



Caractérisation des tourbières du delta du Rhône

Rapport d'étude

– Avril 2026 –



La Région
Auvergne-Rhône-Alpes



Cofinancé par
l'Union européenne

Rédaction : Gazaix Antoine, Perret Violette, Saguet Loeiz, Galmiche Simon, Fontes Hugo, Garnodon Morgan, Hilaire Samuel, Régis Julie, Willm Loïc, Massez Gregoire.

Projet porté par la Tour du Valat, en partenariat avec les Amis des Marais du Vigueirat.



Remerciements : La Tour du Valat souhaite remercier le Syndicat Mixte de la Camargue Gardoise (SMCG), le Parc Naturel Régional des Alpilles (PNRA), le Parc Naturel Régional de Camargue (PNRC), le Grand Port Maritime de Marseille (GPMM), les Conservatoire d'Espaces Naturels de PACA (CEN PACA) et d'Occitanie (CEN Occitanie), la commune d'Arles, ainsi que l'ensemble des propriétaires privés et exploitants agricoles avec qui nous avons pu échanger et accéder aux différents sites d'études. Nous remercions également Gaetan Ploteau, Elisa Fel et Ayma Chataignat.

Financements : Le projet a été financé dans le cadre du plan Rhône Saône par le FEDER (Convention ARA009709).

Ce rapport est une synthèse de l'ensemble des travaux ayant eu cours dans le cadre du projet « Caractérisation des tourbières du delta du Rhône ». Plus de détails peuvent être obtenus à la lecture des documents suivants :

Perret Violette, 2025, « Caractérisation des tourbières du delta du Rhône ». Rapport d'étude scientifique et technique - Master 2 Gestion de l'Environnement - Université de Montpellier, 62pp + annexes.

Galmiche Simon, 2025, « Revisiter les relevés phytosociologiques des marais tourbeux de Raphèle ». Rapport de stage. Master 2 Biologie Ecologie Evolution – Université de Lille, 43pp + annexes.

Saguet Loeiz, 2025, « Étude de la tourbière des marais de Raphèle (Arles – 13), Description et perspectives », Rapport intermédiaire - Master sciences de l'eau – Université de Lyon. 30pp.

Saguet Loeiz, 2025, « Caractérisation de la tourbière des marais de Raphèle (Arles – 13), Anticipation sur leur gestion » Rapport de fin d'étude - Master sciences de l'eau – Université de Lyon. 60p. + annexes

Citation du document : Gazaix A. (coord.), Caractérisation des tourbières du delta du Rhône, rapport d'étude. Tour du Valat, Arles. 55 p.

Table des matières

Liste des figures.....	4
Liste des Tableaux	5
Introduction.....	6
Les tourbières.....	6
Les tourbières méditerranéennes	6
Le contexte camarguais.....	7
Section 1 : Localisation des tourbières du delta du Rhône	10
Site d'étude	10
Pré-cartographie des probabilités de présence de tourbe.	11
Acquisition des données pédologique	13
Sondage de terrain	13
Interprétation des sondages pédologiques.....	16
Analyse cartographique – délimitation des enveloppes tourbeuses	17
Section 2 : Caractérisation de l'état de dégradation des tourbières du delta du Rhône et de leurs stocks de carbone.....	20
Indicateur pédologique et stocks de carbone	20
Echantillonnage	20
Analyses physico-chimique	21
Résultats	22
Indicateur piézométrique.....	32
Section 3 : Focus sur le marais de Raphele	36
Genèse et formation des tourbe	36
Méthodologie d'étude du site des marais de Raphele	37
Profondeur et localisation de l'enveloppe tourbeuse.....	38
Type de tourbe et éléments paléo-environnementaux	40
Evolution de la flore	41
Eléments méthodologiques.....	42
Résultats	43
Contributions générales du projet et perspectives.....	46
Actions de communications menées dans le cadre du projet	46
Implications pour la conservation et la restauration des tourbières.....	47
Perspectives futures	49
Conclusion	50
Références.....	51

Liste des figures

Figure 1 : Zone d'étude du delta du Rhône.....	11
Figure 2 : Cartographie des potentiels tourbeux.	13
Figure 3 : Illustration d'un fragment de l'étude des sols de 1972 réalisée par le port de Marseille. ...	14
Figure 4 : Localisation des données de sondages antérieurs à ce projet sur le territoire d'étude.....	15
Figure 5 : Illustration de tarière pédologique.	16
Figure 6 : Illustration du carottier russe.....	16
Figure 7: Définition retenue d'un sondage tourbeux.....	17
Figure 8 : Caractère tourbeux des sondages réalisés sur la zone d'étude	18
Figure 9: Localisation des enveloppes tourbeuses identifiées dans le cadre du projet.....	18
Figure 10 : Enveloppe tourbeuse historique potentielle de la dépression du Vigueirat.	19
Figure 11 : Relation entre les mesures de densités apparentes et les taux de matières organique	23
Figure 12: Taux de matière organique en fonction de la profondeur des échantillons pour la vallée des Baux.	25
Figure 13: Taux de matière organique en fonction de la profondeur des échantillons pour le Cougourlier.....	26
Figure 14: Taux de matière organique en fonction de la profondeur des échantillons pour le marais de Raphele.....	27
Figure 15: Taux de matière organique en fonction de la profondeur des échantillons pour le marais du Capeau.....	28
Figure 16: Taux de matière organique en fonction de la profondeur des échantillons pour le marais du Tonkin et le secteur du Landre.....	29
Figure 17: Carte de l'emplacement des piézomètres.....	33
Figure 18: Chroniques piézométriques	33
Figure 19 : Cartographie de l'échantillonnage réalisé sur le marais de Raphele.	37
Figure 20 : Schématisation d'une coupe transversale du marais de Raphele au niveau du transect Centre.....	38
Figure 21 : Schématisation d'une coupe transversale du marais de Raphele au niveau du transect Ouest	38
Figure 22 : Schématisation d'une coupe transversale du marais de Raphele au niveau du transect Est	39
Figure 23 : Cartographie des enveloppes tourbeuses estimées par Dellery et al. (1987) et celle estimée dans le cadre de ce projet.	40
Figure 24 : Profils des tourbes observées dans les sondages du transect Centre.	41
Figure 25 : Cartographie de la végétation issue du rapport de Calamand (1961)	42
Figure 26 : Représentation de l'évolution de l'Indice floristique d'engorgement (I02).....	43
Figure 27 : Représentation de l'évolution de l'Indice floristique de fertilité du sol (I06)	44
Figure 28 : Diagramme de sankey représentant les changements d'association phytosociologique de chaque couple de relevé (historique et récent) sur le marais de Raphele.	45

Liste des Tableaux

Tableau 1 : Indicateurs utilisés pour le calcul de la « potentialité tourbeuse ».....	12
Tableau 2 : Principales sources bibliographiques de sondages pédologiques sur le territoire	14
Tableau 3 : Echantillonnage des prélèvements réalisé	21
Tableau 4 : Estimation du stock de carbone contenu sur le site de la vallée des Baux.	25
Tableau 5 : Estimation du stock de carbone contenu sur le site du Cougourlier.....	26
Tableau 6 : Estimation du stock de carbone contenu sur le site de Raphèle.....	27
Tableau 7 : Estimation du stock de carbone contenu sur le site du Capeau.	28
Tableau 8 : Estimation du stock de carbone contenu sur le site de la dépression du Vigueirat.....	30
Tableau 9: Résultat des analyses physico-chimiques complémentaires.....	31

Introduction

Les tourbières

Caractérisées par un sol très riche en matière organique, les tourbières constituent à l'échelle planétaire le principal stock de carbone des sols (Parish et al. 2008). Ainsi, bien que n'occupant que 3% de la surface des terres émergées (Yu et al. 2010), elles stockent près de 30% de tout le carbone contenu dans les sols (Scharlemann et al. 2014), soit un chiffre comparable à 75% de la totalité du carbone contenue dans l'atmosphère (Janowiak et al. 2017).

Résultat d'une accumulation plurimillénaire, ce stock est fortement fragilisé par les activités anthropiques, en particulier l'assèchement de ces espaces (drainage, abaissement des nappes phréatiques, pompage, changements climatiques, ...). Ce dernier, qui a pour conséquence de permettre la dégradation de la matière organique jusqu'alors réduite, est aujourd'hui responsable d'émissions de gaz à effet de serre estimées à plus de 4 % des émissions mondiales (Joosten 2016). Pour certains pays, comme l'Allemagne, ce chiffre monte à 7% des émissions totales du pays (Eisemann 2021).

A l'échelle française, les données manquent, tant est si bien que les émissions des tourbières ne sont aujourd'hui pas intégrées au bilan carbone national. C'est notamment pour combler cette lacune que l'Université de Besançon a lancé un projet d'inventaire national des tourbières (Pinault 2025). Basé notamment sur la remontée de données territoriales et l'inventaire minier de 1949 (Pinault et al. 2023), ce travail devrait aboutir à la publication de l'Atlas National des tourbières, financé par le WWF France, courant 2026.

Au-delà de l'enjeu du stockage de carbone, les tourbières sont des écosystèmes clés, avec des rôles majeurs au sein du cycle de l'eau (*e.g.* stockage, influence sur les nappes souterraines, réduction du risque inondation) (Holden et al. 2006; Fraser et al. 2001) ainsi qu'une biodiversité riche et unique (Joosten et al. 2017). Ces enjeux, à la manière du stockage du carbone, sont bouleversés par les dégradations récentes de ces écosystèmes. Si l'immense majorité des dégradations a pour origine le changement de pratiques agricoles (intensification), une voie agro-écologique, permettant d'adresser une solution à l'ensemble de ces problématiques (carbone, eau et biodiversité) est possible et déjà déployée sur de nombreux espaces (pratiques de « paludicultures » par exemple, ou agro-pastoralisme souvent proche des usages historiques) (Bonn et al. 2016; Tanneberger et al. 2022).

Les tourbières méditerranéennes

La présence de tourbières résulte d'un bilan hydrique « positif », à savoir que les apports d'eau (pluviométrie, apports de nappes souterraines, ...) excèdent les pertes (évapotranspiration, ruissellement, ...). Or le climat méditerranéen se caractérise par un fort déficit hydrique estival. Dès lors, la présence de tourbières en climat méditerranéen ne peut résulter – à l'exception des secteurs à microclimats plus humides (notamment sur les massifs montagneux) - que d'apports d'eau souterrains. Les probabilités de présence de tourbières en contexte méditerranéen sont ainsi réduites (Payne 2016) mais des zones de résurgences importantes peuvent exister, entraînant des conditions favorables à la formation de tourbe.

Aussi, des espaces tourbeux y sont connus, et certains d'envergures majeures : en témoignent les immenses étendues tourbeuses du rift du Jourdain (la vallée de Houla en Israël ou les zones humides d'Aammîq au Liban) (Payne 2016) ou la tourbière de Philippi en Grèce (Christanis 2016) qui présentent des surfaces et des profondeurs de tourbe très importantes (plusieurs milliers d'hectares chacune, et plusieurs dizaines de mètres de profondeur pour la tourbière de Philippi). Dans l'ensemble, en dehors de ces quelques complexes majeurs connus, ou de petits sites étudiés souvent par des approches paléo-écologiques (*e.g.* Concheri et al. 2017; Ben Tiba et Reille 1982), les tourbières méditerranéennes souffrent d'un déficit historique d'intérêt, et leur état de dégradation avancé rend leur identification complexe (Payne 2016).

Pourtant, en contexte méditerranéen, le climat est possiblement responsable d'émissions de gaz à effet de serre issues des tourbières accrues, puisque la température augmente l'activité bactérienne responsable de la dégradation de la matière organique (Wang et al. 2017). De plus, la pression sur la ressource en eau est d'autant plus marquée que la ressource est réduite (en comparaison des régions tempérées européennes notamment), et la densité de population y est importante et en augmentation (Anastasiou et al. 2020). De plus, le changement climatique vient renforcer les menaces qui pèsent sur ces écosystèmes (Iglesias et al. 2007). Enfin, la biodiversité des tourbières méditerranéennes revêt une importance majeure de par l'important taux d'endémisme (Fonseca et al. 2023), mais également devant les nombreuses espèces à large distribution qui viennent trouver leur limite sud en région méditerranéenne, ce qui confère à ces populations une importance forte pour la conservation (Provan et Maggs 2011; Thornton et al. 2018; Channell et Lomolino 2000).

Le contexte camarguais

Les tourbières du delta du Rhône ne figurent pas dans l'inventaire français de 1949 (Pinault et al. 2023). Elles n'apparaissent que dans l'inventaire du Service de l'observation et des statistiques (2013), avec 1227 ha mis en évidence. Toutefois, cet inventaire ne se base que sur des critères de végétation, ce qui peut emmener à des erreurs conséquentes (intégration de secteurs sans tourbe, et oubli de secteurs tourbeux dont la végétation n'est plus celle de milieux naturels tourbeux). L'équipe de Besançon, dans son travail à l'échelle nationale, n'utilise d'ailleurs pas les données de cet inventaire en l'absence de données pédologiques (Pinault 2025).

La présence de sites tourbeux dans le delta du Rhône est connue localement, comme en témoignent les traces d'exploitation de tourbe dans le marais des Chanoines (Massez, *com pers*), ou encore le risque d'enlèvement pour les bêtes bien connu des éleveurs localement. Des documents historiques mettent également en évidence la présence de tourbe : étude du gisement de Chanoines et Meyranne (Dellery et al. 1987) ainsi que du Cougourlier (Eulry 1983), études palynologiques (Triat-Laval 1979). Plus récemment, une étude pilotée par le SYMCRAU (OSMOSE 2), sur les liens entre la nappe de la Crau et les zones humides alimentées par cette dernière, est venue confirmer la présence de tourbe sur plusieurs sites (Sicard et al. 2023). Enfin, un projet de restauration écologique dans la vallée des Baux a permis de mettre en évidence plus de 80 ha de tourbe en contexte agricole (prairies semées sur d'anciennes parcelles céréalières) (Gazaix, *obs. pers.*). Cependant, la définition spatiale des enveloppes associées à la présence de tourbe reste méconnue, ainsi que la caractérisation de leur profondeur et de leur état de conservation.

Or l'ensemble de ces données historiques et observations plus récentes, combinées à la végétation en place laisse supposer des étendues non négligeables ainsi que des profondeurs de tourbe importantes.

Les enjeux liés à l'eau en contexte méditerranéen, et particulièrement sur la nappe de la Crau au fonctionnement original (alimentation à 70 % d'origine anthropique par l'irrigation des prairies de foin de Crau), de même que la biodiversité unique de ces espaces (surfaces d'habitats d'intérêt communautaires particulièrement remarquables, espèces à enjeu de conservation majeur), viennent accentuer encore plus la nécessité de mieux caractériser les tourbières du delta. **L'objectif de ce projet est donc de localiser et caractériser l'état de dégradation des tourbières du delta du Rhône.**

Ce travail est un préalable indispensable pour de très nombreuses perspectives à court et moyen terme : *e.g.* Actions de restauration écologiques, recherche scientifique (paléoécologie, études écologiques, étude des émissions de gaz à effet de serre, études hydrologiques, ...), projets agro-écologiques, ...

Ce rapport synthétise l'ensemble des actions menées dans le cadre du ce projet, avec trois axes de travail principaux :

1. Localisation des principales tourbières du delta du Rhône
2. Caractérisation de l'état de dégradation de la tourbe et estimation des stocks de carbone sur les principaux sites
3. Trajectoires anciennes et récentes de la tourbière de Raphele, une des principales tourbières du territoire.



Illustration d'une carotte de tourbe observée entre 0 et 50cm de profondeur sur le site du Tonkin.

© V. Perret.

Section 1 : Localisation des tourbières du delta du Rhône

La première étape de ce travail a visé à localiser les principaux sites tourbeux du delta du Rhône. Bien que d'apparence simple, cet objectif revêt un défi technique, les tourbières étant majoritairement définies par un critère pédologique (Joosten et al. 2017), l'acquisition de données est donc complexe et chronophage. Plusieurs territoires ont ainsi lancé des opérations d'envergures pour aboutir à des inventaires territorialisés des tourbières, souvent menés sur de longues périodes, voire toujours en cours (e.g. Marescaux et al. 2021; Hingray 2025). Devant la relative urgence d'alimenter les données nationales, il a été fait le choix pour ce projet d'établir une méthodologie souple, permettant d'aboutir à une première estimation pour le territoire du delta du Rhône. Il est donc important de considérer les résultats de ce travail comme préliminaires et comportant de nombreuses incertitudes.

Site d'étude

La zone d'étude définie s'étend sur environ 1800 km² et comprend l'ensemble de la partie terrestre de la Réserve de Biosphère de Camargue (RBC). Il s'agit de l'entité administrative la plus englobante pour le delta du Rhône, intégrant notamment les bordures du delta et la vallée des Baux, qui sont des secteurs où des tourbières sont déjà connues (Figure 1). L'emprise d'étude a ensuite été élargie au Nord (zone des costières de Nîmes) et au sud-est (au niveau du grand port maritime de Marseille), afin d'inclure des secteurs géologiques, pédologiques ou floristiques à fort potentiels tourbeux, toujours dans l'espace fonctionnel du delta du Rhône. Enfin, le secteur de l'étang des aulnes avait également été initialement ajouté à l'enveloppe, mais faute de temps, ce territoire n'a fait l'objet d'aucune prospection de terrain.

Trois régions géographiques sont couramment distinguées dans le delta (voir Figure 1 pour la numérotation):

- La Camargue Gardoise, à l'ouest du Petit Rhône (zone 1). Elle est bordée par le massif des costières de Nîmes au nord, dont la nappe occupe un dépôt de cailloutis, des communes de Beaucaire à Vauvert.
- L'île de Camargue (zone 2), entre les deux bras du Rhône, qui comporte de nombreuses zones humides, principalement saumâtres.
- Le plan du bourg, à l'est du Grand Rhône (zone 3). On y trouve notamment des zones humides au contact des cailloutis de la Crau, ancien delta détritique de la Durance. Le fonctionnement de la nappe de Crau est très particulier, car son alimentation en eau provient majoritairement (à 70%) de l'irrigation des prairies de foin de Crau, par submersion à partir de canaux apportant l'eau de la Durance, la pluie complétant cet apport principal (Sicard, 2023).
- A noter que le périmètre élargie la situation à deux entités supplémentaires : la plaine de Beaucaire (à l'ouest du Rhône avant la séparation des deux bras), en pied de Costière de Nîmes (qui peut se

rattacher à la zone 1), ainsi que l'étang des aulnes et le secteur du golf de Fos (qui se situent sur le plan du bourg, zone 3)

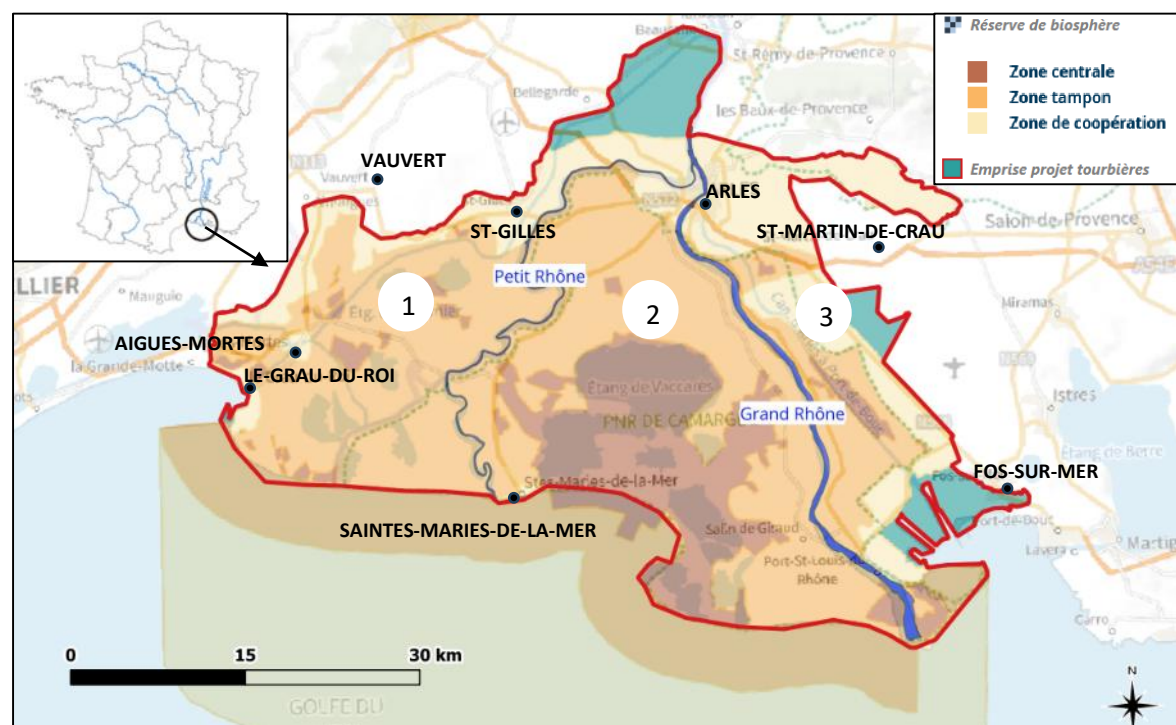


Figure 1 : Zone d'étude du delta du Rhône. Trois unités géographiques la composent : la Camargue gardoise (1), l'île de Camargue (2) et le plan du bourg (3). (Carte produite par V. Perret)

Pré-cartographie des probabilités de présence de tourbe.

Au sein de la zone d'étude, la première étape du travail a consisté à identifier le potentiel tourbeux, afin de prioriser et cibler le travail de terrain. Pour cela, une cartographie a été réalisée sur le logiciel QGIS, en réalisant les étapes suivantes :

- Réalisation d'un maillage de l'emprise d'étude de 500m de côté. Cette taille de maille s'appuie sur d'autres inventaires existants (e.g. Lebrun et al. 2020), et reste également cohérente avec la large emprise de notre site d'étude.
- Rastérisation (à partir du maillage précédent) des données d'entrée utilisées comme indicatrices de milieux tourbeux (voir ci-après).
- Calcul d'un indice de potentiel tourbeux par maille : chaque donnée d'entrée qui croise une maille est associée à un coefficient (Tableau 1). L'indice de potentialité de la maille est égal à la somme des coefficients qu'elle contient.

Les données d'entrée utilisées et leurs coefficients ont été les suivants :

- Les données d'observation de 17 espèces floristiques issues de la base de données du Conservatoire Botanique National Méditerranéen (SIMETHIS) et considérées comme indicatrices modérées (attribution d'un coefficient 1) ou indicatrices fortes (attribution d'un coefficient 2) de milieux tourbeux (après échanges avec Hugo Fontes, Nicolas Borel et Hervé Gomila) (Tableau 1). La base de données SIMETHIS a été filtrée pour supprimer les localisations trop peu précises (suppression des données à précision communale ou sans coordonnées GPS). Aucune limite de date n'a été appliquée.

- **Les données géologiques** issues de la carte du BRGM¹. Trois types de substrats ont été considérés comme étant potentiellement tourbeux :
 - « **Tourbes**, limons tourbeux, alluvions tourbeuses, tourbières asséchées (Actuel à récent) » ou « Holocène : Tourbe » : attribution d'un **coefficient 5**. Ce coefficient est volontairement supérieur aux coefficients de 1 et 2 associés aux données floristiques, l'objectif est en effet de faire primer le critère pédologique.
 - « Holocène : **limons palustres** » ou « Limons palustres des dépressions interfluves et étangs éventuellement avec influence fluviatile (Quaternaire récent) » : attribution d'un **coefficient 2**, car bien que pas nécessairement tourbeux (contrairement au substrat précédent), certains sondages existants mettent en évidence de la tourbe là où ces dépôts sont notés sur la carte (Gazaix, *pers. obs.*).
 - « **Limons fluviatiles et palustres (faciès mixte)** » : attribution d'un **coefficient 1**. Le coefficient est cette fois minimal car les limons fluviatiles du Rhône sont très minéraux, ce qui limite la probabilité de présence de tourbe dans ces faciès mixtes.
- **Les données pédologiques** correspondant aux « Histosols » de la carte pédologique de France² : attribution d'un **coefficient 5** (pour les mêmes raisons que les « Tourbes » indiquées sur les cartes géologiques, cf ci-dessus).

Indicateur	coefficient
FLORE <i>Juncus subnodulosus</i>	1
FLORE <i>Lysimachia vulgaris</i>	1
FLORE <i>Scutellaria galericulata</i>	1
FLORE <i>Senecio doria</i>	1
FLORE <i>Stachys palustris</i>	1
FLORE <i>Symphytum officinale</i>	1
FLORE <i>Thalictrum flavum</i>	1
FLORE <i>Carex elata</i>	2
FLORE <i>Cladium mariscus</i>	2
FLORE <i>Gentiana pneumonanthe</i>	2
FLORE <i>Hydrocotyle vulgaris</i>	2
FLORE <i>Lathyrus palustris</i>	2
FLORE <i>Lysimachia tenella</i>	2
FLORE <i>Nymphaea alba</i>	2
FLORE <i>Schoenus nigricans</i> (retrait substrats sableux / littoraux)	2
FLORE <i>Thelypteris palustris</i>	2
FLORE <i>Jacobaea paludosa</i>	2
GEOLOGIE Limons fluviatiles et palustres: "FLZr"	1
GEOLOGIE Limons palustres: "LFz"	2
GEOLOGIE Limons palustres: "LFzr"	2
GEOLOGIE Tourbe : "T"	5
GEOLOGIE Tourbe : "Tz"	5
PÉDOLOGIE "Histosol"	5

Tableau 1 : Indicateurs utilisés pour le calcul de la « potentialité tourbeuse ». En vert les espèces floristiques fortement indicatrices de milieux tourbeux (coefficient 2), en orange celles plus faiblement indicatrices (coefficient 1). Pour les données géologiques : « T » = « Tourbes, limons tourbeux, alluvions tourbeuses, tourbières asséchées (Actuel à récent) », « Tz » = « Holocène : Tourbe », « LFz » = « Limons palustres des dépressions interfluves et des étangs éventuellement avec influence fluviatile (Quaternaire récent : Holocène) », « LFzR » = « Holocène : limons palustres », et « FLZr » = « Holocène : limons fluviatiles et palustres (faciès mixte) ».

¹ accès depuis <https://infoterre.brgm.fr/page/cartes-geologiques>

² Groupement d'Intérêt Scientifique sur les Sols (GIS Sol) et Réseau Mixte Technologique Sols & Territoires, Pédologie – Les sols dominants de France métropolitaine, 2019.

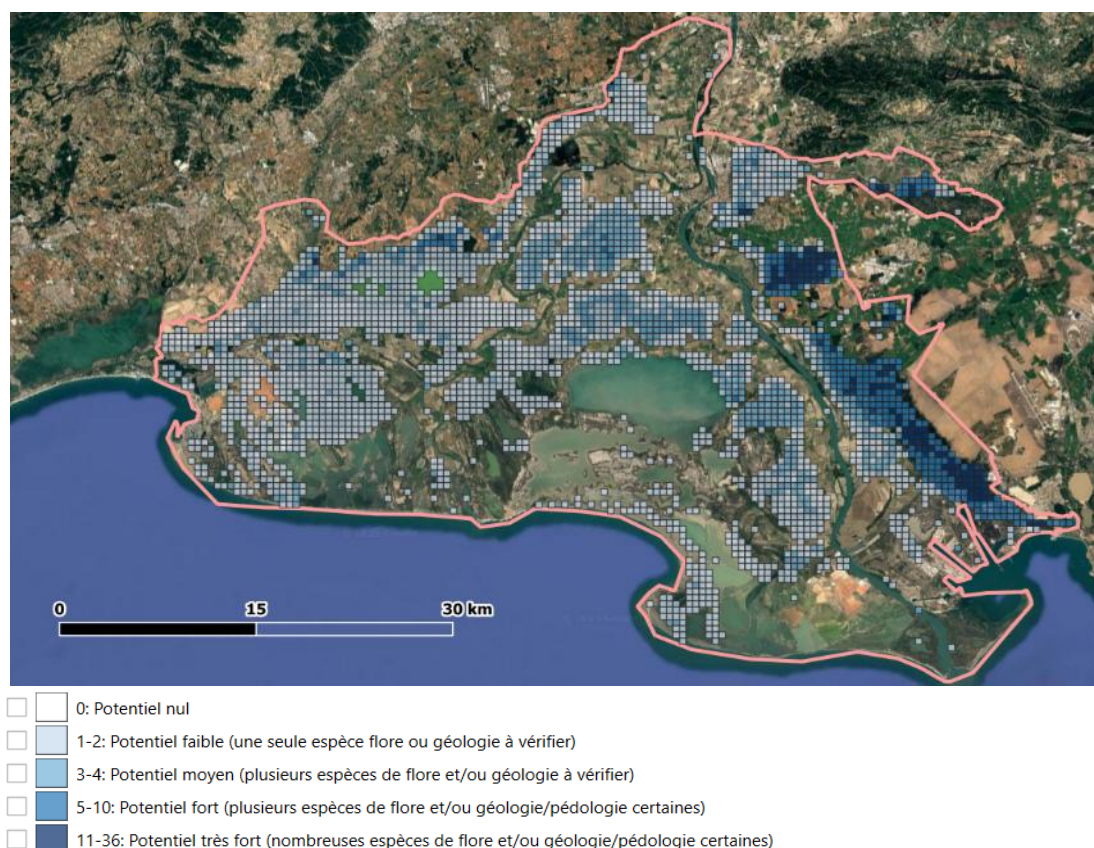


Figure 2 : Cartographie des potentiels tourbeux par maille de 500m par 500m sur le territoire d'étude (les mailles à potentiels nuls ne sont pas affichés par souci de lisibilité de la carte). V. Perret.

Ce travail permet de mettre en évidence qu'une bonne partie du territoire présente un potentiel non nul (2758 mailles sur 7128 mailles, voir Figure 2). Parmi celles-ci, 857 mailles présentent un potentiel moyen à très forts. Elles se concentrent majoritairement sur quelques secteurs particuliers :

- Le plan du Bourgs, avec principalement la dépression du Vigueirat et le marais de Raphele, dans une moindre mesure le pourtour de l'étang des Aulnes également.
- La vallée des Baux et dans une moindre mesure la plaine de Montmajour.
- La frange sud des Costières de Nîmes (en particulier au nord du complexe du Scamandre-Charnier).
- Avec un degré de probabilité inférieur, les grandes dépressions marécageuses de l'île de Camargue, en particulier les marais du pont du Rousty, la grand Mar, et sur une zone allant de la Capelière à la Tour du Valat.
- Enfin, des mailles à potentiels moyens plus isolées se retrouvent aussi sur l'ensemble du territoire, avec quelques rares mailles à potentiel fort en Camargue gardoise.

Acquisition des données pédologique

Sondage de terrain

Une fois cette cartographie du potentiel tourbeux réalisée, il est essentiel de vérifier la présence de tourbe à travers la réalisation de sondages pédologiques. Bien que réduite par rapport à

l'ensemble du site d'étude, les surfaces prioritaires précédemment identifiées restent très étendues. Ainsi, avant de se rendre sur le terrain, un premier travail a consisté à compiler les données préexistantes, issues de différentes sources de données. Ainsi, deux rapports produits par le BRGM dans les années 80 s'intéressent aux « gisements » de tourbes de deux tourbières du site d'étude : Le marais de Raphèle (en particulier sa partie est, appelée marais des Chanoines) (Dellery et al. 1987) et le marais du Cougourlier (Eulry 1983). Le travail de Dellery et al. (1987) contient d'ailleurs un certain nombre de données de sondages pédologiques. En plus de ces deux rapports, une cartographie, produite dans le cadre d'une étude des sols préalable à un projet d'extension du port de Marseille a pu être consultée et numérisée (Figure 3). Elle présente les résultats de plus de 300 sondages principalement réalisés dans l'actuel marais de Port Saint Louis du Rhône. Dans un souci d'économie de temps, seuls les sondages tourbeux ont été saisis numériquement pour le moment (voir Figure 4). Enfin, plus récemment, deux études ayant réalisés des sondages pédologiques dans des secteurs tourbeux ont également produit des données intéressantes que nous avons pu intégrer : les données de Jérémie Cuvelier produites dans le cadre de l'étude Osmose 2 (Sicard et al. 2023) et les sondages réalisées dans le cadre de l'étude préalable à l'installation d'une station d'épuration à proximité de Saint Gilles (HYDRIAD 2015). Pour terminer, des sondages réalisés en 2024 au marais du Capeau (Gazaix, non publié), ainsi que les données de sondages ponctuels issues de la base de données publique infoterre (<https://infoterre.brgm.fr/>) ont également été considérées. Au total, ce sont plus de 414 sondages préexistants à ce projet qui ont pu être considérés pour ce travail.

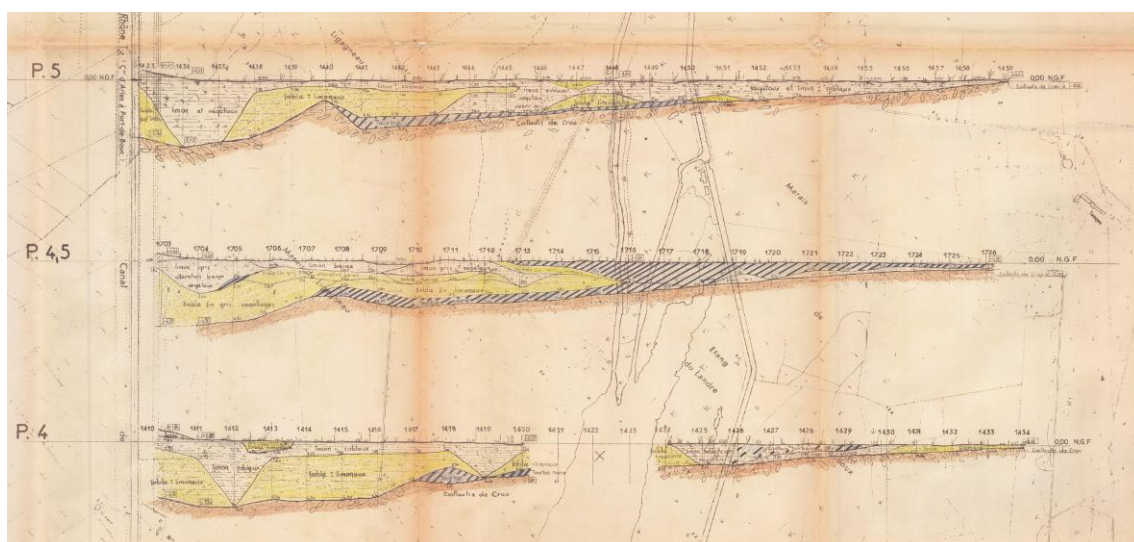


Figure 3 : Illustration d'un fragment de l'étude des sols de 1972 réalisée par le port de Marseille.

Sources	Auteurs	Nombre de sondages saisis
Sondage marais du Capeau (2024)	Tour du Valat (A. Gazaix)	10
Etude du BRGM du marais de Chanoine (1987)	Dellery et al. (1987)	9
Base de données InfoTerre (dates diverses)	Divers	59
Etude STEP St Gilles (2015)	HYDRIAD® Eau et Environnement	18
Projet Osmose 2 – 2021	Jérémy Cuvelier (02Terre)	237
Etude des sols 1972	Port de Marseille (aujourd'hui GPMM)	81

Tableau 2 : Principales sources bibliographiques de sondages pédologiques sur le territoire

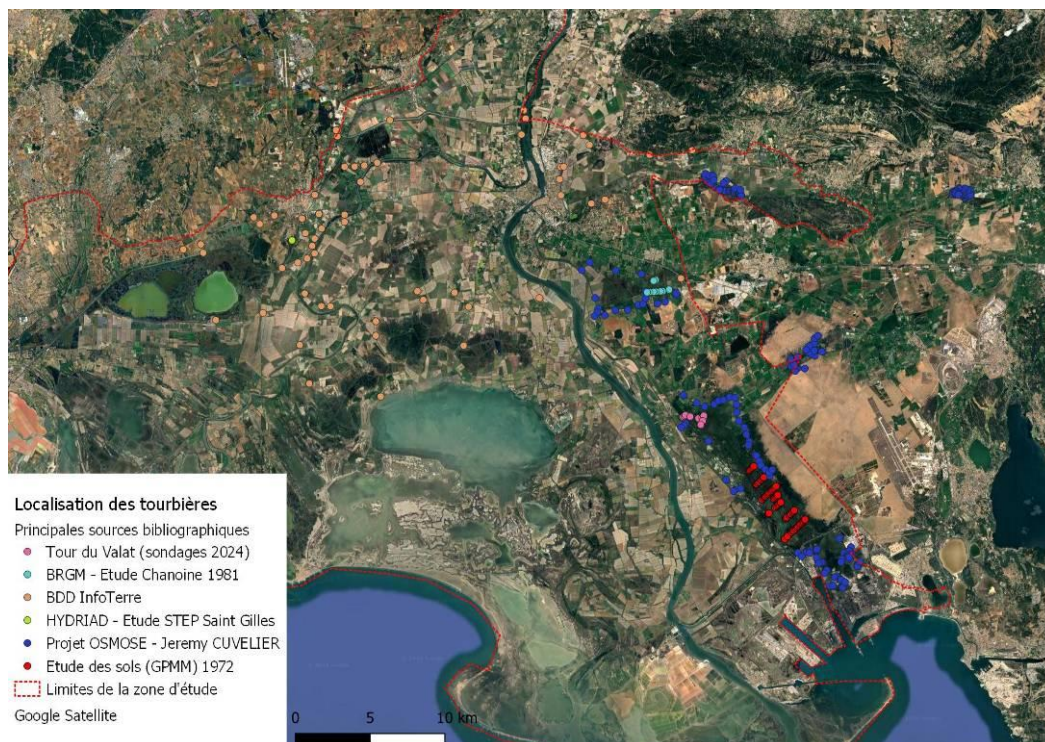


Figure 4 : Localisation des données de sondages antérieurs à ce projet sur le territoire d'étude

Même après avoir intégré toutes les données existantes, une prospection généralisée de l'ensemble des mailles à potentiel non nul reste impossible dans le temps du projet. Ainsi, les emplacements de sondages ont été choisis en se concentrant sur les mailles à potentiels tourbeux « moyen », « fort » et « très fort » (Figure 2). Au-delà de cette première sélection, l'emplacement des sondages a alors été défini de manière individuel, à partir d'un ensemble d'informations : relief (MNT), contraintes d'accès (contexte foncier local), données existantes (e.g. études anciennes, ...). L'absence d'échantillonnage systématique est ici un choix qui répond au besoin d'acquisition de donnée dans un temps court. Les sondages réalisés sur le terrain suivent la méthodologie classique des sondages en zones humides, réalisé à la tarière Edelman avec description des horizons rencontrés de 0 à 120 cm de profondeur (Figure 5).

Au-delà de cet ensemble de sondages, à partir de la cartographie des potentiels tourbeux et des données bibliographiques, cinq sites ont été identifiés comme étant très probablement tourbeux et représentant pour chacun des surfaces conséquentes (>50ha). Ces cinq sites sont : le marais du Cougourlier, la vallée des Baux, le marais de Raphèle, le marais du Capeau et la Dépression du Vigueirat (voir Figure 9 pour la localisation de ces 5 sites). Afin de pouvoir au mieux définir les enveloppes tourbeuses, mais également de connaître la profondeur de tourbe, l'état de dégradation et les stocks de carbone (voir section 2 de ce rapport), l'effort d'échantillonnage a été plus conséquent sur ces 5 sites. Spatialement, l'échantillonnage s'est organisé en plusieurs transects parallèles dans le sens de la pente (dans les systèmes de « vallée » comme la vallée des Baux, ou le marais de Raphèle), ou en deux transects perpendiculaires lorsque la topographie forme une « cuvette ». Cette méthode s'appuie sur la méthodologie proposée par Pinault (2025). Les sondages sont espacés de 100 à 200m entre eux selon les sites, afin d'obtenir une vingtaine de points par site, correspondant à un sondage pour 10 à 30 hectares environ. Cependant, certains sondages initialement prévus n'ont pu être réalisé pour des contraintes d'accès, réduisant la résolution des données obtenues. L'échantillonnage des 5 principaux sites est détaillé dans la section 2.

Au-delà de la répartition spatiale des échantillons, les sondages ont aussi été réalisés différemment, puisque ces derniers ne se limitaient pas à 120cm, mais étaient poursuivis jusqu'à ce que les dépôts observés ne soient plus tourbeux ou non accessible (sable, argile dense, roche, ...). Le

matériel utilisé était composé à la fois d'une tarière Edelman mais également d'un carottier russe permettant d'échantillonner jusqu'à des profondeurs de 8m (7,43m étant le maximum réalisé dans le cadre de ce projet, au marais de Raphele) (Figure 6).



Figure 5 : Illustration de tarière pédologique. a) Tarière manuelle utilisée pour les sondages de 120 cm. b) Utilisation de la tarière manuelle sur le terrain



Figure 6 : Illustration du carottier russe. a) Prélèvement au carottier russe (© L. Saguet). b) Schéma de la gouge du carottier russe (© L. Saguet). c) Carotte de tourbe prélevée au carottier russe sur le site de Cougourlier (©V. Perret).

Interprétation des sondages pédologiques

Une fois les sondages réalisés, avec description des horizons rencontrés (jusqu'à 120cm ou au-delà pour les 5 principaux sites tourbeux), et afin de délimiter les enveloppes tourbeuses, il a été nécessaire de s'arrêter sur une définition de ce qui est considéré comme une tourbière dans ce travail. En effet, l'épaisseur minimale de tourbe requise pour considérer un site comme une tourbière varie selon les auteurs : 10cm (FAO, 1998 ; Cubizolle, 2019), 30cm (Joosten et Clarke, 2002 ; Joosten, 2017), 40cm (Baillie, 2001), voire 50 cm (Osaki, 2016). Pour notre étude, nous avons choisi de croiser les valeurs du référentiel pédologique national, constituant en France la base de définition réglementaire des zones humides (Baize et al. 2009), et celles mentionnées dans un document de référence sur les tourbières à l'échelle européenne (Joosten, 2017). Le critère ainsi retenu pour définir sur le terrain un sondage pédologique (120cm) comme tourbeux est représenté sur la Figure 7, et est décrit comme ceci (2 possibilités) :

- **Au moins 30 cm de tourbe à la surface** (Joosten et Clarke 2002; Joosten et al. 2017)
- **Si la tourbe n'est pas affleurante : tourbe majoritaire entre 40 et 120 cm** (Baize et al. 2009).

Ce choix est également basé sur nos premières observations de terrain : certaines tourbières sont peu épaisses mais avec de la tourbe en surface, d'autres présentent en profondeur des épaisseurs importantes, mais leurs horizons de surface sont parfois délicats à caractériser.

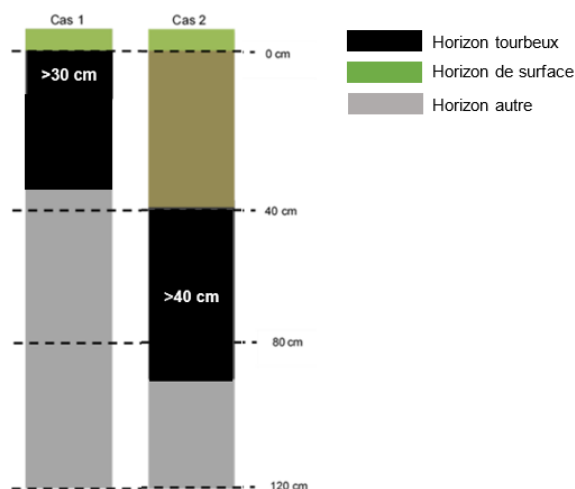


Figure 7: Définition retenue d'un sondage tourbeux. © V. Perret

Analyse cartographique – délimitation des enveloppes tourbeuses

L'analyse cartographique utilise les résultats de sondages de terrain pour délimiter des surfaces tourbeuses. Elle se base ainsi sur le critère tourbeux ou non de chaque sondage réalisé au cours de notre étude ou au cours d'études préexistantes (voir Figure 8).

A partir de ces résultats, le découpage des surfaces tourbeuses a été effectué en intégrant l'ensemble des sondages tourbeux à proximité les uns des autres. En complément, les secteurs non couverts par des sondages (en particulier le nord et le sud de la dépression du Vigueirat) ont été considérées en fonction des habitats naturels en place (les Cladiaies (végétations à *Cladium mariscus*) ont été intégrées). Dans certains cas, certains sondages, bien que n'étant pas considérés comme tourbeux, ont été interprétés comme des secteurs particulièrement dégradés, et donc intégrés dans les polygones de tourbières (notamment dans la Vallée des Baux, au Cougourlier et au marais de Raphèle).

Dans le cas où un ou plusieurs sondages non tourbeux sont encadrés de sondages tourbeux, l'interprétation est faite au cas par cas, mais l'hypothèse d'une grande tourbière hétérogène a été le plus souvent considérée, avec un découpage englobant ces sondages non tourbeux isolés au sein de sondage tourbeux. Ce cas de figure s'applique au marais de Raphèle, au Capeau et à la dépression du Vigueirat.

Comme indiqué à plusieurs occasions dans ce rapport, il est essentiel de garder à l'esprit que ces découpages restent grossiers, le nombre de sondage étant faibles, et ne représentant qu'une couverture spatiale partielle, au regard des surfaces en jeu. A noter enfin que deux sondages tourbeux à l'ouest de la vallée des Baux ont été laissés isolés, sans polygone les englobant. De nombreux sondages non tourbeux sont présents sur ce secteur, et les parcelles agricoles au nord des sondages en question n'ont pu être prospectées (la végétation ne pouvant dans ce cas de figure orienter la décision). Des sondages complémentaires sont donc nécessaires afin de définir si un polygone est à ajouter sur ce secteur de la vallée des Baux.

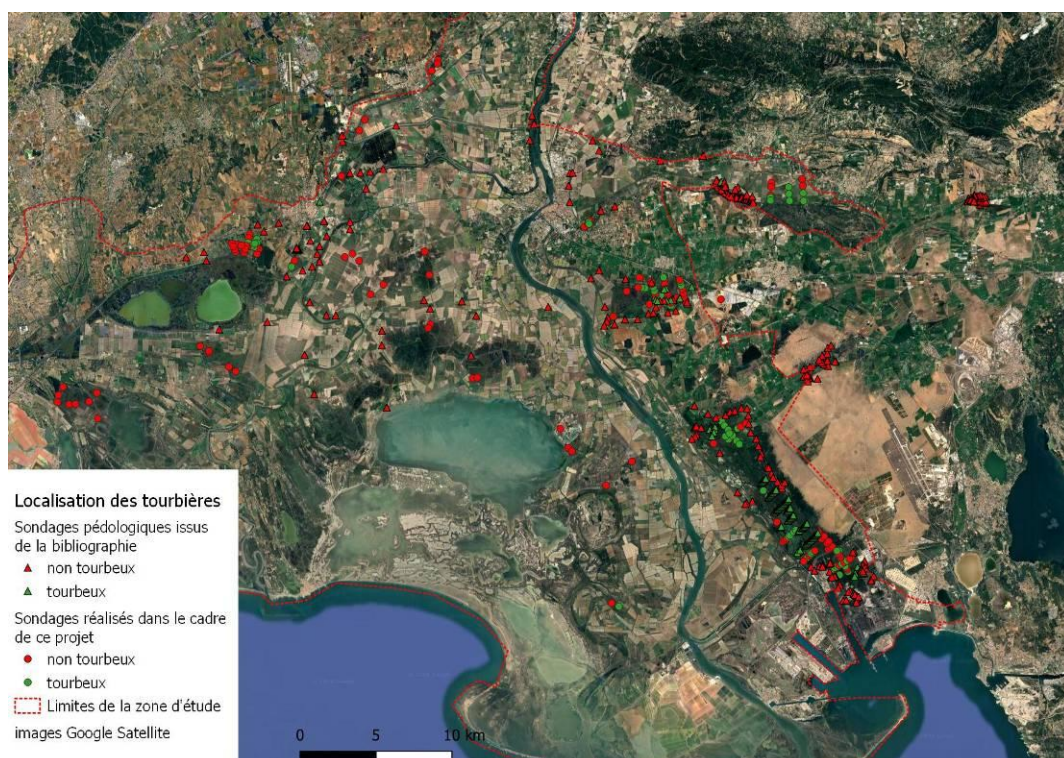


Figure 8 : Caractère tourbeux des sondages réalisés sur la zone d'étude

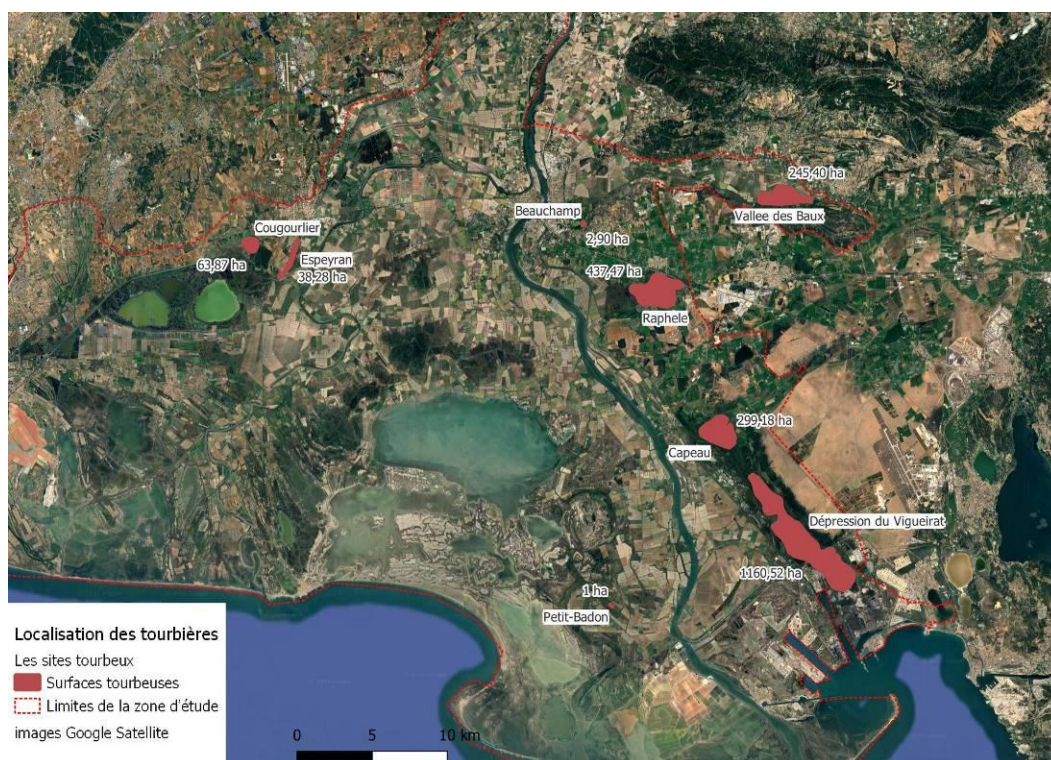


Figure 9: Localisation des enveloppes tourbeuses identifiées dans le cadre du projet

Ainsi, près de 67 sondages se sont révélés tourbeux sur les 198 réalisés dans le cadre du projet. En considérant les 109 sondages issus d'études antérieures, ce sont 176 sondages reconnus comme tourbeux qui sont identifiés sur le territoire du delta du Rhône. Le nombre de tourbière (polygone tourbeux) apparaît relativement limité, avec 8 tourbières définies dans le cadre de ce projet. Deux types de tourbières sont présents, des sites de grande taille (>50 ha), avec des épaisseurs maximales

importantes (>100cm), et des sites de petites tailles (<50 ha), avec des épaisseurs de tourbe maximales très limitées (<50cm), ce qui nous permet de connaître les profondeurs maximales malgré des sondages limités à 120cm de profondeur sur ces sites. Au total, 2247 hectares de tourbière ont été identifiées sur le territoire du delta du Rhône. Ces surfaces, bien que correspondant à 1 à 2 % des tourbières française (Pinault et al. 2023; Pinault 2025) font du delta du Rhône un secteur d'importance nationale pour les tourbières, avec des surfaces proches de massifs tourbeux emblématiques ; *e.g.* : le massif des Vosges (1613 ha) (Pinault et al., *submitted*).

Cinq sites de grande taille sont à noter, la dépression du Vigueirat (1160 ha), le marais du Capeau (299 ha), le marais de Raphèle (437 ha), la vallée des Baux (245 ha) et le marais du Cougourlier (64 hectares). Pour la dépression du Vigueirat et encore plus pour la vallée des Baux, de très fortes incertitudes subsistent. Ainsi, pour la dépression du Vigueirat, la partie nord (marais de Port Saint Louis) ont uniquement été étudiés à partir des sondages de l'étude historique (1972), et il serait utile de pouvoir actualiser les données. Par ailleurs, les parcelles qui se situent sur les propriétés industrielles nécessiteraient des prospections à la fois pour confirmer la présence de tourbe sur les secteurs cartographiés aujourd'hui en tourbière, mais également pour probablement étendre ces surfaces sur des secteurs ne disposant d'aucune donnée pédologique aujourd'hui. La surface identifiée pour ce site est donc probablement sous-estimée. De plus, la construction des infrastructures industriolo-portuaire dans les années 60 et 70 a très vraisemblablement enseveli entre 500 et 1000 hectares de tourbières, dans la continuité de l'actuelle tourbière de la dépression du Vigueirat (Figure 10).

Un site de taille intermédiaire (le marais d'Espeyran - 38 hectares) et deux petits sites (Beauchamps et Petit Badon, respectivement 3 et 1 hectares) complète la liste. A noter que certains sondages ont pu mettre en évidence des dépôts tourbeux trop peu épais ou enfouis, sans que ces secteurs ne puissent être considérés comme des tourbières. Ce fût par exemple le cas à la Capelière, au cœur de la Camargue, où près de 20cm de tourbe ont pu être observées en surface dans une roselière. Par ailleurs, d'autres éléments, comme un incendie historique ayant eu lieu au marais des Gargattes (camargue gardoise) et s'étant prolongé plusieurs jours dans le sol (Petit, *com. pers.*), laissent supposer l'existence d'autres secteurs tourbeux n'ayant pu être identifiés, ou là encore de profondeur inférieur à la limite des 30 cm considérée dans notre étude.



Figure 10 : Enveloppe tourbeuse historique potentielle, estimée à partir des photos aériennes historiques (années 50-65, haut), et projection sur la photo aérienne actuelle (bas). Etant basée sur une photo interprétation à partir de la végétation, ce découpage n'est pas celui reporté dans la délimitation finale de l'entité tourbeuse actuelle de la dépression du Vigueirat.

Section 2 : Caractérisation de l'état de dégradation des tourbières du delta du Rhône et de leurs stocks de carbone.

Un des principaux objectifs du projet était de caractériser l'état de dégradation de ces tourbières. La dégradation d'une tourbière fait suite principalement à des altérations hydrologiques, se traduisant par un changement dans la piézométrie (abaissement du niveau d'eau), conduisant alors à une minéralisation de la matière organique contenue dans la tourbe. Ainsi, les propriétés physico-chimique de la tourbe peuvent renseigner sur d'éventuelles dégradations (au moins historique) tandis que la piézométrie permet d'étudier si les conditions de dégradation se maintiennent encore aujourd'hui. Ces deux indicateurs sont donc complémentaires, et c'est pourquoi ils ont été mobilisés conjointement dans le cadre de ce projet. Toutefois, le déploiement des piézomètres a rencontré de nombreuses difficultés et tous n'ont pu être installés à ce jour.

Indicateur pédologique et stocks de carbone

L'étude de la tourbe s'est faite en suivant le protocole déployé à l'échelle nationale par Lise Pinault dans le cadre de sa thèse (Pinault 2025). En suivant l'échantillonnage détaillé dans la section 1 de ce rapport, le Cougourlier, la vallée des Baux, le marais de Raphele, les marais du Capeau et la dépression du Vigueirat ont été étudiés pour caractériser l'état de dégradation. La dépression du Vigueirat étant particulièrement étendue et les demandes d'autorisation d'accès n'ayant pas toutes été satisfaites, deux secteurs distincts ont été échantillonnés, à savoir le marais du Tonkin et les roselières de l'étang du Landre (les deux secteurs étant propriétés du GPMM), distingués dans la suite de ce rapport. Ces différents sites permettent de dresser un premier constat de l'état de dégradation des principaux sites tourbeux du delta du Rhône, qu'il serait nécessaire d'approfondir à la fois par un échantillonnage plus étendu et conséquent, et un élargissement de ce travail aux autres sites connus du territoire qui n'ont pu être ici échantillonnés.

Echantillonnage

L'échantillonnage de la tourbe s'est fait sur les sondages profonds (sans limite de profondeur prédéfinie, l'arrêt du sondage correspondant à la fin de la séquence tourbeuse ou à l'impossibilité de descendre plus profondément). La distribution de ces sondages s'est effectuée majoritairement le long de transects comme évoqué dans la section 1 du rapport. Le marais de Raphele a bénéficié d'un échantillonnage nettement plus important, le site faisant l'objet d'un travail spécifique présenté en section 3 de ce rapport, réalisé par les Amis des marais du Vigueirat.

A l'inverse, certains sites se sont avérés moins tourbeux, avec moins de sondages exploitables qu'initialement envisagés pour l'étude des propriétés physico-chimique de la tourbe. C'est particulièrement le cas pour le marais du Cougourlier où de nombreux sondages se sont avérés non tourbeux. Par ailleurs pour la vallée des Baux, les contraintes d'accès ont limité l'échantillonnage à la partie sud-est du site. Il conviendrait d'élargir à terme l'échantillonnage pour couvrir toute la vallée des Baux.

Les prélèvements de tourbe suivent la méthode d'échantillonnage déployée par Lise Pinault dans le cadre de sa thèse (Pinault 2025), avec des prélèvements à profondeurs fixes : 25cm, 50cm, 75cm, 100cm, 150cm, 200cm et ainsi de suite tous les mètres jusqu'à arriver à la base de la colonne tourbeuse. Les sondages étant réalisés au carottier russe, les prélèvements réalisés correspondent à des demi-cylindres de 5cm de diamètre et 10cm de long, correspondant à un volume de 98,17 cm³. Les

échantillons récoltés correspondent ainsi aux sections : 20 à 30cm, 40 à 50cm, 70 à 80cm, 90 à 100cm, 140 à 150cm, 190 à 200cm, etc (au maximum 690 à 700), pour faciliter la manœuvre sur le terrain (description des sondages par tranche de 50cm et prélèvement). A noter que ponctuellement, certains échantillons peuvent légèrement différer dans leurs profondeurs de prélèvement (e.g. 23 à 33cm, 37 à 47cm, ou encore 75 à 85cm), si des horizons minéraux sont inclus dans les sections normalement échantillonnées). Ce cas de figure reste très minoritaire (9 prélèvements concernés). Enfin, les prélèvements de surface sur les sites les plus minéralisés ont été délicats, lorsqu'il était impossible d'utiliser le carottier russe. Un certain nombre de sondages en début de projet, ont ainsi été échantillonnés de manière tronquée, avec des prélèvements souvent à partir de 50 voire 75cm de profondeur. L'utilisation d'une bêche puis d'un carottier circulaire manuel de 5cm de diamètre sont venues solutionner ces difficultés en réalisant un pré-trou à la bêche jusqu'à 25cm de profondeur, puis un prélèvement de 5cm de diamètre et 5 cm de profondeur (de 25 à 30cm, correspondant là aussi à un volume de 98,17cm³). Le carottier russe était alors utilisé si possible pour la suite du sondage. A défaut, la même méthode était réalisée pour un prélèvement de 45 à 50cm de profondeur. Cette solution a permis de compléter l'échantillonnage, mais cela n'a pu être réalisé sur l'ensemble des sondages tronqués du début de projet, ce qui explique que pour certains sites, le nombre d'échantillon soit légèrement inférieur pour les plus faibles profondeurs.

Enfin, les tourbières du delta du Rhône présentent des dépôts parfois très hétérogènes. Ainsi, lorsque des dépôts clairement argileux ou limoneux se trouvaient au niveau de profondeurs à échantillonner, le prélèvement n'était pas réalisé (le substrat n'étant de manière évidente pas de la tourbe). Ce cas de figure est relativement limité, mais bien présent au marais de Raphele.

Au total, ce sont près de 412 échantillons qui ont été prélevés, puis conservés au réfrigérateur dans l'attente des analyses (4°C). Cependant, un nombre non négligeable a été prélevé sur des sondages non définis comme tourbeux (en particulier au marais de Raphele où le premier mètre était souvent argilo-limoneux). Ainsi, pour les analyses présentées ci-dessous, 271 sondages ont été considérés, de manière à être en cohérence avec le découpage spatial des entités tourbeuses tel que présenté dans la section 1 de ce rapport. Le détail du nombre d'échantillons analysés par site est présenté dans le Tableau 3.

Site	Nombre de sondages étudiés	Nombre d'échantillons analysés
Cougourlier	6	35
Vallée des Baux	7	36
Marais de Raphele	13	110
Capeau	7	21
Landres (Dépression du Vig.)	7	18
Tonkin (Dépression du Vig.)	9	49
Beauchamps	1	2
TOTAL	50	271

Tableau 3 : Echantillonnage des prélèvements réalisé

Analyses physico-chimique

Les analyses réalisées visent à caractériser la dégradation des différents sites en comparant différentes profondeurs, mais également à estimer les stocks de carbone contenus dans chacun de ces

sites. Pour cela, deux indicateurs sont nécessaires, les deux étant corrélés : (1) la densité apparente et (2) le taux de matière organique.

- (1) La densité apparente correspond à la masse de sol sec par unité de volume. Elle est ainsi souvent estimée en kg / m^3 , et est très majoritairement $< 300 \text{ kg/m}^3$ pour les tourbières (Roßkopf et al. 2015; Qi et al. 2025).

Cette dernière a été mesurée par pesée après 72 heures de séchage à l'étuve à 60°C . La masse sèche ainsi pesée est rapportée au volume du prélèvement frais, afin d'obtenir une valeur exprimée en kg.m^{-3} .

Cette analyse a été effectuée à la tour du Valat. Une fois pesés, les échantillons étaient à nouveau conservés au réfrigérateur (4°C).

Il est connu dans plusieurs contextes climatiques distincts que les tourbières, lorsqu'elles sont drainées, voient la densité apparente de la tourbe augmenter dans les horizons superficiels (e.g. Wittnebel et al. 2021; Word et al. 2022; Sinclair et al. 2020), en raison du tassement et de la minéralisation de la matière organique permise par l'oxydation du substrat.

- (2) Le taux de matière organique a été mesuré par la méthode de la perte au feu (550°C pendant 4h). Ces analyses ont été confiées au laboratoire Teyssier (Route du Junchas, 26460 Bourdeaux). Le taux de matière organique correspond alors à 100 moins le pourcentage de cendres résiduelles après combustion (pour la méthode plus détaillée, voir Pinault 2025).

Comme pour la densité apparente, il est connu que le drainage impacte le taux de matière organique des tourbes, entraînant cette fois-ci une diminution, par minéralisation, de ce dernier dans les horizons impactés par le drainage (Kechavarzi et al. 2010; Wittnebel et al. 2021; Word et al. 2022).

Au-delà de ces paramètres qui ont été mesurés sur l'immense majorité des échantillons, une caractérisation plus détaillée a été réalisée pour un sondage par secteur de prélèvement (Vallée des Baux, Cougourlier, Capeau, Landre et Tonkin). Pour le marais de Raphele, qui a été étudié plus en profondeur sur de nombreux aspects (voir section 3), 3 sondages différents ont été étudiés. L'emplacement de ces sondages est représenté dans la section résultats ci-après. Les paramètres analysés sont le pH, la résistivité, la conductivité, l'azote total, le rapport C/N, et les concentrations en K_2O , MgO , CaO , Na_2O , ainsi que le P_2O_5 . Ces analyses ont là aussi été réalisées par le laboratoire Teyssier.

Résultats

Densités apparentes et matière organique.

Dans un premier temps, il est intéressant de regarder la distribution des valeurs de taux de matière organique et les densités apparentes, paramètres très peu documentés dans des tourbières en contexte méditerranéen, de même que la relation entre les deux.

La corrélation est très fortement négative entre le taux de matière organique et la densité apparente (Spearman test, $r = -0.759$, $p.\text{value} < 0.001$). Toutefois, la relation n'est pas linéaire sur l'ensemble du jeu de données (Figure 11). Si l'on se concentre sur les valeurs de matière organique supérieur à 30%, qui marque la limite généralement admise des tourbes, la gamme des valeurs de densité apparente se restreint (très majoritairement $< 350 \text{ kg.m}^{-3}$). On peut réaliser une régression linéaire pour les valeurs de densité apparente inférieure à 350 kg.m^{-3} , présentée en Figure 11. La relation obtenue (densité apparente = $321.2 - 2.9 * \text{Matière Organique}$) est toutefois à considérer avec précaution, l'observation des résidus étant sujette à caution.

Par ailleurs, il est intéressant d'observer que les valeurs de densité apparente sont dans l'ensemble plus élevées que ce qui est connu pour la plupart des tourbières, tandis que les valeurs de matière organique sont plus faibles (e.g. Hemery 2023; Roßkopf et al. 2015; Qi et al. 2025; Pinault 2025). Si les tourbes du delta du Rhône sont toutes des tourbes de systèmes minérotrophes alcalins, qui sont connus pour présenter les densités apparentes les plus élevées, les valeurs restent supérieures à celles couramment mesurées pour des écosystèmes comparables (Qi et al. 2025; Roßkopf et al. 2015).

Plusieurs hypothèses peuvent être formulées pour expliquer ces résultats, comme la localisation dans le delta du Rhône de ces tourbières, avec de probables apports de sédiments minéraux par les crues du fleuve. Il est également possible que le climat méditerranéen favorise une minéralisation plus importante de la matière organique lors de la formation de la tourbe. Enfin, la minéralisation secondaire des tourbes en surface suite au drainage pourrait aussi être plus intense en raison du climat méditerranéen, toutefois, ces valeurs élevées de densité apparente, et faibles pour les taux de carbone, se retrouvent aussi bien souvent en profondeur.

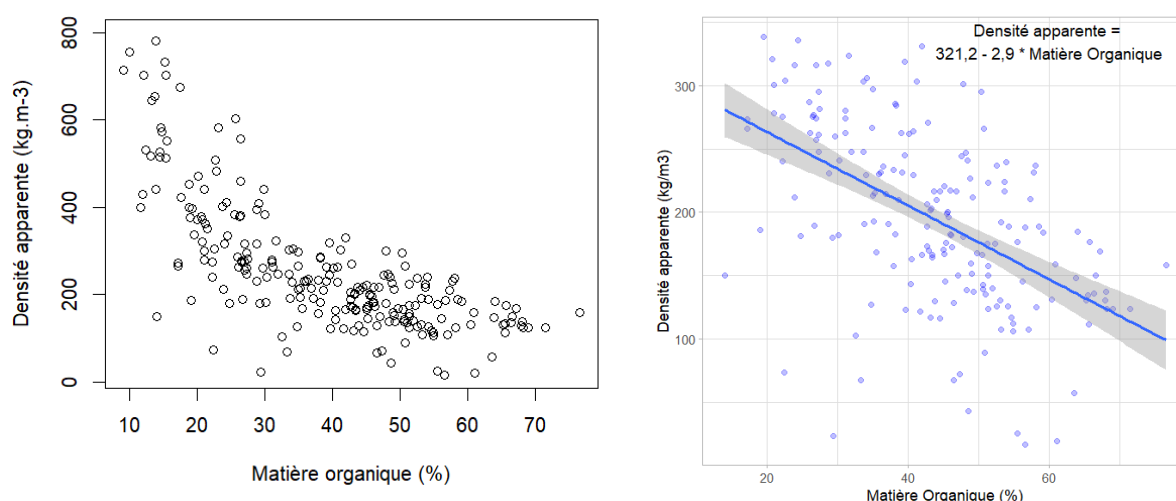


Figure 11 : Relation entre les mesures de densités apparentes et les taux de matières organique (gauche : avec toutes les données, droite : uniquement avec les données de densité apparente inférieures à 350 kg.m-3)

Etat de conservation et stock de carbone

Afin d'évaluer l'état de dégradation de ces tourbières, nous nous sommes basés sur les valeurs de taux de matière organique, devant la forte dispersion des données de densité apparente (et la relation non linéaire entre les deux variables sur toute la gamme mesurée). Les valeurs de taux de matière organique ont donc été étudiées en fonction de la profondeur d'échantillonnage. Chaque site a été étudié indépendamment, et ces résultats sont présentés dans la section qui suit. Pour chaque site, un test de Kruskal-Wallis a été réalisé pour tester si les différences de taux de matières organique en fonction de la profondeur sont significatives (Kruskal et Wallis 1952).

En complément de cette caractérisation de l'état de dégradation de chaque site, nous avons procédé à une estimation du stock de carbone de chaque site tourbeux du delta du Rhône, en s'appuyant sur les paramètres mesurés (densité apparente et taux de matière organique), et les méthodes déjà utilisées par Boiteux (2014) et Pinault et al. (2023). Pour cela, nous avons utilisé les formules suivantes : $Vt = P_{moy} * Surf$

$$Vt = P_{moy} * S$$

Où Vt : Volume de tourbe du site ; P_{moy} : la profondeur moyenne du site ; S : la surface du site.

$$Tc = MO / 1.885$$

Où Tc : Taux de carbone ; MO : Taux de matière Organique. Le coefficient appliqué correspondant à celui utilisé dans les contextes les plus proches (tourbières minérotrophes alcalines) (Pinault 2025; Roßkopf et al. 2015). Il s'agit ici d'une estimation en l'absence de mesure sur nos échantillons.

Le Stock de carbone pour chaque site est alors calculé en suivant la formule :

$$Sc = Vt * DA * Tc$$

Où Sc = Stock de carbone ; Vt = Volume de Tourbe ; DA = Densité Apparente ; Tc = Taux de Carbone.

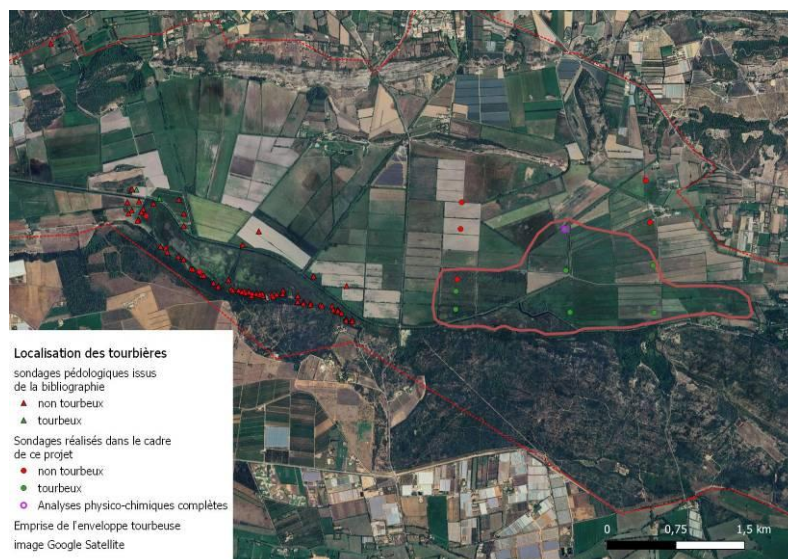
Ces valeurs présentent des incertitudes à plusieurs échelles. Bien qu'elles ne puissent pas toutes être estimées (notamment la surface de chaque site, qui reste une approximation, voir section 1 de ce rapport), et afin de bien considérer la fragilité de ces estimations, les stocks ont été estimés à la fois sur les valeurs moyennes, mais également à partir des bornes des intervalles de confiance à 95% pour la Profondeur moyenne (P_{moy}), le taux de Matière Organique (MO), ainsi que la Densité Apparente (DA). Une fourchette du stock de carbone est donc estimée pour chaque site, ainsi qu'une estimation moyenne, basée sur les moyennes de ces différents paramètres. Les résultats sont ainsi présentés par sites ci-après.



Exemple de deux carottes. A Gauche, un échantillon profond (500 cm à 550 cm de profondeur) au marais du Cougourlier (tourbe à roseaux). A droite, un échantillon de 50 cm à 100 cm de profondeur sur le site de la vallée des Baux.

Vallée des Baux

La vallée des Baux présente un gradient très fort du taux de matière organique en fonction de la profondeur (Figure 12). Les valeurs de taux de matière organique sont très nettement inférieures à 30% jusqu'à 50 cm de profondeur inclus. La vallée des Baux apparaît donc comme un site nettement dégradé, comme l'usage des terres pouvait le laisser supposer. Par ailleurs, le



site présente de très importantes lacunes de prospection, puisque les deux tiers ouest n'ont fait l'objet de presque aucune prospection (et deux sondages tourbeux existent sur ce secteur, voir Section 1).

Malgré cette importante dégradation en surface, la vallée des Baux reste une tourbière d'envergure, possiblement sous estimée (au moins 245 hectares), qui stocke entre **110 659** et **317 992 tonnes de carbone** (estimation moyenne de **193 838 tonnes**) (Tableau 4).

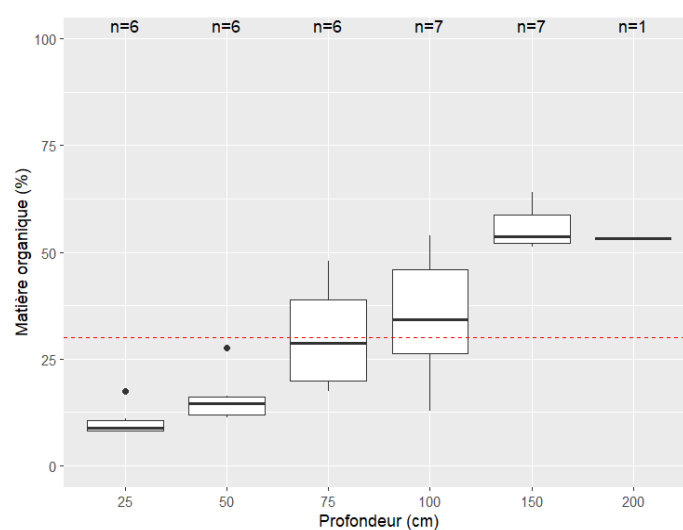


Figure 12: Taux de matière organique en fonction de la profondeur des échantillons pour la vallée des Baux (le nombre d'échantillons obtenu par profondeur est indiqué au-dessus de chaque boxplot). La ligne rouge correspond au taux de 30% de matière organique ($K-W=25.339$, $p.value<0.001^{***}$).

Surface (ha)	Profondeur moyenne (Nb sondages utilisés)	Volume estimé (m ³)	Densité apparente (kg/ m ³)	Taux de Matière Organique (%)	Stock de Carbone (t)
245,4 ha	1,85m ± 0,23m (7 sondages)	4 550 452 m ³	259,2 ± 76,51	31 ± 19%	193 838 [110 659 ; 317 995]

Tableau 4 : Estimation du stock de carbone contenu sur le site de la vallée des Baux.

Cougourlier

Le marais du Cougourlier semble présenter un gradient du taux de matière organique en fonction de la profondeur (Figure 13, différences presque significatives), avec des valeurs qui sont toutes relativement faibles, autour des 30%, y compris en profondeur. Le marais du Cougourlier apparaît donc comme dégradé en surface, sur des tourbes probablement initialement faibles en matière organique, bien qu'une dégradation en profondeur en raison d'un taux important de sulfate ne puisse être exclue (Eulry 1983).



Malgré ces taux de matière organique faibles, l'importante densité et la grande profondeur font de cette tourbière de près de 64 hectares, un stock non négligeable de carbone, estimé entre **39 233** et **286 704 tonnes de carbone** (estimation moyenne de **132 471 tonnes**) (Tableau 5).

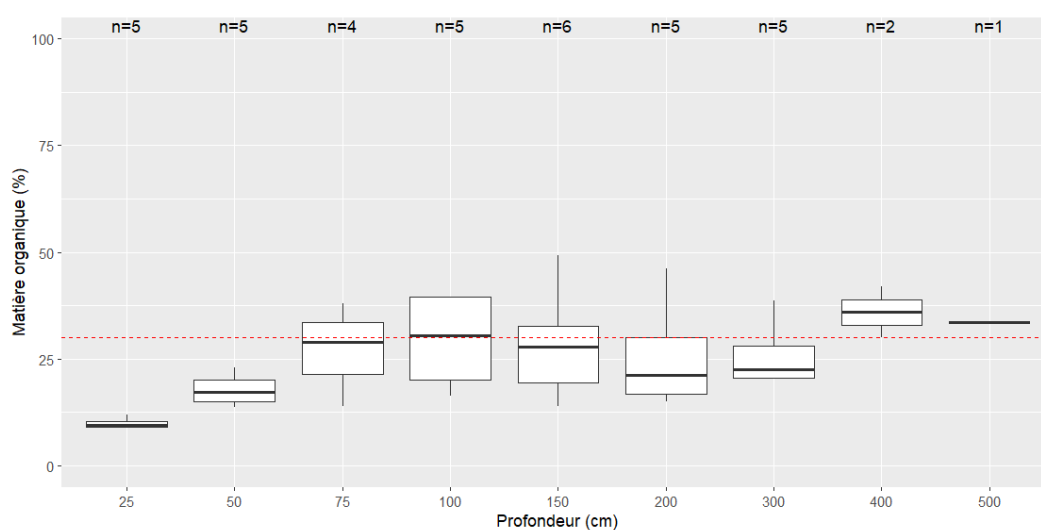


Figure 13: Taux de matière organique en fonction de la profondeur des échantillons pour le Cougourlier (le nombre d'échantillons obtenu par profondeur est indiqué au-dessus de chaque boxplot). La ligne rouge correspond à un taux de 30% de matière organique (K-W= 14.868, $p.value=0.06176$).

Surface (ha)	Profondeur moyenne (Nb sondages utilisés)	Volume estimé (m ³)	Densité apparente (kg/ m ³)	Taux de Matière Organique (%)	Stock de Carbone (t)
63,87 ha	3,63m ± 1,64m (5 sondages)	2 317 204 m ³	431,1 ± 229,7	25 ± 11 %	132 471 [39 233 ; 286 704]

Tableau 5 : Estimation du stock de carbone contenu sur le site du Cougourlier

Raphele

Le marais de Raphele présente un patron très particulier. Si des différences significatives existent entre les profondeurs, les valeurs de matière organique sont très fluctuantes de 25 à 200 cm. Cela pourrait refléter à la fois une dégradation en surface de la tourbe, mais aussi une variété des dépôts, comme en témoigne la description des faciès détaillées en section 3. Une fois dans les dépôts les plus tourbeux (>200cm), les taux de matières organiques avoisinent les 50 %, alors qu'ils sont plus faibles au-dessus (Figure 14).



Le marais de Raphele présente les profondeurs les plus importantes de tous les sites étudiés. Il est ainsi logiquement le principal stock de carbone du delta et compte plus de 45% du stock de carbone de l'ensemble des sites étudiés, soit entre **672 284** et **1 710 333 tonnes de carbone** (estimation moyenne de **1 123 377 tonnes**) (Tableau 6).

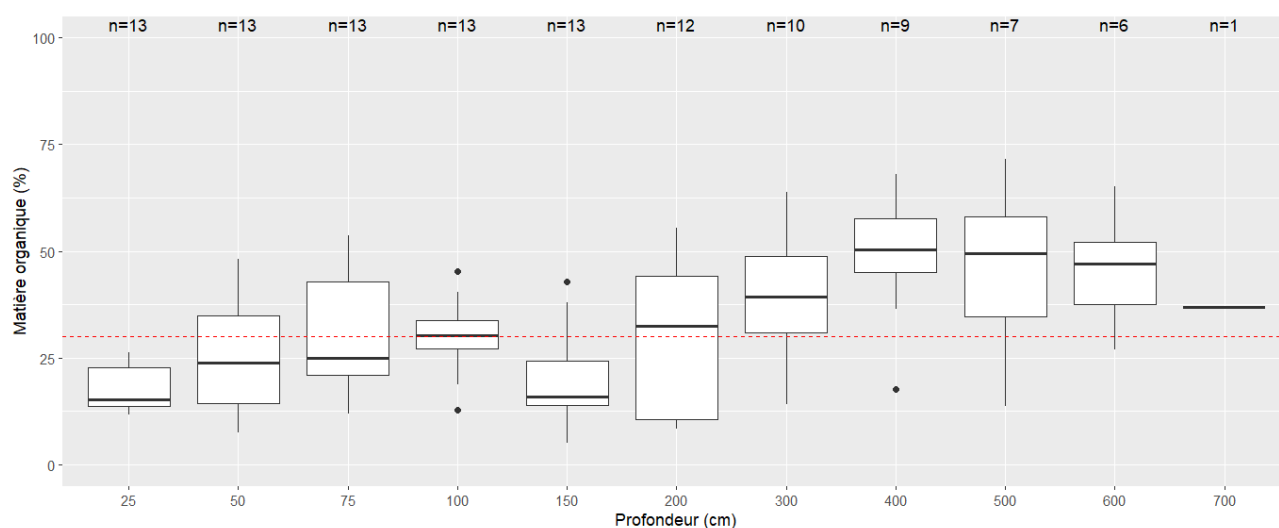


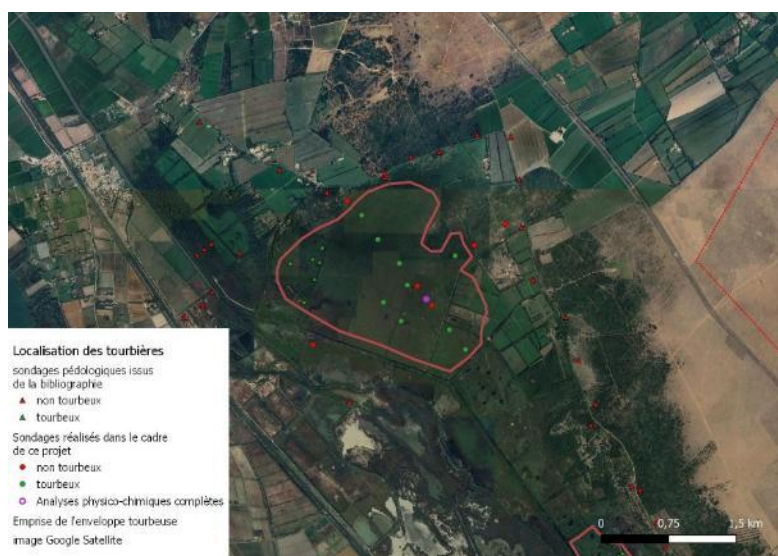
Figure 14: Taux de matière organique en fonction de la profondeur des échantillons pour le marais de Raphele (le nombre d'échantillons obtenu par profondeur est indiqué au-dessus de chaque boxplot). La ligne rouge correspond à un taux de 30% de matière organique (K-W= 36.928, p.value<0.001 ***).

Surface (ha)	Profondeur moyenne (Nb sondages utilisés)	Volume estimé (m ³)	Densité apparente (kg/ m ³)	Taux de Matière Organique (%)	Stock de Carbone (t)
437,47 ha	4,77m ± 2,12m (16 sondages)	20 853 757 m ³	327,6 ± 163,9	31 ± 16 %	1 123 377 [672 284 ; 1 710 333]

Tableau 6 : Estimation du stock de carbone contenu sur le site de Raphele

Capeau

Le Capeau ne semble pas présenter de patron particulier selon la profondeur de prélèvement, laissant supposé un niveau de dégradation faible sur ce site (Figure 15). Les dépôts sont majoritairement peu épais, à quelques exceptions près. De même pour les taux de matière organique qui sont dans l'ensemble plutôt faibles, bien que ce soit au Capeau que le taux maximal ait été mesuré (76%) sur un échantillon prélevé en surface (25cm).



Ainsi, les faibles profondeurs et un taux de carbone moyennement élevé sont responsables d'un stock de carbone limité, estimé entre **54 846** et **369 726 tonnes** (estimation moyenne de **171 697 tonnes**) (Tableau 7).

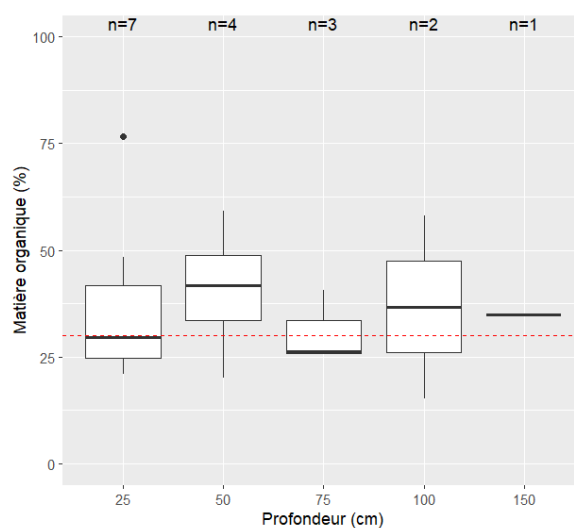


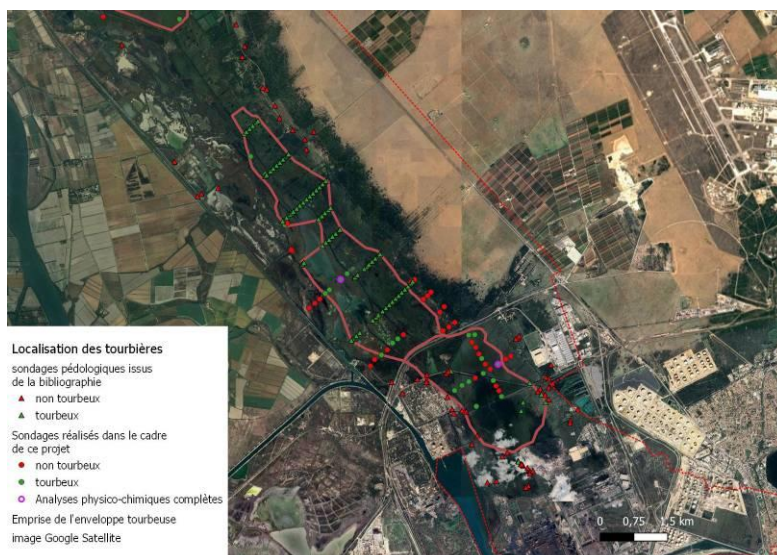
Figure 15: Taux de matière organique en fonction de la profondeur des échantillons pour le marais du Capeau (le nombre d'échantillons obtenu par profondeur est indiqué au-dessus de chaque boxplot). La ligne rouge correspond à un taux de 30% de matière organique ($K-W= 0.5546$, $p.value = 0.968$).

Surface (ha)	Profondeur moyenne (Nb sondages utilisés)	Volume estimé (m ³)	Densité apparente (kg/ m ³)	Taux de Matière Organique (%)	Stock de Carbone (t)
299,18 ha	0,94 m $\pm$ 0,61m (16 sondages)	2 797 333 m ³	312,7 $\pm$ 125,1	37 $\pm$ 16 %	171 697 [54 846 ; 369 726]

Tableau 7 : Estimation du stock de carbone contenu sur le site du Capeau.

Dépression du Vigueirat

La dépression du Vigueirat, comme le Capeau, ne semble pas présenter de patron particulier selon la profondeur de prélèvement, laissant supposé un niveau de dégradation là aussi faible ou nul (Figure 16). Si les valeurs de taux de carbone sont comparables entre les prélèvements du Tonkin et ceux du Landre, les densités apparentes pour les sondages du Landre sont beaucoup plus faibles



(68 kg.m⁻³). Les stocks de carbone ont donc été estimés en distinguant le nord et le sud de la dépression du Vigueirat (voir carte ci-dessus, la limite correspondant à la route D268). La végétation de la partie nord étant à la fois composée de Roselières (Landre) mais aussi de Cladiaies (comme au Tonkin), il a été choisi d'utiliser les mesures de ces deux secteurs pour définir les valeurs de densité apparente et de taux de carbone dans la partie Nord de la dépression du Vigueirat. Pour la partie sud, seuls les sondages du Tonkin ont été considérés dans le calcul des valeurs moyennes. Pour les profondeurs, dans la partie Nord, elles ont été estimées à partir des sondages réalisés dans le Landre et de l'étude des sols de 1972 (voir Section 1). Pour la partie Sud, les sondages réalisés au Tonkin ont été considérés.

La dépression du Vigueirat, bien qu'étant la tourbière la plus étendue de la zone étude, n'est pas le principal stock de carbone, en raison d'une profondeur moins importante (en particulier pour la partie Nord) ainsi que de densités apparentes inférieures aux autres sites. Le stock est estimé entre **391 479** et **1 140 799 tonnes** (estimation moyenne de **715 574 tonnes**) (Tableau 8).

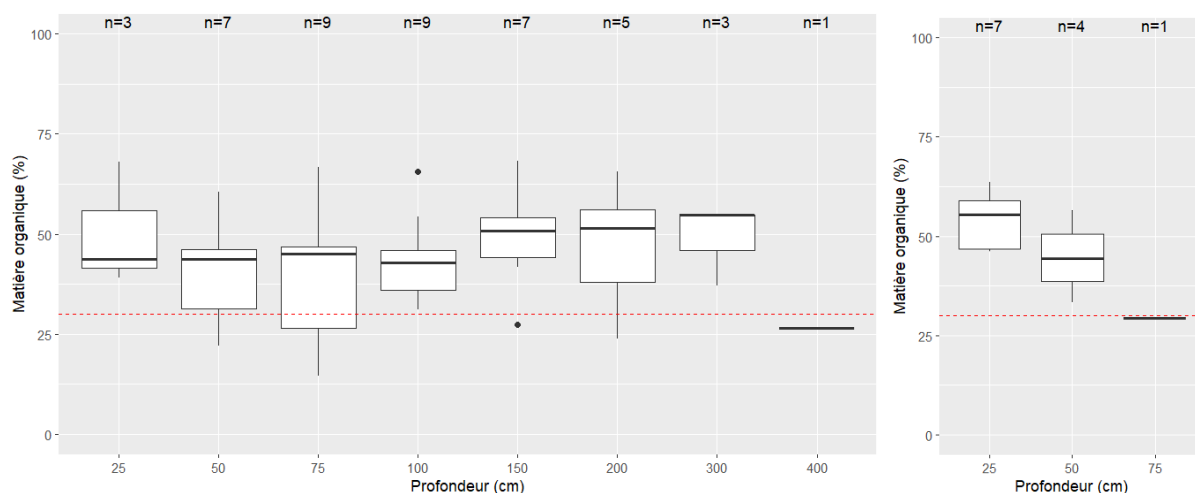


Figure 16: Taux de matière organique en fonction de la profondeur des échantillons pour le marais du Tonkin (gauche) et le secteur du Landre (droite) (le nombre d'échantillons obtenu par profondeur est indiqué au-dessus de chaque boxplot). La ligne rouge correspond à un taux de 30% de matière organique (Tonkin : K-W= 4.6359, p.value = 0.704 ; Landre : K-W= 4.0192, p.value = 0.134).

Site	Surface (ha)	Profondeur moyenne (Nb sondages utilisés)	Volume estimé (m ³)	Densité apparente (kg/ m ³)	Taux de Matière Organique (%)	Stock de Carbone (t)
Nord	714,97	0,73 m ± 0,62m (88 sondages)	5 183 533 m ³	168,2 ± 98,7	45 ± 13 %	208 151 [120 392 ; 309 655]
Sud	445,47	2,50 m ± 1,03m (11 sondages)	11 117 149 m ³	195,54 + 90,8	44 + 14 %	507 423 [271 086 ; 831 144]
Total	1160,4					715 574 [391 479 ; 1 140 799]

Tableau 8 : Estimation du stock de carbone contenu sur le site de la dépression du Vigieirat.

Autres sites

Pour les autres sites identifiés dans la section 1 de ce rapport (Beauchamp, Espeyran et Petit Badon), nous n'avons pas de données pour juger de l'état de dégradation de ces derniers. Seul un sondage a été analysé au marais de Beauchamp (2 échantillons à 25 et 50cm). Le taux de carbone moyen y est de 36% et la densité apparente de 174 kg.m⁻³. Ainsi, à partir des surfaces et profondeur moyenne (37 cm en moyenne sur 3 sondages), on peut estimer un stock de carbone de 360 tonnes pour la tourbière du Beauchamp.

Pour le marais d'Espeyran et pour Petit Badon, il n'y a aucun prélèvement. Ces deux tourbières étant des Roselières, les valeurs de taux de matière organique et de densité apparentes mesurées au Landre semblent être les plus adaptées pour ces deux sites. En considérant ces valeurs, on arrive à une estimation moyennede 2030 tonnes de carbone pour le marais d'Espeyran et 53 tonnes pour Petit Badon. A noter toutefois que pour le site de Petit Badon, le dépôt semble particulier, proche d'une litière, l'estimation est donc à considérer avec précaution.

Quoi qu'il en soit, ces petits sites sont anecdotiques, au regard des **1,27 à 3,83 million de tonnes de carbone** que stockent les tourbières du delta du Rhône étudiées dans le cadre de ce projet (estimation moyenne de 2,34 Mt).

Il est intéressant aussi de noter que les taux de carbone qui ont été mesurés sur des secteurs où les sondages n'étaient pas définis comme tourbeux dépassaient régulièrement ce qui a pu être mesuré pour différents types de zones humides de Camargue (Martínez-Eixarch et al. 2024). Bien que présentant des épaisseurs de substrat organique peu épais (comme cela a pu être observé par exemple à la Capelière ou en Camargue gardoise), les importantes surfaces concernées (roselières, limons palustres, ...) en Camargue pourraient là aussi représenter des stocks de carbone relativement importants qu'il conviendrait d'étudier plus en détail.

Paramètres physico-chimique des tourbes des principaux sites du delta du Rhône

Site	Nb d'échant.	pH	Résistivité	Conductivité (mS/m)	Azote N (ppm sur sec)	C/N	K2O (mg/kg)	MgO (mg/kg)	CaO (mg/kg)	Na2O (mg/kg)	P2O5 Total (%)
Capeau	5	6,54 ± 0.33	1258 ± 264	8,2 ± 1,44	20436 ± 8515	12,71 ± 1,74	108 ± 28	857 ± 195	19751 ± 1709	249,4 ± 135	0,075 ± 0.014
Cougourlier	5	7,64 ± 0.65	1152 ± 1147	14,7 ± 8,56	13790 ± 9068	9,42 ± 1,32	109,4 ± 42	1509 ± 284	16028 ± 3907	4364,2 ± 2432	0,052 ± 0.012
Landre	4	7,74 ± 0.24	1090 ± 379	9,9 ± 2,90	7739 ± 6556	14,33 ± 0,62	233,5 ± 56	1086 ± 408	12092 ± 2988	1708 ± 1305	0,111 ± 0.020
Raphele	10 ;6 ;5	7,94 ± 0.37	1907 ± 937	6,5 ± 3,21	9255 ± 5181	11,57 ± 2,44	59 ± 44	873 ± 556	16134 ± 3344	1030,1 ± 1645	0,0482 ± 0.028
Tonkin	5	7,60 ± 0.51	1738 ± 1077	7,7 ± 4,03	11299 ± 7937	13,2 ± 2,40	58,4 ± 31	508 ± 354	19422 ± 5187	207,6 ± 130	0,0471 ± 0.023
Vallée des Baux	6	8,06 ± 0.72	4770 ± 1830	2,7 ± 2,11	8256 ± 5781	13 ± 1,54	83 ± 36	1075 ± 406	16438 ± 5038	101,7 ± 41	0,0544 ± 0.025

Tableau 9: Résultat des analyses physico-chimiques complémentaires

Les analyses présentées dans le Tableau 9 permettent d'avoir un premier regard sur les tourbes présentes sur ces différents sites. Il est ainsi intéressant de noter que le marais du **Capeau** présente des tourbes légèrement acides, avec un pH nettement inférieur à tous les autres sites. Ces valeurs basses de pH se retrouvent sur toutes les profondeurs échantillonnées. Des valeurs plus faibles sont aussi ponctuellement retrouvées, notamment dans la vallée des Baux à 150cm de profondeur (6,64) ou en surface (25cm de profondeur) au Tonkin (6,75), mais elles sont toujours issues de mesures isolées. Le marais du Capeau présente par ailleurs des valeurs d'azote total très élevées, en particulier en surface et à 1 mètre de profondeur. Il est possible que selon les formes de l'azote (qui n'ont pas été étudiées ici), cela participe à l'abaissement du pH observé sur ce site (sans que cela n'en soit l'unique raison). Ces valeurs importantes d'azote n'entraînent pas de valeur basses pour le rapport C/N, notamment en raison des importantes valeurs de carbone (>50% de matière organique sur les échantillons du sondage analysé au marais du Capeau).

Le site du **Cougourlier** se démarque de son côté pour la conductivité et l'oxyde de sodium (Na2O), ce dernier étant plus de 3 fois supérieur à celui de tous les autres sites en moyenne. Il est probable que la proximité du Cougourlier avec l'aquifère salé qui se situe sous le complexe actuel du Scamandre et du Charnier puisse expliquer ces valeurs plus importantes, via des entrées d'eau salée dans le site. Le site du Cougourlier est d'ailleurs en proie à des problèmes de salinisation (Lafournière, *com. pers.*). La salinité de ces tourbes avait d'ailleurs été identifiée lors de l'étude réalisée dans les années 80 (Eulry 1983), où le taux de Chlorure trop élevé rendait le site impropre à une exploitation de la tourbe pour un usage maraicher.

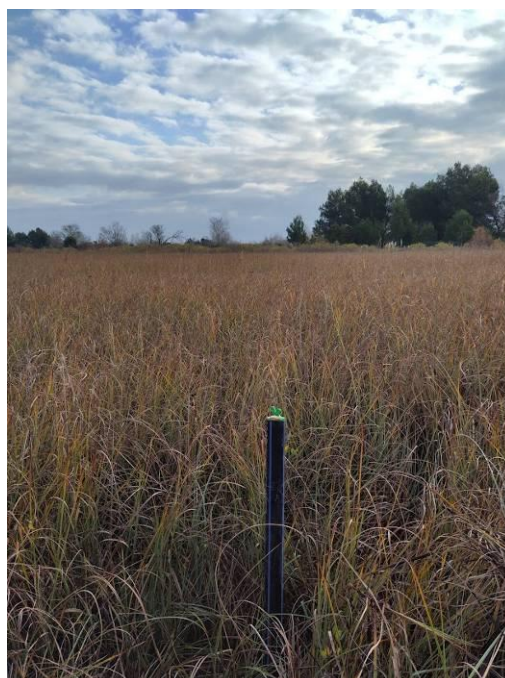
Enfin, les analyses des échantillons du secteur du **Landre** présentent des valeurs élevées pour l'oxyde de Potassium et le pentaoxyde de phosphore total. Ces valeurs pourraient traduire des apports agricoles issus du bassin versant du canal du Vigueirat, qui se jette dans l'étang du Landre.

Dans l'ensemble, les valeurs du rapport C/N observé sur tous les sites indiquent que les tourbières du delta du Rhône peuvent toutes être considérées comme des tourbières eutrophes (aucune valeur de C/N > 20, Hammerich et al. 2024).

Indicateur piézométrique

L'eau est un élément central essentiel à la formation de la tourbe. Or les conditions hydrologiques favorables à l'existence d'une tourbière sont précises et précaires. Ainsi, tout changement hydrologique peut entraîner une dégradation de la tourbière. Suivre les niveaux d'eau, sur la base de piézomètres, est donc essentiel pour étudier les tourbières, que ce soit en contexte de suivi de long terme, dans l'étude fonctionnelle de milieu naturels ou pour évaluer l'impact de travaux de restauration.

En contexte méditerranéen, il existe peu de connaissance sur les niveaux piézométriques favorables à la formation de tourbe. Le projet prévoyait l'installation de quinze piézomètres sur un échantillon de site. Cependant, d'importantes difficultés pour l'implantation ont fortement limitées le déploiement de ces dispositifs. A l'heure de la rédaction de ce rapport, seuls 6 piézomètres ont pu être installés. Sept autres sont toujours en projet. Il est prévu de poursuivre le suivi de ces piézomètres à long terme.



Piézomètre installé au Tonkin

Du point de vue méthodologique, suivant les recommandations de Clément et al. (2023), les piézomètres installés sont composés d'une section crépinée de 1m, avec un bouchon de fond, surmontée d'une section pleine (d'un mètre ou moins selon le contexte des sites). Pour assurer une meilleure longévité, une gaze filtrante a été ajoutée autour de la section crépinée. Sur l'extrémité haute, un bouchon est installé, permettant de suspendre la sonde à l'intérieur du piézomètre (Sonde *Levelogger* de Solinst). A noter que pour les tourbières, un ancrage est nécessaire pour éviter tout mouvement vertical du piézomètre. Pour cela, un fer à béton (300cm) a été enfoncé à la verticale de chaque piézomètre, puis fixé au tube avec deux colliers de serrage. Pour tous les sites, ces fers à béton une fois le socle minéral atteint, ont été recoupés sur place. Pour 3 piézomètre du marais de Raphele en revanche, l'ancrage atteint 275 cm (25 cm dépassant pour fixer le tube) mais n'atteint pas le socle minéral, en raison d'une épaisseur de tourbe trop importante (>7m).

Les piézomètres ont été installés dans la dépression du Vigueirat (marais du Tonkin : 2 piézomètres) et au marais de Raphele (4 piézomètres) (Figure 17). Deux piézomètres installés dans la vallée des Baux dans le cadre d'un autre projet ont également été ajoutés à la représentation des chroniques piézométriques présentée en Figure 18. A noter que le piézomètre situé dans une roselière, en limite

de secteurs tourbeux sur le marais de Raphèle n'a pas encore pu être relevé, il ne figure ainsi pas Figure 18.

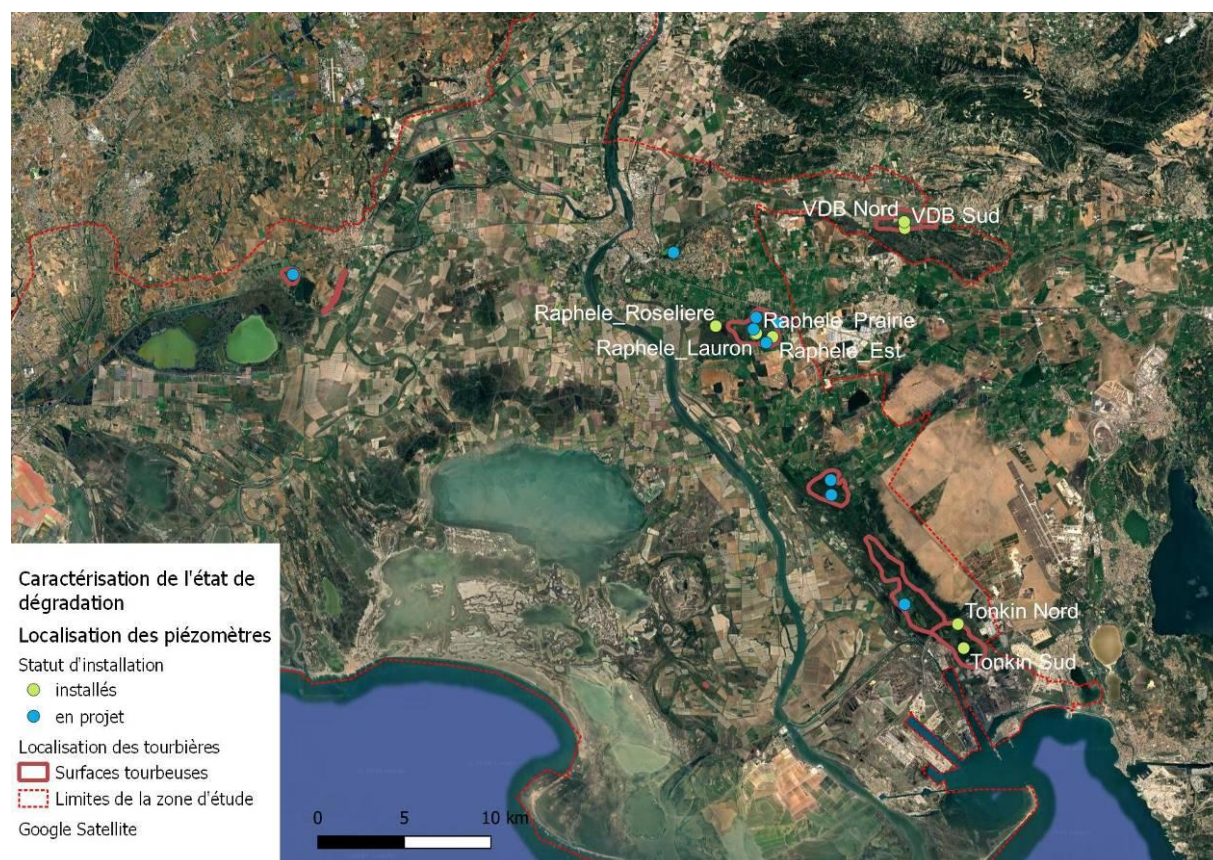


Figure 17: Carte de l'emplacement des piézomètres

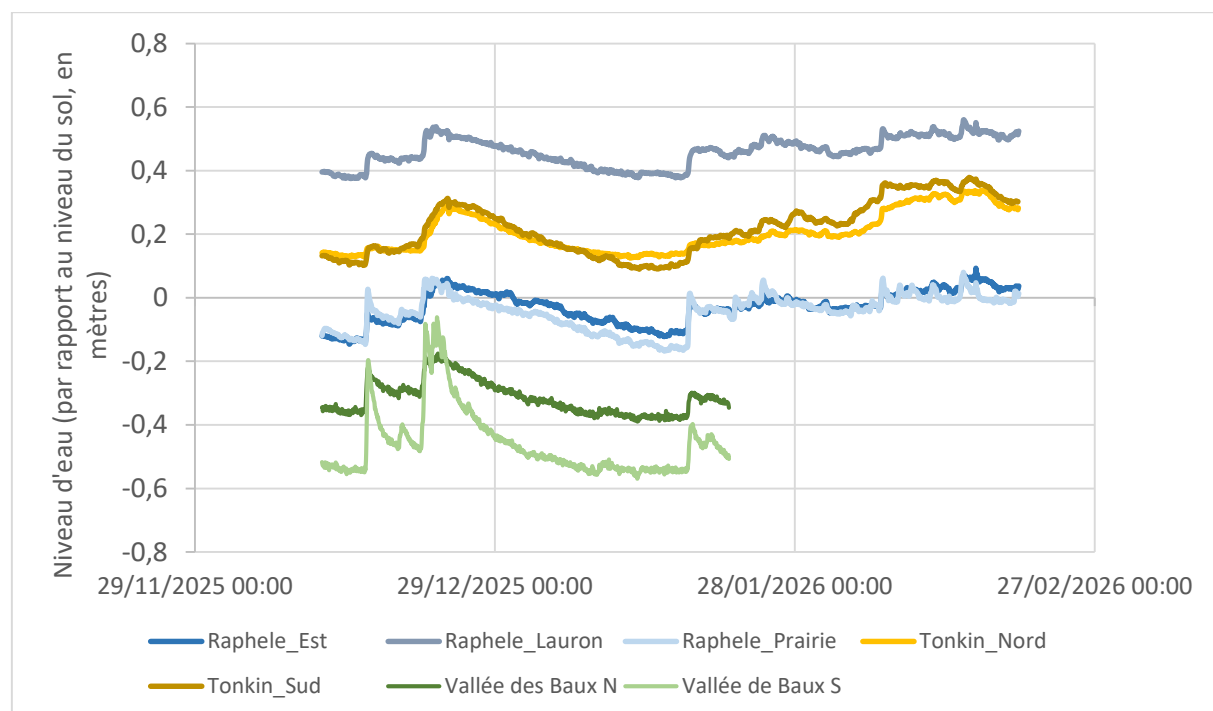


Figure 18: Chroniques piézométriques

Si les observations piézométriques sont issues d'un nombre restreint de piézomètres, et sur une période courte (de fin octobre à mi-février), elles sont déjà informatives dans la comparaison des sites entre eux. Si l'on ajoute les piézomètres existants dans la vallée des Baux (installé dans le cadre d'une autre étude sur le domaine de Joyeuse Garde, en suivant la même méthodologie d'installation), la comparaison des niveaux d'eau hivernaux par rapport au niveau du sol entre les trois sites étudiés indique un gradient allant de la vallée des Baux, où les niveaux sont très bas ($< -0.3\text{m}$ majoritairement) au marais de Raphèle, où les niveaux se situent plus ou moins au niveau du sol, jusqu'au Tonkin où le niveau d'eau dépasse celui du sol de plus de 20cm en moyenne. Ce gradient est en cohérence avec les analyses de tourbe, qui illustraient une forte dégradation pour la vallée des Baux, alors que pour le site du Tonkin, les échantillons de surface étaient peu ou pas altérés.

Au-delà de ce gradient, l'intensité des fluctuations observées est aussi intéressante. Au Tonkin, ces dernières semblent lissées (encore plus pour le piézo Nord), avec peu ou pas d'épisode brutaux de hausse du niveau, comme c'est le cas pour les marais de Raphèle et encore plus pour la Vallée des Baux. Cela pourrait traduire une plus grande influence de résurgences de nappe. A l'inverse, le piézomètre installé dans le Lauron au marais de Raphèle met en évidence des épisodes marqués de hausses du niveau d'eau (symétrique avec les piézomètres du site). Cette observation laisse à penser que le lauron étudié se rapproche plus d'un lauron colmaté que d'un lauron ouvert dans son fonctionnement hydrologique (Giudicelli et al. 1980). Les valeurs brutes par rapport au niveau du sol ne sont pas informatives pour ce piézomètre (il faudra comparer les données en NGF une fois l'ensemble des piézomètres installés et côtés).

Il sera bien évidemment essentiel de suivre ces piézomètres sur des durées plus longues afin d'avoir de meilleurs éléments de comparaison. La poursuite de l'installation du réseau de piézomètres et l'intégration à ce réseau des quelques piézomètres installés dans le cadre du projet OSMOSE (la plupart des sondes ayant été installées dans des eaux libres) permettra de bénéficier d'un jeu de données riche pour mieux comprendre les dynamiques piézométriques à l'œuvre dans les tourbières du delta du Rhône.



*Le marais du Tonkin avec vue sur le complexe industrialo-portuaire de Fos sur mer.
©A. Gazaix*



Vue aérienne du marais de Raphèle © G. Massez

Section 3 : Focus sur le marais de Raphele

Parmi les principaux sites tourbeux du delta du Rhône, le marais de Raphele occupe une place particulière. Tout d'abord, il s'agit du site le plus profond, avec plus de 7 mètres de tourbe au maximum, ainsi que le site qui stocke le plus de carbone dans le delta. Par ailleurs, il est encore aujourd'hui occupé par des végétations turficoles, comme les cladiaies ou les prairies humides méditerranéennes. Ces dernières ont d'ailleurs fait l'objet d'un intérêt majeur pour les botanistes, attirés depuis des décennies par la présence de nombreuses espèces à distribution euro-sibériennes rares sur le pourtour Méditerranéen. Un projet de classement en réserve naturelle régionale est en cours, illustrant l'intérêt exceptionnel de ce site. Toutefois, d'importants changements ont eu lieu sur le territoire depuis la seconde moitié du XX^{ème} siècle, illustrés notamment par la disparition de plusieurs espèces (comme *Liparis loeselii* ou encore *Pedicularis palustris*). Ce contexte ainsi que la disponibilité de connaissances historiques permettent d'envisager un travail afin de questionner les dynamiques actuelles et historiques sur le territoire des marais de Raphele.

Pour cela, deux approches ont été menées. Dans un premier temps, un travail de caractérisation des dépôts tourbeux a été réalisé, afin de mieux comprendre la distribution de la tourbe sur le site, et des écosystèmes historiquement présents à l'origine de leurs formations. Cette étude a pu être confrontée aux résultats d'un premier travail réalisé dans les années 80 par le BRGM (Dellery et al. 1987). Dans un second temps, mobilisant les relevés de végétation réalisés par les botanistes ayant arpentés le marais de Raphele des années 50 aux années 70, les changements récents dans la végétation du site ont été caractérisés. Ces résultats permettent d'émettre un certain nombre d'hypothèse quant aux facteurs de changement à l'œuvre sur le site.

Genèse et formation des tourbe

Les études paléo-environnementales sont très peu nombreuses sur les tourbières du delta du Rhône. Cependant, la thèse d'Hélène Triat-Laval s'est intéressée à ce territoire, considérant les tourbières principalement comme pourvoyeuses de chroniques sédimentaires pour étudier des échelles plus large que les tourbières en tant que telle (Triat-Laval 1979). Toutefois, les résultats ainsi produits permettent d'avoir un premier regard sur les écosystèmes, et ont permis par exemple, de remettre en cause l'hypothèse d'espèces reliques glaciaires pour expliquer la présence des espèces euro-sibériennes. En effet, leur détection uniquement dans les échantillons plus récents laisse plutôt présager une arrivée récente sur le territoire (Triat-Laval 1979, 1975).

Plus récemment, plusieurs études se sont intéressées à la vallée de Baux, en liant les changements paysagers et les changements d'usages du territoire aux différentes époques historiques. Il ressort ainsi que la vallée des Baux a été drainée dès l'époque romaine, et a vu par la suite plusieurs fois le niveau d'eau augmenter rapidement (Leveau 2017). Ces augmentations s'expliquent à la fois par des changements climatiques, mais également par des ouvrages installés sur le site, notamment à l'aval de l'exutoire de la vallée des Baux (Bruneton et al. 1998).

Bien que ces deux travaux apportent des éléments de compréhension de l'histoire complexe de certains des sites tourbeux du delta, les études restent peu nombreuses et aucune n'apporte une étude du marais de Raphele (hormis un sondage de la thèse d'Hélène Triat-Laval). Le projet porté par la Tour du Valat a donc été l'occasion d'initier un premier travail pour ce site, réalisé dans le cadre de

l'alternance de Loeiz Sagnet. Ainsi, le paragraphe ci-dessous reprend des éléments qui sont détaillés dans les deux rapports réalisés par ses soins³.

Méthodologie d'étude du site des marais de Raphèle

L'objectif de ce travail était à la fois de disposer d'une meilleure estimation de l'enveloppe tourbeuse du site du marais de Raphèle, de confronter l'enveloppe ainsi estimée à l'étude réalisée dans les années 80 par le BRGM (Dellery et al. 1987) et enfin, de caractériser les dépôts tourbeux afin de bénéficier d'une description sommaire des végétations passées, ayant constitué les tourbes aujourd'hui présentes sur le site, en se basant sur le guide d'identification des tourbes de Schulz et al. (2019).

Dans un premier temps, trois transects de sondages ont été définis et positionnés perpendiculairement au sens d'écoulement de la vallée qu'occupe le marais de Raphèle. En complément de ces trois transects, orientés Nord-Sud, des sondages ponctuels ont été réalisés sur le site, afin de contrôler des secteurs qui avaient identifiés comme tourbeux dans l'étude de Dellery et al. (1987) (Figure 19).



Figure 19 : Cartographie de l'échantillonnage réalisé sur le marais de Raphèle. (Les trois transects (rouge) sont par la suite nommés selon leur emplacement : Ouest, Centre et Est.

³ Sagnet Loeiz, 2025, « Étude de la tourbière des marais de Raphèle (Arles – 13), Description et perspectives », Rapport intermédiaire - Master sciences de l'eau – Université de Lyon. 30pp.

Sagnet Loeiz, 2025, « Caractérisation de la tourbière des marais de Raphèle (Arles – 13), Anticipation sur leur gestion » Rapport de fin d'étude - Master sciences de l'eau – Université de Lyon. 60p. + annexes

Par la suite, les sondages ont été réalisés sur le terrain, avec l'aide d'un carottier russe (c.f. méthodologie détaillée en section 1 du rapport), et l'étude des dépôts tourbeux s'est faite par observation in situ des principaux macrorestes.

En parallèle, une numérisation des données issues des résultats produits lors de l'étude de Dellery et al. (1987) a également été effectuée afin de pouvoir comparer les résultats obtenus avec ceux issus de notre étude.

Profondeur et localisation de l'enveloppe tourbeuse

Au total, 41 sondages ont été réalisés sur le site du marais de Raphele. Les figures Figure 21, Figure 20 et Figure 22 représentent schématiquement les coupes transversales du site, avec les épaisseurs de tourbes ou d'autres types de sédiments observés sur le site. Ainsi, les épaisseurs maximales sont observées sur le transect ouest, avec toutefois des limons probablement rhodaniens en surface, recouvrant les tourbes dans le fond de la vallée (mais non présent sur les secteurs légèrement plus hauts topographiquement au sud). A l'inverse, le nord de la vallée n'est pas tourbeux.

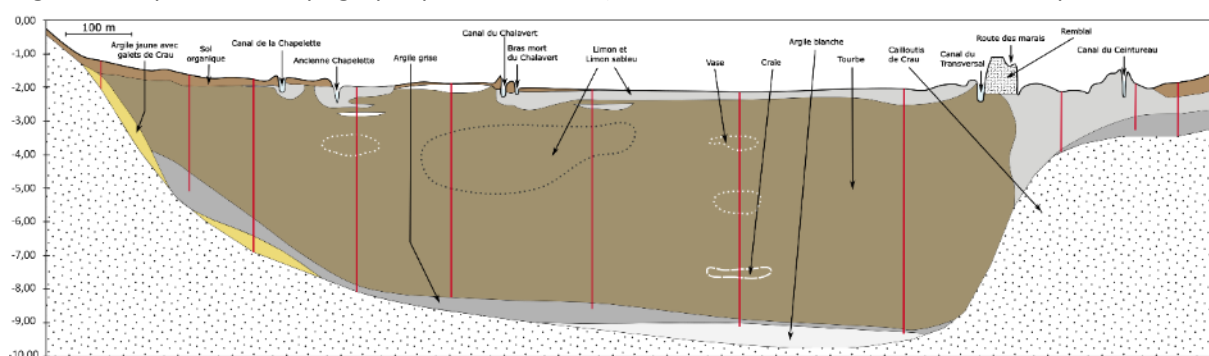


Figure 21 : Schématisation d'une coupe transversale du marais de Raphele au niveau du transect Ouest © L. Saguet.

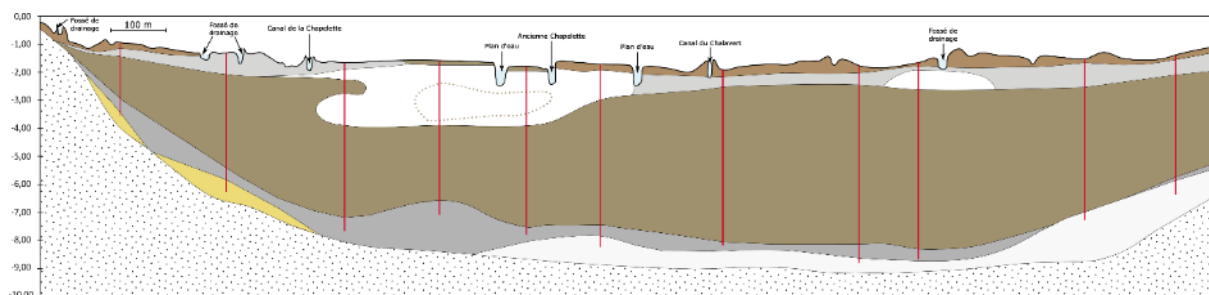
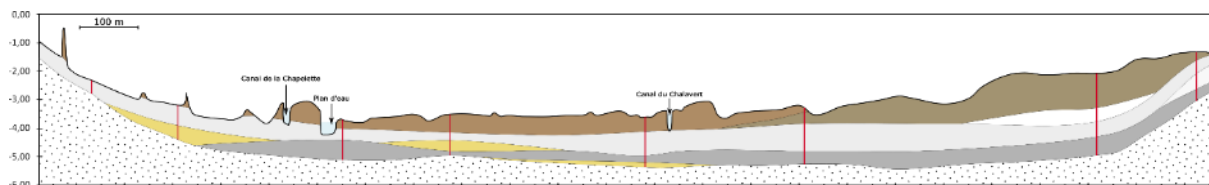


Figure 20 : Schématisation d'une coupe transversale du marais de Raphele au niveau du transect Centre © L. Saguet.

Au niveau du transect central, les épaisseurs sont encore très conséquentes, autour des 6m en moyenne dans la partie la plus profonde. Les limons (probablement rhodaniens) sont absents des sondages, en revanche, des dépôts non tourbeux occupent une partie du transect (Figure 20). Ces dépôts sont probablement lacustres, et pourraient être relativement récents, un étang occupant ce secteur (Chanoine) dans des représentations cartographiques des derniers siècles (Voir les rapports de Loeiz Saguet à ce sujet). Il est enfin intéressant de noter l'élargissement de la tourbière sur ce transect, puisque la limite nord n'a pas pu être atteinte.

Enfin, le dernier transect réalisé, à l'Est du marais de Raphele, révèle des épaisseurs de tourbe très limitées, voir une absence de tourbe. Seuls les sondages situés au nord du transect peuvent être considérés comme tourbeux, tandis que les deux tiers sud du transect, qui correspondent à d'anciennes zones cultivées ne peuvent être considérés comme tourbeux. On trouve sur ces sondages une épaisseur de limon calcaire importante, avant d'atteindre le cailloutis de Crau.



*Figure 22 : Schématisation d'une coupe transversale du marais de Raphele au niveau du transect Est
© L. Saguet.*

Suite à ce travail, il est intéressant de noter que les polygones correspondants aux secteurs tourbeux définis dans l'étude de Dellery et al. (1987) et celui que nous avons pu définir à partir des sondages réalisés sur le site (voir Section 1) se distinguent sur deux zones (Figure 23). En premier lieu, au nord-ouest du site, un petit isolat avait été identifié lors de l'étude de 1987, or nos sondages sur le secteur n'ont pas permis de mettre en évidence de manière certaine que le secteur est tourbeux. Si un des sondages était de façon certaine non tourbeux, le second présentait près de 70 cm de « limon palustre », possiblement très riche en matière organique. Toujours est-il que cela reste loin des 4 mètres identifiés historiquement. Il est possible que ce secteur soit particulièrement localisé, et que la carte de 1987 soit d'une précision insuffisante. Quoi qu'il en soit, ce secteur n'a pas été repris dans le découpage actuel de la tourbière du marais de Raphele et nécessiterait de plus amples investigations.

L'autre secteur nettement plus étendu correspond au sud-est du site. En effet, il y a là près de 100 hectares qui étaient intégrés au périmètre de la zone tourbeuse de 1987 que nous ne pouvons aujourd'hui considérer comme tel. Ce secteur est considéré au moins pour partie comme exploité dans les années 80 (Dellery et al. 1987). Les épaisseurs y étaient limitées (« Echantillon de H. FEOUGIER - P 6 - Il y a une "poche" de 1,6 m de profondeur, le reste de l'exploitation a une épaisseur de 60 cm seulement », citation dans Dellery et al. (1987)). Il est donc probable que l'exploitation de ce secteur, combinée à son drainage et sa mise en culture à partir de la fin des années 90 ou au début des années 2000 (d'après les photos aériennes de l'époque) ait entraîné la disparition des tourbes qui y étaient présentes sur de faibles épaisseurs. Ce travail, au-delà d'apporter une connaissance plus fine de la structure du comblement tourbeux du marais de Raphele, apporte donc aussi des éléments importants sur les dégradations récentes que le site a pu subir.

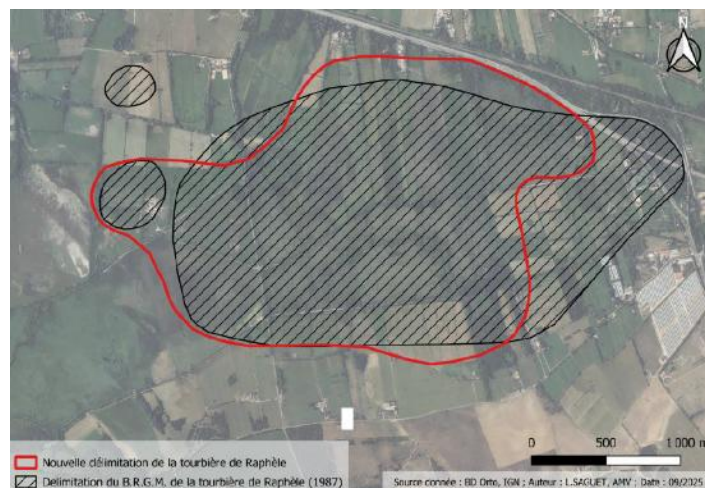


Figure 23 : Cartographie des enveloppes tourbeuses estimées par Dellery et al. (1987) et celle estimée dans le cadre de ce projet.

Type de tourbe et éléments paléo-environnementaux

Au-delà de la définition des entités tourbeuses et des épaisseurs de tourbes, la réalisation de ces sondages profonds permet aussi de collecter des informations complémentaires, notamment les principaux macro-restes observables dans les tourbes. Ces observations renseignent sur les végétations en place lors de la constitution des tourbes. Ce travail détaillé a ainsi été réalisé sur les transects ouest et centre, le transect est étant très peu tourbeux. Il est prévu une analyse détaillée de ces résultats dans le cadre d'une collaboration avec l'Université de Lyon 2 et l'Université de Lausanne (en cours), en s'appuyant notamment sur plusieurs datations en cours de réalisation. Toutefois, plusieurs éléments peuvent déjà être évoqués suite à la réalisation des sondages.

On observe en effet ce qui semble avoir été une succession écologique lors de l'initiation de la turfigénèse, avec des dépôts principalement constitués de tourbe à *Cladium mariscus* à la base de la plupart des sondages, peu épais. Ils sont ensuite supplantés par des tourbes à roseaux (bien visible sur transect centre, voir Figure 24, mais également perceptible sur transect Ouest). On retrouve ensuite des dépôts de *Cladium* très fins à la base des dépôts vaseux lacustres plus récents (100 à 150cm de profondeur) sur les sondages du transect centre, qui pourrait traduire un nouvel épisode de paludification (qui a débouché dans ce contexte sur un étang et non sur une tourbière à roseaux). Par ailleurs, bien que l'immense majorité du remplissage tourbeux corresponde à des tourbes à roseaux, des tourbes à *Carex* ont été observés de manière conséquente sur les bordures nord et sud du marais (Figure 24). Ces dépôts pourraient correspondre à des écosystèmes proches de bas marais alcalins, comme des dépôts récemment observés dans la vallée de Baux (Van Diggelen, non publié). Ces écosystèmes étaient d'ailleurs connus sur les bordures du marais de Raphèle dans les années 50, avec notamment des communautés végétales et bryophitiques particulières (Molinier et al. 1964). Ainsi, bien que très préliminaire, ce travail ouvre des perspectives pour une étude paléo-environnementale approfondie de la tourbière de Raphèle.

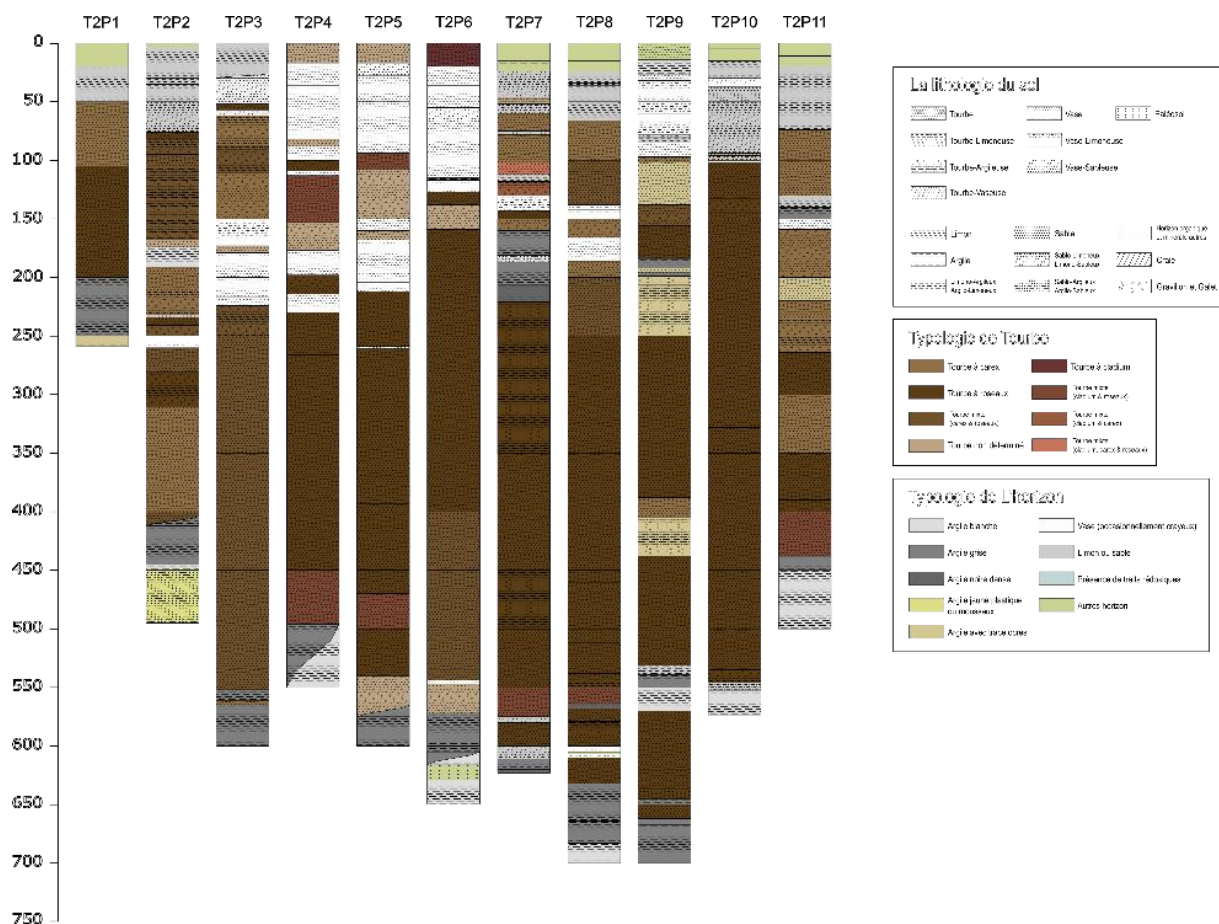


Figure 24 : Profils des tourbes observées dans les sondages du transect Centre.

Evolution de la flore

Comme évoqué précédemment avec la présence connue de communautés floristiques originales dans les années 50, le marais de Raphele dispose d'études floristiques historiques nombreuses. Sa proximité avec l'université de Marseille, et son originalité floristique en contexte méditerranéen ont attiré depuis des décennies les botanistes locaux, comme René Molinier et Gabriel Tallon (Molinier et Tallon 1951). Un étudiant marseillais de René Molinier, Claude Calamand s'est intéressé au début des années 1960 à ce même territoire, et a entrepris une étude complète des communautés végétales du site (Calamand 1961). Il a ainsi réalisé une cartographie de la végétation, basée sur la réalisation de plus de 70 relevés de végétation (Figure 25). Ce travail offre une opportunité importante de retourner sur les lieux ayant fait l'objet de relevé de végétation à cette époque, afin de comparer les communautés végétales observées avec celles présentes aujourd'hui.



Figure 25 : Cartographie de la végétation issue du rapport de Calamand (1961)

Eléments méthodologiques

La méthode utilisée pour cette étude est présentée en détail dans le rapport de stage de Simon Galmiche⁴. Un rapide résumé est ici effectué, en listant les principales étapes :

- (1) Dans un premier temps, il a fallu collecter et sélectionner les relevés utilisés. Pour ce faire, le rapport de Claude Calamand (1961) n'a pas été l'unique source de relevés de végétation historique, et d'autres études conduites entre les années 1949 et 1965 ont été considérées à partir des données extraites de la base de données SIMETHIS du Conservatoire Botanique National Méditerranéen.
- (2) Les relevés étant anciens, les localisations de ces derniers sont de précisions diverses, et uniquement basées sur des descriptions rédigées (et non des coordonnées par exemple). Un important travail a donc été réalisé afin d'estimer, à partir de photographies aériennes contemporaines de la date du relevé et les descriptions faites par les auteurs, la localisation la plus précise possible du relevé, matérialisée par un cercle de diamètre variable correspond à la zone dans laquelle le relevé est situé de manière certaine. Les relevés ne pouvant être localisés avec une précision suffisante n'ont pas été conservés. Au total, 71 relevés ont été conservés.
- (3) Pour chacun de ces relevés, un retour sur l'emplacement a été effectué au printemps 2026 (de fin mai à début juillet). Afin de définir précisément l'emplacement du relevé (100m², comme pour les relevés historiques), l'emplacement du relevé récent a été défini comme suit : (1) Si la même végétation que celle échantillonnée était retrouvée dans le cercle défini comme emplacement certain du relevé historique, le relevé récent était effectué dans cette végétation (2) Dans le cas où la végétation échantillonnée dans les relevés historiques n'était plus

⁴ Galmiche Simon, 2025, « Revisiter les relevés phytosociologiques des marais tourbeux de Raphaële ». Rapport de stage. Master 2 Biologie Ecologie Evolution – Université de Lille, 43pp + annexes.

présentes sur le site, le relevé était effectué dans la végétation dominante au sein du cercle matérialisant l'emplacement du relevé historique.

- (4) Pour finir, la dernière étape a été la saisie et l'analyse des données. Deux analyses sont présentées dans ce rapport : (1) Etude des indicateurs floristiques Rhoméo (I02 : Indice floristique d'engorgement et I06 : Indice floristique de fertilité du sol). Ces deux indicateurs correspondent à des moyennes pondérées calculées par relevé. Chaque espèce floristique dispose en effet d'une notation de son affinité hydrique et de son affinité trophique (valeurs d'Ellenberg). Ces valeurs sont ensuite pondérées par l'abondance respective de chaque espèce (considérée comme le pourcentage médian de chaque classe de recouvrement de Brau-Blanquet). Les valeurs d'Ellenberg considérées sont celles issues de la publication récente de Tichý et al. (2023), complétées pour les espèces manquantes par Julve (2015). (2) Au-delà d'une analyse basée sur ces deux indicateurs, une interprétation phytosociologique de chaque relevé (historique et récent) a été effectuée, de manière à étudier comment les relevés historiques ont évolué.

Résultats

La Figure 26 présente les évolutions de l'indice floristique d'engorgement calculé avec les relevés historiques et ceux reproduits en 2025. Il ressort de ces résultats que les pourtours du marais de Raphele, où se concentrent la plupart des relevés floristiques réalisés, présentent un abaissement quasi-généralisé et assez marqué de l'indice floristique d'engorgement (jusqu'à 3 points perdus sur la valeur de l'indicateur qui se situe entre 0 et 10). A l'est et au centre du marais, les valeurs semblent avoir légèrement augmentées, toutefois de manière très substantielle (<1). L'observation des résultats pour l'indice de fertilité du sol (Figure 27) ne révèle pas de patron uniforme sur le site, mais plutôt d'importants changements locaux dont la direction varie, parfois à très peu de distance. Ces évolutions sont possiblement plus à mettre en lien avec des changements d'habitats, pour lesquels les espèces structurantes sont associées à des valeurs d'indice d'Ellenberg différentes.

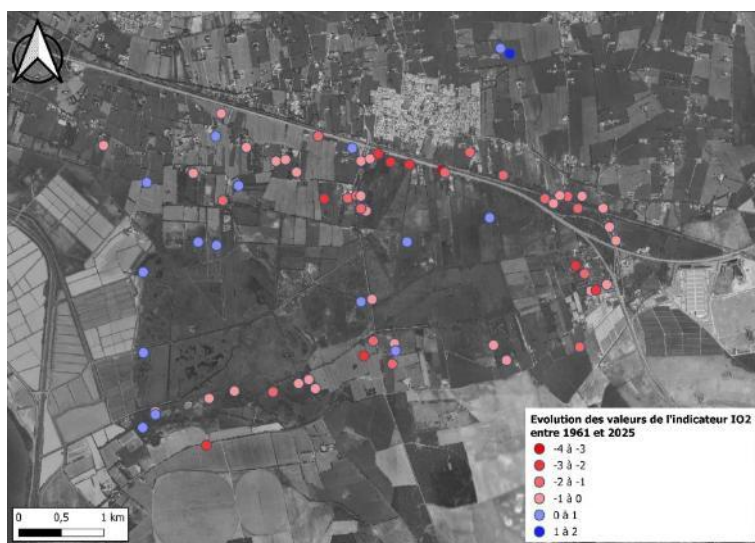


Figure 26 : Représentation de l'évolution de l'Indice floristique d'engorgement (I02)



Figure 27 : Représentation de l'évolution de l'Indice floristique de fertilité du sol (I06)

En effet, les changements d'habitat ont été nombreux lorsque l'on compare les rattachements phytosociologiques des relevés historiques et actuels (Figure 28). De manière générale, la tendance observée sur les végétations s'inscrit dans le même sens que les observations faites sur l'évolution de l'indice floristique d'engorgement, avec une régression des végétations de milieux humides, au profit de végétation mésophiles ou plus faiblement hygrophiles (forte régression des *Molinietalia caeruleae* et des *Magrocaricetalia* par exemple, au profits principalement des prairies de fauche (*Arrhenatheretalia elatioris*) et des peupleraies (*Populetalia albae*). Trois associations ont particulièrement régressé sur les relevés effectués, à savoir le *Loto pedunculati-Filipenduletalia ulmaritae*, le *Molinietalia caeruleae* et les Cladiaies (*Magrocaricetalia*).

Ces résultats permettent d'illustrer la direction principale des changements qui se sont opérées sur les végétations du marais de Raphele sur les 70 dernières années. Il est important cependant de conserver à l'esprit que seul un échantillon de relevé a été considéré (71 relevés), conditionné par la distribution historique des relevés, et qu'aucune conclusion sur la distribution de ces différentes végétations ne peut être formulée.

A noter qu'un travail complémentaire a été réalisé avec la prospection de secteur supplémentaire a été réalisé. Cela a notamment permis d'identifier un nouveau secteur de *Molinietalia caeruleae*, et a permis d'illustrer qu'au-delà des changements locaux, les compositions des principaux habitats ont également évolué sur l'ensemble du site. Ces éléments sont d'ailleurs illustrés par la régression de certaines espèces bien représentées historiquement, comme la pédiculaire des marais (*Pedicularis palustris*) aujourd'hui disparue, ou la molinie (*Molinia caerulea*). A l'inverse, une espèce comme le choin noirâtre (*Schoenus nigricans*) semble être aujourd'hui plus abondante sur le site qu'au début de la seconde moitié du XX^{ème} siècle.

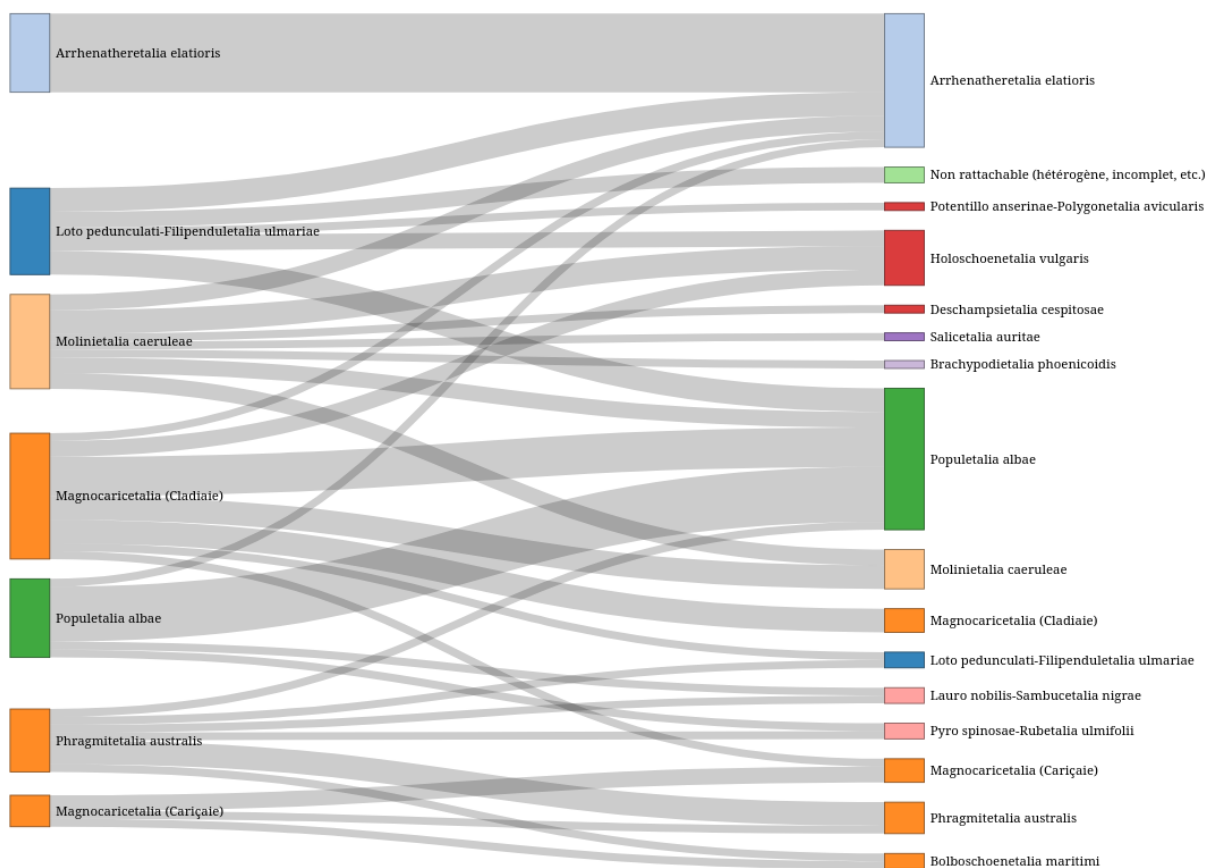


Figure 28 : Diagramme de sankey représentant les changements d'association phytosociologique de chaque couple de relevé (historique et récent) sur le marais de Raphele.

Contributions générales du projet et perspectives

L'étude présentée dans ce rapport est un important pas en avant dans la connaissance des tourbières du delta du Rhône, et du pourtour méditerranéen. Au-delà des connaissances produites, ce travail avait également pour ambition d'initier une dynamique territoriale autour de la thématique des tourbières. Pour cela, des actions communication ont été entreprises et sont détaillées dans cette section, afin de porter à connaissance ce sujet, à la fois localement, mais aussi nationalement, en ciblant des publics divers. Enfin, les implications des résultats produits en terme de conservation et de restauration sont discutées et les principales perspectives qui s'ouvrent sont détaillées.

Actions de communications menées dans le cadre du projet

Le projet a été l'occasion de porter à connaissance l'enjeux des tourbières pour le delta du Rhône, ainsi que de faire connaître à l'échelle nationale les tourbières du territoire. Dans le détail, les communications réalisées intégrant les résultats de ce projet sont les suivantes :

Communications à destination du grand public :

- Sortie le 1^{er} Juin 2025 dans le cadre du Festival de la Camargue : « Les marais de Raphèle : découverte d'une tourbière méditerranéenne », co-organisée avec les amis des marais du Vigueirat (Grégoire Massez).
- Production d'un flyer présentant les tourbières du delta du Rhône, disponible ici : <https://tourduvalat.org/wp-content/uploads/2026/01/Depliant-Tourbieres-web.pdf>
- Communication sur le site internet de la Tour du Valat : <https://tourduvalat.org/actualites-projets/les-tourbieres-du-delta-du-rhone-cartographiees-pour-la-premiere-fois/>



Sortie au marais de Raphèle dans le cadre du festival de la Camargue (1^{er} Juin 2025) – ©Elisa Fel



Illustration du flyer réalisé dans le cadre du projet

Au-delà du grand public, des actions de communication à destination d'un public plus spécialisé ont été réalisées :

Communications orales

- Journée d'initiation à la réalisation de sondage pédologique en tourbière réalisé le 26 novembre 2024 au marais de Raphele (15 personnes présentes)
- Séminaire réalisé par Violette Perret et Simin Galmiche à la tour du Valat le 4/08/2025 (séminaire)
- Présentation à diverses réunion (Comité de tronçon aval du Plan Rhône Saone, Comité de pilotage Natura 2000 (trois marais))
- Organisation d'une réunion de restitution du projet au marais de Raphele à destination des usagers des marais de Raphele et des partenaires du projet (25/11/2025).
- Présentation de Simon Galmiche lors des troisièmes rencontres des acteurs de la conservation de la flore méditerranéennes à Marseille le 4/12/2026.



Restitution organisée au marais de Raphele le
25/11/2025

Communications scientifiques écrites

En plus du présent rapport, d'autres publications intégrant des résultats produits dans le cadre de ce projet sont en cours d'élaboration :

- Participation à une publication nationale sur l'inventaire et l'état de dégradation des tourbières de France (projet de publication coordonné par Lise Pinault, article soumis).
- Participation à l'Atlas National des Tourbières de France, dont la publication est prévue dans le courant de l'année 2026 (rédaction d'un chapitre sur le delta du Rhône).
- Collaboration avec l'université de Lyon 2 et l'Université de Lausanne (Datations et analyse paléo-écologique) – publication scientifique à venir.
- Enfin, il est envisagé de rédiger une publication scientifique spécifique à l'étude des changements de végétation dans les marais de Raphele.

Implications pour la conservation et la restauration des tourbières

Ce projet, en compilant un ensemble de données existantes, et en apportant de nouvelles, permet de faire exister l'enjeu tourbières dans le delta du Rhône, mais également de faire connaître cet enjeu à plus large échelle. Ce travail, bien que préliminaire, permet déjà d'identifier des priorités pour des actions de conservation et de restauration localement, tout en conservant à l'esprit que le travail nécessiterait d'être prolongé et approfondi pour améliorer les connaissances sur la distribution et l'état des tourbières du delta du Rhône.

- Conservation

En terme de conservation, plusieurs enjeux se chevauchent, et ce travail n'apporte qu'une vision centrée sur la qualité physico-chimique de la tourbe, et de manière plus lacunaire sur la piézométrie. Sur la base de ces indicateurs, les secteurs de la dépression du Vigueirat et les marais du Capeau apparaissent comment bien préservés et comme des priorités de conservation, ces derniers n'étant que peu inclus dans des périmètres de protection, hormis l'exception notable de l'APPB du Tonkin, et l'intégration au PGEN de ce même secteur du Tonkin et des secteurs du Landre. Pour le marais du Capeau, un pH des tourbes nettement inférieur à tous les autres sites laisse entrevoir un possible originalité en terme de biodiversité, ce qui confère à ce site un intérêt majeur en terme de conservation, nécessitant des prospections ciblées sur ce territoire aujourd'hui mal connu. Le marais de Raphele est également à considérer comme une priorité de conservation, car malgré une dégradation (c.f. évolution de la flore sur le site, ou l'état des tourbes en surface), il s'agit du principal stock de carbone du delta du Rhône, dont la conservation est essentielle, et d'importantes surface d'habitats naturels d'intérêt persistes sur ce site.

Sur des surfaces nettement plus faibles, la tourbière du marais de Beauchamps ainsi que certains secteurs de roselière tourbeuse comme le marais d'Espeyran apparaissent aussi en état de conservation favorable.

Pour les tourbières de la dépression du Vigueirat, il est essentiel de rappeler que bien que l'état de conservation des tourbes soit favorable, l'entité géographique historique était nettement plus étendue. En effet, entre 500 et 1000 hectares ont été détruits lors de la construction du complexe industrialo-portuaire de Fos sur Mer (voir Figure 10 en section 1 à ce sujet)

Au-delà des indicateurs liés à la tourbe, les habitats naturels observés diffèrent entre les sites. Les roselières sont dominantes à Petit Badon, Espeyran, ainsi que sur la partie Nord-Ouest de la dépression du Vigueirat, tandis que les cladiaies, et plus ponctuellement les prairies humides méditerranéennes, occupent les sites de Beauchamps, Raphele, du Capeau, le reste de la dépression du Vigueirat et très localement la vallée des Baux (Cladiaie de Santa Fé). Ces différents habitats sont tous d'intérêt pour la conservation de la biodiversité. Le reste de la vallée des Baux comme le marais du Cougourlier et une petite partie du marais de Raphele correspondent à d'autres habitats nettement moins hygrophiles en raison d'un drainage important. A noter enfin que les prospections flore réalisées au marais de Raphele ont permis d'identifier des secteurs d'intérêt majeur pour la conservation, avec notamment des prairies à molinie jusqu'alors non connues.

- Restauration

Si les tourbières qui se trouvent sous les installations industrielles semblent perdues, d'autres secteurs offrent de réelles opportunités de restauration écologiques dans le delta du Rhône. Les tourbières qui se situent au sud du delta sont les mieux conservées (hors port de Fos), puis le niveau de dégradation augmente dans l'ensemble en remontant vers le nord. Ainsi, le marais de Raphele apparait comme dégradé, comme en témoigne notamment l'évolution de l'indicateur floristique d'engorgement sur les 70 dernières années (voir Figure 26 en section 3). Plus au Nord, la vallée des Baux est encore plus dégradée, avec des cultures sur tourbes actuelles ou passées, et un niveau de matière organique réduit jusqu'à 1 mètre de profondeur. Enfin, le marais du Cougourlier en Camargue gardoise, présente aussi un important niveau de dégradation (matière organique abaissée jusqu'à 75 cm de profondeur), avec des problématiques de salinisation spécifiques à ce site. Ces trois sites, bien que présentant des niveaux de dégradation différents, offrent des opportunités de restauration écologique majeures. Le marais du Cougourlier et un certain nombre de propriété de la vallée des Baux fonctionne par pompage, la topographie de ces sites étant aujourd'hui souvent abaissée, très probablement en raison de la subsidence liée au drainage de la tourbe, parfois sous le niveau de la

mer, les rendant dépendant de pratique de drainage par pompage. Ces contextes peuvent permettre une restauration facilitée, par la présence d'un outil de gestion des niveaux d'eau (pompe). Le marais de Raphèle quant à lui est uniquement drainé par fonctionnement gravitaire, sur une entité hydrologique d'envergure, ce qui peut complexifier les actions de restauration. Une compréhension du fonctionnement éco-hydrologique du site serait un plus afin d'identifier des secteurs ou des actions prioritaires pour la restauration du site.

Les objectifs fixés dans le Règlement européen pour la Restauration de la Nature sur la restauration des tourbières sont particulièrement ambitieux, et les résultats produits dans le cadre de ce rapport pourrait permettre d'aboutir à plusieurs projets de restauration ciblant les tourbières du territoire. Actuellement, un premier projet de restauration est d'ailleurs en cours d'élaboration dans la vallée des Baux, sur le domaine de Joyeuse garde.

Perspectives futures

Au-delà des perspectives de conservation et de restauration évoquées précédemment, et suite notamment aux actions de communication menées dans le cadre du projet, plusieurs pistes peuvent être envisagées pour prolonger et approfondir le travail initié :

- Poursuivre le travail d'inventaire et de caractérisation des sites réalisés en affinant les connaissances, en explorant notamment les secteurs n'ayant pu être visités (moitié ouest de la vallée des Baux, les grands marais rosiers de Camargue, les pourtours de l'étang des Aulnes, la plaine de Montmajour, certains secteurs de Camargue gardoise comme la roselière de Je-m'en-repens, ...). Au sein de l'île de Camargue, à la manière de la roselière de Petit Badon, d'autres petites roselières pourraient également présenter un faciès tourbeux. Au-delà de la Camargue, le territoire Méditerranéen présente des potentialités, à la manière des Cladiaies qui bordent l'étang de Salses dans les Pyrénées orientales, ou encore le secteur des sources d'Argens ou des sondages pédologiques ont révélé la présence de tourbe (Triat-Laval et Reille 1981).
- Les tourbières du delta du Rhône pourraient bénéficier d'un plan régional d'action Tourbières, bien que la Camargue se situe à cheval sur deux régions administratives. Cela permettrait de capitaliser sur la dynamique en cours, et de planifier les actions pour les années à venir. Cela pourrait aussi être un outil pour élargir l'acquisition de connaissance au pourtour méditerranéen dans son ensemble, comme suggéré précédemment.
- Localement, l'hydrologie est à explorer plus en détail, en particulier le lien avec la nappe de la Crau, au fonctionnement original. Les évolutions en cours et attendue des pratiques agricoles sur la plaine de la Crau laisse supposer d'importants changements dans les années à venir, dont les impacts sur les milieux tourbeux restent peu exploré, malgré un premier travail centré sur la conservation du caractère humide, mais sans prendre en compte les spécificité hydrologique nécessaire à la conservation d'un caractère tourbeux (Sicard et al. 2023).
- De nombreuses questions de recherche restent à explorer, dans des disciplines diverses, que ce soit en paléo-écologie ou en écologie par exemple. Les connaissances sur ces milieux naturels en contexte méditerranéen restent aujourd'hui particulièrement limitées.

Conclusion

Le projet de caractérisation des tourbières du delta du Rhône a permis de mettre en évidence **2 247 hectares de tourbières** sur le territoire, correspondant à un stock de carbone estimé entre **1,27 à 3,83 million de tonnes de carbone**. Ce travail a également permis d'identifier des priorités d'action pour la conservation et la restauration de ces écosystèmes localement. Ainsi, la dépression du Vigueirat et le marais de Raphèle sont les deux principaux stocks de carbone du territoire et sont à considérer comme des priorités de conservation. Dans une moindre mesure pour son stock de carbone, le marais du Capeau est aussi à considérer en priorité, en raison d'un état de conservation favorable et d'une originalité importante pour la région (tourbes à pH légèrement acide). Trois sites se détachent comme cibles prioritaires pour la restauration d'écosystèmes tourbeux, le marais du Cougourlier, la vallée des Baux et le marais de Raphèle. D'autres sites de petites tailles ont pu être identifiés mais le travail est loin d'être exhaustif devant l'étendue de la zone d'étude.

Ce travail permet aujourd'hui de faire exister l'enjeu des tourbières dans le delta du Rhône, comme à l'échelle nationale, en alimentant des bases de données françaises. Ce projet illustre que le territoire méditerranéen n'est non seulement pas exempt de tourbière, mais qu'il peut accueillir des systèmes particulièrement conséquents, dont certains en bon état de conservation. Le travail ainsi réalisé ouvre la voie à de nombreuses perspectives de recherche, comme d'actions concrètes.

Références

- Anastasiou, Evgenia, Yoann Doignon, Dimitrios Karkanis, Jean-Francois Léger, Alain Parant, et Salah Eddine Sahraoui. 2020. *Tendances et perspectives démographiques en Méditerranée*. Plan Bleu pour l'environnement et le développement en Méditerranée.
- Baize, D. (coord), M. C. (coord). Girard, Alain Gérard (collab). Beaudou, et Roland (collab). Poss. 2009. *Référentiel pédologique 2008*. In https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers15-05/010063397.pdf. <https://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:010063397>.
- Ben Tiba, Béchir, et Maurice Reille. 1982. « Recherches pollenanalytiques dans les montagnes de Kroumirie (Tunisie septentrionale): premiers résultats ». *Ecologia Mediterranea* 8 (4): 75-86. <https://doi.org/10.3406/ecmed.1982.1004>.
- Boiteux, Hugues. 2014. *Méthodologie d'estimation du stock de carbone emmagasiné dans les tourbières de Franche-Comté*. FCEN – Pôle Relais Tourbières -.
- Bonn, Aletta, Tim Allott, et Martin Evans. 2016. *Peatland Restoration and Ecosystem Services: Science, Policy and Practice*. Cambridge University Press.
- Bruneton, Hélène, Mireille Provansal, Philippe Leveau, et Maurice Jorda. 1998. « Le marais des Baux archéologie et paléoenvironnements ». *Méditerranée* 90 (4): 31-40. <https://doi.org/10.3406/medit.1998.3073>.
- Calamand, Claude. 1961. *Etude écologique et floristique des marais de Raphele*. Faculté des sciences de Marseille, Laboratoire de biologie végétale.
- Channell, Rob, et Mark V. Lomolino. 2000. « Trajectories to Extinction: Spatial Dynamics of the Contraction of Geographical Ranges ». *Journal of Biogeography* 27 (1): 169-79.
- Christanis, Kimon. 2016. « The Philippi Peatland (Greece) ». In *The Wetland Book*, édité par C. Max Finlayson, G. Randy Milton, R. Crawford Prentice, et Nick C. Davidson. Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-007-6173-5_147-1.
- Clément, H., S. Gaucherand, G. Gayet, et al. 2023. *HYDRINDIC – Suivi et évaluation de la restauration/création de zones humides avec un indicateur hydrologique – version 1*. INRAE – OFB.
- Concheri, Giuseppe, Piergiorgio Stevanato, Claudio Zaccone, et al. 2017. « Rapid Peat Accumulation Favours the Occurrence of Both Fen and Bog Microbial Communities within a Mediterranean, Free-Floating Peat Island ». *Scientific Reports* 7 (1): 8511. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-08662-y>.
- Dellery, B., L. Damiani, G. Juncy, et G. Toro. 1987. *Etude sommaire des possibilités d'un gisement de tourbe dans les marais de Meyranne et des Chanoines Commune d'Arles (Bouches-du-Rhône)*. 87 SGN 179 PAC.
- Eisemann, Lea. 2021. *Submission under the United Nations Framework Convention on Climate Change and the Kyoto Protocol 2021*. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/submission-under-the-united-nations-framework-6>.

- Eulry, M. 1983. *Recherches de gisements de tourbes en Languedoc-Roussillon - Sitologie et données économiques - Etude de quatre tourbières du plateau d'aubrac (Lozère)*. 83 SGN 851 LRO.
- Fonseca, André, João Santos, Luís Pádua, et Mário Santos. 2023. « Unveiling the future of relict Mediterranean mountain peatlands by integrating the potential response of ecological indicators with environmental suitability assessments ». *Ecological Indicators* 157 (décembre): 111206. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.111206>.
- Fraser, C. J. D., N. T. Roulet, et M. Lafleur. 2001. « Groundwater flow patterns in a large peatland ». *Journal of Hydrology* 246 (1): 142-54. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(01\)00362-6](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00362-6).
- Giudicelli, J., Z. Moubayed, et J. N. Tourenq. 1980. « Un biotope hydrobiologique remarquable : Les laurons de la Crau (Bouches-du-Rhône, France). La communauté animale et ses relations avec le peuplement des biotopes aquatiques voisins ». *Annales de Limnologie* 16 (3): 271-97. <https://doi.org/10.1051/limn/1980002>.
- Hammerich, Jenny, Corinna Schulz, Robert Probst, Thomas Lüdicke, et Vera Luthardt. 2024. « Carbon content and other soil properties of near-surface peats before and after peatland restoration ». *PeerJ* 12 (avril): e17113. <https://doi.org/10.7717/peerj.17113>.
- Hemery, Elodie. 2023. *Caractérisation de la dégradation des tourbes alcalines des vallées de l'Authie et de la Somme*. Conservatoire d'Espaces Naturels des Hauts de France et Université de Picardie Jules Verne.
- Hingray, Thibault. 2025. « Contribution à la cartographie des tourbières acides du massif des Vosges (France) : une avancée significative vers une carte exhaustive des zones tourbeuses actuelles du massif ». *Sciences Eaux & Territoires*, n° 48 (septembre): 9146-9146. <https://doi.org/10.20870/Revue-SET.2025.48.9146>.
- Holden, J., P. J. Chapman, S. N. Lane, et C. Brookes. 2006. « Chapter 22 Impacts of artificial drainage of peatlands on runoff production and water quality ». In *Developments in Earth Surface Processes*, édité par I. P. Martini, A. Martínez Cortizas, et W. Chesworth, vol. 9. Peatlands. Elsevier. [https://doi.org/10.1016/S0928-2025\(06\)09022-5](https://doi.org/10.1016/S0928-2025(06)09022-5).
- HYDRIAD, Eau & Environnement. 2015. *Elaboration de la demande d'autorisation unique au titre du code de l'environnement pour la construction de la station d'épuration de Saint Gilles. Phase 1*. Nîmes Métropole - Service Assainissement.
- Iglesias, Ana, Luis Garrote, Francisco Flores, et Marta Moneo. 2007. « Challenges to Manage the Risk of Water Scarcity and Climate Change in the Mediterranean ». *Water Resources Management* 21 (5): 775-88. <https://doi.org/10.1007/s11269-006-9111-6>.
- Janowiak, M., W. J. Connelly, K. Dante-Wood, et al. 2017. « Considering Forest and Grassland Carbon in Land Management ». *General Technical Report, Washington Office* 95. <https://doi.org/10.2737/WO-GTR-95>.
- Joosten, Hans. 2016. « Peatlands across the globe ». In *Peatland Restoration and Ecosystem Services: Science, Policy and Practice*. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139177788.003>.
- Joosten, Hans, et Donal Clarke. 2002. *Wise use of mires: Background and principles*. International Mire Conservation Group and International Peat Society.

- Joosten, Hans, Franziska Tanneberger, et Asbjorn Moen. 2017. *Mires and Peatlands of Europe*. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung.
https://www.schweizerbart.de/publications/detail/isbn/9783510653836/Joosten_Tanneberger_Moen_Mires_and_peat.
- Julve, Philippe. 2015. « Index botanique, écologique et chorologique de la Flore de France ». <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3561.5601>.
- Kechavarzi, C., Q. Dawson, et P. B. Leeds-Harrison. 2010. « Physical properties of low-lying agricultural peat soils in England ». *Geoderma* 154 (3): 196-202.
<https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.08.018>.
- Kruskal, William H., et W. Allen Wallis. 1952. « Use of Ranks in One-Criterion Variance Analysis ». *Journal of the American Statistical Association* 47 (260): 583-621.
<https://doi.org/10.1080/01621459.1952.10483441>.
- Lebrun, Jérémy, Lilian Car, et Marie Heraude. 2020. *Inventaire et cartographie des tourbières des Hauts-de-France, Rapport méthodologique*. Conservatoire d'Espaces Naturels des Hauts de France, Agence de l'Eau Artois-Picardie (AEAP), Agence de l'Eau Seine-Normandie (AESN), DREAL Hauts-de-France.
- Leveau, Philippe. 2017. « Milieux humides et sociétés en Provence littorale à l'époque romaine. Un essai d'écologie historique ». *Provence Historique « Etangs, marais et deltas en Provence »* t. LXVII (fasc. 262).
- Marescaux, Quentin, Jérémy Lebrun, et Guillaume Gaudin. 2021. *Plan régional d'actions en faveur des tourbières des Hauts-de-France*. Conservatoire d'espaces naturels des Hauts-de-France, Agence de l'Eau Artois-Picardie, Agence de l'Eau Seine-Normandie, DREAL Hauts-de-France.
- Martínez-Eixarch, Maite, Pere Masqué, Anna Lafratta, et al. 2024. « Assessing methane emissions and soil carbon stocks in the Camargue coastal wetlands: Management implications for climate change regulation ». *Science of The Total Environment* 950 (novembre): 175224.
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.175224>.
- Milano, Filippo, Paolo Pantini, Riccardo Cavalcante, et Marco Isaia. 2018. « Notes on the Italian Distribution of Dolomedes Plantarius (Clerck, 1757), Species Assessed for the IUCN Red List (Araneae: Pisauridae) ». *Fragmenta Entomologica* 50 (1): 69-74.
<https://doi.org/10.13133/2284-4880/285>.
- Molinier, René, Pierre Quezel, et Gabriel Tallon. 1964. « Note sur le Liparis Loeseli (L.) Rich. du marais de Raphèle (B.-du-Rh.) ». *Bulletin de la Société Botanique de France* 111 (7-8): 368-73.
<https://doi.org/10.1080/00378941.1964.10835485>.
- Molinier, René, et Gabriel Tallon. 1951. « La flore de la Crau (Bouches-du-Rhône) Historique et acquisitions récentes ». *Bulletin de la Société Botanique de France* 98 (sup1): 95-116.
<https://doi.org/10.1080/00378941.1951.10839827>.
- Parish, F., A. Sirin, D. Charman, Hans Joosten, T. Minaeva, et M. Silvius. 2008. *Assessment on peatlands, biodiversity and climate change*. Global Environment Centre, Kuala Lumpur and Wetlands International Wageningen.

- Payne, Richard. 2016. « Peatlands of the Mediterranean Region ». In *The Wetland Book*, édité par C. Max Finlayson, G. Randy Milton, R. Crawford Prentice, et Nick C. Davidson. Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-007-6173-5_111-2.
- Pinault, Lise. 2025. « Contribution des tourbières françaises à l'objectif national de neutralité carbone d'ici à 2050 ». n° 2025PAST2005. Theses, Université Marie et Louis Pasteur. <https://theses.hal.science/tel-05158488>.
- Pinault, Lise, Malo Pilloix, Gregory Bernard, et al. 2023. « The 1949 Atlas of French Peat Deposits, a Starting Point for a National Inventory of Peatlands ». *Soil Use and Management* 39 (3): 1040-56. <https://doi.org/10.1111/sum.12919>.
- Provan, Jim, et Christine A. Maggs. 2011. « Unique genetic variation at a species' rear edge is under threat from global climate change ». *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* 279 (1726): 39-47. <https://doi.org/10.1098/rspb.2011.0536>.
- Qi, Ji, Sophia Weigt, Miaorun Wang, et al. 2025. « Hydro-physical and carbon properties of peat across peatland types and climate zones ». *Geoderma* 461 (septembre): 117480. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2025.117480>.
- Roßkopf, Niko, Holger Fell, et Jutta Zeitz. 2015. « Organic Soils in Germany, Their Distribution and Carbon Stocks ». *CATENA* 133 (octobre): 157-70. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.05.004>.
- Scharlemann, Jörn PW, Edmund VJ Tanner, Roland Hiederer, et Valerie Kapos. 2014. « Global soil carbon: understanding and managing the largest terrestrial carbon pool ». *Carbon Management* 5 (1): 81-91. <https://doi.org/10.4155/cmt.13.77>.
- Schulz, C., R. Meier-Uhlherr, V. Luthardt, et H. Joosten. 2019. « A Toolkit for Field Identification and Ecohydrological Interpretation of Peatland Deposits in Germany ». *Mires and Peat*, n° 24 (novembre): 1-20. <https://doi.org/10.19189/MaP.2019.OMB.StA.1817>.
- Service de l'observation et des statistiques. 2013. *Fiches descriptives des massifs à tourbières de France métropolitaine*.
- Sicard, Ninon, Thomas Legay, Jérémy Cuvelier, Pascal Fenart, Hervé Gomila, et Sébastien Chazot. 2023. *Etude des besoins d'alimentation en eau des zones humides de la Crau (OSMOSE 2) - rapport final*. No. A00772.
- Sinclair, Amanda L., Laura L. B. Graham, Erianto I. Putra, et al. 2020. « Effects of distance from canal and degradation history on peat bulk density in a degraded tropical peatland ». *Science of The Total Environment* 699 (janvier): 134199. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134199>.
- Tanneberger, Franziska, Friedrich Birr, John Couwenberg, et al. 2022. « Saving Soil Carbon, Greenhouse Gas Emissions, Biodiversity and the Economy: Paludiculture as Sustainable Land Use Option in German Fen Peatlands ». *Regional Environmental Change* 22 (2): 69. <https://doi.org/10.1007/s10113-022-01900-8>.
- Thornton, Daniel H., Aaron J. Wirsing, Carlos Lopez-Gonzalez, et al. 2018. « Asymmetric Cross-Border Protection of Peripheral Transboundary Species ». *Conservation Letters* 11 (3): e12430. <https://doi.org/10.1111/conl.12430>.

- Tichý, Lubomír, Irena Axmanová, Jürgen Dengler, et al. 2023. « Ellenberg-Type Indicator Values for European Vascular Plant Species ». *Journal of Vegetation Science* 34 (1): e13168. <https://doi.org/10.1111/jvs.13168>.
- Triat-Laval, Hélène. 1975. « L'analyse pollinique de la tourbière de Fos-sur-Mer (B. du Rh.) ». *Ecologia Mediterranea* 1 (1): 109-21. <https://doi.org/10.3406/ecmed.1975.914>.
- Triat-Laval, Hélène. 1979. « Contribution pollenanalytique a l'histoire tardi et postglaciaire de la végétation de la basse valle du Rhône ».
- Triat-Laval, Hélène, et Maurice Reille. 1981. « Analyse pollinique d'une séquence tourbeuse de Provence orientale (Seillons-Source d'Argens, Var, France) ». *Ecologia Mediterranea* 7 (2): 31-37. <https://doi.org/10.3406/ecmed.1981.993>.
- Wang, Xiaoyue, Steven Siciliano, Bobbi Helgason, et Angela Bedard-Haughn. 2017. « Responses of a mountain peatland to increasing temperature: A microcosm study of greenhouse gas emissions and microbial community dynamics ». *Soil Biology and Biochemistry* 110 (juillet): 22-33. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2017.02.013>.
- Wittnebel, Mareille, Bärbel Tiemeyer, et Ullrich Dettmann. 2021. « Peat and Other Organic Soils under Agricultural Use in Germany: Properties and Challenges for Classification ». *Mires and Peat* 27 (19): 24. <https://doi.org/10.19189/MAP.2020.SJ.STA.2093>.
- Word, Clayton S., Daniel L. McLaughlin, Brian D. Strahm, et al. 2022. « Peatland Drainage Alters Soil Structure and Water Retention Properties: Implications for Ecosystem Function and Management ». *Hydrological Processes* 36 (3): e14533. <https://doi.org/10.1002/hyp.14533>.
- Yu, Zicheng, Julie Loisel, Daniel P. Brosseau, David W. Beilman, et Stephanie J. Hunt. 2010. « Global Peatland Dynamics since the Last Glacial Maximum ». *Geophysical Research Letters* 37 (13). <https://doi.org/10.1029/2010GL043584>.