Salinisation des eaux et des sols en zone côtière méditerranéenne : état, évolution et indicateurs. Application aux basses-plaines de l'Aude

Laurène Marien

▶ **To cite this version:**

Laurène Marien. Salinisation des eaux et des sols en zone côtière méditerranéenne : état, évolution et indicateurs. Application aux basses-plaines de l'Aude. Sciences de l'environnement. Institut Agro - Montpellier, 2023. Français. ⟨NNT : ⟩. ⟨tel-04871896⟩

HAL Id: tel-04871896

https://hal.science/tel-04871896v1

Submitted on 7 Jan 2025

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Distributed under a Creative Commons CC0 1.0 - Universal - International License

THÈSE POUR OBTENIR LE GRADE DE DOCTEUR DE L'INSTUTUT AGRO MONTPELLER ET DE L'UNIVERSITE DE MONTPELLIER

En Sciences de la Terre et de l'Eau

École doctorale GAIA – Biodiversité, Agriculture, Alimentation, Environnement, Terre, Eau
Portée par

Unité de recherche UMR GEAU (Gestion de l'Eau, Acteurs, Usages)

Salinisation des eaux et des sols en zone côtière méditerranéenne : état, évolution et indicateurs. Application aux basses-plaines de l'Aude

Présentée par Laurène MARIEN
Le 21 décembre 2023

Sous la direction de François COLIN

Devant le jury composé de

Christophe CUDENNEC, professeur, Institut Agro Rennes-Angers	Rapporteur
Maritxu GUIRESSE, professeur, Institut Nat. Polytechnique/Ecole Nat. Sup. d'Agronomie Toulouse	Rapporteur
Stéphane DE TOURDONNET, professeur, Institut Agro Montpellier	Examinateur
Stéphane GHIOTTI, directeur de recherche, CNRS	Examinateur
Christèle LEAUTHAUD, chercheur, CIRAD	Examinateur
François COLIN, professeur, Institut Agro Montpellier	Directeur de thèse
Armand CRABIT, maitre de conférence, Institut Agro Montpellier	Co-encadrant de thèse
Perrine FLEURY, hydrogéologue, BRGM	Co-encadrant de thèse

UNIVERSITÉ DE MONTPELLIER

L'INSTITUT agro Montpellier

THÈSE POUR OBTENIR LE GRADE DE DOCTEUR DE L'INSTUTUT AGRO MONTPELLER ET DE L'UNIVERSITE DE MONTPELLIER

En Sciences de la Terre et de l'Eau

École doctorale GAIA – Biodiversité, Agriculture, Alimentation, Environnement, Terre, Eau
Portée par

Unité de recherche UMR GEAU (Gestion de l'Eau, Acteurs, Usages)

Salinisation des eaux et des sols en zone côtière méditerranéenne : état, évolution et indicateurs. Application aux basses-plaines de l'Aude

Présentée par Laurène MARIEN
Le 21 décembre 2023

Sous la direction de François COLIN

Devant le jury composé de

Christophe CUDENNEC, professeur, Institut Agro Rennes-Angers	Rapporteur
Maritxu GUIRESSE, professeur, Institut Nat. Polytechnique/Ecole Nat. Sup. d'Agronomie Toulouse	Rapporteur
Stéphane DE TOURDONNET, professeur, Institut Agro Montpellier	Examinateur
Stéphane GHIOTTI, directeur de recherche, CNRS	Examinateur
Christèle LEAUTHAUD, chercheur, CIRAD	Examinateur
François COLIN, professeur, Institut Agro Montpellier	Directeur de thèse
Armand CRABIT, maitre de conférence, Institut Agro Montpellier	Co-encadrant de thèse
Perrine FLEURY, hydrogéologue, BRGM	Co-encadrant de thèse

UNIVERSITÉ DE MONTPELLIER

L'INSTITUT agro Montpellier

Remerciements

Je souhaite tout d'abord exprimer mon infinie reconnaissance à François Colin, mon directeur de thèse et à Armand Crabit, mon encadrant, sans qui je n'aurais jamais pu mener à bien ce travail. Je les remercie tous deux très sincèrement pour leurs conseils et encouragements. Vous m'avez apporté un soutien infaillible et m'avez montré la voie qu'il me plairait de suivre dans mon avenir professionnel. Pour toutes vos qualités humaines, votre pédagogie et votre sagesse merci. Merci à Perrine Fleury pour les échanges, les conseils et les journées sur le terrain qui m'ont laissé de beaux souvenirs.

Je tiens à remercier chaleureusement Stéphane De Tourdonnet, Sthephane Ghiotti et Crystèle Leauthaud d'avoir accepté de participer à ce jury ainsi que Christophe Cudennec et Maritxu Guiresse qui ont bien voulu être rapporteurs de cette thèse.

Merci à Stéphane Follain, Bruno Cheviron et Severin Pistre qui ont aiguillé l'évolution de ce travail en y apportant leur avis critique. Je remercie sincèrement Benoit Dewandel, Bernard Ladouche et Tiphaine Salel pour leur indispensable contribution à la réalisation de ce travail.

Merci à mes acolytes de thèse, colocataires de bureau, Victor et Laurie pour leurs encouragements, leur soutien et leur amitié. Un immense merci aux étudiants et stagiaires en particulier Florian et Evaelle ayant participé à ce travail de thèse avec curiosité et bonne humeur.

Je tiens également à remercier très chaleureusement tous les viticulteurs et acteurs du territoire qui ont accepté de participer aux enquêtes nourrissant cette thèse et aux partenaires du projet SALiN qui a permis que cette thèse voit le jour.

Un grand merci également aux membres de l'UMR GEAU pour l'accueil et la bonne atmosphère dans laquelle j'ai pu effectuer ce travail de thèse. Merci à Mylène et Rossano pour leur gentillesse et disponibilité depuis de nombreuses années.

Je remercie toutes les personnes avec qui j'ai partagé mes études et notamment ces années de thèse.

Mes derniers remerciements vont à ma famille et mes amis (Marseillais et Montpelliérains, anciens et récents) qui m'ont soutenu et supporté pendant ces années de thèse.

Résumé

La salinisation des sols et des eaux est une problématique environnementale majeure, particulièrement préoccupante dans les zones côtières. Cette étude se focalise sur la région des Basses Plaines de l'Aude, située dans le sud de la France, afin de comprendre les mécanismes sous-jacents de la salinisation dans un contexte de changement climatique et d'évolutions des usages des terres. Cette étude vise à analyser l'évolution paysagère de la région, à établir un diagnostic complet de la salinité des sols et des eaux, et à comprendre les dynamiques historiques et contemporaines de gestion de l'eau dans cette région. Des campagnes de mesure ont été menées sur l'ensemble de la région, couvrant les sols, les eaux de surface et souterraines. Les paramètres physico-chimiques de 348 points d'échantillonnage de sols répartis dans la zone à différentes profondeurs ont été relevés. La salinité est exprimée par la conductivité électrique (CE) pour les eaux et sur extraits de pâte saturée (CE_{sp}) pour les sols. Des entretiens ont été menés pour établir les éléments liés à l'histoire agricole, aux infrastructures hydrauliques et aux événements climatiques. Des enquêtes auprès des viticulteurs permet d'analyser les pratiques et perceptions liées au phénomène de salinisation.

L'état des lieux de la salinité dans la zone d'étude a montré une grande variabilité de la salinité dans l'espace. La salinité des sols d'origine marine croît en fonction de l'altitude décroissante, varie en fonction du type de sol, avec une salinité particulièrement élevée pour les salisols réductiques (34,2 $mS.cm^{-1}$ en surface et 26,4 $mS.cm^{-1}$ en profondeur) et pour les fluviosols à horizon réductique en profondeur (9,5 $mS.cm^{-1}$ en surface et 11,4 $mS.cm^{-1}$). La salinité est décroissante en fonction d'un gradient d'anthropisation, avec des valeurs faibles pour les vignes à forte pour les espaces naturels. Enfin, elle varie en fonction de la gestion agricole avec notamment une différence significative pour les zones sans gestion portée par une ASA. Cette région a connu des changements géographiques significatifs au fil du temps, passant d'une ria à un delta et à une plaine marécageuse, transformée par les activités humaines. Cette analyse met en lumière la notion de delta anthropique et questionne sur l'efficience des prélèvements d'eau dans la partie aval du fleuve Aude. Une analyse spatiale des données de salinité des sols et une analyse géochimique des différents prélèvements des eaux montrent une relation entre salinité des sols et distance aux aménagements anciens de gestion des eaux. Les valeurs de salinité des sols les plus élevées se trouvent en correspondance avec des eaux souterraines dont la signature géochimique indique la présence d'eaux de mers sur-salées, associées à d'anciennes zones d'exploitation du sel et diluées par les pluies et les submersions. Enfin, l'analyse des pratiques de gestion existantes et des perceptions des viticulteurs à l'égard de la salinité, en leur corrélation avec les données mesurées sur leurs exploitations révèlent une diversité d'associations entre pratiques, perceptions et salinité qui constitue une ressource pour l'adaptation du territoire constituant une base d'échanges pour une évolution des pratiques dans le futur.

Une approche interdisciplinaire pour mieux appréhender la problématique complexe de la salinisation dans cette zone côtière méditerranéenne est nécessaire. Le phénomène de salinisation apparaît comme multifactoriel et sa caractérisation met en évidence l'importance d'une gestion adaptée par zone. Ces unités de gestion sont spécifiques mais sous influence d'une stratégie globale et d'une réglementation commune.

Abstract

The salinisation of soil and water is a major environmental issue, particularly worrying in coastal areas. This study focuses on the Basses Plaines de l'Aude region, in the south of France, in order to understand the underlying mechanisms of salinisation in the context of climate change and changes in land use. The aim of the study is to analyse changes in the region's landscape, establish a comprehensive diagnosis of soil and water salinity, and understand the historical and contemporary dynamics of water management in the region. Measurement campaigns were carried out throughout the region, covering soil, surface water and groundwater. The physico-chemical parameters of 348 soil sampling points spread across the area at different depths were recorded. Salinity is expressed by electrical conductivity (EC) for water and on saturated paste extracts (ECsp) for soil. Interviews were conducted to establish the elements relating to agricultural history, hydraulic infrastructures and climatic events. Surveys of winegrowers were used to analyse practices and perceptions relating to the phenomenon of salinisation.

The survey of salinity in the study area showed that salinity varies widely in space. The salinity of soils of marine origin increases with decreasing altitude and varies according to soil type, with particularly high salinity for reductive salisols (34.2 mS.cm-1 at the surface and 26.4 mS.cm-1 at depth) and for fluviosols with a reductive horizon at depth (9.5 mS.cm-1 at the surface and 11.4 mS.cm-1). Salinity decreases according to a gradient of anthropisation, with low values for vineyards and high values for natural areas. Finally, it varies according to agricultural management, with a significant difference for areas not managed by an ASA. This region has undergone significant geographical changes over time, moving from a ria to a delta and a marshy plain, transformed by human activities. This analysis highlights the notion of an anthropogenic delta and raises questions about the efficiency of water abstraction in the downstream section of the River Aude. A spatial analysis of soil salinity data and a geochemical analysis of the various water samples show a relationship between soil salinity and distance from former water management facilities. The highest soil salinity values correspond to groundwater whose geochemical signature indicates the presence of over-salted sea water, associated with former salt mining areas and diluted by rainfall and flooding. Lastly, an analysis of existing management practices and winegrowers' perceptions of salinity, correlated with data measured on their farms, reveals a diversity of associations between practices, perceptions and salinity, providing a resource for adapting the area and a basis for discussion on how to change practices in the future.

An interdisciplinary approach is needed to gain a better understanding of the complex issue of salinisation in this Mediterranean coastal zone. The phenomenon of salinisation appears to be multifactorial and its characterisation highlights the importance of management adapted to each zone. These management units are specific but under the influence of an overall strategy and common regulations.

Sommaire

Introduction 7

Chapitre 1 : Salinité des eaux et des sols en zone littorale : positionnement du problème 11

1. Définitions et enjeux 11

1.1 Salinité des sols 11

1.2 Origines de la salinité 12

1.3 Impacts liés à la salinité 14

1.4 Salinité en zone littorale 16

2. Présentation d'un site d'étude en zone littorale méditerranéenne 18

2.1 Géomorphologie 19

2.2 Types de sols 22

2.3 Occupation des sols 25

2.4 Réseaux hydrographiques et aménagements hydrauliques 27

2.5 Le Projet S.A.L.I.N : actions, acteurs, enjeux, stratégie 31

3. Problématique de la thèse 32

Chapitre 2 : Etat de la salinité des eaux et des sols de la basse-plaine de l'Aude 35

1. Introduction 35

2. Matériels et méthodes 37

2.1 Stratégie d'échantillonnage 37

2.1.1 Echantillonnage des sols dans l'espace 37
2.1.2 Échantillonnage des sols dans le temps 38
2.1.3 Echantillonnage des eaux 39

2.2 Mesures 40

2.2.1 Mesures de la salinité 40
2.2.2 Mesures des propriétés de sol in-situ 41
2.2.3 Mesures en laboratoire 42

2.3 Analyses des données 43

2.3.1 Structure spatiale de la salinité à l'échelle de la Basse Plaine 43
2.3.2 Salinité et facteurs paysagers 44
2.3.3 Variations temporelles de la salinité à l'échelle de la basse-plaine 44
2.3.4 Variabilité temporelle intra parcellaire de la salinité 44
3. Résultats & discussions 45
3.1 Ordres de grandeur de la salinité dans la basse-plaine de l'Aude 46
3.1.1 Relation entre extraits sur pâte saturée et extrait à l'eau 46
3.1.2 Statistiques descriptives des valeurs de salinité sur l'ensemble des échantillons 47
3.2 Origine de la salinité 50
3.2.1 Salinité des sols 50
3.2.2 Salinité des eaux 52
3.3 Organisation spatiale de la salinité dans la basse-plaine de l'Aude 54
3.3.1 Structure spatiale de la salinité 54
3.3.2 Distribution de la salinité selon les facteurs du paysage 56
3.3.2.1 Salinité et géomorphologie 56
3.3.2.2 Salinité et types de sols 58
3.3.2.3 Salinité et occupation du sol 59
3.3.2.4 Salinité et unités de gestions de l'eau agricole 60
3.4 Dynamiques locales de la salinité 61
3.4.1 Variations dans le temps 61
3.4.2 Effets des submersions sur la salinité 63
4. Conclusions 65
Chapitre 3 : Redistribution des eaux dans la basse-plaine de l'Aude au cours du temps ... 68
1. Introduction 68
2. La Basse plaine sur les derniers millénaires : - 10000 ans à aujourd'hui 69
2.1 Evolution au cours de la première moitié de l'Holocène 71
2.2 Evolution au cours de la deuxième moitié de l'Holocène 72
2.3 Evolution au cours des deux derniers millénaires 74
2.4 Conclusion 75
3. Historique des interactions eau-agriculture dans la basse-plaine de l'Aude 75
3.1 Matériels et méthodes 76
3.1.1 Guide d'entretien 76
3.1.2 Acteurs et structures d'appartenance 76

3.1.3 Frise chrono-systémique 78
3.2 Résultats 79
3.2.1 De la création de Narbonne au XV^{ème} siècle 79
3.2.2 Du XV^{ème} au XVIII^{ème} siècle 83
3.2.3 Du XVIII^{ème} au XIX^{ème} siècle 86
3.2.4 Du XIX^{ème} au XX^{ème} siècle 90
3.2.5 Frise chrono-systémique 92
3.3 Conclusion 95
4. Redistribution actuelle de l'eau dans la Basse Plaine 96
4.1 Matériel et méthodes 97
4.1.1 Données climatiques 97
4.1.2 Données de débit de l'Aude 98
4.1.3 Données sur les écoulements souterrains 99
4.1.4 Données sur la recharge de la nappe 99
4.1.5 Données sur les eaux domestiques 100
4.1.6 Données sur les prélèvements sur le Canal de la Robine 100
4.1.7 Données sur le drainage superficiel vers les étangs 103
4.2 Résultats 103
4.2.1 Précipitations et évapotranspiration 103
4.2.2 Crues de l'Aude 106
4.2.3 Écoulements souterrains 107
4.2.4 Recharge de la nappe 110
4.2.5 Eaux domestiques 111
4.2.6 Système Robine 111
4.2.7 Grands canaux de drainage collecteurs 112
4.3 Conclusion 114
5. Discussion et conclusion 117
Chapitre 4 : Salinity spatial patterns in Mediterranean coastal areas: The legacy of historical water infrastructures 120
1. Introduction 121
2. Study site 122
2.1 Geological and soils characteristics 122
2.2 Agriculture, natural areas and water management 124
3. Materials and methods 124
3.1 Soil measurements 124

3.2 Water measurements 125

4. Results 125

4.1 Soil salinity pattern 125

4.2 Water quality 126

5. Discussion 126

5.1 Soil salinity assessment at regional scale 126

5.2 Long term landscape management impacts on soil and water salinity 127

6. Conclusion 129

Chapitre 5 : Etude des pratiques agricoles, des perceptions et de l'état de la salinité en zone côtière méditerranéenne : cas de la viticulture dans la basse-plaine de l'Aude (France) ..133

1. Introduction 133

2. Matériel et méthodes 135

2.1 Protocoles d'enquête 135

2.2 Pratiques agricoles 136

2.3 Perception de la salinité 140

2.4 Validation par les acteurs du territoire 141

2.5 Salinité du sol 142

3. Résultats 142

3.1 Pratiques en lien avec la salinité 142

3.1.1 Typologie des pratiques 143
3.1.2 Description des groupes de pratiques 146

3.2 Perceptions de la salinité par les viticulteurs 150

3.2.1 Perceptions des symptômes 151
3.2.2 Perceptions de l'évolution de la pression saline 154

3.3 Etat de la salinité mesurée 157

4. Discussion 159

4.1 Pratiques et perceptions de la salinité 160

4.2 Synthèse Pratiques - Perceptions - Salinité 161

4.3 Implications pour la gestion de la salinité dans le territoire 164

4.4 Intérêt d'une approche intégrée entre salinité, pratiques, perceptions 166

5. Conclusion 167

Conclusion 169

Liste des figures 173

Liste des tableaux 177

Références 178

Annexes 192

Annexe A : Statistiques de salinité par composante du paysage 192

Annexe B : Approche multi-factorielle : analyse en composantes multiples (ACM) ... 194

Annexe C : Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) 200

Annexe D : Comparaison des classes 204

Annexe E : 2 exemples de guides d'entretien orientés selon la structure enquêtée . 205

Annexe F : Questionnaire d'enquête pour les viticulteurs : Diagnostic de la basse plaine de l'Aude, identification des pratiques en lien avec la salinisation des eaux et des sols 217

Introduction

Introduction

La salinisation des eaux et des sols constitue une menace majeure pour les terres agricoles et pour la biodiversité des espaces naturels. En Europe, 3,8 millions d'hectares de terre sont touchés par le phénomène de la salinisation des sols (Shahid et al., 2018). L'intensité du phénomène, particulièrement élevée dans les zones côtières, peut entraîner une détérioration des ressources en eau, en sol et de la biodiversité. Les impacts de cette salinisation des sols et des eaux peuvent intervenir à plusieurs échelles, impactant les milieux naturels avec une détérioration de la qualité des sols (Epstein, 1980), une perte de la biodiversité (Vernberg, 1993) causée par l'altération et la mort des plantes par réduction de la disponibilité en eau douce dans la zone racinaire (Munns & Tester, 2008). Les répercussions peuvent également avoir un impact anthropique avec une diminution des rendements en agriculture (Feinerman et al., 1982; J. Li et al., 2012; Maas & Hoffman, 1977; Rengasamy, 2010) ou de la disponibilité en eau potable.

L'origine peut être naturelle, par exemple par altération physique ou chimique de la roche mère, intrusion d'eau de mer ou présence de sels fossiles ou atmosphériques, on parle alors de salinisation primaire. Il existe également une salinisation dite secondaire sous influence anthropique telles que l'utilisation d'eau d'irrigation chargée, d'engrais ou encore l'utilisation massive d'eau de nappe qui accentue le phénomène d'intrusion marine (Daliakopoulos et al., 2016).

Dans un contexte de changement climatique, il paraît important de comprendre les mécanismes liés à la salinité des eaux et sols.

Ce phénomène présent dans les Basses Plaines de l'Aude est ancien et géré par des pratiques de lutte par apport d'eau douce lors de submersions et mise en place d'un système de drainage des eaux de lixiviation. A dire d'acteurs, la problématique de salinisation est de plus en plus prégnante dans la Basse-Plaine de l'Aude, portant atteinte aux productions agricoles présentes dans la zone et à l'environnement. Face aux grands enjeux territoriaux de préservation des systèmes agricoles, de la ressource en eau et de la biodiversité des zones naturelles contribuant à l'économie locale, le programme SALiN (Salinisation des Aquifères Littoraux de la Narbonnaise) a été 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 prélèvements AEP et la gestion hydraulique des terrains naturels ou semi-naturels.

Ce travail de thèse s'ancre dans le projet territorial SALiN permettant de mettre en relation les connaissances techniques d'institutions telles que le BRGM sur le sous-sol et l'Institut Agro sur le sol et les plantes aux connaissances d'acteurs et agriculteurs à titre d'experts du territoire.

La problématique principale est de comprendre le phénomène de salinisation des sols et des eaux en zone côtière méditerranéenne et son impact face à un changement global, à savoir, changement climatique et d'usages des terres.

Pour répondre à cette problématique, la démarche d'étude choisie est pluridisciplinaire, afin de mettre en regard différents angles d'approche du phénomène. L'étude regroupe l'analyse de l'évolution paysagère de la région, l'établissement d'un diagnostic complet de la salinité des sols et des eaux, et la compréhension des dynamiques historiques et contemporaines de gestion de l'eau dans cette région.

Le premier chapitre se consacre à positionner les questions scientifiques développées dans la thèse. Il commence par un rappel d'éléments de définition et d'enjeux liés à la salinité des eaux et des sols issus de la bibliographie. Il se poursuit par une présentation du site d'étude de la basse-plaine de l'Aude incluant une caractérisation géomorphologique basée sur l'altitude et la topographie, des types de sols, de l'occupation du sol sur une période de quinze ans (2003-2018), du réseau hydrographique et des infrastructures hydrauliques

Le deuxième chapitre consiste en un diagnostic approfondi de la salinité dans la Basse-Plaine de l'Aude. Des campagnes de mesure ont été menées sur l'ensemble de la région, couvrant les sols, les eaux de surface et les eaux souterraines. Les paramètres physico-chimiques des sols ont été relevés sur le terrain, avec 348 points d'échantillonnage répartis dans la zone, permettant une analyse détaillée de la salinité des sols à différentes profondeurs. La salinité est évaluée à l'aide de la conductivité électrique (CE) directement mesurées dans les cours d'eau, les canaux agricoles, les eaux souterraines et pour les sols sur des extraits aqueux et

corrélée à la conductivité sur extraits de pâte saturée. Ces données permettent de dresser un état spatialisé de la salinité dans pour les différents compartiments sur le territoire étudié.

Le troisième chapitre se penche sur la mise en place géologique et l'évolution historique de la Basse-Plaine de l'Aude. Cette région a connu des changements géographiques significatifs au fil du temps, passant d'une ria à un delta et à une plaine marécageuse, transformée par les activités humaines, notamment la construction du canal de la Robine au Moyen-Âge. Des entretiens ont été menés pour établir les éléments liés à l'histoire agricole, aux infrastructures hydrauliques et aux événements climatiques. Ces données ont été analysées pour créer une frise chronosystémique retraçant l'évolution de la gestion de l'eau dans la Basse-Plaine de l'Aude. Cette analyse met également en lumière la notion de delta anthropique et pose des questions sur la notion de prélèvements d'eau dans la partie aval du fleuve Aude.

Le quatrième chapitre a fait l'objet d'un article intitulé « Salinity spatial patterns in Mediterranean coastal landscape: the legacy of the historical water management and land planning" et publié dans la revue Science of The Total Environment ((Marien et al., 2023). Il propose une analyse spatiale des données de salinité des sols et une analyse géochimique des différents prélèvements dans les eaux de surface et souterraines. Les résultats montrent une relation entre salinité des sols et distance aux aménagements anciens de gestion des eaux. Ils montrent également que les valeurs de salinité des sols les plus élevées se trouvent en correspondance avec des eaux souterraines dont la signature géochimique indique la présence d'eaux de mers sur-salées, probablement anciennes et associées à des zones d'exploitation du sel, et qui ont subies une dilution par les pluies efficaces et les apports massifs liés aux pratiques de submersions.

Le dernier chapitre confronte les pratiques agricoles et les perceptions en lien avec la salinité avec l'état actuel de salinité. Des typologies de pratiques et des catégories de perception ont été établis à partir de données d'enquête et d'entretien avec des viticulteurs de la zone d'étude. Ces typologies ont été confrontées entre elles et avec des mesures directes de salinité. Les inter-relations apparaissent complexes entre les 3 dimensions. Elles peuvent être appréhendées avec une entrée par type de paysage et fournissent des éléments intéressants de prospective pour le territoire.

Chapitre 1 : Salinité des eaux et des sols en zone littorale : positionnement du problème

Chapitre 1 : Salinité des eaux et des sols en zone littorale : positionnement du problème

Ce chapitre a pour ambition de définir la problématique de ce travail de recherche. Tout d'abord, quelques définitions sur la salinité, ses origines, les processus qu'elle implique et ses enjeux sont rapportés à partir de la bibliographie. Ensuite, les grandes caractéristiques physiographiques du site d'étude sur lequel ont porté les recherches sont présentées. Enfin, les partis pris et les types de questionnement de recherche sont introduits.

1. Définitions et enjeux

1.1 Salinité des sols

Les sols sont dits "salés" lorsqu'ils présentent la caractéristique de contenir des sels plus solubles que le gypse (sols gypsiques) et la calcite (sols calciques), comme des sels chlorurés ($NaCl$, KCl, $MgCl_2$, $CaCl_2$), sulfatés (Na_2SO_4, $MgSO_4$), bicarbonatés ($NaHCO_3$), carbonatés (NCO_3) ou des sels plus ou moins hydratés (Montoroi, 1993). La salinité d'un sol peut alors évoluer selon deux principaux processus d'accumulation de ces sels : la salinisation et la sodisation.

La salinisation des sols fait référence à l'accumulation d'ions de sels dissous dans le profil de sol principalement sous forme calcium (Ca^{2+}), sodium (Na^{+}), potassium (K^{+}), magnésium (Mg^{2+}), chlorures (Cl^{-}), sulfates (SO_4^{2-}), nitrates (NO_3^{-}) et bicarbonates (HCO_3^{-}) (Shrestha, 2006). La sodisation fait, elle, référence à la saturation progressive du complexe organo-minéral par l'ion Na^{+} pouvant engendrer une dégradation des propriétés physiques et chimiques des sols. Celle-ci s'observe particulièrement sur la structure des sols et la dispersion des argiles qui peuvent être alors lixiviés sous l'action de l'infiltration des eaux de surface.

Parmi les sols salés, on distingue les sols salins, sodiques et salino-sodiques classés par l'U.S. Salinity Laboratory Staff en 1954 (U.S. Salinity Laboratory Staff, 1954) selon leur valeur de

conductivité électrique sur extrait de pâte saturée (EC_{sp}), leur pH et leur pourcentage de sodium échangeable (ESP) :

- les sols salins ont une EC_{sp} > 4 dS.cm^{-1}, une valeur de pH < 8,5 et un ESP < 15% ;
- les sols sodiques sont caractérisés par une EC_{sp} < 4 dS.cm^{-1}, un pH > 8,5 et un ESP > 15% ;
- les sols sali-sodiques combinent les caractéristiques des types de sols précédents avec une EC_{sp} > 4 dS.cm^{-1}, un pH < 8,5 et un ESP > 15% (Rhoades et al., 1999).

L'ESP, utilisé comme indicateur du caractère sodique, est calculé à partir du rapport entre la concentration ionique en sodium échangeable et la capacité d'échange cationique (CEC) (eq.1).

$$ESP = \frac{[Na+]}{CEC} \times 100 \qquad \text{Eq.1}$$

avec ESP : pourcentage de sodium échangeable (%)

[Na^+] : concentration en ions sodium échangeables (meq.100g^{-1})

CEC : capacité d'échange cationique (meq.100g^{-1})

La CEC est la capacité maximale de cations qu'un sol peut absorber sur son complexe d'échange. La CEC est fortement liée à la teneur en argile et en matière organique d'un sol et peut être influencée par le pH. Les cations présents dans la solution de sol vont se fixer, plus ou moins facilement en fonction de leur taille et leur charge, au complexe argilo-humique.

1.2 Origines de la salinité

La salinisation peut être d'origine naturelle, on parle alors de salinisation primaire, ou d'origine anthropique, on parle alors de salinisation secondaire (Figure 1).

La salinisation primaire dépend des processus d'altération physique ou chimique d'une roche mère, d'intrusion d'eau de mer ou dépôt d'aérosol en zone côtière et de transport de sels par les eaux souterraines (Daliakopoulos et al., 2016).

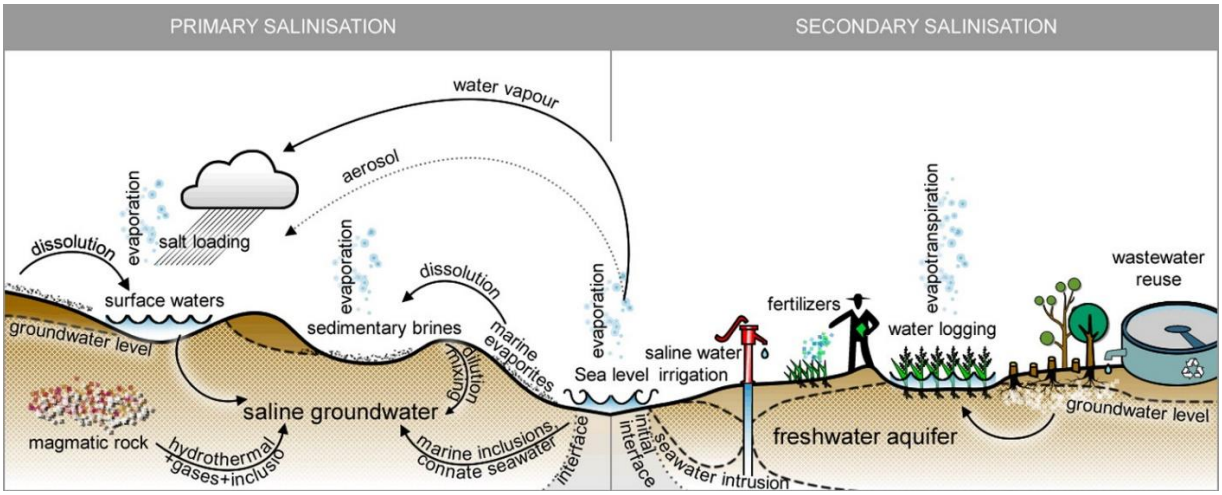


Figure 1 : Origine de la salinisation des sols (source Daliakopoulos et al., 2016)

L'origine des sels dans le profil de sol ou les eaux souterraines peut être due à la présence d'anciennes zones immergées piégeant le sel dans l'espace poreux des sédiments ou sous forme d'une lentille d'eau salée (Edmunds et al., 1987; Wendland et al., 2008). L'élévation actuelle du niveau de la mer provoquant l'inondation des terres et l'intrusion d'eau de mer souterraine sous forme de biseau salé sont dans certains cas à l'origine de la salinisation du profil de sol ou des eaux souterraines notamment au Pays-Bas (Raats, 2015) en Grèce, Espagne, Italie, Floride, côte Ouest africaine, Asie de l'Est et du Sud-Est (Van Weert et al., 2009).

Les sels présents dans les eaux souterraines peuvent remonter vers la surface par capillarité sous influence du phénomène d'évapotranspiration (Brandt et al., 2003; Chari et al., 2012) s'accumuler dans le profil de sol (Rengasamy, 2006). Ces remontées de sels dissous sont dépendantes de caractéristiques physiques des sols tels que la composition minéralogique des argiles, la texture, la structure, la porosité, la compaction, qui influencent le taux d'infiltration, la capacité de stockage de l'eau, la conductivité hydraulique (Chesworth, 2008; Van Beek & Tóth, 2012).

La salinisation secondaire est principalement due à une irrigation inadaptée riche en sel associée parfois à un mauvais drainage. D'autres causes anthropiques comme la pollution des sols peuvent intervenir, avec par exemple l'utilisation excessive d'engrais (Moreira Barradas et al., 2015), ou d'effluents des eaux usées (Moral et al., 2008) ou industriels (Lefebvre &

Moletta, 2006). Enfin, le déglaçage des routes peut entraîner un transport important de sel dans les sols (Houska, 2007; Mateo-Sagasta & Burke, 2011).

En plus des causes induites directement par l'Homme, certains phénomènes anthropiques accentuent la salinisation des sols quelque soit son origine : un mauvais drainage (Chesworth, 2008), une lixiviation insuffisante (Eckelmann et al., 2006), le changement d'utilisation des terres (Payen et al., 2016) ou encore un pompage excessif des nappes souterraines (Greene et al., 2016). Dans un contexte de changement climatique, le phénomène s'accentue, par exemple en Europe centrale et dans les plaines centrales des Etats-Unis (Trnka et al., 2013).

1.3 Impacts liés à la salinité

La salinisation des sols est une des principales causes de la dégradation des sols limitant leur productivité (Epstein, 1980). La salinité affecte 10% des terres arables réparties sur tous les continents et dans plus de 100 pays (Szabolcs, 1989).

L'accumulation des sels dans la zone racinaire impacte le potentiel hydrique total du sol, diminuant la disponibilité en eau pour la plante et entraînant une diminution de la croissance en 2 phases : une rapide par augmentation du potentiel osmotique externe et une plus lente par accumulation de Na+ dans les feuilles (Munns & Tester, 2008). Les ions salins peuvent également avoir une action toxique (Munns, 2002), par exemple l'accumulation de Na^+ et Mg^{2+} peut impacter la photosynthèse ou altérer les cellules, ou encore induire la production d'intermédiaires toxiques pour le métabolisme des plantes. L'augmentation de la pression osmotique du milieu et l'accumulation d'ions spécifiques dans les plantes peuvent ainsi fortement impacter la croissance des cultures et diminuer les rendements des cultures (Rengasamy, 2006, 2010). A ce phénomène s'ajoute une altération de la nutrition minérale des plantes (Verbruggen & Hermans, 2013) notamment un dérèglement de l'assimilation de l'azote minéral (Lovatt, 1985) indispensable aux fonctions physiologiques des plantes.

Du fait de ses impacts sur la végétation, la salinité des sols constitue donc un défi majeur dans le domaine de l'agriculture, car elle se révèle être un facteur limitant pour la production de cultures, mettant en péril la durabilité de l'agriculture dans certaines régions.

Selon un rapport de la FAO publié en 2011 (Dubois, 2011) qui reprend les éléments précédents, la salinité du sol est classée comme une menace responsable de la dégradation des terres dont les conséquences néfastes sur les cultures ont été démontrées (Rengasamy, 2006, 2010). Entravant le processus d'évapotranspiration, en réduisant le potentiel osmotique de la solution du sol, la présence de sel affecte la fermeture des stomates et perturbe ainsi la photosynthèse. Ceci entraîne une réduction de la croissance des plantes et de la production de biomasse végétale et peut conduire à la mort de la plante.

Tableau 1 : Classes de salinité basées sur la conductivité électrique sur extrait de pâte saturée (EC_{sp}) et les effets associés sur les plantes (FAO, 1988 ; L. A. Richards, 1954)

Catégorie de salinité des sols	CE_{sp} ($mS.cm^{-1}$)	Effet sur les cultures
Non-salé	0-2	Effets négligeables sur le rendement
Légèrement salé	2-4	Diminution de rendement des cultures très sensibles
Moyennement salé	4-8	Diminution de rendement de nombreuses cultures
Très salé	8-16	Seules les cultures tolérantes ont un rendement satisfaisant
Extrêmement salé	>16	Seules les cultures très tolérantes ont un rendement satisfaisant

Le Tableau 1 présente une classification générale de la salinité du sol par rapport à son impact sur les cultures. L'évaluation de la réponse des plantes à la salinité se base principalement sur leur rendement, en particulier sur le seuil au-delà duquel une perte de rendement est observée, ainsi que sur le taux de perte de rendement par augmentation de 1 $dS.m^{-1}$ de la conductivité d'un extrait de pâte saturée du sol (Maas & Hoffman, 1977).

Le seuil de déclenchement d'une réponse de rendement à la salinité est différent selon la culture (Feinerman et al., 1982; Maas & Hoffman, 1977). Certaines espèces sont considérées comme tolérantes au sel, notamment en contexte méditerranéen (Chartzoulakis, 2005; Paranychianakis & Chartzoulakis, 2005). Au contraire, la plupart des arbres fruitiers sont sensibles au sel, spécifiquement à cause de l'accumulation de NaCl au niveau des feuilles. Certaines espèces très tolérantes arrivent cependant à se développer en condition hautement saline. C'est le cas par exemple dans les marais salants (*Salt marshes*) qui sont des espaces remarquables caractérisés par une végétation spécifique et de forts taux de production primaire qui servent également d'habitat pour un grand nombre d'espèces animales

(Vernberg, 1993). Cette diversité floristique et faunistique reste néanmoins conditionnée à la diversité des habitats qui constituent le milieu, elle-même très fortement dépendante des conditions de salinité des eaux et des sols.

Par ailleurs, la forte concentration en sel dans les sols peut directement impacter la structure du sol et réduire la stabilité structurale des sols (Six et al., 2000) et ainsi favoriser l'érosion hydrique des sols (De La Paix et al., 2013). L'adsorption du sodium sur le complexe argilo-humique, peut engendrer un effet dispersant des argiles du sol et provoquer ainsi la rupture des agrégats et diminuer ainsi la perméabilité du sol. Les particules colloïdales issues de la dispersion des agrégats referment alors les pores du sol, réduisant ainsi la conductivité hydraulique et limitant le transport des contaminants colloïdaux associés (Sen & Khilar, 2006).

Cette modification des propriétés structurales de sols peut également altérer certains processus biologiques tels que la respiration, la minéralisation des résidus de plante entraînant une diminution de l'activité microbienne et la matière organique liée (Singh, 2016). Cette diminution des stocks de matière organique liée peut être à l'origine des faibles stocks de carbone organique dans les sols salins (Wong et al., 2010). De plus, les sols sodiques contiennent généralement beaucoup de carbonate qui peut compliquer la dynamique de minéralisation de la matière organique des sols. La salinité influence donc la biomasse et les activités microbiennes du sol, induisant un changement dans les flux de CO_2 et la nature des nutriments apportés à la végétation (Setia et al., 2013). En plus de l'impact sur les plantes, l'agriculture, la biodiversité ou la fonction écologique des sols, la salinisation des sols et des eaux souterraines peuvent impacter la ressource en eau potable dont les seuils de potabilité peuvent être dépassés.

1.4 Salinité en zone littorale

Dans les zones côtières, à l'interface entre terre et mer, plusieurs études s'intéressent à l'accentuation de facteurs de salinisation des eaux souterraines et des sols, par exemple l'intrusion d'eau de mer (Yu et al., 2014), et à l'impact des pratiques agricoles (Alexakis et al., 2015; Libutti et al., 2018). Les littoraux méditerranéens sont particulièrement concernés comme le montre la Figure 2 issue de la revue bibliographique de Daliakopoulos et al. (2016).

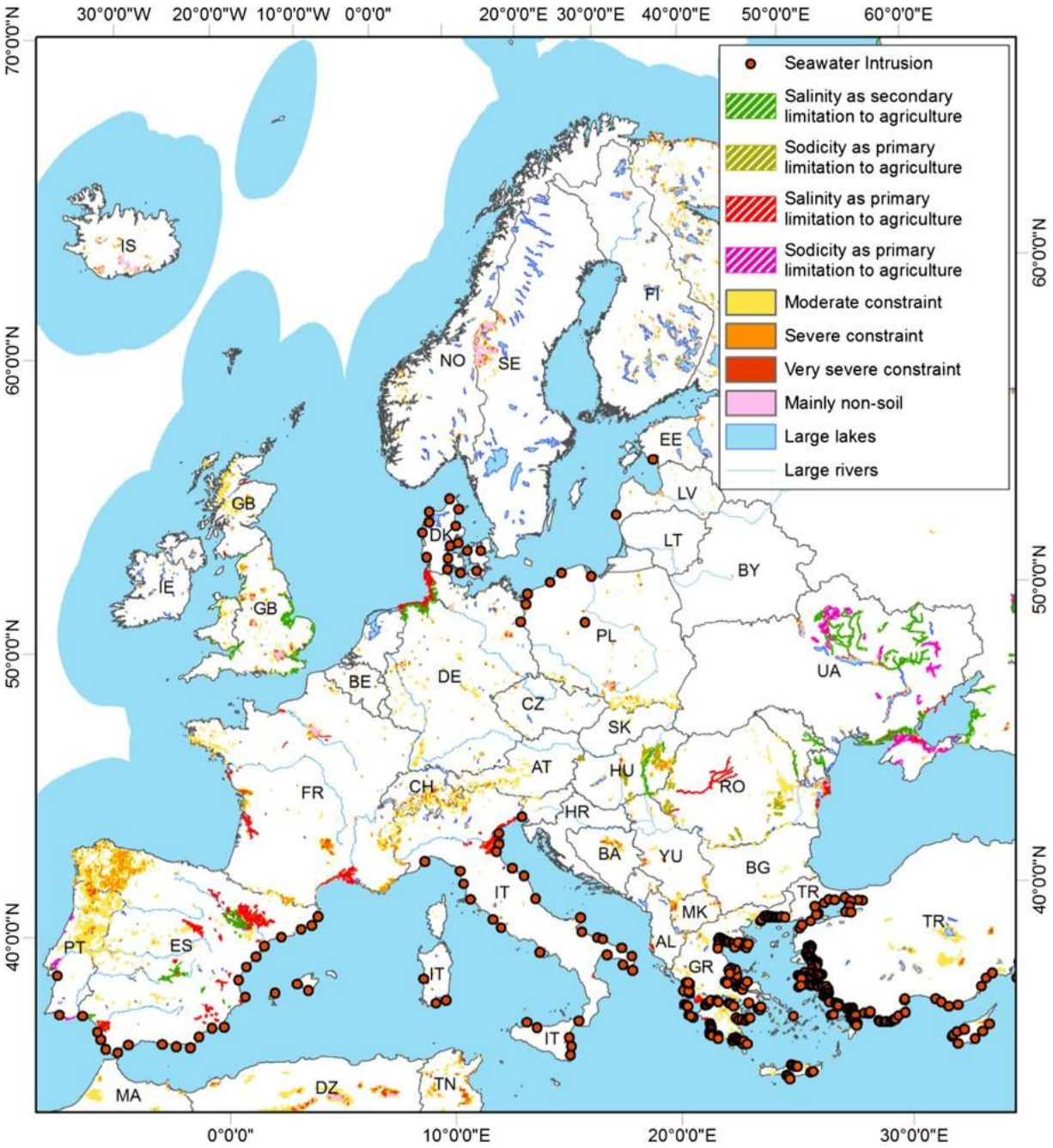


Figure 2 : Carte des sols impactés par le sel (extrait de Daliakopoulos et al., 2016)

Bless et al., (2018) proposent un modèle conceptuel de la salinisation en zone côtière inspiré de travaux dans le delta de l'Orb en zone méditerranéenne (Bless, 2019). Ce modèle, présenté à la Figure 3, fait interagir les trois compartiments, eau, sol et végétation, par des processus hydrologiques et sous contrôle climatique et humain. Il met en avant l'importance des stratégies de gestion reposant sur les aménagements et la gestion de l'eau.

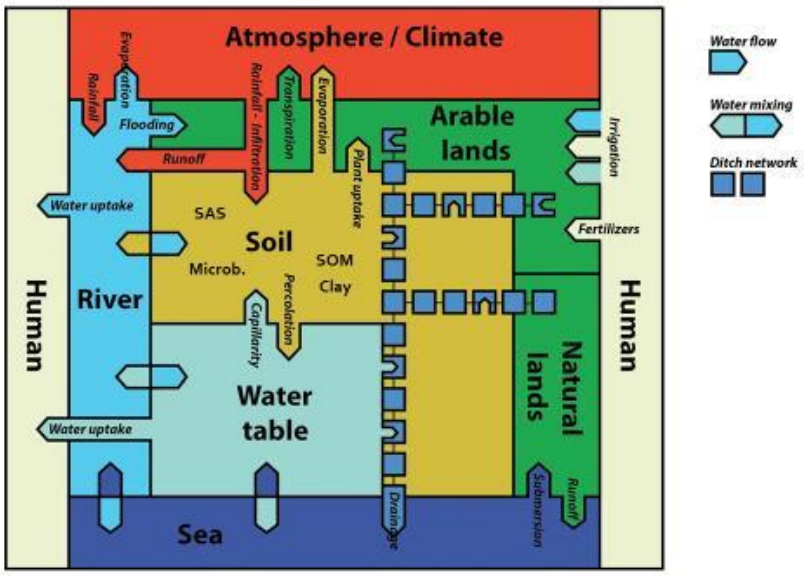


Figure 3 : Modèle conceptuel de la salinisation des sols en zone côtière méditerranéenne (Bless et al., 2018)

Comprendre les facteurs de salinisation en zone littorale à l'échelle territoriale permet d'intégrer les enjeux globaux de préservation des ressources (eau, sol et biodiversité) et des services écosystémiques et spécifiques notamment économiques et touristiques (Álvarez-Romero et al., 2011). Afin de poursuivre cet objectif, la zone d'étude de la basse-plaine de l'Aude constitue une bonne opportunité.

2. Présentation d'un site d'étude en zone littorale méditerranéenne

La région méditerranéenne est un hot spot du changement climatique et d'utilisation des terres, sous pression démographique croissante exposée aux phénomènes de salinisation. La zone d'étude choisie pour ce travail est située sur le littoral méditerranéen, au cœur du Golfe du Lion, dans le département de l'Aude (Occitanie, France). Son emprise d'une superficie d'environ 370 km^2, est délimitée au Nord par le fleuve Aude, au Sud par la mer et les étangs de Bages et Sigean, de l'Ayrolle et de Gruissan et à l'Ouest par les premiers contreforts du massif des Corbières (Figure 4). La zone de basses plaines comprend le massif calcaire et karstique de la Clape (90 km2) où se trouve le point culminant de la zone (217 mNGF).

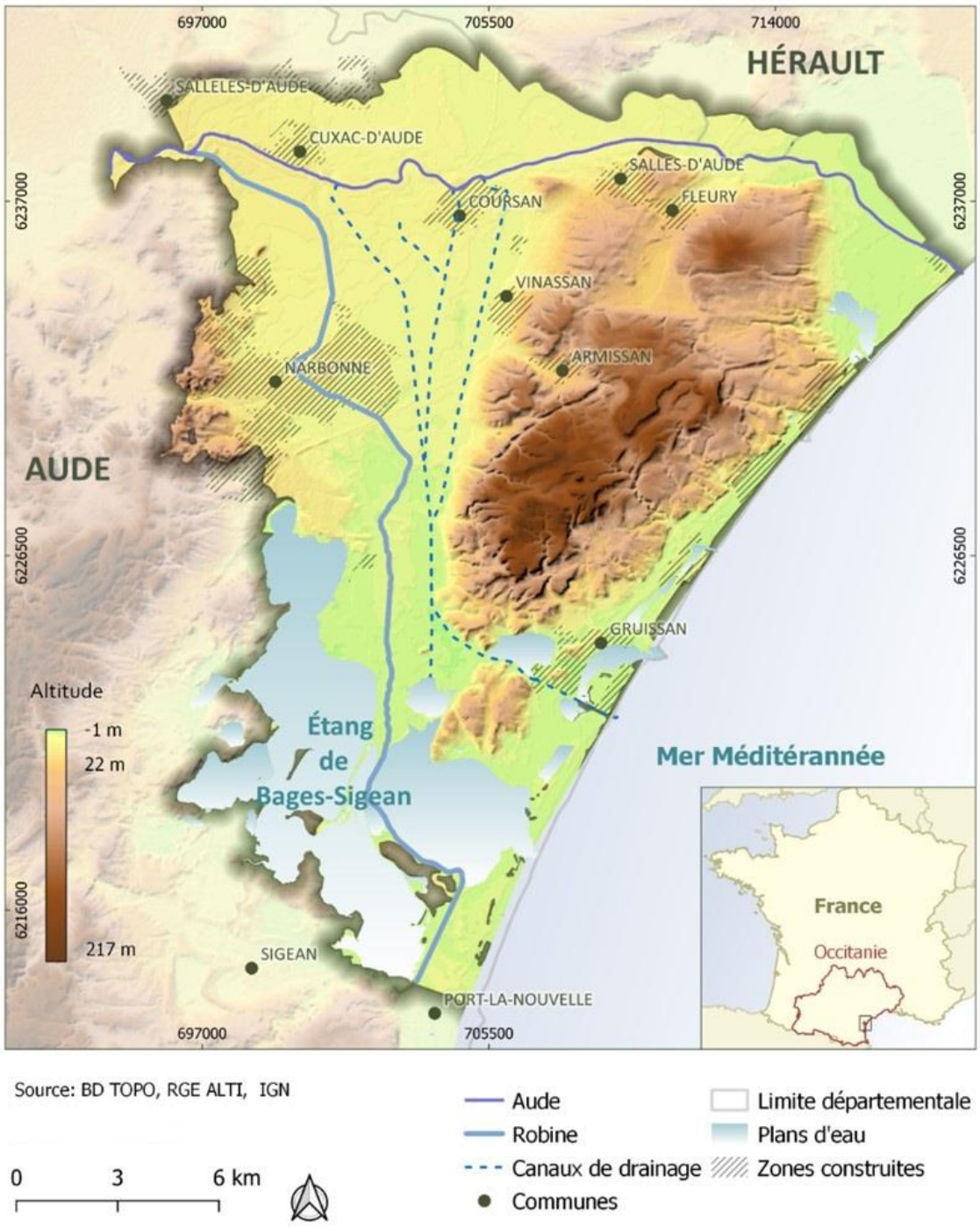


Figure 4 : Zone d'étude : les Basses-Plaines de l'Aude et le massif de la Clape

2.1 Géomorphologie

La morphologie de la zone d'étude peut être appréhendée par l'examen de l'altitude et de la pente locale disponibles au travers du Modèle Numérique de terrain, établi à partir de relevés lidar et fourni à 5 m de résolution spatiale par le PNRNM. En considérant l'arbre de décision

présenté à la Figure 5, la zone d'étude peut se décomposer 6 unités géomorphologiques principales (Figure 6).

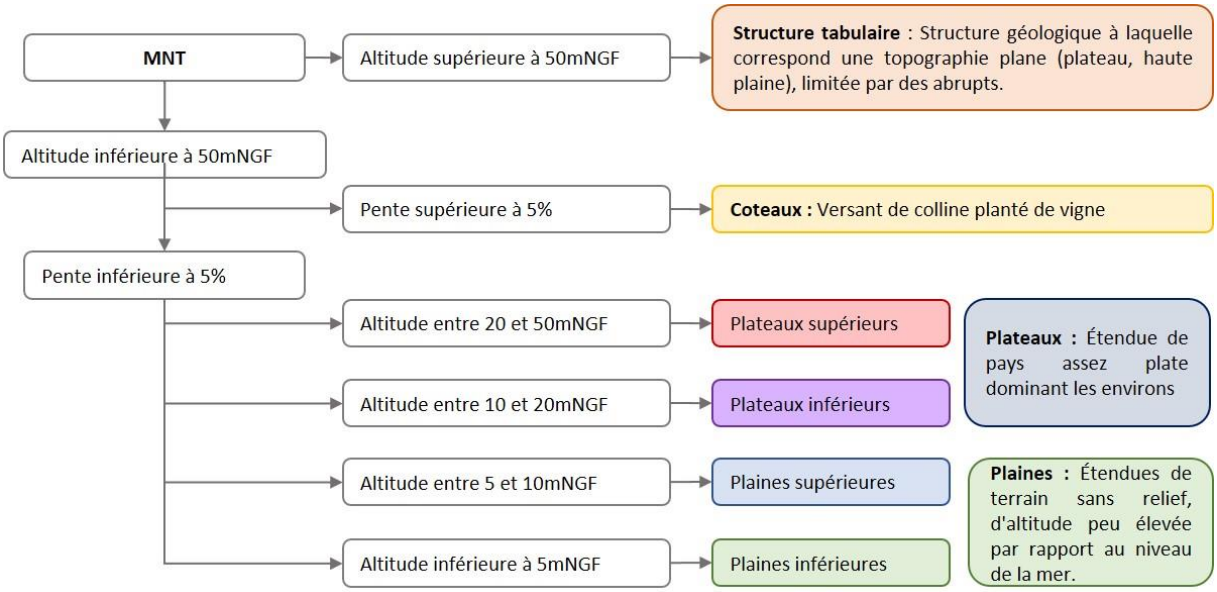


Figure 5 : Arbre de décision appliqué au du découpage géomorphologique de la zone d'étude

La zone appelée structure tabulaire, définie par une altitude supérieure à 50 m NGF, représente 21% de la zone d'étude avec une superficie de 81km^2. Il s'agit des massifs de Fontfroide (à l'Ouest, au pied des Corbières) et de la Clape dans la partie Est du territoire.

Les coteaux entourant les structures tabulaires ont une superficie de 59km^2, soit 15% de la zone.

Deux types de plateaux se distinguent : les plateaux supérieurs (d'altitude comprise entre 20 et 50 m NGF), d'une superficie de 14 km^2, principalement présents au nord du massif de la Clape et les plateaux inférieurs (d'altitude comprise entre 10 et 20 m NGF) situés majoritairement à l'Ouest de la zone, d'une superficie de 30 km^2.

Deux types de plaines sont définies : les plaines supérieures (d'altitude comprise entre 5 et 10 m NGF), représentant 55 km^2, situé au Nord-Nord-Ouest de la zone et les plaines inférieures largement représentées dans la zone (38% de la zone) avec 144 km^2 répartis principalement au Nord, sur la rive gauche du Fleuve Aude, ainsi qu'au centre et au Sud, entre l'emprise de la ville de Narbonne et le Massif de la Clape).

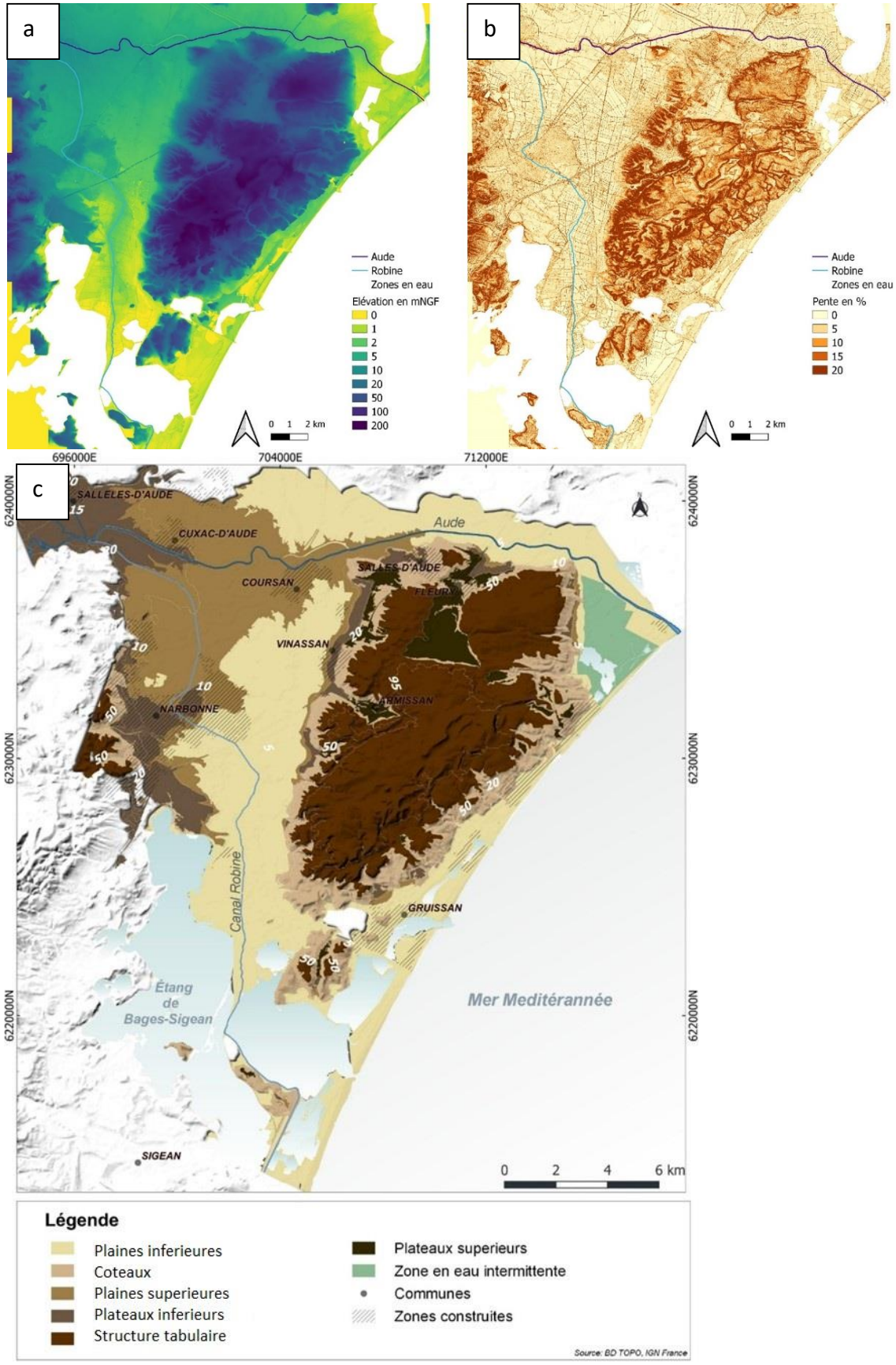


Figure 6: Relief de la zone d'étude : a) altitudes, b) pentes locales, c) zonage géomorphologique

2.2 Types de sols

La carte des sols présentée à la Figure 7 est issue du recoupement entre les sources d'informations suivantes :

- carte géologique de la France à 1/50 000 et notice explicative (Lespinasse et al., 1982);
- carte des Pédopaysages de l'Aude et notice (Barthès et al., 1999) ;
- carte pédologique 1/50 000 établie par la CNABRL ;
- carte des caractéristiques des sols au 1/100 000 (par la Direction Départementale de l'agriculture avec la concours de la CNABRL, dressée par J. Barrière avec la collaboration de C. Toni sous la direction de G. Bouteyre, 1970) ;
- 245 sondages à la tarière jusqu'à 120 cm effectués entre 2018 et 2022 ;
- 32 échantillons analysés par le laboratoire du CIRAD.

Dans le but de se concentrer sur la salinisation des sols, l'altitude maximale retenue pour cette étude des sols est de 20 m NGF, ce qui exclut le massif de La Clape.

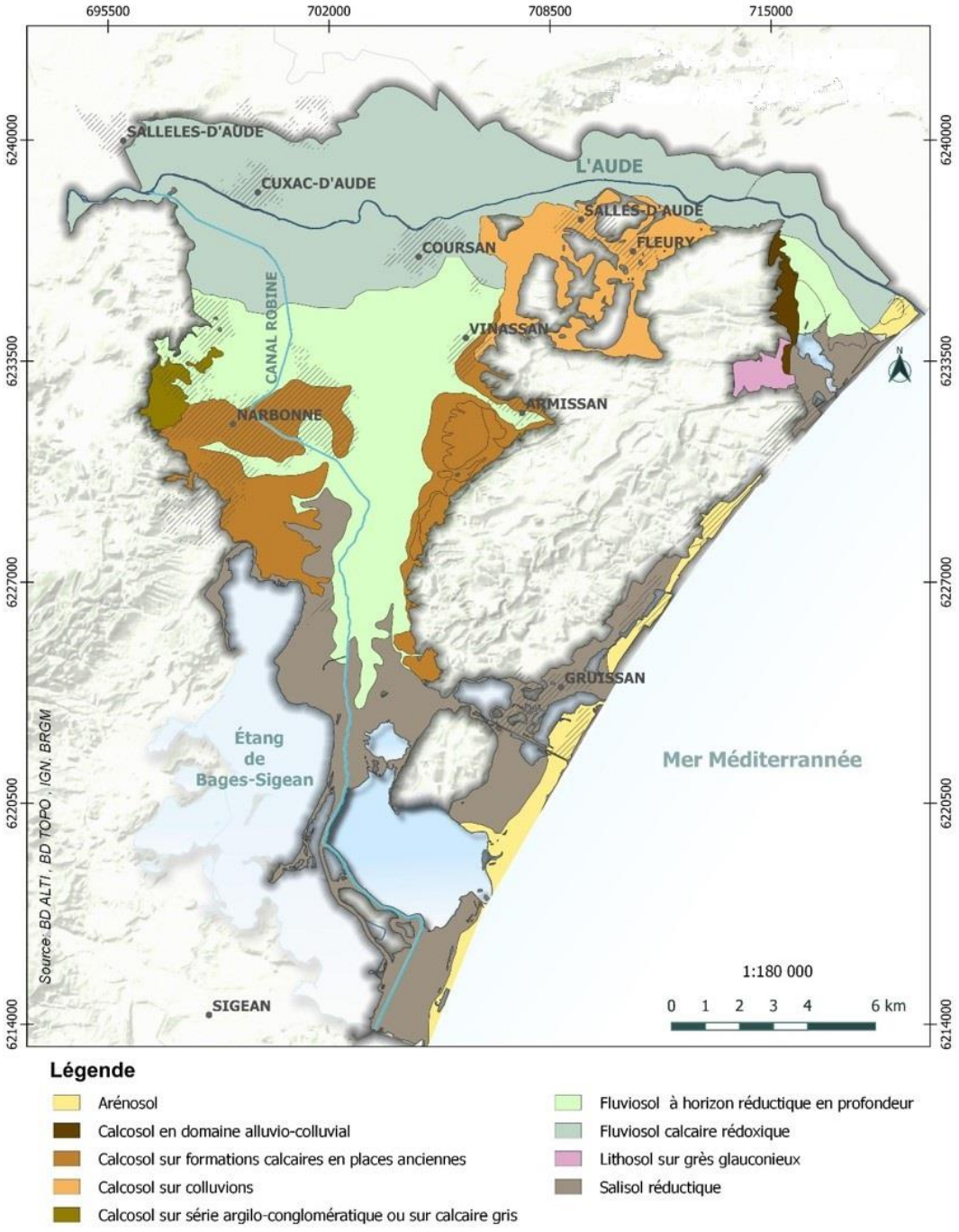


Figure 7 : Carte des sols de la basse-plaine de l'Aude

Les sols dans la zone d'étude sont majoritairement des fluviosols calcaires rédoxiques (21,2% de la zone d'étude), des fluviosols à horizon réductique en profondeur (13,4%), des salisols réductiques (10%) et des calcosols sur formations calcaires en place anciennes (7%). Dans une moindre mesure, d'autres types de sol sont retrouvés dans la zone d'étude : des calcosols sur colluvions (3,5%), des calcosols sur série conglomératique ou sur calcaire gris (3,1%), des

arénosols (2,5%), des calcosols en domaine alluvio-colluvial (0,5%) et enfin des lithosols sur grès glauconieux (0,4%). Les sols sont présentés ci-après suivant un ordre reproduisant une toposéquence théorique.

Les **calcosols sur formations calcaires anciennes**, en position les plus élevées, peuvent être qualifiés de Sables limoneux et sont basiques pour la fraction de terre fine. Ils sont profonds, avec une forte charge en cailloux. Les teneurs en matière organique, la CEC et la somme des cations échangeables sont peu élevées. Ces sols sont non salés et non sodiques.

Les **calcosols sur colluvions** peuvent être qualifiés de Limons et sont basiques pour la fraction de terre fine. Ils sont peu profonds, avec une charge en cailloux intermédiaire. Les teneurs en matière organique, la CEC et la somme des cations échangeables sont assez faibles. Ces sols sont non salés et non sodiques.

Les **calcosols en domaine alluvio-colluvial** peuvent être qualifiés de Limons sableux et sont légèrement basiques. Ils sont profonds, avec une charge en cailloux assez faible en moyenne mais qui peut être variable. La teneur en matière organique, la CEC et la somme des cations échangeables sont assez faibles. Ces sols sont qualifiés de légèrement salés, de non sodiques à légèrement sodiques localement sur certains horizons.

Les **fluviosols calcaires rédoxiques** peuvent être qualifiés de Limons fins et sont basiques. Ils sont profonds, sans fraction caillouteuse et laissent apparaître des marques d'hydromorphie temporaire dans le profil au-delà de 50 cm. La teneur en matière organique, la CEC et la somme des cations échangeables sont assez faibles. Ces sols sont majoritairement et en moyenne non salés, avec une légère diminution de CE_{sp} avec la profondeur. Ils sont non sodiques (ESP de 2,3%).

Les **fluviosols à horizon réductique** en profondeur sont à la limite entre Limons fins et Limons fins argileux. Ils sont basiques, profonds, sans fraction caillouteuse et laissent apparaître des marques d'hydromorphie temporaire et permanente dans le profil au-delà de 50 cm. La teneur en matière organique, la CEC et la somme des cations échangeables sont plus élevées que pour les sols précédents. Ce type de sol est en moyenne légèrement salé en surface et moyennement salé en profondeur. Ils sont en moyenne à la limite de la sodicité.

Les **salisols réductiques** peuvent être qualifiés de Limon argileux fins. Ils sont légèrement basiques. La teneur en matière organique, la CEC et la somme des cations échangeables sont

les plus élevées de la zone d'étude. Ce type de sol est en moyenne très salé sur l'ensemble du profil et avec une augmentation avec la profondeur. La sodicité est variable en fonction des échantillons mais est majoritaire.

2.3 Occupation des sols

Les cartes d'occupation des sols montrées à la Figure 8 ont été constituées pour les années 2003 à 2018 à partir des données fournies par l'agglomération "le Grand Narbonne". En 2018, la viticulture est fortement représentée dans la zone, avec 19% de la surface. Une partie de la zone est occupée à 6% par les cultures, les friches à 8% et les prairies à près de 2%. Les zones naturelles (espaces naturels de type forêts et garrigues et zones humides) sont présentes sur 34% de la surface. Les espaces naturels (forêt et garrigue) sont principalement regroupés sur le massif de la Clape et à l'Ouest de Narbonne. Les zones humides se situent à proximité des étangs. Enfin, les tâches urbaines représentent 12% de la surface associées aux communes de Narbonne, Armissan, Vinassan, Coursan, Cuxac d'Aude, Moussan, Salles d'Aude, Fleury et Gruissan.

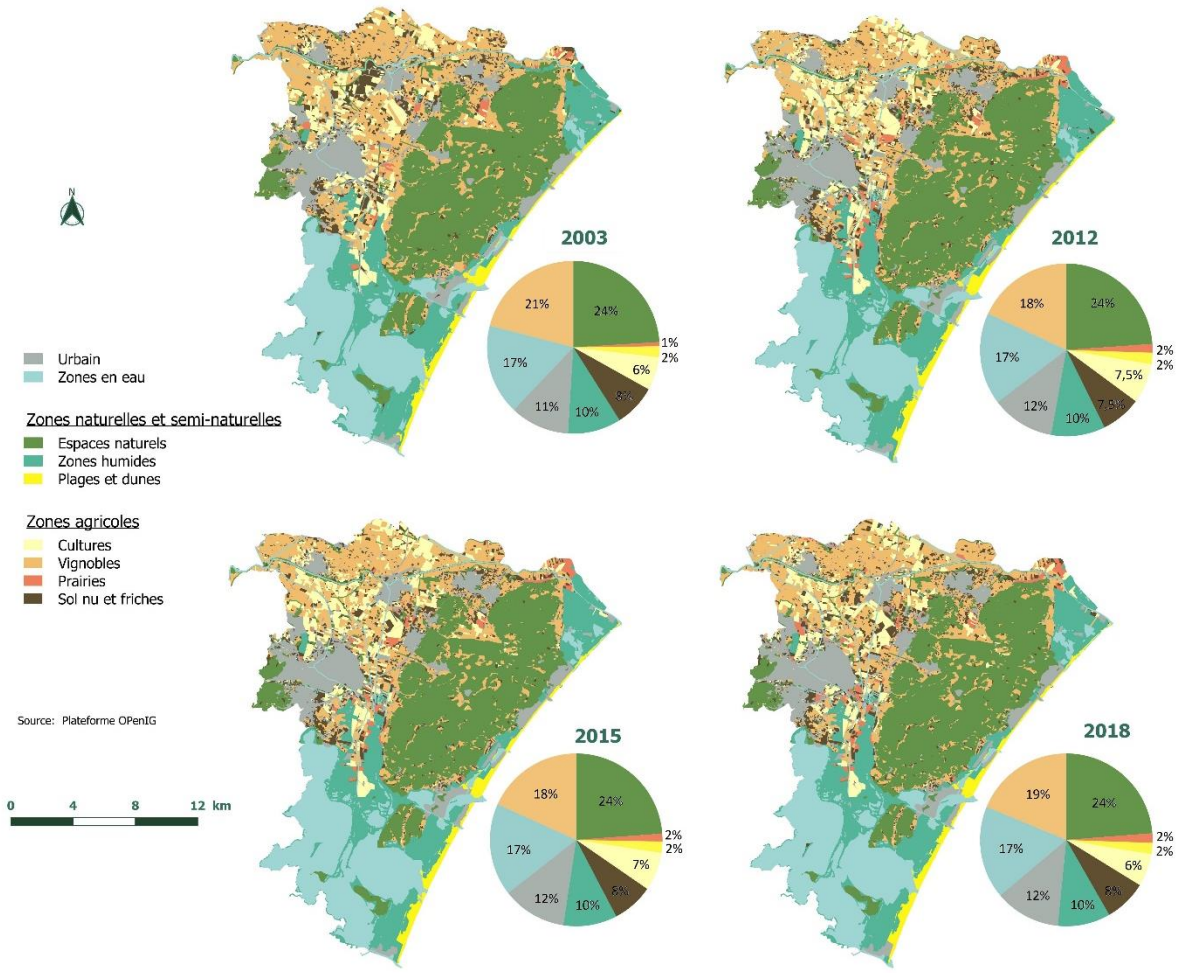


Figure 8 : Cartes d'occupation du sol pour les années 2003, 2012, 2015 et 2018

L'occupation des sols apparaît globalement assez stable sur les 20 dernières années, les zones en eau et les zones urbaines n'évoluent que très légèrement (respectivement de 16,9% en 2003 à 17,4% en 2018 et de 11,1% en 2003 à 12,3% en 2018). La cartographie de l'évolution de la viticulture, représentée à la Figure 9, indique un abandon de 1966 ha contre l'apparition de 1141 ha, soit une perte totale de 827 ha de terres viticoles abandonnées. Si l'abandon des vignes n'apparaît pas particulièrement localisé, les replantations sont plus importantes au nord de la zone d'étude, plus loin du littoral, et sur le massif de la Clape.

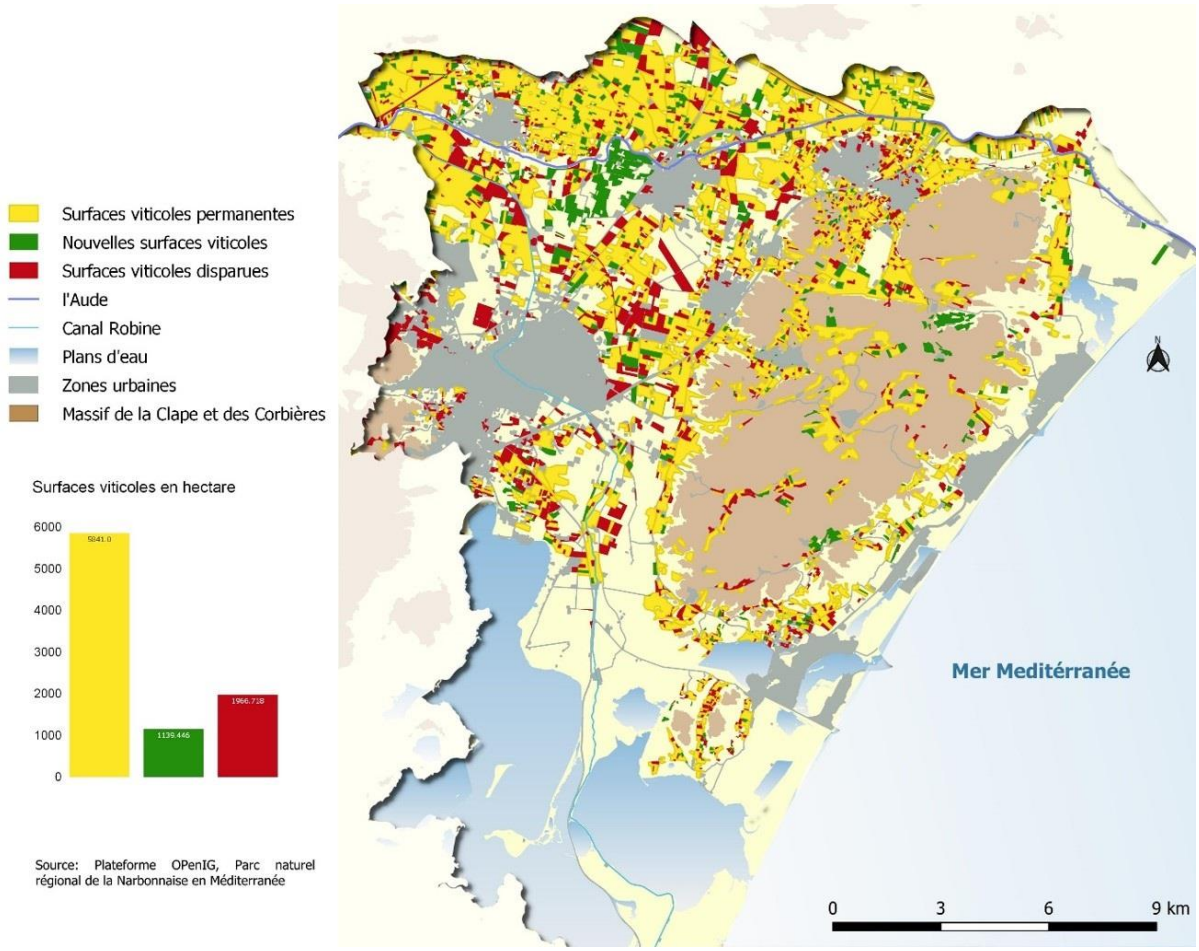


Figure 9 : Evolution spatio-temporelle des surfaces viticoles entre 2003 et 2018

2.4 Réseaux hydrographiques et aménagements hydrauliques

La cartographie du réseau hydrographique complet, montrée à la Figure 10, est issue de la base de données TOPAGE ® (*BD Topage*, 2023).

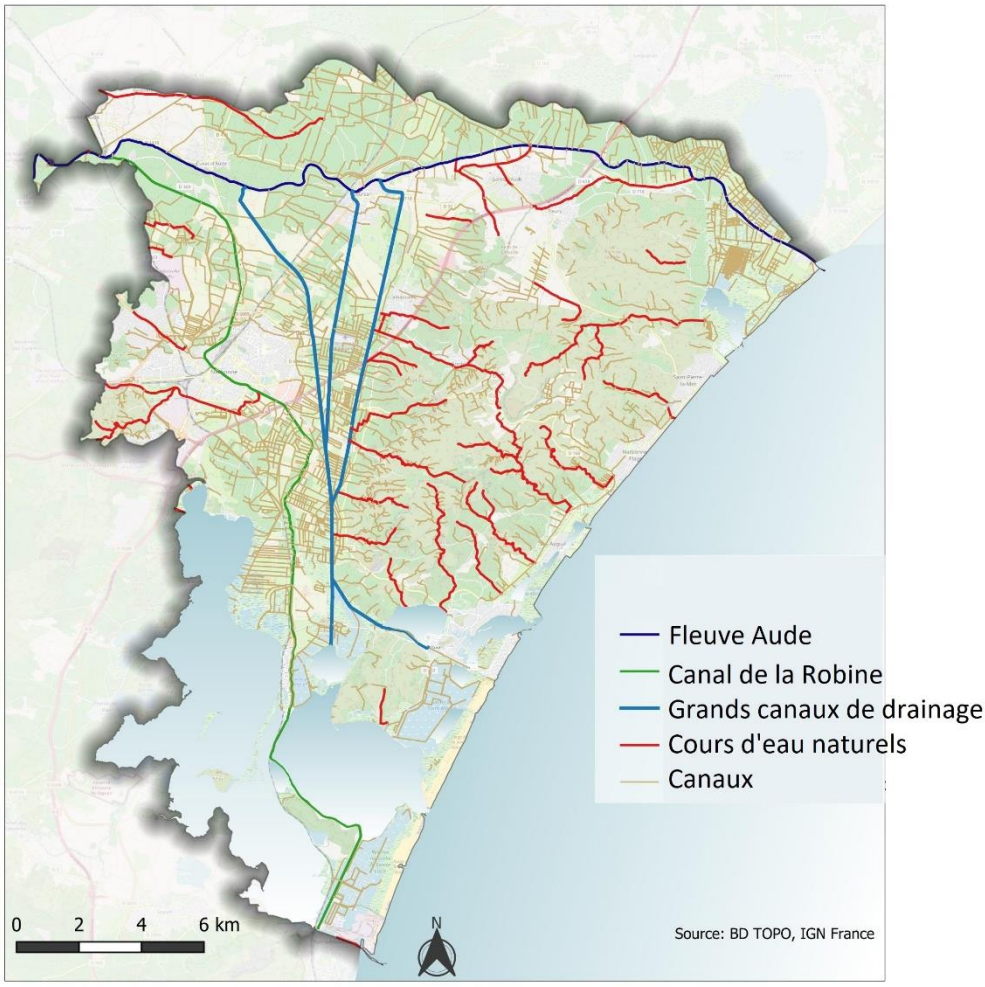


Figure 10 : Carte du réseau hydrographique de la basse-plaine de l'Aude

Le fleuve Aude qui prend sa source à 2185 m d'altitude dans les Pyrénées au massif du Carlit s'écoule sur 224 km et draine un bassin hydrographique de 6 074 km^2. L'Aude suit un cours ouest-est au nord de la zone d'étude sur un linéaire de 30 km. A environ 1 km de l'exutoire marin de l'Aude, au lieu-dit les Cabanes de Fleury (coordonnées Lambert 93 X: 717237.55 / Y: 6236391.51), se trouve un barrage anti-sel, construit entre 1986 et 1987.

Le Canal de la Robine à l'ouest de la zone d'étude suit un tracé nord-sud sur 31 km. Il est alimenté par une prise d'eau sur l'Aude au niveau de l'écluse de Moussoulens. Le canal traverse Narbonne, la basse-plaine et les étangs de Bages-Sigean, de l'Ayrolle et de la Berre avant de se jeter dans la mer dans le port de Port-La-Nouvelle. Il fait partie des voies navigables de France et joue un rôle très important dans l'apport d'eau d'irrigation dans la zone. Six

écluses permettent d'assurer ses deux fonctions et un déversoir principal, le Canélou, sert de déversoir de crues au niveau de l'écluse de Mandirac.

Trois grands canaux apparaissent au centre de la basse-plaine, d'ouest en est, le canal de Lastours, le canal de de Grand-Vignes et le canal de Sainte-Marie qui se rejoignent pour former le canal de la Réunion. Ces grands canaux sont connectés à l'Aude via des déversoirs latéraux afin de limiter les crues du fleuve. Ils assurent également le drainage des terres directement et en collectant les eaux de drainage issues de réseaux de plus faibles dimensions.

On note la présence de quelques cours d'eau naturels qui prennent pour la plupart leur source dans le massif de la Clape. Ces cours d'eau temporaires sont connectés à leur aval aux grands canaux de drainage.

Enfin un très dense réseau de canaux quadrillent la zone. Certains assurent les apports d'eau aux parcelles depuis le canal de la Robine ou l'Aude, via des réseaux primaires, secondaires et tertiaires. D'autres ont une vocation de drainage et rejoignent en réseau les grands canaux de drainage.

L'ensemble des canaux d'apport d'eau et de drainage sont gérés collectivement au sein d'Associations Syndicales Autorisées (ASA). Les ASAs sont regroupées au sein l'ASEAUDE (Union des Associations Syndicales d'Hydraulique de l'Est Audois) qui a pour mission la gestion technique et collective de l'eau à l'échelle du canal de la Robine et l'apport de conseils auprès des agriculteurs. Les ASA adhérentes, représentées cartographiquement à la Figure 11, sont : Raonel, La Rèche, La Plaine de Livière, Le Cercle, Petit Mandirac, Ricardelle et Coursan.

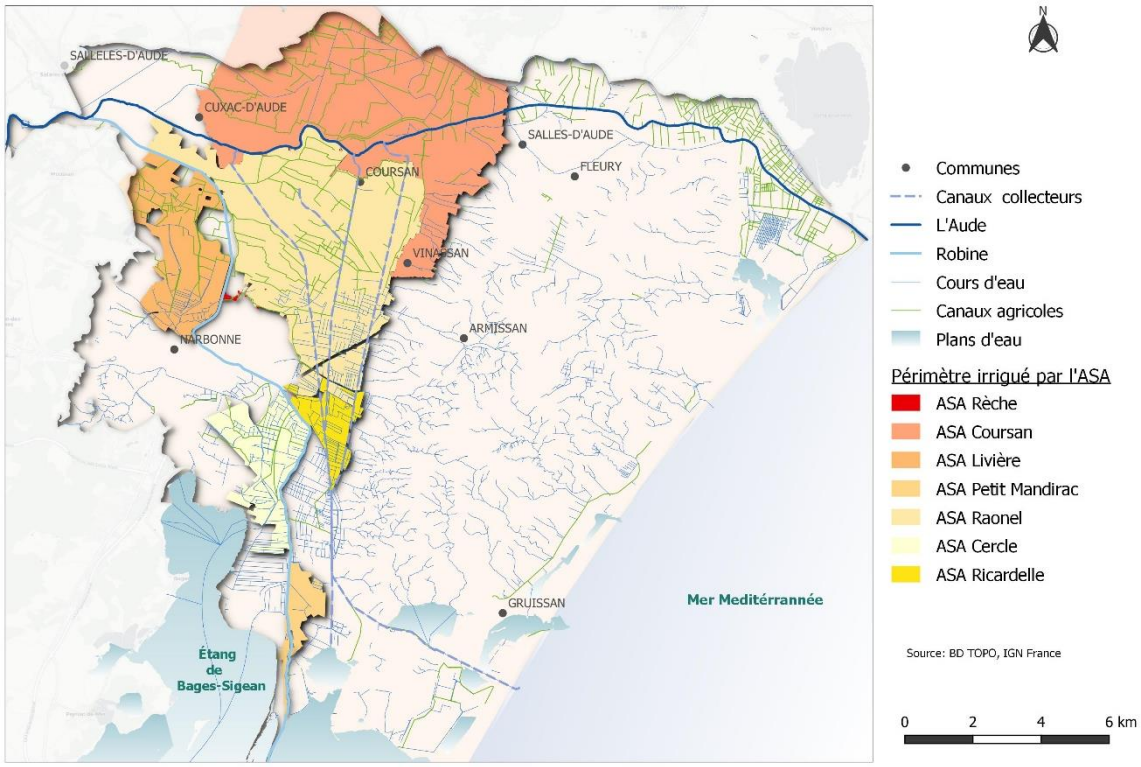


Figure 11 : Répartition spatiale des ASAs et des réseaux associés

Les dimensions des différentes ASA, montrées au Tableau 2, sont variables. La densité de leurs réseaux n'est pas corrélée à leurs superficies. Trois sont de petites superficies (inférieures à 3km2) : l'ASA du Petit Mandirac, de la Rèche et de Ricardelle avec respectivement des superficies de 2,0 km^2, 0,1 km^2 et 2,8 km^2. L'ASA du Petit Mandirac a la plus faible densité de réseau hydraulique de 2,9 km/km^2. Les densités de réseaux hydrauliques des ASA de la Rèche et de Ricardelle sont les plus élevées avec respectivement 10,7 km/km^2 et 11,0 km/km^2. Les ASA du Cercle et de la Livière sont de taille intermédiaire avec 6,3 km^2 et 9,6 km^2. Le réseau hydraulique est dense sur le périmètre de l'ASA du Cercle avec une densité de 8,6 km/km^2. L'ASA de la Livière, plus étendue que le Cercle, a une densité de réseau hydraulique moindre avec 5,7 km/km^2. Enfin les ASA de Coursan et du Raonel sont de grandes superficies avec respectivement 38,0 km^2 et 29,8 km^2. La densité de réseau hydraulique dans ces deux dernières ASA sont faibles par rapport aux autres ASA de la zone avec 3,4 km/km^2 pour Coursan et 4,8 km/km^2 pour Raonel. Au sein de l'ASA du Raonel, les canaux sont majoritairement regroupés au Sud du périmètre de l'ASA.

Tableau 2 : Dimensions des ASAs de la basse-plaine de l'Aude

ASA	Longueur de linéaires (km)	Aire (km2)	Densité de réseau (km/km2)
Cercle	54,2	6,3	8,6
Coursan	128,0	38,0	3,4
Livière	55,1	9,6	5,7
Petit Mandirac	5,9	2,0	2,9
Raonel	142,7	29,8	4,8
Rèche	0,9	0,1	10,7
Ricardelle	31,2	2,9	11,0

2.5 Le Projet S.A.L.I.N : actions, acteurs, enjeux, stratégie

Le projet S.A.Li.N, lancé en 2019 pour une durée de 3 ans, porte sur la Salinisation des Aquifères Littoraux de la Narbonnaise. Il a pour ambition d'améliorer les connaissances relatives aux phénomènes de salinisation sur la zone des Basses-Plaines de l'Aude dans le but de proposer des pistes d'évolution de la gestion de la ressource en eau comprenant l'usage agricole, les prélèvements AEP (Alimentation Eau Potable) et la gestion hydraulique des espaces naturels ou semi-naturels. Ce projet collaboratif a été porté par les structures territoriales du Parc Naturel Régional de la Narbonnaise en Méditerranée (PNRNM) et de l'agglomération Le Grand Narbonne, et les structures de recherche de l'Institut Agro Montpellier et du Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) avec l'appui de deux partenaires techniques : la Chambre d'Agriculture de l'Aude et l'Union d'ASA d'Hydraulique de l'Est Audois (ASEAUDE). Ce projet bénéficie du soutien financier de l'Agence de l'Eau RM et C et de la Région Occitanie.

Les objectifs du projet SALiN sont i) de réaliser un état des lieux de la salinité des nappes et des sols, ii) de caractériser le fonctionnement hydrogéologique du système avec la compréhension des relations sol/nappe, la définition des différents termes du bilan hydrologique et l'origine de la salinité, iii) d'évaluer les impacts du changement climatique et des pratiques de gestion agricole et non agricole sur la salinité et enfin iv) de proposer des scénarios d'adaptation, pour concevoir notamment une agriculture durable, un maintien de la qualité de l'eau de la nappe et un bon état des espaces naturels.

Ce projet, terminé en 2022, a au final impliqué un grand nombre des acteurs du territoire de la basse-plaine de l'Aude : SMDA (Syndicat Mixte du Delta de l'Aude), SMMAR (Syndicat Mixte des Milieux Aquatiques et des Rivières), ASEAUDE, PNRNM, les caves coopératives, les agriculteurs, les ASA (Associations Syndicales Autorisées), la Chambre d'Agriculture de l'Aude, l'agglomération Le Grand Narbonne, VNF (Voies Navigables de France), l'Institut Agro Montpellier, le BRGM, l'Agence de l'eau et la Région Occitanie.

3. Problématique de la thèse

Les zones côtières méditerranéennes concentrent de nombreux enjeux territoriaux relatifs aux ressources en eau et en sol, aux productions agricoles, aux espaces naturels remarquables, à l'urbanisation et au tourisme. La préservation de ces zones implique une recherche d'équilibres entre besoins et disponibilité des ressources et d'espaces pour les différents usages. Cette recherche est à opérer en conditions de changement global de climat et d'usage des terres. Le phénomène de salinisation des sols et des eaux dans ces zones côtières est particulièrement intéressant à considérer dans l'étude de ces équilibres généraux.

L'état de salinité résulte de processus assez bien identifiés et très fortement liés à l'eau. Il s'agit de processus naturels (intrusion d'eau marine, présence de nappes saumâtres, remontées capillaires, infiltration, percolation, lixiviation) et de processus anthropiques d'actions de lutte anti-sel (pratique de submersion, de drainage). L'enjeu historique de gestion de la salinisation pour de nombreuses zones littorales méditerranéennes consiste à établir des modes de gestion de l'eau capables de maintenir les usages attendus pour des types de sols et des écosystèmes naturels ou cultivés donnés. Les situations de crises (mortalité de la végétation, augmentation de la salinité des eaux, dégradation des sols) sont souvent révélatrices de déséquilibres induits par des changements de climat (baisse de la pluviométrie, augmentation de l'évapotranspiration, hausse du niveau des mers) et/ou d'accès aux ressources en eau (partage entre prélèvements d'eau, accès à des ressources hors bassin versant) et/ou de configuration des espaces (remembrements agricoles, imperméabilisation, construction ou effacement d'ouvrages). La salinisation offre donc un prisme pour l'étude de la gestion de l'eau et de son adaptation face aux conditions de changement climatique.

Les partis pris de la thèse sont de trois ordres : (i) investiguer fortement la dimension spatiale, (ii) placer l'objet sol, considéré comme objet intégrateur, au centre des observations et (iii) engager une réflexion pluridisciplinaire sur la gestion de l'eau sur des temps longs. Le site d'étude de la basse-plaine et la dynamique du projet SALIN ont permis de disposer des moyens matériels, de résultats et d'un tissu d'acteurs de terrain et de recherche pour mener cette réflexion sur un territoire littoral méditerranéen en prise avec des problèmes de salinité.

Le premier niveau de questionnement porte sur la quantification spatialisée de la salinité au sein du territoire d'étude (Chapitre 2). Le deuxième niveau de questionnement porte sur la trajectoire de la gestion de l'eau dans le territoire, depuis la mise en place des matériaux, les cycles et ruptures historiques, jusqu'aux usages actuels (Chapitre 3). A partir des résultats obtenus suite à ces deux premiers questionnements, on cherche plus précisément s'il existe et quel peut-être le lien entre la gestion de l'eau sur un temps long et l'état actuel de salinité (Chapitre 4). Enfin, les pratiques, les perceptions en lien avec la salinité et l'état actuel de salinité sont confrontés pour questionner l'influence sur la salinité de la gestion de l'eau agricole et ses perspectives (Chapitre 5).

Chapitre 2 : Etat de la salinité des eaux et des sols de la basse-plaine de l'Aude

Chapitre 2 : Etat de la salinité des eaux et des sols de la basse-plaine de l'Aude

1. Introduction

Ce chapitre de thèse a pour objectif de caractériser l'état de salinité des eaux et des sols à l'échelle de la Basse plaine de l'Aude (210 km^2), non connu avant ces travaux. Pour y répondre, il s'agit en premier lieu de définir l'approche méthodologique la plus adaptée permettant d'observer la salinité à plusieurs échelles d'espace et de temps.

Les outils nécessaires pour évaluer la salinité du sol depuis la zone racinaire jusqu'à l'échelle régionale s'appuient sur une combinaison potentielle d'approches (Farifteh et al., 2006) : échantillonnage des sols, systèmes d'information géographique (SIG), indices de végétation, techniques géophysiques utilisant des capteurs à proximité et à distance, ainsi que des modèles de transport de solutés. Ainsi, le choix de la méthode doit être adapté aux questions et aux échelles d'étude choisies. La prise en compte des avantages et inconvénients métrologiques de chacune d'entre elles doit ainsi permettre de définir la meilleure stratégie d'échantillonnage.

La salinité des sols est usuellement quantifiée par mesure de la conductivité électrique sur des extraits aqueux : sur extrait de pâte saturée de sol (CE_{sp}), dont la réalisation en laboratoire est particulièrement longue et fastidieuse. Introduite par l'U.S. Salinity Laboratory staff en 1954, elle implique l'adoption d'un protocole expérimental permettant une mesure standardisée et spécifique de l'échantillon de sol. Le rapport sol/eau d'un extrait influence le partage des solutés entre les trois phases du sol (gaz, solide, liquide) ; par conséquent, le rapport doit être normalisé pour obtenir des résultats qui peuvent être appliqués et interprétés de manière universelle.

Les techniques de télédétection peuvent aussi être utilisées pour quantifier la salinité de surface sur de vastes étendues, en se basant uniquement sur les caractéristiques spectrales de surface des sols salins. Toutefois, elles peuvent être entravées par des problèmes de qualité

d'image et ne permettent pas de quantifier la salinité en profondeur (Metternicht et Zinck, 2003).

A l'inverse, les techniques géophysiques, comme l'induction électromagnétique, fournissent des valeurs de conductivité apparente intégrée en profondeur (Lesch et al., 1998 ; Akramkhanov et al., 2011). La facilité de la mesure autorise alors des mesures sur une grande superficie et à moindre coût (Jonc et al. 1979 ; Williams et Baker, 1982 ; Job et al.,1987). Une mesure de conductivité électromagnétique (CEM) permet ainsi de rendre compte de la conductivité électrique apparente des sols (CE_a), intégré sur une certaine profondeur de sondage. En condition salée, l'inversion du signal permet, en théorie, de caractériser les profils de salinité du sol à travers l'obtention de valeurs de conductivité électrique apparente à différentes profondeurs (Hendricks et al., 2002). Il faut alors établir des relations stables entre les CE_a à différentes profondeurs et les CE_{sp} obtenus aux mêmes profondeurs (Amezketa, 2006). Cependant, comme le présente Heil et al. (2017) dans sa review, la mesure de CE_a peut-être influencée par d'autres variables comme : la teneur en sel dans le sol, l'humidité, la température, la porosité ou encore le type d'argile minéralogique et le taux d'argile. La conversion entre CE_a et CE_{sp} implique alors d'établir des relations multivariées incluant ces différentes propriétés. L'interprétation et l'utilité de ces relations sont donc très spécifiques au site et dépendantes des propriétés de sol des unités pédologiques en présence, ne permettant pas une utilisation à grande échelle.

Bien que la méthode traditionnelle d'échantillonnage ($CE_{1:5}$) du sol soit chronophage, elle demeure la plus fiable pour obtenir des mesures de salinité des sols sur la profondeur, dans l'espace et dans le temps et comparables avec des mesures de salinité des eaux. C'est la méthode qui a donc été retenue pour cet état des lieux.

Sur la base des nombreuses mesures réalisées, on présentera la caractérisation de la variabilité spatiale de la salinité, en considérant les différents éléments constitutifs du paysage (types de sols, historique d'occupation des sols, aménagements et gestion de l'eau) et le continuum surface/profondeur. On cherchera à déterminer l'origine de la salinité et à qualifier son évolution dans le temps sur quelques années, entre saisons et sur une courte durée liée à la pratique de submersion.

2. Matériels et méthodes

2.1 Stratégie d'échantillonnage

Afin de caractériser la variabilité de la salinité sur la zone d'étude, des mesures ont été réalisées sur les sols, les eaux de surface et les eaux souterraines.

2.1.1 Echantillonnage des sols dans l'espace

L'échantillonnage des sols a été fait de manière aléatoire à l'échelle de la basse-plaine afin de couvrir l'intégralité de la zone d'étude, et s'est déroulé au cours de 4 campagnes de mesures entre 2018 et 2020 :

- Septembre 2018 : avec la participation des étudiants de l'Option ESE (Eau-Sol-Environnement) de l'Institut Agro Montpellier - 270 prélèvements ;
- Mai/juillet 2019 : durant le stage de M1 de Jérôme Pinta (Master Eau et Agriculture) et avec la participation des étudiants du Junior Research Lab (Institut Agro Montpellier) - 495 prélèvements ;
- Septembre 2019 : avec la participation des étudiants ESE - 119 prélèvements ;
- Septembre 2020 : avec la participation des étudiants ESE - 267 prélèvements ;
- Juin 2020 et juin 2021 : 410 prélèvements réalisés par moi-même.

Sur chaque position, les sondages ont été réalisés à l'aide d'une tarière manuelle EDELMAN, sur une profondeur allant de 0 à sur 1,20 m et des prélèvements moyens ont été réalisés en surface, sur les profondeurs [0-20cm] et [30-40cm], et en profondeur, sur les profondeurs [70-80cm] et [90-120cm].

Au total, 414 points de mesures sont répertoriés dans la base de données géographiques, ce qui représente un total de 1615 échantillons de sol. La Figure 12 présente la localisation des points de mesures à différentes profondeurs. Il est à noter que sur 15 positions, des sondages et des prélèvements ont été effectués jusqu'à des profondeur pouvant atteindre les 4 m.

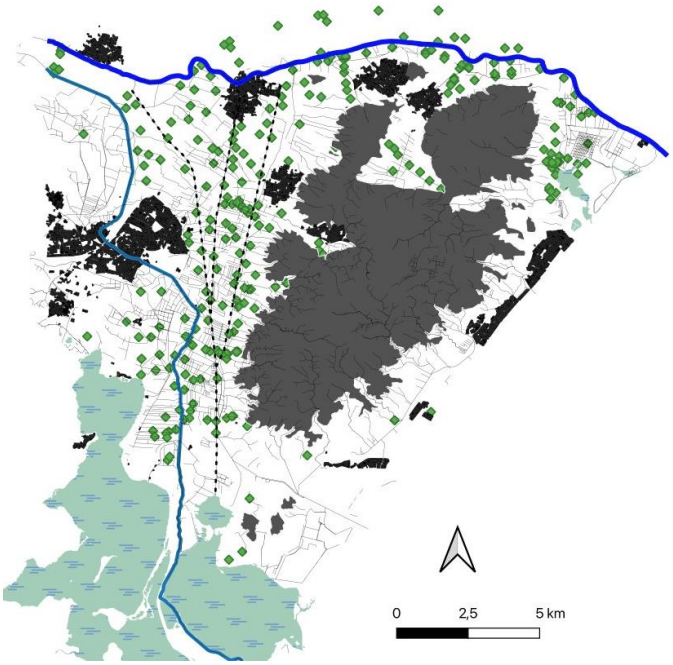


Figure 12 : Localisation des points d'échantillonnage des sols

2.1.2 Échantillonnage des sols dans le temps

Plusieurs parcelles ont fait l'objet de mesures répétées dans le temps afin de pouvoir qualifier la stabilité de la salinité dans le temps. Un total de 14 parcelles a été échantillonné à plusieurs dates entre 2018 et 2022 de manière à étudier la saisonnalité et les variations entre années de la salinité (Figure 13).

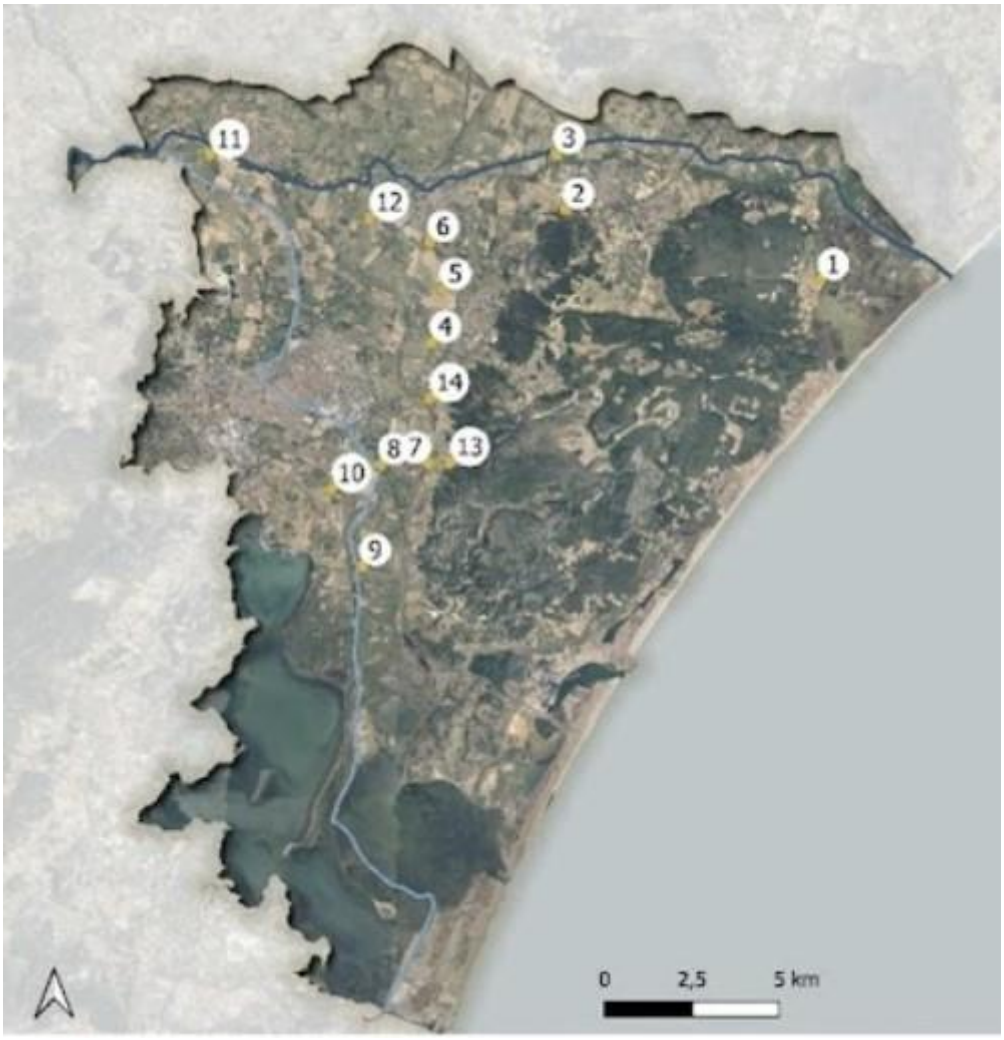


Figure 13 : Localisation des parcelles échantillonnées plusieurs fois au cours des 4 campagnes de collecte de données

Sur un pas d'espace et de temps plus court, 2 parcelles ("Grand_Vigne" et "Le_Cercle") ont été sélectionnées pour étudier les variations de salinité intra-parcellaires et intra-annuelles en lien notamment avec la pratique de submersion.

2.1.3 Echantillonnage des eaux

De manière à caractériser la variabilité de la salinité des eaux de surface, les principaux réseaux hydrographiques, représentés par le fleuve Aude et le Canal de la Robine et les grands canaux de drainage, ont été échantillonnés durant le mois de juillet 2020. L'échantillonnage de 12 points de mesures sur l'Aude a été conditionné selon l'accessibilité au cours d'eau au niveau des 5 ponts traversant le fleuve ou directement depuis les berges. Le canal de la Robine et les canaux de drainage principaux, Sainte Marie, Grands vignes, Pas des tours, la Réunion,

ont été échantillonnés sur 31 positions. Les mesures ont été réalisées depuis les ponts ou passerelles traversant les ouvrages ou directement du bord des canaux. La Robine est échantillonnée sur 9 points, le réseau d'irrigation et de drainage principal est échantillonnée sur 22 points.

L'équipe du BRGM Montpellier impliquée dans le projet SALIN a relevé la conductivité électrique des eaux souterraines sur 2 sources en lien avec le massif karstique de la Clape et une centaine de puits et forages au cours de 3 campagnes de mesure menées en été 2019, hiver 2021 et été 2021. La plupart des puits sont peu profonds et la profondeur des forages est inférieure à 10 m.

2.2 Mesures

2.2.1 Mesures de la salinité

En mesurant la capacité d'une solution à conduire l'électricité, qui est directement liée à la somme des concentrations en ions présents, on peut quantifier la salinité du sol en termes de concentration totale de sels solubles. Cette concentration est mesurée à l'aide de la conductivité électrique (CE) de la solution du sol, exprimée en $dS.m^{-1}$ ou $mS.\ cm^{-1}$ (U.S. Salinity Laboratory Staff, 1954).

La mesure de la conductivité électrique se fait à l'aide d'un conductimètre contenant deux électrodes de géométrie et de distance de séparation constantes (Suarez & Jurinak, 1996). Une solution est placée entre les deux électrodes. Un potentiel électrique est imposé aux électrodes et la résistance de la solution entre les électrodes est mesurée. La conductance mesurée est fonction de la concentration en sel de la solution et de la géométrie de l'électrode, dont les effets se traduisent par une constante de cellule. À potentiel constant, le courant est inversement proportionnel à la résistance de la solution :

$$EC_t = \frac{k}{R_t} \qquad \text{Eq. 1}$$

Avec EC_t la conductivité électrique de la solution du sol (en $dS.m^{-1}$ ou $mS.cm^{-1}$) ; t la température (°C), k la constante de cellule et R_t la résistance mesurée à la température t.

La conductivité électrique se mesure directement dans le cas d'échantillon d'eau, ou après décantation si la turbidité de l'échantillon est trop élevée. La méthode la plus fréquemment utilisée pour évaluer la salinité du sol consiste à procéder aux mesures sur des extraits aqueux préparés à partir d'échantillons de sol.

La méthode de référence consiste à obtenir un extrait par filtration sous vide d'une pâte de sol saturée préparée avec de l'eau distillée (Rhoades, 1996). La préparation des pâtes et de leurs extraits est un processus long et délicat.

Une alternative plus simple à réaliser est la mesure de la conductivité électrique sur des extractions à l'eau suivant différents rapports de dilution. Une masse de sol sec tamisée à 2mm est diluée dans X fois cette masse d'eau distillée. Après agitation et décantation (48 h), la mesure de conductivité est faite dans la phase aqueuse. Différents rapports d'extraction sont couramment utilisés, mélanges sol:eau de 1:1, 1:2, 1:5 ou 1:10, et dans le cas présent, les prélèvements ont été analysés après dilution 1:5 (20 g de sol dans 100 ml d'eau osmosée).

Les mesures simultanées de la conductivité électrique (EC) sur extraits de pâte saturée et sur extraits 1:5 permettent de calculer un facteur de conversion entre EC_{sp} et $EC_{1:5}$ propre à la zone d'étude (Kargas et al., 2022). Les 32 échantillons envoyés au laboratoire du CIRAD de Montpellier ont permis d'établir cette conversion.

Les mesures de conductivité électrique $EC_{1:5}$ ont été réalisées à l'aide d'un conductimètre WTW model 2CA301 Cond 3310. Les mesures des concentrations ioniques en Na^+, Ca^{2+}, K^+ et NO_3^- à l'aide de sondes spécifiques LAQUATWIN de chez HORIBA.

2.2.2 Mesures des propriétés de sol in-situ

Chaque prélèvement de sol est accompagné d'une description faite sur le terrain et concernant les propriétés indiquées dans le Tableau 3.

Tableau 3 : Propriétés de sol relevées lors des prélèvements in-situ d'échantillons

Propriétés relevés in-situ	Méthodes	Références
Couleur	*Charte Munsell*	(Munsell, 1915)
Test HCl	*Test à l'effervescence*	(USDA, 2004)
Humidité du sol	*Estimation qualitative en 4 classes : sec, frais, humide, saturé*	(Rinderer et al., 2015)
Hydromorphie temporaire et permanente	*Estimation visuelle de la présence et de l'abondance des tâches*	
Texture	*Méthode USDA*	(Thien, 1979)
Pierrosité	*Estimation visuelle du pourcentage du volume*	
Occupation du sol	Constat visuel	

2.2.3 Mesures en laboratoire

Des analyses complètes en laboratoire ont été réalisées sur 32 échantillons : 16 échantillons moyens prélevés en surface sur la profondeur [0-40cm] et 16 échantillons moyens prélevés en profondeur sur [90-120cm].

Chacun d'eux ont été préparés suivant la norme NF ISO 11464 (X31-412) et envoyés au laboratoire du CIRAD de Montpellier pour réaliser une analyse de sol. Les données sur la fraction solide portent sur : la granulométrie, la quantité de matière organique, le calcaire actif, le pHCo, les concentrations en cations Ca^{2+}, Mg^{2+}, K^{+}, Na^{+}, Al^{3+}, Mn^{2+}, H^{+} échangeables par la méthode à la cobaltihexamine. A partir des concentrations ioniques, la somme des cations échangeables, la CEC, le taux de saturation (TS) et le pourcentage de Sodium échangeable (ESP) sont calculés. La conductivité électrique, le pH, les éléments chimiques (Al^{3+}, Ca^{2+}, K^{+}, Mg^{2+}, Mn^{2+}, Na^{+}, P, S, Si, Fe, N-NO_3^{-}, N-NH_4, Cl-, HCO_3^{-}) ont été déterminés sur des extraits de pâte saturée et sur des extraits à l'eau pour un rapport de dilution 1:5.

2.3 Analyses des données

2.3.1 Structure spatiale de la salinité à l'échelle de la Basse Plaine

La méthode géostatistique du variogramme permet d'explorer la variance des données en considérant des couples de points suivant des inter-distances croissantes (h) dans un rayon de distance maximal fixé (cutoff). Les caractéristiques du variogramme sont illustrées à la Figure 14.

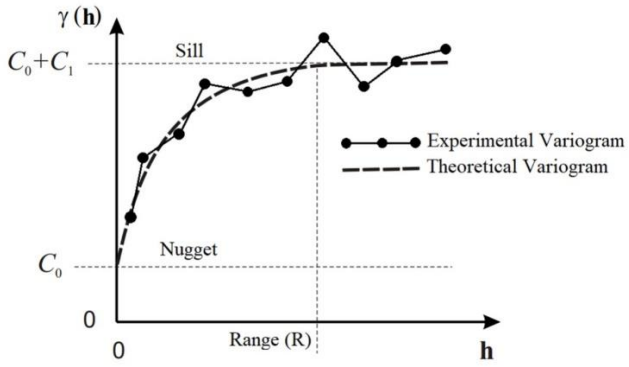


Figure 14 : Caractéristique du variogramme (Sill : pallier, Range : portée, Nugget : pépite)

Si les variances calculées (□(*h*)) qui composent le variogramme expérimental ne montrent aucune organisation par rapport aux classes d'inter-distance, on parle d'absence de structure spatiale. Dans ce cas, cela signifie que la proximité géographique des points n'a pas de rapport avec la variable d'intérêt mesurée. A l'inverse, si une relation apparaît et qu'un variogramme théorique peut être ajusté au variogramme expérimental à partir d'un modèle (linéaire, sphérique, Gaussien…), on peut alors considérer une structuration spatiale de la variable d'intérêt caractérisable à travers le variogramme théorique. Une faible variance signifie que les valeurs d'intérêt (ici la conductivité électrique) sont proches pour les couples de points de la classe d'inter-distance correspondante. Une courbe croissante indique que les valeurs sont de plus en plus différentes quand la distance augmente entre les points. La courbe peut atteindre un plateau, on parle alors de portée ("Range") pour la classe d'inter-distance où cela se produit, et de pallier ("Sill") pour la variance atteinte. L'apparition d'un plateau signifie qu'à partir de la distance indiquée par la portée, les couples de points sont autant différents les uns des autres et qu'il n'y a donc plus d'influence de la distance sur les valeurs d'intérêt.

Des variogrammes ont ainsi été calculés pour les mesures de conductivité électrique en surface (0-40 cm) sur 806 points et en profondeur (90-120 cm) sur 361 points.

2.3.2 Salinité et facteurs paysagers

La distribution spatiale de la salinité dans la zone d'étude a été analysée en relation avec les différents types de variables du paysage (relief, sol, occupation du sol, unité de gestion hydraulique). Les valeurs d'ECsp ont été comparées entre les classes des variables de paysage, en considérant séparément les échantillons de surface et les échantillons profonds, au moyen de tests statistiques à sens unique et par paires (Kruskal Wallis et Wilcoxon). Les résultats sont considérés significatifs lorsque la p-value est inférieure à 0,05.

2.3.3 Variations temporelles de la salinité à l'échelle de la basse-plaine

Des prélèvements de sol sur 14 parcelles ont été effectués sur plusieurs campagnes de manière à pouvoir étudier et caractériser la stabilité des valeurs de salinité dans le temps. Les 4 campagnes d'acquisition ont été réalisées en période estivale (mai/juin 2019 et juillet 2020) et en période hivernale (septembre 2018 et en janvier/février 2022).

Les comparaisons statistiques sont basées sur le principe d'une Anova bi-factorielle sur mesures répétées. Dans le cas où les données ne suivraient pas une distribution normale, le test non-paramétrique sur mesures répétées de Friedman sera réalisé (Friedman, 1937).

2.3.4 Variabilité temporelle intra parcellaire de la salinité

Afin d'estimer la variabilité de la salinité des sols à courte distance et dans le temps, des prélèvements de sol ont été effectués avant et après une pratique de submersion (12 mai et 11 juillet 2022) sur les deux parcelles expérimentales : la parcelle du "Cercle" et la parcelle "Grand Vigne" présentées à la Figure 15.

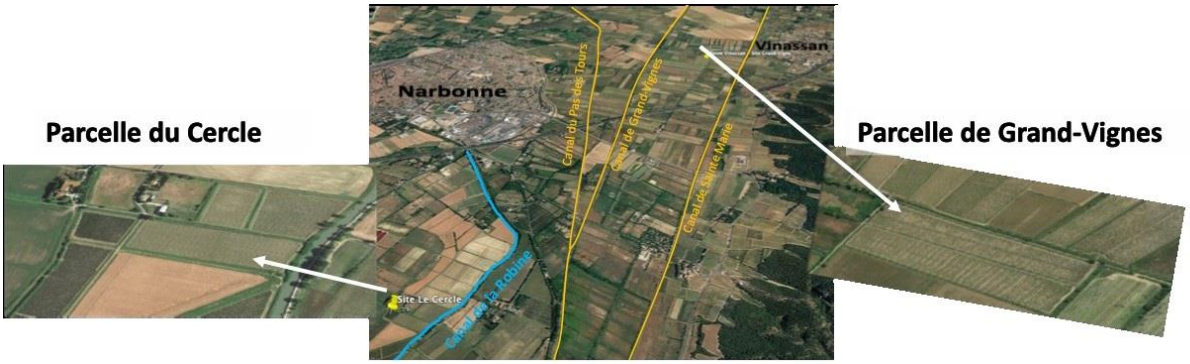


Figure 15 : Localisation de la parcelle du "Cercle" et de la parcelle "Grand Vigne"

A chaque date, pour 8 sondages sur la parcelle de Grands-Vignes et 9 sur la parcelle du Cercle, les prélèvements ont été effectués sur 4 profondeurs : 0-20 cm, 20-40 cm, 70-90 cm et 90-120 cm. Pour chaque prélèvement, la conductivité électrique sur extrait à l'eau 1:5 a été mesurée et convertie en équivalent sur extrait de pâte saturée (CE_{sp}) à partir de la relation présentée dans la partie 4.1.1. Sur chaque parcelle, les valeurs de CE_{sp} ont été spatialement interpolées pour les 4 profondeurs à l'aide la méthode Inverse Distance.

Les valeurs de stock en sel sur le profil 0-120 cm ont été estimées à partir des valeurs de ECsp suivant l'équation :

$$Stock\ en\ sel\ =\ EC_{sp}\ *\ \frac{Salinité\ eau\ de\ mer}{EC_{eau\ de\ mer}}\ *\ \theta_{sat}\ \ *\ z\ *\ S$$

avec : θ_{sat} l'humidité volumique à saturation prise égale à 40 % (m3 d'eau/m3 de sol), z l'épaisseur de l'horizon du sol échantillonné, S la surface des parcelles considérée dans l'interpolation spatiale soit 1,83 ha pour la parcelle du Cercle et 2,87 ha pour la parcelle de Grands-Vignes; et en considérant la salinité de l'eau de mer prise égale à 35 $g.l^{-1}$ et la CE d'eau de mer prise égale à 50 $mS.cm^{-1}$.

3. Résultats & discussions

Les résultats présentés dans la suite rendent compte de l'importante base de données constituée sur la basse-plaine de l'Aude. Ils exposent l'état général de la salinité à l'échelle de la basse-plaine et de sa variation à courte distance et sur la période d'étude. L'origine de la salinité est déterminée en comparant la conductivité électrique, les teneurs en Na+ et Ca2+

des sols et des eaux douces et salées. La distribution des valeurs de salinité pour les différentes composantes du paysage est analysée. Enfin, l'évolution temporelle de la salinité mesurée à différentes échelles est quantifiée.

3.1 Ordres de grandeur de la salinité dans la basse-plaine de l'Aude

3.1.1 Relation entre extraits sur pâte saturée et extrait à l'eau

La relation entre extraits sur pâte saturée et extrait à l'eau a été établie sur les 32 échantillons analysés en laboratoire. La Figure 16 montre un facteur de proportionnalité entre la CE_{sp} et la $CE_{1:5}$ de 11,35, avec un $R^2 = 0,98$. Ce facteur de proportionnalité régional est comparable avec les valeurs rapportées par de nombreux auteurs (Kargas et al., 2018).

Par ailleurs, la relation entre $CE_{1:5}$ mesurées au laboratoire CIRAD (référence) et $CE_{1:5}$ mesurées en laboratoire durant la thèse, montre une bonne corrélation entre les deux types de mesures avec un r^2 de 0,98 et un biais de 1,07. Ces résultats confirment que les mesures $CE_{1:5}$ effectuées durant la thèse peuvent bien être converties en CE_{sp} et être interprétées dans un référentiel normalisé de la salinité de sols.

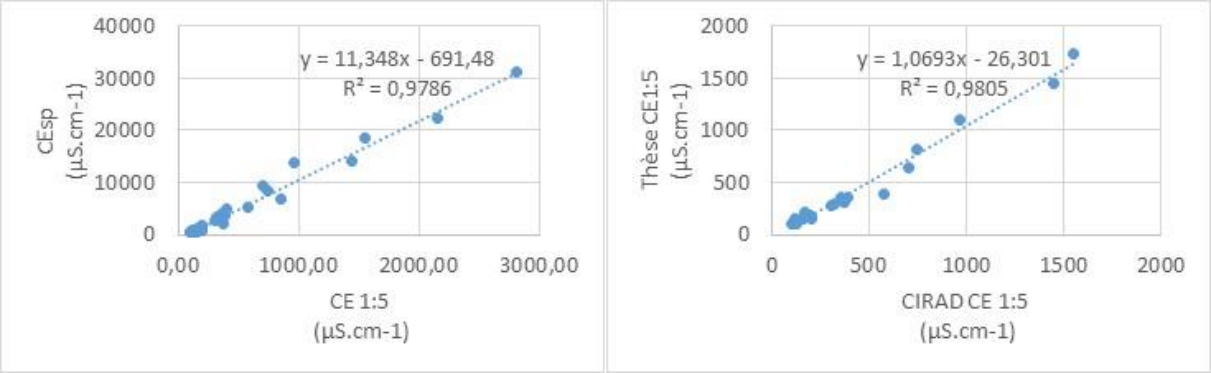


Figure 16 : Corrélation entre les conductivités électriques sur extrait de pâte saturée (CE_{sp}) et sur dilution 1:5 ($CE_{1:5}$) d'après les analyses du CIRAD (graphe de gauche) et les conductivités électriques sur dilution 1:5 d'après nos propres analyses laboratoire

3.1.2 Statistiques descriptives des valeurs de salinité sur l'ensemble des échantillons

Les valeurs de conductivité électrique sont montrées au Tableau 4 suivant les classes de salinité proposées par la FAO et au Tableau 5 en distinguant les échantillons de surface et de profondeur. La Figure 17 représente la cartographie des valeurs de conductivité électrique en surface et en profondeur.

Tableau 4 : Conductivité électrique des échantillons de sol selon le classement de la FAO

Classes de CE (mS.cm^{-1})		**0-2**	**2-4**	**4-8**	**8-16**	**16-50**	**>50**	**TOTAL**
Surface (0-40cm)	n	52	137	60	18	19	7	293
	%	18	47	20	6	6	2	100
Profondeur (90-120cm)	n	12	68	55	28	29	2	194
	%	6	35	28	14	15	1	100

*Tableau 5 : Statistiques descriptives de la conductivité électrique en surface et en profondeur d'après le test de Kruskall-Wallis avec n=nombre d'individus, min= minimum, max=maximum, median= médiane, q1=1er quantile, q3=3ème quantile, mean=moyenne, sd= écart-type, p=, significativité = <0,05 *, <0,01**, <0,005***, <0,001****.*

Profondeur	**n**	**min**	**max**	**median**	**q1**	**q3**	**mean**	**sd**	**p**	**significativité**
0-40cm	293	0,71	103,60	3,38	2,44	5,16	7,52	14,91	1.82^{-6}	****
90-120cm	194	0,54	98,29	4,94	2,86	11,30	9,41	11,94		

Les valeurs mesurées couvrent une large gamme et s'échelonnent sur la totalité des classes proposées par la FAO.

Pour les prélèvements en surface, 52 échantillons ont une CE comprise entre 0 et 2 mS.cm^{-1} correspondant à des sols non salés, 137 échantillons sont légèrement salés avec une CE comprise entre 2 et 4 mS.cm^{-1}, 60 échantillons sont moyennement salés avec une CE entre 4 et 8 mS.cm^{-1}, 18 échantillons sont très salés avec une CE entre 8 et 1 mS.cm^{-1}, 26 échantillons sont extrêmement salés avec 19 échantillons d'une CE comprise entre 16 et 50 mS.cm^{-1} et 7 échantillons dont les valeurs rares de CE dépassent 50 mS.cm^{-1}.

Pour les prélèvements en profondeur, 12 échantillons ont une CE entre 0 et 2 mS.cm^{-1}, 68 échantillons ont une CE entre 2 et 4 mS.cm^{-1}, 55 échantillons ont une CE entre 4 et 8 mS.cm^{-1},

28 échantillons ont un CE entre 8 et 16 $mS.cm^{-1}$, 29 échantillons ont une CE entre 16 et 50 $mS.cm^{-1}$ et 2 échantillons ont une CE supérieure à 50 $mS.cm^{-1}$.

En surface il y a plus d'échantillons non-salés ou légèrement salés qu'en profondeur avec 18% des échantillons ayant une CE entre 0-2 $mS.cm^{-1}$ contre 6% en profondeur et 47% des échantillons en surface ayant une CE comprise entre 2 et 4 $mS.cm^{-1}$ contre 35% en profondeur. A l'inverse, il y a plus d'échantillon en profondeur très salés ou extrêmement salés qu'en surface avec 14% des échantillons en profondeur ayant une CE entre 8 et 16 $mS.cm^{-1}$ contre 6% en surface, 16% des échantillons en profondeur ayant une CE supérieure à 16 $mS.cm^{-1}$ contre 8% en surface.

La différence entre les échantillons de surface et profonds est significative[1] ($p<0,001$) avec une conductivité électrique moyenne et médiane de 7,52 et 3,38 $mS.cm^{-1}$ en surface et de 9,41 et 4,94 $mS.cm^{-1}$ en profondeur. La valeur maximale trouvée dans un échantillon de surface présente une EC extrêmement élevée de 103,60 $mS.cm^{-1}$, soit plus du double de celle de l'eau de mer.

[1] Dans un premier temps, la variabilité de la salinité dans le profil du sol a été examinée en comparant l'EC_{sp} à la surface et l'EC_{sp} en profondeur. Préalablement, un test de normalité (test de Shapiro) a été conduit et a révélé la non-normalité des échantillons et un test de Levene a montré la non-homogénéité des variances. L'analyse a donc été complétée par le test non-paramétrique de Kruskal Wallis pour déterminer s'il existe une différence statistiquement significative entre les médianes des 2 groupes (surface vs. profondeur).

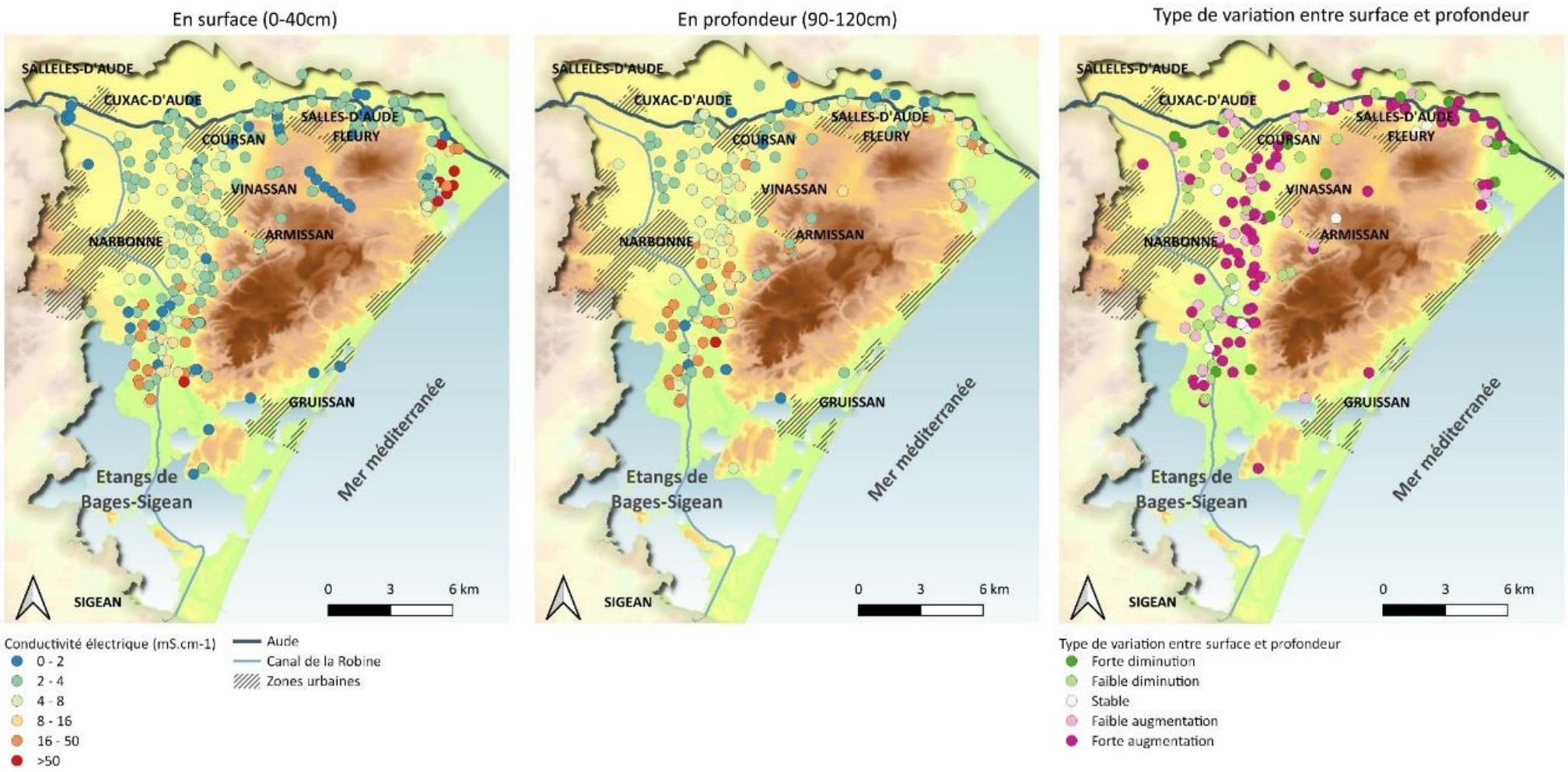


Figure 17 : Cartographie de la conductivité électrique (CEsp en mS.cm-1) des échantillons de sol de surface, profonds et le type de variation entre surface et profondeur

Pour chaque profil, on considère EC comme stable si la variation entre surface et profondeur est inférieure à 5%, la variation d'EC faible si elle est comprise entre 5% et 50% entre surface et profondeur et forte si elle est supérieure à 50% entre surface et profondeur. Elle est en augmentation lorsque la CE en profondeur est supérieure à celle en surface et en diminution lorsque la CE en profondeur est inférieure à celle en surface. A partir des 414 positions géographiques faisant l'objet de prélèvements de sols, seuls 194 points géographiques ont des valeurs de CE_{sp} en surface et en profondeur, les variations sont analysées sur ces 194 points. Il existe une forte diminution entre la surface et la profondeur de la CE_{sp} pour 17 points, une faible diminution pour 43 points, une CE_{sp} stable pour 15 points, une faible augmentation pour 37 points et une forte augmentation pour 82 points. La variation prédominante est une forte augmentation de la CE en profondeur, avec une CE en profondeur plus élevée d'au moins 50% que la CE en surface. Le type de variation entre surface et profondeur ne semble pas suivre de logique spatiale.

3.2 Origine de la salinité

3.2.1 Salinité des sols

La salinité de la solution du sol dépend du cortège ionique qui la compose. Deux éléments ont été relevés en particulier, Na^+, Ca^{2+}, dans le but de qualifier l'origine de la salinité. La Figure 18 montre les graphes représentant la concentration en sodium et le ratio entre les concentrations en calcium et sodium en fonction de la conductivité électrique pour les échantillons de sol de surface et de profondeur. Les mesures d'EC et de concentration ont été corrigées du facteur 11,35 précédemment identifié pour être rapportées à des équivalents de pâte saturée et être comparées aux valeurs correspondant à l'eau de mer.

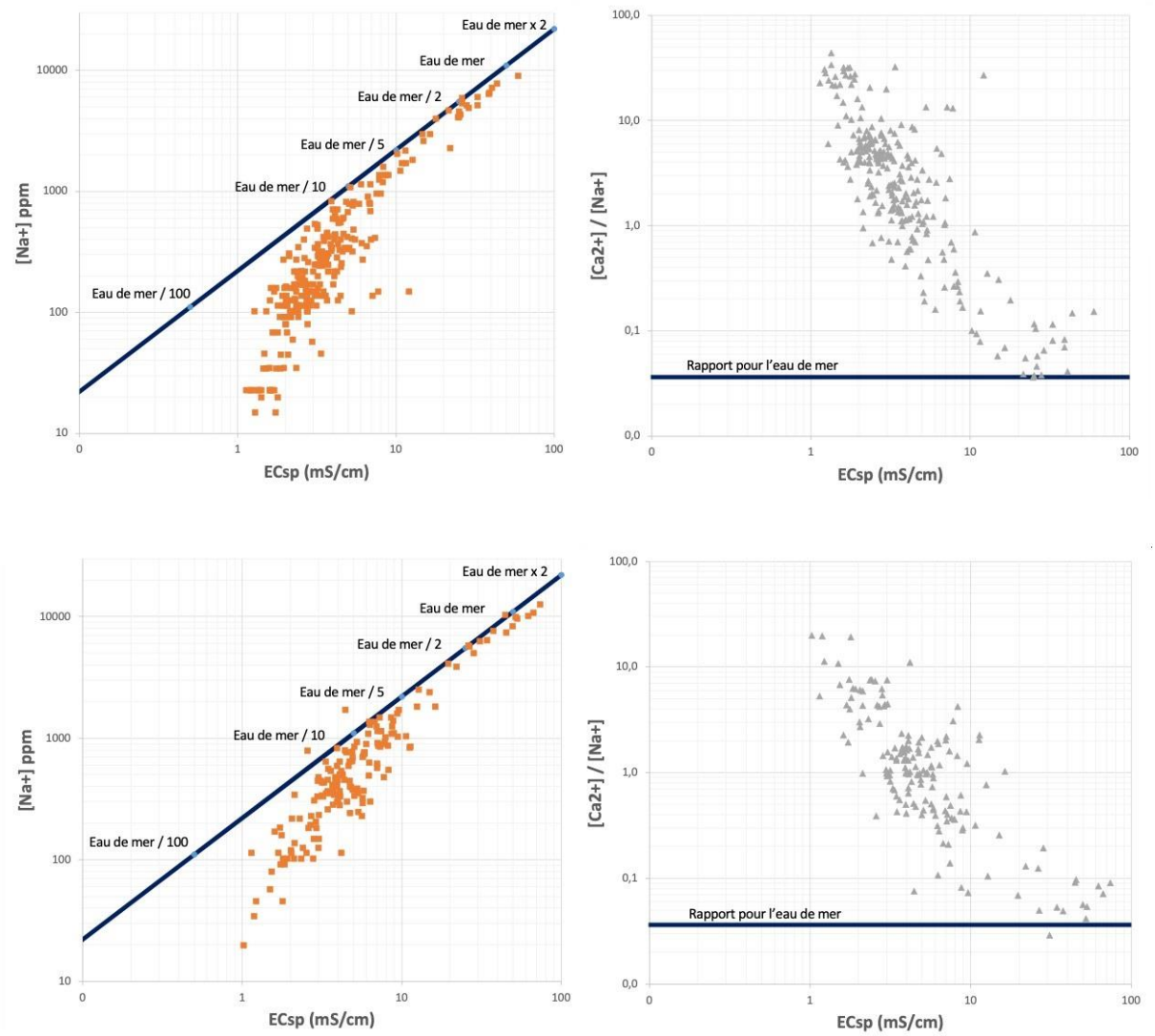


Figure 18 : Concentration en Sodium corrigée en fonction de la conductivité électrique sur extrait de pâte saturée (graphes de gauche) et rapport calcium sur sodium en fonction de la conductivité électrique sur extrait de pâte saturée (graphes de droite) pour les échantillons de sol de surface (en haut) et les échantillons profonds (en bas)

Pour les fortes valeurs de conductivité électrique, les points sont proches de la droite de dilution. Pour les plus faibles valeurs de conductivité électrique, les valeurs montrent un appauvrissement relatif en Na^+ et un enrichissement relatif en Ca^{2+} par rapport à l'eau de mer. En profondeur, quelques points apparaissent plus salés que l'eau de mer.

Ces résultats montrent que les fortes valeurs de salinité des sols, la salinité est d'origine marine. Ils montrent également que la salinité de la solution du sol est le produit d'un mélange

entre une eau de mer et une eau calcique issue de l'interaction avec les sédiments calcaires de la basse-plaine.

3.2.2 Salinité des eaux

Les mesures de conductivité électrique des eaux de surface sont représentées à la Figure 19. Les valeurs sont constantes le long de l'Aude de l'amont de la zone d'étude jusqu'au barrage anti-sel ainsi que le long du canal de la Robine. Les valeurs sont faibles et comprises entre 0,6 et 0,7 mS.cm^{-1}. La conductivité électrique ne présente pas de variation en profondeur dans l'Aude et la Robine.

La conductivité électrique des canaux collecteurs est très variable. Les valeurs sont faibles (0,6 à 0,7 mS.cm^{-1}) dans la partie Nord de la zone. Au niveau de la partie Sud, à proximité des étangs, la conductivité augmente. Pour les valeurs élevées de conductivité, on note une stratification avec la profondeur des canaux. Elle peut varier de 1,7 en surface à 35,2 mS.cm^{-1} en profondeur à 4,5km des étangs, et respectivement de 2,6 à 44,1 mS.cm^{-1} à proximité des étangs.

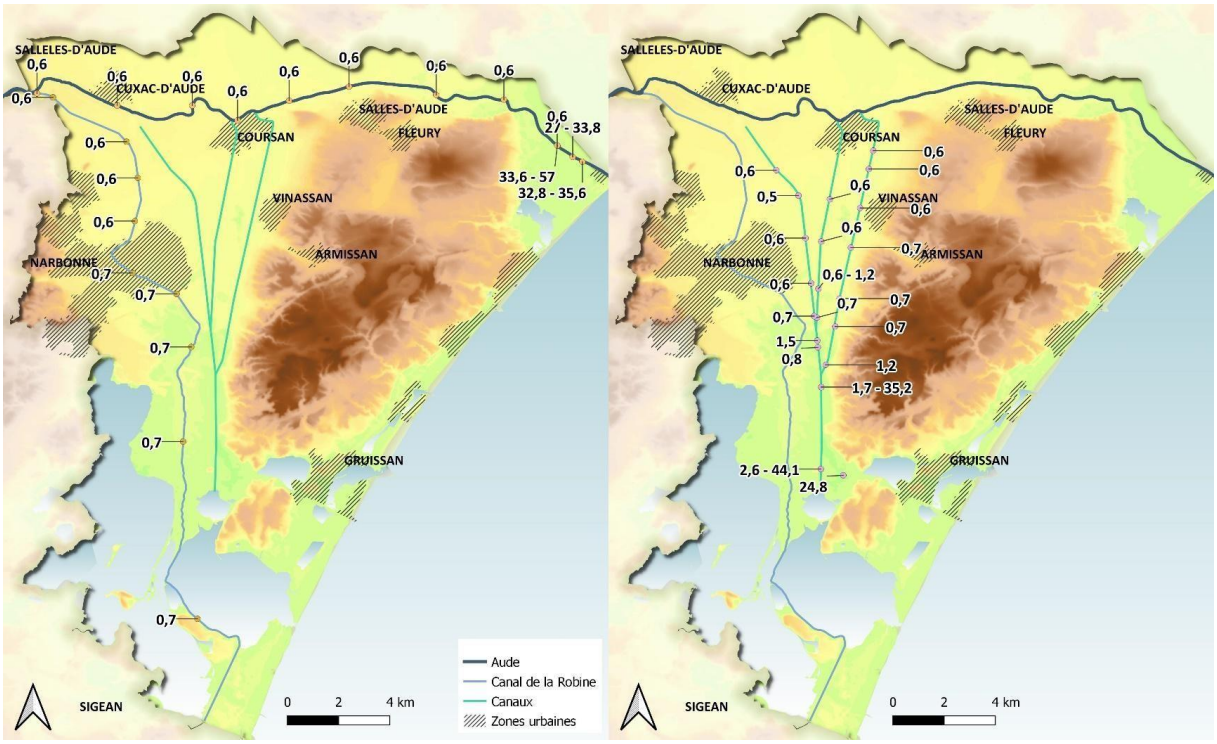


Figure 19 : Conductivité électrique (mS.cm-1) des eaux de surface (Aude et canal de la Robine à gauche et canaux collecteurs à droite)

La conductivité électrique mesurée dans les sources au niveau de la Clape et de Ricardelle sont également faibles. La conductivité électrique mesurée dans les ouvrages (puits, forages) lors de 3 campagnes (été 2019, hiver 2021 et été 2021) est relativement stable. La Figure 20 montre que la grande majorité des points (plus de 60 points) ont une conductivité électrique inférieure à 2 $mS.cm^{-1}$. Une douzaine de points ont une conductivité comprise entre 2 et 4 $mS.cm^{-1}$ et une minorité de points (6 points) ont une conductivité supérieure à 4 $mS.cm^{-1}$. La conductivité des eaux souterraines échantillonnées peut donc être globalement qualifiée de faible.

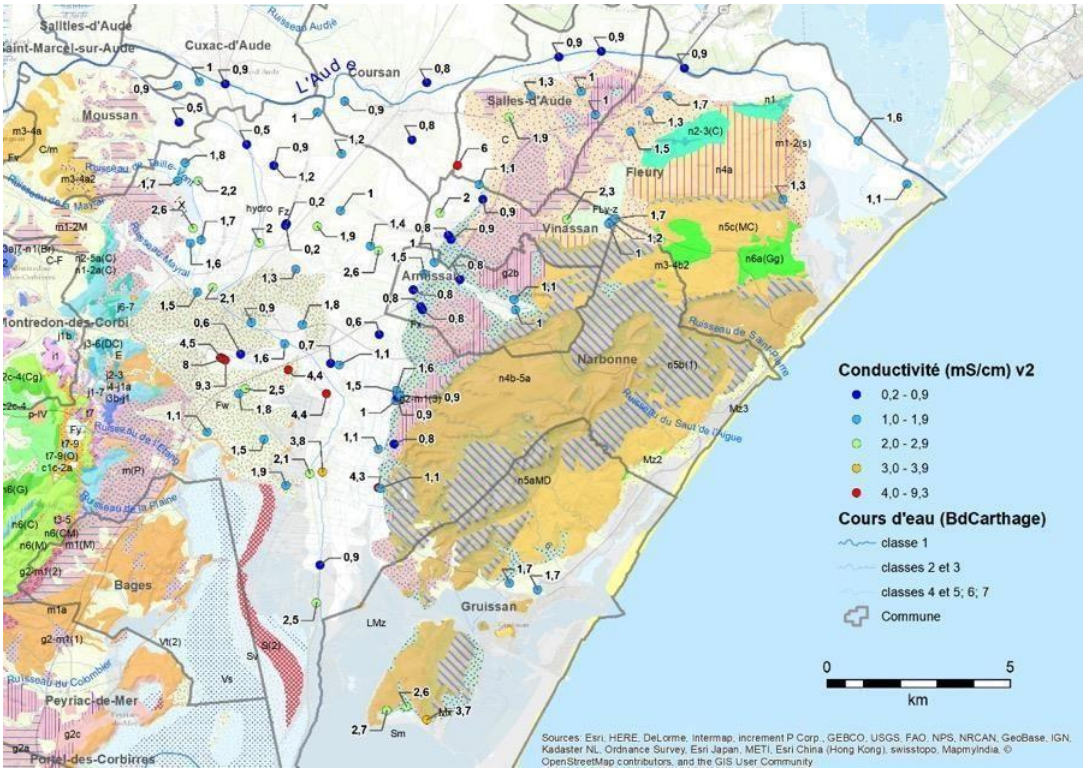


Figure 20 : Conductivité électrique mesurée par le BRGM à l'été 2019 dans les puits et forage peu profonds identifiés sur la zone d'étude.

On peut donc considérer l'eau de l'Aude (qui s'écoule dans le cours du fleuve et dans la Robine après son prélèvement à Moussoulens en amont de la zone d'étude) et les eaux souterraines issues du Massif de Clape comme les pôles d'eaux douces de la basse-plaine. Les eaux échantillonnées dans des puits ou des forages en activité ne peuvent être considérées comme représentatives de l'ensemble des eaux souterraines puisqu'il est fortement probable que seuls les ouvrages les moins salés sont exploités. De nombreux auteurs ont rapportés l'existence de stratification de la salinité des eaux souterraine peu profondes : les eaux douces ou moins salées provenant de flux de percolation, moins denses, sont présentes au-dessus

d'eaux plus salées, quelquefois définies comme "lentilles d'eau douce" (Asghar et al., 2002; De Louw et al., 2013; Northey et al., 2006; Saeed et al., 2003). Il est possible que les forages peu profonds et les puits soient en lien le toit de ces types de lentille d'eau douce. Enfin, les canaux interceptant des eaux de drainage des parcelles montrent des niveaux de salinité plus proches de celle des sols.

3.3 Organisation spatiale de la salinité dans la basse-plaine de l'Aude

3.3.1 Structure spatiale de la salinité

Les valeurs de conductivité électrique sur extrait de pâte saturée en surface et en profondeur suivent une distribution log-normale comme le montre la Figure 21. On a donc appliqué une transformation logarithmique avant de procéder à la construction du semi-variogramme.

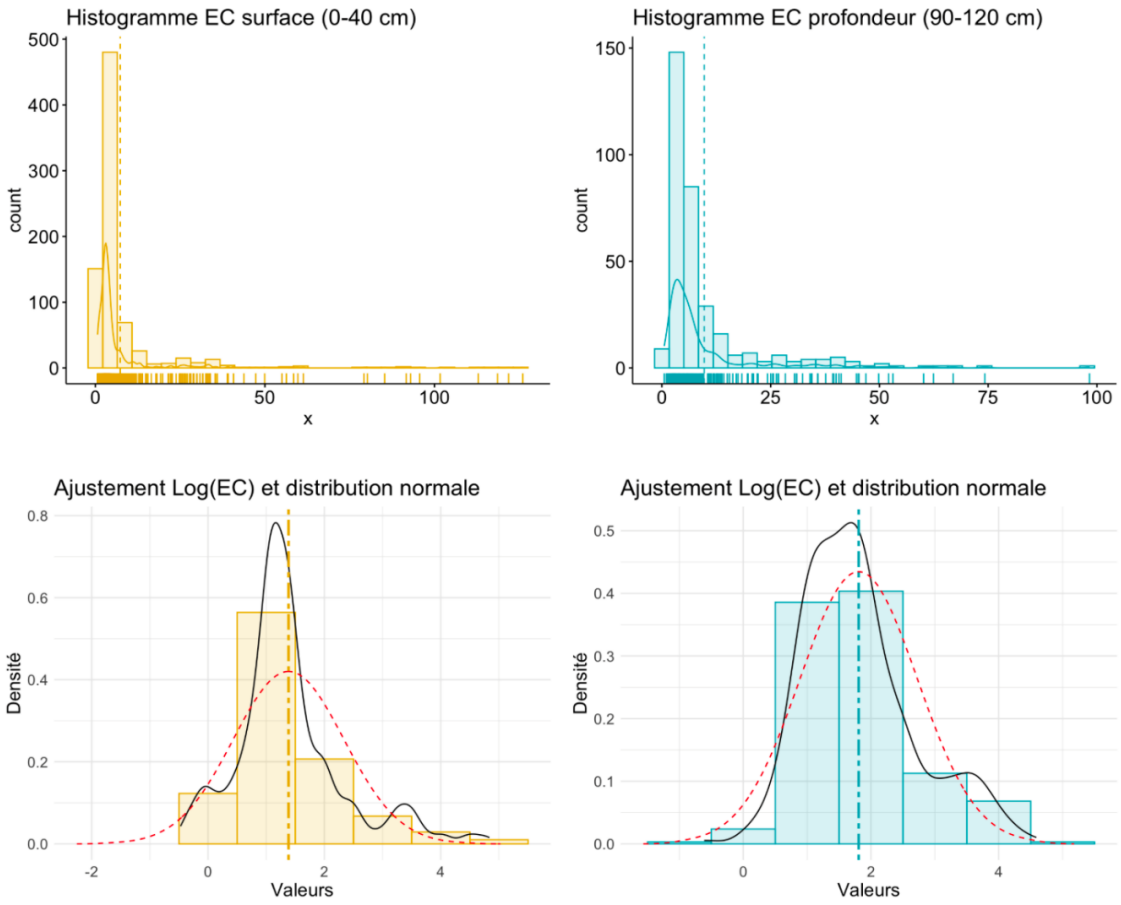


Figure 21 : Distribution des valeurs de conductivité électrique extrait de pâte saturée de surface (0-40 cm) et en profondeur (80-120cm)

La Figure 22 présente les semi-variogrammes calculés pour les mesures de conductivité électrique en surface (CE_{sp}), sur l'horizon 0-40 cm (avec un ajustement avec un modèle Gaussien) et sur l'horizon 80-150 cm (avec un ajustement avec un modèle Sphérique).

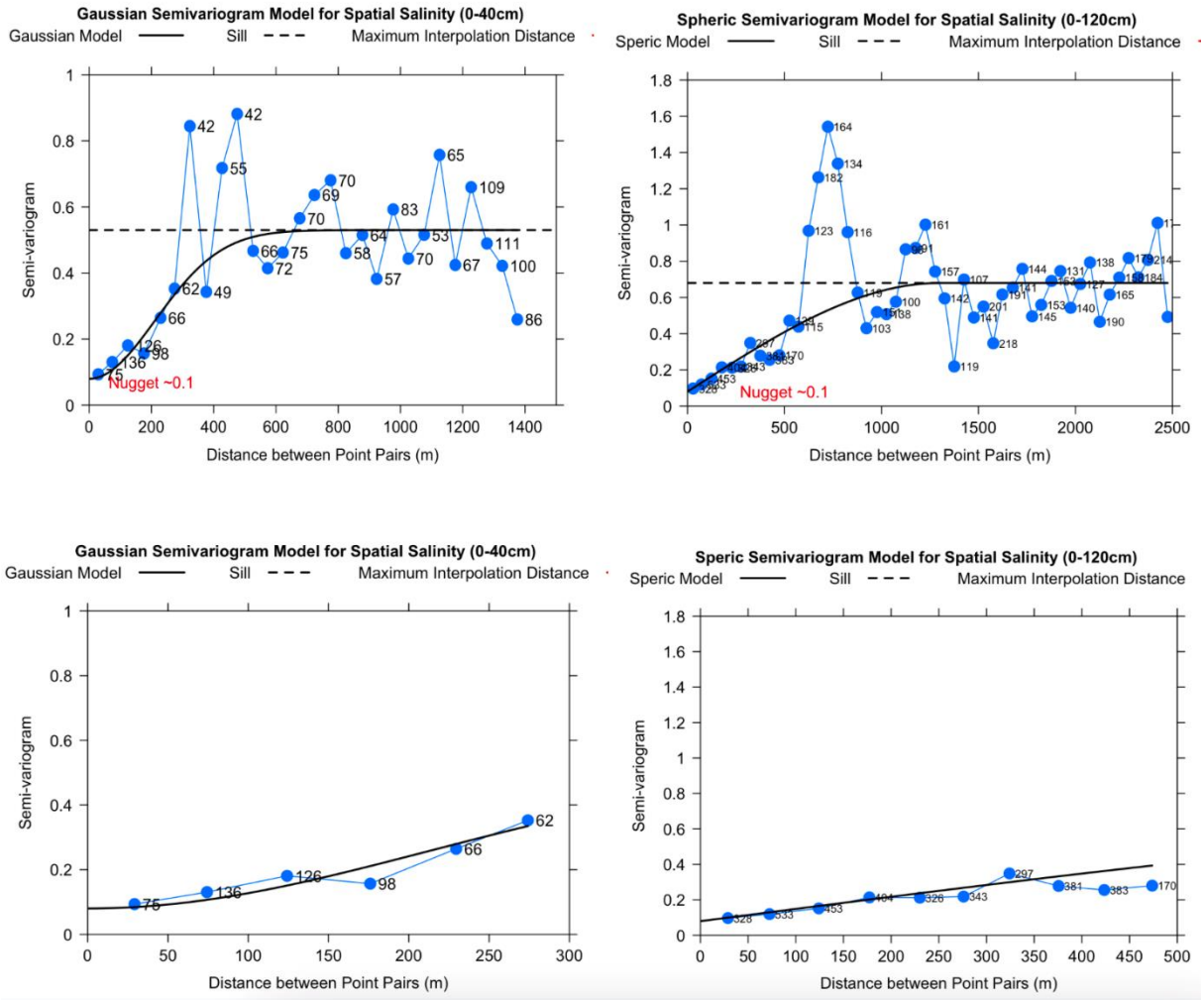


Figure 22 : Semi-variogrammes de la conductivité électrique extrait de pâte saturée (ECsp) en surface (0-40cm) et en profondeur (80-120cm)

Au sens des variogrammes, les valeurs de conductivité électrique présentent une structure spatiale, qui diffère sensiblement entre la surface et la profondeur.

En surface, la variance est faible à courtes distances (< 200 m) et la portée est atteinte proche de 400 m de distance. Une exploration de la variance sur une plage limitée confirme cette observation en montrant une variance particulièrement basse pour des distances interclasses inférieures à 50 m. Cette structure spatiale évoque des dimensions similaires à celles de la

structure parcellaire ou d'îlot parcellaire. Par conséquent, nous pouvons proposer ici une interprétation selon laquelle, à l'échelle de la basse-plaine, entre deux parcelles proches (ou îlot parcellaire proche), l'histoire et la gestion des parcelles peuvent avoir un impact sur la distribution spatiale de la salinité, réduisant ainsi la variabilité au sein des parcelles par rapport à la variabilité entre les parcelles. Cependant, il est important de noter que cette constatation ne doit pas effacer complètement la variabilité intra-parcellaire (cf. section 3.2.1).

En profondeur, un ajustement de type sphérique est proposé sur une distance de 2.5 km et une portée de 1 km. En comparaison avec la surface, la structure spatiale de la salinité des sols en profondeur s'établit donc sur des distances plus importantes. Cela suggère que les effets liés aux activités de surface, y compris les pratiques actuelles et passées ainsi que les aménagements, diminuent pour laisser place à des motifs de plus grande envergure liés aux types de dépôts (fluviaux, fluvio-lacustres) et aux conditions de salinité des eaux souterraines, qu'elles soient piégées ou en circulation.

3.3.2 Distribution de la salinité selon les facteurs du paysage

Dans cette partie les valeurs de salinité des sols sont analysées en fonction des facteurs paysagers que constituent le relief, appréhendé selon une classification simple géomorphologique, les types de sols, l'occupation du sol à l'échelle parcellaire et l'appartenance à une structure de gestion collective de l'eau (ASA d'irrigation et de drainage). Les résultats complets des analyses statistiques sont donnés en Annexe A.

3.3.2.1 Salinité et géomorphologie

Les valeurs de salinité des sols regroupées suivant les 7 classes géomorphologiques définies au Chapitre 1 (par altitude croissante : Zone en eau (étangs intermittents), Plaines inférieures, Plaines supérieures, Plateaux inférieurs, Plateaux supérieurs, Coteaux, Structure tabulaire) sont montrées à la Figure 23.

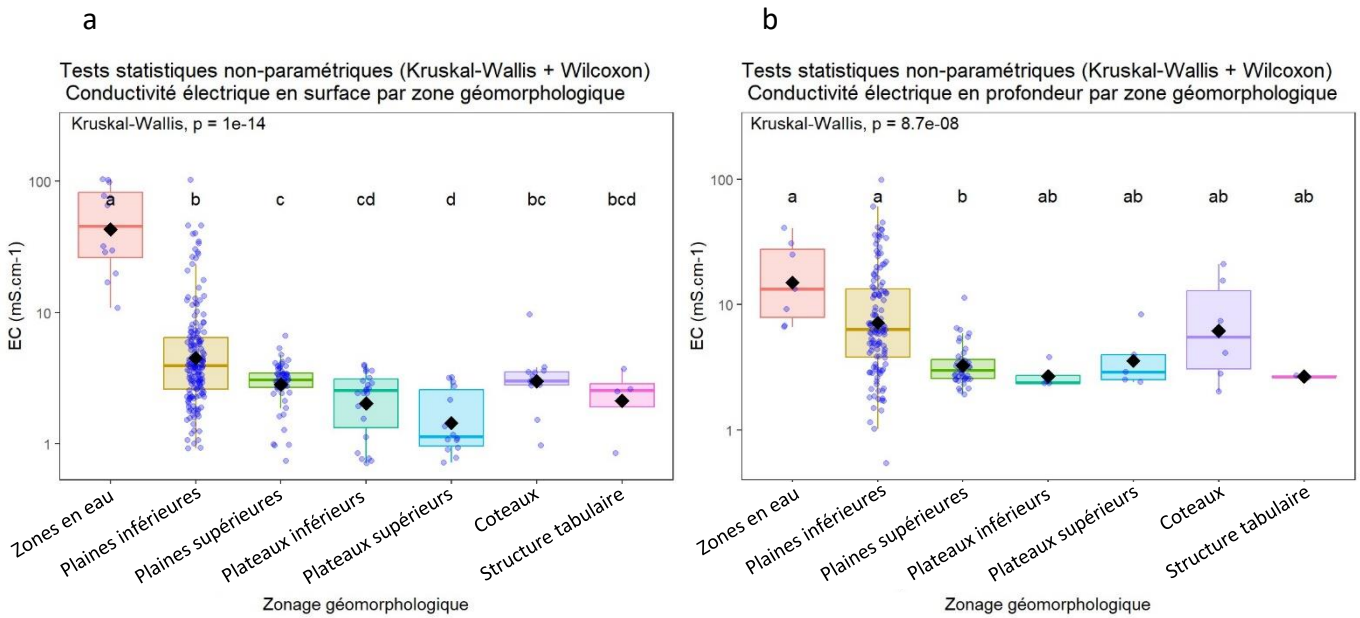


Figure 23 : Comparaison de la CE_{sp} de chaque classe géomorphologique en surface (a) et profondeur (b) par test de Kruskal-Wallis et Wilcoxon

En surface, la conductivité électrique est plus élevée dans les zones en eau transitoires (étangs intermittents) avec une CE moyenne de 55,18 $mS.cm^{-1}$. La EC est moins élevée dans les plaines inférieures (EC moyenne de 7,23 $mS.cm^{-1}$) que dans les zones en eau. Les plaines supérieures ont une EC moyenne de 0,57 $mS.cm^{-1}$ plus faible que dans les plaines inférieures. Et enfin, les plateaux supérieurs ont une EC plus faible que toutes les autres zones (EC moyenne de 0,44 $mS.cm^{-1}$). Les coteaux ont une EC intermédiaire entre les plaines inférieures et les plaines supérieures, les plateaux inférieurs ont une EC entre les plaines supérieures et les plateaux supérieurs et enfin les structures tabulaires ont une CE entre celles des plaines et des plateaux.

En profondeur, la conductivité électrique est plus élevée dans les zones en eau transitoires (CE moyenne = 18,89 $mS.cm^{-1}$) et les plaines inférieures (CE moyenne = 11,54 $mS.cm^{-1}$) (Figure 23). Les plaines supérieures ont une CE moyenne de 3,50 $mS.cm^{-1}$, plus faible que dans les autres zones. Dans les coteaux, les plateaux inférieurs et supérieurs et les structures tabulaires, la CE est intermédiaire entre celle des zones en eau et plaines inférieures et celle des plaines supérieures mais pas significativement différente.

La salinité suit un gradient géomorphologique globalement significatif augmentant des zones les plus basses en altitude vers les zones les plus hautes. Les résultats sont particulièrement significatifs pour les échantillons prélevés en surface. Les zones en eau de manière intermittente en bordure des étangs sont en moyenne les plus salées. Toutefois, la différence avec les plaines inférieures n'est significative qu'en surface et pas en profondeur. Enfin, on note une forte variabilité dans la classe géomorphologique des plaines inférieures.

3.3.2.2 Salinité et types de sols

Les valeurs de salinité des sols regroupées suivant les 6 types de sols dominants sont montrées à la Figure 24.

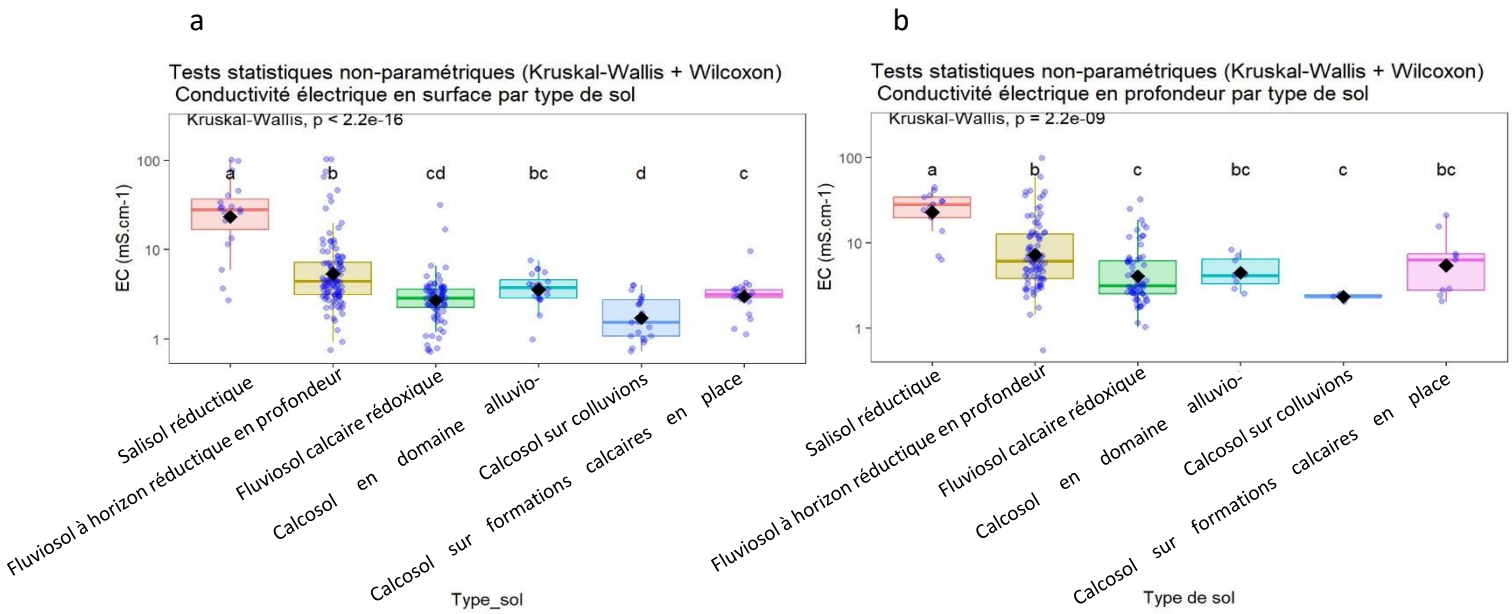


Figure 24 : Comparaison de la CEsp de chaque type de sol en surface (a) et profondeur (b) par test de Kruskal-Wallis et Wilcoxon

En surface, la conductivité électrique est plus élevée sur les salisols réductiques avec une CE moyenne de 34,19 mS.cm^{-1}. Les fluviosols à horizon réductique en profondeur ont une CE moins élevée que les salisols réductiques et plus élevée que les autres types de sol (CE moyenne de 9,45 mS.cm^{-1}). Les calcosols sur formation calcaires anciennes ont une CE inférieure à celle des fluviosols à horizon réductique en profondeur avec une CE moyenne de 3,27 mS.cm^{-1}. Les calcosols sur colluvions ont une CE inférieure à celle des autres types de sol

avec une CE moyenne de 1,98 mS.cm^{-1}. Les calcosols en domaine alluvio-colluvial ont une CE moyenne de 3,91 mS.cm^{-1} intermédiaire entre celle des fluviosols à horizon réductique en profondeur et calcosols sur formations calcaires anciennes sans différence significative. Les fluviosols calcaires rédoxiques ont une CE moyenne de 3,36 mS.cm^{-1} qui se situe entre les calcosols sur formations calcaires anciennes et les calcosols sur colluvions.

En profondeur, la conductivité électrique est plus élevée sur les salisols réductiques avec une CE moyenne de 26,38 mS.cm^{-1}. Les fluviosols à horizon réductique en profondeur ont une CE moyenne de 11,36 mS.cm^{-1}, moins élevée que les salisols réductiques et plus élevée que les autres types de sol. Les fluviosols calcaires rédoxiques et les calcosols sur colluvions ont une CE inférieure à celle des fluviosols à horizon réductique en profondeur avec respectivement une CE moyenne de 5,63 mS.cm^{-1} et 2,33 mS.cm^{-1}. Les calcosols en domaine alluvio-colluvial et les calcosols sur formations calcaires anciennes ont une CE intermédiaire entre celle des fluviosols à horizon réductique en profondeur et celle des fluviosols calcaires rédoxiques et calcosols sur colluvions sans différence significative.

3.3.2.3 Salinité et occupation du sol

Les valeurs de salinité des sols regroupées suivant 4 grandes catégories d'occupation des sols sont montrées à la Figure 25.

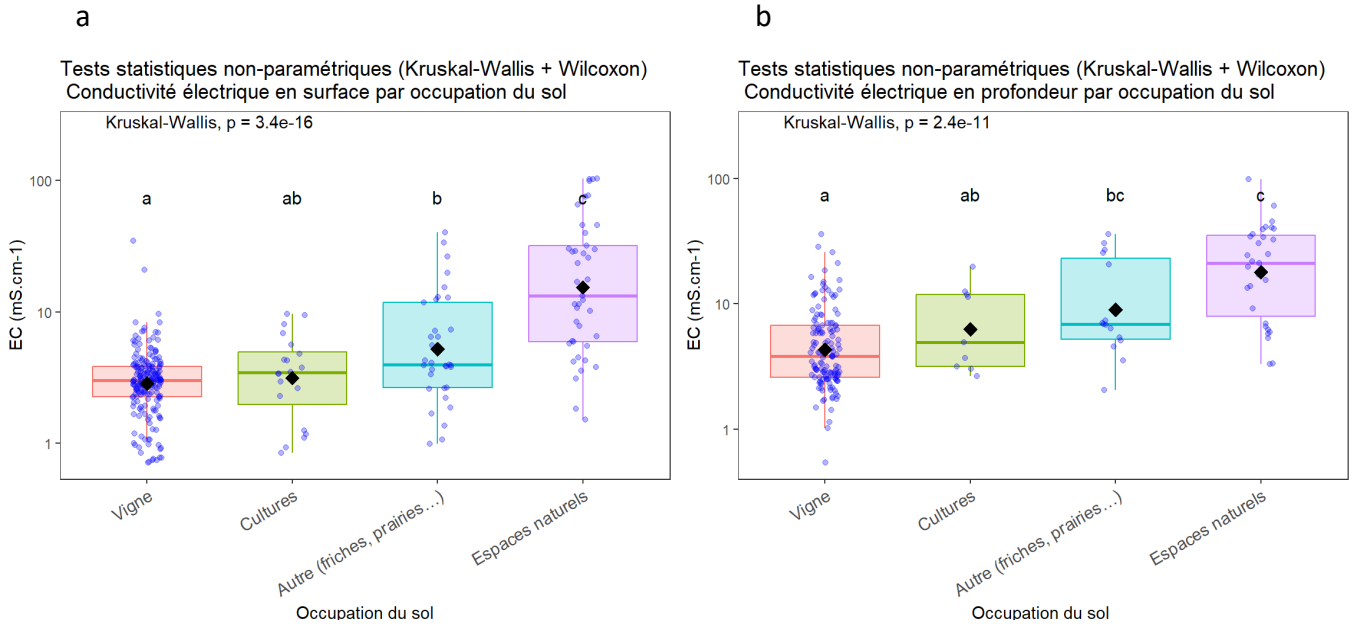


Figure 25 : Comparaison de la CEsp par grande catégorie d'occupation du sol en surface (a) et profondeur (b) par test de Kruskal-Wallis et Wilcoxon

En surface, la conductivité électrique des espaces naturels est statistiquement plus élevée que toutes les autres occupations du sol avec une CE moyenne de 28,36 mS.cm^{-1}. La CE sur les parcelles de friches ou prairies est plus faible que les espaces naturels avec une CE moyenne de 8,33 mS.cm^{-1}. La CE sur les parcelles de vignes est plus faible que les autres occupations de sol avec une CE moyenne de 3,44 mS.cm^{-1}. Les cultures ont une CE intermédiaire entre celle des vignes et celle des friches et prairies mais pas différente statistiquement.

En profondeur, la conductivité électrique des espaces naturels est statistiquement plus élevée que toutes les autres occupations du sol avec une CE moyenne de 24,96 mS.cm^{-1}. La CE sur les parcelles de vignes est plus faible que les autres occupations de sol avec une CE moyenne de 5,73 mS.cm^{-1}. Les friches et prairies et les cultures ont une CE intermédiaire entre celle des vignes et celle des espaces naturels.

3.3.2.4 Salinité et unités de gestions de l'eau agricole

Les valeurs de salinité des sols regroupées suivant l'emprise spatiale des 4 principales Association Syndicale Autorisée (ASA) et hors ASA sont montrées à la Figure 26.

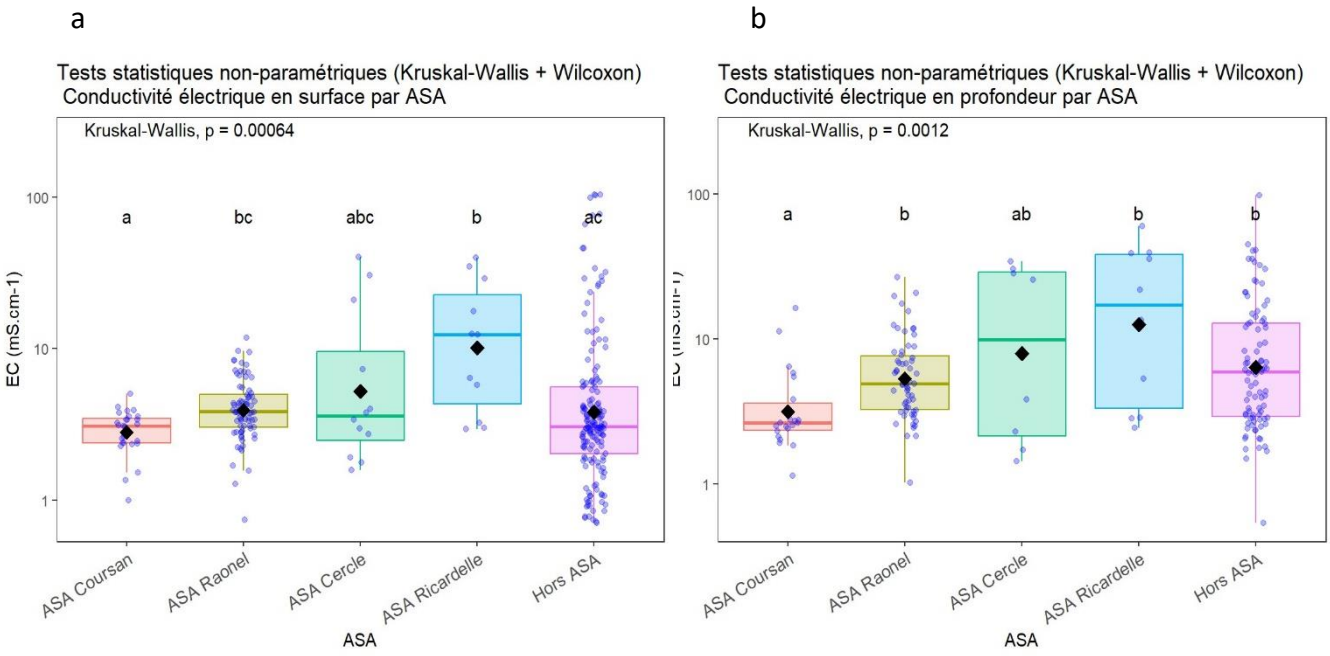


Figure 26 : Comparaison de la CE_{sp} par Association Syndicale Autorisée en surface (a) et profondeur (b) par test de Kruskal-Wallis et Wilcoxon

En surface, la conductivité électrique dans l'ASA Ricardelle est plus élevée avec une CE moyenne de 15,23 mS.cm^{-1}. L'ASA de Coursan a une CE moyenne de 2,95 mS.cm^{-1} plus faible que les autres ASA. Les ASA de Raonel, du Cercle et les points hors ASA ont une CE intermédiaire entre celle des ASA Ricardelle et de Coursan.

En profondeur, la conductivité électrique dans les ASA Ricardelle, Raonel et les points hors ASA sont plus élevées avec respectivement des CE moyennes de 22,37 mS.cm^{-1}, 6,62 mS.cm^{-1} et 10,79 mS.cm^{-1}. Dans l'ASA de Coursan, la CE est plus faible avec une CE moyenne de 3,97 mS.cm^{-1}. La CE de l'ASA du Cercle n'est pas statistiquement différente des autres ASA.

Una approche multi-factorielle par une analyse en composantes multiples (ACM) et une classification ascendante hiérarchique (CAH) est disponible en Annexes B, C et D.

3.4 Dynamiques locales de la salinité

3.4.1 Variations dans le temps

Les différences de salinité dans le temps caractérisées par le suivi de 14 parcelles entre 2018 à 2022 et à des périodes de l'année différentes sont montrées à la Figure 27.

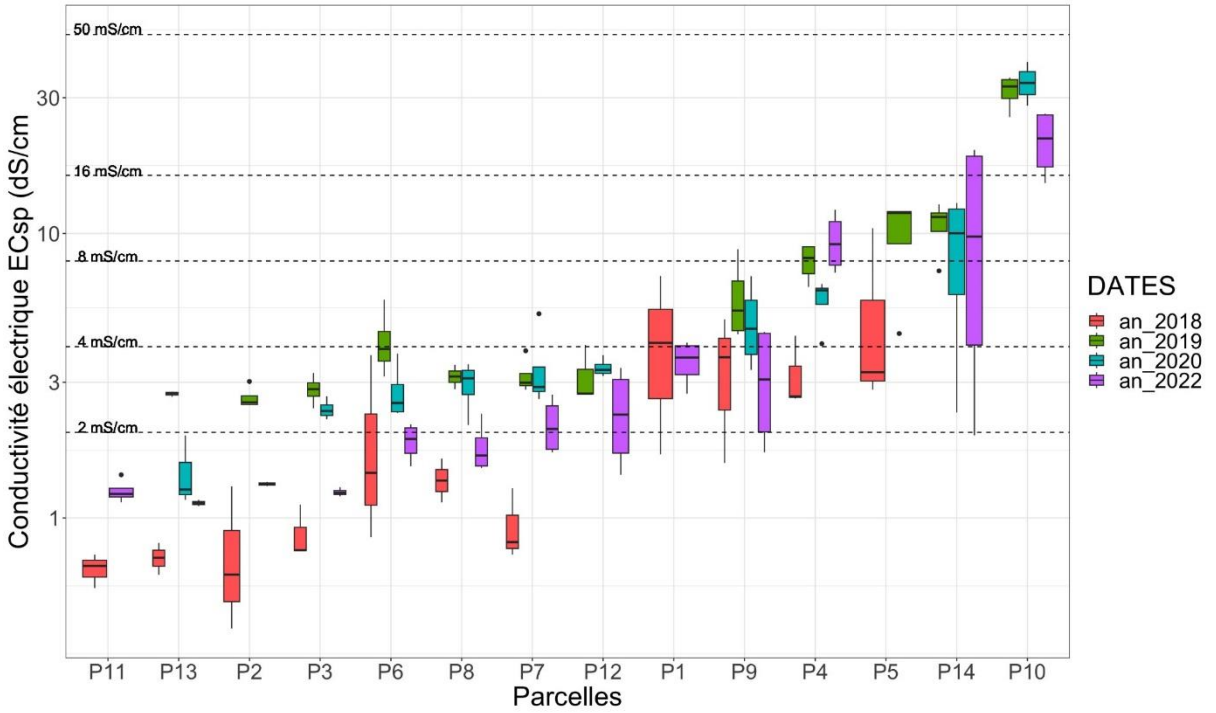


Figure 27 : Comparaison des valeurs de conductivité électrique mesurées à plusieurs dates sur 14 parcelles

La salinité est très variable entre les 14 parcelles ayant fait l'objet d'un multi-échantillonnage temporel. La gamme des conductivités comprend des valeurs de salinité faibles (<2mS.cm^{-1}) pour 6 parcelles (P11, P13, P2, P3, P6, P7), moyennes (2 <EC_{sp}<4 mS.cm^{-1}) pour 2 parcelles (P12, P1), et très fortes (>4mS.cm^{-1}) pour 5 parcelles (P9, P4, P5, P14, P10).

La Figure 28 montre que les mesures réalisées en septembre 2018, toutes profondeurs confondues, présentent les valeurs de CE_{sp} les plus basses. Les résultats du test de Friedman (test non-paramétrique sur mesures répétées), appliqué sur 6 parcelles, confirment que cette année 2018 se démarque de manière significative (p-value = 7.494e^{-06}) des autres années du point de vue de la salinité.

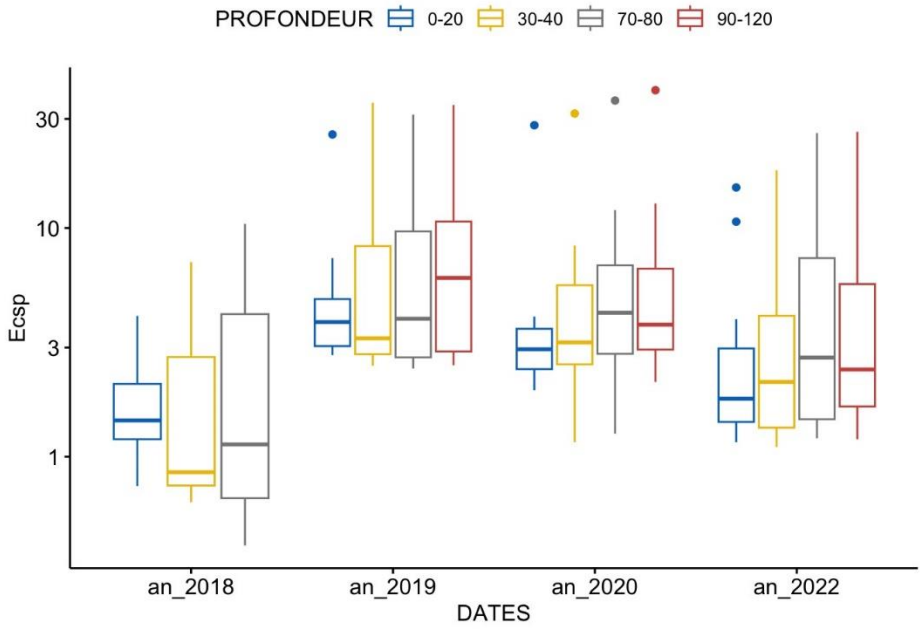


Figure 28 : Comparaison des valeurs de conductivité électrique mesurées sur 14 parcelles en fonction des années de mesures à différentes profondeurs

Les données météorologiques de la station de référence MétéoFrance de Pech Rouge (Station 11170004) sont rapportées au Tableau 6. Il est intéressant de constater que cette année se différencie également des autres de par son climat. En effet, la pluviométrie sur l'année hydrologique 2017/2018 a été relativement importante, avec un cumul mesuré de 617.5 mm et un déficit hydrique climatique le plus faible des 4 années d'étude, avec -369 mm de déficit.

Tableau 6 : Données météorologiques annuelles mesurées entre 2018 et 2022 à la station Pech Rouge (MétéoFrance)

Année hydrologique	Précipitations (mm)	ET0 (Penman) (mm)	Déficit Hydrique Climatique (P-ET0) (mm)
2018	617,5	986,5	-369
2019	432,5	1027,3	-594,8
2020	655	1075,6	-420,6
2021	337	1101,6	-764,6
2022	674	1191,7	-517,7

Les résultats du test Friedman, rapportés au Tableau 7, montrent également que la salinité est significativement stable entre les années 2019, 2020, 2022.

Tableau 7 : Résultats statistiques du Test de Friedman sur la comparaison des valeurs de salinité entre les années 2019, 2020 et 2021

p-value	**an_2018**	**an_2019**	**an_2020**
an_2019	5.7e-06	-	-
an_2020	0.0016	0.5854	-
an_2022	0.1195	0.0362	0.4849

A l'inverse, on peut noter que les conductivités du sol mesurées durant la campagne de 2019 sont les plus fortes et que les précipitations sur l'année hydrologique 2018/2019 sont seulement de 432 mm. Il est intéressant de penser qu'au-delà de la seule influence du climat, une influence anthropique peut également impacter la salinité, lors de pratiques de submersion par exemple, et peut ainsi contrebalancer les différences de pluviométrie annuelle pour finalement maintenir une CE relativement stable au cours du temps.

Sur la large gamme de salinité observée, on peut donc considérer que les variations de la salinité dans le temps sont faibles devant les variations de la salinité entre les parcelles.

3.4.2 Effets des submersions sur la salinité

Pour les deux parcelles suivies avant et après submersion, les résultats des interpolations et des estimations de stocks en sel sont donnés aux Figure 29 et Figure 30.

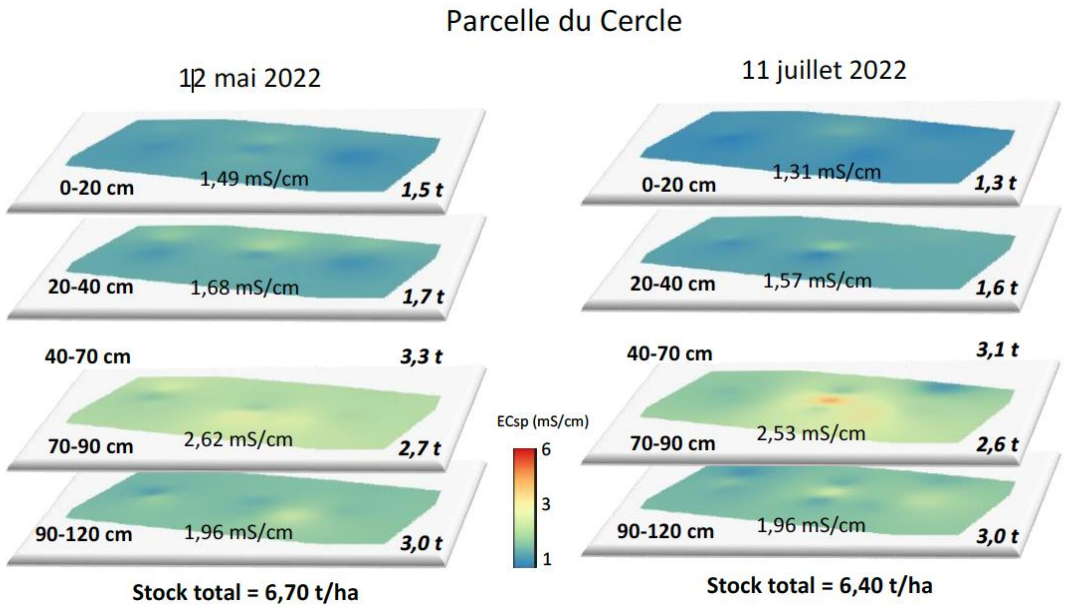


Figure 29 : Conductivités électriques (EC_{sp}) interpolées, EC_{sp} moyennes et stocks en sels pour les différentes profondeurs de sol et totaux par ha pour la parcelle du Cercle avant (12 mai 2022) et après submersion (11 juillet 2022)

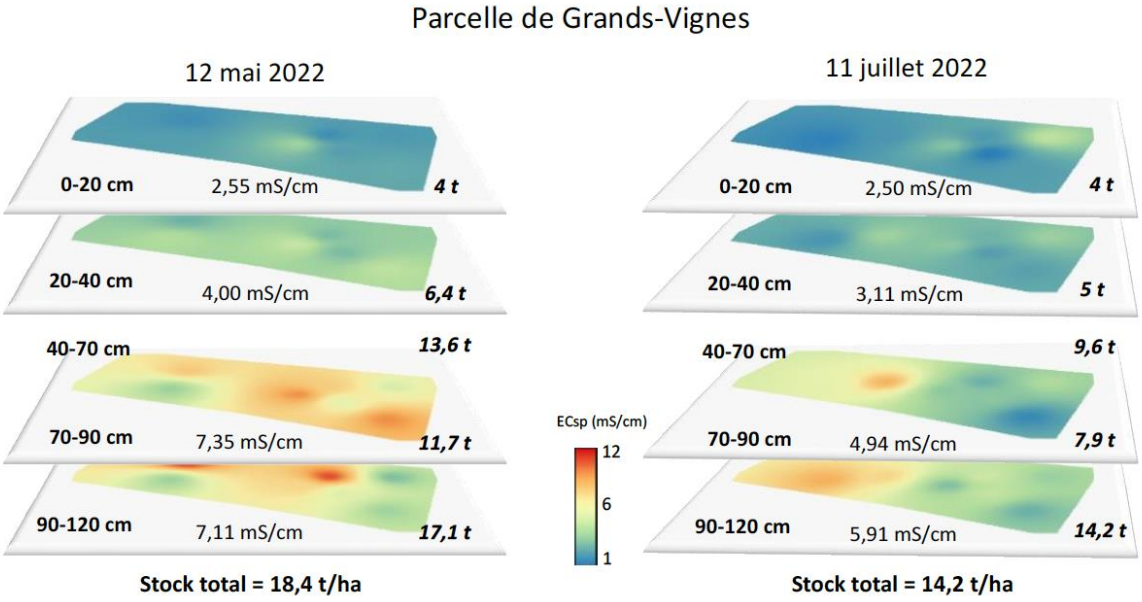


Figure 30 : Conductivités électriques (EC_{sp}) interpolées, EC_{sp} moyennes et stocks en sels pour les différentes profondeurs de sol et totaux par ha pour la parcelle Grand Vigne avant (12 mai 2022) et après submersion (11 juillet 2022)

La salinité des sols, de 0 à 1,20 m, est entre 2 et 6 fois plus faible sur la parcelle du Cercle que dans la parcelle de Grands-Vignes et dans les deux cas, celle-ci augmente avec la profondeur. Alors que les carottages profonds ont montré des quantités des sels très importantes en

profondeur, du point de vue des classes FAO, la parcelle du Cercle peut être considérée comme “non salée” sur l’ensemble du profil (< 2 $mS.cm^{-1}$) alors que celle de Grands-Vignes présente des valeurs pouvant affecter des végétations sensibles (2-4 $mS.cm^{-1}$) ou pouvant affecter les rendements des cultures (4-8 $mS.cm^{-1}$) à partir de 20 cm.

La submersion a un impact très faible sur les stocks en sels des sols non salés de la parcelle du Cercle (6,7 à 6,4 t/ha soit 12,3 à 11,7 t pour la surface de la parcelle considérée). Le stock en sel de la parcelle de Grands-Vignes diminue entre les deux dates encadrant la submersion : au total le stock passe de 18,4 t/ha (soit 52,8 t pour la surface considérée) à 14,2 t/ha (soit 40,7 t respectivement). Le dessalement est particulièrement visible au-delà de 40 cm où les conditions initiales de salinité sont les plus fortes.

Sur une parcelle exposée à la salinité comme celle de Grands-Vignes, le stock en sel du sol entre 0 et 1,2 m diminue d’environ 20 à 25 % sous l’effet d’une submersion. Toutefois, des mesures effectuées sur la parcelle de Grands Vignes en fin de saison sèche (20 points de sondage en septembre 2020) montrent des valeurs moyennes stables entre 70 et 120 cm de 7,74 $mS.cm^{-1}$ et plus fortes entre 0 et 40 cm de 6,01 $mS.cm^{-1}$. Cela montre que, sur cette parcelle, le stock en sel du sol entre 0 et 120 cm diminue bien au cours des submersions (et des pluies hivernales) et qu’il se reconstitue en grande partie au cours de la saison sèche. Au final, pour être comprise, la dynamique de dessalement des sols doit intégrer les deux phénomènes de chasse et d’enrichissement par la profondeur.

4. Conclusions

Plusieurs éléments de synthèse peuvent être proposés à l'issue de la présentation de ces nombreux résultats.

La relation établie entre conductivité électrique sur extrait de pâte saturée et extrait à l’eau 1:5 est forte sur l’ensemble de la gamme de mesure. Il a donc été possible de réaliser un très grand nombre de mesures de salinité et de rapporter les résultats dans un cadre de référence. Ce premier résultat est important en termes de métrologie du territoire. En effet, dans la mesure où les mesures de salinité sur extrait à l’eau sont simples et peu coûteuses, il est

possible de préconiser aux différents acteurs du territoire de réaliser des suivis dans l'espace et le temps pour évaluer localement et globalement la salinité du territoire.

La salinité des sols est extrêmement variable à l'échelle de la basse-plaine de l'Aude. Les sols peuvent être qualifiés de non-salés à très salés avec des valeurs qui suivent une distribution log-normale. A cette échelle, la variabilité apparaît globalement structurée : les mesures de surface sont marquées par un effet parcellaire qui à tendance à d'estomper avec la profondeur. Les comparaisons entre classes de variables du paysage ne font pas ressortir de différences très claires. Les zones de faible altitude, qui sont aussi les zones les plus proches des étangs et de la mer, apparaissent les plus salées tout comme les salisols pour des raisons pédogénétiques. Les espaces naturels, plutôt proches des étangs, sont également plus salés que les cultures et la vigne. Toutefois, ces résultats attendus ne sont pas fortement significatifs. Il existe beaucoup de chevauchements entre les différentes classes et au sein de chaque classe, il existe une forte variabilité. L'appartenance à une ASA n'a pas d'impact significatif sur la salinité. Il sera par la suite intéressant de tester d'autres facteurs explicatifs, notamment l'impact sur le long terme des infrastructures de gestion de l'eau sur la salinité des sols (Chapitre 4).

Le territoire bénéficie d'apports d'eau douce par le fleuve Aude, directement et par le prélèvement qui alimente le canal de la Robine, et par le massif de la Clape en période de pluie par les cours d'eau intermittents et par apports souterrains. Les canaux qui drainent la plaine sont progressivement salés de l'amont vers l'aval. Ces éléments montrent donc que la basse-plaine est en capacité à évacuer des sels par son organisation hydrographique naturelle et anthropique de surface.

Les dynamiques temporelles étudiées montrent des variations de salinité des sols entre années sèches et années humides, tout comme à une échelle parcellaire des variations liées à la pratique de submersion. Toutefois, ces variations temporelles sont très faibles devant les variations spatiales. La première conséquence est qu'il est donc possible de regrouper des données mesurées sur quelques années en différentes saisons pour analyser l'organisation spatiale de la salinité des sols. La seconde conséquence est que le phénomène de salinisation ou de désalinisation doit être envisagé et suivi sur les temps plus longs de la décennie.

Chapitre 3 : Redistribution des eaux dans la basse-plaine de l'Aude au cours du temps

Chapitre 3 : Redistribution des eaux dans la basse-plaine de l'Aude au cours du temps

1. Introduction

L'objectif de ce chapitre est d'ancrer la problématique actuelle de salinité des eaux et des sols dans une trajectoire temporelle longue. L'ambition est donc d'analyser la répartition actuelle des stocks et des flux d'eau et de sels en regard de la mise en place des matériaux géologiques quaternaires, des logiques historiques d'aménagement et de gestion des eaux. Pour répondre à cette problématique, trois types de travaux ont été conduits.

En premier lieu, un travail de synthèse a été mené à partir des éléments connus sur la mise en place géologique de la basse-plaine au quaternaire ainsi que sur les conditions paléo-environnementales. En second lieu, des entretiens auprès de différents acteurs de la zone ont été conduits afin de repositionner la problématique de la salinité par rapport à une rétrospective historique axée sur trois thèmes : l'agriculture, les logiques d'aménagements (notamment hydro-agricoles) et les grandes crises, qu'elles soient d'ordre sanitaires ou liées à des événements hydro-climatiques majeurs recensés. Ces thèmes structurants, présentés sous forme de frises, sont analysés de façon transversale afin de proposer une interprétation chrono-systémique. En troisième lieu, une proposition de la répartition actuelle des flux annuels est faite à partir de la compilation de différents types de données.

L'analyse conjointe de la trajectoire d'évolution et des flux d'eau actuels permet de discuter la notion de delta anthropique sur le territoire de la Basse plaine de l'Aude, qui peut être utile au moment d'analyser la problématique de volumes d'eau disponibles et prélevables dans le bassin versant. Plus largement, les résultats permettent de s'interroger sur la notion d'efficience des prélèvements d'eau dans la partie avale du fleuve Aude.

Afin de faciliter la lecture et permettre de situer les différents lieux mentionnés dans le texte suivant, une représentation de l'espace géographique mentionnant ces lieux est donnée à la Figure 31.

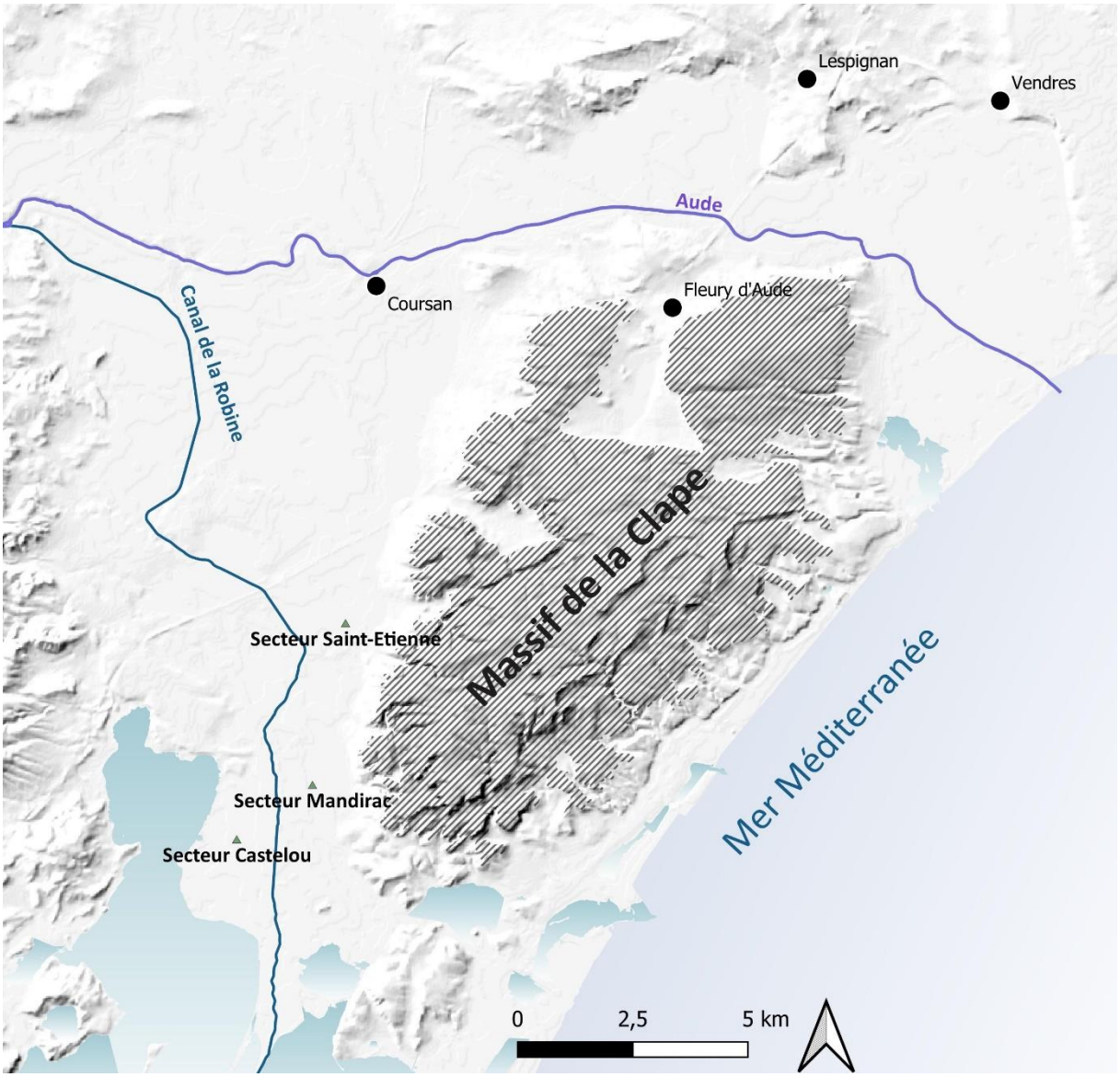


Figure 31 : Géographie actuelle de la basse plaine de l'Aude étudiée et principaux lieux évoqués dans le Chapitre 3.

2. La Basse plaine sur les derniers millénaires : - 10000 ans à aujourd'hui

La synthèse qui suit est issue des documents produits dans le cadre du projet SALIN en collaboration avec le BRGM (Fleury et al., 2022) ainsi que des travaux de thèse de T. Salel (Salel, 2018). L'objectif est de rapporter les conditions géologiques dans lesquelles la basse-plaine actuelle s'est formée au cours des 10 000 dernières années (Figure 32).

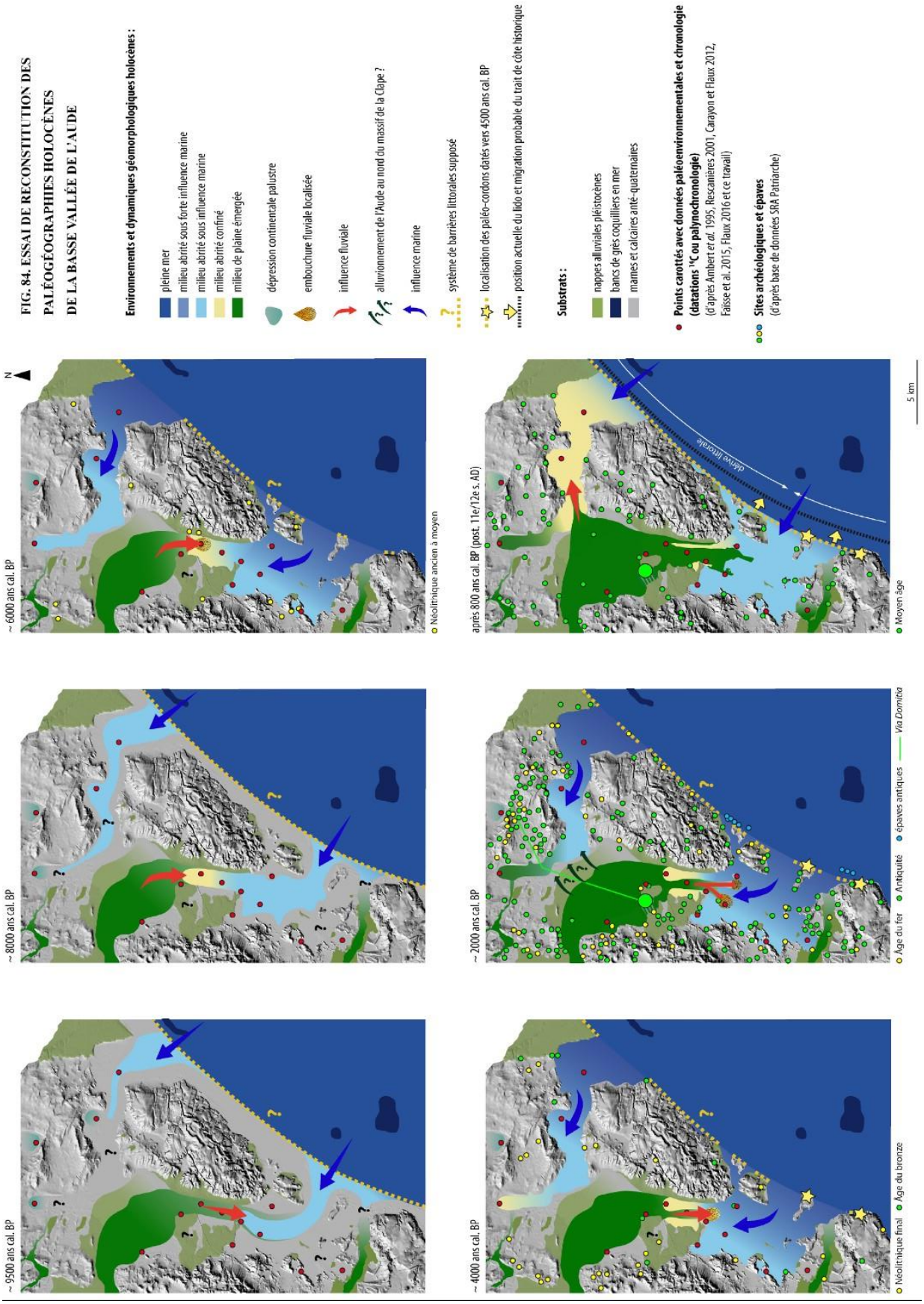


Figure 32 : Proposition de reconstitution des paléogéographies de la basse vallée de l'Aude (extrait de Salel, 2018)

2.1 Evolution au cours de la première moitié de l'Holocène

Lors du Dernier Maximum Glaciaire vers 18 000 cal BP, les niveaux marins bas atteignaient -100 à -120 m par rapport au niveau actuel. Pendant cette période, les cours d'eau ont profondément érodé le substratum, créant ainsi des vallées encaissées. Cette phase glaciaire est suivie par une remontée des niveaux marins, également appelée transgression marine rapide à l'interglaciaire Holocène entre 12 000 et 7 500 ans cal BP, suivie d'une décélération de cette remontée après 7 500 ans BP. Pendant la phase de remontée rapide, les fleuves ajustent leur profil en long pour atteindre un équilibre avec le niveau marin, entraînant une diminution de la force des écoulements et des apports sédimentaires aux embouchures. La mer pénètre alors à l'intérieur des basses vallées, formant ainsi des rias (embouchures fluviales envahies par la mer). Le ralentissement de la remontée marine conduit à la progradation (avancée des terres dans la mer) des deltas à l'intérieur des rias par apport sédimentaire.

A cette époque, dans la région de la Plaine de la Narbonnaise, se trouvent deux rias, la première est approximativement située sur le tracé actuel de la Robine, au Sud de la zone et la seconde, au Nord-Est, située au niveau du cours actuel de l'Aude au nord du massif de la Clape et des villages de Coursan et Fleury d'Aude. Le substratum de ce bassin est principalement constitué des marnes bleues datant du Miocène.

Au début de l'Holocène, dans la branche Sud (secteur du Castelou), le paysage était principalement continental avec un lit actif, large et rocailleux. De -10 000 ans à -7 500 ans BP, la transgression marine est rapide, le niveau de la mer passe de -20 à -5 m NGF soit 6 m/1000 ans. A partir de -7 500 ans, la remontée, plus lente, est de 5 m, soit 67 cm/1000 ans.

Il y a 10 000 ans, le cours de l'Aude dans sa zone deltaïque était orienté nord-sud et suivait la ria de la branche Sud et une étendue d'eau pénétrait assez profondément à l'intérieur des terres. La même configuration existait dans la branche Est, avec une étendue d'eau qui s'enfonçait au nord du massif de la Clape. À cette époque, le transport des sédiments provenait de l'érosion issue du bassin versant de l'Aude et n'était pas encore influencé par les activités humaines. Dans sa partie terminale, le cours d'eau présentait une pente plutôt faible

et les paléochenaux servaient de réceptacles aux sédiments les plus grossiers (sables, graviers et petits galets).

Une transformation du cours de l'Aude est observée au cours de la première moitié de l'Holocène. La sédimentation de l'Aude évolue d'une large bande active composée de gros galets vers des lits mineurs plus étroits associés à des remplissages plus fins, sablo-graveleux. Cette transformation semble s'être produite avant 9 000/9 500 ans cal BP. À cette époque, la branche Est de l'Aude n'est pas connectée au cours principal. La sédimentation dans cette branche se caractérise par des dépôts marins dans un milieu protégé. Les épaisseurs de sédiments sur une période de 1 000 ans sont limitées, allant de moins de 1 m dans la partie proximale à environ 2 m dans la partie plus distale, correspondant à la zone de l'embouchure actuelle de l'Aude.

Dans la branche Sud, la zone d'embouchure se trouve dans le secteur de "Mandirac". En amont de cette zone, la région reste principalement émergée, déconnectée du milieu marin, et la sédimentation y est de type fluvio-palustre. L'accumulation de sédiments atteint environ 3 à 5 m et se compose d'un "chenal à charge de fond caillouteuse" recouvert d'une fine couche de sédiments provenant d'une "plaine émergée ou marécageuse". En aval du haut-fond, les sédiments reposant sur le substratum présentent également un "chenal à charge de fond caillouteuse", témoignant d'une sédimentation fluviale à une époque où la mer n'avait pas encore atteint l'altitude des terrains en amont de "Mandirac". Ces sédiments sont ensuite recouverts par 2 à 3 m de sédiments marins déposés dans un milieu protégé fortement influencé par la mer, rendu possible grâce à la barrière formée par le massif de la Clape. Dans la branche Sud, la sédimentation est significative (environ 5 à 10 m tous les 1 000 ans, soit 50 cm à 1 m par siècle), en raison de la disponibilité d'un important espace d'accommodation et de l'apport de sédiments par l'Aude.

2.2 Evolution au cours de la deuxième moitié de l'Holocène

La remontée rapide des niveaux marins se poursuit au même rythme et atteint le niveau marin de -8 m NGF et l'espace d'accommodation reste donc très important. La sédimentation marine dans la branche Est est toujours limitée en raison d'un apport de sédiments relativement faible. En revanche, la sédimentation dans la branche Sud est très importante, avec une

accumulation de 2 à 3 mètres de sédiments tous les 1 000 ans, ce qui équivaut à un taux de sédimentation de 20 à 30 cm par siècle. L'embouchure de l'Aude s'étend désormais jusqu'au secteur de Malard, et toute la zone aval est submergée par la mer. La sédimentation évolue d'un "milieu protégé" à un "milieu protégé sous influence marine".

La vitesse de remontée du niveau marin ralentit, avec une augmentation de 4 mètres sur une période de 2 000 ans. Ainsi, il y a environ 6 000 ans cal BP, le niveau marin atteignait -4 m NGF. Dans la branche Est, la sédimentation est associée à un milieu protégé sous influence marine. Cela signifie que la sédimentation est influencée par les courants marins mais se produit dans une zone relativement abritée. Dans la branche Sud, l'embouchure de l'Aude se trouve maintenant sur le secteur de Saint-Étienne. En amont de ce secteur, la sédimentation est associée à un milieu infralittoral protégé, tandis qu'en aval, la sédimentation est de nature marine.

Au cours des 3 000 dernières années, il y a eu une accumulation d'environ 15 mètres de sédiments dans la partie amont, ce qui correspond à un taux de sédimentation d'environ 50 cm par siècle. La remontée du niveau marin continue de décélérer, avec une augmentation de 2 mètres sur une période de 2 000 ans, atteignant ainsi le niveau de -2 m NGF. La zone d'embouchure se déplace vers le sud, ce qui entraîne une sédimentation fluvio-palustre dans la partie amont au nord, et une sédimentation sous influence marine dans la partie aval au sud. Cette période correspond à l'âge de bronze et marque un changement du couvert végétal ainsi que le début de la déforestation. Dans la branche Est, la sédimentation marine se poursuit, mais les épaisseurs de dépôts restent limitées, d'environ 1 mètre.

En remontant de 2 000 ans dans le passé, le niveau marin était proche du niveau actuel. La zone d'embouchure continue de migrer vers le sud et se situe désormais au niveau de Castelou. On observe une phase de progradation, avec une sédimentation marine jusqu'au secteur de Mandirac, puis une sédimentation associée aux dépôts de l'Aude dans la partie amont. Alors que dans la branche Est, la sédimentation marine se poursuit.

2.3 Evolution au cours des deux derniers millénaires

Au cours des deux derniers millénaires, l'activité humaine s'est intensifiée, notamment avec le développement et l'augmentation de l'agriculture et du pâturage. Cela a entraîné une déforestation importante dans le bassin versant de l'Aude, y compris dans les zones montagneuses, provoquant une forte érosion et un apport sédimentaire considérable. Cet apport a d'abord contribué à combler la branche Sud en moins de 1 000 ans, avec le dépôt de plusieurs mètres de sédiments fluvio-palustres dans la plaine. Parallèlement, la branche Est profonde se trouvait à côté de la branche Sud comblée. Lors d'une crue majeure probablement au XIIe siècle, le cours de l'Aude a franchi le seuil de séparation entre les deux anciennes rias au nord du massif de la Clape. Le cours de l'Aude a alors adopté une orientation est-ouest similaire à celle que nous connaissons aujourd'hui. L'ancienne ria de la branche Est est profonde (plus de 15 mètres entre Lespignan et Vendres) et cette zone est protégée par le massif de la Clape. L'apport sédimentaire de l'Aude y est très important. En conséquence, la ria s'est rapidement comblée, avec un remplissage de 15 mètres en 800 ans, soit un taux de sédimentation d'environ 2 mètres par siècle, le plus élevé observé dans la zone d'étude.

Au début du comblement de la branche Est, la sédimentation était marine dans un environnement protégé. La zone d'embouchure, initialement proche (secteur de Coursan), s'est progressivement déplacée vers l'est jusqu'à l'embouchure actuelle de l'Aude. Au fil des siècles, une sédimentation fluvio-palustre s'est mise en place en amont des embouchures. Ces derniers siècles ont été marqués par une sédimentation récente de type fluvio-palustre atteignant une épaisseur de 2 à 4 mètres. La branche Est évoluait dans des conditions lagunaires, sous influence marine, jusqu'à la fin du XIIIe siècle. A une dizaine de km au nord en dehors de la zone d'étude, le secteur de Capestang s'est rapidement colmaté dès le changement d'ère, mais des marais d'eau douce à saumâtre ont persisté.

Au cours des deux derniers millénaires, lorsque le cours de l'Aude était encore orienté du nord au sud, le fleuve s'écoulait principalement du côté ouest du massif de la Clape dans une vallée composée de zones marécageuses ou de lagunes, et régulièrement alimentée par les débordements du fleuve ou par des intrusions salines (Cavero, 2010; Sanchez, 2016).

2.4 Conclusion

La basse-plaine de l'Aude étudiée a pris place dans d'anciennes rias formées à la dernière époque glaciaire par l'incision profonde de fleuves qui se jetaient alors dans une mer dont le niveau était environ 100 m plus profond qu'aujourd'hui. C'est donc une plaine récente formée grâce aux apports par l'Aude de sédiments très importants sur les derniers millénaires et sur les derniers temps en lien avec une érosion en partie d'origine anthropique du bassin de l'Aude. À l'ouest du massif de la Clape, le cours ancien de l'Aude avait donc d'abord un tracé orienté nord-sud, qui a ensuite évolué vers un delta avec une branche est-ouest située au nord du massif de la Clape. Les apports de sédiment par le fleuve et la sédimentation marine et palustre sont des éléments cruciaux de la formation mais aussi de l'équilibre actuel de cette plaine.

3. Historique des interactions eau-agriculture dans la basse-plaine de l'Aude

Cette partie suit le courant de la socio-hydrologie telle que définie par Sivapalan et al. (2012, 2014) et illustrée par Kandasamy et al. (2014) pour explorer l'évolution historique en lien avec la gestion et les aménagements liés à l'eau dans la basse-plaine.

L'ambition n'est pas de reconstituer de manière exhaustive l'ensemble des éléments constitutifs de l'histoire de ce territoire. Il s'agit ici d'assembler des informations de nature diverse afin de proposer une interprétation systémique de l'évolution de la basse-plaine de l'Aude sous le prisme de la gestion de l'eau. La méthode retenue consiste à (i) collecter des informations auprès d'acteurs de la zone d'étude au moyen d'entretiens semi-directifs, (ii) positionner ces informations dans une frise historique, (iii) proposer une lecture transversale des éléments de la frise pour déterminer les grands cycles et ruptures en lien avec la gestion de l'eau. Les éléments de cette partie ont été constitués en grande partie au cours du travail de stage de Master d'Evaelle Alexandre (Alexandre, 2021).

3.1 Matériels et méthodes

3.1.1 Guide d'entretien

La collaboration avec des experts du terrain est essentielle pour comprendre la répartition et l'évolution des usages de l'eau dans un territoire. Cinq organismes ont été ciblés afin de couvrir les différents thèmes à aborder : l'union des Associations Syndicales d'hydraulique de l'Est Audois (AS-E-AUDE), le Syndicat Mixte des Milieux Aquatiques et des Rivières de l'Aude (SMMAR), les Voies Navigables de France (VNF), le Parc Naturel Régional de la Narbonnaise en Méditerranée (PNRNM) et la Chambre d'Agriculture de l'Aude (CA11).

Pour structurer et orienter les questions en fonction des partenaires impliqués, le choix a été fait de regrouper l'ensemble des interrogations en grands thèmes : l'apparition des acteurs et leurs actions, l'histoire agricole de la région, les aménagements hydro-agricoles et les "grandes crises", comprenant les événements marquants d'ordre sanitaire et/ou hydro-climatiques.

La collecte d'informations auprès des différents intervenants a été réalisée au moyen d'un guide d'entretien général et adapté aux spécificités de chaque expert (Annexe E). Les entretiens conduits entre mai et juin 2021 ont duré en moyenne entre 1 heure 30 et 2 heures. Ces entretiens semi-directifs ont permis de découvrir l'histoire et le fonctionnement de l'environnement à dire d'acteurs, en fonction de leurs savoirs et leurs domaines d'expertise.

3.1.2 Acteurs et structures d'appartenance

Un annuaire des différents acteurs a été sélectionné en amont des entretiens et s'est enrichi au cours des discussions et des recherches entreprises.

Louise BUHE, en qualité d'animatrice du Contrat du Canal de la Robine, occupe un poste au sein de l'Union des Associations Syndicales d'Hydraulique de l'Est Audois (ASEAUDE). Créée en réponse aux problèmes de salinisation des terres agricoles, l'ASEAUDE apporte un soutien technique aux agriculteurs et rassemble les données sur les réseaux hydro-agricoles de la zone.

Eric VOQUE, Antoine SEGALEN, Laurent BENAU et Romain REY travaillent pour le PNRNM et se consacrent à la gestion de l'eau et des écosystèmes naturels. Leur objectif est de créer une variété d'environnements présentant des caractéristiques diverses afin de favoriser la biodiversité faunistique et floristique pouvant impliquer une gestion hydraulique.

Bernard PUGET et Francis LOUVETON, membres de VNF, ont la responsabilité technique du Canal de la Robine. Ils supervisent les volumes d'eau entrant dans la Robine, ce qui en fait des interlocuteurs essentiels pour quantifier les débits d'eau et appréhender ce grand ouvrage historique très structurant de la zone.

Etienne BALUFIN et Philippe CLUZEL sont affiliés au SMMAR et impliqués dans l'animation du Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SAGE). Leur expertise réside dans la gestion des aléas climatiques, et ils ont élaboré divers documents techniques tels que le Plan de Gestion de la Ressource en Eau (PGRE) et l'État des Lieux du Milieu et des Pressions (EVP).

Daniel CASTEIGNAU, de la Chambre d'Agriculture de l'Aude, ainsi que Olivier PHILLIPON, ingénieur à l'Institut Agro Montpellier, possèdent une connaissance approfondie de l'agriculture et de l'histoire agricole de la région.

Le Parc Naturel Régional de la Narbonnaise en Méditerranée (PNRNM), établi en 2005, est responsable de la gestion de la zone du marais du Narbonnais, composée du Grand Castélou, du Petit Castélou, du domaine du Grand Tournebelle et de Tournebelle-le-Neuf. Ces terres appartiennent au Conservatoire du Littoral, une partie desquelles est gérée par une dizaine d'éleveurs conformément à une charte rigoureuse, notamment lors des submersions gravitaires. L'objectif principal de cet organisme est de promouvoir une diversité d'environnements et de préserver la flore et la faune. Pour atteindre ces objectifs, un système d'îlots submergés par des quantités variables d'eau, en fonction des écosystèmes recherchés, a été mis en place. Laurent BENAU est responsable de la qualité de l'eau, Eric VOQUE est en charge de la gestion des ressources en eau et de l'éco-développement, Antoine SEGALEN est responsable du pôle Biodiversité, et enfin Jade Ching s'occupe de la mission Agriculture et Valeurs Parc.

Le SMMAR a été créé en 2002 en réponse aux inondations de 1999. Son objectif principal est d'organiser et de structurer le département face aux inondations grâce à des travaux et des études. Sa fonction stratégique permet la mutualisation des ressources techniques, la création

d'une solidarité financière et de syndicats plus fonctionnels. Devenu Etablissement Public Territorial Bassin (EPTB) en 2008, il s'occupe également de l'organisation du Bassin Versant de l'Aude, ce qui englobe des actions beaucoup plus vastes que la seule prévention des inondations. La création officielle du Syndicat Mixte du Delta de l'Aude (SMDA) en 2006, bien qu'il existe depuis l'après-guerre en raison de la récurrence des crues, lui confère la gestion exclusive de la compétence GEMAPI (Gestion des Milieux Aquatiques et Prévention des Inondations). Philippe CLUZEL est chargé du Plan de Gestion de la Ressource en Eau, et Etienne BALUFIN s'occupe de l'animation du Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SAGE) et a également travaillé sur les crues dans la région.

VNF a été créé en 1991 et est responsable de la gestion du Canal de la Robine. Leur mission consiste à entretenir les berges, à faciliter la navigation et à gérer l'irrigation. Le canal de la Robine, tout comme le canal du Midi, est classé au patrimoine mondial de l'UNESCO depuis 1996. Bernard PUGET est le responsable technique du Canal de la Robine.

ASEAUDE a été établie en 2011 en tant que regroupement d'une dizaine d'Associations Syndicales Autorisées (ASAs). Initialement créée pour des tâches administratives, elle est désormais chargée de la gestion technique et de la fourniture de conseils aux agriculteurs. Elle permet une gestion collective à l'échelle du Canal de la Robine. De nombreux canaux sont présents dans la zone, les uns servant au drainage, les autres à l'irrigation des cultures. L'utilisation actuelle de ces ouvrages hydrauliques est gérée par différentes ASA : Raonel (50,3% de la surface), Livière (15,7%), Coursan (15,0%), Cercle (10,6%), Ricardelle (4,8%), Petit Mandirac (3,4%) et Rèche (0,1%). L'ASA de Raonel, fondée en 1887 pour lutter contre le phylloxéra, est l'une des plus anciennes de notre zone d'étude et figure parmi les plus grands utilisateurs d'eau, aux côtés de celle du Petit Mandirac.

3.1.3 Frise chrono-systémique

Les éléments identifiés dans les entretiens ainsi que dans l'ouvrage historique de Gilbert Larguier (Larguier, 1999) et la publication de Julien Cavero (Cavero, 2010) ont été reportés sur une frise chronologique. Les éléments ont été classés en 3 rubriques représentant (i) l'évolution des aménagements liés à l'eau et les usages associés, (ii) l'évolution

démographique et les crises climatiques (crues et sécheresses) et sanitaire, (iii) l'évolution de l'usage agricole des terres au cours de l'histoire.

Une analyse exploratoire avec le prisme de la gestion de l'eau a ensuite été conduite pour chercher des logiques d'enchaînement entre des éléments déclenchants, expliquant l'apparition d'aménagements et leurs impacts. Ces logiques permettent de proposer des grands cycles et des ruptures ou transitions entre ces cycles (Daudin et al., 2021; Giacona et al., 2019; Mathevet et al., 2015; Mendez, 2010; Piovan, 2020). La frise chrono-systémique ainsi constituée permet de visualiser la trajectoire et d'obtenir des dates-clefs sur l'évolution spatiale de la mise en place de la gestion de l'eau de la Basse-Plaine de l'Aude.

3.2 Résultats

Les résultats détaillent la frise chronologique en la coupant en 4 périodes, de la mise en place de la basse-plaine au XVème siècle, du XVème au XVIIIème siècle, du XVIIIème au XIXème siècle et du XIXème siècle à nos jours. Une frise chrono-systémique est ensuite proposée à partir de l'interprétation de ces éléments géo-historiques.

3.2.1 De la création de Narbonne au XV^{ème} siècle

L'emplacement de Narbonne, première colonie romaine en dehors d'Italie, a été choisi par l'empereur Auguste (-63 av. JC – 14 apr. JC) en raison de sa proximité maritime et son fleuve, pour implanter un carrefour commercial sans précédent en Europe. Les romains sont connus pour leur grandes capacités à naviguer sur les eaux par leurs bateaux et leurs aménagements hydrauliques. A l'époque romaine, le fleuve Aude traverse Narbonne où il peut être franchi par le Pont des Marchands, décrit par certains auteurs comme composé de 7 arches (alors qu'il n'en compte qu'une aujourd'hui). Narbonne est alors au centre d'un complexe de ports antiques largement décrit par les écrits de Corinne Sanchez (Sanchez, 2016).

La plaine Narbonnaise connaît en 1316 une(de) grosse(s) crue(s) qui provoque le changement du lit de l'Aude. Le cours du fleuve prend la direction au nord de la Clape et le lit initialement orienté nord-sud devient alors est-ouest. La fin de la traversée de Narbonne par le fleuve semble marquer le début des problèmes de salubrité liée à l'eau. En effet, les déchets et les

eaux usées ne peuvent plus être évacués dans le fleuve comme à l'époque romaine, impactant le développement de maladies. Il est difficile d'avoir des descriptions précises du paysages suite à cet événement mais la peste décime la population dans les années qui suivent (Pentecôte 1348). La peste est une bactérie qui se transmet par la puce du rat. Les rats, signes en général d'insalubrité dans les cœurs de ville, vivent dans les cales des bateaux (contrairement aux idées reçues le rat est loin d'être un animal sale mais ils vivent là où on leur laisse de la place c'est-à-dire dans les lieux insalubres), on peut donc imaginer que les ruelles sales permettent la prolifération des rats ce qui augmentent fortement le contact à l'homme (Figure 33).

Figure 33 : La peste à Narbonne

Ce n'est qu'en 1344 que les premiers travaux pour amener à nouveau l'eau à Narbonne sont entrepris semble-t-il en creusant un ancien bras de l'Aude et par la construction d'un ouvrage hydraulique appelé « paissière » à Cuxac (Figure 34). Une « paissière » est décrite comme un barrage permettant de détourner l'eau de l'Aude. Cet ouvrage représente un point stratégique qui sera par la suite la cible d'attaques ennemies et endommagé par les crues.

L'agriculture à cette époque prenait place sur des terres marécageuses où les étangs occupent alors une place importante, notamment dans la fourniture d'aliments par la pêche et la

chasse. La production agricole était principalement consommée à l'intérieur des exploitations, pour les besoins alimentaires des esclaves puis des ouvriers et des animaux et pour une autre partie était vendue au sein de la ville. C'est en 1480 qu'apparaissent les Salines de Mandirac, marquant un tournant dans le paysage narbonnais.

On observe donc une Narbonne florissante et luxueuse à l'époque romaine, une ville qui fait fortune par son port et ses bateaux (import/export), une ville ouverte vers l'extérieur jusqu'à la déviation des eaux en 1316. La plaine se retrouve alors isolée et en proie aux maladies et aux guerres et la population chute de 70-80%. C'est une phase de fermeture sur le monde extérieur où le sel commence à être exploité comme une ressource pour la conservation des aliments.

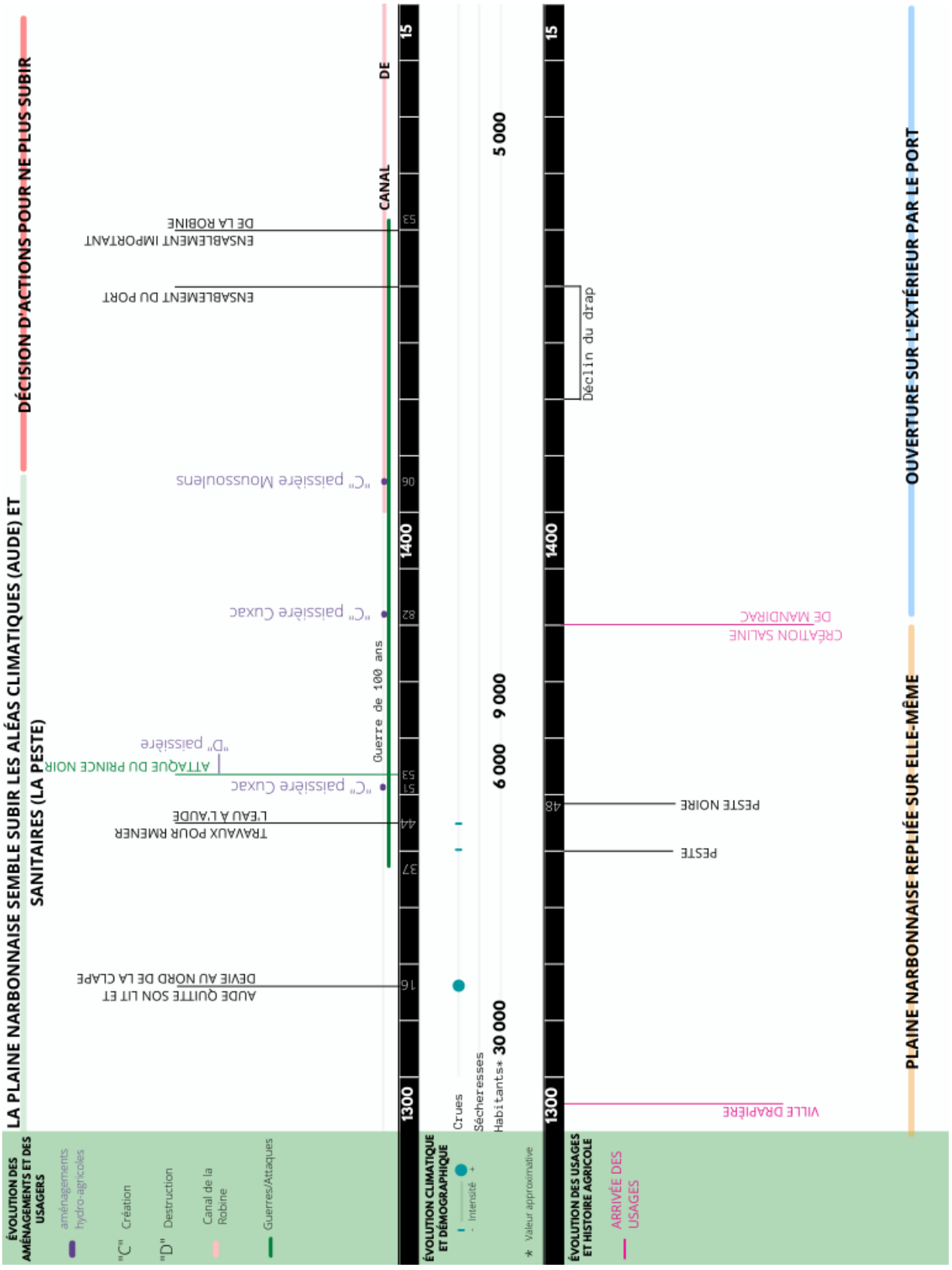


Figure 34 : Frise historique 1300-1500

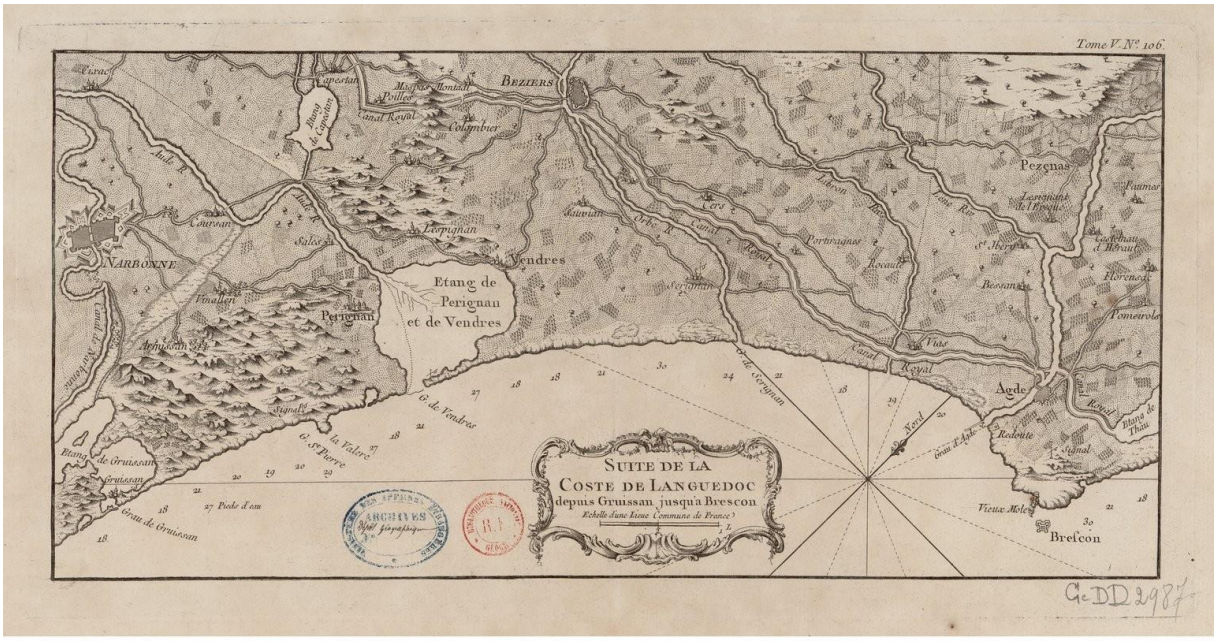
3.2.2 Du XV^{ème} au XVIII^{ème} siècle

Narbonne devient à la fin du XVème s. une place forte royale. Avec l'activité portuaire encore existante, la ville retrouve un cadre florissant. La production de sel augmente fortement jusqu'en 1555. La saliniculture régit les paysages et devient la culture prépondérante dans la zone (Figure 35). Appelé « Or blanc », le sel se vend cher et un marché parallèle se développe même pour échapper aux taxes. Henri IV édite alors une loi contre le faux-saunage pour arrêter cette contrebande du sel (16 novembre 1596). Les étangs sont asséchés et la plupart des salins sont fermés. L'étang Salin (ouest de Vinassan) est asséché par le Canal de Sainte-Marie vers l'étang de Gruissan.

Figure 35 : Représentation de l'étang salin à l'ouest de Vinassan et à l'est de Narbonne (1548)

Le comblement sédimentaire de la plaine menace fortement les activités portuaires de Narbonne au sein de laquelle la production de drap se développe fortement. Afin de remédier à ce problème, deux grands ouvrages hydrauliques voient le jour. Le premier est le canal de la

Robine, dont les travaux débutent vers 1400. Il a pour vocation d'acheminer des eaux du fleuve Aude vers Narbonne et ses ports en aval. Le choix stratégique de déplacer la « paissière » au niveau de Moussoulens (pour moins subir les destructions à cause des crues) permet l'alimentation du canal encore fonctionnelle aujourd'hui. Le second grand ouvrage est le Canal des romains, construit en 1600, qui traverse l'étang de Bages-Sigean pour rejoindre le Port-de-la-Nouvelle (Figure 36). L'essor des allèges (bateaux fond plat) permet de décharger les marchandises au port dans ces bateaux qui seront par la suite tracté par les animaux ou les hommes afin de remonter jusqu'à Narbonne (Figure 37).



Source gallica.bnf.fr / Bibliothèque nationale de France

Figure 36 : Carte de Bellin (1764) d'après les relevés de la Favolière en 1693

Ce système permet d'augmenter fortement le trafic maritime jusqu'en 1665 et la construction du port de Sète. Ce port entraînera en partie le déclin de Port-la-Nouvelle et Marseille deviendra le leader sur le marché drapier. La crise économique provoquée va conduire à l'aménagement du Canal de la Robine par le raccordement au Canal du Midi par le Canal de la Jonction. Il sera construit 3 écluses de Moussoulens à Narbonne en 1686.

En terme topologique, à partir de cette époque, le fleuve a une forme de delta avec une branche naturelle ouest-est (devenue cours principal au XV^{ème}) et une branche nord-sud anthropique (anciennement cours principal). La saliculture est un élément fortement structurant du paysage.

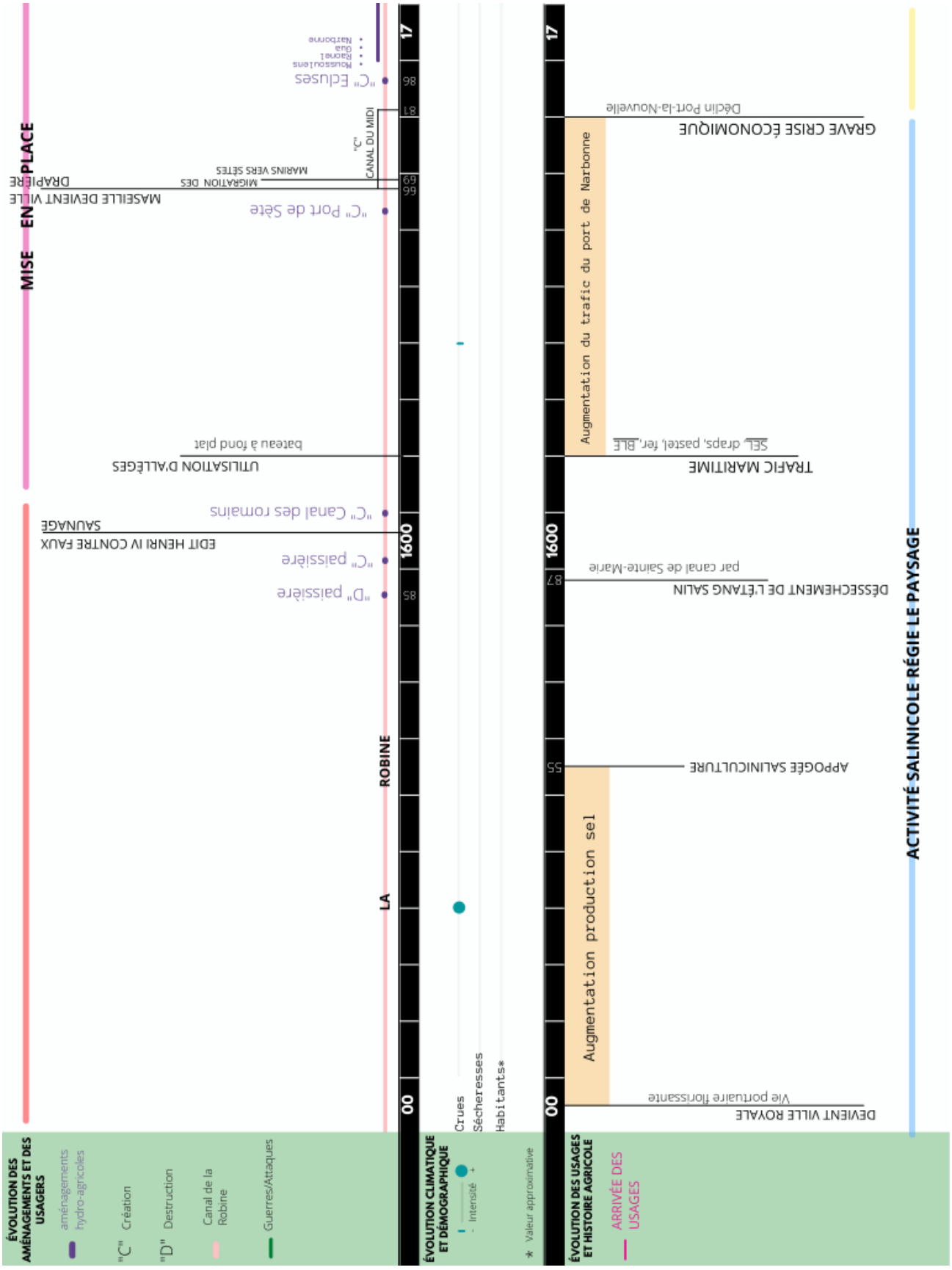


Figure 37 : Frise historique 1500-1700

3.2.3 Du XVIII^{ème} au XIX^{ème} siècle

En 1804, on peut référencer la première loi sur l'eau : « Propriété de l'eau ». Les propriétaires fonciers qui possèdent une prise d'eau sur leur terrain peuvent utiliser l'eau quand et autant qu'ils le veulent à la condition que les bateaux puissent naviguer sur le canal. La question de raréfaction de l'eau n'est pas posée à cette époque et on peut tenter d'interpréter que le commerce (lié à la navigation) possède alors un poids supérieur à l'agriculture.

Sur les cartes anciennes du XVIII^{ème} siècle, les zones d'étangs occupent encore une surface importante (Figure 38). La période suivante est marquée par le drainage de la plaine avec la mise en place d'un réseau hydraulique proche de celui actuel. La fermeture du Canal des Romains autour de 1800 engendre une modification paysagère avec la construction du canal de Sainte-Lucie, le redressement et le rétrécissement de la Robine et pour finir la construction des deux dernières écluses au niveau de Mandirac et Saint-Lucie. On peut noter que la conversion de la saline de Mandirac en culture marque un tournant majeur sur le paysage de la plaine signant la fin de l'exploitation massive du sel.

Figure 38 : Extrait de la carte du diocèse de Narbonne (Aldring, 1791)

Le début du 19ème siècle est marqué par la révolution industrielle, de nombreuses industries ont été créées et d'importants centres urbains ont été construits pour abriter les ouvriers qui arrivent d'autres régions de la France. C'est également à cette période qu'un marché national s'est développé, avec l'envoi de vin vers le nord de la France pour les travailleurs (Figure 39). La production viticole s'oriente vers de forts rendements, pour produire un maximum de vin. C'est à ce moment-là que sont apparues les grandes exploitations agricoles de type "Château" ou "Domaines", et qu'il y a eu une conversion importante des terres en vignobles, marquant le début de la monoculture.

Cette période a perduré jusqu'aux années 1870-1880, où la France a connu une série de crises sanitaires. L'impact dévastateur de ces crises est directement lié à la monoculture. Le mildiou et l'oïdium sont des champignons auxquels la vigne est particulièrement sensible. La solution de la Bouillie Bordelaise, un mélange de cuivre et de soufre, a été rapidement trouvée pour lutter contre ces champignons. Alors que le traitement des champignons avait une solution de traitement, le phylloxéra, un insecte dont le cycle de vie se déroule dans le sol, est apparu entraînant la mort d'un grand nombre de parcelles viticoles. Entre les faillites et les opérations régulières d'arrachage et de replantation, l'industrie viticole a décidé de déplacer sa production dans des zones non infectées, notamment dans les colonies algériennes (ou l'insecte n'était pas présent) et surtout dans les zones humides. En effet, dans ces zones, la submersion des sols durant plusieurs semaines hivernales est possible et l'absence d'oxygène gazeux dans le sol conduit à la mort de l'insecte. Ainsi, les vignobles ont été déplacés vers les Basses-Plaines de l'Aude, de l'Orb, ainsi que vers la Camargue.

La submersion est ainsi devenue la solution pour noyer l'insecte et sauver les domaines viticoles alors que les vignes n'étaient pas irriguées jusque-là. Dans ce but, la structure de l'espace parcellaire visant à faciliter l'irrigation gravitaire a été mise en place. Cette structure impliquait le nivellement des parcelles, la densification des fossés et des canaux pour apporter l'eau et pour assurer le drainage des terres submergées est associé aux submersions. La plupart des Associations Syndicales Autorisées voient le jour à partir de la fin du XIXème siècle (cf. 3.1.2)

De plus, avec la disponibilité de l'eau, l'irrigation n'était plus utilisée uniquement pour lutter contre le phylloxéra, mais aussi pour augmenter les rendements, qui ont atteint des niveaux élevés d'environ 200 hectolitres par hectare. À cette époque, il n'existait pas de limitations

associées à la gestion de l'eau, et les plaines étaient inondées en hiver, puis drainées au printemps. Dans les années 1890, la production viticole a connu une forte expansion qui a conduit à une surproduction. La conséquence a été une chute drastique des prix du vin.

La ligne ferroviaire permet le développement massif de la vigne par une exportation à moindre coût et causera la fin du commerce fluvial sur le Canal de la Robine.

On observe que l'eau est d'abord une contrainte à l'origine de l'hydromorphie des sols. Elle devient ensuite un moyen de lutte contre un parasite de la vigne puis permet d'augmenter la production. A cette époque-là, la viticulture structure l'ensemble du territoire de la basse plaine et la construction de nouvelles voies commerciales permet d'en garantir le produit par exportation.

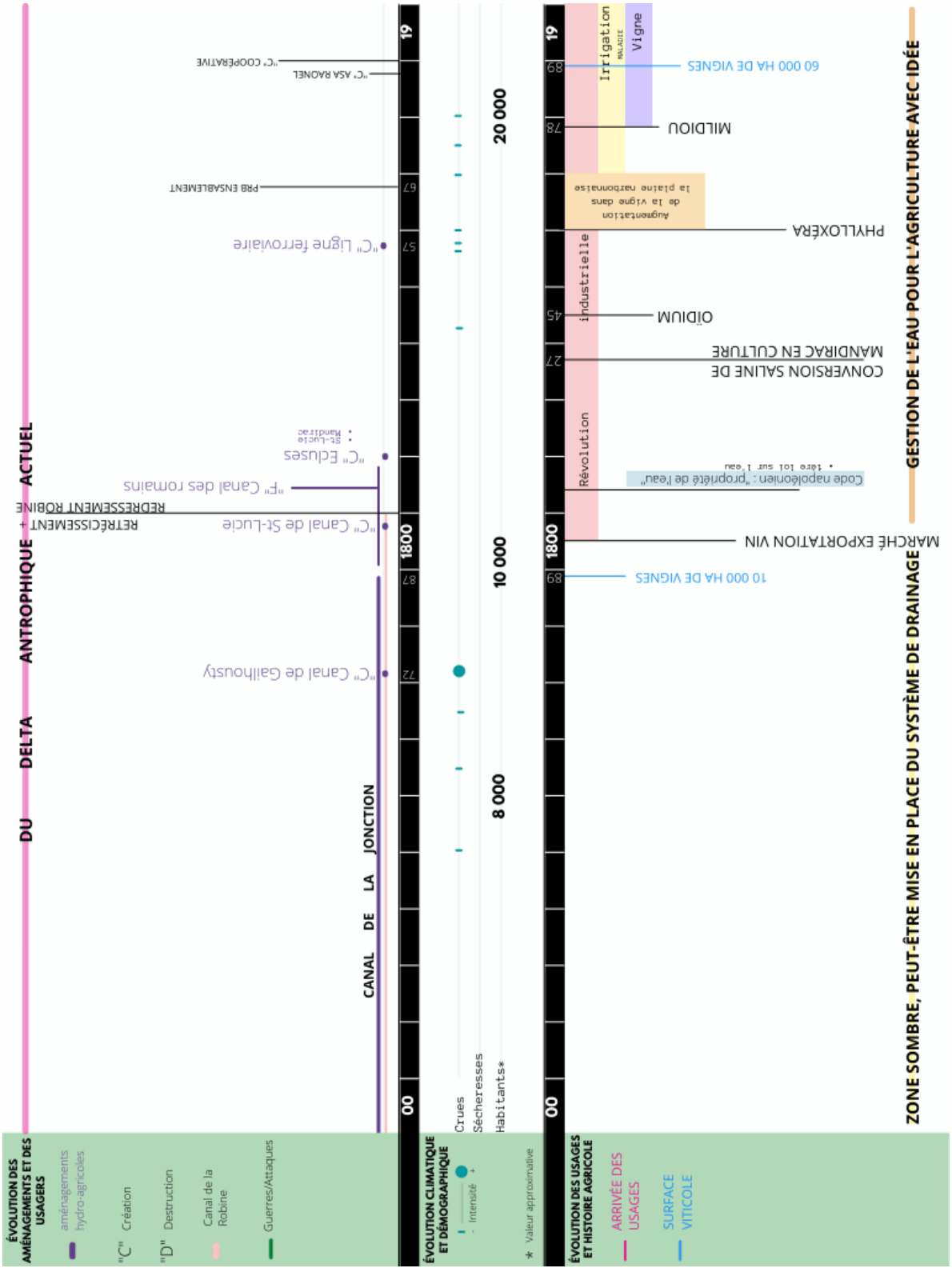


Figure 39 : Frise historique 1700-1900

3.2.4 Du XIX^{ème} au XX^{ème} siècle

L'arrivée des machines et des produits fertilisants et phytosanitaires dans les années 1940 à 1960 a permis une production plus intensive au sein des parcelles, marquant le déclin de l'utilisation des animaux (Figure 40). Cette période correspond également avec le début d'une modification des caractéristiques physiques des sols. L'abandon des anciennes pratiques de fertilisation à base de fumier animal et l'avènement des machines ont entraîné une perturbation importante de la structure des sols (tassement accru, perméabilité réduite).

À partir des années 1960, on observe toujours une surproduction structurelle de vin et une sous-consommation. La création des coopératives permet d'imposer une certaine force économique et amène un accroissement des capacités de production. Par ailleurs, la création des Appellations d'Origine Contrôlée permet de diversifier la gamme des vins produits, en passant par des vins dit « de table » à des vins plus chers et plus qualitatifs. Ce dernier point amène l'introduction de nouveaux cépages et le principe d'association entre le terroir et le cépage. Les variétés de vigne dites « hybrides » qui avaient été introduites afin d'être plus résistantes aux maladies (et notamment au phylloxéra car elles ne nécessitaient pas de greffage sur des porte-greffes américains) sont régulées dans les années 1970 avec l'introduction de la notion de droits de plantation, qui permettaient de limiter l'expansion des vignes. Alors que la régulation des hybrides était en cours, on a observé un retour aux anciens cépages. La vigne, qui n'était pas adaptée à vivre dans des sols saturés en eau, a commencé à se développer sur les coteaux du massif de La Clape. La lutte contre l'hybridation a entraîné un déclin des anciens modes de production viticole, en concomitance avec la création des Appellations d'Origine Contrôlée (AOC) qui avait notamment pour objectif de limiter les rendements.

La réforme de la Politique Agricole Commune (PAC) a été mise en place dans les années 1990. À cette époque, des subventions ont été créées pour les cultures céréalières telles que le blé et le riz dans les zones les plus humides. Cependant, la riziculture n'a pas été un succès dans la basse-plaine de l'Aude et une grande partie de terres rizicoles est restée par la suite en friche.

De 1925 à 1970, le Canal de la Robine est déclassé de grand axe commercial à simple canal. Le début du tourisme fluvial et de la navigation de plaisance qui semble réellement débuter en 1950 reste actuellement un usage important.

La crue catastrophique de 1999 entraîne la création du SMMAR qui va induire des principes de gestion de l'eau différents. C'est à partir des années 2000 que les acteurs actuels de la zone apparaissent ainsi que les lois tournées vers l'environnement. Et c'est dans les années 2010, suite à la Directive Cadre sur l'Eau (2000) et la Loi sur l'Eau et les Milieux Aquatiques (2006) que sont arrivés les documents techniques sur la quantification des volumes d'eau dits prélevables. Dans ce cadre, un corpus de documents techniques s'inscrivant dans une gestion durable et efficiente met en lumière les énormes pertes d'eau au niveau de la Robine.

Ce n'est vraiment donc qu'au milieu du XX^{ème} siècle qu'on observe l'émergence des notions actuelles d'usages et d'usagers, et que l'eau devient associée à des enjeux multiples.

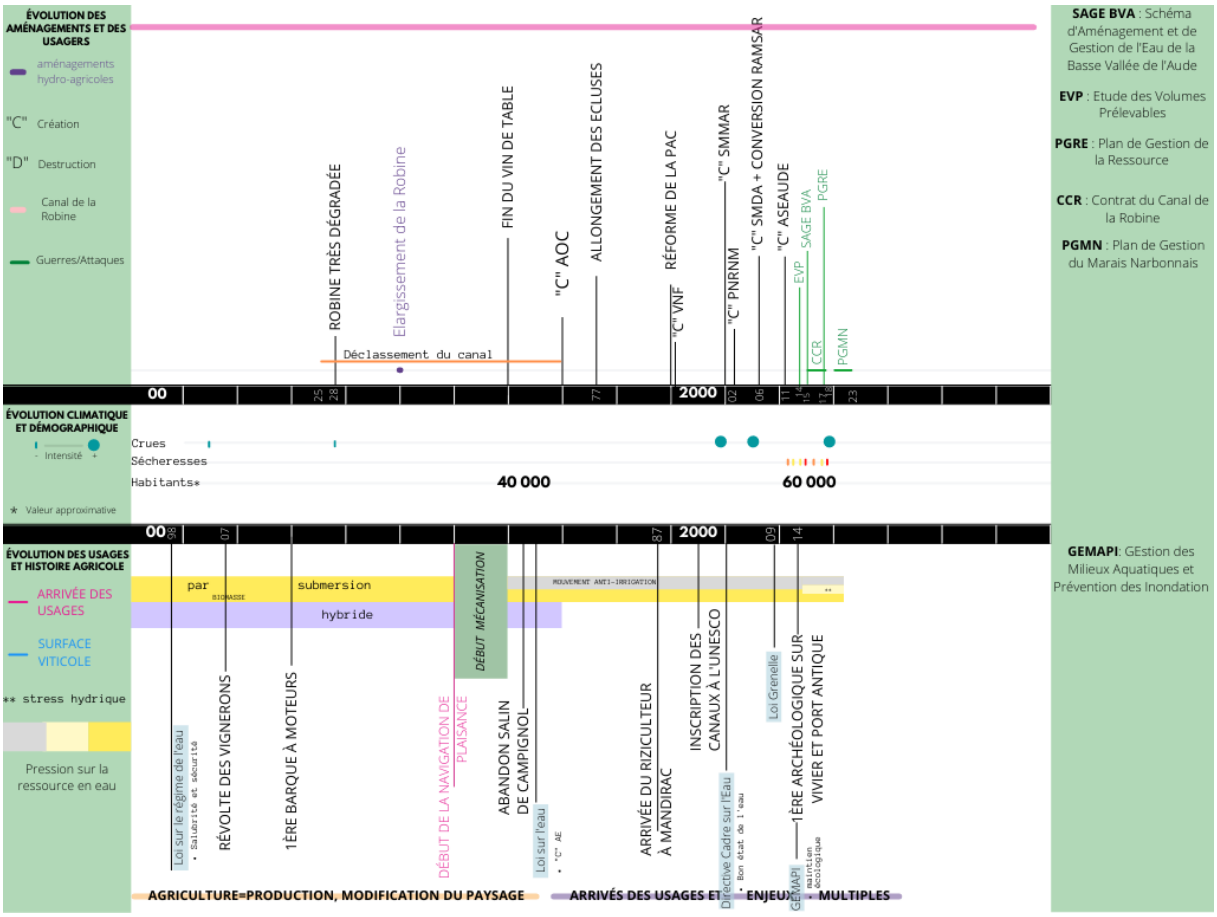


Figure 40 : Frise historique 1900-2010

3.2.5 Frise chrono-systémique

Une interprétation des frises historiques permet de proposer 4 grandes phases dans l'évolution historique de la basse-plaine comme indiquées à la figure 41.

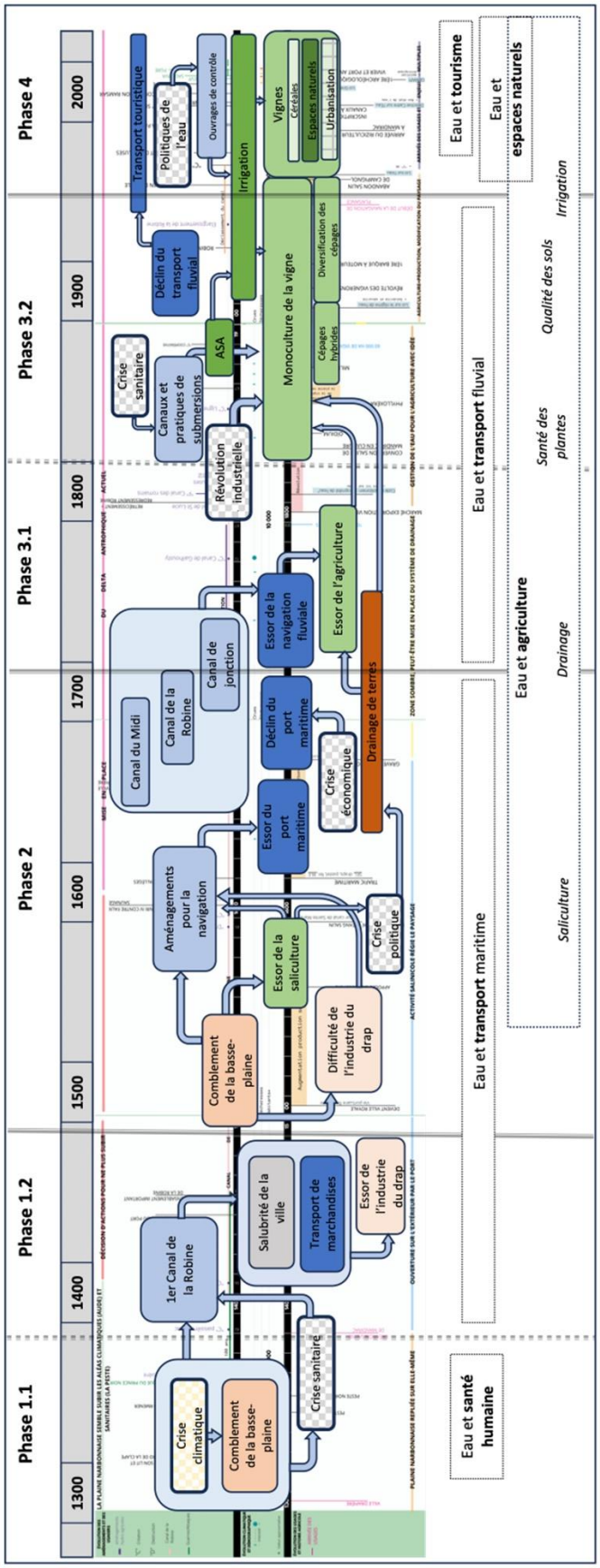


Figure 41 : Proposition d'une frise chrono-systémique de l'évolution de la basse-plaine de l'Aude en lien avec la gestion de l'eau.

La première phase est initiée par deux types d'événements hydrologiques : le changement du cours de l'eau (1316) et le comblement de la basse-plaine. Il est difficile d'établir une causalité certaine avec la crise sanitaire liée à la peste noire même si on peut estimer que l'absence d'écoulement dans la ville de Narbonne a pu être un facteur aggravant de l'épidémie (phase 1.1 jusqu'en 1351 et la construction de la "paissière" de Cuxac)). Suite à ces événements, il est rapporté le creusement d'un premier canal traversant Narbonne sur le tracé qui deviendra la Canal de la Robine et ancien cours du fleuve. Ce canal va permettre de relancer l'activité portuaire maritime de Narbonne alimentée par l'essor de l'industrie du drap dans la ville (phase 1.2 jusqu'aux environs de 1500). La gestion de l'eau apparaît donc dans cette phase liée aux thématiques de la santé humaine et du transport, dans ce cas maritime.

La deuxième phase qui débute aux environs de 1500 est à nouveau initiée par le comblement de la basse-plaine qui se poursuit. Il semble avoir deux types de conséquences : (i) des aménagements pour maintenir l'activité d'un port maritime dans lequel vont circuler des bateaux à fond plat ("allèges") et (ii) le développement de salins devenus possible aux abords des étangs et des marécages formés dans la plaine. L'activité du port maritime se maintiendra avant de décliner au début du XVIIIème siècle pour cause de crise économique locale liée à l'apparition de ports concurrents. Dans le même temps, l'exploitation du sel va connaître un fort essor avant d'être limitée par l'édit contre la contrebande du sel (1596) qui va entraîner le drainage de plusieurs grands étangs. Ainsi, cette phase se clôture avec la fin du commerce maritime dominant et le début du drainage des terres.

La troisième phase peut être décomposée en deux sous-phases. La première sous-phase commence avec la construction du Canal de la Robine et sa liaison au Canal du Midi (construit entre 1666 et 1681) par le Canal de Jonction. Ces ouvrages vont rendre possible le transport fluvial en créant un carrefour entre le territoire, la méditerranée et le sud-ouest de la France. Le territoire voit sa population croître dont une partie contribue à l'essor d'une agriculture diversifiée sur des terres progressivement drainées (phase 3.1.). Le début d'une deuxième sous-phase peut être proposée avec la survenue de la crise du phylloxéra (années 1860). Les surfaces agricoles s'étendent et se spécialisent en vigne, dont une grande partie recours à des matériels végétaux dits "hybrides" résistants à de nombreuses maladies. De nombreux ouvrages, réseaux de canaux d'amenée d'eau (pour la plupart prélevant l'eau dans le canal de

la Robine) et réseaux de canaux de drainage (pour la plupart connectés aux anciens grands canaux de drainage des étangs de la plaine), sont construits et progressivement administrés par des Associations Syndicales Autorisées. Ces ouvrages vont permettre la submersion des parcelles agricoles, mais aussi de drainer la basse plaine lors d'épisode d'inondation. La production de vins orienté vers de forts rendements est très importante et exportée par voie fluviale et par chemin de fer. Malgré quelques crises de surproduction, la monoculture de vigne n'est pas remise en cause d'autant que les apports d'eau initialement destinés à lutter contre le phylloxéra permettent également de garantir de forts rendements. Dans cette phase, la gestion de l'eau est donc orientée vers le transport, qui est passé de maritime à fluvial, et vers l'agriculture puis la viticulture où elle permet de surmonter une crise sanitaire (phylloxéra de la vigne), de dessaler les sols et de garantir de forts apports pour les rendements.

La quatrième phase commence après la deuxième guerre mondiale avec la fin du transport fluvial et la mécanisation de l'agriculture. Le transport fluvial de marchandise laisse la place à la navigation de plaisance avec l'arrivée du tourisme. Avec la mécanisation, la maille parcellaire agricole va s'agrandir entraînant progressivement l'effacement de branches de réseau d'amenée d'eau et de drainage. La présence de structures (ouvrages et organisations) permettant l'irrigation et les incitations de la Politique Agricole Commune va entraîner l'arrivée de la culture céréalière. Les vignes en bordure d'étangs faisant face à la plus forte pression saline sont abandonnées et laissent place à des espaces naturels, dont certains seront gérés par des apports d'eau possibles grâce aux anciens réseaux agricoles. Les zones urbaines et périurbaines croissent fortement. Dans les dernières années, les politiques de l'eau amènent à repenser les prélèvements d'eau dans l'Aude au nom du principe d'équilibre quantitatif des masses d'eau. Cette dernière phase est donc marquée par l'émergence d'un plus grand nombre d'enjeux de gestion de l'eau en lien avec la ressource, la production agricole et la préservation des espaces naturels.

3.3 Conclusion

La frise chrono-systémique produite permet de proposer une interprétation de l'évolution du territoire de la basse-plaine sous l'angle de la gestion de l'eau. Elle est établie à partir

essentiellement à partir d'entretiens avec des acteurs du territoire et de quelques sources bibliographiques. Le relevé des informations n'est pas exhaustif et cette interprétation n'est donc pas unique ni définitive. Cette interprétation gagnerait en robustesse en l'exposant et la discutant avec d'autres acteurs du territoire et différents spécialistes des domaines abordés.

Toutefois, malgré ces réserves, la frise montre que le rapport à l'eau et au fonctionnement hydrologique a fortement marqué l'évolution du territoire. Le changement du lit du cours d'eau et le comblement par les sédiments de la plaine a été à l'origine de logiques de grands aménagements pour la gestion de l'eau. Les crises sanitaires, politiques, économiques ont orienté l'évolution du territoire et de son activité (industrie du drap, exploitation du sel, agriculture, viticulture, tourisme, préservation d'espace naturels) en mobilisant dans chaque cas une gestion de l'eau particulière. L'époque actuelle est caractérisée par la multiplication et la complexification des enjeux. Au cours de cette évolution, il est marquant de voir à quel point, depuis le changement du cours du fleuve en 1316, les actions anthropiques n'ont cessé de chercher à recréer sa topologie initiale de delta, avec la création d'un réseau hydrographique bien développé structuré par les différents canaux et le système hydraulique lié au canal de la Robine. Ces éléments historiques peuvent être particulièrement éclairants au moment d'envisager la compréhension actuelle du fonctionnement et de la gestion hydrologique de ce territoire empreint à la salinité et d'envisager des projections futures.

4. Redistribution actuelle de l'eau dans la Basse Plaine

La gestion des ressources en eau dans le bassin de l'Aude est en partie dépendante des volumes d'eau utilisés dans la basse plaine. A ce titre, il est intéressant de quantifier les différents flux entrant et sortant du périmètre d'étude ainsi que la redistribution de ces flux au sein de la basse-plaine. L'objectif de cette partie est de réaliser une compilation des informations existantes pour cette quantification et d'en proposer une représentation intégrée.

4.1 Matériel et méthodes

La compilation des de l'ensemble des données a pu être conduite grâce à une étroite collaboration entre les acteurs du territoire. Elle comprend notamment les données climatiques (précipitation, évapotranspiration de référence), de débits de l'Aude, de recharge de la nappe et d'écoulements souterrains, de prélèvements dans le Canal de la Robine, de prélèvements pour l'eau potable et les rejets vers les étangs (via les canaux de drainage) et par les stations d'épuration. Les données proviennent des mesures faites par les différents organismes participant au projet SALiN, de l'exploitation de bases de données publiques et de mesures acquises au cours de la thèse.

4.1.1 Données climatiques

Les données climatiques utilisées proviennent 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° de côté, à un pas de temps mensuel, sur la période 1901-2019. Elles sont issues de méthodes d'interpolation spatiale et temporelle de mesures climatiques et publiées (Harris et al., 2020). Les données de la dalle centrée sur Narbonne (CRUTS 43.25N, 3.25E) ont été extraites sur la période 1960-2019 pour les données de pluie et d'évapotranspiration de référence.

L'analyse statistique conduite permet de caractériser les tendances et ruptures dans les séries temporelles de précipitations et de demande climatique (ET0). L'analyse de tendance utilise usuellement le test paramétrique de régression linéaire, en cas de p.value > 0,05 au test de normalité, ou le test non-paramétrique de Mann-Kendall, en cas de p.value > 0,05 au test de normalité. L'analyse de rupture utilise le test paramétrique de Buishand en cas de p.value > 0,05 au test de normalité, ou le test non-paramétrique de Pettitt en cas de p.value > 0,05 au test de normalité (Figure 42).

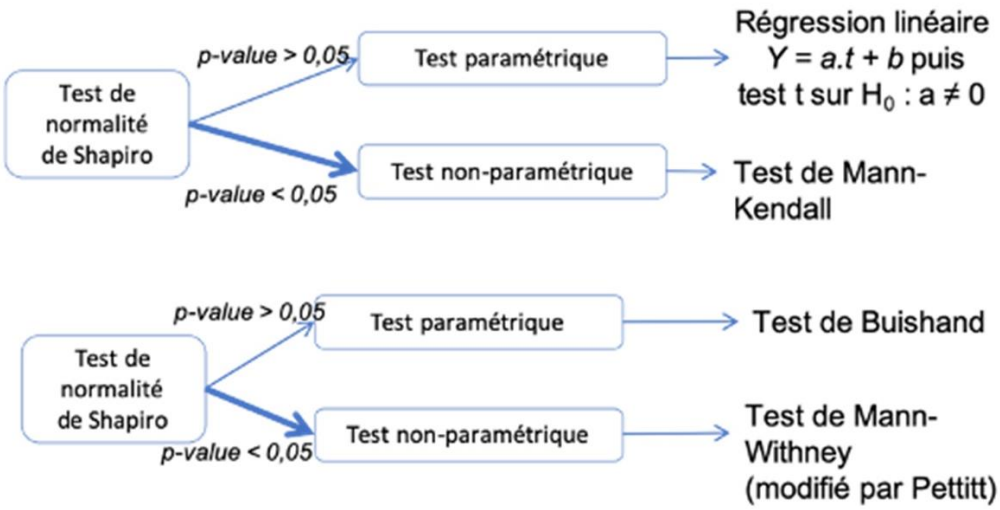


Figure 42 : Organigramme des traitements statistiques des données climatiques (en haut analyse de tendance, en bas analyse de rupture)

4.1.2 Données de débit de l'Aude

Les données analysées proviennent de la Banque HYDRO / Eau France Hydroportail du Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie. La station suivie est la station de Moussan (écluse de Moussoulens), code Y1612040, située en amont de la zone d'étude au niveau de la dérivation du Canal de la Robine. A cet endroit la surface amont drainée du bassin de l'Aude est de 4838 km^2. A partir des données de 1987, la Banque HYDRO indique que les débits mensuels moyens présentent une distribution uni-modale, sont maximaux en février (73,1 m^3/s soit 37 mm) et minimaux en août (7,9 m^3/s soit 4 mm). A l'échelle annuelle, le module est de 40,4 m^3/s, la quinquennale sèche est de 26 m^3/s et la quinquennale humide de 55 m^3/s.

La station de Moussan affiche des données manquantes. Pour analyser les occurrences des crues et les potentiels volumes de débordement dans la basse-plaine, la chronique de débits journaliers et mensuels a pu être exploitée entre janvier 1989 et mai 2000 et entre mai 2005 et novembre 2020.

4.1.3 Données sur les écoulements souterrains

Les données piézométriques ont été récoltées dans le cadre du projet SALIN sur des forages ou puits accessibles sur la basse-plaine entre juillet et septembre 2019 (107 points), février et mars 2021 (111 points), juillet et août 2021 (104 points). Les valeurs ont été comparées à celles mesurées entre octobre 1961 et mai 1962 sur la partie nord de la zone d'étude (Cambon, 1963). Ces données ont été interpolées spatialement par krigeage après une analyse variographique. Les propriétés de perméabilité et de transmissivité moyenne de la nappe du Quaternaire ont été obtenues à partir de 19 essais de pompage disponibles dans la Banque de données du Sous-Sol (BSS, InfoTerre, BRGM), de 4 essais disponibles dans des travaux antérieurs (Cambon, 1963) et de 12 essais d'injection réalisés dans le cadre du Projet SALIN.

Le champ de transmissivité de l'aquifère a été calculé à partir de la méthode proposée dans (Dewandel et al., 2017, 2021) pour des aquifères de socle libre dans les cas où il n'y a pas ou peu d'ouvrages de pompage exploités et où l'on dispose d'une importante densité de piézomètres. La méthode est basée sur le principe que les variations à grande échelle de la charge hydraulique peuvent donner des informations sur les propriétés à grande échelle de l'aquifère. Elle est applicable si l'aquifère est naturellement drainé (absence de pompage dans les eaux souterraines), si on néglige le flux vertical souterrain, et si le niveau de la nappe est en état pseudo-permanent et principalement contrôlé par la topographie plutôt que par la recharge de l'aquifère (Haitjema & Mitchell-Bruker, 2005). On peut alors supposer que le gradient de la nappe dépend à la fois de la pente topographique et de la transmissivité horizontale de l'aquifère.

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 détails de la méthode et les résultats intermédiaires sont disponibles dans le rapport BRGM/RP-71251-FR (Fleury et al., 2021).

4.1.4 Données sur la recharge de la nappe

Un premier terme de la recharge de la nappe par les précipitations a été obtenu par un bilan hydrique global du sol permettant de calculer une pluie efficace à partir des données météorologiques SAFRAN sur la période 1960 à 2019 à l'aide du logiciel ESPERE (Lanini &

Caballero, 2021) et du Ratio d'Infiltration de la Pluie Efficace (RIPE, Lanini et al., 2019). Les résultats de trois modèles de bilan hydriques (Dingman, 2002; Edijatno & Michel, 1989; Thornthwaite, 1948) ont été multipliés par la valeur du RIPE de 56,4% indiquée dans la carte existante à l'échelle nationale (Lanini et al., 2019).

Un deuxième terme de la recharge de la nappe est lié aux pratiques de submersion. Ce terme de redistribution de l'eau dans la basse-plaine est particulièrement délicat à estimer. En effet, ce phénomène, sous le contrôle des agriculteurs, est localisé (à l'échelle d'une parcelle ou d'un groupe de parcelles) et sur une courte durée (quelques heures d'apports d'eau et quelques jours de drainage). Il peut donc difficilement être appréhendé par des suivis piézométriques classiques. Ce terme a tout de même tenté d'être approché sur deux parcelles viticoles test (parcelle de Grand Vigne de 3 ha à l'ouest de Vinassan et parcelle du Cercle de 1,9 ha proche de la rive droite du Canal de la Robine) après accord et concertation avec les viticulteurs dans le cadre de deux submersions (cf.2.3.4). Le dispositif expérimental comprenait des mesures piézométriques à haute fréquence temporelle à trois profondeurs et des mesures sur les canaux de drainage. Les données récoltées ont été utilisées pour le calage du modèle proposé par Dewandel et al. (2021) pour estimer le terme de recharge de la nappe sous différentes hypothèses de fonctionnement. Le détail de la méthode et les résultats intermédiaires sont donnés dans le rapport BRGM/RP-71251-FR (Fleury et al., 2021).

4.1.5 Données sur les eaux domestiques

Les données sur les prélèvements et l'adduction d'eau potable ainsi que les données de rejet des stations d'épuration ont été collectées à partir d'informations communiquées par les partenaires du projet, le Schéma de Cohérence Territorial, l'Étude Volume Prélevable (EAUCEA, 2014) et le Portail de l'assainissement collectif (*Portail de l'AC*).

4.1.6 Données sur les prélèvements sur le Canal de la Robine

De nombreux canaux sont présents dans la zone, les uns servant au drainage, les autres à l'irrigation des cultures. La gestion de ce réseau hydraulique est faite par différentes Associations Syndicales Autorisées (ASAs). La majorité des ASAs de la zone est regroupée au

sein de l'ASEAUDE (Union des Associations Syndicales d'hydraulique de l'Est audois) qui a pour mission la gestion technique et collective de l'eau à l'échelle du canal de la Robine et l'apport de conseils auprès des agriculteurs. Les 7 sept ASA adhérentes sont : Raonel, La Rèche, La Plaine de Livière, Du Cercle, Petit Mandirac, Ricardelle et Coursan.

La caractérisation des prélèvements et des apports d'eau au Canal de la Robine a été réalisée grâce à une collaboration entre le PNRNM, le SMMAR (Syndicat mixte des milieux aquatiques et des rivières), l'ASEAUDE et VNF. Les volumes correspondants ont été établis pour les années civiles 2020 et 2021, marquées respectivement par des précipitations d'environ 650 mm et 337 mm (source MétéoFrance). La différence entre les volumes entrants et les volumes sortants du Canal de la Robine permet de calculer un volume non attribué et peut refléter les erreurs globales d'estimation. Le schéma des prises et des apports d'eau sont visibles en Figure 43. Les volumes annuels et ceux en période de basses eaux (de juin à octobre) ont été calculés et agrégés par type d'usage.

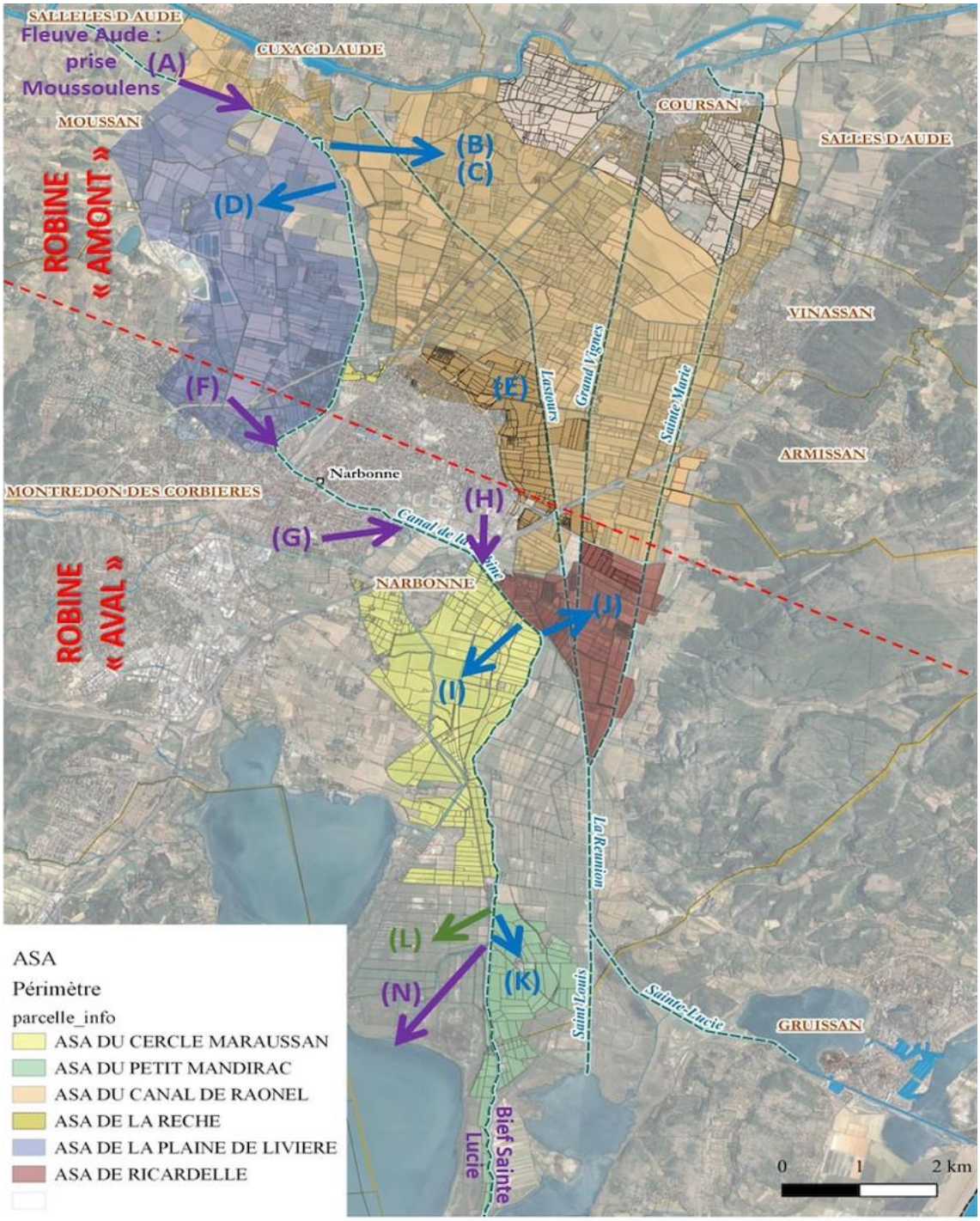


Figure 43 : Représentation du système Robine. Les flèches indiquent les volumes entrants ou sortants de la Robine : (A) prise d'eau de Moussoulens sur l'Aude, (B) prélèvement de l'ASA du Raonel pour l'agriculture, (C) prélèvement de l'ASA du Raonel pour la pêche, (D) prélèvement de l'ASA de la Livière, (E) prélèvement de l'ASA de la Rêche, (F) apport provenant de la source de l'Oeillal via le canal Mayral, (G) apport par le Rec de Veyret, (H) apport par la STEP de Narbonne, (I) prélèvement de l'ASA du Cercle, (J) prélèvement de l'ASA de Ricardelle, (K) prélèvement de l'ASA de Mandirac, (L) prélèvement pour les espaces naturels (Conservatoire du Littoral et PNRNM), (N) déversoir du Canélou dans l'étang de Bages-Sigean.

4.1.7 Données sur le drainage superficiel vers les étangs

Une étude intitulée FMA (Flux Maximum Admissible) pour l'étang de Campignol a été lancée et est en cours de réalisation par le Bureau d'Étude Hydriad pour le PNR (Hydriad, 2022). Dans le cadre de cette étude, le débit à l'exutoire du Canal de la Réunion a été mesuré et les données fournies concernent la période d'octobre 2020 et avril 2022. A partir de ces débits, les volumes entrants dans les étangs ont été calculés. Il convient de noter que le canal de la Réunion agit en tant que collecteur des eaux de ressuyage, issues des submersions, ainsi que du ruissellement et du drainage suite aux précipitations. Ce volume intègre donc le flux drainé dans la partie ouest de la basse-plaine de l'Aude à l'exception du réseau de drainage de l'ASA du petit Mandirac.

4.2 Résultats

4.2.1 Précipitations et évapotranspiration

La série de précipitations annuelles est montrée à la Figure 44. Les données ne suivent pas de tendance significative. Cependant, le test de Buishand révèle une rupture significative (p-value < 0,05) avec un changement de moyenne annuelle de 648 mm à 594 mm à partir de 2010.

L'analyse mois par mois permet d'identifier certaines tendances avec une p.value < 0,01 (Tableau 8). Les mois de janvier, février, mai, septembre, novembre et décembre ne présentent pas d'évolution des précipitations. On observe une évolution à la hausse pour les mois de mars, sur l'ensemble de la période et le mois d'août sur la période 1960 à 1981. A l'inverse, les mois d'avril, juin, juillet et octobre sont plutôt caractérisés par une baisse des précipitations, visible à partir de 1995.

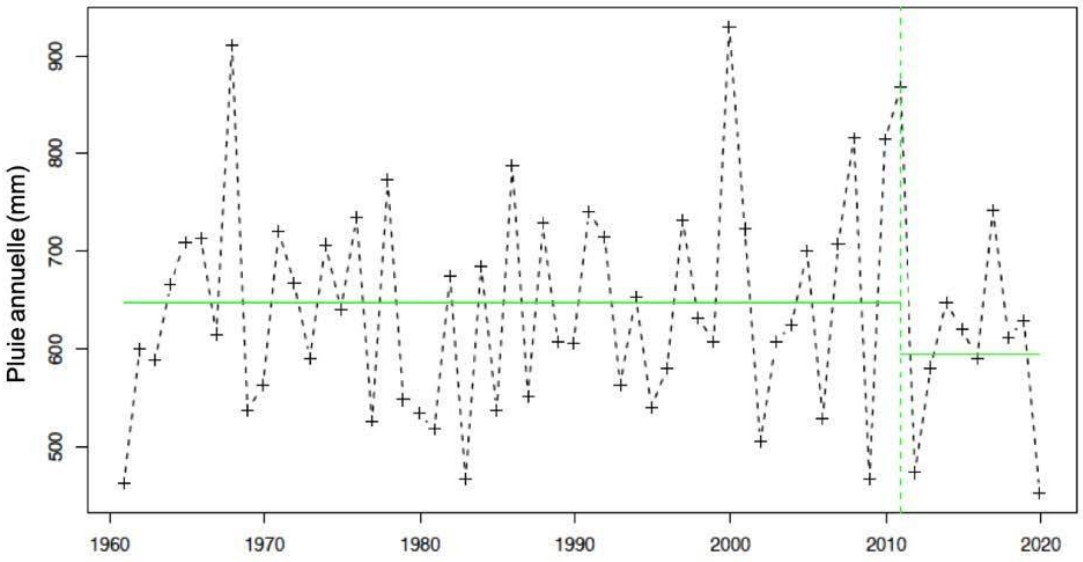


Figure 44 : Précipitations annuelles sur la période 1960-2019 avec test de rupture (en vert la moyenne avant et après la rupture identifiée par le test de Buishand).

La série d'évapotranspiration de référence annuelle est montrée à la Figure 45. L'analyse révèle une tendance significative à l'augmentation sur l'ensemble de la période 1960-2019 de 3,01 mm/an (p-value de $2{,}4e^{-13}$), avec une augmentation plus prononcée depuis 1981 de 3,56 mm/an (p-value $9e^{-09}$). Une rupture est également observée en 1988, avec une moyenne annuelle passant de 917 mm à 1014 mm.

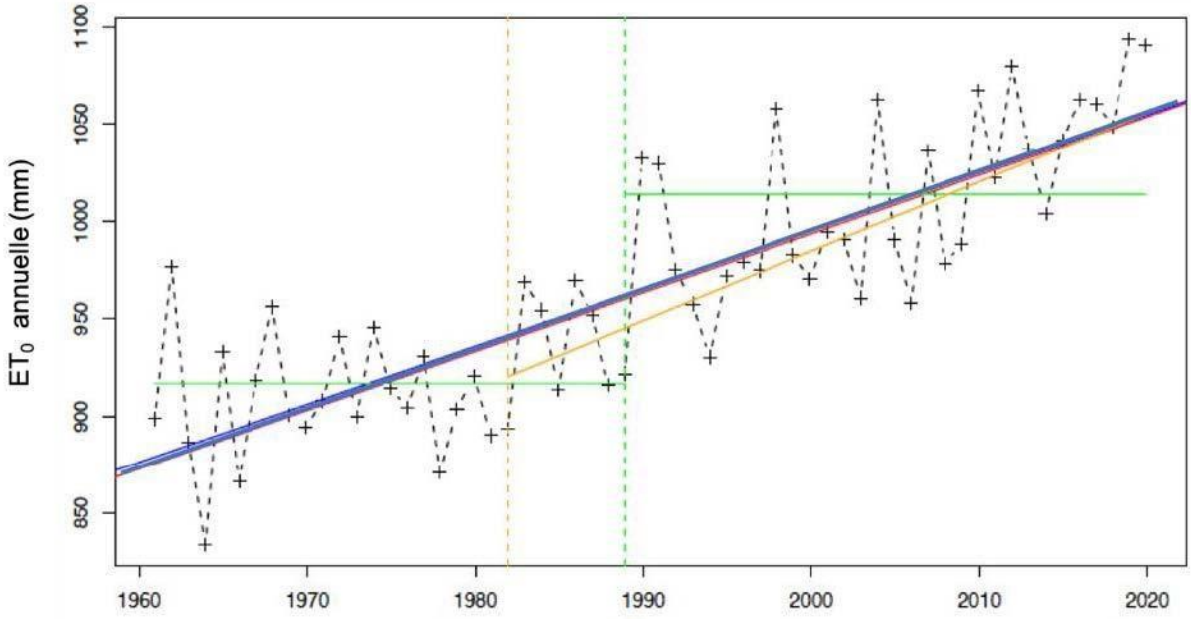


Figure 45 : Evapotranspiration de référence annuelle entre 1960 et 2019, test de ruptures des moyenne (en vert) et courbes de tendance pour toute la période (en bleu) et sur la période 1981-2019 (en orange).

Tableau 8 : Evolution des précipitations (mm/an) et de la demande climatique (mm/an) par mois

Mois	Évolution des précipitations (mm/an)	Période	Évolution de la demande climatique (mm/an)	Période
janvier	→aucune	1960 - 2019	↗ 0,05 mm/an	1960 - 2019
février	→aucune	1960 - 2019	→aucune	1960 - 2019
mars	↗ 0,48 mm/an	1960 - 2019	↗ 0,26 mm/an	1960 - 2019
avril	↘ 1,46 mm/an	1960 - 1991	↗ 0,5 mm/an	1980 - 2019
mai	→aucune	1960 - 2019	↗ 0,42 mm/an	1972 - 2019
juin	↘ 1,9 mm/an	1995 - 2019	↗ 0,66 mm/an	1969 - 2019
juillet	↗ 1,94 mm/an ↘3,82 mm/an	1960 - 1995 1995 - 2019	↗ 0,52 mm/an	1969 - 2019
août	↗ 3,32 mm/an	1960 - 1981	↗ 0,58 mm/an	1969- 2019
septembre	→aucune	1960 - 2019	↗ 0,29 mm/an	1969 - 2019
octobre	↘ 3,1 mm/an	1960 - 1983	↗ 0,33 mm/an	1976 - 2019
novembre	→aucune	1960 - 2019	↗ 0,1 mm/an	1969 - 2019
décembre	→aucune	1960 - 2019	↗ 0,13 mm/an	1969 - 2019

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 certaines tendances significatives (avec une p-value < 0,01). On observe cette fois-ci une évolution de la demande climatique à la hausse qui concerne quasiment tous les mois de l'année, avec une intensification particulièrement marquée pendant la période estivale, à l'exception du mois de février. Cette évolution est légère pour le mois de janvier, un peu plus marquée pour le mois de mars et plus importante pour le mois d'avril, mai et juin, juillet, août, septembre, octobre, novembre et décembre. Aucun mois ne présente donc une diminution significative des valeurs d'évapotranspiration de référence.

4.2.2 Crues de l'Aude

La chronique des débits journaliers à la station de Moussan est montrée à la Figure 46. 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 (Figure 47).

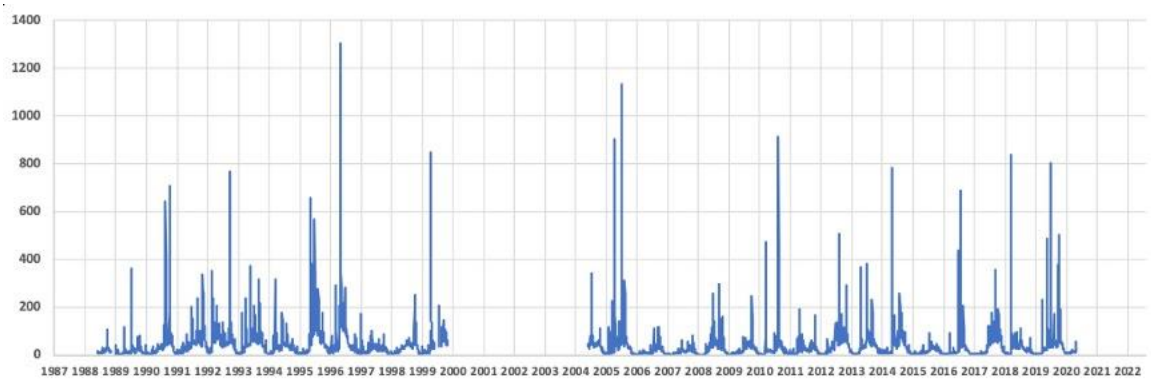


Figure 46 : Débits journaliers de l'Aude mesurés à la station de Moussan (code Y1612040)

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

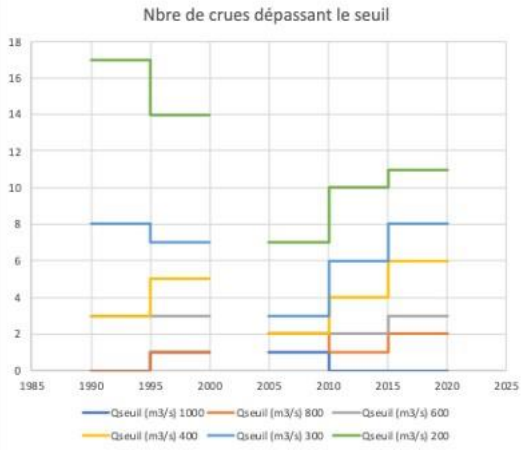


Figure 47 : Évolution entre 1989 et 2020 du nombre de jours et nombre de crues dépassant un débit journalier seuil à la station de Moussan

Les crues de plus faible amplitude (débit seuil de 200 à 300 $m^3.s^{-1}$) sont plus récurrentes avant les années 2000 qu'après 2005. Pour les plus fortes crues (débit seuil de 400 à 800 $m^3.s^{-1}$), 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 $m^3.s^{-1}$).

Les apports d'eau à la basse-plaine résultant des débordements de l'Aude ont été estimés en utilisant les données pour les années hydrologiques de 2005 à 2020. Un seuil de 600 $m^3.s^{-1}$ a été retenu comme critère de débordement, en fonction de la capacité des déversoirs latéraux (comm. pers. SMMAR). Les volumes calculés fournissent une estimation et représentent une limite supérieure des apports d'eau par débordement (en supposant que la totalité des débits journaliers au-dessus de ce seuil ont atteint la partie de la basse-plaine étudiée par débordement, sur la rive droite du fleuve). Ces débordements surviennent tous les 2 ou 3 ans entre 2005 et 2020 et peuvent équivaloir en volume à l'ordre de grandeur de la pluviométrie annuelle directe sur la zone étudiée, estimée entre 30 et 55 millions de mètres cubes (Mm^3) par an.

4.2.3 Écoulements souterrains

Les cartes piézométriques ont été établies à différentes dates et montrent une stabilité globale entre les différentes dates (1960, 2019, 2021). Un exemple de carte établie pour l'été 2021 est donné à la Figure 48.

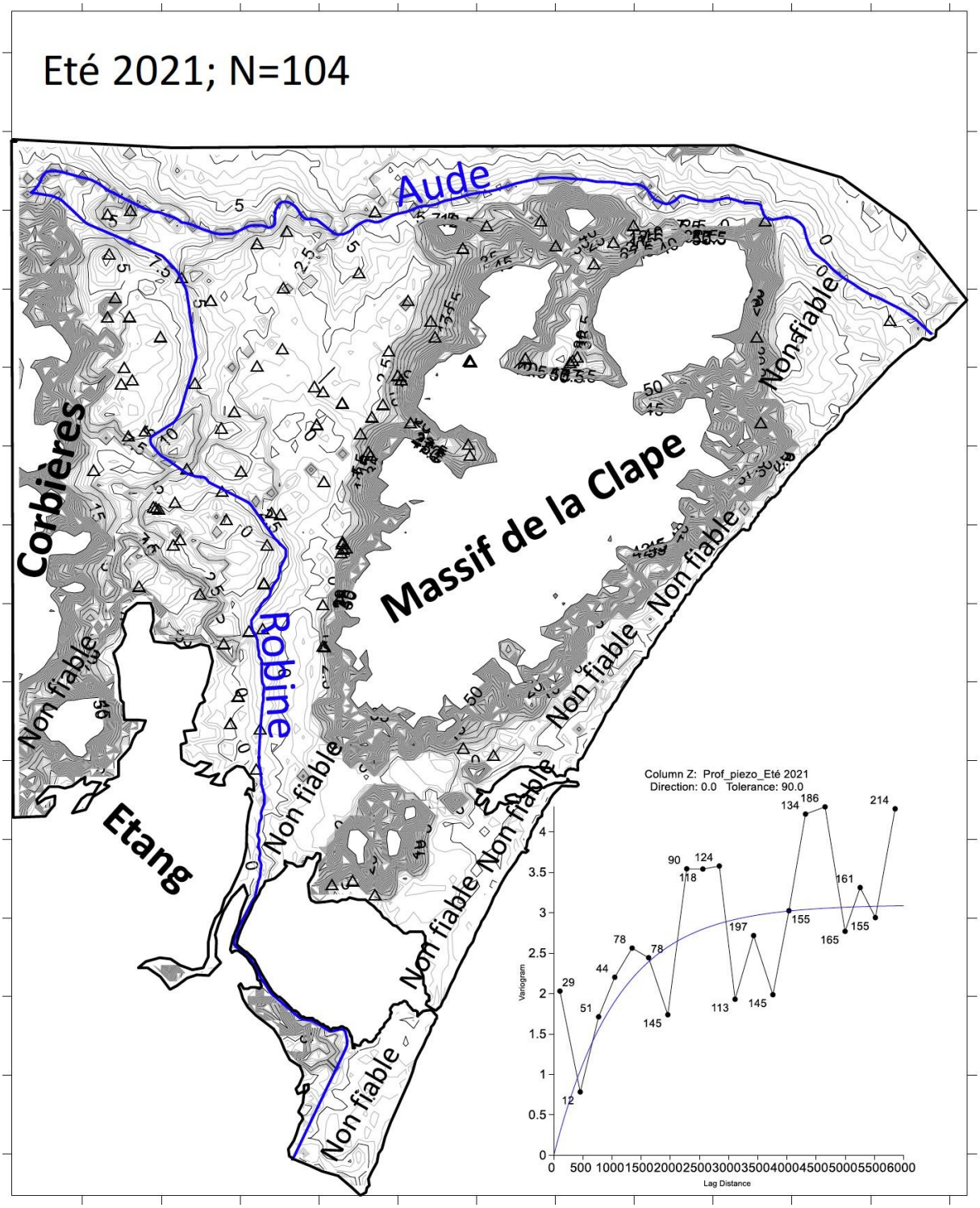


Figure 48 : Carte piézométrique établie à partir de relevés de l'été 2021 (isovaleurs tous les 5 m) et variogramme associé à l'interpolation (extrait de Fleury et al., 2021)

Les ordres de grandeur des principaux flux entrants et sortants ont été calculés en utilisant les cartes piézométriques et les valeurs de transmissivité établie aux limites de l'aquifère. Selon ces estimations :

- les Corbières alimentent l'aquifère de la plaine à un rythme d'environ 1,7 Mm^3/an (environ 7 Mm^3/an sortants et 9,7 Mm^3/an entrants),
- le massif de la Clape contribue à hauteur de 4,0 Mm^3/an (environ 0,4 Mm^3/an sortants et 4,4 Mm^3/an entrants).

Entre l'été 2019 et l'été 2021, il y a peu de différence dans les évaluations des flux. Les flux estimés pour la période 2019-2021 comparés à ceux estimés dans les années 1960 (Cambon, 1963) dans la partie nord de la plaine, se révèlent similaires, suggérant qu'il n'y a pas eu de forte évolution des flux dans cette partie de la plaine.

En ce qui concerne les échanges souterrains avec l'étang en aval, le flux d'eau souterraine est globalement sortant, indiquant un déplacement d'eau souterraines vers l'étang de Bages-Sigean. À partir des données de l'été 2019, de l'hiver 2021 et de l'été 2021, ce flux d'eau vers l'étang est estimé à 5,3 Mm^3/an (environ 6,8 Mm^3/an sortants et 1,5 Mm^3/an entrants).

La perméabilité du lit de l'Aude et la Robine, estimée d'après des essais de pompage sur le captage AEP de Coursan, est évaluée à 4.10^{-6} $m.s^{-1}$. En ce qui concerne l'aquifère au niveau de l'Aude, on observe depuis les années 1960 relativement peu de variations dans les flux alimentant le cours d'eau, généralement de l'ordre de 0,1 à 0,2 Mm^3/an. En revanche, les flux de l'Aude alimentant l'aquifère semblent avoir diminué, passant d'environ 1 Mm^3/an dans les années 1960 à environ 0,6 Mm^3/an aujourd'hui. Cette baisse pourrait être expliquée par des cartes piézométriques moins précises au niveau de l'Aude en 2019 et 2021, ainsi que par des conditions piézométriques d'étiage plus marquées en 2019/2021 (en raison de très faibles précipitations pendant l'hiver 2021) par rapport aux années 1960. Actuellement, en bilan, l'Aude semble alimenter la nappe avec un flux d'environ 0,4 Mm^3/an d'après ces calculs.

Concernant les échanges souterrains avec le Canal de la Robine, les estimations réalisées pour la partie commune des années 1960 jusqu'à aujourd'hui sont très comparables. Les flux alimentant le canal sont généralement de l'ordre de 0,2 Mm^3/an, tandis que les flux de la Robine alimentant la nappe sont d'environ 0,3 Mm^3/an. Ces estimations suggèrent que dans sa partie amont, la Robine est partiellement alimentée par la nappe, ce qui n'est pas le cas en aval où la Robine alimente systématiquement la nappe. À l'échelle de la plaine et en moyenne, le Canal de la Robine (sur toute sa longueur) semble alimenter la nappe avec un flux total d'environ 0,6 Mm^3/an.

4.2.4 Recharge de la nappe

Les résultats des calculs de pluie efficace sont indiqués au Tableau 9. La moyenne des trois modèles de bilan hydrique du sol donne des résultats assez peu variables sur des périodes de 30 ans. Sur les dernières décennies, la recharge de la nappe par les précipitations semble, rapportée à la surface de la basse-plaine, pouvoir être estimée à hauteur de 4 à 5 Mm^3/an.

Tableau 9 : Recharge moyenne de la nappe par les eaux de pluie par période de 30 ans à partir de trois formules de bilans hydriques du sol

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	**49.4**	**58.5**	**57.5**	**53.8**	**51.4**

La recharge de la nappe par les submersions a pu être estimée à partir des mesures réalisées durant le suivi de deux submersions sur les deux parcelles test, en 2021 et en 2022. Les résultats ont révélé la création d'un dôme piézométrique suite aux submersions qui se dissipe assez rapidement. D'après les mesures et les premières modélisations réalisées sur ces deux parcelles, Il semble donc qu'une assez faible part des submersions recharge réellement la nappe et semble plutôt recharger les sols et être évacuée par drainage dans les différents types de canaux collecteurs.

Sur la Plaine de la narbonnaise, les surfaces irrigables sont égales à 5 000 Ha, et les surfaces irriguées sont comprises entre 1 500 à 2 000 Ha (Projet SALIN). Le volume de submersion calculé à partir de l'analyse des submersions sur les parcelles expérimentales est d'environ 2 000 m^3/Ha (chiffre également confirmé à l'échelle de la Basse Plaine, dans le cadre du projet SALIN). Avec une moyenne de 2 submersions pas an, le volume annuel pour les submersions est donc compris entre 6 Mm^3 (1 500 Ha * 2 000 m^3/Ha * 2 submersions / an) et 8 Mm3 (2 000 Ha * 2 000 m^3/Ha * 2 submersions / an). Enfin, la recharge « efficace de la nappe » déduite de l'étude des submersions (Fleury et al., 2021) est comprise entre 10 à 25 %. Il en résulte une estimation de la recharge de la nappe par les submersions qui est comprise entre 0,6 Mm^3 (6

Mm^3 * 10%) et 2 Mm^3 (8 Mm^3 * 25%) sur la plaine de la Narbonnaise. En considérant le bilan en eau de la nappe à partir des autres flux calculés, une première estimation très incertaine d'environ 1 Mm^3/an peut être considérée.

4.2.5 Eaux domestiques

Les prélèvements annuels pour l'Approvisionnement en Eau Potable (AEP) aux captages de Moussoulens, Coursan et Cuxac totalisent 6,6 Mm^3/an. A ce terme correspondant à des prélèvements à l'intérieur de la zone d'étude, il faut ajouter une entrée d'eau provenant d'en dehors des limites de la zone d'étude et du bassin versant de l'Aude par le réseau BRL d'environ 8 à 10 Mm3/an. Une partie non évaluée de ces entrées hors bassin de l'Aude peut quitter les limites de la basse-plaine considérées dans ce travail pour alimenter les communes du littoral.

La station d'épuration de Narbonne participe aux apports d'eau dans le canal de la Robine à hauteur de 3,8 Mm^3/an. Les autres stations d'épuration dans la zone déversent 0,74 Mm^3 dans l'Aude (alentours de Coursan/Salles d'Aude) et 0,2 Mm^3 dans le canal de drainage de Sainte Marie.

4.2.6 Système Robine

Les volumes entrants et sortant de la Robine sont donnés au Tableau 10.

Tableau 10 : Volumes (en Mm3) totaux annuels et en période d'étiage (entre juin et octobre), entrants et sortants du système Robine pour les années 2020 et 2021

		Prise d'eau sur l'Aude (Moussoulens)	Apports latéraux	Usage agricole	Pêche	Espaces naturels	Navigation	Non affecté
2020	Total	38,8	9,1	18,8	1,4	6,6	10,5	12
	Période étiage	23,6	3,8	13,6	0	2,4	4,4	7
2021	Total	36,5	5,2	19,4	2,7	6,6	10,5	5
	Période étiage	18,1	1,6	11,3	0	1,7	4,4	2

Les volumes entrants dans le Canal de la Robine en provenance de l'Aude à la prise d'eau de Moussoulens sont comparables entre les deux années et représentent un peu moins de 40 Mm^3/an. Ces prélèvements sont effectués en période d'étiage pour une part représentant 60

% en 2020 et 50 % en 2021 des prélèvements totaux annuels. A ces volumes entrants, il faut additionner des volumes provenant des autres apports à hauteur de 9,1 Mm^3/an en 2020 et 5,2 Mm^3/an en 2021 soit respectivement 24 % et 14 % des prélèvements directs dans l'Aude.

Les volumes sortants majoritaires sont destinés à l'agriculture et représentent pour les deux années une valeur stable de 18 Mm^3/an soit environ 50 % des volumes annuels entrants provenant du fleuve Aude à la prise d'eau de Moussoulens. Les prélèvements pour les usages agricoles sont effectués en période d'étiage pour 70 % en 2020 et 60 % en 2021.

Les volumes sortants pour la pêche sont quant à eux faibles en comparaison des autres usages et estimés à 1,4 Mm3/an en 2020 et 2,7 Mm^3/an en 2021 soit respectivement 4% et 7% des volumes annuels entrants provenant du fleuve Aude.

Les volumes alloués aux espaces naturels sont stables et représentent 6,6 Mm3/an soit un peu plus de 15 % des prélèvements à la prise d'eau de Moussoulens sur l'année et environ 10 % en période d'étiage.

Les volumes estimés pour la gestion du canal sont significatifs et représentent environ 1/3 du volume total prélevé par le canal de la Robine à Moussoulens à hauteur de 10 Mm^3/an.

Il convient de noter que les volumes non affectés sont importants en 2020 (représentant 1/3 du volume prélevé), tandis qu'ils sont deux fois moins importants en 2021.

4.2.7 Grands canaux de drainage collecteurs

Les données relatives aux volumes drainés vers les étangs par l'intermédiaire du Canal de la Réunion sont illustrées à la Figure 49. Sur une année complète, d'octobre 2020 à octobre 2021, le volume évacué vers les étangs peut être estimé à environ 5 Mm^3/an.

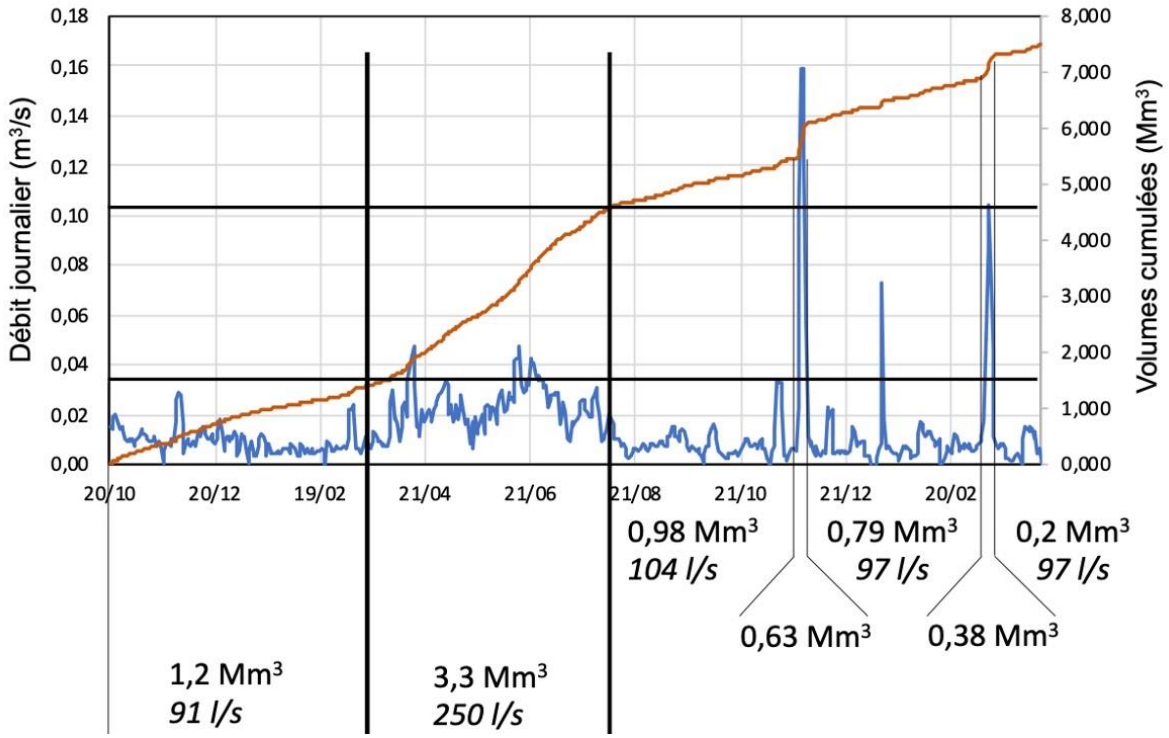


Figure 49 : Débits journaliers (courbe bleue), débits journaliers cumulés (courbe rouge) mesurés et volumes et débits moyens par périodes calculés à l'exutoire du canal de la Réunion à partir des données collectées et fournies par Hydriad (2022)

Plusieurs sous-périodes peuvent être identifiées par l'examen de la courbe de débit cumulé. D'octobre 2020 à mars 2021, le débit est faible et le drainage de cette période hivernale est estimé à 1,2 Mm^3/an.

De mars à août 2021, le drainage est plus intense avec un débit moyen de 250 l/s et représente 3,3 Mm3/an. Il convient de noter que pendant ces cinq mois, les précipitations ont été peu abondantes, environ 110 mm à la station MétéoFrance de Narbonne, sans épisode significatif dépassant les 15 mm par jour. Pour rappel, la part des submersions qui ne rechargeait pas les nappes avait précédemment été estimée entre 5,4 et 6 Mm^3. En prenant en compte le flux de ressuyage calculé à 3,3 Mm3 par Hydriad (2022), il est donc possible de déduire que le volume restant, situé entre 2,1 et 2,7 Mm3, demeure dans le sol et reste disponible pour les plantes. Cela permet d'établir des estimations générales de la répartition du flux des submersions avec la moitié se dirigeant vers les étangs, un tiers demeurant dans le sol, reconstituant le réservoir hydrique disponible pour la végétation et 15 à 20 % rechargeant la nappe.

De août-septembre 2021 à avril 2022, le débit cumulé suit une courbe régulière comparable à celle de l'hiver 2020-2021 (avec un débit journalier moyen entre 90 et 100 l/s) ponctuée de deux événements de drainage important correspondant à de forts épisodes pluvieux.

4.3 Conclusion

L'ensemble des données rapportées dans les résultats est présenté à la Figure 50. Les flux souterrains apparaissent très inférieurs aux flux de surface en relation avec des gradients piézométriques relativement faibles. Les recharges souterraines aux limites par les massifs de la Clape et des Corbières sont de l'ordre de grandeur des recharges sur le périmètre d'étude. La dynamique inter-annuelle souterraine apparaît stable en comparaison de la dynamique de surface. La plus grande partie des volumes annuels entrants dans la basse-plaine sont conduits à la mer par l'Aude. La plus grande partie des flux de surface redistribués dans la zone d'étude proviennent du système Robine.

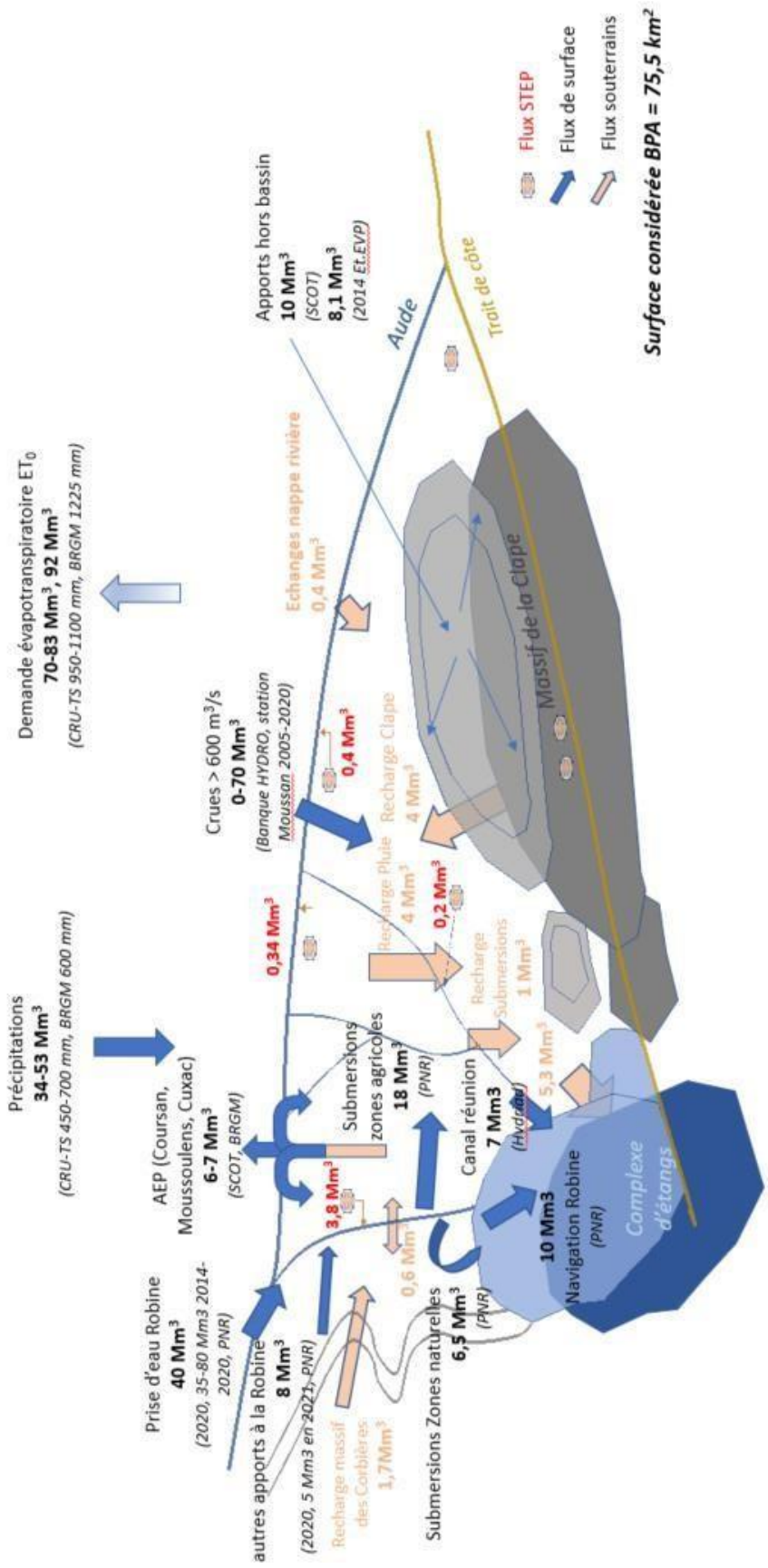


Figure 50 : Représentation intégrée des flux et des volumes annuels correspondant aux limites et au sein de la basse-plaine

Les volumes entrants et sortants entre la zone de la basse-plaine étudiée et la rive droite de l'Aude apparaissent comme des termes faibles du bilan et équilibrés entre eux. Toutefois ce constat n'est valable qu'en dehors des années de fortes crues de l'Aude. En condition de fortes crues de l'Aude (débits dépassant 600 m^3/s à la station de Moussan), les volumes déversés dans la basse-plaine peuvent atteindre l'équivalent d'une à deux années de précipitation directe, soit 34 à 53 Mm3. L'impact de tels événements n'a pas pu être observé sur la courte durée des suivis de cette étude. On peut tout de même faire l'hypothèse que ces volumes de crue doivent impacter la recharge des sols et la lixiviation d'une partie des sels contenus dans les sols.

Le climat méditerranéen sub-humide de la zone d'étude montre un déficit hydrique climatique (Pluie – Evapotranspiration de référence) structurel. Ce déficit dans la zone d'étude est pratiquement compensé par les apports d'eau par submersion, près de 20 Mm3. Ces apports étant concentrés sur les zones irrigables, elles reçoivent en bilan plus d'eau que l'ET_0, ce qui permet de garantir une percolation efficace dans les sols. Cette percolation rejoint semble-t-il pour une part majoritaire les canaux de drainage (7 Mm3) et la nappe superficielle (1 à 2 Mm3).

Les prélèvements dans le système Robine représentent de 4% jusqu'à 10% des volumes de l'Aude pour les années où ses débits sont les plus faibles. La redistribution dans la plaine est importante comme les volumes sortant vers les étangs, via les marais du Narbonnais (6,5 Mm^3) et le canal de la Réunion (7 Mm^3). En plus des flux souterrains, les estimations montrent un apport de l'ordre de 18 Mm^3 vers les étangs.

La Figure 50 fait apparaitre la zone d'étude comme un delta anthropique de l'Aude (Anthony et al., 2014; Maselli & Trincardi, 2013) avec localement une concentration d'eau sur des zones irriguées dépassant la demande climatique. Il est toutefois très important de noter que la vision proposée ici est issue d'ordres de grandeurs moyens sur les dernières années. Une vision plus dynamique et notamment intégrant des épisodes de crues débordantes permettrait compléter le diagnostic pour se projeter sur les conséquences des changements climatique et d'usages de l'eau.

5. Discussion et conclusion

Le projet collaboratif SALIN qui a servi de support à ces travaux a été initié par un questionnement du territoire de la basse-plaine de l'Aude sur la dynamique de salinisation des eaux et des sols et les risques de diminution drastiques de la production agricole et de perte de la biodiversité dans les espaces naturels. Les hypothèses sous-jacentes à ce questionnement étaient principalement de deux grands ordres : le changement climatique et les ressources en eau. Le changement climatique était évoqué au titre de la hausse du niveau des mers. Cette hausse est perçue comme induisant une élévation générale des conditions de salinité dans la basse-plaine et a justifié la réflexion conduite par le PNRM dans le cadre du programme "La mer monte" (*La mer monte*, 2021). L'adaptation au changement climatique semble également indiquer une hausse de la demande en eau pour les usages agricoles et domestiques. Or la disponibilité de la ressource en eau est envisagée comme en diminution en lien avec le fonctionnement hydrologique (naturel et anthropique) de l'ensemble du bassin versant de l'Aude (*Projet Talanoa Waters*, 2023). Dans le cadre de la baisse de la disponibilité en eau, les volumes d'eau prélevés dans la basse-plaine, essentiellement via le canal de la Robine, sont diagnostiqués comme creusant le déficit quantitatif du bassin.

Ce chapitre tente d'établir les ordres de grandeur des différents flux entrants, sortants et redistribués dans la basse-plaine afin de les comparer entre eux et de tenter de replacer la situation actuelle dans une trajectoire de gestion de l'eau sur un temps long. Avant de présenter des interprétations en lien avec les préoccupations du territoire et les éléments apportés par cette proposition de trajectoire, il convient de mentionner les limites de ce travail exploratoire. L'estimation des flux actuels est fortement entachée d'incertitudes liés à l'hétérogénéité des sources de données manipulées et de longueurs de chroniques disponibles, à la qualité des données (sur les prélèvements destinés à l'agriculture notamment) et aux méthodes d'évaluation des flux (les flux souterrains étant particulièrement difficiles à estimer notamment). L'estimation des incertitudes constitue donc une perspective importante de ce travail.

La trajectoire présentée de la basse-plaine montre un système qui évolue de longue date sous les forçages naturels climatiques et anthropiques. En écho au questionnement initial, un résumé pourrait être " la mer monte et la terre avance" depuis l'holocène grâce aux

dynamiques sédimentaires. La basse-plaine est une zone de comblement récente liée aux forts apports de sédiments par l'Aude. La plaine a donc suivi une progradation sur les derniers millénaires, malgré la hausse du niveau des mers. Le fleuve Aude à l'aval de Narbonne avait initialement un cours Nord-Sud puis a formé un delta avec une branche Ouest-Est. Ce bief est devenu le cours actuel suite à un fort événement de crue. Toutefois sur la place du bief Nord-Sud a été construit le Canal de la Robine recréant une forme qu'il est possible de décrire comme un "delta anthropique" (Del Grande et al., 2002; Fan et al., 2019; Maselli & Trincardi, 2013).

Les prélèvements sur le Canal de la Robine, qui emprunte un réseau hydrographique dense de canaux agricoles, visent à submerger les parcelles agricoles. Ces prélèvements et cette redistribution peuvent être vus comme une continuation du fonctionnement hydrologique antérieur de la Basse Plaine. Auparavant, les inondations "naturelles" provoquées par les crues de l'Aude ont été remplacées aujourd'hui par des apports anthropiques "contrôlés" issus du canal de la Robine, branche anthropique du delta

Sur le thème de la dynamique de la salinité, outre cette progradation des deux derniers millénaires, les estimations de flux d'eau sortants de la basse-plaine vers les étangs salés semblent encore positives. Cette estimation laisse donc penser qu'actuellement, il n'y aurait pas d'intrusion souterraine notable d'eau salée depuis la mer vers les étangs et les eaux des nappes superficielles. Il convient d'être précautionneux avec ce point en regard de la faible valeur estimée du flux annuel sortant et de l'absence d'incertitude quantifiée.

Enfin, établir la trajectoire permet de se demander plus largement si la situation actuelle annonce-t-elle une nouvelle rupture comme évoqué par plusieurs auteurs travaillant sur les zones littorales (Anthony et al., 2014). Trois interrogations peuvent être proposées au regard des résultats présentés.

En premier lieu, les flux souterrains sont en bilan sortants de la plaine vers les étangs mais ces flux sont sous la dépendance des niveaux piézométriques contrôlés par les entrées d'eau dans le système basse-plaine. Or l'évolution de ces entrées est déjà soumise au changement climatique qui montrent un creusement du déficit hydrique climatique, voire une diminution des apports pluviométriques. De même, les entrées liées aux prélèvements par le Canal de la Robine, vont très possiblement se trouver limitées, du fait réglementaire (volumes

prélevables) et du fait de la baisse des débits de l'Aude. Enfin, un terme important des entrées d'eau dans la basse-plaine est constitué par les débordements du fleuve au cours des crues. Il convient donc d'intégrer à la prospective l'évolution de l'occurrence de ces crues et les conditions de débordement du fleuve qui sont aujourd'hui contraintes par les aménagements de lutte contre les inondations.

En second lieu et en lien avec les débordements du cours d'eau, il convient de s'interroger sur la dynamique sédimentaire de la basse-plaine. La trajectoire présentée montre que cette dynamique est un élément fondamental de son évolution. Les apports de sédiments par l'Aude ont provoqué la formation de la basse-plaine, le comblement du port maritime et l'apport de limons favorables à l'installation de l'agriculture. Si ces apports de sédiments s'atténuent drastiquement par diminution des sources en amont du bassin de l'Aude et limitation des crues débordantes du fleuve, le territoire n'entrerait-il pas alors dans une nouvelle phase ?

Enfin, en troisième lieu, la trajectoire suggère que les usages imposent les ouvrages, les aménagements et la stratégie de gestion de la ressource en eau. Cette relation entre usage et ouvrage a, semble-t-il, dans le passé été impulsée successivement par un usage dominant, comme évoqué dans le cas de la séquence décrite précédemment : navigation maritime → navigation fluviale → saliculture → agriculture. Il semble que l'époque actuelle amène donc un nouveau défi, inédit pour ce territoire, dans le sens où cette gestion de la ressource est désormais caractérisée par la nécessité d'une gestion multi-usages pour répondre à des enjeux multiples.

Chapitre 4 : Salinity spatial patterns in Mediterranean coastal areas: The legacy of historical water infrastructures

Science of the Total Environment 899 (2023) 165730

Contents lists available at ScienceDirect

Science of the Total Environment

journal homepage: www.elsevier.com/locate/scitotenv

Salinity spatial patterns in Mediterranean coastal areas: The legacy of historical water infrastructures

L. Marien [a], A. Crabit [a], B. Dewandel [a,b], B. Ladouche [b], P. Fleury [b], S. Follain [c], J. Cavero [d], V. Berteloot [a], F. Colin [a,*]

[a] G-EAU, University of Montpellier, INRAE, Institut Agro, CIRAD, IRD, AgroParisTech, Montpellier, France
[b] BRGM, Univ Montpellier, Montpellier, France
[c] Agroécologie, Institut Agro Dijon, INRAe, Univ. Bourgogne, Univ. Bourgogne Franche-Comté, 21000 Dijon, France
[d] CNRS, FR 3747, Maison de l'Orient et de la Méditerranée, Lyon, France

ARTICLE INFO

Editor: Jay Gan

Keywords:
Freshwater availability
Soil fertility
Anthropogenic structures
Geochemical signature
Ancient ponds
Salt works

ABSTRACT

Mediterranean coastal areas have been occupied and developed intensively for a long time facing issues related to agricultural production, urbanization, tourism, preservation of natural resources often linked to salinity. This article explores the relationship between historical land planning and water management, and current soil and water salinity to gain insights into future projections.

Soil samples (1185) were collected in a coastal plain of 114 km^2 in the south of France and saturated paste extract Electrical Conductivity (EC_{sp}) was deduced from 1:5 dilution. Soil salinity exhibits a wide range of variation (from 0.54 to 113.1 mS cm^{-1}) and spatial patterns. EC_{sp} is significantly different among soil types, higher at depth than at the surface and influenced by the distance to ancient water infrastructures (Pettitt test). Surface water and shallow groundwater samples were collected for trace element concentrations and Oxygen ($^{18}O/^{16}O$) isotope ratio measurements. The geochemical signatures indicate a mixture between surface freshwater and seawater, reveal the presence of over-salted seawater and a stratification of salinity from the surface to the depth.

Results suggest that groundwater is the source of soil salinity, and illustrate the long-term impact of old water infrastructures. Less saline soils are found near the freshwater supply channel (constructed from 15th to 18th), while more saline soils are located near drainage channels. The presence of over-salted water reflects temporal evolution of the plain over the last few centuries (initially under seawater, gradually filled in, presence of ponds and salt works that have now disappeared). The current soil salinity patches continue to be a visible reminder of this evolution. The trend towards desalinization of the plain over the last few centuries has been made possible by massive freshwater inflows, which are now under threat due to the general decrease of water resources availability.

1. Introduction

Soil salinization is a process of soil degradation from natural or anthropogenic origins that leads to an increase in accumulation of soluble salts, which seriously affects agricultural productivity and environmental sustainability, and may ultimately lead to desertification and the abandonment of affected land. Salinity referring to the concentration of soil soluble-salts, mainly in the form of chlorides, sulfates, sodium, calcium and magnesium (Shrestha, 2006) affects soil aggregate stability and associated functions (Six et al., 2004; Bless et al., 2022). Salinity reduces water availability for plants by increasing osmotic, ionic and oxidative stress (Munns and Tester, 2008; Rengasamy, 2010). This leads to a gradient of situations ranging from reduced plant productivity to plant death (Epstein, 1980; Feinerman and Yaron, 1982; Li et al., 2012; Maas and Hoffman, 1977). Salt-affected soils occur in >100 countries worldwide and are generally found in arid and semi-arid climatic zones (Szabolcs, 1985; Szabolcs, 1989; Martinez-Beltran and Manzur, 2005; Rengasamy, 2006). In Europe, soil salinity affects approximately 3.8 million hectares of land (Jones et al., 2012; Tóth et al., 2008), with coastal regions in southern Europe particularly facing especially severe

* Corresponding author.
E-mail address: francois.colin@supagro.fr (F. Colin).

https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165730
Received 9 May 2023; Received in revised form 17 July 2023; Accepted 20 July 2023
Available online 24 July 2023
0048-9697/© 2023 Elsevier B.V. All rights reserved.

agricultural challenges due to salinization (Daliakopoulos et al., 2016).

The coastal zone is an interface between land and sea, where the risk of seawater intrusions (historical or current) can induce the migration of salts to inland soils (Yu et al., 2014). As indicated in recent review articles, coastal areas concentrate many issues related to water resources (Tramblay et al., 2020), soil resource (Ferreira et al., 2022), agricultural production (Jacobsen et al., 2012), remarkable natural spaces (Erostate et al., 2020; Martínez-Megías and Rico, 2022), urbanization and tourism (Mejjad et al., 2022). Preserving and developing these areas requires a balancing act between water demand and the availability of water and soil resources to satisfy the various uses. This equilibrium must be carried out under conditions of global change (García-Ruiz et al., 2011; Linares et al., 2020) and may be complicated by salinity conditions (Corwin, 2021).

The regional scale is the appropriate scale for managing the different natural resources in the coastal areas, not in a silo-based way, but in an integrated way (Álvarez-Romero et al., 2011). An in-depth understanding of the spatial patterns of soil salinity and its driving factors is then needed for effective integrated management of salinization in these regions. However, soil salinity is a particularly difficult property to assess in the field, as it varies greatly in space and time (Corwin and Scudiero, 2019). Mapping and monitoring its spatial variability is therefore a real challenge because of the dynamic nature of the processes involved in the salinization phenomenon. The necessary tools for assessing salinity of the root zone at the regional scale have only recently reached maturity, and are now based on the complementarity of approaches (Corwin and Scudiero, 2019; Farifteh et al., 2006): soil sampling, GIS, vegetation indices, geophysical techniques involving proximal and remote sensors, solute transport models. However, all these methods have been faced with different types of challenges (Ren et al., 2019; Shahid and Rahman, 2010). If the traditional soil-sampling method is time-consuming, it is still the one considered as the most convincing way to obtain the soil salinity in depth, space and time by measuring the electrical conductivity on saturated paste extract. Remote sensing methods can also be used to quantify soil salinity at the surface and over large spatial areas, based on the spectrum of salinized soil. However, they can be hampered by image quality problems and are unable to quantify salinity at depth (Metternicht and Zinck, 2003). Geophysical techniques, notably electromagnetic induction, provide depth-integrated apparent conductivity values (Lesch et al., 1998; Akramkhanov et al., 2011). Inversion of this apparent conductivity using data from soil samples collected in the field provides information on salinity. Spatial distribution estimates of salinity are often reported to perform well at plot scale (Doolittle and Brevik, 2014). However, inversion of apparent conductivity is often difficult at regional scale, as it requires knowledge of all the factors influencing the signal, such as moisture, clay content, mineralogical nature of clays or the level of soil compaction (Saey et al., 2009; Heil and Schmidhalter, 2017; Nagra et al., 2017; Brevik et al., 2006).

Whatever the technique used to estimate salinity patterns at regional level, it is essential to understand the factors that explain this salinity. Daliakopoulos et al. (2016), highlights that numerous studies have already shown that the spatial variation of soil salinity can be considerably regulated by natural factors such as physical/chemical weathering and transport from parent material, geological deposits, groundwater, current or historical submergence of the soil by seawater, topography, climate and hydrological conditions. Soil salts can then be transported and redistributed with soil water, groundwater and irrigation water across landscapes. In addition, several authors also show the importance of taking anthropogenic factors into account to explain the salinization/desalinisation processes. (Yu et al., 2014; Ondrasek and Rengel, 2021; Bless et al., 2018). Lot of studies examine the impact of human activities through the prism of irrigation practices (Zhang et al., 2014; Ren et al., 2019; Qi et al., 2018) in arid/semi-arid climate or rainwater lenses dynamics in temperate oceanic climate (de Louw et al., 2011, 2013), but very few study the effect of historical hydro-agricultural structures on salinity patterns at regional scale. Because of their historical location, these structures can play an important role in the long-term dynamics of salinity by impacting salinization processes. Mediterranean coastal landscapes are particularly at the center of this questioning because they have been occupied and managed for a long time. Since ancient times, land use patterns and hydro-agricultural management have changed significantly and interfered with water and soil (Gibling, 2018; Pieruccini et al., 2021; Wilkinson, 2005) and thus with the processes that cause salinity. While the current concern is to adapt Mediterranean coastal areas to climate change, it is crucial to analyze the impacts of past land and water management on current salinity conditions.

This article aims to analyze the spatial patterns of soil salinity and surface and groundwater quality in relation to historical water management and land planning in a Mediterranean coastal landscape. The hypothesis tested in this article is that, in the long term, historical water management structures may have played an important role in explaining current soil salinity patterns at regional scale. The role of water supply and drainage channels is addressed in particular by seeking to characterize the distance of influence of old freshwater supply and drainage canals. The chosen study site shows a long history of land use and allows to discuss the consequences of long-term landscape management on water and soil salinity and the implications for the future in a climate change context.

2. Study site

The selected study area located in the department of Aude, in the south of France, includes the city of Narbonne and covers an area of 114 km^2. It is the part of a low plains corresponding to the deltaic zone of the former southern branch of the Aude River. It is bounded to the North by the Aude River, to the South by the Mediterranean sea, ponds and lagoons, in the western part by the Corbières hills (maximum elevation 248 m a.s.l.) and to the east by the Clape massif (maximum elevation 214 m a.s.l.) (Fig. 1A).

2.1. Geological and soils characteristics

The main stages of the geological history of the Narbonne coastline are part of the formation of the Gulf of Lion during the Tertiary era (Ambert, 1994; Guennoc et al., 2000). For nearly 10,000 years, the Narbonne coast has undergone a very important geomorphological evolution, changing from a ria to a lagoon under the combined influence of a rise in sea level and the process of progradation resulting from the sedimentary contributions of the Aude (André and Ambert, 1998; Guilaine, 1995). The structure of the Narbonnaise plain results from the filling of two rias during the Holocene era, identified below as the South and East branches (Salel, 2018). The bedrock of the basin is composed of blue marls from the Miocene (Helvetian, −11-16 Ma). These formations were eroded during the last glacial period and now form the base of this sedimentary basin. After the ice age, the sea level rose and rias were filled in.

The course of the Aude in its deltaic zone was N-S 10,000 years ago following the ria of the southern branch. This area was then protected behind the Clape massif and an arm of the sea penetrated quite far inland. It was the same for the Eastern branch, with an ingress of the sea that rushed to the North of the Clape massif. Over the past two millennia, increased human activity has led to an intensification of agriculture and grazing. The important deforestation which resulted generated a strong erosion on the Aude basin and contributed to a massive sedimentary contribution. This contribution finished filling the South Branch in <1000 years, with several meters of alluvial sediments of fluvio-palustral origins which were deposited in the plain, deviating the direction of the river in the early 14th century to give it an *E*-W orientation comparable to the current one (Larguier, 2018). The lower Aude plain is then formed of ancient quaternary alluvium near the Clape

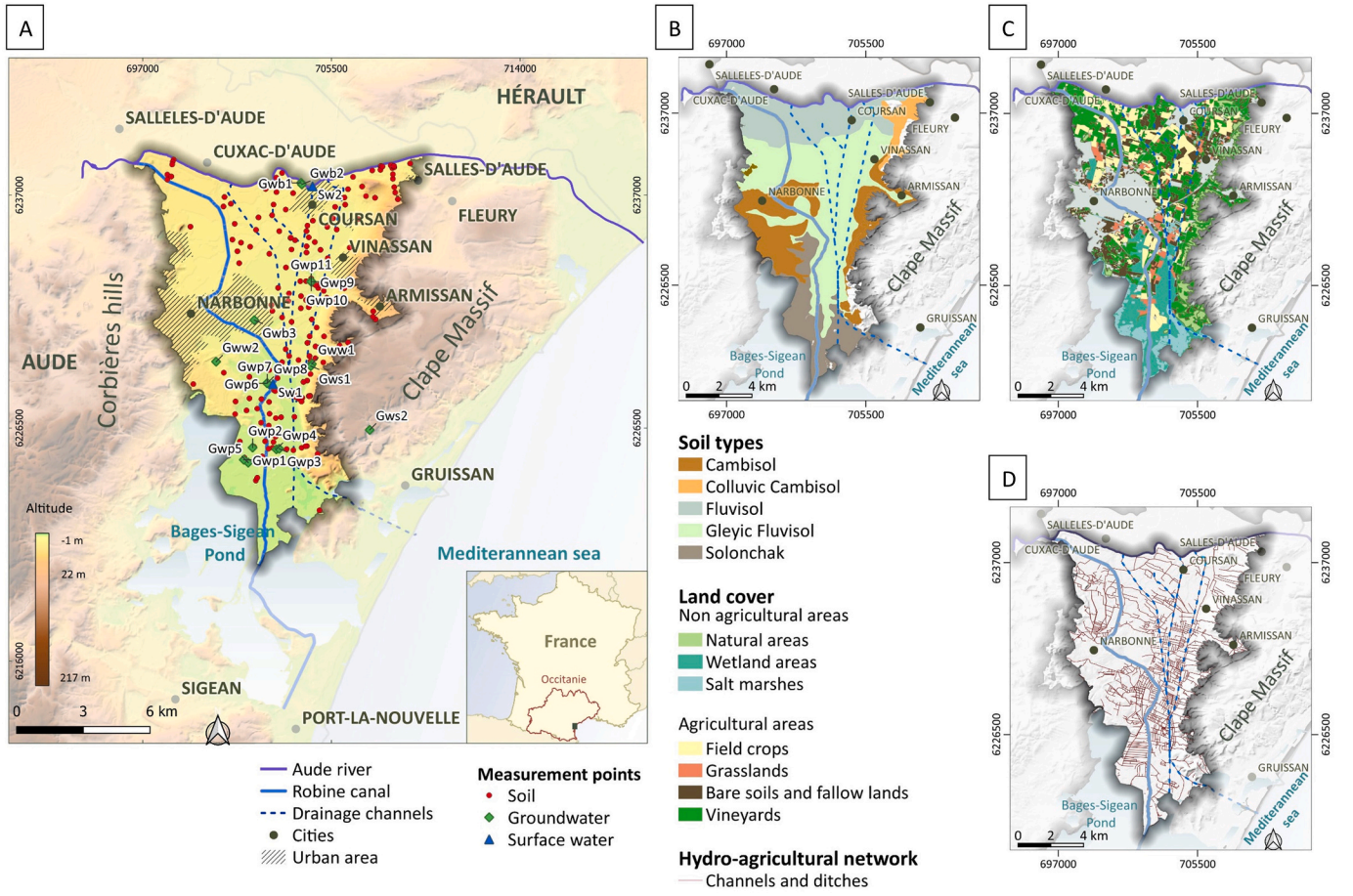


Fig. 1. Study site maps (A) sampled points, (B) soil types, (C) land cover and (D) hydro-agricultural network.

massif and more recent one in the plain. Today, the Aude flows North of the Clape massif before reaching the sea.

Consequently, the study area is today essentially composed of a topographically flat sedimentary basin. The northern part of the area is composed of recent alluvial sediments dating from the Quaternary period and originating from sediment transport by the Aude River. At the edge of the study area, the relief is characterized by higher elevations, related to older alluvial and colluvial sediments. In the southern part, near the present Bages-Sigean pond, the alluvial deposits are substituted by fluvial and lacustrine deposits.

By combining the BRGM geological map at a 1:50,000 scale (Lespinasse et al., 1982), the INRA soil landscape map of the Aude at a 1:250,000 scale (Barthès et al., 1999), and data from 393 auger bores at depths of 0–20 cm, 30–40 cm, 70–90 cm, and 90–120 cm, with recorded properties such as Munsell color, texture (using the FAO method), hydromorphy, HCl test, $EC_{1:5}$, pH, Na^{+}, and Ca^{2+}, a detailed soil map was elaborated (Fig. 1B). The main characteristics of the five dominant soil types (WRB, 2015) represented in the study area are (see also Table 1):

- Soil 1: Calcaric Cambisol developed in the current alluvial deposits and located at relief footslope positions with elevation ranging from 10 to 20 m a.s.l. and classified as Cambisol. This soil unit represents 20 % of the study area;
- Soil 2: Colluvic Cambisol mainly located in the northeastern part of the study area, with elevations ranging from 20 to 50 m a.s.l.,

Table 1
Main characteristics of the five soil types.

Soil Units (WRB, 2015)	Depth (cm)	Clay (%)	Silt (%)	Sand (%)	pH (H_2O)	CEC (me/100 g)	Sum cations (me/100 g)	ESP (%)	EC (mS cm^{-1})
Soil 1: Calcaric Cambisol									
	0–40	16	40	44	7.98	8.91	12.7	0	0.60
Soil 2: Colluvic Cambisol									
	0–40	11	11	78	8.00	5.07	7.83	0	0.64
Soil 3: Fluvisol									
	0–40	18	56	26	7.87	9.52	11.4	3	0.87
	90–120	17	60	23	8.00	8.72	12.2	1	1.19
Soil 4: Gleyic Fluvisol									
	0–40	31	58	11	7.97	15.75	18.2	6	2.53
	90–120	20	53	27	8.21	9.29	13.1	23	7.02
Soil 5: Solonchak									
	0–40	39	55	6	7.78	21.08	27.5	25	14.4
	90–120	27	51	22	8.28	13.40	26.0	38	22.07

characterized by a shallow soil depth (<80 cm). This soil unit represents 4 % of the study area;
- Soil 3: Fluvisol located in the northern part of the study area, in recent alluvial deposits from the Aude river at a medium elevation (5–10 m a.s.l.). They are characterized by medium to high soil depth (>1.2 m) and exhibit temporary waterlogging within the first meter soil depth. This soil unit represents 21 % of the study area;
- Soil 4: Gleyic Fluvisol located in the central and low elevation part of the study area (<5 m a.s.l.) and characterized by permanent waterlogging whatever the soil depth. It is the dominant soil unit, representing 40 % of the study area;
- Soil 5: Solonchaks located at the edges of the present pond (Bages-Sigean) formed on lacustrine deposits, rarely cultivated. They are characterized by a high electrical conductivity of saturated paste (>4 mS cm^{-1}) and an ESP (Exchangeable Sodium Percentage) may exceed 15 % and permanent waterlogging at low depth. They represent 14 % of the study area.

2.2. Agriculture, natural areas and water management

The land use established in 2018 is composed of 24 % of vineyards, 14 % of wasteland, 4 % of grasslands, 18 % of field crops, 18 % of natural areas and 22 % of urbanized areas (Fig. 1C). The urban areas have been growing rapidly over the last 50 years. The natural areas, which are mostly protected, include Mediterranean scrubland in the higher elevations, wetlands and salt marshes in the lower elevations. Vines are the main land use and have been present in the area for a long time. Introduced by Greek settlers around 600 BCE in Marseille, viticulture was initially limited to southern Gaul during the Iron Age (Boissinot, 2001; Collin Bouffier, 2009). Viticulture then spread to Languedoc and particularly to the province of Gallia Narbonensis after the Roman conquest around 118 BCE (Bernigaud et al., 2021). During the first millennium CE, Narbonne was the capital of the Roman province Gallia Narbonensis, one of the largest port cities in the northwest Mediterranean (Faïsse et al., 2018). As related by Martínez Ferreras et al. (2013), the city of Narbonne, then capital of the province of Narbonensis, played a very important role in the commercial redistribution of Tarraconensis wine (one of the three roman provinces in Hispania) to other regions of the Empire. Later, from the 9th century to the 16th century, if wine production was still important (Larguier, 1996), the salty land in this area was also exploited in the form of salt ponds for the production of salt. Salt then became one of the most characteristic products of the medieval Mediterranean economy (Dupont, 1958). The use of ancient data in geography allowed to study the paleogeography of Narbonne's ponds. Based on the georeferencing of ancient maps published since the early 18th century, and extensive work in archaeology, Cavero (2010) suggests a representation of the historical contours of the ancient salt ponds located in the study area.

The production of salt coincided with the onset of significant drainage operations in the plain, leading to the construction of large canals that are still visible on the map D in Fig. 1. This land drainage progress was instrumental in establishing and diversifying agriculture. The Robine canal, built over several centuries from the 15th to the 18th century, serves as a navigable waterway and a source of freshwater for the lowlands. It runs along the former course of the southern branch of the Aude river and flows into the Bages-Sigean pond (Ambert, 1993). This canal supplies a network of channels and ditches, as depicted in map D of Fig. 1. The water is managed collectively by Authorized Syndical Associations (Dallmayr, 1961) and allows for artificial flooding (Alaghmand et al., 2016). This practice is water-intensive as it requires about 300 mm one to three times a year. During the winter, water is supplied for several days on the plots and then drained via artificial subsurface and open drainage networks to downstream ponds and lagoons, which serve as the general outlet of the network. The primary objective of these winter inputs is the soil desalinization through leaching. Water can be reapplied in the spring to fight against freezing of the vineyards and replenish the soil's water content before the vineyards' budburst. A third application can be made at the beginning of summer to prevent water stress in crops. Some of the natural areas on the plain have taken place over formerly cultivated areas, particularly around the ponds and lagoons. The hydro-agricultural networks' maintenance ensures that water is added to these natural areas to promote variously saline grasslands and reed beds, serving as a refuge for numerous animal species.

3. Materials and methods

3.1. Soil measurements

Soil sampling was done randomly, taking into account the accessibility of the plots and ensuring that all soil types were well represented. Soil samples ($N = 1185$) were collected at 289 locations, at different depths (0–120 cm) using an auger during two different periods: dry season (end of September) and wet season (April–May) from 2018 to 2022 (Fig. 1A). Each auger survey was conducted in accordance with FAO rules for soil description (Jahn et al., 2006). All soil samples were air-dried and measured for $EC_{1/5}$ according to the U.S. Salinity Laboratory protocol (Rhoades et al., 1999).

Soil salinity was estimated by measuring the electrical conductivity (EC), which is determined by the electrical conductivity of the saturated paste extract (EC_{sp}) and total dissolved salts, as calculated by Richards' equation (Richards et al., 1954). To analyze a large number of samples, EC measurements were conducted on soil solution extracts diluted in demineralized water at a 1:5 ratio ($EC_{1:5}$). The soil samples were treated using the United States Salinity Laboratory protocol (Rhoades et al., 1999), and $EC_{1:5}$ was measured using a conductivity meter (WTW model 2CA301 Cond 3310).

Soil salinity is often estimated using the electrical conductivity of soil saturated paste extract (EC_{sp}). However, this method can be time-consuming and laborious. As a result, alternative methods that involve different soil/water ratios, such as 1:5 ($EC_{1:5}$), are often used to estimate the EC_{sp} (Kargas et al., 2022). These alternative methods are generally faster and easier to implement. As highlighted by Sonmez et al. (2008), the findings revealed a strong correlation between the values of electrical conductivity measured in saturated paste extracts and those measured in extracts of varying soil to water ratios. A specified relationship between EC_{sp} and $EC_{1:5}$ was then established for the study area, considering EC_{sp} and $EC_{1:5}$ on 32 subsamples (16 points at two different depths), both measured at the CIRAD laboratory in Montpellier. The specific relationship ($R2 = 0.98$) found was:

$$EC_{sp} = 11.35\ EC_{1:5} \quad (1)$$

Laboratory analysis was done on 32 subsamples in order to quantify the main characteristics of the five soil types and the results are given in Table 1.

Inverse Distance Weighted (IDW) method was employed for interpolating Electrical Conductivity with the power value $p = 4$, at a resolution of 20 m. Two visual representations were generated, one for the spatial distribution of surface salinity data (0-40 cm) and the other for depth salinity (90-120 cm).

The study involved three levels of statistical analysis: i) the variability of the salinity in the soil profile was examined by comparing EC_{sp} at the surface and EC_{sp} at depth using non-parametric one-way ANOVA test (Kruskal Wallis); ii) the spatial distribution of salinity across the study area was analyzed in relation to the various soil types encountered, by comparing EC_{sp} with soil types using both one-way and pairwise comparison tests (Kruskal Wallis and Wilcoxon); iii) the impact of anthropogenic structures on salinity was investigated by comparing EC_{sp} with the distance to the Robine canal and EC_{sp} with the distance to drainage channels.

An important issue was to delineate the zone of influence of anthropogenic structures e.g. Robine canal, drainage channels, and to

quantify their respective impacts on soil salinity in order to answer the question of whether conductivity increases or decreases with distance from this structure. For this purpose, a statistical analysis based on spatial soil electrical conductivity dataset and a statistical method for analyzing points of change in a continuous series of points, was performed. As defined by Chandler and Scott (2011), a change point can be defined as a point in series when any parameter of the data distribution (mean, median, variance) undergoes an abrupt change. Pettitt test is a non-parametric test derived from the Mann-Whitney test to find a single change point in the mean of a series and returns a *p*-value for the change point (Pettitt, 1979; Pohlert, 2023). The non-parametric Pettitt test is robust to outliers and skewed distributions (Sagarika et al., 2014), usually used for evaluating the occurrence of abrupt changes in climatic records (Gao et al., 2011; Verstraeten et al., 2006; Zhang and Lu, 2009) and hydroclimatological studies (Conte et al., 2019). It applies to non-stationary data sets with at least 3 data and a non-normal distribution. To detect a change point in our dataset, we then applied Pettitt's test. In this analysis, the variable under consideration is the electrical conductivity of the saturated paste extract, while time was substituted by the minimum euclidean distance of the point from the anthropogenic structure being analyzed.

The statistical analysis focuses on the soils with the highest salinity (Fluvisol, Gleyic Fluvisol and Solonchak) and does not include the least saline soils 1 and 2. The minimum distance between the measurement points and the anthropogenic structures, including the Robine canal and drainage channels, were calculated using QGIS and statistical tests were realized using R Software.

3.2. Water measurements

Water samples were collected in early summer for the years 2021 and 2022 in 14 locations for groundwater and 2 locations for surface water (Robine canal Sw1, and Aude river Sw2). Among the 14 groundwater sampling locations, 3 locations are boreholes (Gwb1, Gwb2, Gwb3), 2 are wells (Gww1, Gww2), 2 are springs (Gws1, Gws2), 5 are shallow piezometers (between 2 and 4 m depth, Gwp1 to Gwp5) and 2 are locations where piezometers have been installed at 3 depths (2, 4 and 8 m depth, Gwp6 to Gwp8 and Gwp9 to Gwp11).

Water samples for major and trace element analysis were filtered on-site with a 0.45 μm PVDF filter. Chemical analyses were performed in the HydroSciences Montpellier laboratory at the University of Montpellier. Major ions were analyzed by ion chromatography (ICS 1000 Dionex®, precision error is $< \pm 5$ %). Oxygen ($^{18}O/^{16}O$) isotope ratio measurements were performed at BRGM Laboratories by gas equilibration method (CO_2) using a Finnigan MAT 252 mass spectrometer. Results are expressed in parts per thousand (i.e. ‰) in the familiar δ notation relative to the Vienna Standard Mean Ocean Water (SMOW) standard, where $\delta = ([Rsample/Rstandard - 1] \times 1000)$, the uncertainty of measurement for oxygen 18 is ±0.1 ‰.

The examination of the relationships between the ions and trace elements and the chloride contents by the binary diagrams made it possible to characterize the geochemical context of the study area. Geochemical signature of groundwater has been compared to values measured in Mediterranean sea (Petelet-Giraud et al., 2016). Geochemical signatures were used to compare the different types of water (e.g., freshwater of different origins and Mediterranean seawater (Petelet-Giraud et al., 2016)) and their mixing conditions. A binary diagram showing the $\delta^{18}O$ values and chloride concentrations was built to position the water samples and curves that represent different mixing conditions between river freshwater and seawater or seawater that has undergone an evaporation process with concentration factors (F) between 4 and 10.

4. Results

4.1. Soil salinity pattern

Maps of soil salinity with depth produced with the IDW method are shown in Fig. 2. Overall salinity is higher in the South of the study area. However, the patterns do not show a systematic increase in values with proximity to the present ponds connected to the sea. Salinity patches appear in the north of the area near the town of Vinassan, several kilometers from the present sea coastline. Striped patterns of salinity are also visible. Lower values appear near the Robine canal and higher values near the drainage channels in their downstream part. Salinity values increase with soil depth and adopt similar spatial patterns whatever the considered soil depth.

The Kruskal Wallis test highlights that soil salinity of the 0–40 cm top layer is significantly different than soils salinity of the 90–120 cm deeper layer (*p*-value = 0.0016), with EC_{sp} mean values equal to 6.76 and 10.2 mS cm^{-1} respectively. When analyzing the difference in salinity between surface and depth by soil type, this trend is also found for Gleyic Fluvisols (p-value = 0.0064).

According to Table 2, the descriptive statistics for soil salinity indicate that the results vary depending on the soil type. Solonchaks are, as expected, much more saline than the other types of soil (mean EC_{sp} = 27.7 mS cm^{-1}). These soils closest to the coastline are constituted with fine-textured alluvial deposits in lacustrine or fluvio-lacustrine paleoenvironmental conditions. The Gleyic Fluvisol and Solonchack exhibit the highest range of salinity values among the studied soils, with the minimum and maximum values ranging from 0.54 to 98.72 mS cm^{-1} and 2.36 to 113.43 mS cm^{-1}, respectively. Moreover, the standard deviation of these soils is also considerably high, at 10.79 mS cm^{-1} and 19.96 mS cm^{-1}, respectively. The statistical analysis using the Wilcoxon test indicates a significant difference (*p*-value <0.05) between these two soil types and the other three, highlighting their distinctiveness. The Colluvic Cambisols have the lowest salinity, with a mean electrical conductivity (Ec_{sp}) of 2.34 mS cm^{-1}. These soils are developed on sloping faces of the Clape massif.

Table 3 shows that the Robine canal has a substantial decreasing effect on the salinity levels observed across the three soil types: Fluvisol, Gleyic Fluvisol, and Solonchak. The salinity levels decrease with spatial proximity to the Robine canal. The impact of the Robine canal on soil salinity across the entire soil profile is substantial and statistically significant (p-value <0.05), particularly in the most saline soil types (Solonchak and Gleyic Fluvisol). Salinity levels in Solonchak range from 14.3 to 34.88 mS cm^{-1}, while those in Gleyic Fluvisol range from 5.09 to 12.33 mS cm^{-1}. The results also suggest that this effect is comparatively weaker in the least saline soil (Fluvisol), where the electrical conductivity values range from 2.38 mS cm^{-1} to 3.43 mS cm^{-1} throughout the soil profile. When considering soil salinity of the entire soil profile, the distance of influence of the Robine canal is then estimated to 437 m and 560 m for the Gleyic Fluvisol and Solonchak respectively. When looking at the results by separating the two depths, Pettitt test shows that salinity decreases with proximity to the Robine Canal for Gleyic Fluvisol with a change point between 208 and 285 m for the surface samples and between 431 and 544 m for the deep samples.

According to Table 3, there is a significant increasing effect near drainage channels, which is particularly evident when analyzing the salinity levels across the entire soil profile for Gleyic Fluvisol. The mean salinity level decreased by almost half between the points before and after the change point (10.84 to 5.80 mS cm^{-1}), indicating a considerable impact on soil salinity. The effect appears to be limited to the deepest layers of the soil, as evidenced by the significant results of the Pettitt test (p-value = $4.89e^{-3}$) for the deep samples (90–120 cm), while the surface samples (0–40 cm) showed no significant effect (p-value = $4.09e^{-1}$). Results from the Pettitt test show that the estimated distance of influence for Gleyic Fluvisol on the overall soil salinity profile due to the drainage channels is approximately 450 m. The lack of data for

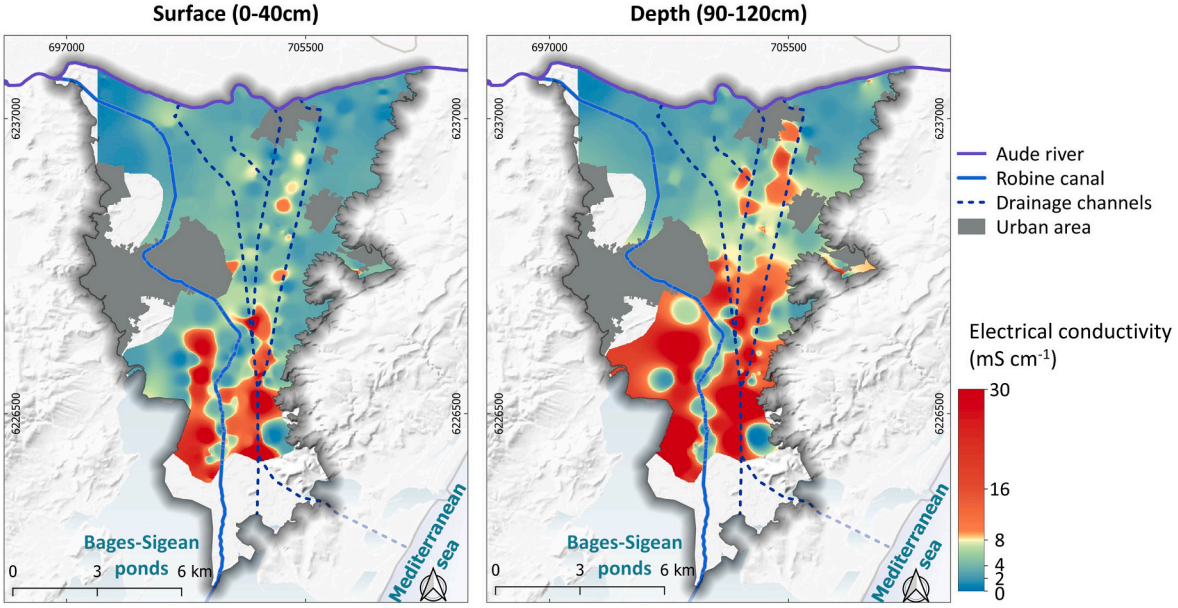


Fig. 2. Soil salinity interpolation using the Inverse Distance Weight method (IDW).

Solonchaks has made it impossible to estimate the impact of drainage channel distance on its soil salinity. Regardless, since this type of soil is already highly saline, the concentration effect would have been less pronounced.

4.2. Water quality

The concentrations of chlorides and bromides locally present higher values than those of seawater (Fig. 3A) which indicates that the waters of marine origin have undergone phenomena of evaporation. The evaporation of seawater initially leads to enriching the water with dissolved ions and the $\delta^{18}O$ signature of residual seawater until the concentration factor (F) reaches approximately 4, which globally corresponds to the beginning of the precipitation of anhydrite (gypsum) and celestite (Fontes and Matray, 1993). According to Holser et al. (1979), the precipitation of anhydrite (gypsum) is also accompanied by a slight depletion of the isotopic signature ($\delta^{18}O$) of the evaporated residual seawater. The Cl/Br ratio in the residual seawater remains stable during the precipitation of calcite and anhydrite (gypsum). It starts to decrease when halite precipitates when F reaches 10. Surface water (Robine canal, Aude river) represents the first freshwater end-member that recharges the alluvial aquifer. Groundwater of the Clape massif karstic system represents the second freshwater end member that can recharge the aquifer formation of the alluvial plain. Several end members for evaporated seawater trapped in alluvial plain have been defined depending on whether the seawater has undergone evaporation or not (Fig. 3B).

The bromide and chloride concentrations plotted in Fig. 3A show a linear alignment of points on a mixing line between freshwater and seawater. It is possible to distinguish between freshwater (chloride concentration < 1 g L^{-1}), brackish water (chloride concentration between 1 and 10 g L^{-1}), saltwater (chloride concentration between 10 and 35 g L^{-1}), and over-saltwater (chloride concentration > 35 g L^{-1}). Freshwaters include surface water samples (Sw1, Sw2), water samples from boreholes in the alluvial aquifer of the Aude river (Gwb1, Gwb2, Gwb3), water samples from springs in connection with the limestone karstic Clape massif (Gws1, Gws2), water samples from shallow wells (Gww1, Gww2) and from shallow piezometers (Gwp6, Gwp9 placed at 2 m depth). For the shallow wells and piezometers Gwp6 and Gwp9, the geochemical signature is strongly influenced by nearby artificial flooding practices. Brackish water includes samples from the deeper piezometers (4 m and 8 m depth) installed at two locations (Gwp7, Gwp8 and Gwp10, Gwp11). For these two corresponding locations, a stratification of salinity is observed that increases with the depth of the piezometers and a geochemical signature that indicates a mixture evolving from freshwater to saltwater. The salty and over salty waters include samples Gwp1 to Gwp5 and indicate the presence of seawater in the groundwater that must have undergone evaporation (Fig. 3A and B).

The results indicate the presence of over-salted water in the subsurface layers for all piezometers with brackish and salty water in addition to piezometers Gwp1 and Gwp5. In this case, the concentration factor of the evaporated seawater is between 5.8 and 10. For these samples, the percentage of mixing is between 0.5 % for Gwp10 (which is now at the boundary between fresh and brackish water) and 30 % for Gwp1 (which is now still in an over-salted condition). These results therefore indicate that the saltier groundwater contains a percentage of formerly over-salted seawater that has been diluted over time.

5. Discussion

5.1. Soil salinity assessment at regional scale

The many studies on salinity show a wide variety of measurement protocols. At regional scale, spatial distribution of the salinity is very often estimated from soil samples taken from the surface over one or more seasons (i.e. Yu et al., 2014; Chi et al., 2019), sometimes at several depths over long periods of time (i.e. from national surveys over decades as in Taghizadeh-Mehrjardi et al. (2021), but rarely including the saturated zone. In this article, soils were sampled regularly with depth (0 to 120 cm) down to horizons in contact with a saturated zone. The first advantage of such a protocol is that it enables understanding of rooting conditions and associated constraints for vegetation (Munns et al., 2020). The second interest was to characterize soil/subsoil interactions to understand whether the origin of salts is underground (and therefore potentially influenced by sea levels in coastal areas) or comes from the concentration of salts on the soil surface as presented in Amiaud et al. (1998), with few measurement points, in the French Poitevin salt marsh.

Soil and water salinity is highly variable over the study area and increases with depth (see Fig. 2). This observation confirms that the general origin of salinity is from the subsurface compartment. The salinity is partially mitigated on the surface by water supply practices that, to a certain extent, allows root development but remains limited by

Table 2
Descriptive statistics of EC_{sp} per soil type.

Soil Units (WRB, 2015)	Soil Profil [0-120 cm] Ec_{sp} (mS cm^{-1})							Soil Surface [0-40 cm] Ec_{sp} (mS cm^{-1})							Soil Depth [90-120 cm] Ec_{sp} (mS cm^{-1})						
	Nb	Moy.	Median	Std.	Min.	Max.	Wilcoxon test	Nb	Moy.	Median	Std.	Min.	Max.	Wilcoxon test	Nb	Moy.	Median	Std.	Min.	Max.	Wilcoxon test
Soil 1: Calcaric Cambisol	68	4.21	3.04	2.88	0.69	22.12	a	24	3.27	3.12	1.58	1.12	9.65	a	9	7.49	6.33	6.60	2.05	21.0	ab
Soil 2: Colluvic Cambisol	24	2.34	2.22	1.55	0.75	6.91	b	8	2.22	2.04	1.14	0.99	3.92	a	3	2.32	2.43	0.25	2.03	2.51	ab
Soil 3: Fluvisol	153	3.12	3.88	1.89	0.57	16.72	a	40	2.88	3.08	1.15	0.71	6.62	a	32	3.55	2.89	1.90	1.02	11.3	a
Soil 4: Gleyic Fluvisol	377	8.39	4.77	10.79	0.54	98.72	c	101	6.50	4.34	7.16	0.74	46.0	b	81	11.1	5.81	14.5	0.54	98.3	b
Soil 5: Solonchak	53	27.75	25.6	19.96	2.36	113.43	d	15	26.9	25.9	24.1	2.72	102	c	12	26.0	27.0	12.5	6.34	45.2	c

the higher salinity values at depth.

5.2. Long term landscape management impacts on soil and water salinity

Salinity is first spatially structured according to soil formation conditions. The soils formed from the finest material deposits, in brackish or salty lacustrine/lagoon conditions are currently the most saline soils. They are found today near the edges of the present lagoons and are rarely cultivated. Soils formed from the deposition of silty fluvial materials are very variably saline. Gleyic Fluvisol and Fluvisol are very similar soils and are distinguished by the presence of temporary or permanent hydromorphy in the first meter. The Fluvisols, which are higher in elevation and closer to the current river course, are only slightly or not at all saline. The greatest variations in salinity are found on the Gleyic Fluvisols.

The results show that the current salinity is strongly structured in space by long-term water management. The Robine canal reached the southern end of the selected study area at the end of the 17th century from the first constructions dating from the 15th century. This canal, which takes water from the main river (Aude river), was initially intended to serve as a waterway for the transport of goods. Over time, it has been used to transport water for agriculture and desalinization practices by artificial flooding of the plots. Salinity is significantly lower near this canal for all soil types that can have high salinity levels. This can be interpreted as the proximity of the canal making water use easier and therefore desalinization of soils more efficient. It is also possible at the same time that leakage through the canal bed feeds fresh water into the subsurface compartment. It is therefore possible that this deep desalinization of the subsurface compartment reduces the saline pressure on the soils due to capillary rise during dry periods. These results support the need to integrate surface and groundwater interactions to understand soil salinity (Bless et al., 2018). Artificial flooding practices consist of massive water inputs between one and three times per year to a large portion of the plots. These water inputs are then drained through a network of canals to downstream ponds. Near the larger drainage channels, salinity levels are higher. These results suggest a serial movement of salt masses over long times (Duan et al., 2022; Wang et al., 2018).

To further explore the relationship between landscape evolution and current salinity, we can examine the visible patches on the interpolated soil salinity maps. Geochemical analysis of groundwater within these high salinity patches has revealed the mixture between fresh and over-salinity water, a phenomenon that is not observed outside of these patches. Fig. 4 illustrates the overlap of the interpolated salinity patterns with historical maps such as the Etat Major map from 1852 and the Jean Nicolas Bellin map published in 1764 in Cavero (2010). This overlap shows that the salinity patches are situated in areas that were previously ponds in the 19th century or designated as wetlands or swamps in the 18th century.

During the phase of sea recession and the establishment of the plain, salt water may have become isolated in ponds or marshes. The salt content may have become over-concentrated naturally due to the lack of fresh water from upstream or through anthropogenic means, such as the exploitation of these areas by salt works (Descadeillas, 1959; Dupont, 1958). Over time, these over-salted waters could have infiltrated into the groundwater compartment and been diluted by rainwater percolation and artificial flooding of the plots. As a result, higher salinity patches may still exist in the subsoil, contributing to areas of higher soil salinity today.

5.3. Implications for the future land and water management

The insights provided by this work provide perspective on an apparent paradox. The consequences of climate change through increased climatic water deficit and rising sea levels indicate a prospect of increased water and soil salinity problems in the coastal zone (Bless

Table 3
Pettitt test results for EC_{sp} per soil type - with n the number of soil measurements; $\overline{EC_1}$ the average electrical conductivity calculated for points included in the perimeter between the anthropogenic structures and the change point; $\overline{EC_2}$ the average electrical conductivity calculated for all points included in the perimeter between the change point and 2.5 km; *Shift* + indicates that $\overline{EC_2}$ is higher than $\overline{EC_1}$ and - indicates that $\overline{EC_2}$ is lower than $\overline{EC_1}$; D_{min} and D_{max} are the minimum and maximum distance of the change point; p is the p-value of the Pettitt test.

Soil Units (WRB, 2015)	Pettitt Test for change point Distance from Robine canal							Pettitt Test for change point Distance from Drainage Channel						
	n	$\overline{EC_1}$ (*mS cm*$^{-1}$)	D_{min} (*m*)	D_{max} (*m*)	$\overline{EC_2}$ (*mS cm*$^{-1}$)	*Shift*	*p*	*n*	$\overline{EC_1}$ (*mS cm*$^{-1}$)	D_{min} (*m*)	D_{max} (*m*)	$\overline{EC_2}$ (*mS cm*$^{-1}$)	*Shift*	*p*
Soil 3: Fluvisol														
All [0–120 cm]	70	2.38	1387.78	1522.08	3.43	+	$8.99e^{-5}$	124	3.01	925.40	1034.33	3.43	+	$2.79e^{2}$
Surface [0–40 cm]	18	2.36	1387.78	1577.92	3.54	+	$5.59e^{-2}$	28	No change point					$6.56e^{-1}$
Depth [90–120 cm]	11	2.71	1387.78	1577.92	3.47	+	$9.07e^{-2}$	8	No change point					$1.30e^{-1}$
Soil 4: Gleyic Fluvisol														
All [0–120 cm]	268	5.09	431.67	437.53	12.33	++	$1.42e^{-6}$	386	10.84	434.52	445.41	5.80	- -	$2.94e^{-4}$
Surface [0–40 cm]	68	4.24	279.89	285.58	8.57	++	$6.62e^{-2}$	99	No change point					$4.09e^{-1}$
Depth [90–120 cm]	55	5.03	431.67	544.14	16.49	++	$4.09e^{-3}$	76	14.15	510.58	526.35	6.13	- -	$4.89e^{-3}$
Soil 5: Solonchak														
All [0–120 cm]	72	14.30	560.24	560.44	34.88	++	$1.18e^{-8}$							
Surface [0–40 cm]	18	12.03	560.24	560.44	36.85	++	$5.55e^{-3}$							
Depth [90–120 cm]	11	19.15	560.24	560.44	37.23	++	$3.92e^{-2}$	Lack of data						

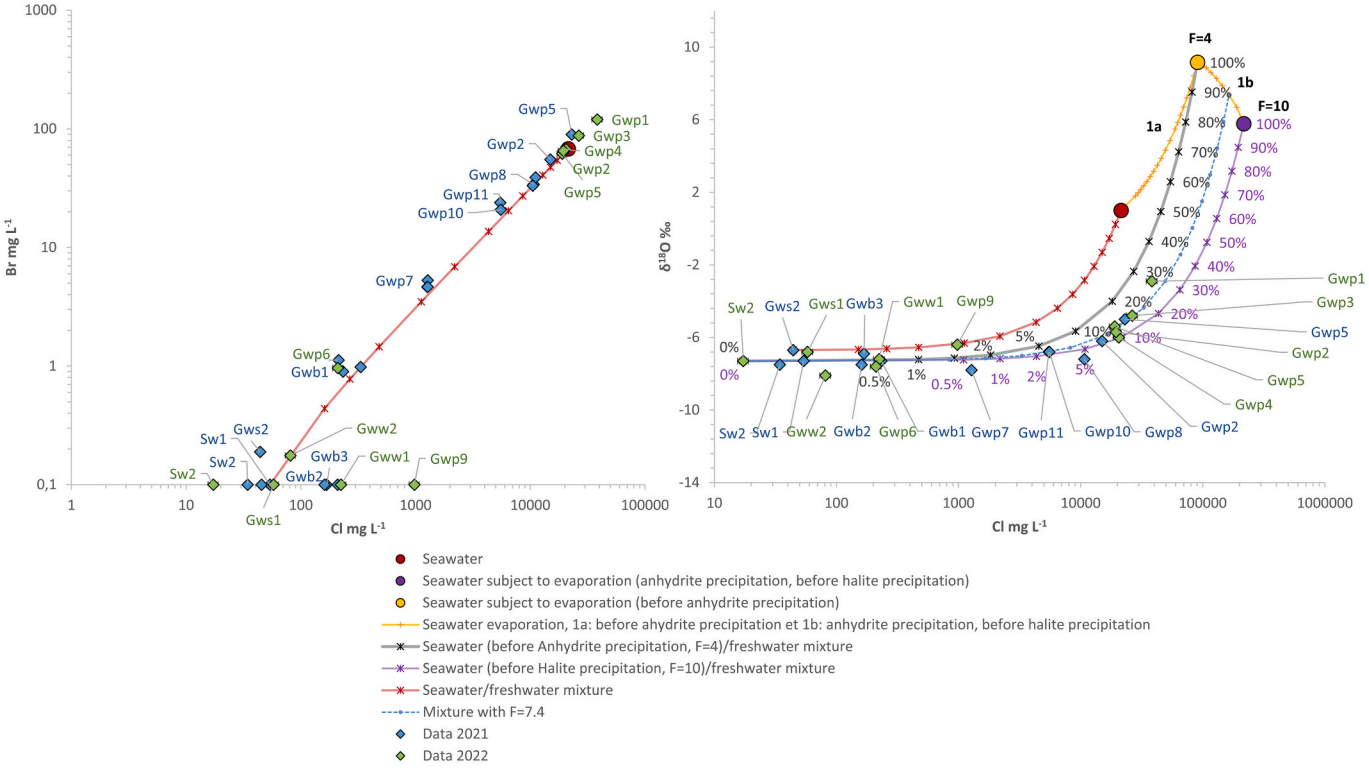


Fig. 3. Binary diagrams bromide vs. chloride (A) and $\delta^{18}O$ vs. chloride (B).

et al., 2018). Long-term perspective shows for this coastal zone that despite the sea level rise since the beginning of the Holocene, the influx of sediments by the river has allowed the establishment of a plain on formerly marine or lagoon areas. It also shows that over the last few centuries, the evolution is that of a global desalinization of water and soil of the plain.

This soil and water desalinization has been made possible in large part by land planning and water management. The freshwater inflow benefits all land uses with (i) agricultural areas, with high value crops such as vineyards and (ii) natural areas with rich and specific environments associated with multiple ecosystem services (*ie* salt marshes, Ermgassen et al., 2021; Himes-Cornell et al., 2018). The current land

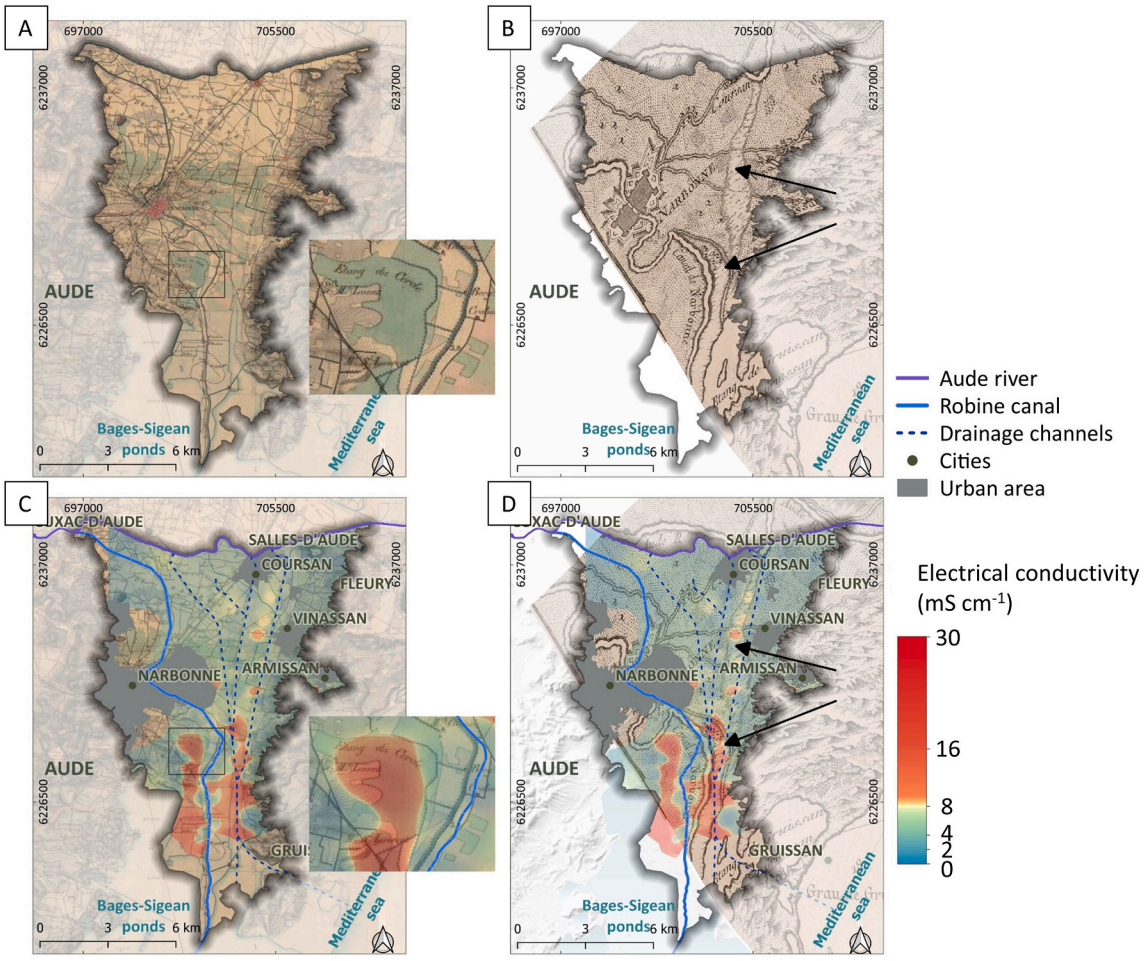


Fig. 4. (A) Etat Major map, surveyed in 1852, Narbonne sheet no. 244, published by the Dépôt de la Guerre in 1860 (Cavero, 2010), (B) Map by Jean Nicolas Bellin published in 1764, taken from the Neptune François, a work intended for navigation, commissioned by Colbert and published by La Favolière in 1693 (Cavero, 2010) (C) overlap of map A and soil surface salinity map and (D) overlap of map B and soil surface salinity map.

management strategy involves the use of large amounts of water for soil desalinization, maintenance of freshwater lens (de Louw et al., 2013) and mitigation of water stress accentuated by the presence of salt in the soil solution (Rengasamy, 2010). This strategy is now very strongly questioned. The water used for artificial flooding practices comes from a withdrawal from a coastal river. The acceptability of this withdrawal depends on the river flows and other competing uses of water (drinking water, water for river aquatic ecosystems, water for coastal marine ecosystems). The European (WFD, 2000), national (LEMA, 2006), and regional (Rhône Méditerranée & Corsica Water Agency policy) regulatory frameworks aim to achieve a quantitative balance between withdrawal and an available resource that is decreasing due to climate change. In this context, the encouragement to reduce withdrawals for agricultural use is very strong. With this issue of trade-offs on the use of water resources, the studied lowland area is probably beginning a new phase of transition as it has experienced in the past.

All Mediterranean coastal areas are concerned in the same way as for the lowland area studied. Adaptation strategies concern an overall reduction in freshwater withdrawals from rivers, concentration of water inputs in priority areas and for priority land uses, management of soils and groundwater levels to limit salinization processes, adaptation of plants (new resistant varieties and new crops) and planning of the spatial organization between natural and cultivated areas. As was done for the study area, a spatialized diagnosis of water and soil salinity is required to make the appropriate strategic choices. Supporting choices for a sustainable transition implies having a metrological logic to evaluate the evolution of water and soil salinity and put it into perspective on different time scales, including long time scales.

6. Conclusion

The current spatial distribution of salinity is mainly inherited from sedimentary processes over the last two millennia and land planning and water management over the last few centuries. In the short term, the soils are subject to salinization processes from salty groundwater through variations in water table levels and capillary rise. In the long term, desalinization is observed by massive use of water inputs. The current spatial patterns ask questions for the future. Stakeholders have therefore to decide where to continue to fight against salinization. In a situation of decreasing available water resources, three directions are emerging: fight against salinization on the whole area with less water, choose to fight on the most impacted areas or, on the contrary, to concentrate desalinization efforts on the areas that are currently the least salty in order to create non-salted patches surrounded by other areas where salinization is accepted. In a way, salinity raises the question of the trade-off between water and soil resources in the medium to long term: is it preferable to use large amounts of water to maintain soil fertility? Or should water use be reduced with the risk of degrading soils and losing agricultural land and the conditions required for diversified coastal ecosystems?

Mediterranean coastal areas are particularly sensitive to climate change and the impacts of water and soil salinization. Salinity has a

strong impact on plant water availability and requires to be mitigated by water inputs. Climate change in the Mediterranean regions already shows a greater interannual variability of precipitation that is concentrated on more extreme events while climatic water deficits are increasing. The consequence is a decrease in the amount of water available for societies and ecosystems. Salinity is therefore a prism that allows to perceive in an accelerated way the impacts of climate change related to the decrease of available water resources. This prism can be particularly interesting to analyze the trajectories of a large number of regions in the world.

CRediT authorship contribution statement

Marien L., Crabit A., Colin F.: Conceptualization, Methodology, Formal analysis , Investigation, Writing - Original Draft.

Ladouche B.: Formal analysis, Writing.

Fleury P., Follain S., Berteloot V., Cavero J.: Review.

Colin F: Conceptualization, Methodology, Formal analysis , Investigation, Writing - Review & Editing, Supervision, Project administration.

Declaration of competing interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

Data availability

Data will be made available on request.

Acknowledgements

The authors thank the SALIN collaborative project associating BRGM, the Institut Agro Montpellier, the Regional Nature Park (PNR Narbonnaise en Méditerranée) and the Communauté d'Agglomération du Grand Narbonne with the financial support of the Rhone-Mediterranean and Corsica Water Agency and the Occitanie Region.

References

Akramkhanov, A., Martius, C., Park, S.J., Hendrickx, J.M.H., 2011. Environmental factors of spatial distribution of soil salinity on flat irrigated terrain. Geoderma 163, 55–62. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.04.001.

Alaghmand, S., Beecham, S., Woods, J.A., Holland, K.L., Jolly, I.D., Hassanli, A., Nouri, H., 2016. Quantifying the impacts of artificial flooding as a salt interception measure on a river- floodplain interaction in a semi-arid saline floodplain. Environ. Model. Softw. 79, 167–183. https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.02.006.

Álvarez-Romero, J.G., Pressey, R.L., Ban, N.C., Vance-Borland, K., Willer, C., Klein, C.J., Gaines, S.D., 2011. Integrated land-sea conservation planning: the missing links. Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst. 42, 381–409. https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-102209-144702.

Ambert, P., 1993. Preuves géologiques de l'insularité du massif de la Clape (Aude) pendant la transgression flandrienne. C. R. Acad. Sci. Paris 316 (SerieII), 237–244.

Ambert, P., 1994. L'évolution géomorphologique du Languedoc Central depuis le Néogène (Grands Causses Méridionaux-Piémont Languedocien).

Amiaud, B., Bouzillé, J.B., Tournade, F., Bonis, A., 1998. Spatial patterns of soil salinities in old embanked marshlands in western France. Wetlands 18, 482–494. https://doi.org/10.1007/BF03161540.

André, J., Ambert, P., 1998. L'évolution des paléo-environnements holocènes de la lagune de Narbonne (Sud de la France): apports de l'étude pluridisciplinaire du forage Peyriac. Congrès National Des Sociétés Historiques et Scientifiques, CTHS, pp. 77–91.

Barthès, J.P., Bornand, M., Falipou, P., 1999. Référentiel pédologique de la. Pédopaysages de l'Aude, France.

Bernigaud, N., Bondeau, A., Guiot, J., 2021. Understanding the development of viticulture in Roman Gaul during and after the Roman climate optimum: the contribution of spatial analysis and agro-ecosystem modeling. J. Archaeol. Sci. Rep. 38 https://doi.org/10.1016/j.jasrep.2021.103099.

Bless, A.E., Colin, F., Crabit, A., Devaux, N., Philippon, O., Follain, S., 2018. Landscape evolution and agricultural land salinization in coastal area: a conceptual model. Sci. Total Environ. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.083.

Bless, A.E.S., Colin, F., Crabit, A., Follain, S., 2022. Soil aggregate stability in salt-affected vineyards: depth-wise variability analysis. Land 11. https://doi.org/10.3390/land11040541.

Boissinot, P., 2001. Archéologie des vignobles antiques du sud de la Gaule. Gallia 58, 45–68. https://doi.org/10.3406/galia.2001.3173.

Brevik, E.C., Fenton, T.E., Lazari, A., 2006. Soil electrical conductivity as a function of soil water content and implications for soil mapping. Precis. Agric. 7, 393–404. https://doi.org/10.1007/s11119-006-9021-x.

Cavero, J., 2010. Paléogéographie des étangs narbonnais d'après les sources cartographiques anciennes. Géocarrefour 85 (1), 29–40. https://doi.org/10.4000/geocarrefour.7659.

Chandler, R.E., Scott, E., 2011. In: Chandler, R.E., Scott, E. (Eds.), Statistical Methods for Trend Detection and Analysis in the Environmental Sciences. John Wiley.

Chi, Y., Sun, J., Liu, W., Wang, J., Zhao, M., 2019. Mapping coastal wetland soil salinity in different seasons using an improved comprehensive land surface factor system. Ecol. Indic. 107, 105517 https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105517.

Collin Bouffier, S., 2009. Marseille et la Gaule méditerranéenne avant la conquête romaine. Pallas 80, 35–60. https://doi.org/10.4000/pallas.1751.

Conte, L.C., Bayer, D.M., Bayer, F.M., 2019. Bootstrap Pettitt test for detecting change points in hydroclimatological data: case study of Itaipu Hydroelectric Plant, Brazil. J. Hydrol. Sci. 64 (11), 1312–1326. https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1632461.

Corwin, D.L., 2021. Climate change impacts on soil salinity in agricultural areas. Eur. J. Soil Sci. 72, 842–862. https://doi.org/10.1111/ejss.13010.

Corwin, D.L., Scudiero, E., 2019. Review of soil salinity assessment for agriculture across multiple scales using proximal and/or remote sensors. Adv. Agron. 158, 1–130. https://doi.org/10.1016/bs.agron.2019.07.001.

Daliakopoulos, I.N., Tsanis, I.K., Koutroulis, A., Kourgialas, N.N., Varouchakis, A.E., Karatzas, G.P., Ritsema, C.J., 2016. The threat of soil salinity: a European scale review. Sci. Total Environ. 573, 727–739. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.08.177.

Dallmayr, W.R., 1961. Public and semi-public corporations in France. In: Law and Contemporary Problems, 26(4), pp. 755–793.

Descadeillas, R., 1959. La contrebande du sel aux sources de la Sals, 1750-1850. In: Annales Du Midi: Revue Archéologique, Historique et Philologique de La France Méridionale, 71(46), pp. 125–142. https://doi.org/10.3406/anami.1959.6263.

Doolittle, J.A., Brevik, E.C., 2014. The use of electromagnetic induction techniques in soils studies. Geoderma 223–225, 33–45. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.01.027.

Duan, Y., Ma, L., Abuduwaili, J., Liu, W., Saparov, G., Smanov, Z., 2022. Driving factor identification for the spatial distribution of soil salinity in the irrigation area of the Syr Darya River, Kazakhstan. Agronomy 12 (8). https://doi.org/10.3390/agronomy12081912.

Dupont, A., 1958. L'exploitation du sel sur les étangs de Languedoc (IXe-XIIIe siècle) (Tome 70). N°41. https://doi.org/10.3406/anami.1958.6196.

Epstein, E., 1980. Responses of plants to saline environments. Basic Life Sci. 14 (2), 7–21. https://doi.org/10.1007/978-1-4684-3725-6_2.

Ermgassen, P.S.E., Baker, R., Beck, M.W., Dodds, K., Ermgassen, S.O.S.E., Mallick, D., Taylor, M.D., Turner, R.E., 2021. Ecosystem services: delivering decision-making for salt marshes why quantify the value of ecosystem. Estuar. Coasts 1691–1698.

Erostate, M., Huneau, F., Garel, E., Ghiotti, S., Vystavna, Y., Garrido, M., Pasqualini, V., 2020. Groundwater dependent ecosystems in coastal Mediterranean regions: characterization, challenges and management for their protection. Water Res. 172, 115461 https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.115461.

Faïsse, C., Mathé, V., Bruniaux, G., Labussière, J., Cavero, J., Jézégou, M.P., Lefèvre, D., Sanchez, C., 2018. Palaeoenvironmental and archaeological records for the reconstruction of the ancient landscape of the Roman harbour of Narbonne (Aude, France). Quat. Int. 463, 124–139. https://doi.org/10.1016/j.quaint.2017.03.072.

Farifteh, J., Farshad, A., George, R.J., 2006. Assessing salt-affected soils using remote sensing, solute modelling, and geophysics. Geoderma 130, 191–206. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2005.02.003.

Feinerman, E., Yaron, D., 1982. Linear crop response functions to soil salinity with a threshold salinity level. Water Resour. Res. 18 (1), 101–106.

Ferreira, C.S.S., Seifollahi-Aghmiuni, S., Destouni, G., Ghajarnia, N., Kalantari, Z., 2022. Soil degradation in the European Mediterranean region: processes, status and consequences. Sci. Total Environ. 805, 150106 https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150106.

Fontes, J.C., Matray, J.M., 1993. Geochemistry and origin of formation brines from the Paris Basin, France 1. Brines associated with Triassic salts. Chem. Geol. 109, 149–175.

Gao, P., Mu, X.M., Wang, F., Li, R., 2011. Changes in streamflow and sediment discharge and the response to human activities in the middle reaches of the Yellow River. Hydrol. Earth Syst. Sci. 15 (1), 1–10. https://doi.org/10.5194/hess-15-1-2011.

García-Ruiz, J.M., López-Moreno, I.I., Vicente-Serrano, S.M., Lasanta-Martínez, T., Beguería, S., 2011. Mediterranean water resources in a global change scenario. Earth Sci. Rev. 105 (3–4), 121–139. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2011.01.006.

Gibling, M.R., 2018. River systems and the anthropocene: a late pleistocene and holocene timeline for human influence. Quaternary 1 (3), 1–37. https://doi.org/10.3390/quat1030021.

Guennoc, P., Gorini, C., Mauffret, A., 2000. Histoire géologique du golfe du Lion et cartographie du rift oligo-aquitanien et de la surface messinienne. Géol. Fr. 3, 67–97. https://archivesdepartementales.aude.fr/actualites/le-territoire-dans-tous-ses-etats-11-les-variations-du-lit-de-laude.

Guilaine, J., 1995. Temps et espace dans le bassin de l'Aude du néolithique à l'Âge du Fer (Centre d'A).

Heil, K., Schmidhalter, U., 2017. The application of EM38: determination of soil parameters, selection of soil sampling points and use in agriculture and archaeology. Sensors (Switzerland) 17. https://doi.org/10.3390/s17112540.

Himes-Cornell, A., Pendleton, L., Atiyah, P., 2018. Valuing ecosystem services from blue forests: a systematic review of the valuation of salt marshes, sea grass beds and mangrove forests. Ecosyst. Serv. 30, 36–48. https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2018.01.006.

Holser, W.T., Kaplan, I.R., Sakai, H., Zak, I., 1979. Isotope geochemistry of oxygen in the sedimentary sulfate cycle. Chem. Geol. 25 (1–2), 1–17. https://doi.org/10.1016/0009-2541(79)90079-2.

Jacobsen, S.E., Jensen, C.R., Liu, F., 2012. Improving crop production in the arid Mediterranean climate. Field Crop Res. 128, 34–47. https://doi.org/10.1016/j.fcr.2011.12.001.

Jahn, R., Blume, H.P., Asio, V.B., Spaargaren, O., Schad, P., 2006. Guidelines for Soil Description. https://doi.org/10.1007/978-3-030-33443-7_3.

Jones, A., Panagos, P., Barcelo, S., Bouraoui, F., Bosco, C., Dewitte, O., Gardi, C., Erhard, M., Hervás, J., Hiederer, R., Jeffery, S., Lukewille, A., Marmo, L., Montanarella, L., Penizek, V., Olazabal, C., Petersen, J.-E., Penizek, V., Strassburger, T., Yigini, Y., 2012. State of Soil in Europe. https://doi.org/10.2788/77361.

Kargas, G., Londra, P., Sotirakoglou, K., 2022. The effect of soil texture on the conversion factor of 1:5 soil/water extract electrical conductivity (EC1:5) to soil saturated paste extract electrical conductivity (ECe). Water 14, 642. https://doi.org/10.3390/w14040642.

Larguier, G., 1996. Le drap et le grain en Languedoc Narbonne et Narbonnais 1300–1789 (PUP).

Larguier, G., 2018. Catastrophe naturelle et effets à long terme: l'inondation de 1316 et le changement de lit de l'Aude. Bulletin de La Société d'Etudes Scientifiques de l'Aude, CXVIII 79–96. https://archivesdepartementales.aude.fr/actualites/le-territoire-dans-tous-ses-etats-11-les-variations-du-lit-de-laude.

LEMA, 2006. Loi sur l'eau et les milieux aquatiques. https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000000649171.

Lesch, S.M., Rhoades, J.D., Herrero, J., 1998. Monitoring for temporal changes in soil salinity using electromagnetic induction techniques. Soil Sci. Soc. Am. J. 62, 232–242. https://doi.org/10.2136/sssaj1998.03615995006200010030x.

Lespinasse, P., Aloïsi, J.C., Barruol, J., Durand-Delga, M., Got, H., Monaco, A., Marchal, J.P., 1982. Notice explicative de la feuille Narbonne au 1/50 000.

Li, J., Pu, L., Zhu, M., Zhang, R., 2012. The present situation and hot issues in the salt-affected soil research. Acta Geograph. Sin. 67 (9), 1233–1245.

Linares, C., Díaz, J., Negev, M., Martínez, G.S., Debono, R., Paz, S., 2020. Impacts of climate change on the public health of the Mediterranean Basin population - current situation, projections, preparedness and adaptation. Environ. Res. 182 https://doi.org/10.1016/j.envres.2019.109107.

de Louw, P.G.B., Eeman, S., Siemon, B., Voortman, B., Gunnink, J., van Baaren, E.S., Oude Essink, G.H.P., 2011. Shallow rainwater lenses in deltaic areas with saline seepage. Hydrol. Earth Syst. Sci. Discuss. 8, 7657–7707. https://doi.org/10.5194/hessd-8-7657-2011.

de Louw, P.G.B., Eeman, S., Oude Essink, G.H.P., Vermue, E., Post, V.E.A., 2013. Rainwater lens dynamics and mixing between infiltrating rainwater and upward saline groundwater seepage beneath a tile-drained agricultural field. J. Hydrol. 501, 133–145. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.07.026.

Maas, E.V., Hoffman, G.J., 1977. Crop salt tolerance - current assessment. J. Irrig. Drain. Div. 103 (2) https://doi.org/10.1061/JRCEA4.0001137.

Martínez Ferreras, V., Capelli, C., Cabella, R., Nieto Prieto, X., 2013. From Hispania tarraconensis (ne Spain) to gallia narbonensis (s France). New data on pascual 1 amphora trade in the augustan period. Appl. Clay Sci. 82 (1), 70–78. https://doi.org/10.1016/j.clay.2013.06.021.

Martinez-Beltran, J., Manzur, C., 2005. Overview of salinity problems in the world and FAO strategies to address the problem. In: Proceedings of the International Salinity Forum, Riverside, California, April 2005, pp. 311–313.

Martínez-Megías, C., Rico, A., 2022. Biodiversity impacts by multiple anthropogenic stressors in Mediterranean coastal wetlands. Sci. Total Environ. 818 https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151712.

Mejjad, N., Rossi, A., Pavel, A.B., 2022. The coastal tourism industry in the Mediterranean: a critical review of the socio-economic and environmental pressures & impacts. Tour. Manag. Perspect. 44 (September), 101007 https://doi.org/10.1016/j.tmp.2022.101007.

Metternicht, G.I., Zinck, J.A., 2003. Remote sensing of soil salinity: potentials and constraints. Remote Sens. Environ. 85, 1–20. https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00188-8.

Munns, R., Tester, M., 2008. Mechanisms of salinity tolerance. Annu. Rev. Plant Biol. 59, 651–681. https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.59.032607.092911.

Munns, R., Day, D.A., Fricke, W., Watt, M., Arsova, B., Barkla, B.J., Bose, J., Byrt, C.S., Chen, Z.H., Foster, K.J., Gilliham, M., Henderson, S.W., Jenkins, C.L.D., Kronzucker, H.J., Miklavcic, S.J., Plett, D., Roy, S.J., Shabala, S., Shelden, M.C., Soole, K.L., Taylor, N.L., Tester, M., Wege, S., Wegner, L.H., Tyerman, S.D., 2020. Energy costs of salt tolerance in crop plants. New Phytol. 225, 1072–1090. https://doi.org/10.1111/nph.15864.

Nagra, G., Burkett, D., Huang, J., Ward, C., Triantafilis, J., 2017. Field level digital mapping of soil mineralogy using proximal and remote-sensed data. Soil Use Manag. 33, 425–436. https://doi.org/10.1111/sum.12353.

Ondrasek, G., Rengel, Z., 2021. Environmental salinization processes: detection, implications & solutions. Sci. Total Environ. 754, 142432 https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142432.

Petelet-Giraud, E., Négrel, P., Aunay, B., Ladouche, B., Bailly-comte, V., Guerrot, C., Flehoc, C., Pezard, P., Lo, J., Dör, N., 2016. Coastal groundwater salinization: focus on the vertical variability in a multi-layered aquifer through a multi-isotope fingerprinting (Roussillon). Sci. Total Environ. 567, 398–415. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.05.016.

Pettitt, A.N., 1979. A non-parametric to the approach problem. Appl. Stat. 28 (2), 126–135.

Pieruccini, P., Susini, D., Buonincontri, M.P., Bianchi, G., Hodges, R., Lubritto, C., Di Pasquale, G., 2021. Late Holocene human-induced landscape changes in calcareous tufa environments in Central Mediterranean valleys (Pecora river, Southern Tuscany, Italy). Geomorphology 383, 107691. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.107691.

Pohlert, T., 2023. Non-parametric trend tests and change-point detection, pp. 1–18.

Qi, Z., Feng, H., Zhao, Y., Zhang, T., Yang, A., Zhang, Z., 2018. Spatial distribution and simulation of soil moisture and salinity under mulched drip irrigation combined with tillage in an arid saline irrigation district, Northwest China. Agric. Water Manag. 201, 219–231. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2017.12.032.

Ren, D., Wei, B., Xu, X., Engel, B., Li, G., Huang, Q., Xiong, Y., Huang, G., 2019. Analyzing spatiotemporal characteristics of soil salinity in arid irrigated agro-ecosystems using integrated approaches. Geoderma 356. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.113935.

Rengasamy, P., 2006. World salinization with emphasis on Australia. J. Exp. Bot. 57 (5), 1017–1023. https://doi.org/10.1093/jxb/erj108.

Rengasamy, P., 2010. Soil processes affecting crop production in salt-affected soils. Funct. Plant Biol. 37 (7), 613–620. https://doi.org/10.1071/FP09249.

Rhoades, J.D., Chanduvi, F., Lesch, S., 1999. Soil Salinity Assessment: Method and Interpretation of Electrical Conductivity Measurements, Vol. 57, Issue 1. http://journal.um-surabaya.ac.id/index.php/JKM/article/view/2203.

Richards, L.A., Allison, L., Bernstein, L., Bower, J.W., Brown, J.W., Fireman, M., Hatcher, J.Y., Hayward, H.E., Pearson, G.A., Reeve, R.C., Wilcox, L.V., 1954. Diagnosis and Improvement of saline and alkali soils. In: Richards, L.A. (Ed.), Agriculture Hanbook, Vol. N° 60 (Issue February 1954).

Saey, T., Simpson, D., Vermeersch, H., Cockx, L., Van Meirvenne, M., 2009. Comparing the EM38DD and DUALEM-21S sensors for depth-to-clay mapping. Soil Sci. Soc. Am. J. 73, 7–12. https://doi.org/10.2136/sssaj2008.0079.

Sagarika, S., Kalra, A., Ahmad, S., 2014. Evaluating the effect of persistence on long-term trends and analyzing step changes in streamflows of the continental United States. J. Hydrol. 517, 36–53. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.05.002.

Salel, T., 2018. Dynamique des environnements fluvio-lagunaires du Narbonnais à l'Holocène (Golfe du Lion, France).

Shahid, S.A., Rahman, K. ur, 2010. Soil salinity development, classification, assessment, and management in irrigated agriculture. In: Pessarakil, M. (Ed.), Handbook of Plant and Crop Stress, pp. 23–39.

Shrestha, R.P., 2006. Relating soil electrical conductivity to remote sensing and other soil properties for assessing soil salinity in Northeast Thailand. Land Degrad. Dev. 17 (6), 677–689. https://doi.org/10.1002/ldr.752.

Six, J., Bossuyt, H., Degryze, S., Denef, K., 2004. A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. Soil Tillage Res. 79, 7–31. https://doi.org/10.1016/j.still.2004.03.008.

Sonmez, S., Buyuktas, D., Okturen, F., Citek, S., 2008. Assessment of different soil to water ratios (1:1, 1:2.5, 1:5) in soil salinity studies. Geoderma 144, 361–369.

Szabolcs, I., 1985. Salt affected soils as a world problem. The reclamation of salt-affected soils. In: Proceedings of an International Symposium, China, pp. 30–47.

Szabolcs, I., 1989. Salt-Affected Soils. CRC Press, Inc.

Taghizadeh-Mehrjardi, R., Schmidt, K., Toomanian, N., Heung, B., Behrens, T., Mosavi, A., Band, S., Amirian-Chakan, A., Fathabadi, A., Scholten, T., 2021. Improving the spatial prediction of soil salinity in arid regions using wavelet transformation and support vector regression models. Geoderma 383, 114793. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114793.

Tóth, G., Montanarella, L., Rusco, E., 2008. Threats to soil quality in Europe. In: Tóth, G., Montanarella, L., Rusco, E. (Eds.), Updated Map of Salt Affected Soils in the European Union. https://doi.org/10.2788/8647.

Tramblay, Y., Koutroulis, A., Samaniego, L., Vicente-Serrano, S.M., Volaire, F., Boone, A., Le Page, M., Llasat, M.C., Albergel, C., Burak, S., Cailleret, M., Kalin, K.C., Davi, H., Dupuy, J.L., Greve, P., Grillakis, M., Hanich, L., Jarlan, L., Martin-StPaul, N., Polcher, J., 2020. Challenges for drought assessment in the Mediterranean region under future climate scenarios. Earth Sci. Rev. 210 (March), 103348 https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103348.

Verstraeten, G., Poesen, J., Demarée, G., Salles, C., 2006. Long-term (105 years) variability in rain erosivity as derived from 10-min rainfall depth data for Ukkel (Brussels, Belgium): implications for assessing soil erosion rates. J. Geophys. Res. Atmos. 111 (22), 1–11. https://doi.org/10.1029/2006JD007169.

Wang, Y., Deng, C., Liu, Y., Niu, Z., Li, Y., 2018. Identifying change in spatial accumulation of soil salinity in an inland river watershed, China. Sci. Total Environ. 621, 177–185. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.222.

WFD, 2000. Water Framework Directive. https://environment.ec.europa.eu/topics/water/water-framework-directive_en.

Wilkinson, B.H., 2005. Humans as geologic agents: a deep-time perspective. Geology 33 (3), 161–164. https://doi.org/10.1130/G21108.1.

WRB, 2015. World Reference Base for Soil Resources 2014, Update 2015 International Soil Classification System for Naming Soils and Creating Legends for Soil Maps.

Yu, J., Li, Y., Han, G., Zhou, D., Fu, Y., Guan, B., Wang, G., Ning, K., Wu, H., Wang, J., 2014. The spatial distribution characteristics of soil salinity in coastal zone of the Yellow River Delta. Environ. Earth Sci. 72, 589–599. https://doi.org/10.1007/s12665-013-2980-0.

Zhang, S., Lu, X.X., 2009. Hydrological responses to precipitation variation and diverse human activities in a mountainous tributary of the lower Xijiang, China. Catena 77 (2), 130–142. https://doi.org/10.1016/j.catena.2008.09.001.

Zhang, Z., Hu, Hongchang, Tian, F., Hu, Heping, Yao, X., Zhong, R., 2014. Soil salt distribution under mulched drip irrigation in an arid area of northwestern China. J. Arid Environ. 104, 23–33. https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2014.01.012.

Chapitre 5 : Etude des pratiques agricoles, des perceptions et de l'état de la salinité en zone côtière méditerranéenne : cas de la viticulture dans la basse-plaine de l'Aude (France)

Chapitre 5 : Etude des pratiques agricoles, des perceptions et de l'état de la salinité en zone côtière méditerranéenne : cas de la viticulture dans la basse-plaine de l'Aude (France)

1. Introduction

L'introduction de la culture de la vigne dans les zones littorales méditerranéennes remonte au II^{ème} siècle avant J.C.. Depuis le XVIII^{ème} siècle, cette culture est devenue la principale ressource économique du département et est aujourd'hui un élément essentiel du paysage local (McPhee, 1989). Le département de l'Aude compte actuellement 64 000 hectares de vignes en production, ce qui représente environ 30% de sa Surface Agricole Utile (SAU) (Grand Narbonne, 2017). Pour établir la vigne dans la zone de la Basse-Plaine de l'Aude, les viticulteurs ont fait face au problème de salinité des sols et des eaux de surface et souterraines par des pratiques visant à favoriser la submersion des terres avec de l'eau douce et à assurer le drainage des eaux de lixiviation (Chaigneau, 2017). Or plusieurs acteurs locaux estiment que la salinisation s'intensifie au cours des dernières années. Les évocations à propos de la mortalité des plants de vigne sont devenues de plus en plus fréquentes. Les pertes de rendement associées sont décrites comme mettant en péril toute l'économie de la plaine viticole. Ainsi, même si la salinité des eaux et des sols est une problématique globale à l'échelle de la basse-plaine, le secteur viticole se trouve particulièrement concerné.

Après avoir intensément caractérisé les niveaux de la salinité des eaux et des sols dans la basse-plaine, il paraissait important de revenir sur ces perceptions de la salinité. La perception est définie comme l'état dans lequel un individu ou une communauté comprend une situation en fonction de son expérience pratique et des mesures qu'il prend pour répondre à cette situation (Adger et al., 2009; Harvatt et al., 2011; Islam et al., 2020). C'est donc une dimension pivot qui permet de créer le lien entre l'état du milieu et les pratiques engagées sur ce milieu. A ce titre, confrontée à la réalité de la salinité et aux pratiques agricoles en lien avec la salinité, elle ouvre plusieurs axes de questionnement : la perception de la salinité correspond-elle à la

salinité réelle des sols ? La perception du phénomène influence-t-elle les pratiques ? Les pratiques de lutte contre la salinité brouillent-elles la perception ? La salinité du sol est-elle une conséquence des pratiques utilisées ? Les pratiques sont-elles adaptées à la salinité du sol ?

Aborder ces questions permet de progresser dans la compréhension des phénomènes naturels et anthropiques impliqués dans la dynamique de la salinité des eaux et des sols d'un territoire mais également de se projeter vers des solutions d'adaptation plus efficaces au changement climatique (Deressa et al., 2011; Weber, 2010).

S'il n'existait pas de résultats concernant les perceptions de la salinité sur ce territoire, un certain nombre d'études à propos des méthodes de lutte contre le sel dans la région avaient cependant déjà été réalisées (Buhe, 2015; Chaigneau, 2017; EAUCEA, 2014; Escudier et al., 2019; Quie, 2014). Elles portaient principalement sur les pratiques de gestion de l'eau, en particulier la submersion et l'irrigation, en se concentrant sur l'accès à la ressource en eau. Ces études ont été réalisées à l'aide de méthodes d'observations et d'enquêtes menées auprès des présidents des ASAs (EAUCEA, 2014). Néanmoins, la gestion du sel peut prendre différentes formes, telles que le choix de variétés de vignes résistantes au sel, des pratiques spécifiques de travail du sol ou encore l'amendement des sols (Fipps, 2010; Marlet, 2004; Walker, 2010). L'état de l'art des études existantes sur le sujet a mis en évidence qu'aucune étude récente ne faisait un point complet de l'ensemble des pratiques viticoles en usage pour gérer la salinité.

Ce chapitre a donc pour objectif de caractériser et de confronter l'état de salinité des sols avec les pratiques et les perceptions en lien avec cette salinité. Pour tenter de répondre à cet objectif pluri-disciplinaire, différents types de protocoles ont été mis simultanément en place : (i) des enquêtes de terrain afin de caractériser et de comprendre les différentes pratiques de gestion en vigueur, (ii) des entretiens afin de recenser et de catégoriser les perceptions des viticulteurs sur la problématique du sel, et (iii) des mesures directes de salinité sur les îlots culturaux correspondant aux précédentes enquêtes. Les entretiens sur la perception de la salinité, les enquêtes sur les pratiques agricoles en lien avec la salinité ainsi que l'analyse des résultats ont fait l'objet d'un stage de fin d'étude (Bergé, 2020) que j'ai co-encadré. Les

résultats sont donnés pour chacune des dimensions investiguées puis interprétés conjointement et concernent les pratiques, les perceptions et la salinité. Enfin, des implications pour la gestion de la viticulture dans le territoire face à la salinité sont proposées.

2. Matériel et méthodes

L'approche méthodologique proposée est initiée par une concertation avec des acteurs disposant d'expertise sur la viticulture du territoire de la basse-plaine pour co-construire les enquêtes. Ensuite, des entretiens semi-directifs et des enquêtes à questions fermées ont été menés auprès des viticulteurs de la Basse-Plaine pour recueillir leurs perceptions et leurs pratiques en matière de gestion de la salinisation des sols. Dans le même temps, des prélèvements et analyses de la salinité des sols ont été réalisés sur les parcelles des différents viticulteurs enquêtés.

2.1 Protocoles d'enquête

Cette étape vise à co-construire avec les acteurs du territoire un dispositif d'enquête basé sur des questionnaires et sur un échantillon basé sur la diversité des exploitations de la basse-plaine.

Cette étape implique une analyse bibliographique afin de comprendre des éléments généraux sur le phénomène de salinisation en contexte viticole(Follain et al., 2016; Lebrun, 2016; Walker, 2010) et les leviers d'action associés (Abrol et al., 1988; Escudier et al., 2019; Fipps, 2010; Zakharova et al., 2018) ainsi que des éléments locaux sur l'état de la pression liée à la salinité, les dispositifs déjà en place pour y faire face et les acteurs impliqués sur le territoire de la basse-plaine (Belmonte, 2015; Castex, 2014; Rannou, 2015).

Cette analyse permet d'identifier les différents acteurs experts du territoire, à savoir : des techniciens ou conseillers à la Chambre d'Agriculture de l'Aude, des responsables de l'irrigation gravitaire dans la basse plaine (ASEAUDE), des chargés de missions en agriculture pour différentes institutions, des représentants du Service Économie (incluant l'agriculture) de l'agglomération "Le Grand Narbonne", du Parc Naturel Régional de la Narbonnaise, de la

Chambre d'Agriculture de l'Aude et enfin de chercheurs de la station expérimentale INRA en viticulture "Pech Rouge", dans le massif de la Clape.

Après identification des acteurs ressources, une concertation a été conduite au moyen d'entretiens exploratoires non-directifs afin de mieux comprendre la diversité des types d'agricultures, d'exploitations et de pratiques. A l'issue de cette concertation, il a été possible d'établir une liste de viticulteurs et d'identifier les axes à aborder au cours des enquêtes. Les questionnaires sont donnés en Annexe F.

2.2 Pratiques agricoles

L'échelle d'investigation est celle de l'îlot cultural défini comme un ensemble de parcelles culturales contiguës, exploitées par le même viticulteur avec les mêmes pratiques, et limité par des éléments facilement repérables, comme un chemin, une route, un canal. L'ensemble des parcelles d'un îlot est stable d'une année sur l'autre et on ne considère que les parcelles où la vigne est cultivée avec les mêmes pratiques. La localisation des îlots de parcelles caractérisés pendant les enquêtes est montrée à la Figure 51. Plusieurs îlots peuvent être décrits lors d'un entretien, et au total, l'étude a permis de caractériser les pratiques sur 167 parcelles réparties en 45 îlots couvrant une surface de 307 ha de vigne (soit environ 10% de la surface viticole de la basse-plaine) au cours de 28 entretiens.

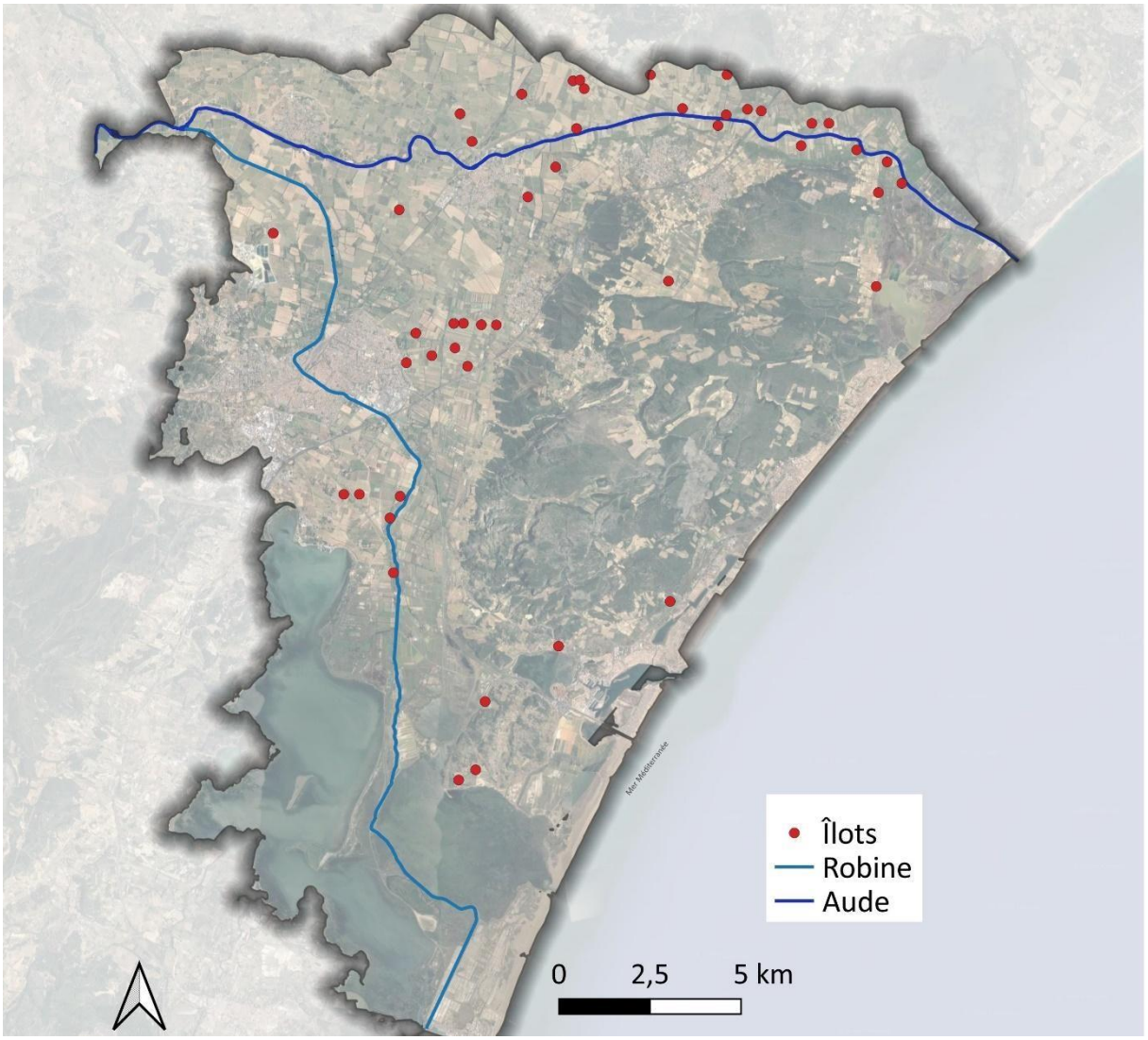


Figure 51 : Localisation des îlots enquêtés

Les 28 entretiens ont été réalisés avec des viticulteurs de la basse plaine sur une période allant de mi-juin à mi-août 2020. La durée des entretiens était variable en raison de la disponibilité des interlocuteurs et du niveau de précision abordé lors des entretiens, allant de 1 h 30 à 4 h, avec une moyenne de 2 h. Le questionnaire à réponses fermées conçu abordait en introduction les principales caractéristiques de l'exploitation (surface, âge, inscription dans un label, structure de vinification...) puis trois grands thèmes : l'entretien du sol, les intrants et la gestion de l'eau.

Les questions sur les trois thèmes ont permis de définir, pour les 45 individus (îlots), 14 variables actives. Les variables sont listées par la suite en les classant par thème :

- **pour le thème de l'entretien du sol** : la préparation du sol avant plantation selon les modalités : présence ou absence d'un labour très profond, appelé labour de défoncement ou retournement, faisant remonter à la surface des éléments enfouis au-delà de 50 cm ; la fréquence de travail du sol de l'inter-rang dans une année culturale ; la profondeur des outils de travail du sol de l'inter-rang ; l'existence de retournement profond du sol ou "charruage"[2] à plus de 15 cm de profondeur de l'inter-rang ; le type d'enherbement de l'inter-rang selon les modalités : « sol nu » (signifiant qu'il n'y a jamais d'herbe), « enherbement hivernal » (établi après les vendanges et détruit au débourrement), « enherbement permanent » (qui n'est jamais détruit), et le pourcentage de surface concerné par la stratégie d'enherbement ; le type d'entretien du sol du rang selon les modalités : présence ou absence et sa nature (désherbage chimique ou mécanique) ;
- **pour le thème de la fertilisation des sols** : le type d'amendement ; le type d'engrais ;
- **pour le thème de l'aménagements et la gestion de l'eau des îlots :** le drainage artificiel des parcelles selon les modalités : présence ou absence d'un système de drains agricoles en profondeur facilitant l'écoulement de l'eau des parcelles hydromorphes et/ou sujettes aux remontées de sel[3] ; les fossés de drainage selon les modalités : présence ou absence et leur état d'entretien ; l'apport et du mode d'apport d'eau sur la parcelle ; le cumul annuel des hauteurs d'eau de submersion estimé par le viticulteur (en mm) ; la présence d'autres types d'irrigation (aspersion, goutte à goutte).

Ces variables ont été catégorisées afin d'attribuer une signification qualitative aux valeurs prises définissant ainsi des modalités. Au final, les 3 thèmes, décrits par 14 variables, comprennent un total de 38 modalités comme résumé au Tableau 11.

[2] L'action de "charruer" aura un impact sur la gestion du sel par le mélange des horizons, la modification de la structure et la dégradation du sol, notamment l'organisation carbonée et mycorhizienne, ainsi que sur le macrofaune (Constant et al., 2019).

[3] Ce sont généralement des drains en plastique de 45 mm de diamètre installés en moyenne à 60 cm.

Tableau 11 : Thèmes, variables et modalités extraits des enquêtes sur les pratiques à l'échelle des îlots viticoles

Thèmes	Variables actives	Modalités
Entretien du sol	Préparation de la parcelle avant plantation	Oui (returnsol)
		Non (no_returnsol)
	Fréquence de travail du sol de l'inter-rang	Intensif (IR_intensif)
		Modéré (IR_modere)
		Faible (IR_faible)
	Profondeur des outils de travail du sol de l'inter-rang	Profond (IR_prof)
		Superficiel (IR_superf)
	Retournement profond de l'inter-rang	Oui (reurnIR)
		Non (no_returnIR)
	Enherbement de l'inter-rang	Sol nu toute l'année (no_herb)
		Hivernal (H_hiver)
		Permanent (H_perm)
	Intensité de la pratique d'enherbement de l'inter-rang	Toute la parcelle (>80%IR)
		2 rangs sur 3 (50-80%IR)
		1 rang sur 2 ou 3 (<50%IR)
	Pratique d'entretien du rang	Mécanique (R_meca)
		Chimique (R_chim)
		Mixte (R_mixte)
Fertilisation	Type d'amendement	Organique (AM_orga)
		Gypse (gypse)
		Pas d'amendement (no_AM)
	Engrais	Organique (ferti_orga)
		Minéral (fert_mine)
		Mixte (ferti_mixte)
		Pas d'engrais (no_ferti)
Gestion de l'eau	Type de submersion	Apport de surface (S_surf)
		Apport par des drains (S_drain)
		Pas de submersion (no_sub)
	Cumul des apports par submersion	0 mm (0mm)
		Inférieur à 200 mm (<200mm)
		Entre 200 et 400 mm (200-400mm)
		Supérieur à 400 mm
	Drainage enterré	Pas de présence de drains (no_drain)
		Présence de drains (drain)
	Entretien des fossés de drainage	Bon état (D_good)
		Mauvais état (D_bad)
		Pas utilisé (D_notused)
		Pas de fossé présent (no_ditch)
	Autre stratégie d'irrigation	Présence (irrig)
		Absence (no_irrig)

La typologie des pratiques des viticulteurs a été réalisée au moyen d'une Analyse des Correspondances Multiples (ACM) sur les 38 modalités, en considérant les 45 îlots comme individus, suivie d'une Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) en utilisant une métrique

euclidienne. Ces analyses ont été effectuées à l'aide du langage R et de l'environnement RStudio en utilisant le package FactoMineR.

L'Analyse des Correspondances Multiples est une méthode descriptive visant à faciliter l'interprétation des relations entre des variables qualitatives en lien avec les individus étudiés. La Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) est une méthode d'analyse statistique qui vise à constituer des groupes d'individus similaires. Elle utilise une matrice de distances qui exprime la similitude ou la dissemblance entre chaque paire d'individus. Les individus similaires auront une inter-distance faible, tandis que les individus différents auront une inter-distance plus élevée. La CAH commence par regrouper les individus les plus similaires en petits groupes, puis elle fusionne progressivement ces groupes en des groupes d'effectif de plus en plus élevé, créant ainsi une structure arborescente appelée dendrogramme. En coupant cet arbre à une certaine hauteur choisie, on obtient une partition en groupes distincts. L'objectif de la CAH est de regrouper les îlots en fonction des pratiques viticoles en lien avec la gestion de la salinisation, en cherchant à maximiser la similarité des pratiques au sein de chaque groupe tout en maximisant les différences entre les groupes.

2.3 Perception de la salinité

L'analyse de la perception de la salinité par les agriculteurs enquêtés est menée à partir de questionnaires semi-directifs selon une approche compréhensive (Bardin, 2013). Elle peut être qualifiée de recherche qualitative de terrain (Paillé & Mucchielli, 2012). A partir des entretiens, un ensemble de fragments (verbatim, citations) sont extraits des discours (Figure 52). Ces fragments sont ensuite ordonnés dans une matrice (Wanlin, 2007). Chaque ligne de la matrice correspond à un viticulteur. En colonne, les thèmes de la matrice sont basés sur la grille d'analyse construite avec le guide d'entretien, complétés et modifiés au cours de l'enquête et de l'interprétation. Au total, 27 entretiens alimentent cet examen discursif.

Figure 52 : Fragments de discours organisés selon une matrice

Deux lectures des données sont réalisées : la lecture verticale de la matrice, par thèmes, permet de comparer les fragments de discours et de proposer des catégories de perceptions fondés sur des ressemblances, des convergences et des divergences, ou des oppositions. La lecture transversale, passant plus librement d'un thème à l'autre, d'un entretien à l'autre, par association d'idées, laissant une part de liberté et favorisant l'aspect créatif de l'interprétation permet de construire du sens à l'ensemble du corpus.

2.4 Validation par les acteurs du territoire

A l'issue des analyses des enquêtes, une réunion publique comprenant le comité d'experts locaux et les différents acteurs du territoire ayant participé à l'élaboration des questionnaires d'enquêtes et des viticulteurs de la zone d'étude dont certains ayant participé aux enquêtes et d'autres extérieurs aux enquêtes. Au cours de cette réunion, un premier temps a été consacré à la présentation des typologies de pratiques et de perceptions. Un deuxième temps a été dédié à la mise en discussion en demandant aux viticulteurs présents s'ils reconnaissent une appartenance à un des types et si tous les types étaient non vides. Enfin, un dernier temps

a consisté à demander la validation des résultats par vote à main levée. La proposition des types a été validée à l'unanimité de la centaine de présents.

2.5 Salinité du sol

Sur chaque îlot, des échantillons de sol ont été prélevés sur une profondeur de 1,20 m à l'aide d'une tarière entre juin 2020 et juin 2021. Les échantillons de sol ont été tamisés (tamis 2 mm) puis mis en solution (20 g de sol dans 100 ml d'eau osmosée). Après agitation, les solutions sont mises à décanter pendant 48h. La conductivité électrique ($EC_{1:5}$) est mesurée dans la phase aqueuse puis rapportée à une valeur de EC_{sp} équivalente à $11{,}35.EC_{1:5}$ (voir détails en chapitre 2).

Les données ont été regroupées en fonction de deux profondeurs : un horizon de 0 à 40 cm, au-dessus d'un éventuel drainage enterré, associé à la majeure partie zone racinaire et potentiellement influencée par les pratiques agricoles actuelles, et un horizon de 90 à 120 cm, pouvant indiquer la pression saline naturelle en profondeur.

Les différences entre données de salinité ont été éprouvées à l'aide du test de comparaison multiple de Dunn (Dunn, 1964) dérivé du test non paramétrique de Kruskal-Wallis à l'aide du langage R et de l'environnement RStudio.

3. Résultats

Les analyses ont permis de déterminer à partir des enquêtes une typologie des pratiques en lien avec la gestion de la salinité et de faire émerger des catégories de perception en lien avec la salinité et son évolution au cours de la dernière décennie. La salinité mesurée sur l'ensemble des îlots est décrite et confrontée aux types de pratique et aux catégories de perceptions.

3.1 Pratiques en lien avec la salinité

Les résultats des analyses de données statistiques qui permettent de construire la typologie sont présentés avant de décrire les différents groupes qui la composent.

3.1.1 Typologie des pratiques

Deux ACM et une CAH sur les 14 variables qualitatives décomposées en 38 modalités ont permis d'identifier 5 groupes de pratiques.

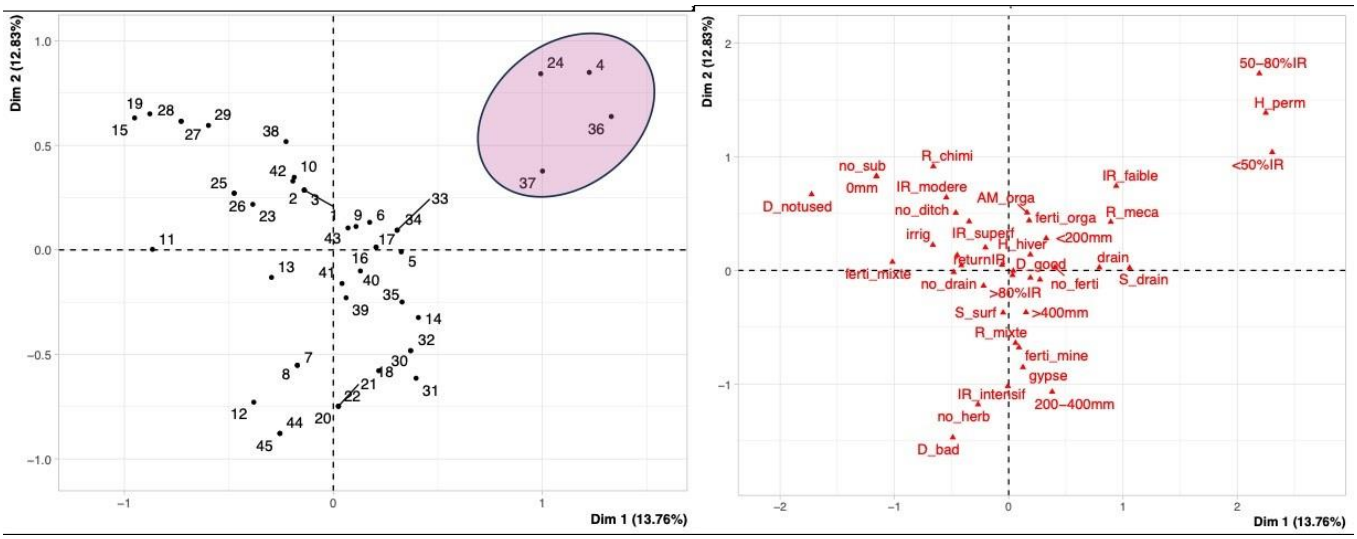


Figure 53 : Résultats de l'ACM sur les 45 îlots : projection des individus et des modalités dans le plan formé par les deux premiers axes

Pour une première ACM sur les 45 îlots, l'inertie totale est de 1,857, l'axe 1 en porte 14% et les deux premiers axes 27%. La projection des individus dans le plan formé par les deux premiers axes, illustrée à la Figure 53, met en évidence un groupe de quatre îlots très différents des autres (ilot 4, 24, 36 et 37). Ce groupe est essentiellement expliqué par les modalités "enherbement permanent" et "fréquence de travail faible". La variabilité liée à la présence de ce groupe a tendance à écraser la variabilité entre les autres éventuels groupes. Nous avons donc décidé de définir un premier groupe comprenant ces 4 îlots et de procéder à une nouvelle ACM sur les 41 îlots restants.

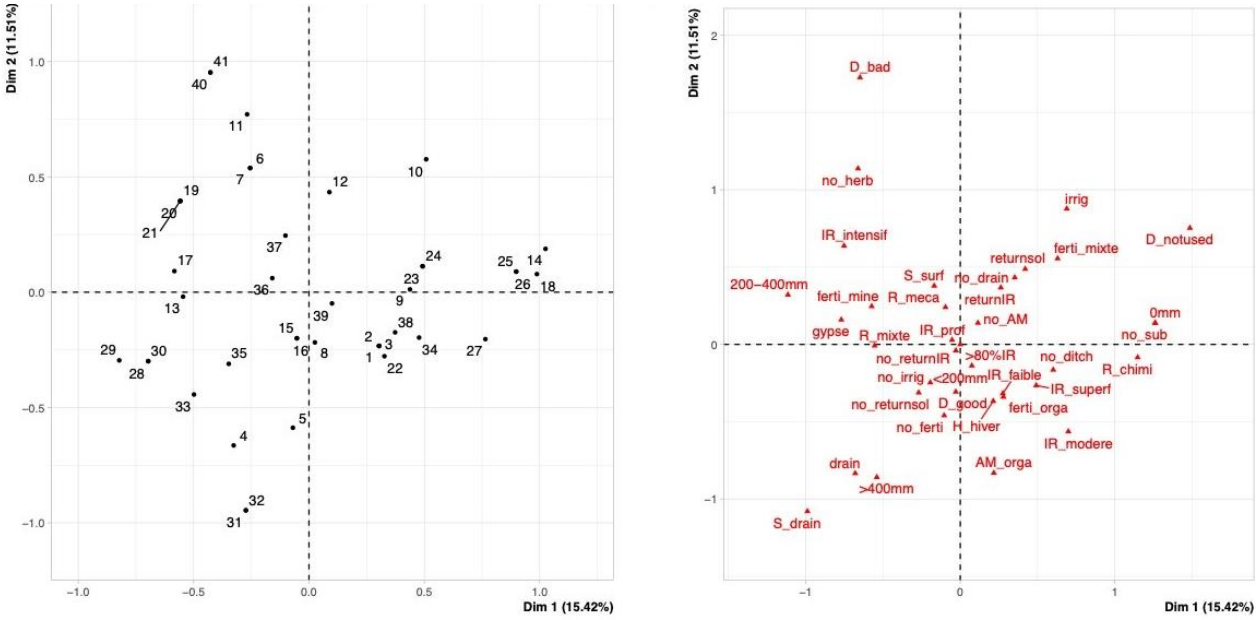


Figure 54 : Résultats de l'ACM sur les 41 îlots : projection des individus et des modalités dans le plan formé par les deux premiers axes

La seconde ACM, illustrée à la Figure 54, permet de mieux discriminer la diversité des pratiques au sein des 41 îlots restants. L'inertie totale est de 1,769 et l'axe 1 en porte 15,4% et les deux premiers axes 26,9%. On observe une association significative entre les modalités liées à la présence de systèmes de drainage, celles liées à l'irrigation par submersion, et celles liées aux niveaux élevés d'apports d'eau annuels élevés. Il est à noter que ces modalités présentent une corrélation négative avec l'utilisation d'autres systèmes d'irrigation et l'absence de fossés. Cette observation suggère que des systèmes alternatifs tels que l'irrigation goutte-à-goutte peuvent être adoptés sans nécessiter la présence de fossés, en particulier lorsque la submersion n'est pas nécessaire. En outre, le fait de ne pas avoir de système de drainage est associé à d'autres pratiques agricoles, notamment l'utilisation d'engrais mixtes et le retournement du sol lors de la préparation et de l'entretien annuel de la vigne. Une explication plausible est que l'absence de drainage permet le retournement du sol sans risquer d'endommager les drains.

Les méthodes d'entretien du sol avec un nombre de passages faible ou modéré sont corrélées avec l'utilisation d'engrais et d'amendements organiques, la pratique de l'enherbement hivernal et le travail superficiel entre les rangées de vigne. Ces pratiques sont en opposition avec l'absence d'enherbement, le travail intensif entre les rangées, l'utilisation exclusive

d'engrais minéraux (engrais et amendements) et un mauvais état des fossés. Les variables correspondantes influencent principalement les deux premières dimensions de l'ACM.

A ce stade de l'analyse, il apparaît une opposition nette entre les approches agricoles simplifiées ou dites "alternatives" et les pratiques agricoles plus traditionnelles. La dégradation des fossés, qui est associée à ces dernières, pourrait s'expliquer par divers facteurs, notamment le manque de temps consacré à l'entretien des fossés ou une détérioration due à des opérations de désherbage excessivement intensives, qui pourraient s'étendre jusqu'aux fossés. Par ailleurs, l'absence de fossés est logiquement associée à l'absence de submersion des îlots, car il est impossible de garantir un apport en eau et un drainage adéquat sans la présence de fossés.

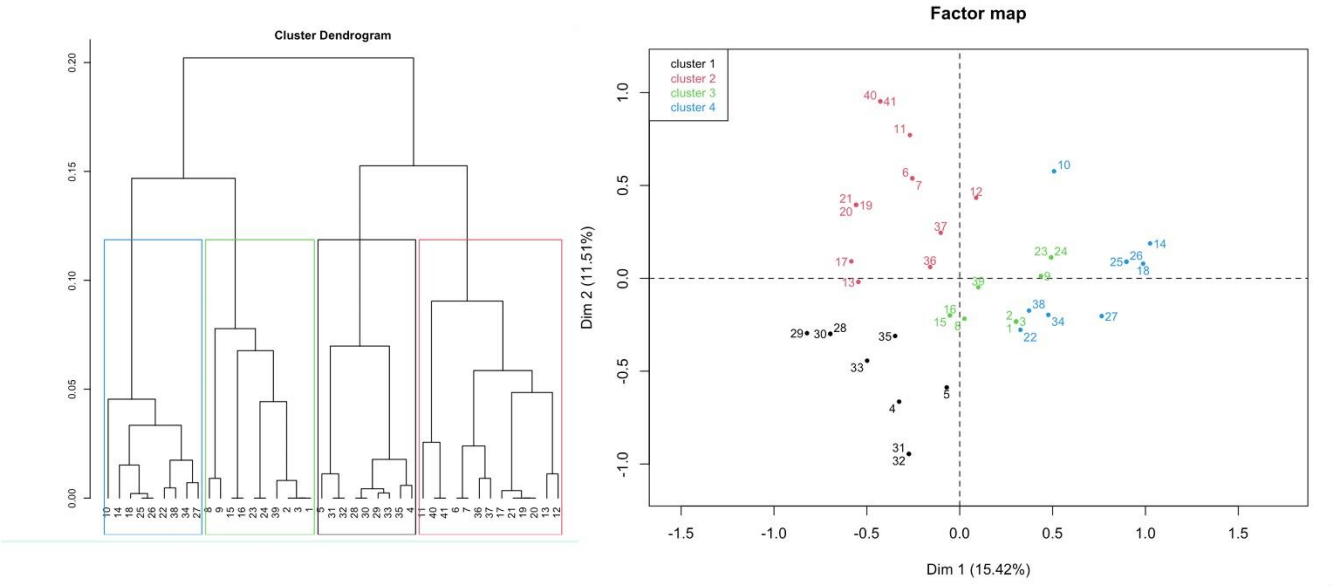


Figure 55 : Dendrogramme issu de la classification ascendante hiérarchique et illustration du découpage en 4 classes

La seconde étape de l'analyse repose sur la Classification Ascendante Hiérarchique qui permet de créer une typologie de pratiques comme indiqué à la Figure 55. La CAH permet de séparer les îlots en groupes en fonction de l'inertie à chaque niveau de séparation. Par volonté de simplifier la comparaison des types, nous regardons quelle inertie relative est la plus grande sur les 6 premiers niveaux de séparation possible. Quatre groupes sont proposés, à ajouter au premier groupe déjà identifié lors de la première ACM.

Le nombre d'individus par groupe est équivalent à l'exception du groupe n°5, identifié par la première ACM, mais représentant une surface d'exploitation comparable comme indiqué au Tableau 12.

Tableau 12 : Nombre d'îlots et surface associée au 5 groupes de pratiques identifiés

Groupe	Nombre d'individus (îlots)	Surface (Ha)
1	10	89,6
2	9	48,0
3	12	54,7
4	10	48,8
5	4	65,7

3.1.2 Description des groupes de pratiques

Chacun des 5 groupes est associé à un qualificatif général pour décrire les pratiques dominantes. Une représentation schématique en fonction de l'intensité du travail du sol et de l'apport en eau réalisés par chaque groupe de viticulteurs ainsi que la localisation des différents îlots classés dans la typologie sont données à la Figure 56.

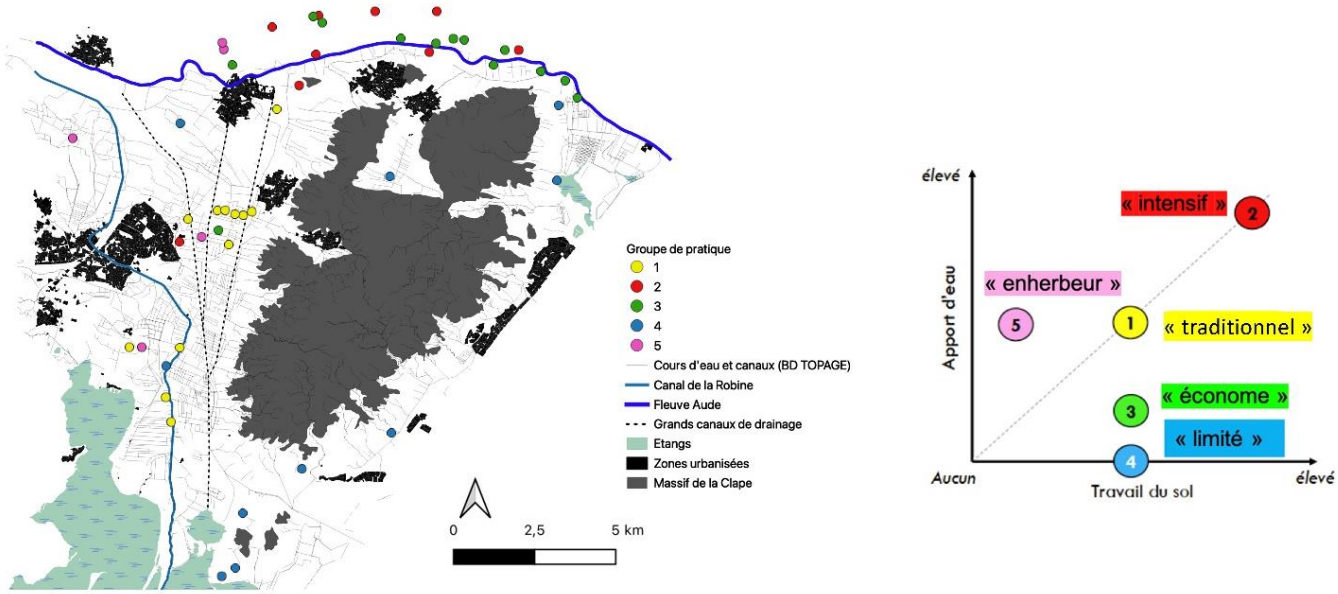


Figure 56 : Localisation des différents groupes de pratiques et représentation en fonction de l'intensité de l'apport en eau et du travail du sol

Afin d'illustrer chaque groupe de pratiques, les principales caractéristiques des exploitations qui le composent, non utilisées dans la construction de la typologie, sont données dans le Tableau 13.

Tableau 13 : Caractéristiques des exploitations viticoles rattachées à chacun des groupes des pratiques identifiés dans la typologie

Groupes	Label	Appellation	Vinification
1	40% sans label 40% HVE3 + Terra Vitis 20% Terra Vitis	60% en IGP 40% en mixte IGP/AOC	100% en coopérative
2	40% sans label 60% HVE3	60% IGP 40% mixte IGP/AOC	100% coopérative
3	100% HVE3	40% IGP 60% mixte IGP/AOC	100% coopérative
4	44,4% sans label, 11,1% HVE3 + Terra Vitis 11,1 % Terra Vitis 33,3% HVE3	22,2% IGP 11,1% AOC 66,6% mixte IGP/AOC	33,3% domaine 55,5% coopérative 11,1% mixte
5	50% sans label 25% Terra Vitis 25% Agriculture Biologique + Demeter	75% IGP 25% mixtes IGP/AOC	25% domaine 75% coopérative

Groupe 1 "Les traditionnels"

Ce groupe de pratiques agricoles se caractérise par le drainage et la submersion systématique des parcelles. L'apport d'eau est effectué par les drains. Le sol n'est jamais retourné avant la plantation des vignes, et l'unique source d'apport en eau provient des opérations de submersion. Les hauteurs d'eau cumulées pour ces submersions varient considérablement, pouvant aller de 100 mm à plus de 400 mm par an.

L'entretien des rangs de vignes dans les parcelles est toujours réalisé de manière mixte, en combinant l'utilisation d'un outil interceps avec l'application d'un herbicide. Sur les inter-rangs, on observe une gamme de fréquences de travail du sol allant de modérée à intensive. Ce groupe se caractérise par un travail du sol sur l'inter-rang profond, mais sans retournement (ou charruage). De plus, les parcelles sont enherbées pendant la saison hivernale.

Toute la production issue des parcelles de ce groupe est destinée à une cave coopérative, principalement pour la production de vin sous l'appellation IGP (Indication Géographique Protégée). Une majorité des parcelles de ce groupe arborent un label certifiant leur engagement dans des pratiques agricoles respectueuses de l'environnement.

Dans l'ensemble, on peut qualifier ce groupe de pratiques de “traditionnel” adoptant un compromis entre des méthodes de travail du sol intensives et des approches simplifiées. Son objectif principal est d'assurer une submersion efficace avec une évacuation rapide de l'eau grâce au drainage des parcelles.

Groupe 2 “Les intensifs”

Les parcelles de ce groupe se distinguent par une intensité élevée du travail du sol, réalisé en profondeur dans les inter-rangs sans recours au charruage. En raison de la fréquence élevée des interventions, le sol demeure nu toute l'année, sans enherbement. Sur les rangs de vignes, l'entretien est effectué de manière mixte, combinant l'utilisation d'un outil interceps avec l'application d’herbicides.

Ce groupe regroupe toutes les parcelles présentant des fossés en mauvais état, sans installation de systèmes de drainage artificiel. Par conséquent, l'approvisionnement en eau lors des opérations de submersion s'effectue en surface, soit par le biais de pompes camarguaises, soit par l'utilisation des fossés. Les hauteurs d'eau cumulées pour les submersions varient de 200 mm à 400 mm par an.

La production provenant des parcelles de ce groupe est destinée à la vinification dans des caves coopératives, principalement pour la production de vin sous l'appellation IGP (Indication Géographique Protégée). De plus, une grande majorité des parcelles de ce groupe sont labellisées Haute Valeur Environnementale (HVE3).

Ce groupe peut être qualifié d’"intensif" en termes de travail du sol, pratiquant la submersion de manière importante et systématique sans recourir à un système de drainage artificiel.

Groupe 3 “Les économes”

Toutes les parcelles de ce groupe sont submergées, avec un apport d'eau en surface et une hauteur d'eau cumulée inférieure à 200 mm par an. En ce qui concerne l'entretien du sol, ce groupe se caractérise par des interventions limitées dans les inter-rangs. L'entretien des rangs de vignes est généralement réalisé de manière chimique, tandis que les inter-rangs sont enherbés pendant la saison hivernale.

Toutes les parcelles du groupe 3 sont soumises à des pratiques agricoles labellisées comme étant respectueuses de l'environnement. La totalité de leur production est destinée à une cave coopérative dans le but de vinifier un produit sous l'appellation IGP (Indication Géographique Protégée) ou AOC (Appellation d'Origine Contrôlée).

Ce groupe peut être qualifié d'"économe" en ce qui concerne l'utilisation de l'eau lors des submersions et le travail du sol. Il est celui qui présente le moins de variables significatives pour le caractériser par rapport aux groupes précédents.

Groupe 4 “les limités”

Les parcelles de ce groupe ne sont pas soumises à des opérations de submersion, et ne possèdent pas de système de drainage enterré. En revanche, ce groupe rassemble les parcelles utilisant une autre forme d'irrigation, notamment le système goutte à goutte.

En ce qui concerne l'entretien du sol, la fréquence des interventions dans les inter-rangs est modérée, et l'entretien des rangs est souvent réalisé de manière mixte. Les vins sont produits à la fois dans des caves coopératives et par des vignerons indépendants. La majorité des exploitations est labellisée HVE3 (Haute Valeur Environnementale de niveau 3) ou certifiée Terra-Vitis. Une grande partie de la production est transformée en vins d'Appellation d'Origine Contrôlée (AOC).

Ce groupe se caractérise principalement par ses pratiques liées à l’apport d’eau, en étant le seul où les parcelles ne sont jamais soumises à des submersions car, le plus souvent, limitées dans leur accès à des réseaux de canaux d’apport d’eau.

Groupe 5 ”les enherbeurs”

Ce groupe se caractérise par la présence d'un enherbement semé ou spontané toute l'année, couvrant au moins la moitié des inter-rangs. La fréquence des travaux effectués dans les inter-rangs est faible. L'entretien des rangs de vignes est généralement mécanique, et les engrais utilisés sont principalement d'origine organique.

Toutes les parcelles de ce groupe sont systématiquement submergées, avec des hauteurs d'eau généralement inférieures à 200 mm cumulées par an. La moitié des îlots de ce groupe fait partie d'exploitations agricoles certifiées en Terra-Vitis ou en Agriculture Biologique ou en Biodynamie. Les pratiques de vinification se déroulent aussi bien en cave coopérative qu'en cave particulière, avec une préférence marquée pour la production de vins sous l'appellation IGP (Indication Géographique Protégée).

On peut qualifier ce groupe d’"enherbeur" en ce qui concerne les pratiques d'entretien du sol, car il favorise l'enherbement et l'utilisation de méthodes mécaniques. Bien que composé d'un petit nombre d'îlots, il occupe une superficie équivalente aux autres groupes

3.2 Perceptions de la salinité par les viticulteurs

Les entretiens semi-directifs ont permis d’extraire près de 180 fragments après analyse des discours. Les entretiens ont abordé deux thèmes principaux concernant d’une part la perception de la salinité au travers des symptômes et des impacts sur la production, et d’autre part la perception de l'évolution de la pression saline durant la dernière décennie. En plus de ces deux thèmes, quatre nouvelles thématiques influençant la salinisation ont émergé : les changements d'itinéraire technique, l'accès à la ressource en eau, les politiques et les normes environnementales, le réchauffement climatique. Au final, 6 thèmes, 2 thèmes principaux et 4 thèmes secondaires apparaissent dans la perception globale du phénomène et peuvent être reliés entre eux comme indiqué à la Figure 57. L'ensemble de ces thèmes constitue les colonnes de la matrice dans laquelle ont été classés les fragments notés au cours des entretiens. Les résultats présentés par la suite se limitent aux deux thèmes principaux.

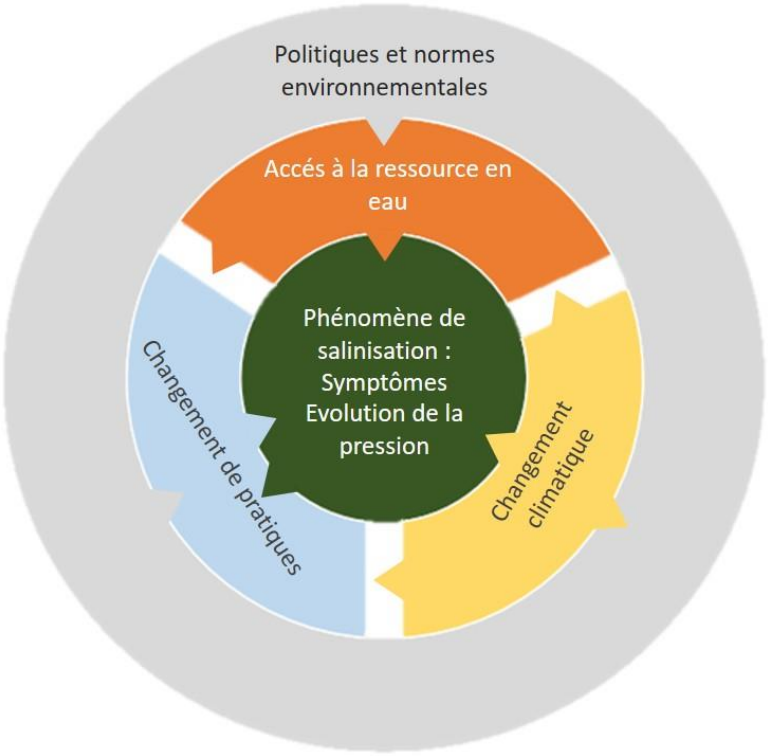


Figure 57 : Représentation des relations entre les 2 thèmes principaux (en vert) et les 4 thèmes secondaires issue des entretiens sur la perception globale du phénomène de salinisation

3.2.1 Perceptions des symptômes

La majorité des viticulteurs perçoivent des manifestations de la salinité dans leurs vignobles sous diverses formes qui peuvent être regroupées en plusieurs catégories comme illustré à la Figure 58.

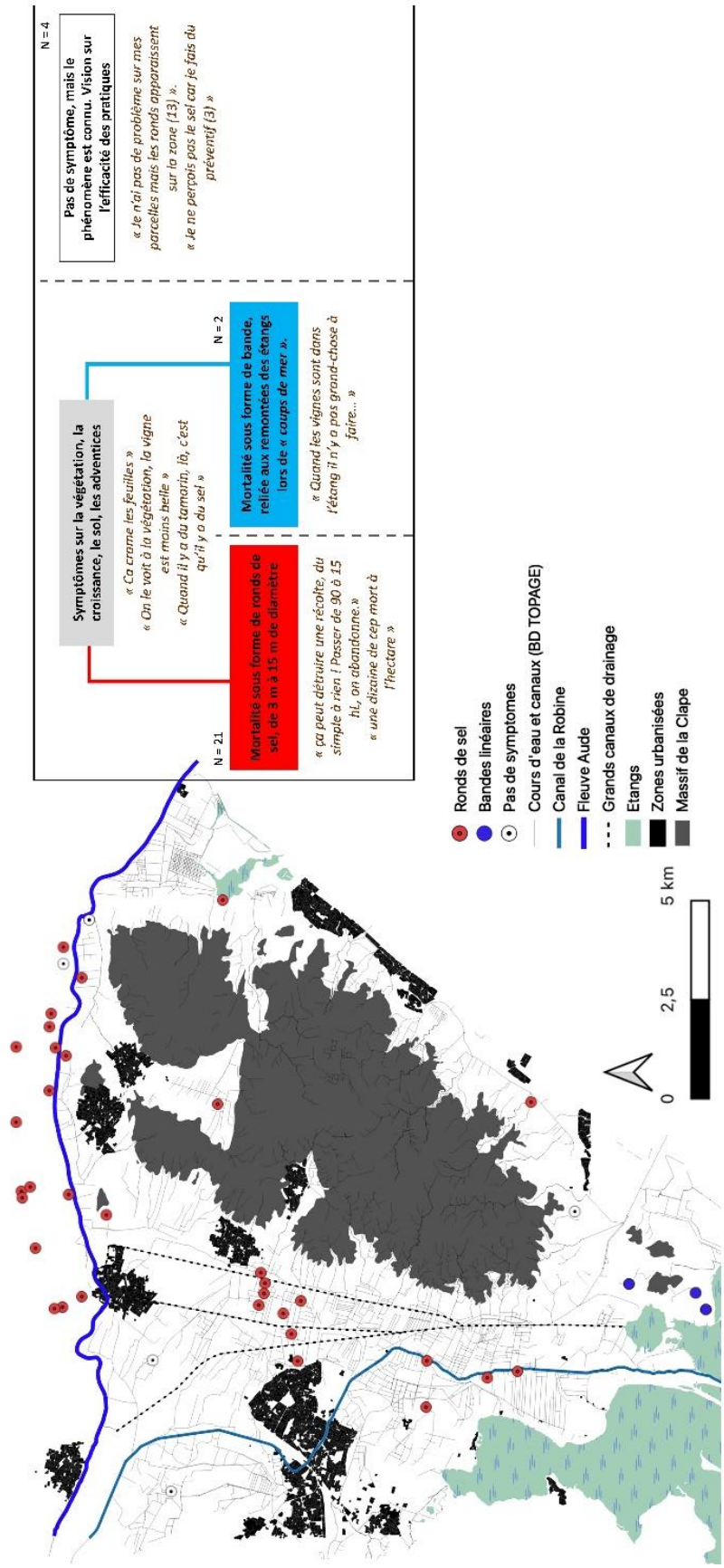


Figure 58 : Catégories de perception des manifestations de la salinité (en italique, les fragments originaux et N, le nombre de fragments) et localisation associée

Tout d'abord, les symptômes les plus couramment observés affectent la végétation et la croissance de la vigne. Ils se traduisent par des signes tels que la coloration rouge sur le des bords des feuilles, la grillure des feuilles, la diminution de la surface foliaire totale, le dépérissement de la plante.

Dans l'ensemble, l'implantation des jeunes plants de vigne est souvent considérée comme très difficile en présence de sols salés avec une mortalité élevée. Un ralentissement significatif de la croissance de la vigne est une manifestation majeure, souvent imputée à une implantation défavorable du système racinaire, induite par la présence de sel dans le profil du sol.

La mortalité des ceps de vigne est plusieurs fois perçue sous forme de ronds de sel, d'un diamètre variant de 3 à 15 mètres. Dans les autres cas, la mortalité prend une forme plus dispersée, ou en bande linéaire en fonction du relief de la parcelle ou de la présence de drains. Dans ce cas, les parcelles situées à des altitudes plus basses sont perçues comme plus susceptibles d'être touchées. En bordure d'étangs, les fragments de discours indiquent des symptômes sur la végétation et la croissance, de manière très localisée, principalement dans les parties exposées aux *"coups de mer"*, qui correspondent à des remontées d'eau des étangs dans les canaux de drainage.

De manière plus marginale, les symptômes de la salinité se manifestent au niveau du sol lui-même. Il est déclaré l'apparition en surface de fissures, de craquèlements et de tâches blanchâtres de sel. La salinité du sol peut également se refléter dans la végétation environnante, en particulier dans la présence d'adventices : *"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 !".*

Les pertes de rendement sont fréquemment associées à ces symptômes liés à la salinité, avec des qualifications allant de faible à négligeable dans certains cas, à des pertes substantielles atteignant 20% à 30% du rendement prévu (généralement fixé à 90 hectolitres par hectare). Les pertes les plus sévères, bien que plus rares, peuvent atteindre jusqu'à 80% de la récolte, ce qui parfois conduit à l'abandon de la culture sur la parcelle : *"Ça peut détruire une récolte, du simple à rien ! de 90 à 15 hL, on abandonne."*

Enfin, une part des individus ne perçoit pas d'impact significatif de la salinité. Les symptômes sont soit absents, soit à peine perceptibles, et aucune perte de production n'est attribuée au

sel. Néanmoins, le phénomène est généralement reconnu comme une menace potentielle, et l'efficacité des pratiques agricoles préventives est généralement citée comme une justification de l'absence de symptômes ressentis : *"Je ne perçois pas le sel car je fais du préventif*".

3.2.2 Perceptions de l'évolution de la pression saline

Les perceptions de l'évolution rétrospective de la salinité sur la dernière décennie, issues des fragments de discours, ont été catégorisées comme indiqué à la Figure 59. Deux grands types de perception de l'évolution de la salinité existent : une évolution marquée ou pas d'évolution.

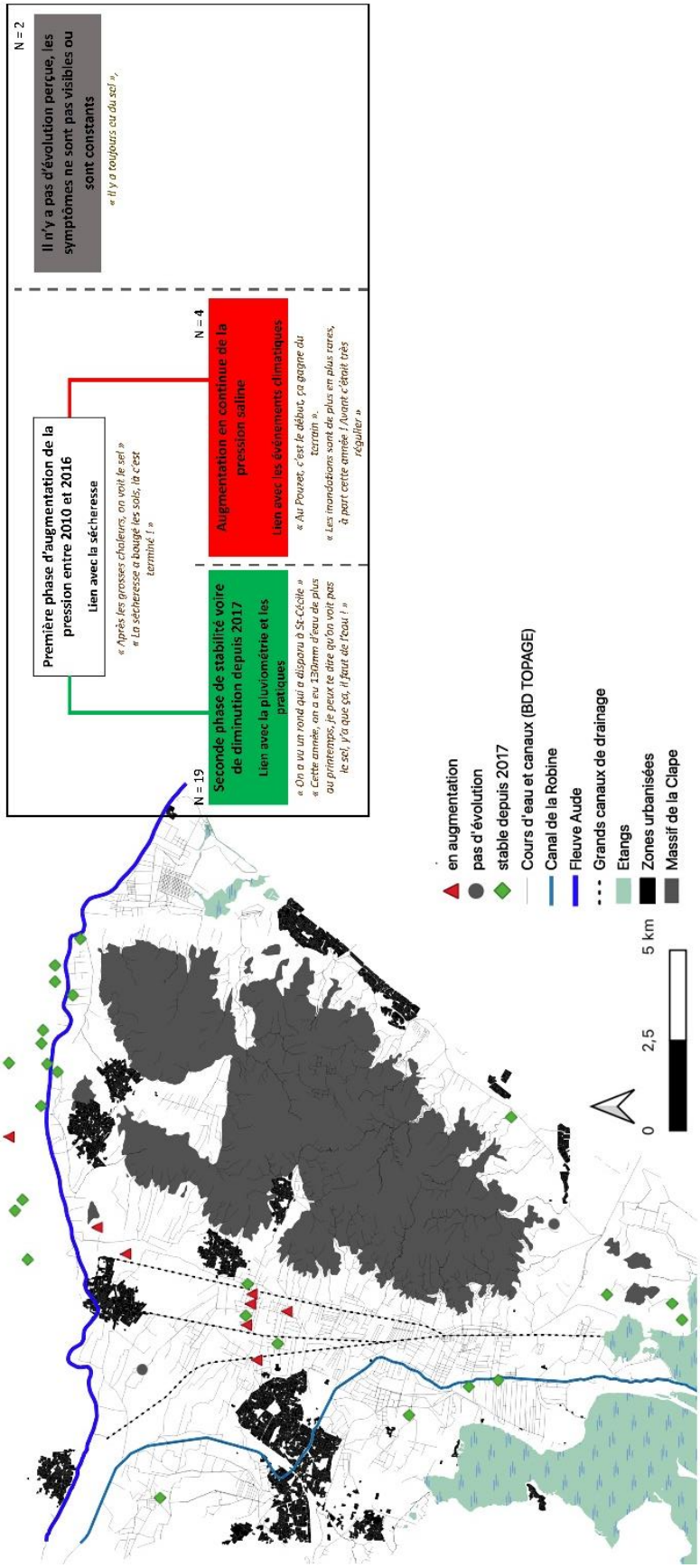


Figure 59 : Catégories de perception de l'évolution de la salinité (en italique, les fragments originaux et N, le nombre de fragments) et localisation associée

Un groupe important de viticulteurs perçoivent tout d'abord une première phase d'augmentation des symptômes de la pression saline. Bien que pour certains, le phénomène soit présent de longue date, *"il y a toujours eu du sel dans la Basse-Plaine"*, l'émergence d'un "*problème*" lié au sel semble avoir débuté entre 2010 et 2016 (la date de 2015 est mentionnée à cinq reprises comme une date importante). Les explications fournies pour expliquer cette période de forte augmentation de la pression sont liées à des événements climatiques, à des périodes de sécheresse et de stress hydrique, ainsi qu'au réchauffement climatique : *"Après les fortes chaleurs, on observe l'apparition du sel"*, *"La sécheresse a perturbé les sols, et c'est devenu un problème irréversible", "Les changements climatiques ont eu un impact sur la salinité des sols"*.

On constate la formation de deux sous-groupes de perception distincts par rapport à l'année 2016. Un premier groupe perçoit une phase de stabilité de la pression depuis 2016-2017, voire une diminution. Les précipitations accrues sont évoquées comme explication : les années de pluies abondantes ont été moins sujettes à la pression saline, *"Il y a moins de sel depuis 3 ans", "Nous avons vu une reprise de la végétation sur d'anciens cercles de sel, ils ont complètement disparu à St-Cécile", "Cette année, nous avons reçu 130 mm d'eau de plus au printemps, et je peux vous assurer que nous ne voyons pas de sel. L'eau est essentielle !".*

Un second sous-groupe perçoit une augmentation continue de la pression saline depuis 2010 jusqu'à aujourd'hui, *"Nous constatons de plus en plus de zones touchées par le sel", "Au Pouzet, c'est un début, le problème gagne du terrain".* Cette augmentation est souvent attribuée à la rareté des inondations naturelles : *"Les inondations sont devenues de plus en plus rares, sauf cette année ! Auparavant, elles étaient fréquentes"*, ou aux pratiques de submersion : *"Nous avons clairement observé que le problème du sel est lié à la réduction des submersions et à l'augmentation de la pression saline."*

Enfin, un dernier groupe ne perçoit pas d'évolution de la salinité sur les dernières décennies. Dans ce cas, soit la salinité ne conduit pas à des symptômes visibles, soit la salinité est considérée comme stable et présente de plus longue date, *"Il y a toujours eu du sel"*.

3.3 Etat de la salinité mesurée

Un total de 43 îlots sur les 45 îlots enquêtés a été échantillonné. Les moyennes des mesures de salinité sur l'ensemble du profil de sol (0 à 120 cm), rapportées aux standards d'extraits de pâte saturée (CE_{sp}), révèlent une gamme allant de sols non salés (22 îlots avec CE_{sp} comprise entre 0 et 2 $mS.cm^{-1}$), moyennement salés (16 îlots avec CE_{sp} comprise entre 2 et 4 $mS.cm^{-1}$) à salés (5 îlots avec CE_{sp} comprise entre 4 et 8 $mS.cm^{-1}$).

Les moyennes d'CE_{sp} sur 0-40 cm et 90-120 cm sont représentées de manière cartographique à la Figure 60. On constate que les valeurs sont globalement plus élevées en profondeur. De plus, ce n'est pas exactement le même motif qui apparaît entre surface et profondeur.

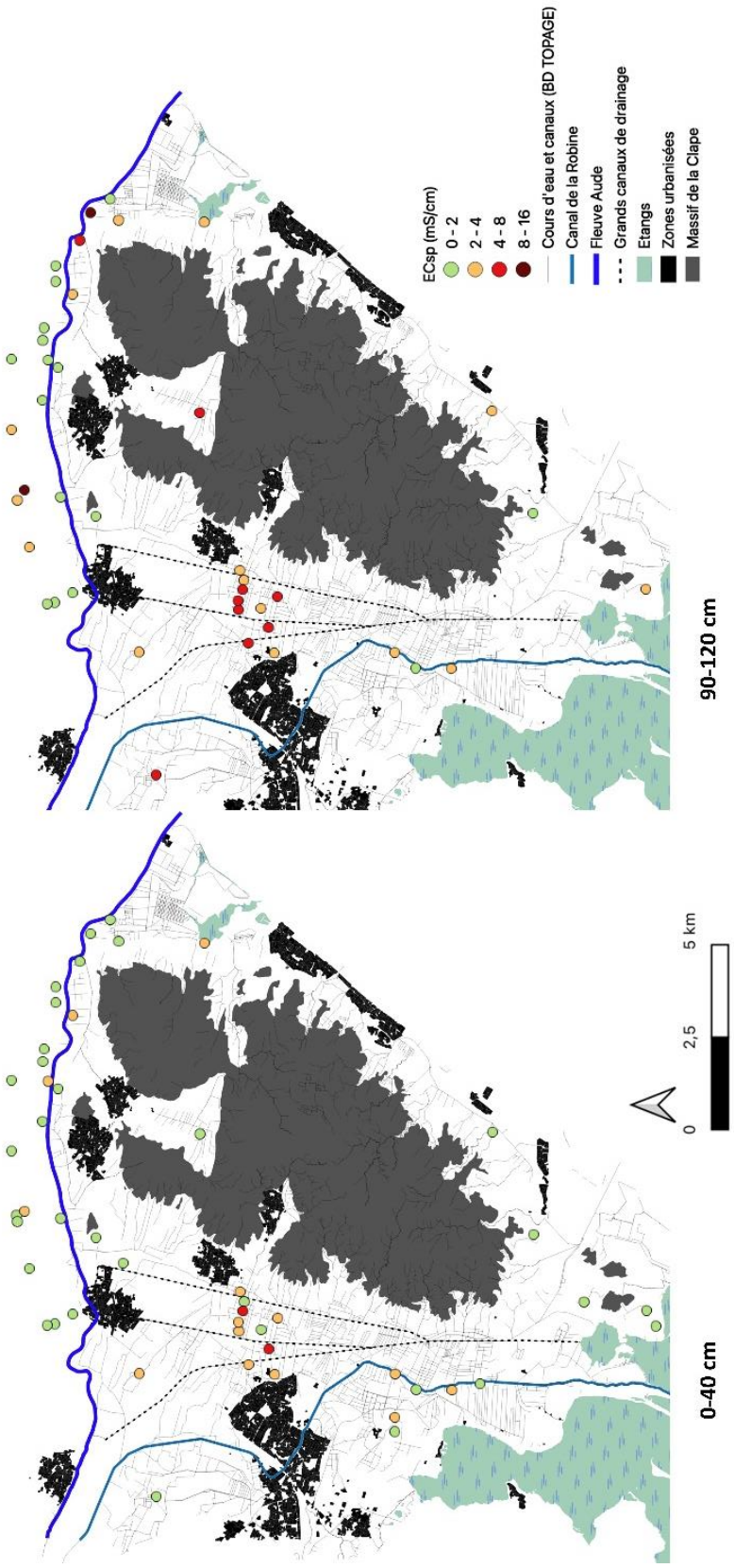


Figure 60 : Salinité des sols des différents îlots échantillonnés. Conductivité électrique équivalent d'extrait de pâte saturée (EC_{sp}) moyenne des échantillons prélevés entre 0 et 40 cm (à gauche) et entre 90 et 120 cm (à droite)

Les valeurs de salinité mesurées sur l'ensemble du profil de sol regroupées par type de pratique sont montrées au Tableau 14. Le test non paramétrique de Dunn montre des différences significatives de salinités entre groupes : le groupe 2 ("les intensifs") présentent les salinités les plus basses (1,5 $mS.cm^{-1}$ en moyenne avec une médiane à 1,3 $mS.cm^{-1}$) alors que les groupes 1 ("les traditionnels") et 5 ("les enherbeurs") présentent les salinités les plus élevées (respectivement 3,1 et 5,0 $mS.cm^{-1}$ en moyenne et des médianes de 2,75 et 2,1 $mS.cm^{-1}$). Les groupes 3 ("les économes") et 4 ("les limités") présentent des salinités intermédiaires (respectivement 2,4 et 2,0 $mS.cm^{-1}$ en moyenne et des médianes de 1,6 et 1,7 $mS.cm^{-1}$).

Tableau 14 : Salinité des sols en fonction des groupes de pratiques. Les EC_{sp} minimum, maximum, médiane, des 1er et 3ème quartiles, moyenne et écarts types sont exprimées en $mS.cm^{-1}$

Groupes de pratiques	N	Min	Max	Médiane	Q1	Q3	Moyenne	Ecart-type	Test de Dunn
1	45	0.61	6.379	2.750	1.980	4.330	3.062	1.576	a
2	36	0.68	3.900	1.340	1.205	1.587	1.525	0.675	b
3	52	0.76	9.690	1.620	1.205	2.840	2.455	2.042	ab
4	37	0.84	6.600	1.700	1.294	2.340	1.986	1.112	ab
5	20	1.10	28.375	2.071	1.298	4.571	5.011	7.559	a

Enfin les mesures de salinité ont été confrontées aux différentes catégories de perception des symptômes et d'évolution temporelle de la salinité. Le test de Dunn ne révèle pas de différences significatives entre les différents groupes de perception. Ce résultat est toutefois à considérer sachant que les effectifs des différentes catégories de perception sont très hétérogènes avec des catégories très fortement représentées (symptômes de ronds de sels et évolution en augmentation puis stable depuis 2017) devant les autres, ce qui peut entraîner la non-significativité des tests statistiques.

4. Discussion

Les résultats montrent que les interrelations entre pratiques, perceptions et réalité actuelle de la salinité ne sont pas simples et sont discutées par la suite. Le lien entre pratiques et

perceptions est tout d'abord analysé. Puis, une proposition de synthèse entre les trois dimensions étudiées est réalisée sur la base d'une entrée spatiale. Les implications pour la gestion du territoire sont ensuite avancées comme perspectives. Enfin, un retour sur le type d'approche conduite est proposé.

4.1 Pratiques et perceptions de la salinité

Les résultats ont montré 5 groupes de pratiques, 3 types de perceptions des symptômes liés à la salinité et 3 types de perceptions liés à l'évolution passée de la salinité. Les correspondances entre pratiques et perceptions peuvent être explorées par une ACM sur les 25 îlots sur lesquels les informations sont simultanément disponibles (Figure 61).

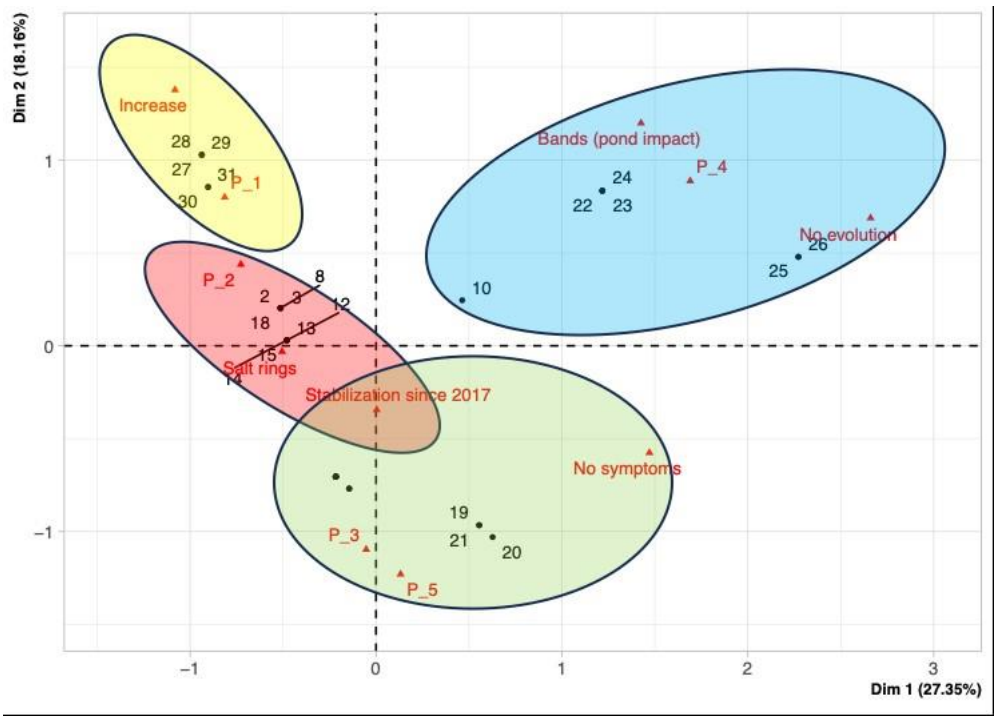


Figure 61 : Résultat de l'ACM sur les groupes de pratiques et les catégories de perceptions sur les deux premiers axes.

Les triangles rouges représentent les différentes modalités : Salt ring = Ronds de sel, Bands = mortalité en bandes alignées), No symptoms = pas de symptômes) et les catégories de perception de l'évolution temporelle de la salinité (Increase = Augmentation, Stabilisation since 2017 = augmentation et stabilisation depuis 2017, No evolution = pas d'évolution).

Les points noirs représentent la position des différents îlots.

L’ACM montre que les viticulteurs des groupes de pratique 1 et 2 partagent une perception commune de l'augmentation de la pression liée à la salinisation et se considèrent affectés par les symptômes en "ronds de sel". Ces groupes utilisent les volumes d'eau les plus élevés pour submerger leurs parcelles qui sont situées en zone de plaine, majoritairement en bordure de l’Aude pour le groupe 2 et dans le cœur de la basse-plaine pour le groupe 1.

Le groupe 4 perçoit soit des symptômes en bandes linéaires causés par les "coups de mer", soit l'absence de symptômes, avec une absence d'évolution de la pression saline. Ce groupe 4, où sont regroupés principalement des îlots situés sur les bas de pentes du massif de la Clape, n’a pas accès aux conditions pour les submersions.

Les groupes 3 et 5 perçoivent une stabilité de la pression depuis 2016-2017 et plutôt peu de symptômes. Cette proximité de perception n’est ni associée à une proximité de pratiques, ni à une proximité géographique : le groupe 3 (“les économes”) recours à des apports faibles, un travail du sol intermédiaire et se trouve en bordure de l’Aude alors que le groupe 5 (“les enherbeurs”) recours plus aux apports d’eau, peu au travail du sol et se retrouvent dans toutes les sous-zones de la basse plaine.

4.2 Synthèse Pratiques - Perceptions - Salinité

Une synthèse sur l’ensemble des résultats sur la base d’une entrée par unité de paysage est proposée à la Figure 62. Les blocs schématiques dessinés indiquent les principales caractéristiques du paysage dans lesquelles se retrouvent les groupes de pratiques et les encadrés résument les conditions de salinité et les catégories de perceptions associées.

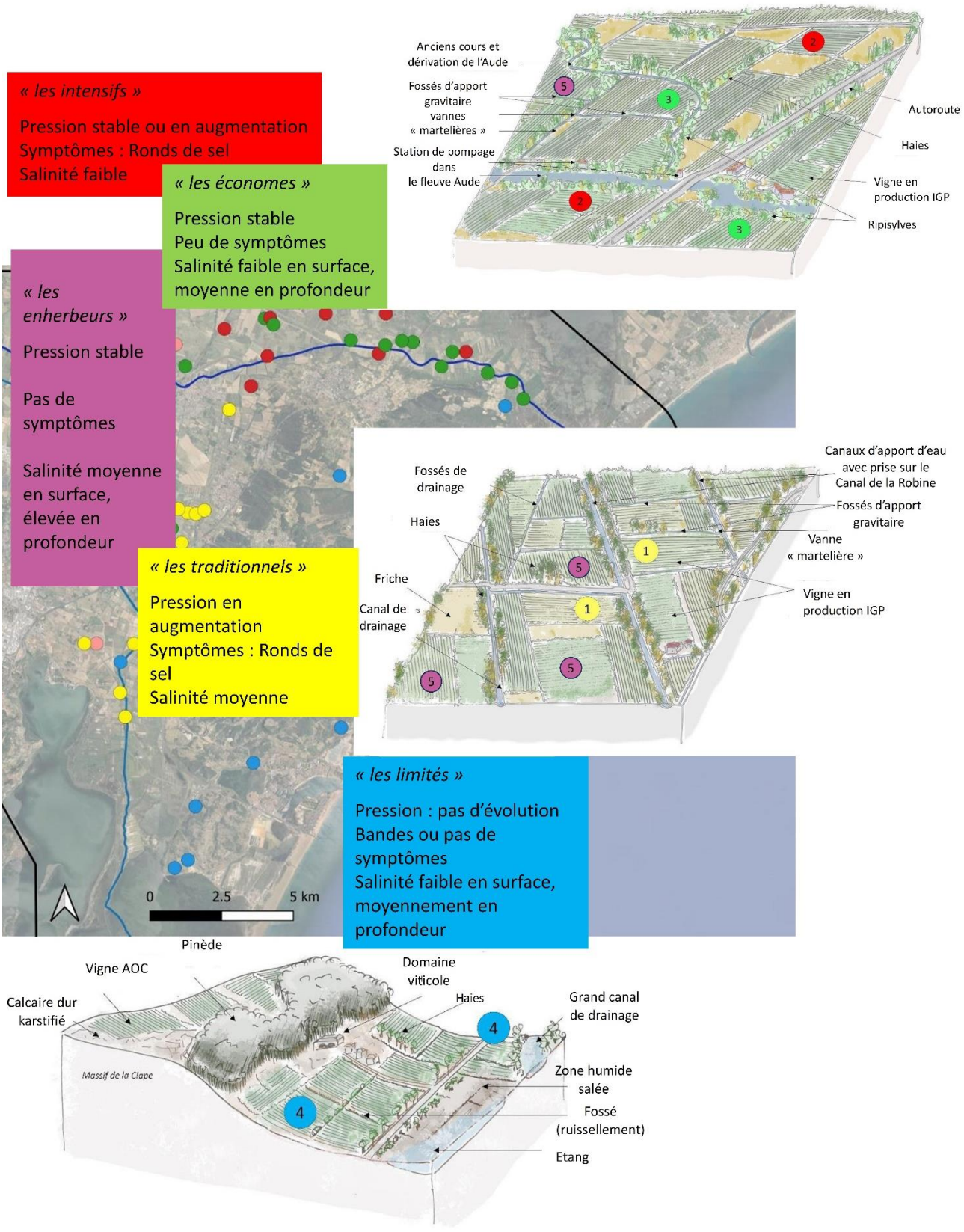


Figure 62 : Synthèse des résultats obtenus sur la salinité mesurée, les pratiques et les perceptions liées à la salinité (aquarelles réalisées par F.Bergé (Bergé, 2020)

Le groupe 1 est exclusivement présent dans la basse-plaine, sur des Fluvisols rédoxiques, à l'ouest de Vinassan dans un couloir entre Narbonne et le massif de la Clape. Ce groupe pratique au moins une submersion hivernale avec une eau provenant du système du Canal de la Robine et se trouve dans la moyenne pour l'intensité du travail du sol. Malgré ces pratiques qui correspondent aux pratiques majoritaires dans les 40-50 dernières années, la salinité réelle des sols est moyenne (dépassant le seuil de sensibilité de la vigne de 2 $mS.cm^{-1}$ dans de nombreux îlots) ; elle est perçue comme en augmentation et à l'origine de la mortalité sous forme de ronds de sel.

Les groupes 2 ("les intensifs") et 3 ("les économes") se retrouvent dans les mêmes conditions de sol et de paysage sur les communes de Coursan, Salles d'Aude et Fleury d'Aude. Par rapport au paysage de plaine précédent, la différence majeure est la présence du fleuve de l'Aude et de ripisylves associées plus étendues. L'Aude permet d'alimenter directement en eau les parcelles grâce à des stations de pompage positionnées le long du fleuve. Bien que situés dans un même paysage, les groupes 2 et 3 diffèrent fortement en termes de pratique, de perceptions et de conditions de salinité. Pour le groupe 2, les très forts apports d'eau, rendus possibles par la proximité du fleuve, permettent de maintenir la salinité à des niveaux bas en surface et en profondeur. Malgré ces niveaux bas de salinité, les perceptions indiquent des symptômes de mortalité et une pression stable ou en augmentation. On peut interpréter que de la mortalité localisée dans les parcelles entraîne une perception de pression saline qui conduit à un très fort apport d'eau (et une intensité forte de travail du sol). Cet apport conduit à maintenir des niveaux bas de salinité. Les choix des viticulteurs du groupe 3 sont différents, avec moins d'apport d'eau et moins de travail du sol et un enherbement hivernal. Si l'évolution de la salinité est perçue comme stable, assez comparable avec celle du groupe 2, il n'y a par contre pas d'évocation de symptômes liés à la salinité. Ce point semble cohérent avec les faibles salinités mesurées en surface.

Les îlots du groupe 4 sont localisés sur les colluviosols de bas de pentes du massif de la Clape jusqu'aux Fluviosols réductiques et Sali-sodisols des abords des étangs de Vendres en rive gauche du l'Aude ou de Campignol au sud de la basse-plaine. Le faible accès à la ressource en eau douce conditionne les pratiques agricoles. Sur ces terres, les rendements sont plus faibles et la valorisation des vins différente par rapport aux deux premiers paysages de plaine. Les symptômes liés à la salinité, quand ils sont perçus, sont associés à une mortalité en bandes

avec une salinité globalement faible en surface mais qui peut être moyenne à forte en profondeur. Il semble donc que la problématique de la salinité est dans ce cas liée à la proximité directe des sources de sels provenant de la mer via les étangs ou à des sols pédogénétiquement salés.

Le groupe 5 se distingue des autres groupes. Présent dans tous les paysages de plaine sur des Fluvisols rédoxiques, il ne semble pas dépendre d'une organisation spatiale à la même échelle que les groupes précédents. Les apports d'eau, garantis par le système du Canal de la Robine ou le pompage direct dans le fleuve Aude, sont comparables avec ceux du groupe 2. Par contre, ce groupe est le seul à pratiquer un enherbement permanent important, en lien, en particulier, avec le manque de main d'œuvre et/ou de temps à consacrer au travail du sol. Il ne perçoit pas de symptômes ni d'évolutions de la pression liés à la salinité. Cela est cohérent avec la faible salinité des sols en surface, même si les salinités en profondeur sont les plus élevées mesurées sur la zone d'étude.

4.3 Implications pour la gestion de la salinité dans le territoire

La démarche suivie consistait à rechercher des groupes d'individus ressemblants pour faire émerger des types. A la marge de ces grands types, il serait possible d'identifier des individus utilisant des combinaisons de pratiques et exprimant des perceptions singulières. La diversité illustrée par les 5 groupes de pratiques peut être interprétée comme un atout du territoire en termes d'adaptation face à la contrainte de la salinité et de son évolution future. Il est possible de penser que des échanges et des retours d'expérience entre ces différents groupes pourraient faire émerger de nouvelles combinaisons de pratiques, déjà existantes et donc partiellement éprouvées, pour faire face à la salinité.

A partir de l'analyse de la situation actuelle, il est possible de tenter de se projeter dans le futur pour essayer d'évaluer les contraintes que pourraient subir les systèmes actuels et leur adaptabilité.

Les groupes 1 ("les traditionnels") et 2 ("les intensifs") semblent issus de la même logique de pratique basée sur un travail du sol important et des apports d'eau par submersion. Ils se différencient par le fait que le groupe 1 dispose d'un accès à l'eau plus important qu'il utilise

massivement quand le groupe 1 est limité par la capacité du système du Canal de la Robine à fournir de l'eau. Dans le cas de ce groupe 1, la salinité des sols est d'ores et déjà supérieure au seuil de sensibilité de la vigne (2 $mS.cm^{-1}$) en surface et en profondeur. Sachant que l'apport d'eau via le Canal de la Robine va très probablement décroitre à l'avenir, la généralisation de ce système de production paraît donc impossible et sa pérennité menacée. Concernant le groupe 2, les submersions par apports d'eau très élevés qui ont pour conséquence de maintenir la salinité des sols à des niveaux bas dépendent de la capacité de pompage direct dans le fleuve Aude. Or la disponibilité de cette ressource va, en période de printemps-été, diminuer dans l'avenir. Dans les deux cas, le recours à la submersion est incontournable pour maintenir la pression saline, et ces systèmes de production vont devoir évoluer : soit vers un maintien des pratiques sur des surfaces plus limitées, soit vers d'autres pratiques.

La mortalité en bande se trouve localisée dans les zones particulières de bas de pente et proche des étangs et directement associée à la proximité de la mer. Les conditions actuelles de production risquent d'être confrontées à la hausse du niveau des mers. Un reconfiguration d'une partie des parcelles, avec un repositionnement sur des zones plus élevées et un abandon des zones les plus basses, sera probablement le seul moyen de s'adapter à ce changement.

Les groupes 3 ("les économes") et 5 ("les enherbeurs") sont très proches en termes de perceptions des symptômes et de l'évolution de la salinité alors qu'ils adoptent des pratiques différentes. Le groupe 3 a peu recours aux apports d'eau et travaille beaucoup les sols sans laisser de place à l'enherbement. Le groupe 5 au contraire pratique l'enherbement et recours à des apports d'eau pour la submersion. Ces stratégies plutôt nouvelles dans la basse-plaine sont associées à des perceptions de la salinité qui ne sont pas pessimistes et les îlots correspondants présentent aujourd'hui de faibles salinités de sols en surface. A ces titres, ces groupes peuvent constituer des exemples inspirants pour les groupes 1 et 2 confrontés à la nécessité de changement. Toutefois, la salinité des sols en profondeur est élevée. Il conviendrait donc d'approfondir la compréhension de la dynamique sur plusieurs années afin de savoir si ces conditions salines en profondeur sont la conséquence d'un déficit de recharge des nappes qui pourrait à terme conduire à une salinité des sols importante en surface.

4.4 Intérêt d’une approche intégrée entre salinité, pratiques, perceptions

Ce chapitre visait à explorer les relations entre la perception de la salinité, les pratiques agricoles et la salinité réelle du sol. Il existe un corpus bibliographique qui traite de ces dimensions prises deux à deux mais peu (ou pas) abordent les trois simultanément. Des recherches ont démontré que la perception de la salinité du sol peut être influencée par des facteurs subjectifs tels que l'expérience personnelle et les connaissances préalables des agriculteurs (Roussy et al., 2015; Weiss et al., 2006). Des résultats sur les perceptions de la salinité montrent que des différences significatives peuvent exister entre la salinité réelle du sol et la perception de la salinité par les agriculteurs (Ali, 2003). Des auteurs suggèrent que la perception de la salinité du sol peut influencer les décisions agricoles, telles que le choix des cultures, des pratiques d'irrigation et l'utilisation de d’intrants chimiques (Jumman et al., 2021). Les agriculteurs peuvent adopter des stratégies de gestion spécifiques en réponse à leur perception de la salinité, ce qui peut potentiellement affecter la productivité des cultures et la santé du sol (Islam et al., 2020). Des recherches indiquent que certaines pratiques de lutte contre la salinité, telles que l'irrigation peuvent temporairement réduire la concentration de sel dans le sol, ce qui peut altérer la perception des agriculteurs concernant la salinité réelle du sol (Machado & Serralheiro, 2017). Ces pratiques peuvent cependant masquer la présence de salinité, ce qui complique l'évaluation précise de la salinité du sol. Plusieurs études ont souligné le lien entre les pratiques agricoles, telles que l'irrigation intensive et l'utilisation excessive d'engrais, et l'augmentation de la salinité du sol (Chen et al., 2010). Ces pratiques peuvent entraîner une accumulation de sels dans le sol, ce qui peut affecter négativement la productivité des cultures et la durabilité des terres agricoles (Shrivastava & Kumar, 2015). Des recherches récentes suggèrent qu'il existe un écart entre les pratiques agricoles actuelles et les niveaux de salinité réels des sols, ce qui suggère que certaines pratiques peuvent ne pas être adaptées pour gérer efficacement la salinité (Li et al., 2022). Les auteurs signalent alors qu’il est crucial d'améliorer la sensibilisation des agriculteurs aux niveaux réels de salinité du sol et d'encourager l'adoption de pratiques agricoles adaptées à ces conditions spécifiques.

Les relations entre pratiques, perceptions et salinité sont complexes à analyser car elles sont à la fois des causes et des conséquences les unes des autres. Il est pourtant fondamental de les comprendre pour espérer produire des conseils utiles et adoptables. Dans cette recherche, l’entrée spatiale, par type de paysage, s’est avérée être un bon moyen de mieux comprendre

et d'expliquer ces relations. Cette identification des unités fonctionnelles de paysage peut donc probablement être une bonne clé pour décliner la gestion du territoire sur des espaces plus limités mais disposant de logiques de fonctionnement biophysique communes.

5. Conclusion

Ce chapitre a permis de caractériser 5 grands types de pratiques viticoles positionnées sur des gradients d'apports d'eau et d'entretien du sol, 3 catégories de perception de la salinité au travers de symptômes et 3 catégories de perception de l'évolution récente de la salinité. Ces résultats ont été validés par les acteurs et en particulier les viticulteurs du territoire.

La confrontation de la salinité réelle avec les pratiques et les perceptions représentait un défi pluri-disciplinaire aux niveaux méthodologique et dans l'interprétation des résultats. Cette confrontation montre que la salinité réelle s'échelonne significativement suivant les types de pratiques et que les types de pratiques sont en correspondance avec des catégories de perception différentes. Par contre, les différences de salinité entre les catégories de perception ne sont pas directement significatives. Le croisement entre les trois dimensions investiguées prend du sens à l'aide d'une analyse par unité de paysage (plaine de bord de fleuve, basse-plaine, pied de versant et abords d'étang).

L'analyse des résultats montre une diversité d'associations entre pratiques, perceptions et salinité qui constitue une opportunité pour l'adaptation du territoire au phénomène de salinisation en lien avec le changement climatique. Elle permet en effet d'identifier des situations qui ne pourront probablement pas perdurer en l'état et des situations qui pourraient constituer la base d'échanges pour une évolution des pratiques dans le futur.

Une limite importante de ce travail réside dans l'aspect statique du diagnostic qui est porté. Mis à part, la perception de l'évolution de la salinité sur la dernière décennie, les autres éléments étudiés (pratiques, salinité, symptômes) sont informatifs de l'état actuel. Poursuivre ce type de recherches en intégrant un aspect dynamique serait important et permettrait de renforcer les conclusions sur la résilience et les conditions de déséquilibre des systèmes viticoles face à l'évolution de la salinité.

Conclusion

Conclusion

Face aux enjeux environnementaux qui concernent les territoires littoraux méditerranéens, comme la Basse Plaine de l'Aude, territoire particulièrement impacté par la salinisation des eaux et des sols dans ses composantes agricole et naturelle, les objectifs généraux de ce travail de Thèse était de caractériser l'état de la salinité, d'identifier les facteurs explicatifs de sa variabilité spatiale et temporelle, et de comprendre les logiques d'action et de gestion qui ont été mises en place à différentes échelles et d'analyser leurs effets. Ce travail de thèse est caractérisé par la mise en place d'une approche multidisciplinaire entre hydrologie, science du sol et agronomie et multi-échelle, de la parcelle au territoire, sur un état actuel et sur un temps long. Cette approche a été menée dans le but d'intégrer les connaissances existantes dans la bibliographie sur les processus à l'échelle locale d'une part dans une analyse spatiale à l'échelle du territoire et d'autre part dans une analyse chrono-systémique permettant de considérer une trajectoire d'évolution allant de la mise en place de la Basse Plaine jusqu'à son état actuel.

Cette approche méthodologique a impliqué de constituer et d'analyser un jeu de données de nature très diversifiée, allant de mesures quantitatives et normalisées (comme la conductivité électrique des solutions), à l'exploitation de documents historiques (cartographie et bibliographie), à des enquêtes de terrain auprès d'acteurs du territoire, et des éléments plus qualitatifs concernant la perception de la salinité sur la zone d'étude. Si la collecte des données relève d'un défi en soi, le croisement de l'information se révèle en être un autre. Le large jeu de données « sol » récoltées dans cette étude comprend 1615 échantillons de sol répartis en profondeur (jusqu'à 1m20) sur 414 positions géographiques dont 15 points suivis durant 4 ans, 15 faisant l'objet de prélèvements profonds (jusqu'à 4m), enfin 13 parcelles ont fait l'objet de prélèvements régulier à courte distance. De nombreux paramètres physico-chimiques ont été relevés pour chaque prélèvements (couleur, humidité, texture, hydromorphie, pierrosité, occupation du sol, conductivité électrique, concentrations ioniques en Na^+, Ca^{2+}, Cl^- et K^+) et 32 échantillons ont fait l'objet d'analyse en laboratoire permettant d'obtenir la matière organique, la granulométrie, le calcaire actif, le pHCo, les concentrations

en cations échangeables et la conductivité électrique. D'autre part, le jeu de données « eau » comprend l'échantillonnage des eaux de surface sur 43 points (Aude, Robine et canaux collecteurs) et des eaux profondes sur une près de 100 ouvrages, sur 3 campagnes de mesures. Une quinzaine de prélèvements d'eau ont fait l'objet d'analyses géochimiques. Sans compter un jeu de données à l'échelle de «l' îlot parcellaire » qui comprend les informations, issues des enquêtes réalisées auprès d'agriculteurs, relatives aux pratiques agricoles appliquées dans la zone d'étude sur un échantillon de 45 îlots (groupes de parcelles d'un même viticulteur ayant des pratiques culturales communes) ainsi que la perception du phénomène de salinisation des 28 viticulteurs enquêtés.

L'état des lieux de la salinité dans la zone d'étude a montré une grande variabilité de la salinité dans l'espace, caractérisé par une importante diversité de situations, allant de conditions non salées (CE_{sp} < 2 mS.cm^{-1}) à très salées (CE_{sp} > 16 mS.cm^{-1}). Cette variabilité apparaît globalement structurée avec des mesures de salinité en surface marquées par un effet parcellaire qui a tendance à s'estomper avec la profondeur. Par ailleurs, les dynamiques temporelles étudiées montrent des variations de salinité des sols entre années sèches et années humides, et à l'échelle parcellaire, des variations liées aux pratiques de submersion (effet avant/après submersion). Toutefois, ces variations temporelles sont faibles devant les variations spatiales. Ainsi, le phénomène de salinisation ou de désalinisation doit être envisagé et suivi sur des temps longs de l'ordre de la décennie.

La salinité d'origine marine des sols suit en première approche des gradients en fonction des variables du paysage. Elle croît lorsque les altitudes décroissent. La salinité varie en fonction du type de sol, avec une salinité particulièrement élevée pour les salisols réductiques avec 34,2 mS.cm^{-1} en surface et 26,4 mS.cm^{-1} en profondeur ainsi que pour les fluviosols à horizon réductique en profondeur avec 9,5 mS.cm^{-1} en surface et 11,4 mS.cm^{-1} en profondeur alors qu'elle est comprise entre 2 et 3,9 mS.cm^{-1} en surface et 2,3 et 7,5 mS.cm^{-1} en profondeur pour les autres types de sols. La salinité est décroissante en fonction d'un gradient d'anthropisation, avec des valeurs faibles pour les vignes à forte pour les espaces naturels. Enfin, la salinité varie en fonction de la gestion agricole avec notamment une différence significative pour les zones sans gestion portée par une ASA.

Toutefois, si cette répartition de la salinité pouvait être attendue, les différences entre les classes de variables du paysage sont statistiquement assez peu significatives. De forts chevauchements de valeurs de salinité entre classe révèle donc l'existence d'autres facteurs explicatifs. L'analyse spatiale et l'analyse géochimique d'eau souterraines a permis de montrer que les motifs de salinité pouvaient être hérités d'infrastructures et d'usages passés (fortes salinité et présence d'anciens salins et plus faibles salées proches d'aménagements historiques d'apport en eau douce). Ce lien entre gestion de l'eau passée et salinité actuelle montre l'intérêt de tenter de reconstruire la trajectoire d'évolution du territoire. Cette trajectoire est fortement marquée par l'évolution de la position du cours du fleuve et les aménagements qui en ont découlés.

Actuellement, les flux d'eau globaux de la basse-plaine sont dominés par des flux "sortants", ce qui la protège d'une salinisation d'origine marine généralisée. Mais il convient de constater que ces flux sont dépendants du climat et des crues de l'Aude et pour partie des apports d'eau sur la zone liés aux prélèvements sur la Robine et à la redistribution de l'eau durant les submersions. Ces entrées d'eau sont sous influence du changement climatique, avec le creusement du déficit hydrique climatique, et sous l'influence anthropique de la gestion des inondations et de la réglementation sur les volumes prélevables pour les ouvrages de prélèvement et d'apport d'eau.

La répartition spatiale actuelle variée et structurée de la salinité est héritée des processus sédimentaires des deux derniers millénaires et de l'aménagement du territoire et de la gestion de l'eau au cours des derniers siècles et actuellement dépendante des évolutions climatiques et de la gestion de l'eau.

Cette dépendance forte à la gestion de l'eau actuelle et future amène à considérer les pratiques actuelles de gestion de la salinité, leur efficience et leurs possibles évolutions. Des travaux d'enquêtes auprès d'un échantillon de viticulteurs de la zone ont permis de définir 5 types de pratiques agricoles spatialement organisés et différents types de perception en lien avec la salinité. La confrontation entre groupes de pratiques, perceptions et salinité réelle

mesurée sur les parcelles des viticulteurs enquêtés, permet de dégager une cohérence à condition d'adopter une entrée par type de paysage. Les résultats obtenus révèlent une diversité d'associations entre pratiques, perceptions et salinité qui constitue une ressource pour l'adaptation du territoire, illustrant des situations qui ne pourront probablement pas perdurer et des situations qui pourraient constituer la base d'échanges pour une évolution des pratiques dans le futur.

Les différents chapitres de cette étude montrent l'intérêt d'une analyse multi-disciplinaire pour répondre à la problématique globale de compréhension du phénomène de salinisation des sols.

Le phénomène de salinisation apparaît comme multifactoriel et sa caractérisation met en évidence l'importance d'une gestion adaptée et pourquoi pas différenciée par zone. Ces unités de gestion sont spécifiques mais sous influence d'une stratégie globale et d'une réglementation commune.

Ces conclusions offrent une piste de réflexion sur la stratégie de gestion du sel la plus favorable dans les zones côtières. Semble-t-il plus judicieux de prioriser les zones les plus touchées afin de conserver l'agriculture en place sur le territoire marqueur d'une identité, d'un terroir dont les enjeux socio-économiques sont dépendants ? Au contraire, faut-il renforcer les efforts sur les zones moins impactées par le sel afin d'éviter l'évolution vers des sols salés ?

Liste des figures

Figure 1 : Origine de la salinisation des sols (source Daliakopoulos et al., 2016)..... 13

Figure 2 : Carte des sols impactés par le sel (extrait de Daliakopoulos et al., 2016)..... 17

Figure 3 : Modèle conceptuel de la salinisation des sols en zone côtière méditerranéenne (Bless et al., 2018) 18

Figure 4 : Zone d'étude : les Basses-Plaines de l'Aude et le massif de la Clape 19

Figure 5 : Arbre de décision appliqué au du découpage géomorphologique de la zone d'étude 20

Figure 6: Relief de la zone d'étude : a) altitudes, b) pentes locales, c) zonage géomorphologique 21

Figure 7 : Carte des sols de la basse-plaine de l'Aude 23

Figure 8 : Cartes d'occupation du sol pour les années 2003, 2012, 2015 et 2018 26

Figure 9 : Evolution spatio-temporelle des surfaces viticoles entre 2003 et 2018..... 27

Figure 10 : Carte du réseau hydrographique de la basse-plaine de l'Aude 28

Figure 11 : Répartition spatiale des ASAs et des réseaux associés 30

Figure 12 : Localisation des points d'échantillonnage des sols..... 38

Figure 13 : Localisation des parcelles échantillonnées plusieurs fois au cours des 4 campagnes de collecte de données 39

Figure 14 : Caractéristique du variogramme (Sill : pallier, Range : portée, Nugget : pépite).. 43

Figure 15 : Localisation de la parcelle du "Cercle" et de la parcelle "Grand Vigne"..... 45

Figure 16 : Corrélation entre les conductivités électriques sur extrait de pâte saturée (CE_{sp}) et sur dilution 1:5 ($CE_{1:5}$) d'après les analyses du CIRAD (graphe de gauche) et les conductivités électriques sur dilution 1:5 d'après nos propres analyses laboratoire..... 46

Figure 17 : Cartographie de la conductivité électrique (CEsp en mS.cm-1) des échantillons de sol de surface, profonds et le type de variation entre surface et profondeur 49

Figure 18 : Concentration en Sodium corrigée en fonction de la conductivité électrique sur extrait de pâte saturée (graphes de gauche) et rapport calcium sur sodium en fonction de la conductivité électrique sur extrait de pâte saturée (graphes de droite) pour les échantillons de sol de surface (en haut) et les échantillons profonds (en bas) 51

Figure 19 : Conductivité électrique (mS.cm-1) des eaux de surface (Aude et canal de la Robine à gauche et canaux collecteurs à droite) 52

Figure 20 : Conductivité électrique mesurée par le BRGM à l'été 2019 dans les puits et forage peu profonds identifiés sur la zone d'étude. 53

Figure 21 : Distribution des valeurs de conductivité électrique extrait de pâte saturée de surface (0-40 cm) et en profondeur (80-120cm) 54

Figure 22 : Semi-variogrammes de la conductivité électrique extrait de pâte saturée (ECsp) en surface (0-40cm) et en profondeur (80-120cm) 55

Figure 23 : Comparaison de la CE_{sp} de chaque classe géomorphologique en surface (a) et profondeur (b) par test de Kruskal-Wallis et Wilcoxon 57

Figure 24 : Comparaison de la CEsp de chaque type de sol en surface (a) et profondeur (b) par test de Kruskal-Wallis et Wilcoxon 58

Figure 25 : Comparaison de la CEsp par grande catégorie d'occupation du sol en surface (a) et profondeur (b) par test de Kruskal-Wallis et Wilcoxon 59

Figure 27 : Comparaison de la CE_{sp} par Association Syndicale Autorisée en surface (a) et profondeur (b) par test de Kruskal-Wallis et Wilcoxon 60

Figure 27 : Comparaison des valeurs de conductivité électrique mesurées à plusieurs dates sur 14 parcelles..... 61

Figure 28 : Comparaison des valeurs de conductivité électrique mesurées sur 14 parcelles en fonction des années de mesures à différentes profondeurs 62

Figure 29 : Conductivités électriques (EC_{sp}) interpolées, EC_{sp} moyennes et stocks en sels pour les différentes profondeurs de sol et totaux par ha pour la parcelle du Cercle avant (12 mai 2022) et après submersion (11 juillet 2022) 64

Figure 30 : Conductivités électriques (EC_{sp}) interpolées, EC_{sp} moyennes et stocks en sels pour les différentes profondeurs de sol et totaux par ha pour la parcelle Grand Vigne avant (12 mai 2022) et après submersion (11 juillet 2022) 64

Figure 31 : Géographie actuelle de la basse plaine de l'Aude étudiée et principaux lieux évoqués dans le Chapitre 3. 69

Figure 32 : Proposition de reconstitution des paléogéographies de la basse vallée de l'Aude (extrait de Salel, 2018) 70

Figure 33 : La peste à Narbonne 80

Figure 34 : Frise historique 1300-1500 82

Figure 35 : Représentation de l'étang salin à l'ouest de Vinassan et à l'est de Narbonne (1548) 83

Figure 36 : Carte de Bellin (1764) d'après les relevés de la Favolière en 1693 84

Figure 37 : Frise historique 1500-1700 85

Figure 38 : Extrait de la carte du diocèse de Narbonne (Aldring, 1791) 87

Figure 39 : Frise historique 1700-1900 90

Figure 40 : Frise historique 1900-2010 92

Figure 41 : Proposition d'une frise chrono-systémique de l'évolution de la basse-plaine de l'Aude en lien avec la gestion de l'eau. 93

Figure 42 : Organigramme des traitements statistiques des données climatiques (en haut analyse de tendance, en bas analyse de rupture) 98

Figure 43 : Représentation du système Robine. Les flèches indiquent les volumes entrants ou sortants de la Robine : (A) prise d'eau de Moussoulens sur l'Aude, (B) prélèvement de l'ASA

du Raonel pour l'agriculture, (C) prélèvement de l'ASA du Raonel pour la pêche, (D) prélèvement de l'ASA de la Livière, (E) prélèvement de l'ASA de la Rêche, (F) apport provenant de la source de l'Oeillal via le canal Mayral, (G) apport par le Rec de Veyret, (H) apport par la STEP de Narbonne, (I) prélèvement de l'ASA du Cercle, (J) prélèvement de l'ASA de Ricardelle, (K) prélèvement de l'ASA de Mandirac, (L) prélèvement pour les espaces naturels (Conservatoire du Littoral et PNRNM), (N) déversoir du Canélou dans l'étang de Bages-Sigean 102

Figure 44 : Précipitations annuelles sur la période 1960-2019 avec test de rupture (en vert la moyenne avant et après la rupture identifiée par le test de Buishand). 104

Figure 45 : Evapotranspiration de référence annuelle entre 1960 et 2019, test de ruptures des moyenne (en vert) et courbes de tendance pour toute la période (en bleu) et sur la période 1981-2019 (en orange). 104

Figure 46 : Débits journaliers de l'Aude mesurés à la station de Moussan (code Y1612040) 106

Figure 47 : Évolution entre 1989 et 2020 du nombre de jours et nombre de crues dépassant un débit journalier seuil à la station de Moussan 106

Figure 48 : Carte piézométrique établie à partir de relevés de l'été 2021 (isovaleurs tous les 5 m) et variogramme associé à l'interpolation (extrait de Fleury et al., 2021) 108

Figure 49 : Débits journaliers (courbe bleue), débits journaliers cumulés (courbe rouge) mesurés et volumes et débits moyens par périodes calculés à l'exutoire du canal de la Réunion à partir des données collectées et fournies par Hydriad (2022) 113

Figure 50 : Représentation intégrée des flux et des volumes annuels correspondant aux limites et au sein de la basse-plaine 115

Figure 51 : Localisation des îlots enquêtés 137

Figure 52 : Fragments de discours organisés selon une matrice 141

Figure 53 : Résultats de l'ACM sur les 45 îlots : projection des individus et des modalités dans le plan formé par les deux premiers axes 143

Figure 54 : Résultats de l'ACM sur les 41 îlots : projection des individus et des modalités dans le plan formé par les deux premiers axes 144

Figure 55 : Dendrogramme issu de la classification ascendante hiérarchique et illustration du découpage en 4 classes 145

Figure 56 : Localisation des différents groupes de pratiques et représentation en fonction de l'intensité de l'apport en eau et du travail du sol 146

Figure 57 : Représentation des relations entre les 2 thèmes principaux (en vert) et les 4 thèmes secondaires issue des entretiens sur la perception globale du phénomène de salinisation 151

Figure 58 : Catégories de perception des manifestations de la salinité (en italique, les fragments originaux et N, le nombre de fragments) et localisation associée 152

Figure 59 : Catégories de perception de l'évolution de la salinité (en italique, les fragments originaux et N, le nombre de fragments) et localisation associée 155

Figure 60 : Salinité des sols des différents îlots échantillonnés. Conductivité électrique équivalent d'extrait de pâte saturée (EC_{sp}) moyenne des échantillons prélevés entre 0 et 40 cm (à gauche) et entre 90 et 120 cm (à droite) 158

Figure 61 : Résultat de l'ACM sur les groupes de pratiques et les catégories de perceptions sur les deux premiers axes. 160

Figure 62 : Synthèse des résultats obtenus sur la salinité mesurée, les pratiques et les perceptions liées à la salinité (aquarelles réalisées par F.Bergé (Bergé, 2020) 162

Liste des tableaux

Tableau 1 : Classes de salinité basées sur la conductivité électrique sur extrait de pâte saturée (EC_{sp}) et les effets associés sur les plantes (FAO, 1988 ; L. A. Richards, 1954) 15

Tableau 2 : Dimensions des ASAs de la basse-plaine de l'Aude 31

Tableau 3 : Propriétés de sol relevées lors des prélèvements in-situ d'échantillons 42

Tableau 4 : Conductivité électrique des échantillons de sol selon le classement de la FAO ... 47

Tableau 5 : Statistiques descriptives de la conductivité électrique en surface et en profondeur d'après le test de Kruskall-Wallis avec n=nombre d'individus, min= minimum, max=maximum, median= médiane, q1=1er quantile, q3=3ème quantile, mean=moyenne, sd= écart-type, p=, significativité = <0,05 *, <0,01**, <0,005***, <0,001**** 47

Tableau 6 : Données météorologiques annuelles mesurées entre 2018 et 2022 à la station Pech Rouge (MétéoFrance) 63

Tableau 7 : Résultats statistiques du Test de Friedman sur la comparaison des valeurs de salinité entre les années 2019, 2020 et 2021 63

Tableau 8 : Evolution des précipitations (mm/an) et de la demande climatique (mm/an) par mois 105

Tableau 9 : Recharge moyenne de la nappe par les eaux de pluie par période de 30 ans à partir de trois formules de bilans hydriques du sol 110

Tableau 10 : Volumes (en Mm3) totaux annuels et en période d'étiage (entre juin et octobre), entrants et sortants du système Robine pour les années 2020 et 2021 111

Tableau 11 : Thèmes, variables et modalités extraits des enquêtes sur les pratiques à l'échelle des îlots viticoles 139

Tableau 12 : Nombre d'îlots et surface associée au 5 groupes de pratiques identifiés 146

Tableau 13 : Caractéristiques des exploitations viticoles rattachées à chacun des groupes des pratiques identifiés dans la typologie 147

Tableau 14 : Salinité des sols en fonction des groupes de pratiques. Les EC_{sp} minimum, maximum, médiane, des 1er et 3ème quartiles, moyenne et écarts types sont exprimées en $mS.cm^{-1}$ 159

Références

Abrol, I. P., Yadav, J. S. P., & Massoud, F. I. (1988). Salt-Affected Soils and their Management. *FAO SOILS BULLETIN*, *39*.

Adger, W. N., Dessai, S., Goulden, M., Hulme, M., Lorenzoni, I., Nelson, D. R., Naess, L. O., Wolf, J., & Wreford, A. (2009). Are there social limits to adaptation to climate change? *Climatic Change*, *93*(3–4), 335–354. https://doi.org/10.1007/s10584-008-9520-z

Alexakis, D., Gotsis, D., & Giakoumakis, S. (2015). Evaluation of soil salinization in a Mediterranean site (Agoulinitsa district—West Greece). *Arabian Journal of Geosciences*, *8*(3), 1373–1383. https://doi.org/10.1007/s12517-014-1279-0

Alexandre, E. (2021). *Répartition et évolution des usages de l ' eau dans la Basse-Plaine de l ' Aude*.

Ali, A. M. S. (2003). Farmers' knowledge of soils and the sustainability of agriculture in a saline water ecosystem in Southwestern Bangladesh. *Geoderma*, *111*(3), 333–353. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0016-7061(02)00271-9

Álvarez-Romero, J. G., Pressey, R. L., Ban, N. C., Vance-Borland, K., Willer, C., Klein, C. J., & Gaines, S. D. (2011). Integrated land-sea conservation planning: The missing links. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, *42*, 381–409. https://doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-102209-144702

Amezketa, E. Ã. (2006). *An integrated methodology for assessing soil salinization , a pre-condition for land desertification*. *67*, 594–606. https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2006.03.010

Anthony, E. J., Marriner, N., & Morhange, C. (2014). Human influence and the changing geomorphology of Mediterranean deltas and coasts over the last 6000 years: From progradation to destruction phase? *Earth-Science Reviews*, *139*, 336–361. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.10.003

Asghar, M. N., Prathapar, S. A., & Shafique, M. S. (2002). Extracting relatively-fresh groundwater from aquifers underlain by salty groundwater. *Agricultural Water*

Management, *52*(2), 119–137. https://doi.org/10.1016/S0378-3774(01)00130-5

Bardin, L. (2013). *L'analyse de contenu* (resses Uni). https://doi.org/10.3917/puf.bard.2013.01

Barthès, J. P., Bornand, M., & Falipou, P. (1999). *Référentiel pédologique de la France : Pédopaysages de l'Aude*.

BD Topage. (2023). https://bdtopage.eaufrance.fr/page/donnees

Belmonte, J.-C. (2015). *Salinisation des sols viticoles sérignanais et mesures correctives.*

Bergé, F. (2020). *Analyse des pratiques de gestion de la salinisation des sols dans le bassin viticole de la Basse Plaine de l ' Aude*.

Bless, A. E. (2019). *Agricultural Land Salinization in Coastal Area : Soil and Water Analysis from Landscape to Soil Aggregate*. Université Montpellier, Montpellier SupAgro.

Bless, A. E., Colin, F., Crabit, A., Devaux, N., Philippon, O., & Follain, S. (2018). Landscape evolution and agricultural land salinization in coastal area: A conceptual model. *Science of the Total Environment*, *625*, 647–656. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.12.083

Brandt, C. J., Thornes, J. B., & Geeson, N. A. (2003). *Mediterranean desertification: a mosaic of processes and responses*. John Wiley & Sons.

Buhe, L. (2015). *Etude de faisabilité d'un lagunage naturel des eaux résiduelles de submersion dans le Narbonnais*.

Cambon, J.-P. (1963). *Contribution à l'étude hydrogéologique de la Basse vallée de l'Aude (secteur Nord).*

Castex, P. A. (2014). *Etude agro-économique de la zone proche de l'embouchure de l'Orb.*

Cavero, J. (2010). Paléogéographie des étangs narbonnais d'après les sources cartographiques anciennes. *Géocarrefour*, *85/1*, 29–40. https://doi.org/10.4000/geocarrefour.7659

Chaigneau, E. (2017). Étude sur les remontées salines sur les parcelles agricoles de l'ASA de Raonel. In *BTS Gestion Maitrise de l'Eau. ASEAUDE*.

Chari, M. M., Nemati, F., Afrasiab, P., Kahkhamoghaddam, P., & Davari, A. (2012). Prediction of Evaporation from Shallow Water Table Using Regression and Artificial Neural

Networks. *Journal of Agricultural Science*, *5*(1). https://doi.org/10.5539/jas.v5n1p168

Chartzoulakis, K. S. (2005). Salinity and olive: Growth, salt tolerance, photosynthesis and yield. *Agricultural Water Management*, *78*(1–2), 108–121. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2005.04.025

Chen, W., Hou, Z., & Wu, L. (2010). *Effects of salinity and nitrogen on cotton growth in arid environment*. 61–73. https://doi.org/10.1007/s11104-008-9881-0

Chesworth, W. (2008). *Encyclopedia of Soil Science* (W. Chesworth (Ed.); Encycloped). https://doi.org/10.1007/978-1-4020-3995-9_140

Constant, N., Auvergne, C., Fortin, N., Colin, E., & Gaviglio, C. (2019). L'entretien du sol Réduire les coûts de production et la consommation en énergies fossiles. In *VITICULTURE BIOLOGIQUE: Vol. Novembre*.

Daliakopoulos, I. N., Tsanis, I. K., Koutroulis, A., Kourgialas, N. N., Varouchakis, A. E., Karatzas, G. P., & Ritsema, C. J. (2016). The threat of soil salinity: A European scale review. *Science of the Total Environment*, *573*, 727–739. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.08.177

Daudin, K., Weber, C., Colin, F., Cernesson, F., Maurel, P., & Derolez, V. (2021). The collaborative process in environmental projects, a place-based coevolution perspective. *Sustainability (Switzerland)*, *13*(15), 1–23. https://doi.org/10.3390/su13158526

De La Paix, M. J., Lanhai, L., Xi, C., Varenyam, A., Nyongesah, M. J., & Habiyaremye, G. (2013). Physicochemical properties of saline soils and aeolian dust. *Land Degradation and Development*, *24*(6), 539–547. https://doi.org/10.1002/ldr.1148

De Louw, P. G. B., Eeman, S., Oude Essink, G. H. P., Vermue, E., & Post, V. E. A. (2013). Rainwater lens dynamics and mixing between infiltrating rainwater and upward saline groundwater seepage beneath a tile-drained agricultural field. *Journal of Hydrology*, *501*, 133–145. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.07.026

Del Grande, C., Gabbianelli, G., & Simeoni, U. (2002). Natural and anthropic middle-term variations in the delta system at the mouth of the Goro River (Po Delta, Italy). *Marine Ecology*, *23*(SUPPL. 1), 169–183. https://doi.org/10.1111/j.1439-0485.2002.tb00016.x

Deressa, T. T., Hassan, R. M., & Ringler, C. (2011). Perception of and adaptation to climate change by farmers in the Nile basin of Ethiopia. *Journal of Agricultural Science*, *149*(1), 23–31. https://doi.org/10.1017/S0021859610000687

Dewandel, B., Boisson, A., Amraoui, N., Caballero, Y., Mougin, B., Baltassat, J. M., & Maréchal, J. C. (2021). Improving our ability to model crystalline aquifers using field data combined with a regionalized approach for estimating the hydraulic conductivity field. *Journal of Hydrology*, *601*(June). https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126652

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. *Journal of Hydrology*, *550*, 118–129. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.03.075

Dingman, S. L. (2002). *Physical hydrology*.

Dubois, O. (2011). *The State of the World's Land and Water Resources for Food and Agriculture: Managing Systems at Risk.* (Food and Agriculture Organization of the United Nations (Ed.)). https://www.cabdirect.org/cabdirect/abstract/20123051697

Dunn, O. J. (1964). Multiple Comparisons Using Rank Sums. *Technometrics*, *6*(3), 241–252. https://doi.org/https://doi.org/10.1080/00401706.1964.10490181

EAUCEA. (2014). *Gestion quantitative de la ressource en eau du bassin versant de l'AUDE Etude de détermination des volumes prélevables*.

Eckelmann, W., Baritz, R., Bialousz, S., Bielek, P., Carré, F., Houšková, B., Jones, R. J. A., Kibblewhite, M., Kozak, J., Bas, C. Le, Tóth, G., Tóth, T., Várallyay, G., Halla, M. Y., & Zupan, M. (2006). *Common Criteria for Risk Area Identification according to Soil Threats Threat : Soil salinisation / sodification*.

Edijatno, & Michel, C. (1989). Un modèle pluie-débit journalier à trois paramètres. *La Houille Blanche*.

Edmunds, W. M., Cook, J. M., Darling, W. G., Kinniburgh, D. G., Miles, D. L., Bath, A. H., Morgan-Jones, M., & Andrews, J. N. (1987). Baseline geochemical conditions in the Chalk aquifer, Berkshire, U.K.: a basis for groundwater quality management. *Applied Geochemistry*,

2(3), 251–274. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0883-2927(87)90042-4

Epstein, E. (1980). Responses of plants to saline environments. *Basic Life Sciences*, *14*(2), 7–21. https://doi.org/10.1007/978-1-4684-3725-6_2

Escudier, J., Gillery, B., Ojeda, H., & Etchebarne, F. (2019). *Managing irrigation water salinity in viticulture ´ des eaux d ' irrigation Maitrise de la salinit e pour la viticulture*. *01010*.

Fan, D., Nguyen, D. V., Su, J., Van Bui, V., & Tran, D. L. (2019). Coastal morphological changes in the red river delta under increasing natural and anthropic stresses. *Anthropocene Coasts*, *2*(1), 51–71. https://doi.org/10.1139/anc-2018-0022

Feinerman, E., Taron, D., & Bielorai, H. (1982). *Linear Crop Response Functions to Soil Salinity With a Threshold Salinity Level*. *18*(1), 101–106.

Fipps, G. (2010). Irrigation Water Quality Standards and Salinity Management Strategies. *Texas A&M Agrilife Extension*.

Fleury, P., Dewandel, B., Ladouche, B., Valentini, N., Colin, F., Crabit, A., Marien, L., & Salel, T. (2022). *Salinisation des Aquifères Littoraux de la Narbonnaise Rapport final*.

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*.

Follain, S., Bless, E., Colin, F., Le Clanche, X., Crabit, A., Devaux, N., & Philippon, O. (2016). Dépérissements et salinité des sols : diagnostic et action de lutte en zone littorale. *8eme Journée Scientifique de La Vigne et Du Vin*. https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2834.9849

Friedman, M. (1937). The Use of Ranks to Avoid the Assumption of Normality Implicit in the Analysis of Variance. *Journal of the American Statistical Association*, *32*(200), 675–701. https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1080/01621459.1937.10503522

Giacona, F., Martin, B., Eckert, N., & Desarthe, J. (2019). Une méthodologie de la modélisation en géohistoire : de la chronologie (spatialisée) des événements au fonctionnement du système par la mise en correspondance spatiale et temporelle. *Physio-Géo Géographie Physique et Environnement*, *14*, 171–199. https://doi.org/https://doi.org/10.4000/physio-geo.9186

Grand Narbonne, C. (2017). L'agriculture de l'Aude en Bref. *Chambre Départementale*

d'Agriculture.

Greene, R., Timms, W., Rengasamy, P., Arshad, M., & Cresswell, R. (2016). Integrated groundwater management: Concepts, approaches and challenges. In *Integrated Groundwater Management: Concepts, Approaches and Challenges*. https://doi.org/10.1007/978-3-319-23576-9

Haitjema, H. M., & Mitchell-Bruker, S. (2005). Are water tables a subdued replica of the topography? *Ground Water*, *43*(6), 781–786. https://doi.org/10.1111/j.1745-6584.2005.00090.x

Harris, I., Osborn, T. J., Jones, P., & Lister, D. (2020). Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset. *Scientific Data*, *7*(1), 1–18. https://doi.org/10.1038/s41597-020-0453-3

Harvatt, J., Petts, J., & Chilvers, J. (2011). Understanding householder responses to natural hazards: Flooding and sea-level rise comparisons. *Journal of Risk Research*, *14*(1), 63–83. https://doi.org/10.1080/13669877.2010.503935

Houska, C. (2007). Deicing Salt – Recognizing The Corrosion Threat. *TMR Consulting, Pittsburgh, PA USA*, 1–11.

Hydriad. (2022). *Bilans annuels des volumes d'eau et de nutriments dans l'étang de Campignol - Etape 1 - Campagnes de mesures de débits, de volumes échangés et de qualité de l'eau.*

Islam, M. A., Warwick, N., Koech, R., Amin, M. N., & Lobry de Bruyn, L. (2020). The importance of farmers' perceptions of salinity and adaptation strategies for ensuring food security: Evidence from the coastal rice growing areas of Bangladesh. *Science of the Total Environment*, *727*, 138674. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138674

Jumman, A., van Heerden, P. S., van Antwerpen, R., van Rensburg, L. D., Adendorff, Marius Radzilani, T., & Searle, A. (2021). The knowledge levels, perceptions, and practices of irrigation farmers in the context of soil salinity management in the South African sugarcane industry. *Irrigation and Dainage*, *71*(2), 381–393.

Kandasamy, J., Sounthararajah, D., Sivabalan, P., Chanan, A., Vigneswaran, S., & Sivapalan, M. (2014). Socio-hydrologic drivers of the pendulum swing between agricultural

development and environmental health: A case study from Murrumbidgee River basin, Australia. *Hydrology and Earth System Sciences*, *18*(3), 1027–1041. https://doi.org/10.5194/hess-18-1027-2014

Kargas, G., Chatzigiakoumis, I., Kollias, A., Spiliotis, D., Massas, I., & Kerkides, P. (2018). Soil salinity assessment using saturated paste and mass soil:water 1:1 and 1:5 ratios extracts. *Water (Switzerland)*, *10*(11), 1–11. https://doi.org/10.3390/w10111589

La mer monte. (2021). https://www.parc-naturel-narbonnaise.fr/actions-parc/environnement/climat-et-energie/la-mer-monte

Lanini, S., & Caballero, Y. (2021). ESPERE, a Tool for Multimethod Aquifer Recharge Estimation: What's New with Version 2? *Groundwater*, *59*(1), 5–6. https://doi.org/10.1111/gwat.13049

Lanini, S., Caballero, Y., Cointe, P. Le, Béranger, S., Pinson, S., Lanini, S., Caballero, Y., Cointe, P. Le, Béranger, S., & Arnaud, L. (2019). Recharge des aquifères à l ' échelle de la France : estimation , évolution et incertitudes associées. *Colloque SHF- UNESCO : Sécheresses, Étiages et Déficits En Eau, Dec 2019*. https://doi.org/hal-02159826

Larguier, G. (1999). *Le drap et le grain en Languedoc : Narbonne et Narbonnais 1300-1789* (Presses un). https://doi.org/https://doi.org/10.4000/books.pupvd.1543.

Lebrun, R. (2016). *Wine Typicality and Vine Responses to Terroir Constraints , A Review* (Issue July). https://doi.org/10.13140/RG.2.1.2293.6564

Lefebvre, O., & Moletta, R. (2006). Treatment of organic pollution in industrial saline wastewater: A literature review. *Water Research*, *40*(20), 3671–3682. https://doi.org/10.1016/j.watres.2006.08.027

Lespinasse, P., Aloïsi, J. C., Barruol, J., Durand-Delga, M., Got, H., Monaco, A., & Marchal, J. P. (1982). *Notice explicative de la feuille Narbonne au 1/50 000*.

Li, J., Pu, L., Zhu, M., & Zhang, R. (2012). The present situation and hot issues in the salt-affected soil research. *Dili Xuebao/Acta Geographica Sinica*, *67*(9).

Li, X., Li, Y., Wang, B., Sun, Y., Cui, G., & Liang, Z. (2022). Analysis of spatial-temporal variation of the saline-sodic soil in the west of Jilin Province from 1989 to 2019 and influencing

factors. *CATENA*, *217*. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106492.

Libutti, A., Cammerino, A. R. B., & Monteleone, M. (2018). Risk assessment of soil salinization due to tomato cultivation in mediterranean climate conditions. *Water (Switzerland)*, *10*(11). https://doi.org/10.3390/w10111503

Lovatt, C. (1985). Characterization of N metabolism during salinity stress of high-salt tolerant (PMR45) and less salt-tolerant (Top Mark) muskmelon varieties (Cucumis melo L.). *No. UC Salinity Drainage Task Force*, *86*.

Maas, E. V., & Hoffman, G. J. (1977). Crop Salt Tolerance - Current Assessment. *Journal of the Irrigation and Drainage Division*, *103*(2). https://doi.org/10.1061/JRCEA4.0001137

Machado, A. M. R., & Serralheiro, R. P. (2017). Soil Salinity : Effect on Vegetable Crop Growth . Management Practices to Prevent and Mitigate Soil Salinization. *Horticulturae*, *3*(30). https://doi.org/10.3390/horticulturae3020030

Marien, L., Crabit, A., Dewandel, B., Ladouche, B., Fleury, P., Follain, S., Cavero, J., Berteloot, V., & Colin, F. (2023). Salinity spatial patterns in Mediterranean coastal areas: The legacy of historical water infrastructures. *Science of the Total Environment*, *899*(July), 165730. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.165730

Marlet, S. (2004). Evolution des systèmes d'irrigation et gestion de la salinité des terres irriguées. *Evolution Des Systèmes d'irrigation et Gestion de La Salinité Des Terres Irriguées*, 12.

Maselli, V., & Trincardi, F. (2013). Man made deltas. *Scientific Reports*, *3*, 1–7. https://doi.org/10.1038/srep01926

Mateo-Sagasta, J., & Burke, J. (2011). Agriculture and water quality interactions: a global overview. *SOLAW Background Thematic Report-TR08*, *46*.

Mathevet, R., Peluso, N. L., Couespel, A., & Robbins, P. (2015). Using historical political ecology to understand the present: Water, reeds, and biodiversity in the camargue biosphere reserve, southern france. *Ecology and Society*, *20*(4). https://doi.org/10.5751/ES-07787-200417

McPhee, P. (1989). *L'Aude de la préhistoire à nos jours* (Bordessoul).

Mendez, A. (2010). *Processus. Concepts et méthode pour l'analyse temporelle en sciences sociales.* (Lectures,).

Montoroi, J.-P. (1993). Cours "Les sols salés." In *Bondy : ORSTORM* (p. 54).

Moral, R., Perez-Murcia, M. D., Perez-Espinosa, A., Moreno-Caselles, J., Paredes, C., & Rufete, B. (2008). Salinity, organic content, micronutrients and heavy metals in pig slurries from South-eastern Spain. *Waste Management*, *28*(2), 367–371. https://doi.org/10.1016/j.wasman.2007.01.009

Moreira Barradas, J. M., Abdelfattah, A., Matula, S., & Dolezal, F. (2015). Effect of Fertigation on Soil Salinization and Aggregate Stability. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, *141*(4), 1–7. https://doi.org/10.1061/(asce)ir.1943-4774.0000806

Munns, R. (2002). Comparative physiology of salt and water stress. *Plant, Cell and Environment*, *25*(2), 239–250. https://doi.org/10.1046/j.0016-8025.2001.00808.x

Munns, R., & Tester, M. (2008). Mechanisms of salinity tolerance. *Annual Review of Plant Biology*, *59*, 651–681. https://doi.org/10.1146/annurev.arplant.59.032607.092911

Munsell, A. H. (1915). *Charte Munsell. Munsell color*.

Northey, J. E., Christen, E. W., Ayars, J. E., & Jankowski, J. (2006). Occurrence and measurement of salinity stratification in shallow groundwater in the Murrumbidgee Irrigation Area, south-eastern Australia. *Agricultural Water Management*, *81*(1–2), 23–40. https://doi.org/10.1016/j.agwat.2005.04.003

Paillé, P., & Mucchielli, A. (2012). *L'analyse qualitative en sciences humaines et sociales.* (Armand Col). https://doi.org/10.3917/arco.paill.2012.01.

Paranychianakis, N. V., & Chartzoulakis, K. S. (2005). Irrigation of Mediterranean crops with saline water: From physiology to management practices. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, *106*(2-3 SPEC. ISS.), 171–187. https://doi.org/10.1016/j.agee.2004.10.006

Payen, S., Basset-Mens, C., Núñez, M., Follain, S., Grünberger, O., Marlet, S., Perret, S., & Roux, P. (2016). Salinisation impacts in life cycle assessment: a review of challenges and options towards their consistent integration. *International Journal of Life Cycle Assessment*, *21*(4), 577–594. https://doi.org/10.1007/s11367-016-1040-x

Piovan, S. E. (2020). *The Geohistorical Approach*.

Portail de l'AC. (n.d.). Retrieved September 1, 2023, from https://www.assainissement.developpement-durable.gouv.fr/PortailAC/

Projet Talanoa Waters. (2023). https://talanoa-water-france.hub.inrae.fr/

Quie, S. (2014). *Etude des besoins en eau agricole de la basse plaine de l ' Aude Etude des besoins en eau agricole de la basse plaine de l ' Aude*.

Raats, P. A. C. (2015). Salinity management in the coastal region of the Netherlands: A historical perspective. *Agricultural Water Management*, *157*, 12–30. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.agwat.2014.08.022

Rannou, A. (2015). Contribution aux connaissances et élaboratio d'une méthode d'évaluation des habitats de prés salés méditerranéens 1410. In A. Rannou (Ed.), *Master Gestion et Conservation de la Biodiversité*. https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004

Rengasamy, P. (2006). World salinization with emphasis on Australia. *Journal of Experimental Botany*, *57*(5), 1017–1023. https://doi.org/10.1093/jxb/erj108

Rengasamy, P. (2010). Soil processes affecting crop production in salt-affected soils. *Functional Plant Biology*, *37*(7), 613. https://doi.org/10.1071/FP09249

Rhoades, J., Chanduvi, F., & Lesch, S. (1999). Soil Salinity Assessment : Methods and Interpretation of Electrical Conductivity Measurements. In *Food & Agriculture Organization of the United Nations*. https://www.ptonline.com/articles/how-to-get-better-mfi-results

Rinderer, M., Komakech, H. C., Müller, D., Wiesenberg, G. L. B., & Seibert, J. (2015). *Qualitative soil moisture assessment in semi-arid Africa – the role of experience and training on inter-rater reliability*. 3505–3516. https://doi.org/10.5194/hess-19-3505-2015

Roussy, C., Ridier, A., & Chaib, K. (2015). Adoption d'innovations par les agriculteurs : rôle des perceptions et des préférences. *Working Paper SMART –LERECO*, *15*(03).

Saeed, M. M., Ashraf, M., & Asghar, M. N. (2003). Hydraulic and hydro-salinity behavior of skimming wells under different pumping regimes. *Agricultural Water Management*, *61*(3), 163–177. https://doi.org/10.1016/S0378-3774(03)00026-X

Salel, T. (2018). *Dynamique des environnements fluvio-lagunaires du Narbonnais à l'Holocène (Golfe du Lion, France)*. Paul Valéry Montpellier 3 préparée.

Sanchez, C. (2016). *Les ports antiques de Narbonne*. ADLFI. Archéologie de La France - Informations. http://journals.openedition.org/adlfi/13599

Sen, T. K., & Khilar, K. C. (2006). Review on subsurface colloids and colloid-associated contaminant transport in saturated porous media. *Advances in Colloid and Interface Science*, *119*(2–3), 71–96. https://doi.org/10.1016/j.cis.2005.09.001

Setia, R., Gottschalk, P., Smith, P., Marschner, P., Baldock, J., Setia, D., & Smith, J. (2013). Soil salinity decreases global soil organic carbon stocks. *Science of the Total Environment*, *465*, 267–272. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.08.028

Shahid, S. A., Zaman, M., & Heng, L. (2018). Introduction to Soil Salinity, Sodicity and Diagnostics Techniques. In *Guideline for Salinity Assessment, Mitigation and Adaptation Using Nuclear and Related Techniques*. https://doi.org/10.1007/978-3-319-96190-3_1

Shrestha, R. P. (2006). Relating soil electrical conductivity to remote sensing and other soil properties for assessing soil salinity in northeast Thailand. *Land Degradation and Development*, *17*(6), 677–689. https://doi.org/10.1002/ldr.752

Shrivastava, P., & Kumar, R. (2015). Soil salinity: A serious environmental issue and plant growth promoting bacteria as one of the tools for its alleviation. *Saudi Journal of Biological Sciences*, *22*(2), 123–131. https://doi.org/10.1016/j.sjbs.2014.12.001

Singh, K. (2016). Microbial and Enzyme Activities of Saline and Sodic Soils. *Land Degradation and Development*, *27*(3), 706–718. https://doi.org/10.1002/ldr.2385

Sivapalan, M., Konar, M., Srinivasan, V., Chhatre, A., Wutich, A., Scott, C. A., Wescoat, J. L., & Rodríguez-Iturbe, I. (2014). Socio-hydrology: Use-inspired water sustainability science for the Anthropocene. *Earth's Future*, *2*(4), 225–230. https://doi.org/10.1002/2013ef000164

Sivapalan, M., Savenije, H. H. G., & Blöschl, G. (2012). Socio-hydrology: A new science of people and water. *Hydrological Processes*, *26*(8), 1270–1276. https://doi.org/10.1002/hyp.8426

Six, J., Paustian, K., Elliott, E. T., & Combrink, C. (2000). Soil Structure and Organic Matter: I. Distribution of Aggregate-Size Classes and Aggregate-Associated Carbon. *Soil Sci Soc Am Proc*, *64*, 681–689.

Suarez, D. L., & Jurinak, J. J. (1996). The chemistry of salt-affected soils and waters. In *Agricultural Salinity Assessment and Management, first ed. ASCCE* (pp. 42–63). Tanji, K.K.

Szabolcs, I. (1989). *Salt-affected soils*. CRC Press, Inc.

Thien, S. J. (1979). A flow diagram for teaching textureby-feel analysis. *Journal of Agronomic Education*, *8*, 54–55.

Thornthwaite, C. W. (1948). An Approach toward a Rational Classification of Climate. *Geographical Review*, *38*(1), 55–94. https://doi.org/http://dx.doi.org/10.2307/210739

Trnka, M., Kersebaum, K. C., Eitzinger, J., Hayes, M., Hlavinka, P., Svoboda, M., Dubrovský, M., Semerádová, D., Wardlow, B., Pokorný, E., Možný, M., Wilhite, D., & Žalud, Z. (2013). Consequences of climate change for the soil climate in Central Europe and the central plains of the United States. *Climatic Change*, *120*(1–2), 405–418. https://doi.org/10.1007/s10584-013-0786-4

U.S. Salinity Laboratory Staff. (1954). Diagnosis and Improvementof Saline and Alkali Soils. In *USDA Handbook*. U.S. Government Printing Office.

USDA. (2004). *Soil Survey Technical Note No.5.*

Van Beek, C., & Tóth, G. (2012). *Risk assessment methodologies of soil threats in Europe : status and options for harmonization for risks by erosion, compaction, salinization, organic matter decline and landslides*. Publications Office. https://doi.org/doi/10.2788/47096

Van Weert, F., Van der Gun, J., & Reckman, J. W. T. M. (2009). Global overview of saline groundwater occurrence and genesis. *IGRAC Report GP 2009-1*, *July*, 105. http://www.indiaenvironmentportal.org.in/files/salinegroundwater.pdf

Verbruggen, N., & Hermans, C. (2013). Physiological and molecular responses to magnesium nutritional imbalance in plants. *Plant and Soil*, *368*(1–2), 87–99. https://doi.org/10.1007/s11104-013-1589-0

Vernberg, F. J. (1993). *Salt-Marsh Processes : A Review*. *12*, 2167–2195.

Walker, R. R. (2010). Managing salinity in the vineyard. In *Growing Winegrapes* (p. 4).

Wanlin, P. (2007). Recherches Qualitatives : Bilan Et Prospectives De La Recherche Qualitative. *Recherche Qualitative*, *Hors Serie*(3), 243–272. http://www.recherche-qualitative.qc.ca/documents/files/revue/hors_serie/hors_serie_v3/Wanlin2.pdf

Weber, E. U. (2010). What shapes perceptions of climate change? *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, *1*(3), 332–342. https://doi.org/10.1002/wcc.41

Weiss, K., Moser, G., & Germann, C. (2006). *Perception de l ' environnement , conceptions du métier et pratiques culturales des agriculteurs face au développement durable Perception of the environment , professional conceptions and cultural behaviours of farmers in favor of sustainable development*. *56*, 73–81. https://doi.org/10.1016/j.erap.2005.04.003

Wendland, F., Blum, A., Coetsiers, M., Gorova, R., Griffioen, J., Grima, J., Hinsby, K., Kunkel, R., Marandi, A., Melo, T., Panagopoulos, A., Pauwels, H., Ruisi, M., Traversa, P., Vermooten, J. S. A., & Walraevens, K. (2008). European aquifer typology: A practical framework for an overview of major groundwater composition at European scale. *Environmental Geology*, *55*(1), 77–85. https://doi.org/10.1007/s00254-007-0966-5

Wong, V. N. L., Greene, R. S. B., Dalal, R. C., & Murphy, B. W. (2010). Soil carbon dynamics in saline and sodic soils: A review. *Soil Use and Management*, *26*(1), 2–11. https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2009.00251.x

Yu, J., Li, Y., Han, G., Zhou, D., Fu, Y., Guan, B., Wang, G., Ning, K., Wu, H., & Wang, J. (2014). The spatial distribution characteristics of soil salinity in coastal zone of the Yellow River Delta. *Environmental Earth Sciences*, *72*(2), 589–599. https://doi.org/10.1007/s12665-013-2980-0

Zakharova, M., Yamnova, I. A., Vorotyntseva, L., & Toderich, K. (2018). *Handbook for Saline soil management* (R. Vargas (Ed.); Issue May). FAO.

Annexes

Annexes

Annexe A : Statistiques de salinité par composante du paysage

Zones géomorphologiques	Surface [0-40cm] EC_{sp} (mS.cm^{-1})						Profondeur [90-120cm] EC_{sp} (mS.cm^{-1})						Comparaison Surface-profondeur Kruskal-Wallis		
	Nb	Moy.	Median	Std.	Min.	Max.	Nb	Moy.	Median	Std.	Min.	Max.	Chi-squared	P-value	Significativité
Zone en eau	12	55.19	48.84	35.81	10.80	103.60	7	18.89	13.35	13.37	6.59	40.72	5.2071	0.02249	*
Plaines inférieures	171	7.23	3.94	11.07	0.92	102.32	127	11.54	6.33	13.54	0.54	98.29	20.789	5.127^{-6}	****
Plaines supérieures	56	0.57	3.08	1.05	0.74	6.62	43	3.50	3.00	1.67	1.92	11.29	3.1148^{-4}	0.9859	ns
Plateaux inférieurs	23	1.48	2.55	1.10	0.71	4.00	4	2.73	2.39	0.71	2.35	3.80	4.6612^{-3}	0.9456	ns
Plateaux supérieurs	14	0.44	1.14	0.96	0.72	3.20	5	4.02	2.88	2.48	2.42	8.32	4.9371	0.02629	*
Coteaux	13	3.42	3.01	2.04	0.97	9.65	6	8.81	5.73	7.76	2.03	21.01	1.9692	0.1605	ns
Structure tabulaire	4	2.42	2.57	1.18	0.85	3.72	2	2.66	2.66	0.06	2.62	2.70	0.85714	0.3545	ns

Figure i : Conductivité électrique (CE_{sp}) en surface (0-40cm) et en profondeur (90-120cm) et test de Kruskal-Wallis entre CE_{sp} surface et profondeur pour chaque zone géomorphologique. Significativité : <0.05 *, <0.01**, <0.005***, <0.001****

Type de sol	Surface [0-40cm] EC_{sp} (mS.cm^{-1})						Profondeur [90-120cm] EC_{sp} (mS.cm^{-1})						Comparaison Surface-profondeur Kruskal-Wallis		
	Nb	Moy.	Median	Std.	Min.	Max.	Nb	Moy.	Median	Std.	Min.	Max.	Chi-squared	P-value	Significativité
Salisol réductique	19	34.19	27.92	28.90	2.72	102.32	13	26.38	28.38	12.08	6.35	45.17	3.6805^{-4}	0.9847	ns
Fluviosol à horizon réductique en profondeur	111	9.45	4.43	16.90	0.74	103.60	87	11.36	6.11	14.37	0.54	98.29	7.196	7.307^{-3}	**
Fluviosol calcaire redoxique	81	3.36	2.86	3.75	0.71	31.87	64	5.63	3.16	5.76	1.02	32.35	6.7297	9.482^{-3}	**
Calcosol en domaine alluvio-colluvial	20	3.91	3.80	1.59	0.99	7.60	8	4.83	4.14	2.08	2.54	8.22	1.0345	0.3091	ns
Calcosol sur colluvions	21	1.98	1.55	1.06	0.72	4.00	5	2.33	2.35	0.18	2.03	2.51	0.56017	0.4542	ns
Calcosol sur formations calcaires anciennes	24	3.27	3.12	1.58	1.12	9.65	9	7.49	6.33	6.59	2.05	21.01	1.3744	0.2411	ns

Figure ii : Conductivité électrique (CE_{sp}) en surface (0-40cm) et en profondeur (90-120cm) et test de Kruskal-Wallis entre CE_{sp} surface et profondeur pour type de sol. Significativité : <0.05 *, <0.01**, <0.005***, <0.001****

Occupation du sol	Surface [0-40cm] EC_{sp} (mS.cm^{-1})						Profondeur [90-120cm] EC_{sp} (mS.cm^{-1})						Comparaison Surface-profondeur Kruskal-Wallis		
	Nb	Moy.	Median	Std.	Min.	Max.	Nb	Moy.	Median	Std.	Min.	Max.	Chi-squared	P-value	Significativité
Vigne	199	3.44	3.01	3.00	0.71	34.79	139	5.73	3.84	5.31	0.54	35.87	19.962	7.9^{-6}	****
Cultures	20	4.02	3.46	2.72	0.85	9.66	9	8.11	4.93	6.02	2.65	19.77	3.38	0.06599	ns
Autre (friches, prairies…)	33	8.33	3.97	9.43	1.00	40.20	15	12.96	6.87	11.40	2.05	35.79	3.875	0.04901	*
Espaces naturels	41	28.36	13.31	31.13	1.52	103.60	31	24.96	21.04	20.13	3.33	98.29	0.44261	0.5059	ns

Figure iii : Conductivité électrique (CE_{sp}) en surface (0-40cm) et en profondeur (90-120cm) et test de Kruskal-Wallis entre CE_{sp} surface et profondeur pour les grandes classes d'occupation des sols. Significativité : <0.05 *, <0.01**, <0.005***, <0.001****

ASA	Surface [0-40cm] EC_{sp} (mS.cm^{-1})						Profondeur [90-120cm] EC_{sp} (mS.cm^{-1})						Comparaison Surface-profondeur Kruskal-Wallis		
	Nb	Moy.	Median	Std.	Min.	Max.	Nb	Moy.	Median	Std.	Min.	Max.	Chi-squared	P-value	Significativité
ASA Coursan	28	2.95	3.08	0.87	0.10	5.02	22	3.97	2.65	3.97	1.15	16.32	0.16846	0.6815	ns
ASA Raonel	76	4.37	3.85	2.09	0.74	11.81	62	6.62	4.92	4.98	1.02	26.79	7.3877	0.006567	ns
ASA Cercle	12	10.09	3.59	13.09	1.58	40.20	8	16.04	14.74	14.88	1.43	34.50	0.14881	0.6997	ns
ASA Ricardelle	11	15.23	12.37	13.47	2.93	39.95	10	22.37	17.72	20.32	2.44	60.16	0.079339	0.7782	ns
Hors ASA	165	9.07	3.07	18.87	0.71	103.60	91	10.79	5.99	13.88	0.54	98.29	18.64	1.58^{e-5}	****

Figure iv : Conductivité électrique (CE_{sp}) en surface (0-40cm) et en profondeur (90-120cm) et test de Kruskal-Wallis entre CE_{sp} surface et profondeur par emprise spatiale d'ASA. Significativité : <0.05 *, <0.01**, <0.005***, <0.001****

Annexe B : Approche multi-factorielle : analyse en composantes multiples (ACM)

L'inertie des axes factoriels indique si les modalités et les variables sont structurées et corrélées entre elles. L'analyse des composantes suggère le nombre judicieux de composantes à prendre en compte et lesquelles contribuent le plus à chaque axe. L'inertie totale de l'ACM est de 5,14 et l'axe 1 en explique 11,57%. Les 2 premiers axes de l'analyse expriment 21,92% de l'inertie totale du jeu de données ; cela signifie que 21,92% de la variabilité totale du nuage des individus est représentée dans ce plan. Cette valeur est supérieure à la valeur référence de 15,11%, la variabilité expliquée par ce plan est donc significative (Figure v).

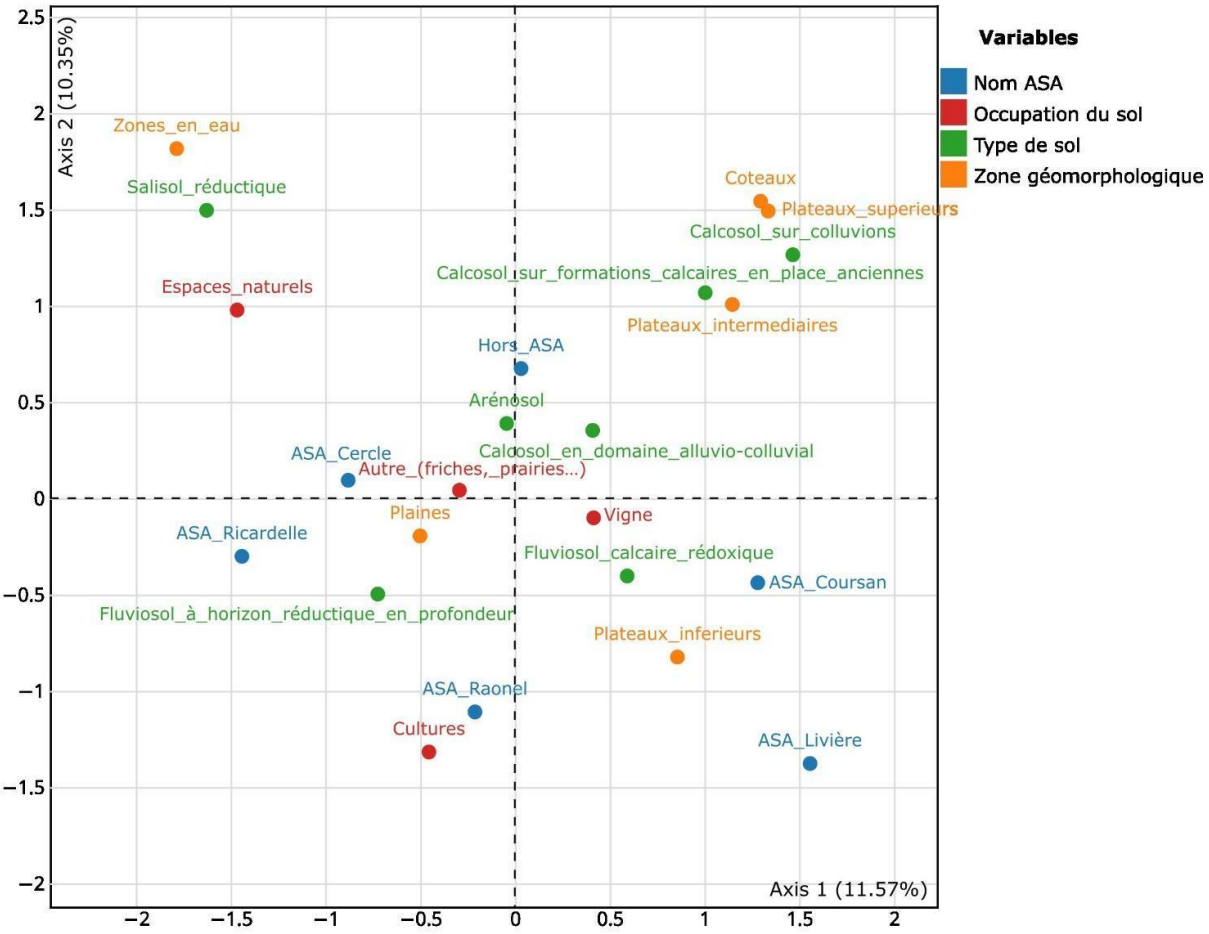
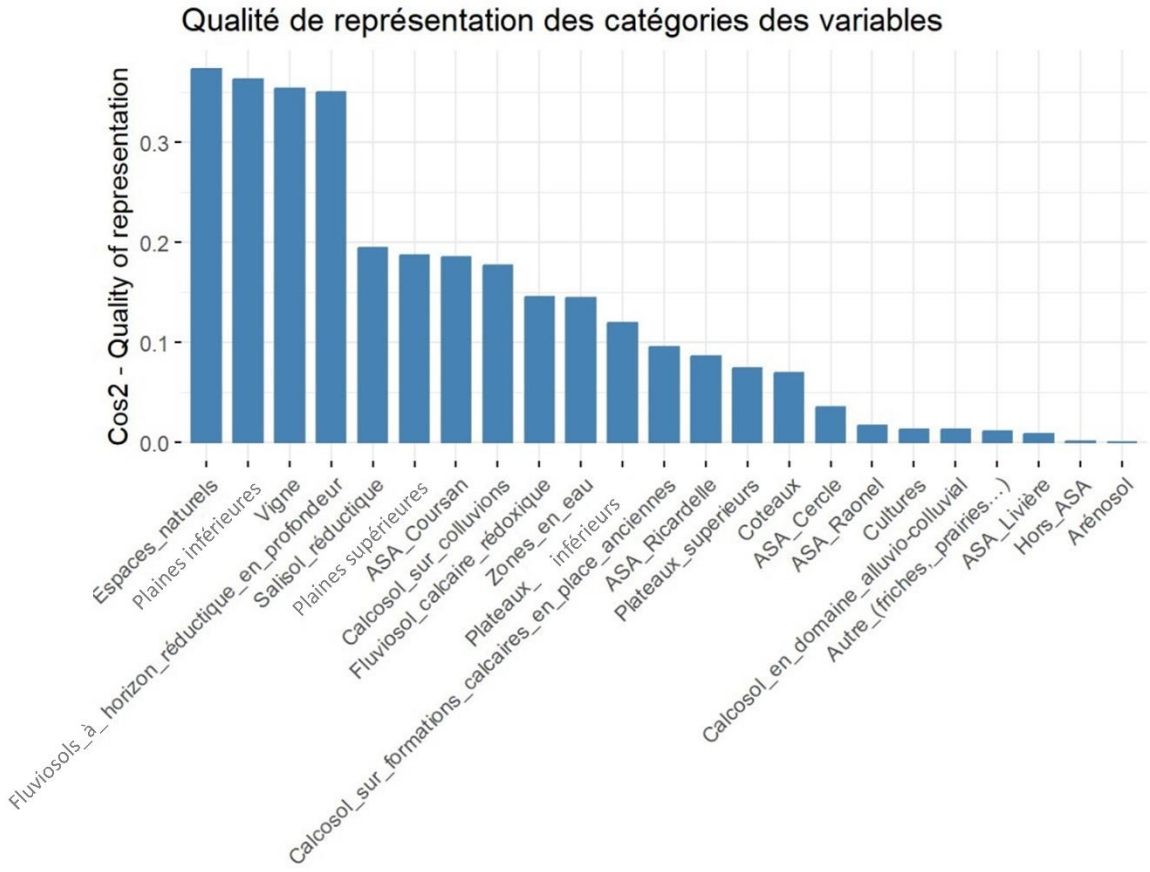
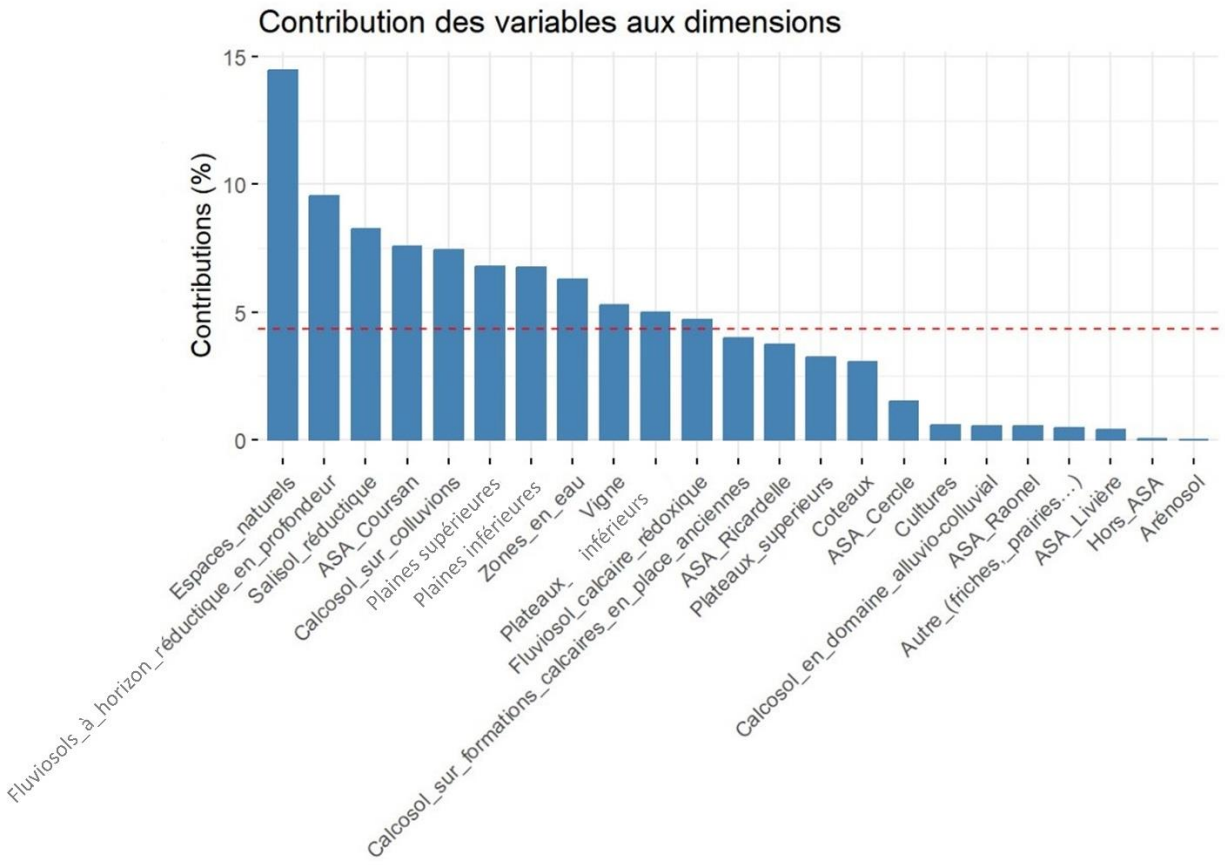


Figure v : Représentation des variables actives selon les axes 1 et 2 de l'ACM

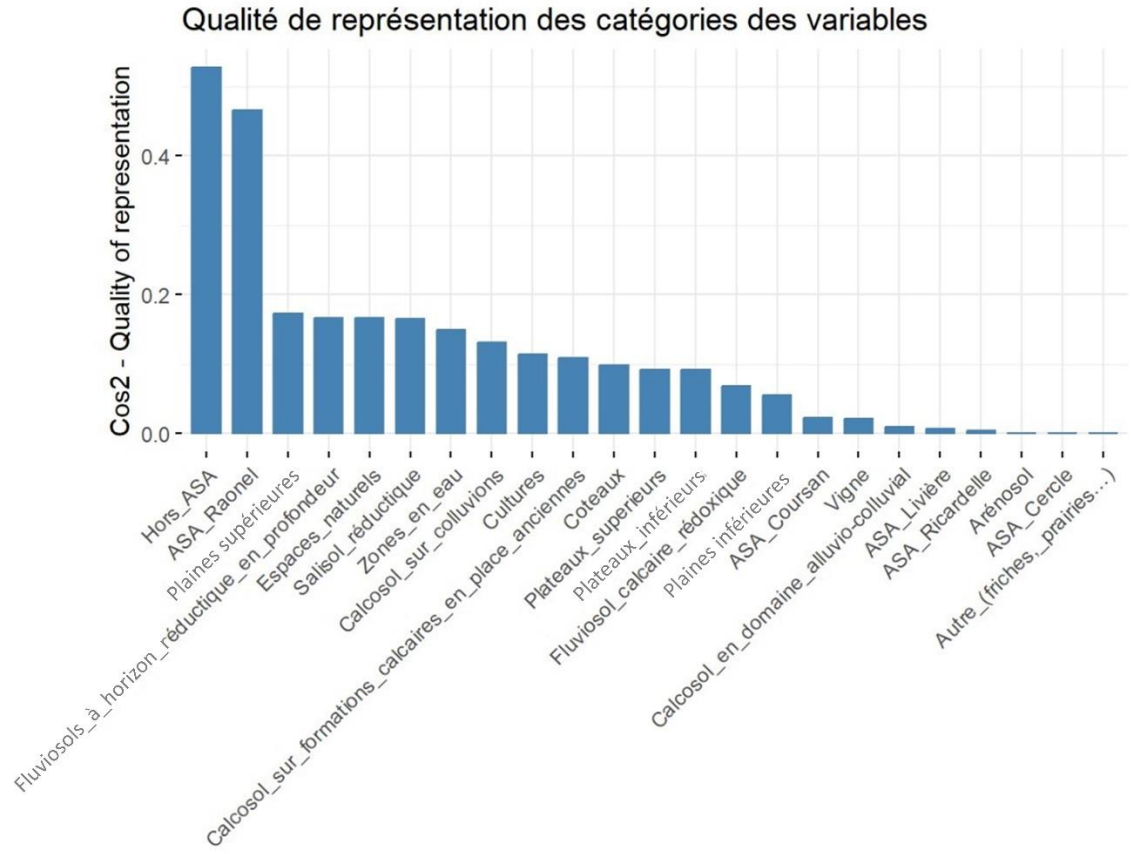
Les modalités contribuant le plus à la construction de l'axe 1 sont (par ordre croissant) : espaces naturels, fluviosol à horizon réductique en profondeur, salisol réductique, ASA Coursan, calcosol sur colluvions, plaines supérieures, plaines inférieures, zones en eau, vigne, plateaux inférieurs. Les modalités qui contribuent majoritairement à l'axe 2 sont (par ordre croissant) : ASA Raonel, Hors ASA, salisol réductique, zones en eau, espaces naturels, plaines supérieures, calcosols sur colluvions, cultures, fluviosol à horizon réductique en profondeur, calcosol sur formations anciennes et coteaux (Figure vi).

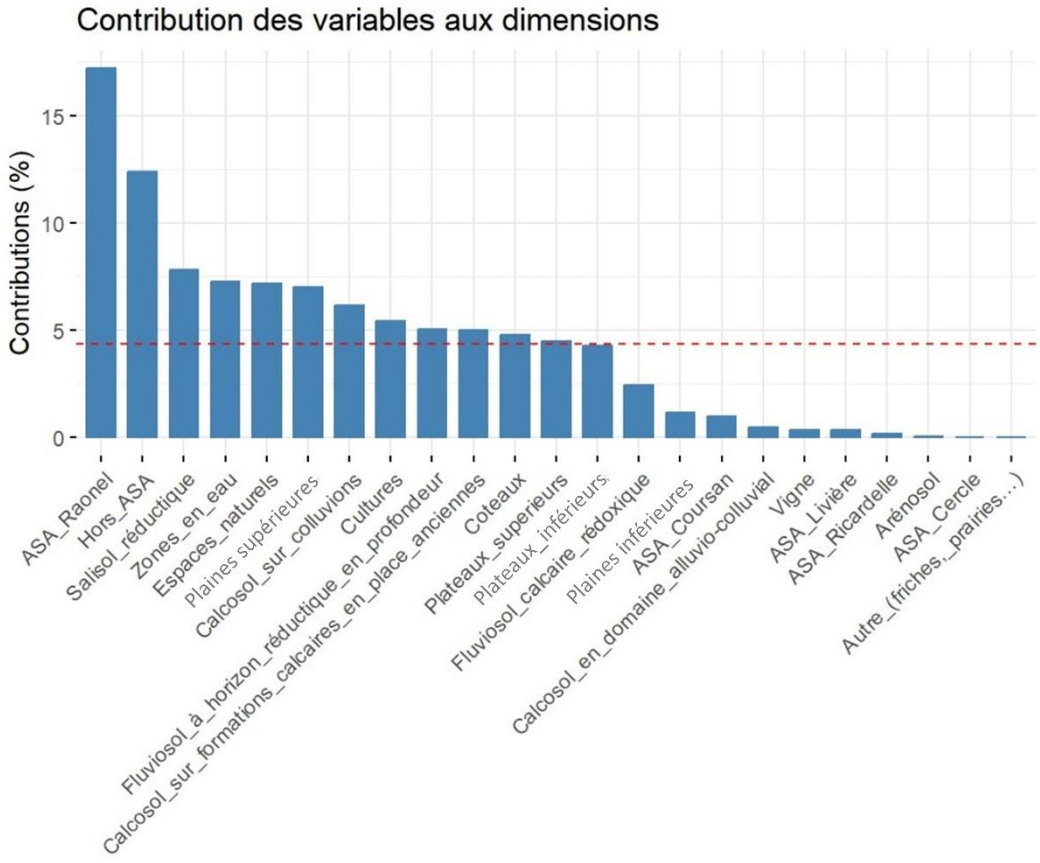
Axe 1



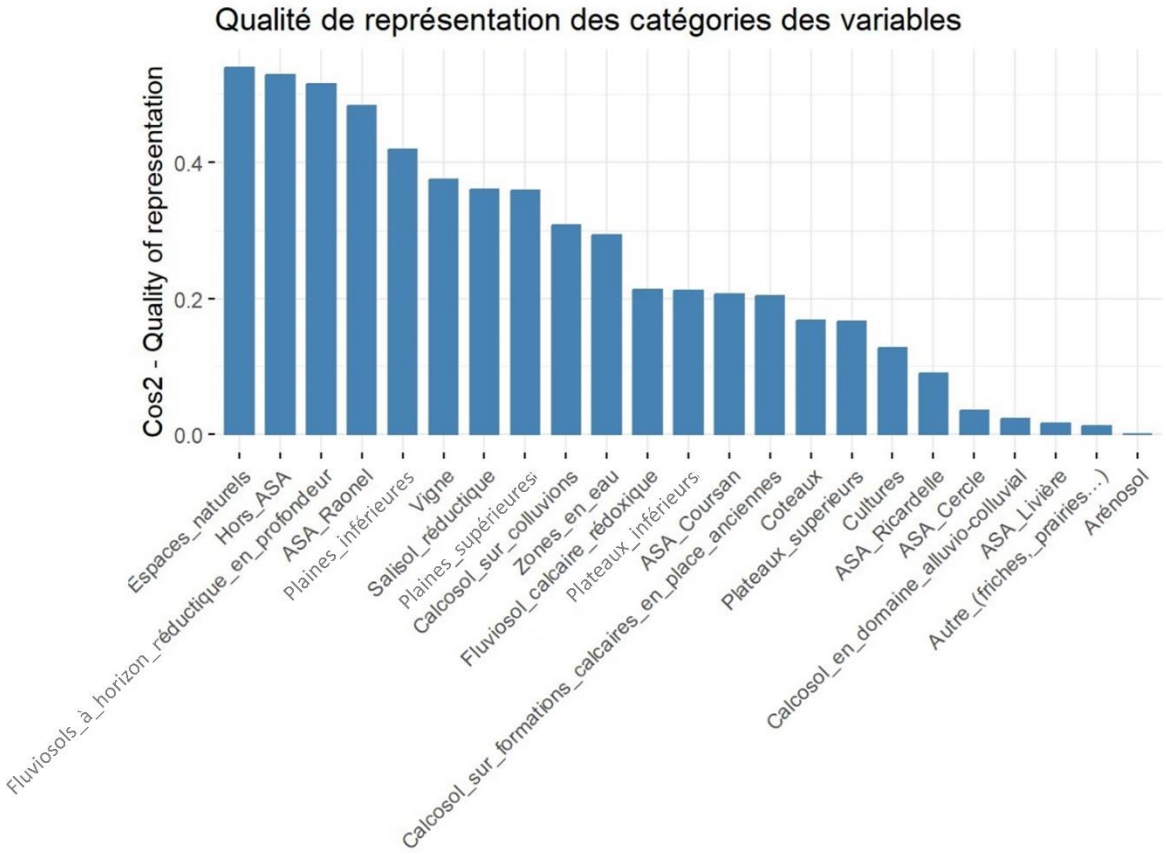

Contribution des variables aux dimensions
Contributions (%)
15
10
5
0
Espaces_naturels
Fluviosols_à_horizon_réductique_en_profondeur
Salisol_réductique
ASA_Coursan
Calcosol_sur_colluvions
Plaines supérieures
Plaines inférieures
Zones_en_eau
Vigne
Plateaux_inférieurs
Fluviosol_calcaire_rédoxique
Calcosol_sur_formations_calcaires_en_place_anciennes
ASA_Ricardelle
Plateaux_superieurs
Coteaux
ASA_Cercle
Cultures
Calcosol_en_domaine_alluvio-colluvial
ASA_Raonel
Autre_(friches,_prairies...)
ASA_Livière
Hors_ASA
Arénosol

Axe 2


Qualité de représentation des catégories des variables
Cos2 - Quality of representation
0.4
0.2
0.0
Hors_ASA
ASA_Raonel
Plaines supérieures
Fluviosols_à_horizon_réductique_en_profondeur
Espaces_naturels
Salisol_réductique
Zones_en_eau
Calcosol_sur_colluvions
Cultures
Calcosol_sur_formations_calcaires_en_place_anciennes
Coteaux
Plateaux_superieurs
Plateaux_inférieurs
Fluviosol_calcaire_rédoxique
Plaines inférieures
ASA_Coursan
Vigne
Calcosol_en_domaine_alluvio-colluvial
ASA_Livière
ASA_Ricardelle
Arénosol
ASA_Cercle
Autre_(friches,_prairies...)


Contribution des variables aux dimensions
Contributions (%)
15
10
5
0
ASA_Raonel
Hors_ASA
Salisol_réductique
Zones_en_eau
Espaces_naturels
Plaines_supérieures
Calcosol_sur_colluvions
Cultures
Fluviosol_à_horizon_réductique_en_profondeur
Calcosol_sur_formations_calcaires_en_place_anciennes
Coteaux
Plateaux_superieurs
Plateaux_inférieurs
Fluviosol_calcaire_rédoxique
Plaines_inférieures
ASA_Coursan
Calcosol_en_domaine_alluvio-colluvial
Vigne
ASA_Livière
ASA_Ricardelle
Arénosol
ASA_Cercle
Autre_(friches,_prairies...)

Axe 1 et 2


Qualité de représentation des catégories des variables
Cos2 - Quality of representation
0.4
0.2
0.0
Espaces_naturels
Hors_ASA
Fluviosols_à_horizon_réductique_en_profondeur
ASA_Raonel
Plaines_inférieures
Vigne
Salisol_réductique
Plaines_supérieures
Calcosol_sur_colluvions
Zones_en_eau
Fluviosol_calcaire_rédoxique
Plateaux_inférieurs
ASA_Coursan
Calcosol_sur_formations_calcaires_en_place_anciennes
Coteaux
Plateaux_superieurs
Cultures
ASA_Ricardelle
ASA_Cercle
Calcosol_en_domaine_alluvio-colluvial
ASA_Livière
Autre_(friches,_prairies...)
Arénosol

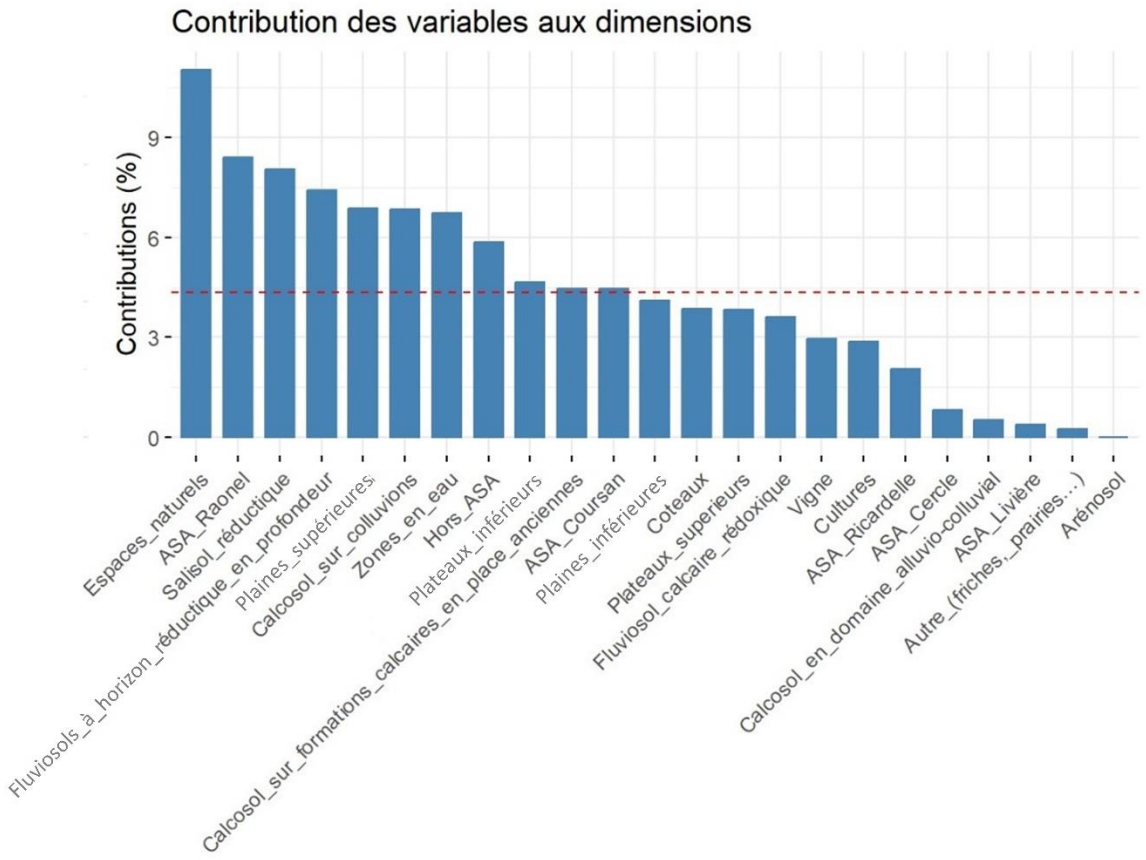


Figure vi : Modalités intervenant dans la composition de chaque classe

En considérant l'ensemble des variables (actives et supplémentaires), la variable qui explique au mieux les distances entre individus est la variable : EC [0-40cm] (Figure vii). La variables conductivité électrique en surface (0-40 cm) suit une parabole dont les valeurs sont croissantes de la droite vers la gauche du graphique.

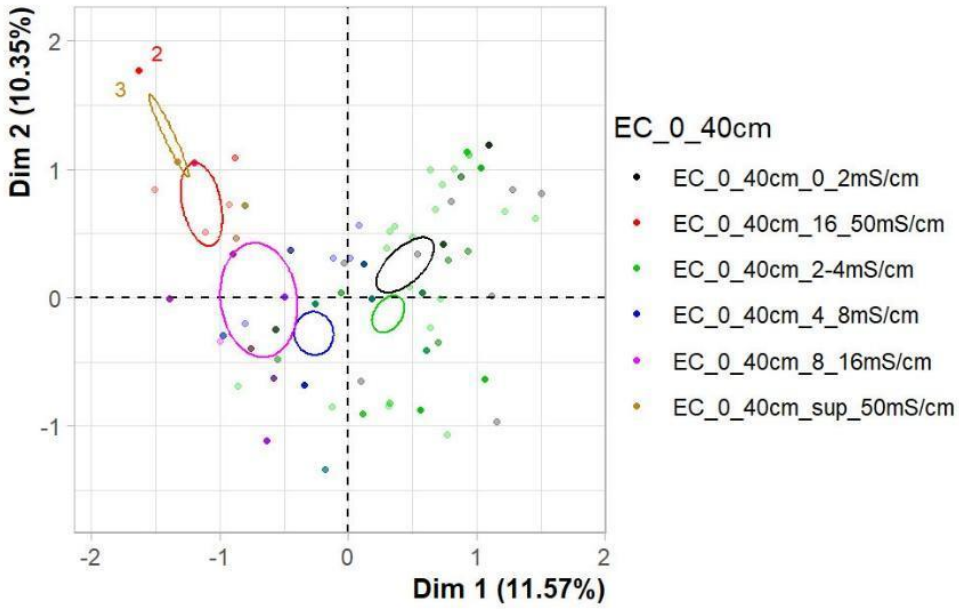


Figure vii : Représentation de la variable EC [0-40cm] des individus selon les axes 1 et 2.

Annexe C : Classification Ascendante Hiérarchique (CAH)

A la suite de l'ACM, la classification ascendante hiérarchique réalisée sur les individus fait apparaître 7 clusters (Figure viii).

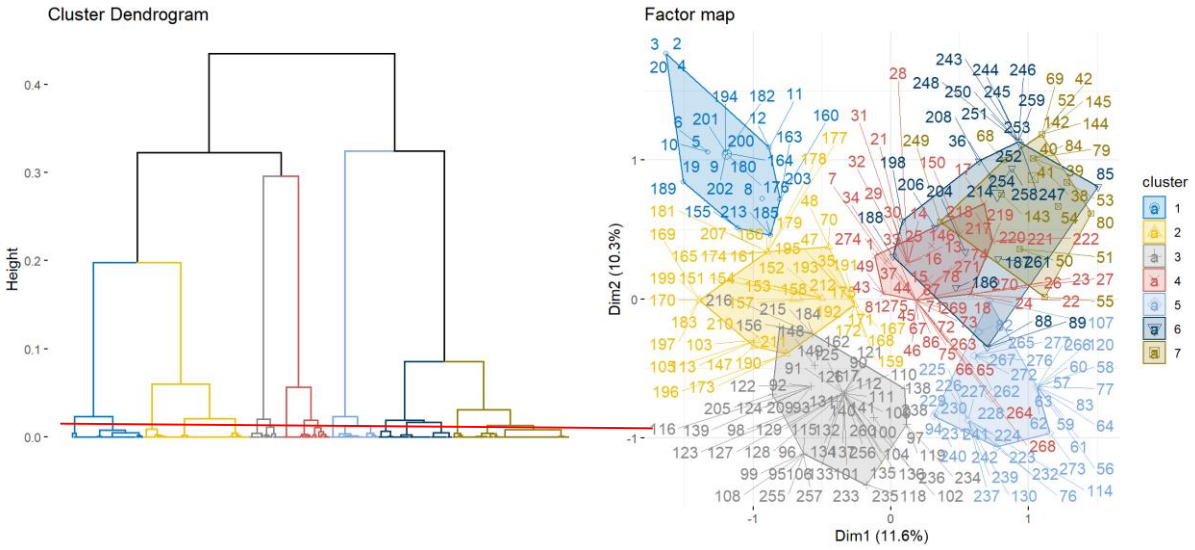


Figure viii : Classification ascendante hiérarchique avec en (a) le dendrogramme permettant la définition de 7 clusters et en (b) représentation de l'appartenance des individus aux clusters selon les axes 1 et 2.

Les classes sont formées en fonction d'une forte fréquence et d'une faible fréquence d'apparition (v.test) de certaines modalités (Figure ix). Si v.test > 0, alors la variable est significativement présente dans le groupe, sinon (v.test < 0) elle est significativement peu représentée dans le groupe.

La classe 1 est principalement composée de salisols réductiques (70%) et de fluviosols à horizon réductiques en profondeur (22%), de zones en eau (44%) et de plaines inférieures (56%), d'espaces naturels (74%) et de friches ou de prairies (19%) et enfin 85% des individus de ce groupe n'appartiennent pas à une ASA, les 15% restants étant dans l'ASA du Cercle. La CE est élevée dans cette classe avec une CE à 0-40 cm supérieure à 16 $mS.cm^{-1}$ pour 78% des

individus, une CE à 40-90 cm supérieure à 16 $mS.cm^{-1}$ pour 71% des individus et une CE à 90-120 cm supérieure à 16 $mS.cm^{-1}$ pour 44% des individus.

La classe 2 est majoritairement composée de fluviosols à horizon réductique en profondeur (93%), de plaines inférieures (100%), de vignes (39%), d'espaces naturels (45%) et de friches ou prairies (16%) et la majorité des individus de cette classe (68%) sont hors ASA, avec néanmoins 25% des individus gérés par l'ASA Ricardelle. La CE dans cette classe est très hétérogène, souvent supérieure à 2 $mS.cm^{-1}$ et allant jusqu'à plus de 16 $mS.cm^{-1}$ pour chaque profondeur.

La classe 3 est composée de fluviosol à horizon réductique en profondeur pour 98% des individus, principalement situés dans les plaines inférieures (87%), majoritairement en vigne (65%) et gérés par l'ASA Raonel (87%). La CE à 0-40 cm est inférieure à 16 $mS.cm^{-1}$ avec majoritairement une CE comprise entre 2 et 8 $mS.cm^{-1}$. Au-delà de 40 cm, la CE est majoritairement entre 2 et 8 $mS.cm^{-1}$ (71% à 40-90 cm et 50% à 90-120 cm), avec 18% à 40-90 cm et 15% à 90-120 cm entre 8 et 16 $mS.cm^{-1}$.

La classe 4 est composée de fluviosol calcaire rédoxique à 63% et calcosol en domaine alluvio-colluvial à 34%, en plaine à 73% avec respectivement 11% et 16% sur plaines supérieures et plateaux inférieurs, sur des parcelles de vigne à 91% et 100% hors ASA. A 0-40 cm, la CE ne dépasse pas 8 $mS.cm^{-1}$ avec une CE entre 2 et 4 $mS.cm^{-1}$ pour 48% des individus de cette classe. A partir de 40 cm, la CE est plus hétérogène, allant de 0 à 16 $mS.cm^{-1}$. Les sols de cette classe sont répartis entre profonds et peu profonds (48% des sondages ne dépassent pas 90 cm).

La classe 5 est majoritairement composée de fluviosols calcaires rédoxiques (98%), de plateaux intermédiaires (80%), de vignes (90%) et répartis entre les ASA Raonel et Coursan (respectivement 41% et 54%). La CE est majoritairement comprise entre 2 et 4 $mS.cm^{-1}$ sur toute la profondeur (respectivement 88% pour 0-40 cm, 73% pour 40-90 cm et 61% pour 90-120 cm).

La classe 6 est principalement composée de calcosols sur formations calcaires anciennes, répartis sur les coteaux, plaines supérieures plateaux inférieurs et supérieurs et les plaines inférieures (respectivement 42%, 23%, 15%, 8% et 12%), en vigne (88%) et hors ASA 81%. A 0-40 cm, la CE est rarement supérieure à 4 $mS.cm^{-1}$ et principalement comprise entre 2 et 4

mS.cm^{-1} (69% des individus). A 40-90 cm la CE est répartie de manière hétérogène dans les classes allant de 0 à 8 mS.cm^{-1}. Enfin à 90-120 cm, la CE est comprise entre 2 et 8 mS.cm^{-1}. Les sols de cette classe sont majoritairement peu profonds (58% ne dépassent pas 90 cm).

La classe 7 est principalement composée de calcosols sur colluvions (95%), de plateaux majoritairement inférieurs et supérieurs (43% chacun), de vigne (76%) et hors ASA (76%). La CE est faible dans cette classe, inférieure à 4 mS.cm^{-1} sur toute la profondeur et avec des sols majoritairement très peu profonds (61% des sondages n'ont pas dépassé les 40 cm et 76% les 90 cm).

Classes	Modalités	v.test	Classes	Modalités	v.test
Classe 1	Salisol réductique	9,07	Classe 2	Fluviosol à horizon réductique en profondeur	8.01
	Zone en eau	7.53		Plaines inférieures	6.88
	Espaces naturels	7.45		ASA Ricardelle	6.22
	EC [0-40cm] = 16-50 mS.cm^{-1}	7.08		Espaces naturels	5.46
	EC [40-90cm] = 16-50 mS.cm^{-1}	6.28		EC [40-90cm] = 8-16 mS.cm^{-1}	3.10
	EC [0-40cm] > 50 mS.cm^{-1}	5.50		EC [90-120cm] = 16-50 mS.cm^{-1}	3.05
	EC [90-120cm] = 16-50 mS.cm^{-1}	4.87		EC [0-40cm] = 8-16 mS.cm^{-1}	2.94
	Hors ASA	3.53		EC [90-120cm] > 50 mS.cm^{-1}	2.25
	EC [40-90cm] > 50 mS.cm^{-1}	3.29		EC [40-90cm] = 16-50 mS.cm^{-1}	2.15
	ASA Cercle	2.26		EC [0-40cm] = 4-8 mS.cm^{-1}	2.14
	ASA Coursan	-1.97		Hors ASA	2.07
	Fluviosol à horizon réductique en profondeur	-2.00		Cultures	-1.98
	EC [0-40cm] = 4-8 mS.cm^{-1}	-2.54		Salisol réductique	-2.13
	EC [0-40cm] = 0-2 mS.cm^{-1}	-2.64		Calcosol en domaine alluvio-colluvial	-2.21
	Fluviosol calcaire rédoxique	-2.79		Calcosol sur colluvions	-2.28
	Plaines supérieures	-3.16		Plateaux inférieurs	-2.42
	EC [90-120cm] = 2-4 mS.cm^{-1}	-3.42		EC [90-120cm] = NA	-2.45
	ASA Raonel	-3.88		Calcosol sur formations calcaires anciennes	-2.48
	EC [40-90cm] = 2-4 mS.cm^{-1}	-4.09		EC [0-40cm] = 2-4 mS.cm^{-1}	-2.57
	EC [0-40cm] = 2-4 mS.cm^{-1}	-4.60		ASA Coursan	-2.75
	Vigne	-6.77		ASA Raonel	-3.60
Classe 3	ASA Raonel	11.54		Fluviosol calcaire rédoxique	-3.85
	Fluviosol à horizon réductique en profondeur	11.21		Vigne	-4.21
	Cultures	5.34		Plaines supérieures	-4.29
	Plaines inférieures	5.30	Classe 4	Hors ASA	8.75
	EC [40-90cm] = 4-8 mS.cm^{-1}	4.84		Calcosol en domaine alluvio-colluvial	7.50
	EC [0-40cm] = 4-8 mS.cm^{-1}	3.59		Fluviosol calcaire redox	5.83
	EC [90-120cm] = 4-8 mS.cm^{-1}	2.92		Vigne	4.55
	ASA Cercle	2.09		EC [0-40cm] = 0-2 mS.cm^{-1}	2.82
	Zones en eau	-2.01		EC [40-90cm] = 0-2 mS.cm^{-1}	2.62
	Salisol réductique	-2.71		EC [90-120cm] = NA	2.46
	EC [0-40cm] = 16-50 mS.cm^{-1}	-2.71		Plaines inférieures	2.40
	Calcosol en domaine alluvio-colluvial	-2.80		Plateaux inférieurs	2.16
	Calcosol sur colluvions	-2.89		EC [40-90cm] = NA	1.98
	Plateaux intermédiaires	-3.06		Plaines supérieures	-2.03
	Calcosol sur formations calcaires anciennes	-3.14		Cultures	-2.35
	ASA Coursan	-3.46		EC [0-40cm] = 8-16 mS.cm^{-1}	-2.44
	EC [40-90cm] = NA	-3.93		Salisol réductique	-2.52
	Espaces naturels	-4.38		EC [0-40cm] = 16-50 mS.cm^{-1}	-2.52
	Fluviosol calcaire rédoxique	-6.19		EC [90-120cm] = 16-50 mS.cm^{-1}	-2.58
	Hors ASA	-9.67		Calcosol sur colluvions	-2.69
Classe 5	Fluviosol calcaire rédoxique	10.19		Calcosol sur formations calcaires anciennes	-2.93
	Plaines supérieures	9.25		ASA Coursan	-3.23
	ASA Coursan	8.18		EC [40-90cm] = 16-50 mS.cm^{-1}	-3.30
	EC [40-90cm] = 2-4 mS.cm^{-1}	6.24		Espaces naturels	-4.10

	EC [0-40cm] = 2-4 mS.cm^{-1}	5.78
	EC [90-120cm] = 2-4 mS.cm^{-1}	5.75
	Vigne	3.62
	ASA Raonel	2.09
	EC [0-40cm] = 4-8 mS.cm^{-1}	-2.01
	Salisol réductique	-2.03
	EC [0-40cm] = 16-50 mS.cm^{-1}	-2.03
	Calcosol en domaine alluvio-colluvial	-2.10
	Calcosol sur colluvions	-2.17
	Calcosol sur formations calcaires anciennes	-2.37
	EC [0-40cm] = 0-2 mS.cm^{-1}	-2.75
	Espaces naturels	-3.36
	EC [40-90cm] = NA	-3.51
	EC [90-120cm] = NA	-4.20
	Plaines inférieures	-5.92
	Fluviosol à horizon réductique en profondeur	-5.93
	Hors ASA	-7.64
Classe 7	Calcosol sur colluvions	11.02
	Plateaux supérieurs	6.18
	EC [40-90cm] = NA	4.97
	Plateaux inférieurs	4.52
	EC [0-40cm] = 0-2 mS.cm^{-1}	4.08
	EC [90-120cm] = NA	4.04
	Hors ASA	2.13
	EC [40-90cm] = 8-16 mS.cm^{-1}	-2.02
	EC [90-120cm] = 4-8 mS.cm^{-1}	-2.56
	EC [0-40cm] = 4-8 mS.cm^{-1}	-2.79
	ASA Raonel	-3.33
	Fluviosol calcaire rédoxique	-3.48
	Fluviosol à horizon réductique en profondeur	-3.69
	Plaines inférieures	-6.00
	ASA Raonel	-6.07
	Fluviosol à horizon réductique en profondeur	-7.34
Classe 6	Calcosol sur formation calcaires anciennes	11.89
	Coteaux	7.22
	Hors ASA	2.93
	EC [40-90cm] = NA	2.92
	EC [90-120cm] = NA	2.57
	Vigne	2.52
	EC [0-40cm] = 2-4 mS.cm^{-1}	2.32
	Espaces naturels	-2.50
	ASA Raonel	-2.50
	Fluviosol calcaire rédoxique	-3.96
	Fluviosol à horizon réductique en profondeur	-4.96
	Plaines inférieures	-5.20

Figure ix : Description des classes en fonction de la fréquence d'apparition des modalités

Annexe D : Comparaison des classes

La CE de la classe 1 est statistiquement plus élevée que celle des autres classes avec une CE moyenne de 39,9 mS.cm^{-1} à 0-40 cm, 31,8 mS.cm^{-1} à 40-90 cm et 24,3 mS.cm^{-1}, décroissante avec la profondeur. La CE de la classe 2 est également significativement différente des autres classes avec une CE augmentant avec la profondeur allant de 8,9 mS.cm^{-1} en surface à 17,1 mS.cm^{-1} en profondeur. La classe 7 est et significativement plus faible que les autres classes, principalement en surface (2 mS.cm^{-1}).

La Figure x compare les classes pour chaque profondeur par le test de Wilcoxon. A 0-40 cm, les classes 3, 4, 5 et 6 ont des CE intermédiaires entre celles des classes 2 et 7 (entre 3 et 4 mS.cm^{-1}). A 40-90 cm, les CE peuvent être classées comme suit : CE classe 1 > CE classe 2 > CE classe 3 > CE classes 5 et 7. Les classes 4 et 6 ont des CE intermédiaires entre celles des classes 3 et 5. A 90-120 cm, seules les classes 1 et 5 se distinguent des autres classes avec une très forte CE pour la classe 1 et moyenne (3,8 mS.cm^{-1}) pour la classe 5.

Profondeur	Classes	n	min	max	médiane	q1	q3	moyenne	écart-type	test de Wilcoxon
EC [0-40cm]	1	27	2.718	103.600	28.956	18.422	55.844	39.888	32.509	a
	2	44	0.917	45.968	5.638	3.171	10.544	8.948	10.081	b
	3	62	0.742	11.810	3.930	2.656	5.232	4.420	2.287	bc
	4	56	0.711	7.604	2.837	1.817	3.907	2.948	1.602	de
	5	41	1.623	6.623	3.093	2.690	3.575	3.203	0.860	cd
	6	26	1.124	9.647	3.121	2.815	3.572	3.213	1.551	cd
	7	21	0.720	3.997	1.924	1.069	2.817	2.045	1.080	e
EC [40-90cm]	1	25	6.072	82.452	25.191	17.059	38.205	31.799	21.144	a
	2	40	0.752	85.012	9.852	4.024	17.712	15.147	16.735	b
	3	61	1.060	22.155	5.369	3.587	7.525	6.238	4.045	c
	4	41	0.567	12.110	3.371	2.023	6.594	4.279	3.182	cd
	5	41	1.385	16.650	2.747	2.429	3.462	3.700	2.793	d
	6	16	1.328	22.019	2.656	1.904	5.919	4.794	5.127	cd
	7	8	0.772	6.135	2.486	1.966	2.840	2.657	1.689	d
EC [90-120cm]	1	18	6.591	45.173	25.328	13.465	33.524	24.348	12.656	a
	2	36	0.542	98.291	9.500	3.842	22.797	17.144	19.992	ab
	3	46	1.021	26.786	5.215	3.765	8.056	6.925	5.154	bc
	4	29	1.691	18.398	5.981	2.815	8.217	6.325	4.596	bc
	5	38	1.146	16.321	2.889	2.520	4.038	3.836	2.774	c
	6	11	2.032	21.009	4.086	2.605	7.202	6.687	6.182	bc
	7	5	2.349	3.961	2.429	2.349	2.508	2.719	0.697	bc

Figure x : Statistiques descriptives et comparaison des classes pour chaque profondeur par le test de Wilcoxon

Annexe E : 2 exemples de guides d'entretien orientés selon la structure enquêtée

Date :

Entretien sur l'historique de la gestion et la quantification des volumes d'eau

Parc Naturel Régional de la Narbonnaise en Méditerranée

1. Présentation du PNRNM
   a. Présentation personnelle + PNRNM

Nom	Prénom	Rôle au sein du PNR
VOQUE	Eric	

   b. Gestion des parcelles

La gestion des zones agricoles et naturels, bien différentes l'une de l'autre, peut impacter la pollution saline. En effet, le travail de la terre et notamment en profondeur ou au contraire son inexploitation, n'impliquent pas l'utilisation des mêmes volumes d'eau.

Terres gérées par le PNR	Rôle		Orientation actuelle des terrains			Irrigation (O/N) et type
	Gestionnaire	Propriétaire	Agriculture	Pastoralisme	Milieu naturel	
Ex : Le Grand Castélou	PNR	CdL			x semi-naturel	O Submersions

Voir carte : *Ne pas à hésiter à dessiner sur la carte*

   i. Comment ont été définies les limites d'actions du PNR?

……
……
……
……
……

ii. Quels sont les types de gestion des différentes zones ? (Climat et énergie, Eau, Paysage, Biodiversité)

……
……
……
……
……

2. Histoire agricole du territoire

La basse plaine de l'Aude possède une histoire qui a façonné son paysage, et c'est pourquoi nous nous y intéressons aujourd'hui. Le canal de la Robine, à priori, construit initialement pour la navigation sert aussi à l'irrigation. Il est intéressant de déterminer les débuts de la lutte anti-sel et les pratiques associées. Ces zones (délimitées précédemment) ont sûrement eu un tout autre visage et c'est ce que nous allons tenter de voir ici.

a. Le PNRNM

i. Y a t-il des événements historiques forts à retenir ?

……
……
……
……
……
……

ii. Quelles sont les décisions réglementaires et/ou politiques, les contrats qui ont particulièrement eu un impact sur la basse plaine de l'Aude ? (Agricole, usage de l'eau, volumes utilisés….)

……
……
……
……
……

b. Les assolements

i. Y a-t-il eu une modification du type d'occupation des sols ? Si oui, pouvez-vous préciser les périodes de transition ?

……
……
……
……
……

ii. Les pratiques culturales et les techniques de travail du sol ont-elles évolué ?

……
……
……
……
……

Nom des terrains	Orientation historique des terrains			La raison de ce changement ? Problème de sel ?
	Agriculture	Pastoralisme	Milieu naturel	
Le Grand Castélou				

Voir frise chronologique : *Annotation sur frise possible*

c. La salinité et les submersions

i. Depuis quand le PNR s'est intéressé à la problématique de la salinisation des eaux et des sols?

……
……
……
……
……

ii. Pouvez-vous nous parler de l'histoire de l'irrigation gravitaire chez vous ?

1. Quand datent les premières submersions ?
2. Avez-vous toujours pratiqué ce principe d'irrigation ?
3. A partir de quand l'irrigation a servi à lutter contre le sel ?

……
……
……
……
……

iii. Les techniques d'irrigation ont-elles évolué ? submersion naturelle (Aude), submersion anthropique (Robine), goutte-à-goutte, autres ?

……
……
……
……
……

d. Histoire de la Basse Plaine

D'après mon travail de bibliographie, j'ai pu rassembler les données collectées dans ces frises chronologiques. Le but ici est d'essayer de comprendre si certains événements hydro-climatiques ont pu avoir un impact notable en termes de sécheresse, inondation, ou ont pu être à l'origine de l'apparition de certaines maladies ayant induit un changement de culture et/ou de pratiques dans la zone d'étude. Des variations de fréquence et/ou d'intensité de ces événements peuvent aussi

Voir frise chronologique : *Annotation sur frise possible*

i. Crise hydro-climatique

1. Quels sont les épisodes climatiques qui vous ont marqués ? (sécheresses, submersions marines, inondations…)

……
……
……
……

ii. Agriculture
1. les grands changements agricoles : les grandes périodes de transition
2. les crises

……
……
……
……

iii. Aménagements hydro-agricoles
1. Quand la Robine a-t-elle commencé à être utilisée à des fins d'irrigation ?
2. Connaissez-vous les dates de construction des canaux de drainage principaux (Ste Marie, Pas des Tours, et Grand Vigne) ? Pourquoi ont-ils été créés (crues) ? quand ont-ils servi de drainage ? Qui les gèrent aujourd'hui (gestion individuelle ou collective) ?
3. Quand sont apparus les aménagements hydrauliques au niveau des parcelles ? Était-ce le fruit d'une réflexion collective ou d'actions plutôt individuelles ? Qui ou quel organisme était chargé de la gestion des travaux ?

……
……
……
……

iv. Contrats et acteurs
1. Quels sont les contrats que vous avez produits ou vécu qui ont induit un changement de pratique sur l'environnement, notamment agricole ?

……
……
……
……

3. Irrigation des terres
a. Organisation spatiale
i. Possédez-vous des îlots d'irrigation ? (= un ensemble de parcelles irriguées ayant une caractéristique commune concernant l'irrigation)
1. Sur quels critères sont-ils définis ?
2. Sont-ils régulièrement modifiés ?

……
……
……
……
……

b. Organisation temporelle (Romain REY)
   i. Comment gérez- vous vos submersions ?
   ii. Avez-vous un calendrier ?

……
……
……
……

c. Organisation technique
   i. Quelle est l'organisation spatiale des submersions ? Par parcelle ? par îlot ? Quels en sont les critères ?
   ii. Vous adaptez les submersions en fonction des parcelles, évaluez-vous les différentes quantités d'eau mise dans les parcelles ? Si oui, comment ?

……
……
……
……

Terrain	Prise d'eau	Prise d'eau			Système d'irrigation			Volumes d'eau associés			
		Robine	Aude	Autres ex: BRL	Submersion	Goutte à goutte	Autre	Compteurs		Explications (durée, débit…)	Types de prises Martelière /déversoir /autre
								Entrée	Sortie		
Le Grand Castélou	Canal Canélou	x									

4. Contacts
   i. Il y a-t-il des personnes que vous me conseillez d'aller rencontrer ?
   ii. Pourquoi ceux-là ?

Date :

Entretien sur l'historique de la gestion et la quantification des volumes d'eau

Union des Associations Syndicales d'Hydraulique de l'Est Audois

1. Présentation de l'organisme

a. Présentation personnelle + ASEAUDE

Nom	Prénom	Rôle au sein de l'ASEAUDE
BUHE	Louise	

- Quelles sont vos grandes actions au sein de l'ASEAUDE ?

……
……
……
……

- Pouvez-vous nous parler de l'AIEDEN ?

……
……
……
……

b. Présentation des ASAs

La délimitation du sol est primordiale pour en comprendre son fonctionnement, en effet, l'ensemble des ASAs ne possèdent peut-être pas les mêmes techniques de gestion les unes des autres ce qui peut fortement influencer la mobilité du sel dans les sols

- Pouvez-vous nous parler des ASAs ?
    - Pourquoi ont-elle adhéré à l'ASEAUDE ?

……
……
……
……
……
……

Voir Carte : *Dessiner dessus si nécessaire*

- Est-ce que le Riziculteur fait bien partie de l'ASA du Petit Mandirac ?

……
……
……
……
……

ASA	Source			Nombre de prises	Nom des prises	Volumes prélevés	Utilisation		
	Robine	Aude	Autres				Agriculture	Pastoralisme	Autres
Raonel									
la Rèche									
la Plaine de Livière									
Du Cercle									
Petit Mandirac									
Ricardelle									
Rives Gauche									
Salles d'Aude									
La Plaine de Lespignan									
Canal de Pezetis									
L'Ille									

2. Histoire

La basse plaine de l'Aude possède une histoire qui a façonné son paysage, et c'est pourquoi nous nous y intéressons aujourd'hui. Le canal de la Robine, à priori, construit initialement pour la navigation sert aussi à l'irrigation. Il est intéressant de déterminer les débuts de la lutte anti-sel et les pratiques associées. Ces zones (délimitées précédemment) ont sûrement eu un tout autre visage et c'est ce que nous allons tenter de voir ici.

a. Histoire De l'ASEAUDE et des ASAs

- Pouvez-vous nous raconter brièvement l'histoire de l'ASEAUDE ?
    - Quand a-t-elle été créée ?
    - Pourquoi a-t-elle été créée ?
    - Dans quel but ?
    - Y a t-il des événements historiques forts à retenir ?

……
……
……
……

- Existait-il auparavant un ancêtre à l'ASEAUDE ou aux ASAs ?

……
……
……
……

b. Assolements

- Est-ce qu'il y a eu une modification du type d'occupation des sols ?

……
……
……
……

- Les techniques de travail du sol ont-elles évolué ?

……
……
……
……

ASA	Orientation historique des terrains			La raison de ce changement ? Problème de sel ?
	Agriculture	Pastoralisme	Milieu naturel	
Raonel				
la Rèche				
la Plaine de Livière				
Du Cercle				
Petit Mandirac				
Ricardelle				
Rives Gauche				
Salles d'Aude				
La Plaine de Lespignan				
Canal de Pezetis				
L'Ille				

Voir frise chronologique : *Annotation sur frise possible*

c. Les submersions

- Pouvez-vous nous parler de l'histoire de l'irrigation gravitaire chez vous ?
    - Quand datent les premières submersions ?
    - Avez-vous toujours pratiqué ce principe d'irrigation ?
    - A partir de quand l'irrigation a servi à lutter contre le sel ?

……
……
……
……
……
……

- Les techniques d'irrigation ont-elles évolué ?

……
……
……
……
……
……

- Y a-t-il pour projet de convertir certaines parcelles submergées en goutte à goutte ?
    - Si oui, pourquoi ?

……
……
……
……
……
……

d. Histoire de la Basse Plaine

D'après mon travail de bibliographie, j'ai pu rassembler les données collectées dans ces frises chronologiques. Le but ici est d'essayer de déduire si certains événements ont pu créer des conséquences. Comme par exemple, une sécheresse ou une maladie qui a induit un changement de culture.

Voir frise chronologique : *Annotation sur frise possible*

- Crise hydro-climatique
    - Quels sont les épisodes climatiques qui vous ont marqués ? (sécheresses, submersions marines, inondations…)

……
……
……
……

- Agriculture
    - les grands changements agricoles
    - les crises

……
……
……
……

- Aménagements hydro-agricoles
    - Quand la Robine a-t-elle servi pour l'irrigation?
    - Connaissez-vous les dates de construction des canaux de drainage principaux (Ste Marie, Pas des Tours, et Grand Vigne)? Pourquoi ont-ils été créés (crues)? quand ont-ils servi de drainage?
    - Quand sont apparus les aménagements hydrauliques au niveau des parcelles?

……
……
……
……

- Contrats et acteurs
    - Quels sont les contrats que vous avez produits ou vécu qui ont induit un changement de pratique sur l'environnement, notamment agricole ?

……
……
……
……

2. Irrigation des terres

a. Organisation spatiale

- Possédez-vous des îlots d'irrigation ? (=un ensemble de parcelles irriguées ayant une caractéristique commune concernant l'irrigation)
    - Sur quels critères sont-ils définis ?
    - Sont-ils régulièrement modifiés ?

……
……
……
……
……

a. Organisation temporelle

- Comment gérez- vous vos submersions ?
    - Avez-vous un calendrier ?

……
……
……
……

b. Organisation technique

- Comment faites-vous les submersions ? Par débordement des casiers ? Par parcelle ?
- Vous adaptez les submersions en fonction des parcelles, évaluez-vous les différentes quantités d'eau mise dans les parcelles ?

……
……
……
……

Quelles sont vos grandes actions au sein de l'ASEAUDE ?
Pouvez-vous nous parler de l'AIEDEN ?

Annexe F : Questionnaire d'enquête pour les viticulteurs : Diagnostic de la basse plaine de l'Aude, identification des pratiques en lien avec la salinisation des eaux et des sols

Questionnaire d'enquête pour les viticulteurs : Diagnostic de la basse plaine de l'Aude, identification des pratiques en lien avec la salinisation des eaux et des sols

Date de l'enquête : Personne enquêtée(s) :

Adresse : Tel :

Nom de l'exploitation :

I – *« QUE FAITES-VOUS ? »* - LA PRODUCTION

A. Type de production

○ Conventionnelle Superficie :

○ Bio Depuis quand ? Superficie :

Avec certification ? Depuis quand ?

○ Raisonnée Depuis quand ? Superficie :

Avec adhésion à une charte ?

Laquelle ? Depuis quand ?

Parcelle en MAE ? Superficie : Depuis quand ? Jusqu'à quand ?

B. Vinification :

○ Cave particulière (% hL) :

○ Cave coopérative (% hL) :

Cave(s) desservie(s) :

Production par catégorie de vins produits :

	Volume produit en 2017 (hL)	Volume produit en 2018 (hL)	Volume produit en 2019 (hL)
AOC			
IGP			
Evènement climatique ?			

C. Identification et caractéristiques des îlots (surface, sol, relief, position, risque innondation, salinité) :

Ilot 1 :

Ilot 2 :

II - PERCEPTION DE LA SALINITÉ

- Y'a-t-il des problèmes de salinité et/ou mortalité sur vos parcelles ?

- Lesquels et quelles parcelles touchées ? (situer et marquer sur la carte)

- Quel indicateur (feuille, cep manquant…) de salinité excessive dans le sol ?

- Quelle influence sur le rendement ? Pertes ?

- Evolution de la pression : quelles observations ces dernières années ?

III - *« COMMENT FAITES VOUS ? »* - LES PRATIQUES

1. **Influences du milieu sur les pratiques en lien avec la salinité :**

    - Y'a-t-il des différences de pratiques entre les îlots ? Pourquoi ?

    - Différentes gestions suivant les îlots, les objectifs de production ?

    - Influence du type de sol sur les pratiques ?

    - Influence de l'éloignement des parcelles sur les pratiques ?

Y'a-t-il des différences de pratiques sur les parcelles au sein d'un même îlot ? Pourquoi ? *(au besoin, redécouper les îlots)*

Ilot 1 :

Parcelle	Superficie (ha)	Cépage	Porte-greffe	Âge	Mode plantation	Rdt moy /ha	Rdt objectif	Perte	Cause	Pré-taille	Mode taille	Ecart IR	Ecart IC	Orient° rang	Palissage	Hateur palissage

Pour quelle(s) raison(s) avoir choisi ces cépages ?

Pour quelle(s) raison(s) avoir choisi ces porte-greffes ?

Utilité de ces modes de taille ?

Utilité de ce palissage ?

Ilot 2 :

Parcelle	Superficie (ha)	Cépage	Porte-greffe	Âge	Mode plantation	Rdt moy /ha	Rdt objectif	Perte	Cause	Pré-taille	Mode taille	Ecart IR	Ecart IC	Orient° rang	Palissage	Hateur palissage

Pour quelle(s) raison(s) avoir choisi ces cépages ?

Pour quelle(s) raison(s) avoir choisi ces porte-greffes ?

Utilité de ces modes de taille ?

Utilité de ce palissage ?

Rendement : hL/ha moyen/îlot ?

Ilot 1 :

Ilot 2 :

Ilot 3 :

- Quels sont vos rendements objectifs ? (Suivant les types de productions – s'il y en a des différents)

Ilot 1 :

Ilot 2 :

Ilot 3 :

- Quels ont été les rendements obtenus de ces dernières années ?

Ilot 1 :

Ilot 2 :

Ilot 3 :

2. Entretien et travail du sol (pratiques pluriannuelles)

- Pourriez-vous me parler de la manière dont vous procédez pour l'entretien du sol au vignoble ?
  (D'abord, on essaie d'avoir une perspective générale)

- *Y'a-t-il des différences entre les îlots ?*

Travail mécanique :

Outils/ méthode	Prof	Largeur	Utilités	Nb passage	Date	Règle déclenchement

Amendements :

Type	Compo	Nom	Fournisseur	Nb	Dose	Date
Orga *Minéral/chim* *Organo-min*						

Utilité des amendements ? Règle de déclenchement d'un amendement ?

Apport de cations de substitution (souvent combiné à l'apport d'eau : oui ou non ? Possible de combiner ou pas ?) Quel produit ?

Engrais :

Type	Compo	Nom	Fournisseur	Nb	Dose	Date

Utilité des engrais ? Règle de déclenchement d'une fertilisation annuelle ?

<u>Enherbement</u> :

Gestion de l'herbe sous le rang :

Méthode			
Profondeur travail			
Nb passage			
Date passage			
Utilité			
Règle			
Produit			
Dose			
Nb Passage			
Date passage			
Utilité			
Règle			

Gestion de l'herbe en interang :

Type enherbement			
Durée/periode			
Largeur			
Alternance			
Utilité			
Méthode de destruction			
Dose (si chimique)			
Règle de déclenchement			
Nb Passage			
Date passage			

Commentaires :

3. **Fossés :**
   - Présence de fossé (âge, utilité, état des fossés, végétation, réseau, **profondeur**)

   - Entretien des fossés (Qui ? Quand ? (Calendrier), Règle déclenchement (systématique, observation, opportunité ? pratiques (désherbage chimique, brulis, curage, fauche), doses, etc)

Méthode	
Passage	
Date	
Curage	
Nb passage	
Date	

Brûlage	
Date	
Utilité	
Règle	

4. Gestion de l'eau

Submersion :

Hauteur lame d'eau	
Objectifs	*(sel, croissance, stress hydrique, gel…)*
Méthode	
Nombre	
Date	
Durée d'irrigation (apport d'eau)	
Volume (m^3)	
Durée parcelle en eau	
Temps avant ressuyage	
Règle déclenchement/ Etablissement calendrier	*(Stade phénologique, enherbement, météo, mortalité, décision ASA…)*
Origine ressource eau	
ASA	

Autre Irrigation :

Type :

Nombre :

Date :

Volume :

Méthode :

Objectif, utilité :

Règle de déclenchement :

Origine ressource :

Commentaires gestion de l'eau

5. **Drainage :**
    - Type, implantation, position, profondeur, section, âge, état, entretien… **SCHEMA**

Type	
Profondeur (cm)	
Espacement (m)	
Position	*(faire un schéma)*
Section (mm)	
Âge	
Rebord en bordure de fossé	

Bec fossé	
Longueur max des drains	
Longueur min. des drains	
Commentaires	

6. **Pratiques avant plantation :**

Interculture entre arrachage et plantier ? Combien de temps ?

Préparation du sol avant plantation : comment ?

Aménagement de la parcelle : Nivèlement ? Quand ? Comment ? Pente ? (Dessiner sur la carte)

7. **Analyses :**

   - Oui/Non ? Avant plantation ou vigne en place ?
   - Quel type d'analyse ?
   - Qui les effectue ? Pourquoi telle personne/organisme ?
   - Pourquoi ?
   - Utilité de l'analyse ? S'en sert-on ?

IV - ADAPTATION DES SYSTEMES DE CULTURE A LA SALINITE

On identifie avec le viticulteur les solutions alternatives et les mesures qui sont déjà mises en œuvre les plus efficientes sur le groupe de parcelles retenu. On laisse place aux innovations que le viticulteur a pu mettre en œuvre ou qu'il pourrait envisager, on imagine les perspectives d'évolutions sur le groupe de parcelle.

- Y a-t-il eu des changements récemment dans l'exploitation ? Comment ont-ils eu lieu ?
- Avez-vous des projets de changements de pratiques pour les prochaines années ?
- Conversion ?
- Pensez-vous acheter du matériel ?
- Y'a-t-il pratiques en lien avec la salinité qui ont été abandonnées, et des nouvelles ?
- Accès à la ressource en eau : y'a-t-il des contraintes, restriction, opportunités ?
- Qualité de l'eau : avez-vous ressenti une dégradation, une amélioration ?
- L'évolution des normes environnementales constitue des craintes ? Des opportunités ?
- Comment le réchauffement climatique impacte vos pratiques ? Craintes ? Opportunités ?
- Si l'eau vient à manquer et qu'il n'y a pas d'adaptation suffisante face à la salinisation, que feriez-vous ? Y avez-vous déjà pensé ?
- Principaux problèmes rencontrés auxquelles nous n'avons pas pensé

V - MAIN D'ŒUVRE ET TYPE D'EXPLOITATION

A. L'exploitation :

Forme juridique :

○ EARL ○ SCEA ○ GFA ○ Autre :

type de société : ….

○ GAEC ○ SARL ○ Exploitation individuelle

SAU totale :

SAU en propriété :

Productions :

Autres productions : …. Superficie : ….

…. Superficie : ….

…. Superficie : ….

Activité :

○ Viticulteur à temps plein

○ Pluriactif Si oui, quelle(s) activité(s) en dehors de l'exploitation ? ….

○ Retraité Depuis quand ? De quel domaine d'activité ? ….

Avez-vous des responsabilités en dehors de votre exploitation ? Lesquelles *(conseil d'administration, associations, syndicats, mairie ; si en cave coopérative, responsabilités au sein de la cave)* ? ….

La question de la succession se pose-t-elle ? Est-elle assurée ?

B. La main d'œuvre (activités : propriétaire, travail de la vigne, cave-vinification, commercialisation, comptabilité)

Main d'œuvre		
	Qui	Activité
Permanente		
Temporaire		

- autrement dit / nombre d'unités de travail humain (1 UTH = 1 plein temps)

- **Evolution de la main d'œuvre ?**

CONTACTS

- Il y a-t-il des viticulteurs que vous me conseillez d'aller rencontrer ?

- Pourquoi ceux-là ? *(ex. la personne enquêtée interagit fréquemment avec le contact cité, le contact a un matériel/une technique particulière, le contact fait de fort rendement/ une très bonne qualité/valorise bien, le contact est « fort en XX », XX pouvant être gestion de la salinité, gestion du sol, de l'eau…*