHF : « Sécheresses 2019, Paris 11-12 et 13 décembre 2019 »

Mardhel, V. Stéphanie Pinson, Delphine Allier, (2021), Description of an indirect method (IDPR) to determine spatial distribution of infiltration and runoff and its hydrogeological applications to the French territory, Journal of Hydrology, Volume 592, 125609, ISSN 0022-1694, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125609>.

Pagé, C., L. Terray et J. Boé, (2009) Dsclim: A software package to downscale climate scenarios at regional scale using a weather-typing based statistical methodology. Technical Report TR/CMGC/09/21, SUC au CERFACS, URA CERFACS/CNRS No1875, Toulouse, France

Thornthwaite, C. W. (1948) An approach toward a rational classification of climate, Geograph. Rev., 38, 55-94,

Verdeil, P., 1970. Données nouvelles sur le quaternaire de la basse vallée de l'Aude. Bull. société géologique de France, t XII, pp 413-425.

Vidal, J. P., E. Martin, L. Franchistéguy, M. Baillon and J. M. Soubeyroux (2010) A 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over France with the Safran system, Int.J.Climatol., 30(11), 1627-1644.

Wanlin P, 2007. L'analyse de contenu comme méthode d'analyse qualitative d'entretiens : une comparaison entre les traitements manuels et l'utilisation de logiciels, RECHERCHES QUALITATIVES, Hors-Série(3), p. 30.

Annexe 1

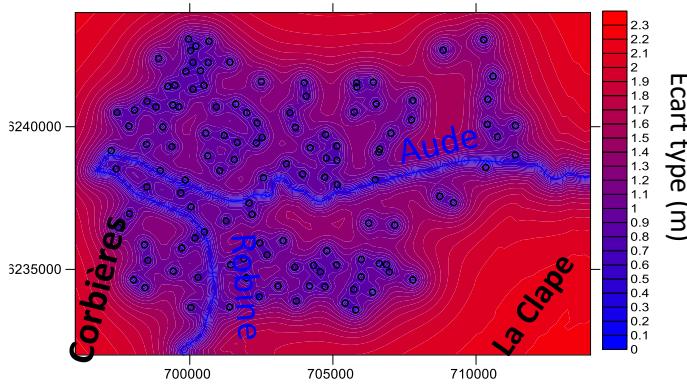
Données piézométriques des 3 campagnes (été 2019, hiver et été 2021)

Ajouter feuille fichier xls

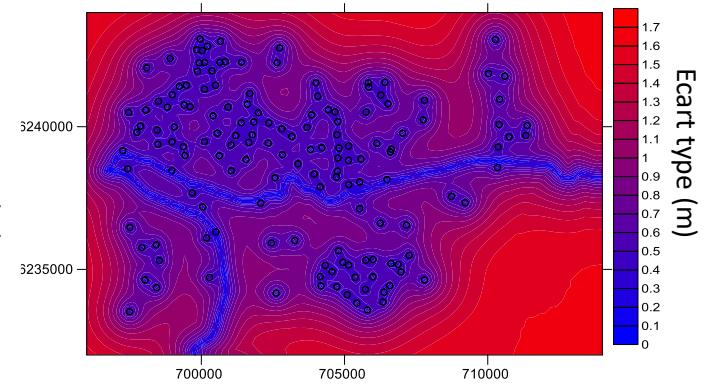
Annexe 2

Elements complémentaires relatifs au chapitre dédié à la carte piézométrique

Oct. 1961 ; N=124



Fév. 1962 ; N=150



Mai 1962 ; N=139

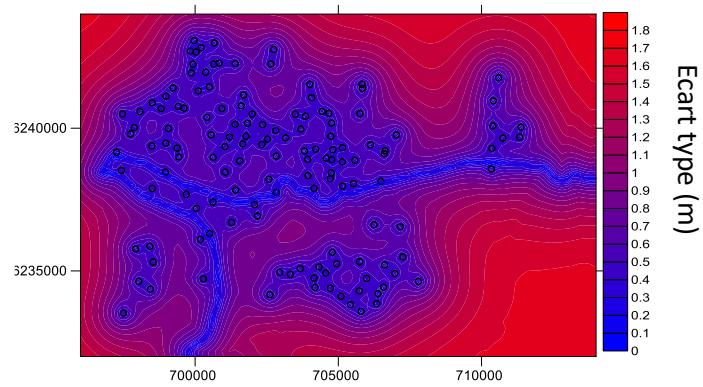


Figure A-1. Ecart type des cartes piézométriques du Quaternaire, années 1960. Variogrammes de la profondeur du niveau piézométrique : Oct.1961 modèle Gaussien (var. : 4,2 ; portée : 1 650 m) ; Fév.1962 modèle sphérique (var. : 2,3 ; portée : 3 500 m) et Mai1962 modèle sphérique (var. : 2,3 ; portée : 4 200 m).

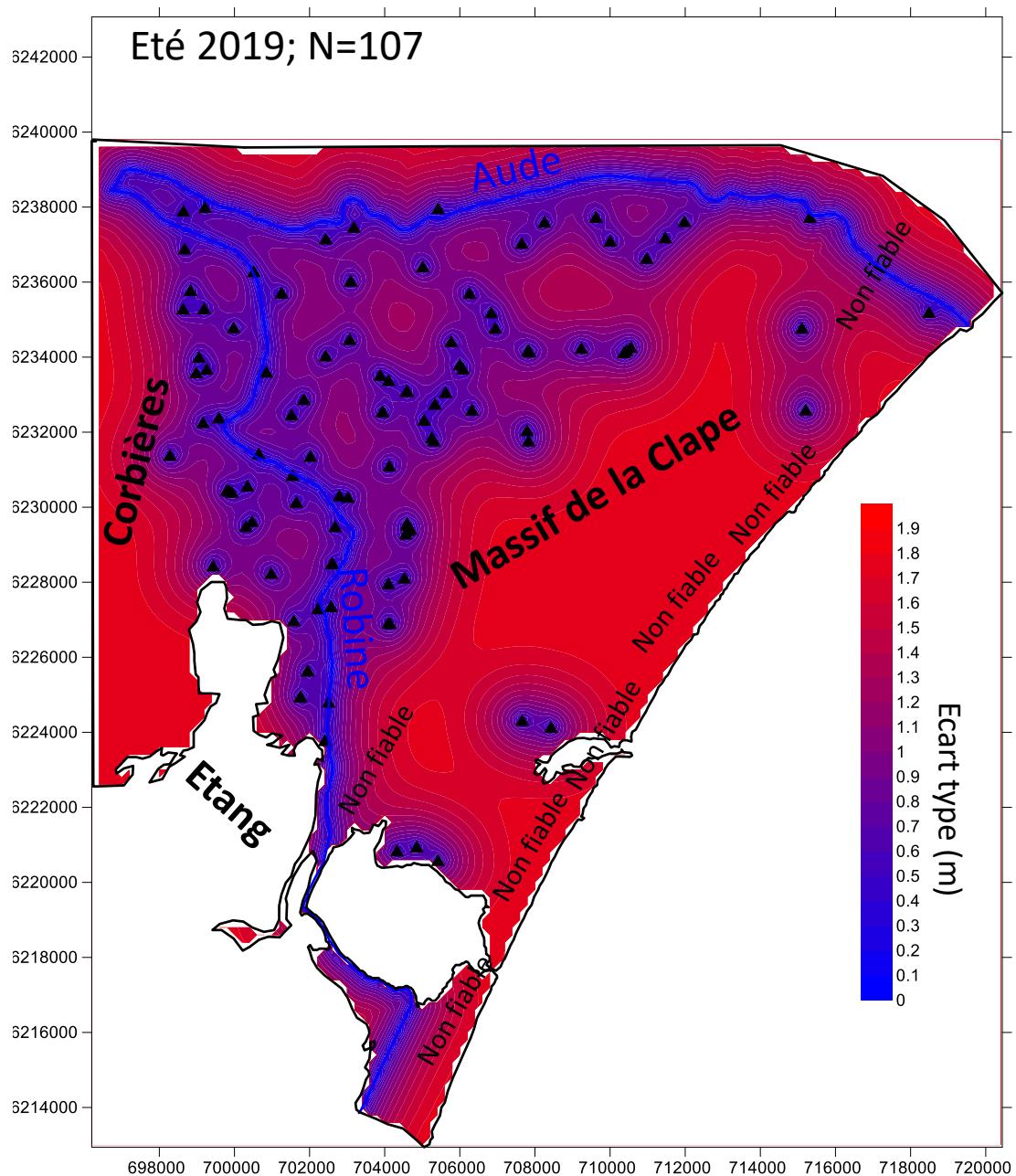


Figure A-2. Ecart type de la carte piézométrique du Quaternaire, été 2019. Variogramme de la profondeur du niveau piézométrique, modèle sphérique (var. : 3,0 ; portée : 3 500 m).

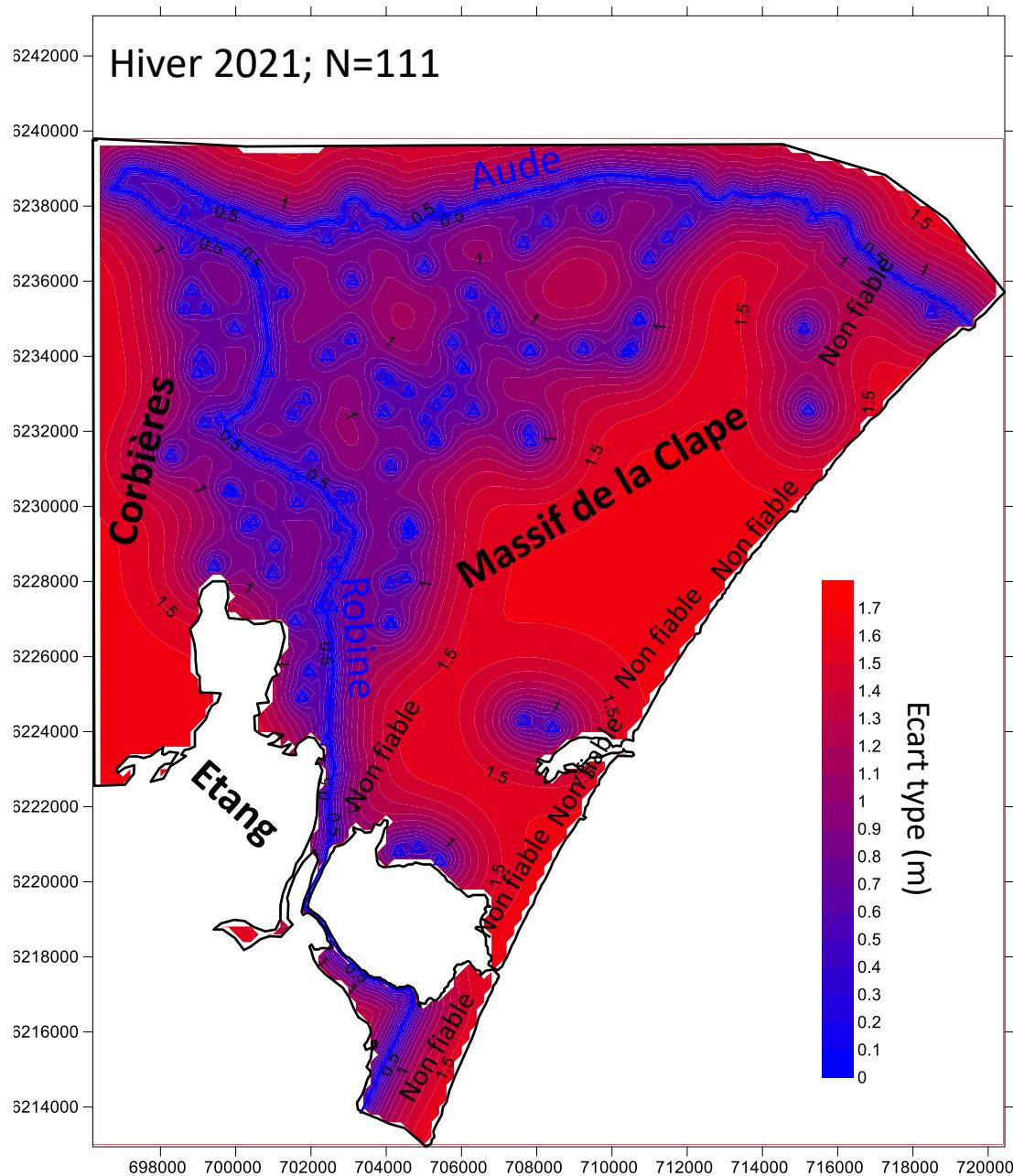


Figure A-3. Ecart type de la carte piézométrique du Quaternaire, hiver 2021. Variogramme de la profondeur du niveau piézométrique, modèle sphérique (var. : 2,5 ; portée : 3 500 m).

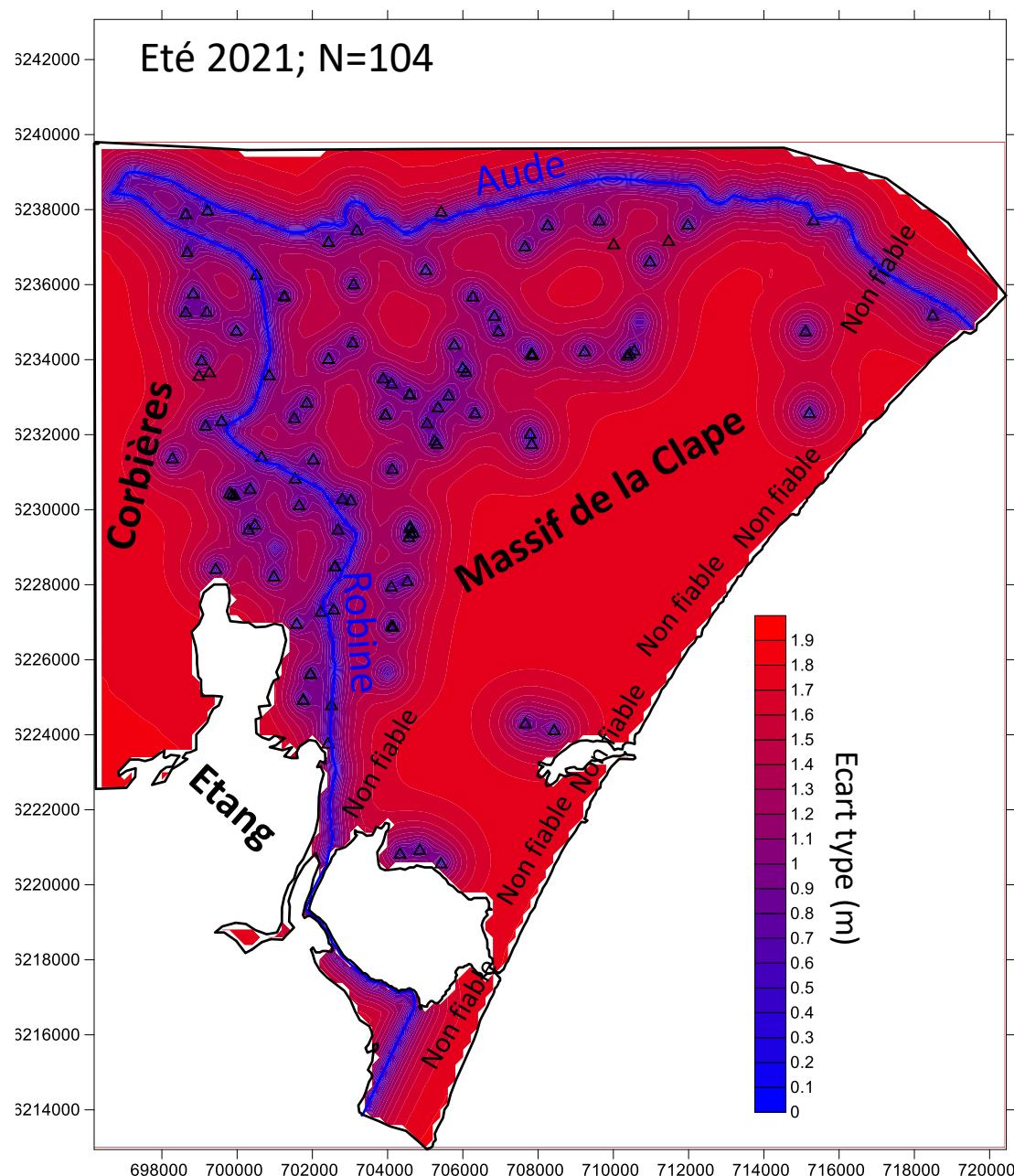
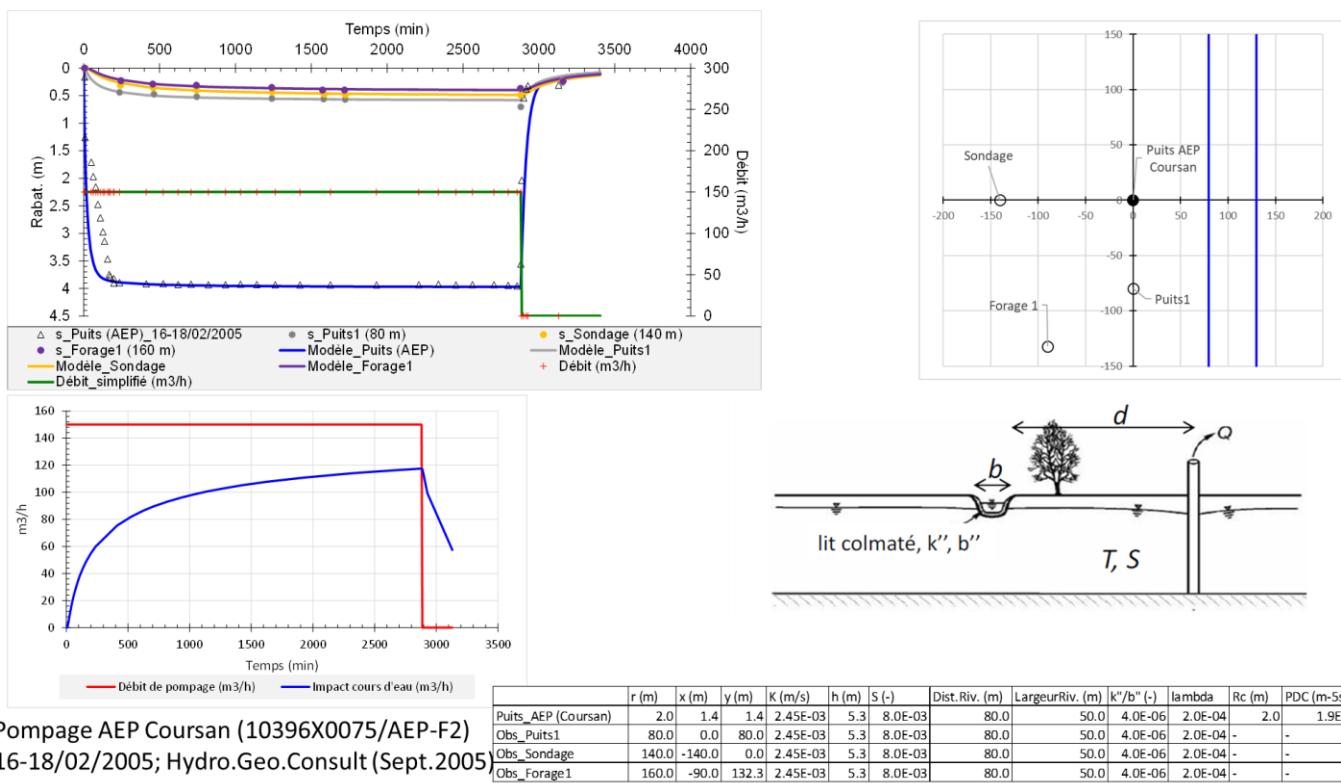


Figure A-4. Ecart type de la carte piézométrique du Quaternaire, hiver 2021. Variogramme de la profondeur du niveau piézométrique, modèle exponentiel (var. : 3,1 ; portée : 1 100 m).



Réinterprétation de l'essai par pompage du forage AEP de Coursan, source des données Hydro.Géo.Consult (sept.2005). Modèle : aquifère avec cours d'eau incisant partiellement l'aquifère (modification de Hunt, 1999).



*Liberté
Égalité
Fraternité*

Centre scientifique et technique

3, avenue Claude-Guillemain

BP 36009

45060 – Orléans Cedex 2 – France

Tél. : 02 38 64 34 34

Direction régionale ou UTAM

Adresse

Tél. :

www.brgm.fr



Géosciences pour une Terre durable

brgm