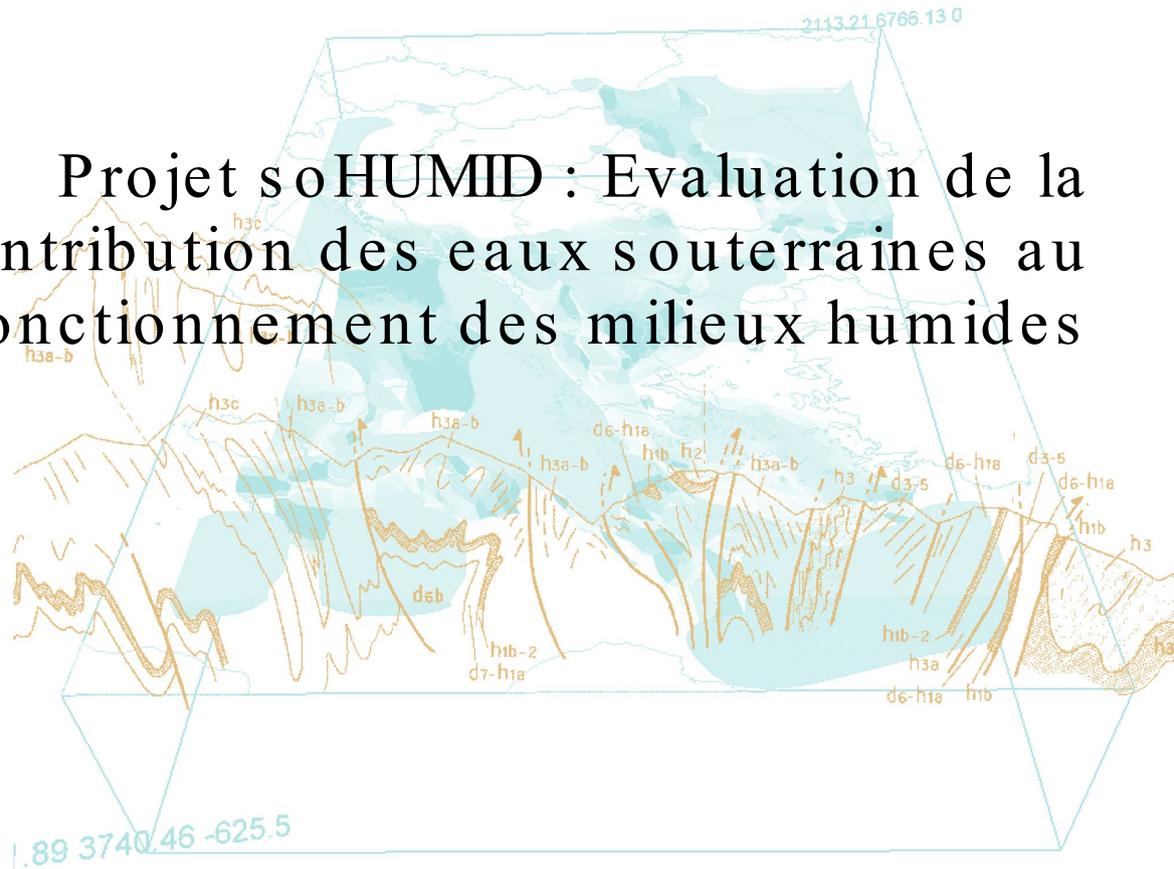




Projet soHUMID : Evaluation de la contribution des eaux souterraines au fonctionnement des milieux humides



Rapport final

BRGM/RP-70676-FR

Mars 2021



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Projet s0HUMID : Evaluation de la contribution des eaux souterraines au fonctionnement des milieux humides

Approche exploratoire associant écologie, pédologie et hydrogéologie

BRGM/RP-70676-FR
Mars 2021

Etude réalisée dans le cadre de l'AMI OFB 2017
« Besoins de développements en appui à la surveillance et à l'évaluation de l'état des eaux et des milieux aquatiques »

AUTERIVES C., VEIRMAN A., PERCHERON T., BASILIEN J.B.

Vérificateur :

Nom : Laurence Gourcy
Fonction : responsable unité EVE
Date : 18 mars 2021

Signature : 

Approbateur :

Nom : Francis Garrido
Fonction Directeur adjoint DEPA
Date : 16/07/2021

Signature : 

Le système de management de la qualité et de l'environnement est certifié par AFNOR selon les normes ISO 9001 et ISO 14001.
Contact : qualite@brgm.fr



Mots-clés : Zone humide; Ecologie; Pédologie; Hydrogéologie; Interaction eau souterraine – eau de surface ; Ecosystèmes terrestres ; Directive Cadre Eau.

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

Auterives C., Veirman A., Percheron T., Basilien J.B. (2021) – Projet soHUMID : Evaluation de la contribution des eaux souterraines au fonctionnement des milieux humides. Approche exploratoire associant écologie, pédologie et hydrogéologie. Rapport final. BRGM/RP-70676-FR, p., 76 ill., 7 tabl.

Synthèse

Le projet soHUMID est un projet de recherche cofinancé par l'Office français de la biodiversité (OFB, anciennement AFB), ECOMED, GEONORD et le BRGM, piloté par le BRGM et comportant comme autre partenaire le Conservatoire d'espaces naturels Nord-Pas-de-Calais, les Marais de Sacy et le syndicat Mixte Baie de Somme Grand Littoral Picard. Il vise à construire une méthode d'évaluation de la contribution des eaux souterraines au fonctionnement des zones humides. Il réunit écologues, pédologues et hydrogéologues autour d'un même objet d'étude - les milieux humides :

(1) pour mettre en évidence les relations eau – sol – plante au sein de ces écosystèmes complexes, et plus précisément les relations eau souterraine – sol – plante ;

(2) pour identifier des indicateurs et construire une méthode, une démarche d'évaluation de la contribution des eaux souterraines au bon état quantitatif des zones humides.

Une première étape a été la recherche de sites pilotes répondant à deux critères (1) une relation eau souterraine – eau de surface avérée, (2) une disponibilité des données suffisantes en écologie, pédologie et hydrogéologie pour permettre une démarche exploratoire combinant ces trois thématiques. Cette première phase du projet a fait l'objet d'un rapport publié en 2019 (Auterives *et al.*, 2019).

Initialement, une quinzaine de sites pilotes ont été identifiés pour répondre aux objectifs du projet soHUMID. Cependant, au fur à mesure des investigations, l'identification, la collecte et le traitement des données se sont révélées très chronophages et peu effectif. Les ambitions du projet ont été, en accord avec l'OFB, recentrées sur 5 sites pilotes, à savoir :

- La lagune de Paulin, dans les Landes;
- Les marais de la Maye, dans la baie de Somme;
- Les marais de Sacy, dans l'Oise;
- Les marais de Meyranne et des Chanoines, dans les Bouches-du-Rhône;
- Le site de l'Ill Wald en Alsace.

Les investigations écologiques, pédologiques et hydrogéologiques ont été menées à partir des données disponibles et transmises par les différents gestionnaires de milieux humides.

Cette étude a montré que chaque site est un cas d'étude spécifique en termes de fonctionnement hydrogéologique ce qui rend difficile la construction d'indicateurs communs à tous les milieux humides. Elle a aussi mis en évidence la grande diversité, disparité et hétérogénéité des données et de leur bancarisation.

La principale limite dans l'étude des sites est l'absence de réelle étude pédologique. Dans les données servant à expliquer le fonctionnement d'un territoire, on y retrouve la géologie, l'hydrogéologie, l'hydrologie et l'écologie. Une rapide approche pédologique peut être parfois initiée mais souvent sur la base du contexte géologique. Il est rare que des investigations aient été menées sur cette discipline, c'est-à-dire en tant qu'étude à part entière visant à compléter les connaissances du site d'un volet dédié aux sols.

La précision de la donnée relevée peut permettre tout un spectre d'expertise. Un simple relevé du niveau d'hydromorphie apporte en soi une information utile, dont la variabilité spatiale peut même être cartographiée. La notion de texture du sol apporte des informations sur d'autres

points, comme par exemple la dynamique de l'eau dans le sol au travers de la notion de perméabilité. Une description très poussée permet d'éclairer sur les conditions de pédogenèse du sol, et peut apporter des précisions sur le fonctionnement hydraulique d'un site, ou venir conforter d'autres expertises d'autres disciplines menées parallèlement.

Les données en écologie récoltées sur les sites sélectionnés dans le cadre de ce projet se présentent sous différentes formes : élaborées¹, cartographiques² et brutes³. Les données brutes, étant celles les plus adaptées à la réalisation d'analyse scientifique, sont les plus manquantes pour trois des quatre sites sélectionnés. Les données élaborées et brutes sont quant à elles relativement bien documentées pour l'ensemble des sites excepté les marais de Meyranne-Chanoine. Globalement les données qui sont utilisées dans le cadre de ce projet paraissent donc hétérogènes selon les formes de données et également selon les sites.

A travers l'étude de quelques sites pilotes, la faisabilité de la démarche d'évaluation de la contribution des eaux souterraines a été testée et a permis de mettre en évidence les données nécessaires pour répondre à la question du lien avec les eaux souterraines et d'identifier les suivis à mettre en place ainsi que les protocoles d'acquisition recommandés.

Ces travaux ont permis de mettre en évidence les relations eau souterraine – sol - plante au sein des milieux humides. Il est possible à partir de la végétation d'identifier des zones, à l'échelle du site, plus ou moins en interaction avec les eaux souterraines. Il est possible d'identifier des seuils de gestion des masses d'eau souterraine à partir de résultats de calculs de corrélation croisée entre chroniques piézométriques du milieu humide et chroniques piézométriques de la masse d'eau souterraine avec laquelle le milieu est en interaction. Il est possible de mettre en relation l'évolution des conditions hydrogéologiques avec l'évolution des conditions pédologiques ou l'évolution des habitats ou des espèces.

¹ Exemple de données élaborées : Documents d'Objectifs Natura 2000 des « Marais de Sacy » (Mosaïque environnement, 2005)

² Exemple de données cartographiques : fichiers SIG (shape file) de l'occupation du sol, des habitats terrestres et aquatiques des marais de Sacy

³ Exemple de données brutes : les données des relevés phytosociologiques de 2013 et 2019 de la lagune de Paulin

Sommaire

1. Présentation du projet soHUMID.....	13
2. Les eaux souterraines dans les milieux humides.....	15
3. Choix des sites pilotes.....	17
4. Baie de Somme, le marais de la Maye.....	19
4.1. GEOLOGIE.....	21
4.2. HYDROGEOLOGIE.....	22
4.2.1. Masse d'eau souterraine.....	22
4.2.2. Interaction eau de surface – eau souterraine.....	26
4.2.3. Inondation du marais de la Maye.....	29
4.2.4. Exploitation des eaux souterraines.....	30
4.3. ECOLOGIE.....	31
4.3.1. Approche qualitative.....	32
4.3.2. Approche quantitative.....	39
4.4. CONCLUSION.....	40
5. La lagune de Paulin.....	43
5.1. HYDROGEOLOGIE.....	43
5.1.1. Masse d'eau souterraine.....	46
5.1.2. Historique.....	49
5.2. ECOLOGIE.....	50
5.2.1. Approche qualitative.....	50
5.2.2. Approche quantitative.....	51
5.3. PEDOLOGIE.....	52
5.4. INDICE FLORISTIQUE ET BATTEMENT DE LA NAPPE.....	53
5.5. CONCLUSION.....	57
6. Les marais de Sacy-le-Grand.....	59
6.1. GEOLOGIE.....	60
6.2. FONCTIONNEMENT HYDRAULIQUE.....	62
6.3. HYDROGEOLOGIE.....	62

6.3.1. Les nappes d'eau souterraine	62
6.3.2. Prélèvement en eau souterraine.....	64
6.3.3. Interaction eau souterraine et Marais de Sacy.....	65
6.3.4. Conclusion	75
6.4. ECOLOGIE.....	76
6.4.1. Approche qualitative	76
6.4.2. Approche quantitative.....	82
6.5. PEDOLOGIE	83
6.6. RELATION EAU – SOL – PLANTE.....	89
7. Les marais de Meyranne et Chanoines	91
7.1. GEOLOGIE	92
7.2. HYDROGEOLOGIE.....	93
7.3. ECOLOGIE.....	98
7.3.1. Approche qualitative	98
7.3.2. Approche quantitative.....	101
7.4. CONCLUSION.....	101
8. Ill Wald, un site de référence en pédologie	103
8.1. LE(S) SITE(S) REFERENT(S) EN PEDOLOGIE	103
8.2. ILL WALD.....	103
8.2.1. Description du site.....	103
8.2.2. Pédologie	104
8.3. CONCLUSION : DEFINIR LA PLACE DE LA PEDOLOGIE.....	108
8.3.1. Interaction avec les habitats et la végétation	108
8.3.2. Interaction avec les eaux souterraines.....	109
8.3.3. Interactions croisées.....	109
8.3.4. Vers une compréhension pédologique des sites humides	110
9. Discussion.....	111
9.1. BILAN SUR LES DONNEES COLLECTEES	111
9.1.1. Hydrogéologie	111
9.1.2. Le volet pédologie, parent pauvre de la collecte de données.....	112
9.1.3. Ecologie	113
9.2. LE PROTOCOL IDEAL.....	116
9.2.1. Hydrogéologie	116
9.2.2. Pédologie	117

9.3. HABITATS, ESPECES ET EAUX SOUTERRAINES.....	123
9.3.1. Des espèces inféodées aux eaux souterraines	123
9.3.2. Des habitats inféodés aux eaux souterraines.....	124
9.4. POSSIBILITE D'UTILISATION DES INDICATEURS RHOMEO	128
9.4.1. Piézométrie – Indicateur I03	128
9.4.2. Pédologie – Indicateur I01	129
9.4.3. Flore – Indicateur I02	130
9.5. CLASSIFICATION DES ZONES HUMIDES : SYSTEMES HYDROGEOMORPHOLOGIQUES.....	130
9.6. INFLUENCE DES PRELEVEMENTS.....	136
10. Conclusions et perspectives	139
11. Bibliographie	141

Liste des figures

Illustration 1. Localisation des 15 sites pilotes identifiés (Auterives et al., 2019).....	18
Illustration 2. Marais arrières-littoraux picards (https://www.baiedesomme.org/themes/2236-1002-ramsar).....	19
Illustration 3. Marais arrière-littoraux picards (1 800 ha), découpage en 15 unités (Bault et al., 2019)	20
Illustration 4. Carte simplifiée de la Picardie crayeuse (Roux et al., 2006).....	21
Illustration 5. Schéma des relations entre les eaux souterraines et les zones humides de la vallée de la Maye (Bault et al., 2019).....	23
Illustration 6. Comparaison des délimitations des référentiels des masses d'eau souterraine (niveau 1, rapportage 2016 et horizon 1, état des lieux 2019) autour des marais arrières littoraux picards : craie de la vallée de la somme aval (FRAG011 – FRAG311) et craie de la vallée de l'Authie (FRAG009 – FRAG309)	24
Illustration 7. Piézomètres et stations hydrologiques autour des marais arrières littoraux picards	25
Illustration 8. Suivi piézométrique de la nappe de la craie autour des marais arrière littoraux picards (source ADES, période 1998-2020).....	26
Illustration 9. Chroniques piézométriques à Arry de la nappe de la craie et des alluvions (Bault et al., 2019).....	27
Illustration 10. Instrumentation autour de l'unité de gestion de la vallée de la Maye.....	28
Illustration 11. Variations piézométriques dans la nappe de la craie (00238X0037/F, en haut) et dans le marais (BSS003SOPQ, au milieu) et coefficient de corrélation croisée entre les deux signaux (en bas)	29
Illustration 12. Chroniques piézométriques à Arry de la nappe de la craie et des alluvions, et des débits de la Maye depuis 2016 (Bault et al., 2019) jusqu'à avril 2019	30

Illustration 13. Piézomètre Arry (marais de la Maye) et nappe de la craie (Bault et al., 2019, données Iduna environnement et BRGM)	31
Illustration 14. Cartographie des habitats naturels des Prés de l'Etang (Marais de la Maye) en 2016 (Blondel et Coulombel, 2019)	35
Illustration 15. Cartographie des habitats naturels du marais de Bernay en 2016 (Blondel et Coulombel, 2019).....	37
Illustration 16. Cartographie des habitats naturels du marais d'Arry en 2016 (Blondel et Coulombel, 2019)	38
Illustration 17. Représentativité (%) des grands types d'habitats dans les marais de la Maye ..	39
Illustration 18. Représentativité des habitats humides dans le marais de la Maye.....	40
Illustration 19. Chronoséquences d'une succession végétale sur un dépôt alluvial (Girel, 1997, 2018)	41
Illustration 20. Localisation de la lagune de Paulin (Crabos et al., 2013)	43
Illustration 21. Localisation de la lagune de Paulin et périmètre du SAGE Midouze	44
Illustration 22. Localisation des piézomètres de suivi des eaux souterraines dans la lagune de Paulin	45
Illustration 23. Piézomètres où le niveau de la nappe ne dépasse pas la cote du sol.....	45
Illustration 24. Piézomètres où le niveau de la nappe dépasse la cote du sol.....	46
Illustration 25. Localisation des 11 piézomètres de la masse d'eau souterraine FG046, les sables et calcaires plioquaternaires du bassin Midouze-Adour	47
Illustration 26. Coefficient de corrélation maximum des données piézométriques de la lagune et de la masse d'eau souterraine FG046.....	48
Illustration 27. Fluctuations piézométriques sur la période 2013-2020 de la nappe d'eau souterraine de la lagune et de la masse d'eau souterraine FG046 au droit du piézomètre 09257X0097/PZ	48
Illustration 28. Niveau piézométrique sur la période 2007-2020 du piézomètre 09257X0097/PZ (FG046).....	50
Illustration 29. Cartographie des habitats naturels (Crabos et al., 2013).....	51
Illustration 30. Représentativité (%) des habitats naturels de la lagune de Paulin en 2013	52
Illustration 31. Horizons superficiels de 5 sites de lagunes landaises (Corbier, 2015), l'horizon CERE01 correspond à la lagune de Paulin	53
Illustration 32. Relevé 1, lagune de Paulin, août 2012, indice floristique d'engorgement (He) = 8,27	54
Illustration 33. Relevé 2, lagune de Paulin, 22/09/2015, indice floristique d'engorgement (He) = 8,69	54
Illustration 34. Relevé 3, lagune de Paulin, 26/08/2019, indice floristique d'engorgement (He) = 8,34	55
Illustration 35. Relevé 4, gazon amphibie à <i>Eleocharis multicaulis</i> , 26/08/2019, indice floristique d'engorgement (He) = 9,2.....	55
Illustration 36. Relevé 4, gazon amphibie à <i>Agrostis canina</i> , 26/08/2019, indice floristique d'engorgement (He) = 9,33.....	55
Illustration 37. Localisation du marais de Sacy	59
Illustration 38. Coupe géologique des marais de Sacy et log stratigraphique (Gallois, 2011)....	60
Illustration 39. Coupe géologique des marais (SETEC-HYDRATEC et al., 2020 source BRGM)61	

Illustration 40. Référentiel hydrogéologique BDLISA (version 2, 2018, niveau 3) autour des Marais de Sacy	61
Illustration 41. Contexte hydrogéologique des marais de Sacy (STUCKY & ARMINES-CIG, 2000)	64
Illustration 42. Horizon 1 et 2 des masses d'eau souterraine (référentiel 2019) autour des marais de Sacy	64
Illustration 43. Champ captant de Liancourtois et piézomètres de la nappe de la Craie (SETEC-HYDRATEC et al., 2020)	65
Illustration 44. Fluctuations piézométriques des piézomètres BSS000HAUG (01045X0105/PZ_AL), BSS000HAUH (01045X0106/PZ_CR) et BSS000HAQN (01045X0015/S1), sur la période 1970-2020 (a) et 2012-2020 (b et c) (Graphiques et Données issues du portail https://ades.eaufrance.fr/)	67
Illustration 45. Variations piézométriques dans le marais par rapport au sol et à la cote 32,80 m NGF	68
Illustration 46. Niveaux de la nappe (SETEC-HYDRATEC et al., 2020).....	69
Illustration 47. Epaisseur des zones non saturées (ZNS), sept-octobre 2019 (SETEC-HYDRATEC et al, 2020)	70
Illustration 48. Carte piézométrique des basses eaux des Marais de Sacy, sept-octobre 2019 (SETEC-HYDRATEC et al., 2020).....	71
Illustration 49. Evolution de la charge hydraulique (cote piézométrique) des piézomètres de la craie en dehors des marais (01045X0015/S1, en haut) et dans les marais de Sacy (01045X0105/PZ_CR, au milieu), et calcul des coefficients de corrélation croisée entre les deux chroniques (en bas)	73
Illustration 50. Evolution de la charge hydraulique (cote piézométrique) du doublet de piézomètres dans les marais de Sacy : 01045X0105/PZ_AL (nappe des alluvions, en haut) et 01045X0106/PZ_CR (nappe de la craie, milieu) ; et résultats des calcul des coefficients de corrélation croisée (en bas)	74
Illustration 51. Evolution de la charge hydraulique (cote piézométrique) entre le piézomètre 01045X0015/S1 (nappe de la craie, en dehors du marais, en haut) et 01045X0105/PZ_AL (nappe des alluvions dans le marais, milieu), et coefficient de corrélation croisée entre les deux signaux (en bas)	75
Illustration 52. Occupation du sol des marais de Sacy-le-Grand (Mosaïque Environnement, 2005)	78
Illustration 53. Habitats d'intérêt communautaire terrestres observés en 2002 dans le marais de Sacy-le-Grand (Mosaïque Environnement, 2005)	80
Illustration 54. Habitats d'intérêt communautaire aquatiques sur les zones protégés, marais de Sacy-le-Grand (Mosaïque Environnement, 2005)	81
Illustration 55. Représentativité (en %) des surfaces occupées par les habitats d'intérêt communautaire	82
Illustration 56. Représentativité des horizons histiques (SETEC-HYDRATEC et al., 2020).....	85
Illustration 57. Carte des intercalations minérales (SETEC-HYDRATEC et al., 2020	86
Illustration 58 Epaisseur des horizons fibriques à mésiques dans les 70 premiers cm (SETEC-HYDRATEC et al., 2020)	87
Illustration 59. Localisation des marais de Meyranne et des Chanoines	91
Illustration 60. Carte des marais de Raphèle, milieux patrimoniaux et canaux principaux (Ros, 2016)	92
Illustration 61. Les eaux de la Durance au Messinien (Alcazar, 2011)	93

Illustration 62. Carte schématique du fonctionnement hydrogéologique de la nappe de Crau (Alcazar, 2011. Source : SYMCRAU)	95
Illustration 63. Coupe schématique d'un lauron, les flèches indiquent la circulation de l'eau de la nappe profonde dans les cailloutis (Giudicelli et al., 1980)	95
Illustration 64. Coupe schématique du fonctionnement des laurons (crédit Parc naturel régional de Camargue)	96
Illustration 65. Carte de localisation des différents points de mesure des travaux de Ros (2016)97	
Illustration 66. Carte piézométrique (juin 2016) dans le marais des Chanoines (Ros, 2016)	98
Illustration 67. Enjeux Natura 2000 sur les marais de Meyrannes-Chanoines (DOCOB 3 Marais – PNR de Camargue, sept. 2019).....	100
Illustration 68. Principaux types de sols de l'IIIWald (Oberti et Meny, 1992).....	105
Illustration 69. Distribution des types de sols de l'III Wald (a) et facteurs écologiques (b) discriminants les types de sols (Oberti et Meny, 1992)	106
Illustration 70. Extrait d'une fiche descriptive d'un type de station forestière de l'III Wald (Oberti et Meny, 1992)	107
Illustration 71. Classification des classes d'hydromorphie élaborées par le GEPPA (1981)	120
Illustration 72. Morphologie des sols correspondant à des zones humides (d'après classes d'hydromorphie du GEPPA, 1981).....	121
Illustration 73. Mécanismes d'alimentation en eau des zones humides alluviales (Vernoux et al., 2010)	132
Illustration 74. Mécanismes d'alimentation en eau des zones humides dépressionnaires (Vernoux et al., 2010)	133
Illustration 75. Mécanismes d'alimentation en eau des zones humides de pente (Vernoux, 2010)134	
Illustration 76. Mécanismes d'alimentation en eau des zones humides de plaine (Vernoux, 2010)	134
Illustration 77. Protocole de suivi recommandé dans les milieux humides pour répondre à la problématique de la contribution des eaux souterraines au fonctionnement des milieux humides	138

Liste des tableaux

Tableau 1. Piézomètres de la nappe de la craie (masses d'eau souterraine AG009 et AG011) localisés autour des marais arrière littoraux picards	25
Tableau 2. Habitats naturels présents au sein du marais de la Maye, données issues du plan de gestion 2019-2023 « Les marais de la Maye »	34
Tableau 3. Habitats naturels de la lagune de Paulin.....	51
Tableau 4. Surface (en ha et en %) des habitats naturels de la lagune de Paulin	52
Tableau 5. Liste des habitats d'intérêt communautaire des marais de Sacy	79
Tableau 6. Surface (en ha, en %) des habitats d'intérêt communautaire	82
Tableau 7 Caractéristique des horizons histiques (AFES, 2009, Gobat et al.,2010, SETEC-HYDRATEC et al., 2020)	84
Tableau 8. Habitats naturels des marais de Meyranne et des Chanoines.....	99

1. Présentation du projet soHUMID

Pour qu'une zone humide fonctionne, avant tout, il faut de l'eau. Cet aspect quantitatif est primordial pour le bon fonctionnement des zones humides. Si la contribution des eaux superficielles aux zones humides est souvent évidente et bien documentée, la contribution des eaux souterraines au fonctionnement des zones humides est insuffisamment étayée dans la littérature. Cette contribution est pourtant loin d'être négligeable et son étude permettrait de contribuer à la préservation des zones humides.

Le projet soHUMID a deux objectifs :

(1) Réunir écologues, pédologues et hydrogéologues autour d'un même objet : les milieux humides pour mettre en évidence les équilibres eau – sol – plante au sein de ces écosystèmes complexes.

Les zones humides sont des écosystèmes hydrologiquement complexes qui se développent le long d'un gradient hydrologique entre habitat terrestre et habitat aquatique (WFD CIS Guidance document n°12, 2003). Elles sont à l'interface entre eau souterraine et eau de surface. Elles sont définies et délimitées selon des critères relatifs aux sols ou à la végétation (arrêté du 24 juin 2008 de définition et délimitation des zones humides). Les zones humides sont des régions où l'eau est le principal facteur déterminant l'environnement et la vie végétale et animale associée. Et pourtant les études qui associent pédologie (sols), écologie (espèces et habitats) et hydrogéologie (eau souterraine) autour des milieux humides sont rares alors qu'il s'agit des éléments de base qui définissent la complexité de ces milieux.

(2) Construire une méthode d'évaluation de la contribution des eaux souterraines au fonctionnement des milieux humides. A travers l'étude de quelques sites pilotes, la faisabilité de la démarche a été testée et a permis de mettre en évidence les données nécessaires pour répondre à la question du lien avec les eaux souterraines et d'identifier les suivis à mettre en place ainsi que les protocoles d'acquisition recommandés.

Le projet soHUMID s'inscrit dans les objectifs de la Directive Cadre sur l'Eau (Directive 2000/60/CE) adoptée le 23 octobre 2000. Pour évaluer l'état des masses d'eau souterraine, la DCE impose de prendre en compte les écosystèmes terrestres dépendants des eaux souterraines. Pour être en bon état quantitatif, les prélèvements dans la masse d'eau souterraine ne doivent pas impacter le fonctionnement de l'écosystème dépendant. Les zones humides sont considérées comme des écosystèmes terrestres complexes à l'interface entre milieu aquatique et milieu terrestre (Auterives *et al.*, 2012).

La première phase clef du projet soHUMID a été d'identifier les sites pilotes sur lesquels les investigations méthodologiques ont pu être menées. Cinq sites pilotes ont été choisis :

- La lagune de Paulin, dans les Landes;
- Les marais de la Maye, dans la baie de Somme;
- Les marais de Sacy, dans l'Oise;
- Les marais de Meyranne et des Chanoines, dans les Bouches-du-Rhône;
- Le site de l'Ill Wald en Alsace.

Les investigations écologiques, pédologiques et hydrogéologiques ont été menées à partir des données disponibles et transmises par les différents gestionnaires de milieux humides. Ces données ont permis de mettre en évidence la relation eau souterraine – sol – plante au sein des

milieux humides. Cette analyse a conduit à identifier les données les plus pertinentes et les protocoles adaptés à l'acquisition de ces données dans le but de répondre à la question du lien eau souterraine – eau de surface dans le contexte des milieux humides.

2. Les eaux souterraines dans les milieux humides

L'hydrologie influence l'écologie, le fonctionnement et la persistance des zones humides (Hunt *et al.*, 1996). L'eau est le paramètre clef qui contrôle la flore, la faune et les cycles biogéochimiques. L'eau peut être d'origine météorique, de cours d'eau ou souterraine. Cette composante souterraine longtemps négligée peut représenter une part significative du bilan hydrologique (Krause et Bronstert, 2005).

Trois caractéristiques principales décrivent généralement les milieux humides :

- une surface libre à proximité de la surface du sol, ou au niveau de celle-ci voire au-dessus ;
- des sols caractérisés par des conditions réduites et une accumulation de matière organique ;
- et des communautés végétales adaptées aux conditions d'humidité spécifiques des milieux humides (Dalh *et al.*, 2007).

Et pourtant, malgré une littérature très riche sur les milieux humides, les travaux de recherche qui associent ces 3 volets « pédologie », « écologie » et hydrogéologie » des milieux humides sont rares.

Sans être exhaustif de la littérature existante, quelques études font le lien entre végétation et hydrogéologie. Pour la plupart des études, il s'agit d'identifier l'origine de l'eau à partir des espèces végétales présentes dans le milieu humide. Goslee *et al.* (1997) mettent en évidence le lien entre végétation et origine de l'eau dans la zone humide. Au total 28 zones humides de Pennsylvanie sont étudiées. Un premier groupe de zones humides a été utilisée pour identifier les espèces plus spécifiques à l'origine principale de l'eau comme *Nyssa sylvatica* très fortement associée à la présence d'eau souterraine. L'origine de l'eau est caractérisée selon trois catégories : l'eau souterraine, l'eau de surface saisonnière et l'eau de surface permanente. Le deuxième groupe de zones humides est utilisé pour éprouver la méthode. Ils identifient la catégorie hydrologique à partir de la végétation avec une exactitude de 72 %.

Munger *et al.* (2014) mènent des travaux pour identifier des espèces ou des associations d'espèces floristiques indicatrices de zones d'échanges tourbière-aquifère : (1) d'un apport de l'aquifère à la tourbière ; (2) de l'absence d'apport d'eau de l'aquifère ; (3) d'écoulements latéraux provenant de l'aquifère ; (4) d'écoulements latéraux provenant de la tourbière ; (5) et de zone de décharge et de recharge de l'aquifère.

Schleuß *et al.* (2002) font le lien entre hydrologie, pédologie et végétation dans trois tourbières allemandes. Les espèces végétales identifiées correspondent bien à un indicateur d'humidité d'Ellenberg⁴ moyen à élevé (7 à 9 : humidité moyenne, 10 à 12 : humidité élevée), en cohérence avec le niveau d'eau souterraine mesuré. Ici le niveau d'eau souterraine correspond aux fluctuations piézométriques mesurées directement dans la tourbière, on pourrait l'appeler la nappe de la tourbe voire l'aquiclude de la tourbe puisqu'il ne s'agit pas d'un réservoir aquifère au sens où on ne pourrait pas exploiter l'eau de ce réservoir. Ils mettent également en évidence le fait que l'origine de l'eau influence la composition des espèces végétales. En effet, la végétation change s'il s'agit d'eau de surface, d'eau météorique ou d'eau souterraine.

⁴ L'indice d'humidité édaphique (F) est évalué à partir du référentiel Ellenberg (Ellenberg, 1988 (première édition en 1974)) où chaque espèce végétale est associée à une valeur variant de 1 à 12.

Les travaux de Bufková *et al.* (2005) font le lien entre la végétation et la qualité des eaux souterraines. Par une méthode d'analyse multivariée des données de végétation de la plaine d'inondation de la rivière Vltava (Tchéquie, affluent de l'Elbe), ils montrent l'existence d'une corrélation significative entre la distribution de la végétation au sein de la plaine et le niveau moyen de la surface libre, la distance à la rivière, et la qualité (pH, teneurs en acides humiques) des eaux souterraines. En France, sur le site pilote des marais de Meyranne et des Chanoines (chapitre 7) d'une superficie de 1 310 ha, il est possible de distinguer, à l'échelle du site, des zones de dépendance variables (forte, partielle ou non significative) à la nappe d'eau souterraine (Baillieux *et al.*, 2019) à partir des habitats naturels et de la flore. Ils distinguent ainsi quatre situations éco-hydrologiques (1) des habitats humides fortement dépendants des eaux souterraines, (2) des habitats humides plus communs alimentés exclusivement par les eaux de surface, (3) des habitats humides alimentés par un mélange d'eau de surface et d'eau souterraine et (4) une absence d'habitats humides dans des secteurs de faible profondeur de la nappe.

La difficulté dans ces études est le concept même d'eau souterraine qui peut varier d'une étude à l'autre. Que représente le terme « eau souterraine » ou « groundwater » ?

Par définition, les eaux souterraines définissent toutes les eaux se trouvant sous la surface du sol. Dans les zones humides, il y a la nappe superficielle, ou nappe de surface, qui correspond aux eaux souterraines dans le sol et le sous-sol de la zone humide. Il ne s'agit pas d'un réservoir au sens d'aquifère mais de l'eau contenue sous la surface du sol délimitée à l'échelle de la zone humide.

Lorsque l'on fait référence à un écosystème terrestre dépendant des eaux souterraines dans le contexte de la DCE, il y a un changement d'échelle. Le milieu humide est alors en interaction avec des eaux souterraines en référence à la notion d'aquifère ou de nappe de plus grande extension et qui contribue à alimenter ou à drainer le milieu humide. Les milieux humides sont généralement d'une petite superficie (échelle de la centaine ou du millier d'hectares tout au plus). Le terme d'aquifère fait référence à la formation géologique contenant de façon temporaire ou permanente de l'eau et constituée de roches perméables et capable de la restituer naturellement et/ou par exploitation⁵. Une nappe souterraine est l'eau contenue dans les interstices et fissures du sous-sol⁶. Une masse d'eau souterraine est une notion introduite par la Directive Cadre sur l'Eau, il s'agit d'un volume d'eau distinct d'eau souterraine à l'intérieur d'un ou plusieurs aquifères, constituant le découpage élémentaire des milieux aquatiques, l'unité d'évaluation et de gestion de la DCE. Le découpage des masses d'eau souterraine a été fait selon des critères hydrogéologiques et administratifs. Les masses d'eau souterraine s'étendent sur quelques centaines voire quelques milliers de km².

Si le lien entre eau souterraine et végétation a été fait à travers quelques études, l'étude des sols en lien avec la végétation ou l'hydrogéologie est discrète ou plus difficile à trouver. Ce constat fait à partir de la littérature va également être fait à travers l'étude des sites pilotes et l'inventaire des données existantes. Dans le concept eau-sol-plante, dans le milieu humide, le compartiment « sol » est le moins bien renseigné par rapport aux deux autres volets de cette étude l'hydrogéologie et l'écologie.

⁵ https://www.actu-environnement.com/ae/dictionnaire_environnement/definition/aquifere.php4

⁶ https://www.actu-environnement.com/ae/dictionnaire_environnement/definition/nappe_souterraine.php4

3. Choix des sites pilotes

Ce chapitre est un résumé des travaux menés pour identifier des sites pilotes pertinents (Auterives *et al.*, 2019). La sélection des sites pilotes a reposé sur deux critères :

- (1) l'interaction du milieu humide avec des eaux souterraines doit être avérée. La notion d'eau souterraine ici faisait référence à une nappe d'eau souterraine identifiée comme une masse d'eau souterraine au sens de la DCE ;
- (2) les données disponibles doivent être suffisamment disponibles en hydrogéologie, en pédologie et en écologie (relevés faunistiques et floristiques) pour mener les travaux de recherche. Une liste préalable de données attendues a été établie. C'est sur la base de cette liste que la recherche des sites pilotes a été menée.

La méthode initialement prévue de travailler à partir d'inventaires nationaux (RAMSAR, Natura 2000, SAGE, CEN) a été peu concluante (Auterives *et al.*, 2019). En concertation avec le comité de pilotage du projet, une enquête a été menée pour identifier des sites pilotes auprès de gestionnaires de milieux humides, membres de groupe de travail sur la thématique, scientifiques et autres acteurs des milieux humides (Illustration 1).

Quinze sites pilotes ont ainsi été sélectionnés sur tous les grands bassins hydrographiques du territoire métropolitain (Illustration 1) :

Artois-Picardie : le marais de la grenouillère ; la baie de Somme ;

Rhin-Meuse : le marais de Vittoncourt ; la réserve naturelle de la forêt d'Erstein ; le ried de Sélestat Ill-Wald ;

Seine-Normandie : le marais de la Souche ; la tourbière de Cessières ; le marais de Sacy ;

Loire-Bretagne : les bois et landes d'Avaugur ; la tourbière de la Verrerie ;

Adour-Garonne : le marais de Bonnefont ; la lagune de Paulin ;

Rhône-Méditerranée : le marais de Meyranne et Chanoines.

Cette étape très enrichissante d'échanges avec acteurs et gestionnaires de milieux humides s'est révélée particulièrement chronophage tant dans la recherche des sites pilotes que dans la récupération des données. Elle a également mis en évidence que les données d'un site à l'autre étaient très disparates, parfois (très) dispersées entre différents organismes.

Jusqu'à maintenant il n'y avait pas de formalisme ou de protocoles communs de collecte et de bancarisation des données. Chaque gestionnaire a ses propres outils, ses propres méthodes, ses propres protocoles. La mise en application des protocoles RhoMéo (collectif RhoMéo, 2014) est encore trop récente pour que cette étude puisse en bénéficier.

Les travaux présentés ci-après vont montrer la difficulté de trouver des sites pilotes avec toutes les données attendues. Le volet « pédologie » s'est révélé très peu riche en données brutes ou même interprétées. Parmi les 15 sites pilotes identifiés, aucun site n'a témoigné d'une richesse suffisante de données sur les trois volets hydrogéologie, pédologie et écologie, simultanément, raison pour laquelle, une cinquième site pilote spécifique au volet « pédologie » a été ajouté.

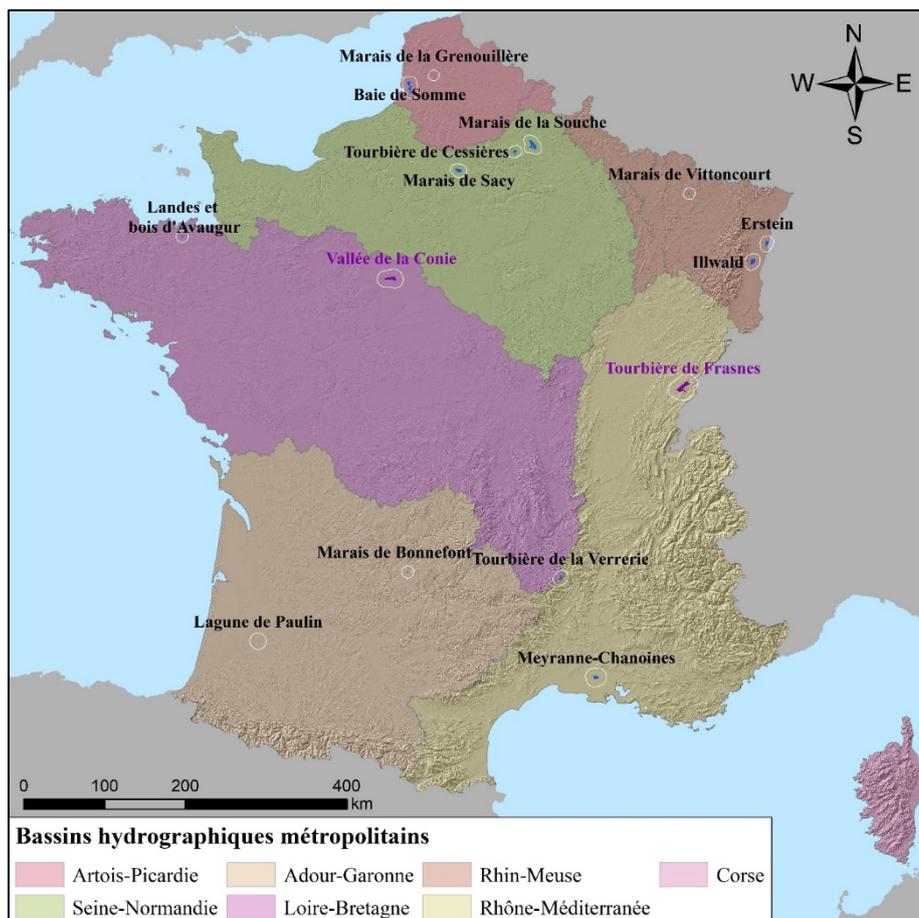


Illustration 1. Localisation des 15 sites pilotes identifiés (Auterives et al., 2019)

Les échanges téléphoniques avec les différents gestionnaires, parfois même différents gestionnaires pour un seul et même site, ont nécessité du temps. Une fois identifiée, la tâche de récupération des données (préalablement identifiées) s'est révélée toute aussi longue, notamment sur une tâche un peu plus administrative, la rédaction des conventions d'échanges des données pour chaque site, voire plusieurs conventions pour un seul et même site, du fait des gestionnaires multiples. A l'avenir, les protocoles d'acquisition de données comme les protocoles RhoMéo (collectif RhoMéo, 2014) et les travaux autour du RPDZH⁷ pour acquérir les données relatives aux zones humides vont très certainement permettre de progresser sur cette étape.

En concertation avec l'OFB, les travaux d'analyse et d'interprétation des données des sites pilotes ont été recentrés sur une sélection réduite de 4 sites :

- La lagune de Paulin (Landes) ;
- Le marais de Sacy (Oise) ;
- Le marais de la Maye dans la baie de Somme (Somme) ;
- Les marais de Meyranne et Chanoines (Bouches du Rhône) ;

Et un 5^{ème} site, pour ses données en pédologie :

- Le site d'Il Wald (Alsace).

⁷ Réseau partenarial des données sur les zones humides <http://www.reseau-zones-humides.org/>

4. Baie de Somme, le marais de la Maye

Les marais arrière-littoraux picards sont situés dans la partie est de la plaine maritime picarde (à proximité de la commune de Rue) et remontent dans les vallées humides du Ponthieu (Illustration 2). Ces marais sont des zones de transition entre la terre ferme et l'eau sous un climat de type océanique. Ils se caractérisent par un sol saturé en eau et la présence d'une biodiversité riche, adaptée à ces milieux humides. Ils constituent un ensemble de tourbières basses alcalines situées dans la partie est de la plaine maritime picarde, contre la falaise morte, et remontant dans les vallées humides de l'Authie, du Pendé, de la Maye et du Dien. Ils se composent d'une mosaïque de marais parfois boisés et de prairies humides. Ils sont traversés par un réseau hydrographique complexe (fossés, canaux et ruisseaux) et ponctués de mares de chasse et d'étangs (Bault *et al.*, 2019).

Les marais arrière-littoraux picards constituent un site d'intérêt international au regard des milieux, de la flore et de la faune qu'ils abritent. La qualité, la diversité et la superficie des milieux présents en font l'un des derniers grands ensembles écologiques palustres arrière-littoraux nord-atlantique d'Europe occidentale.

La plaine maritime du Marquenterre à l'ouest est séparée par une faille ou une flexure d'orientation nord-sud, communément appelée « falaise morte » du plateau crayeux de Ponthieu. Ces marais sont découpés en 15 entités (Illustration 3), notre étude va se focaliser sur le marais de la Vallée de la Maye.

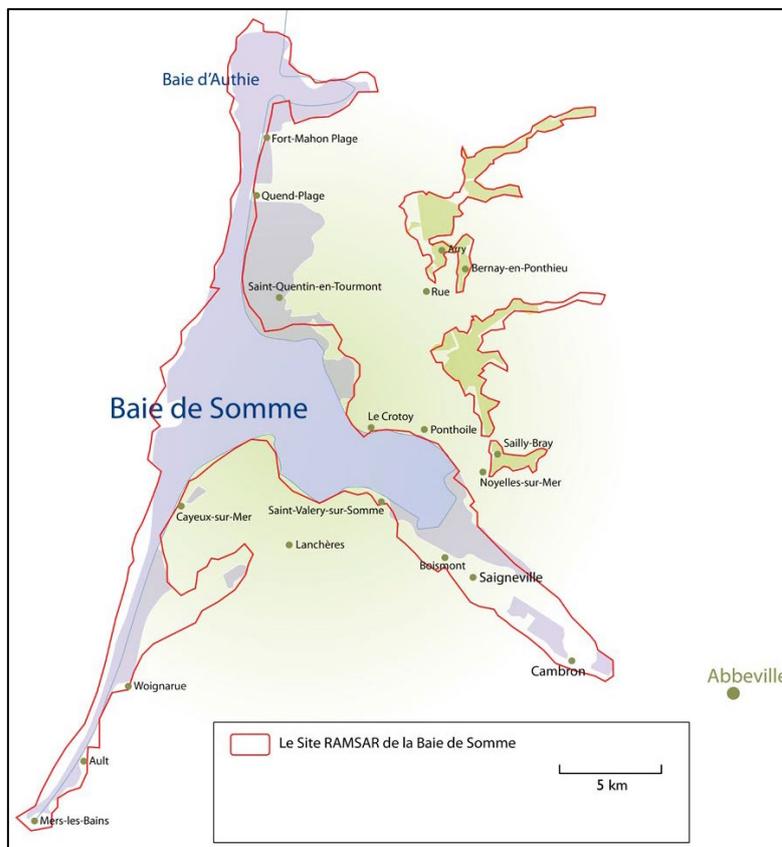
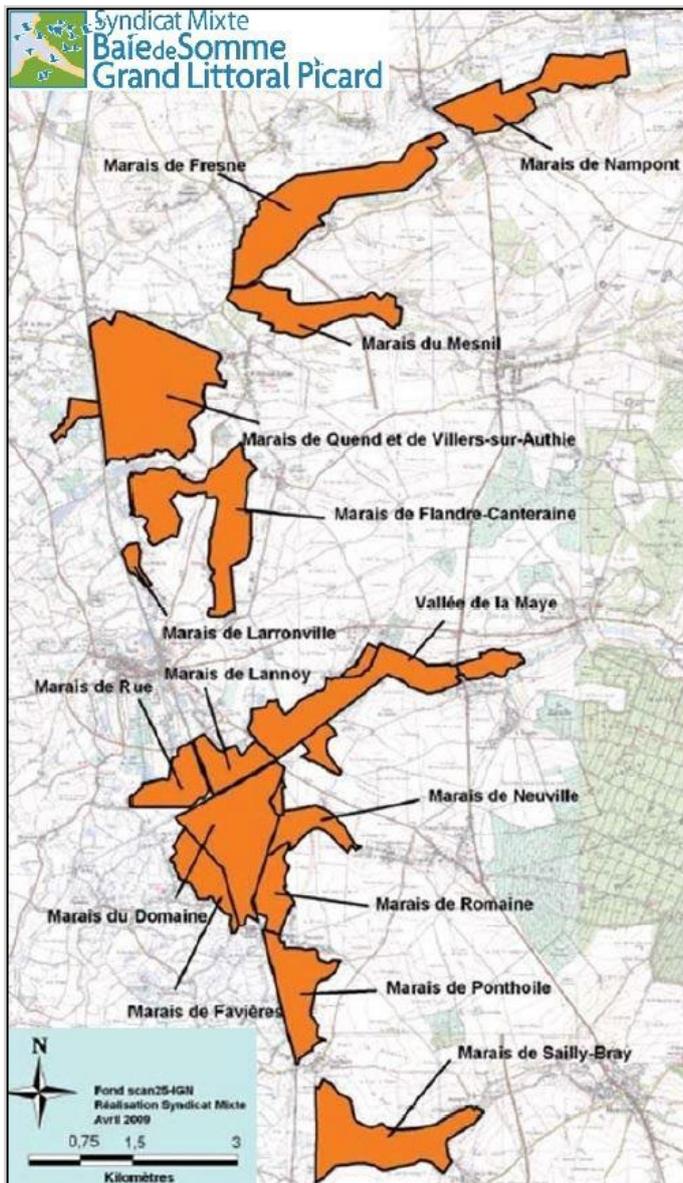


Illustration 2. Marais arrière-littoraux picards (<https://www.baiedesomme.org/themes/2236-1002-ramsar>)



- Marais de Nampont
- Marais de Fresne
- Marais du Mesnil
- Marais de Quend et de Villers-sur-Authie
- Marais de Flandre-Canteraine
- Marais de Larronville
- Marais de la vallée de la Maye**
- Marais du Lannoy
- Marais de Rue
- Marais de Neuville
- Marais du Domaine
- Marais de Romaine
- Marais de Favières
- Marais de Ponthoile
- Marais de Sailly-de-Bray

Illustration 3. Marais arrière-littoraux picards (1 800 ha), découpage en 15 unités (Bault et al., 2019)

Le marais de la Maye est localisé à l'est des marais arrière-littoraux picards, au sein de la vallée de la Maye. La Maye est un petit fleuve côtier de 38 km prenant sa source en amont à l'est du marais de la Maye et se jetant en aval dans la Manche au niveau de la réserve naturelle de la baie de Somme. Le marais de la Maye (environ 246 ha.) s'inscrit au sein du site Natura 2000 des « marais arrière-littoraux picards ». Ce site désigné au titre de la Directive « Oiseaux » et « Habitats, faune, flore » occupe une superficie d'environ 1 800 hectares sur 13 communes du département de la Somme.

Les marais de la vallée de la Maye sont composés de trois entités : les Prés de l'Etang, au sud-ouest, le marais d'Arry et le marais de Bernay-Regnière à l'est (Illustration 10).

4.1. GEOLOGIE

Cette synthèse géologique est issue des travaux de Bault et al. (2019) sur l'hydrosystème des marais arrière-littoraux du Marquenterre.

Durant le Crétacé supérieur, le nord de la France est recouvert par une mer modérément profonde (150 m.). Cette période se caractérise par le dépôt de marnes appelées dièves vertes et bleues durant le Turonien inférieur et moyen puis le dépôt d'une épaisse couche de craie (pouvant atteindre plusieurs centaines de mètres) durant le Turonien supérieur et le Sénonien.

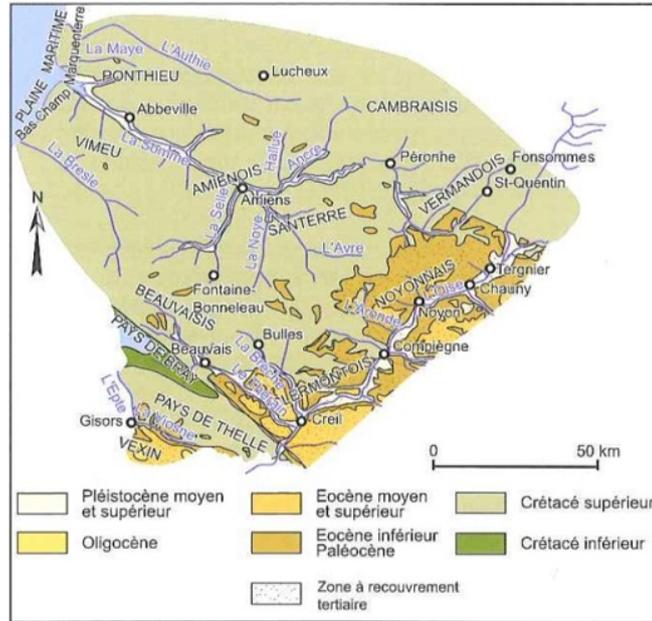


Illustration 4. Carte simplifiée de la Picardie crayeuse⁸ (Roux et al., 2006)

Une régression marine à la fin du Crétacé émerge la région. Une profonde érosion de la craie conduit à un dépôt des argiles à silex au sommet des formations crayeuses. La mer revient et dépose les sables de Bracheux (Thanétien) et les argiles de Saint-Aubain (Yprésien inférieur). La mer se retire et l'érosion reprend.

Le soulèvement des Alpes durant l'Eocène-Oligocène affecte les dépôts crayeux qui se déforment. Le compartiment crayeux du Marquenterre s'abaisse d'environ 10 m affecté par un léger pendage vers le littoral. A partir du Quaternaire, les périodes froides, périglaciaires ou glaciaires et tempérées se succèdent. La fonte des glaciers pendant les périodes de réchauffement engendre des débâcles qui creusent des vallées dans le substratum crayeux. Les paléo-vallées de la Somme et de l'Authie se mettent en place au sein de deux synclinaux encadrant l'anticlinal de Ponthieu. En période tempérée, le niveau marin remonte, et des alluvions graveleuses se déposent dans les vallées humides. Le compartiment occidental appelé Marquenterre se remblaie de cailloutis et galets de silex appelés formations de Rue déposées directement sur le toit de la craie.

⁸ <http://sigessn.brgm.fr/spip.php?article362>

Au maximum glaciaire (20 000 ans BP) d'épaisses calottes recouvrent le nord de l'Europe et le niveau de la mer est 120 m plus bas qu'actuellement. La Somme et l'Authie creusent leur lit au sein des formations de Rue et de la craie pour rejoindre le large fleuve « Manche ».

La période postglaciaire est caractérisée par un réchauffement général et une remontée progressive en plusieurs phases successives jusqu'à la falaise morte du niveau marin. La plateforme crayeuse affaissée est remblayée progressivement au cours des transgressions et régressions marines (argiles tourbeuses, sables du Marquenterre, argiles et tourbes supérieures). La sédimentation reprend en vallée (remontée du niveau de base). Les sols tourbeux et argileux se mettent en place dans les fonds des vallées humides de la Somme, du Dien, de la Maye, du Pendé et de l'Authie.

4.2. HYDROGEOLOGIE

Au droit du plateau de Ponthieu, la craie constitue un aquifère puissant recouvert par une couche limono-sableuse infiltrante. Dans la vallée de la Maye, les alluvions anciennes constituent des aquifères peu épais (< 10 m.). Le substratum des aquifères alluviaux est constitué des formations crayeuses perméables. La nappe alluviale est en continuité hydraulique avec la nappe de la craie (Illustration 5).

La nappe de la craie est libre sous les plateaux et les coteaux, sous couverture limono-sableuse. Au sein des vallées humides, les aquifères de la craie et des alluvions anciennes sont en continuité et la nappe est captive sous les alluvions récentes, argileuses et tourbeuses, constituant un écran imperméable. La nappe de la craie est alimentée directement par les précipitations locales. Bassins versants hydrogéologique et topographique se superposent. Les écoulements principaux s'effectuent vers l'ouest et la plaine maritime tandis que les écoulements secondaires se dirigent vers les vallées humides.

La profondeur de la nappe est très variable car elle dépend de la morphologie de la topographie. Elle peut atteindre 50 à 60 m voire davantage sous les plateaux, 20 à 30 m sous les coteaux et moins de 1 m sous les vallées humides. Dans les grandes vallées humides, la nappe de la craie est sub-affleurante. Elle est drainée vers les dépressions topographiques et donne naissance à de nombreuses sources qui apparaissent en tête de vallées humides, en limite des alluvions récentes peu perméables, ou au centre des vallées humides lorsque la nappe se met en charge sous les alluvions récentes.

4.2.1. Masse d'eau souterraine

Le réservoir aquifère est constitué par un ensemble de formations à dominante crayeuse (Sénonien) dont la craie est d'autant moins franche qu'elle est ancienne, passant à une craie marneuse au Cénomaniens–Turonien, et entrecoupées d'horizons argilo-marneux ou de gaize au Cénomaniens. Le mur du réservoir est formé par les marnes argileuses du Turonien (Dièves bleues) au nord. Celles-ci disparaissent progressivement vers le sud et les craies du Sénonien, Turonien et Cénomaniens forment un immense réservoir aquifère jusqu'aux argiles du Gault (Aptien).

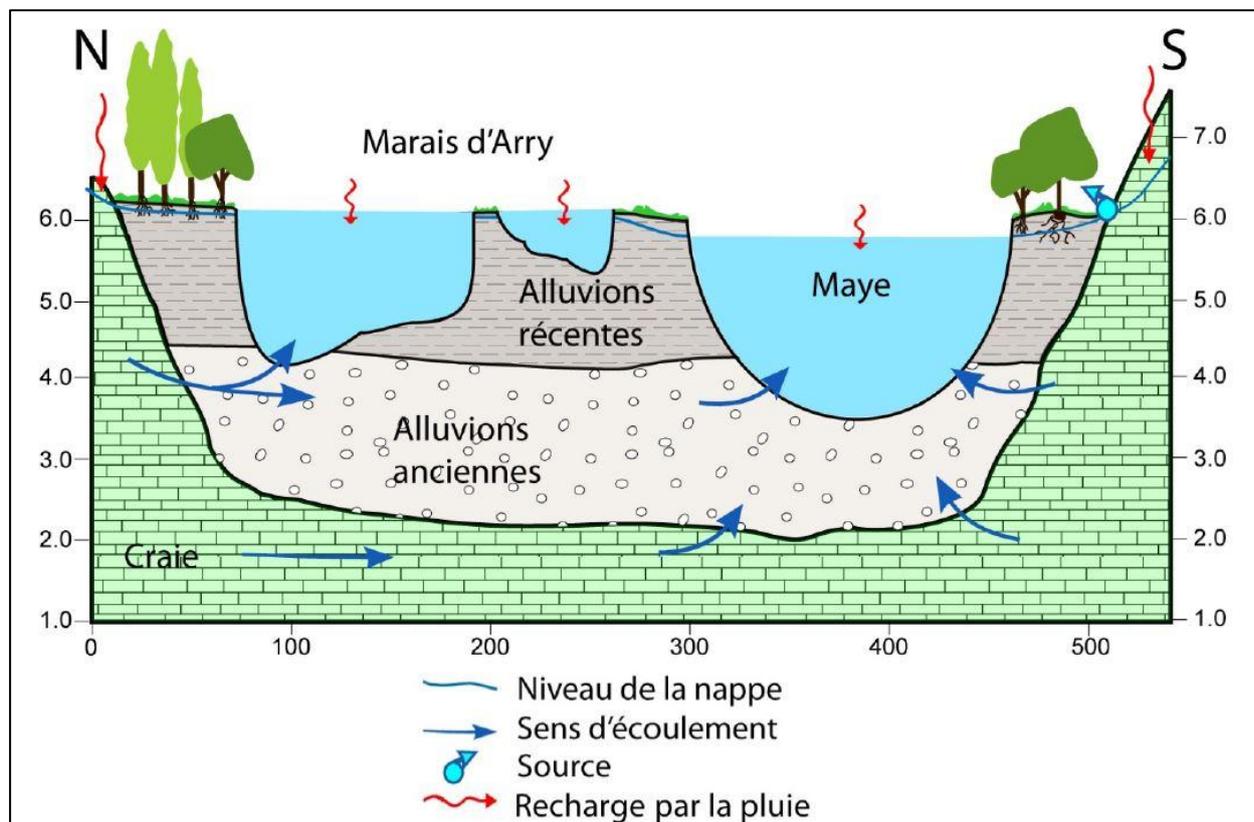


Illustration 5. Schéma des relations entre les eaux souterraines et les zones humides de la vallée de la Maye (Bault et al., 2019)

Les marais arrière littoraux picards sont en interaction avec les eaux souterraines de la nappe de la Craie du Séno-Turonien. Les « marais arrière littoraux picards » sont localisés au-dessus de deux masses d'eau souterraine : la craie de la vallée de l'Authie et la craie de la vallée de la Somme aval dont la limite a changé lors de précédents travaux de redélimitation des masses d'eau souterraine du bassin Artois-Picardie (Cadoret *et al.*, 2019). La masse d'eau souterraine FRAG011 (1 908 km², craie de la Somme aval, référentiel rapportage 2016) s'est étendue vers le nord (Illustration 6) et devient la masse d'eau souterraine FRAG311 (2 090 km², référentiel état des lieux 2019). La craie de la vallée de l'Authie, masse d'eau souterraine FRAG009 (1 305 km², référentiel rapportage 2016), est amputée dans sa partie sud et devient FRAG309 dans le référentiel état des lieux 2019 (1 066 km², Illustration 6).

Le marais de la Maye correspond à la masse d'eau FRAG311, craie de la vallée de la Somme aval (référentiel état des lieux 2019, Illustration 6).

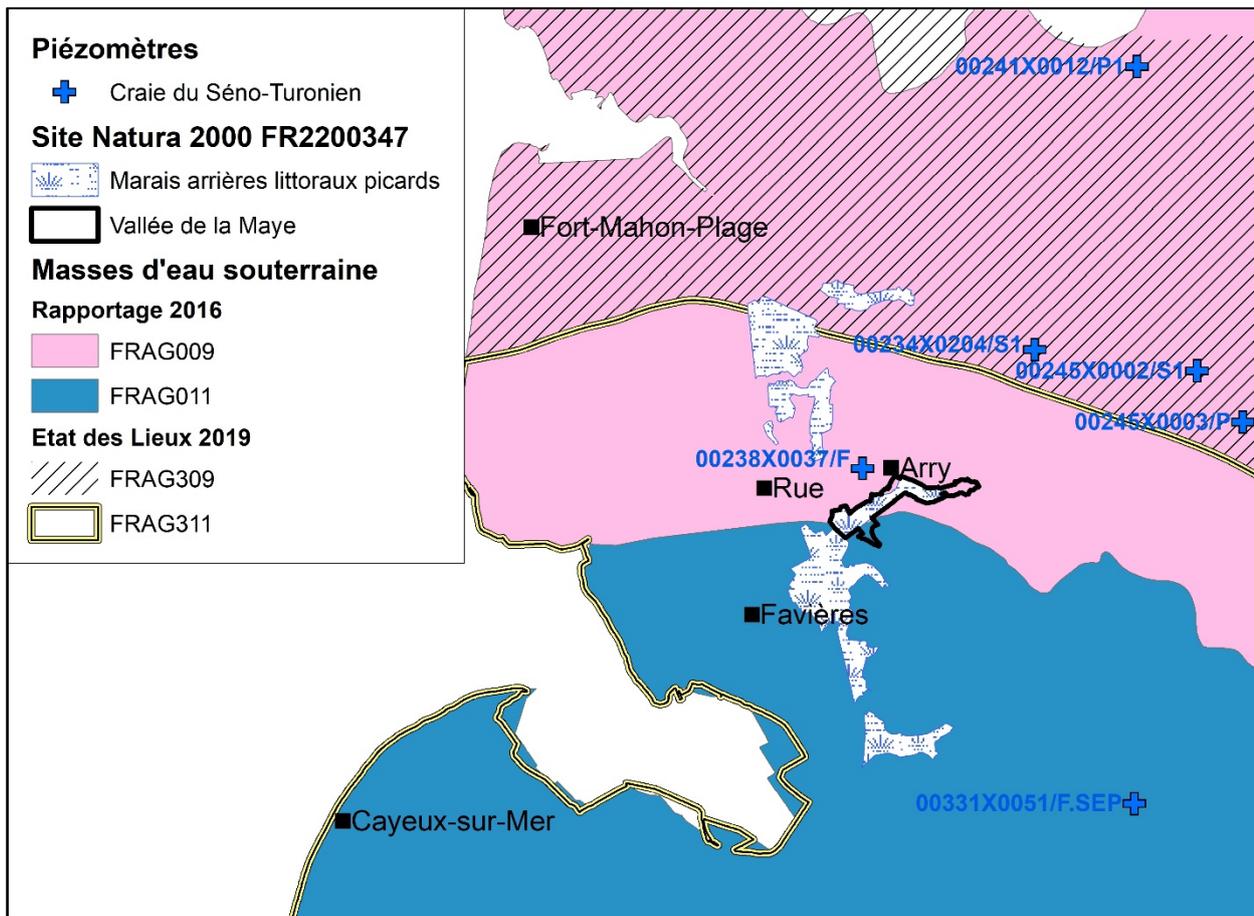


Illustration 6. Comparaison des délimitations des référentiels des masses d'eau souterraine (niveau 1, rapportage 2016 et horizon 1, état des lieux 2019) autour des marais arrières littoraux picards : craie de la vallée de la Somme aval (FRAG011 – FRAG311) et craie de la vallée de l'Authie (FRAG009 – FRAG309)

Le portail d'accès aux données sur les eaux souterraines (ADES⁹) permet d'identifier 45 piézomètres rattachés aux masses d'eau souterraine de la craie de la vallée de la Somme aval (FRAG311) ou de la craie de la vallée de l'Authie (FRAG309). Les piézomètres localisés sur le pourtour des marais arrières littoraux picards (Illustration 7) sont sélectionnés pour une analyse de corrélation (Illustration 8) des chroniques piézométriques. Parmi les 6 piézomètres identifiés, 5 sont conservés. Le piézomètre 00234X0204/S1 de Vron (BSS000CJBM) ne dispose pas de suffisamment de données : seulement 21 mesures disponibles entre 1970 et 1998 (Tableau 1).

⁹ <https://ades.eaufrance.fr/>

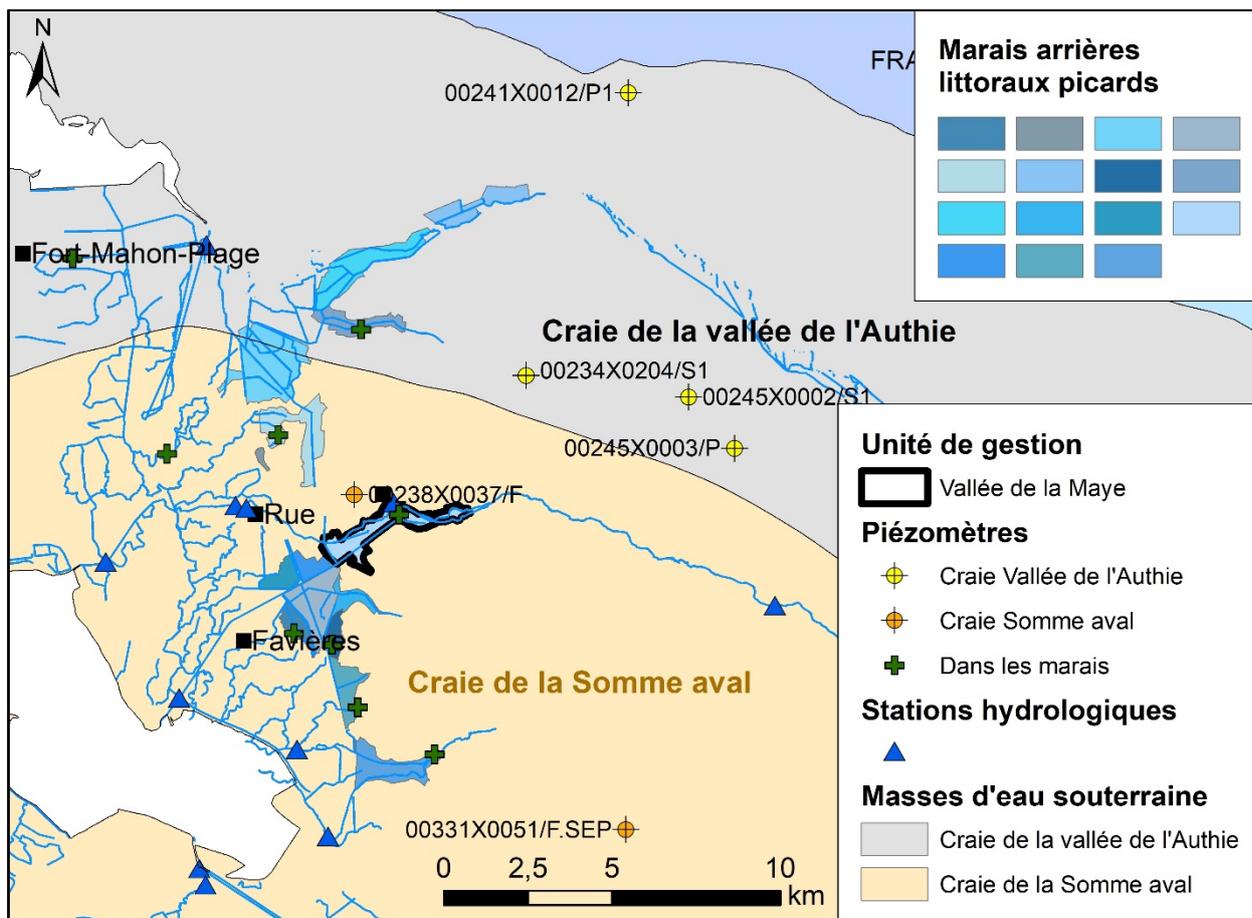


Illustration 7. Piézomètres et stations hydrologiques autour des marais arrière littoraux picards

Ancien code BSS	Nom piézomètre	Nouveau code BSS	Masse d'eau souterraine (rapportage 2016 /Etat des lieux 2019)	Période de suivi piézométrique	Nombre de mesures disponibles
00234X0204/S1	Piézomètre de Vron	BSS000CJBM	AG009/AG309	1970-1998	21
00238X0037/F	Piézomètre d'Arry	BSS000CJNS	AG009/AG311	1998-2021	6 087
00241X0012/P1	Puits de Buire le Sec	BSS000CJSH	AG009/AG309	1972-2021	6 853
00245X0002/S1	Piézomètre de Vironchaux	BSS000CKEP	AG009/AG309	1966-2014	2 466
00245X0003/P	Piézomètre de Ligescourt	BSS000CKEQ	AG009/AG309	2008-2021	4 161
00331X0051/F.SEP	Piézomètre de Lamotte-Buleux	BSS000DEJS	AG011/AG311	1998-2021	5 134

Tableau 1. Piézomètres de la nappe de la craie (masses d'eau souterraine AG009 et AG011) localisés autour des marais arrière littoraux picards

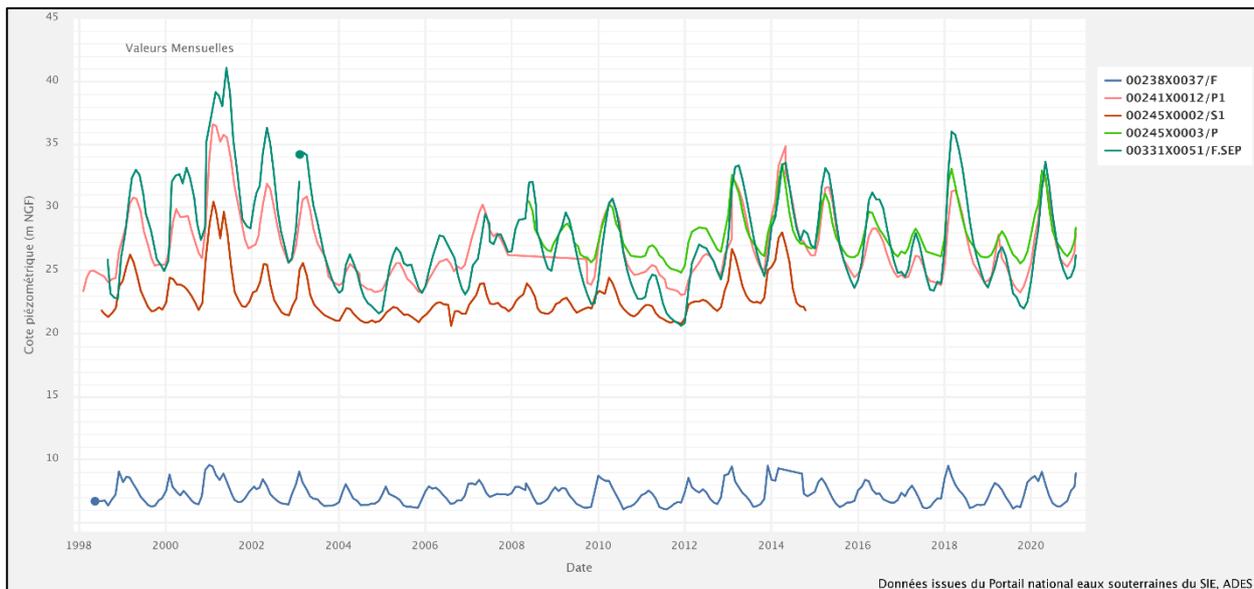


Illustration 8. Suivi piézométrique de la nappe de la craie autour des marais arrière littoraux picards (source ADES, période 1998-2020)

4.2.2. Interaction eau de surface – eau souterraine

Au droit du plateau de Ponthieu, les nappes de la craie et des alluvions anciennes sont en continuité hydraulique et sont drainées par les cours d'eau. Les suivis piézométriques révèlent que les marais, qui se développent au sein des grandes vallées humides (Pendé et Maye à Arry) sont également en relation étroite avec les nappes libres des alluvions et de la craie. La nappe de la craie donne également naissance à de nombreuses sources qui apparaissent en vallée humide et participent à l'alimentation des eaux superficielles.

Le piézomètre BSS003SOPQ est implanté dans le marais d'Arry et permet de suivre les variations piézométriques de la nappe des alluvions de la Maye (Illustration 9, Illustration 10).

Bault *et al.* (2019) ont suivi les variations piézométriques de la nappe libre de la craie et des alluvions à Arry sur une période d'un an (sept. 2016 – sept. 2017). Ils ont montré que la piézométrie est contrainte par des niveaux de base. Les cours d'eau recoupent les horizons tourbeux et drainent la nappe (Illustration 9). Les variations saisonnières de la nappe des alluvions de la Maye à Arry (BSS003SOPQ) suivent celles de la nappe de la craie (BSS000CJNS – 0238X00237/F) sous le plateau de Ponthieu. Ces fluctuations sont plus faibles en vallée qu'en plateau. La nappe de la craie demeure très inertielle en comparaison à celle des alluvions. Le suivi de la nappe des alluvions de la Maye à Arry montre que les niveaux sont tributaires de la pluviométrie, même en période d'étiage. Ainsi les remontées sont très rapides et quasi-instantanées suite à une pluie.

Le marais de la vallée de la Maye est en relation étroite avec la nappe alluviale et la nappe de la Craie. La nappe alluviale de la Maye est alimentée par la nappe de la craie et suit ses variations saisonnières. Elle reste cependant fortement influencée par la pluviométrie, même en période d'étiage. La rivière de la Maye draine la nappe et lui impose un niveau de base (Bault *et al.*, 2019).

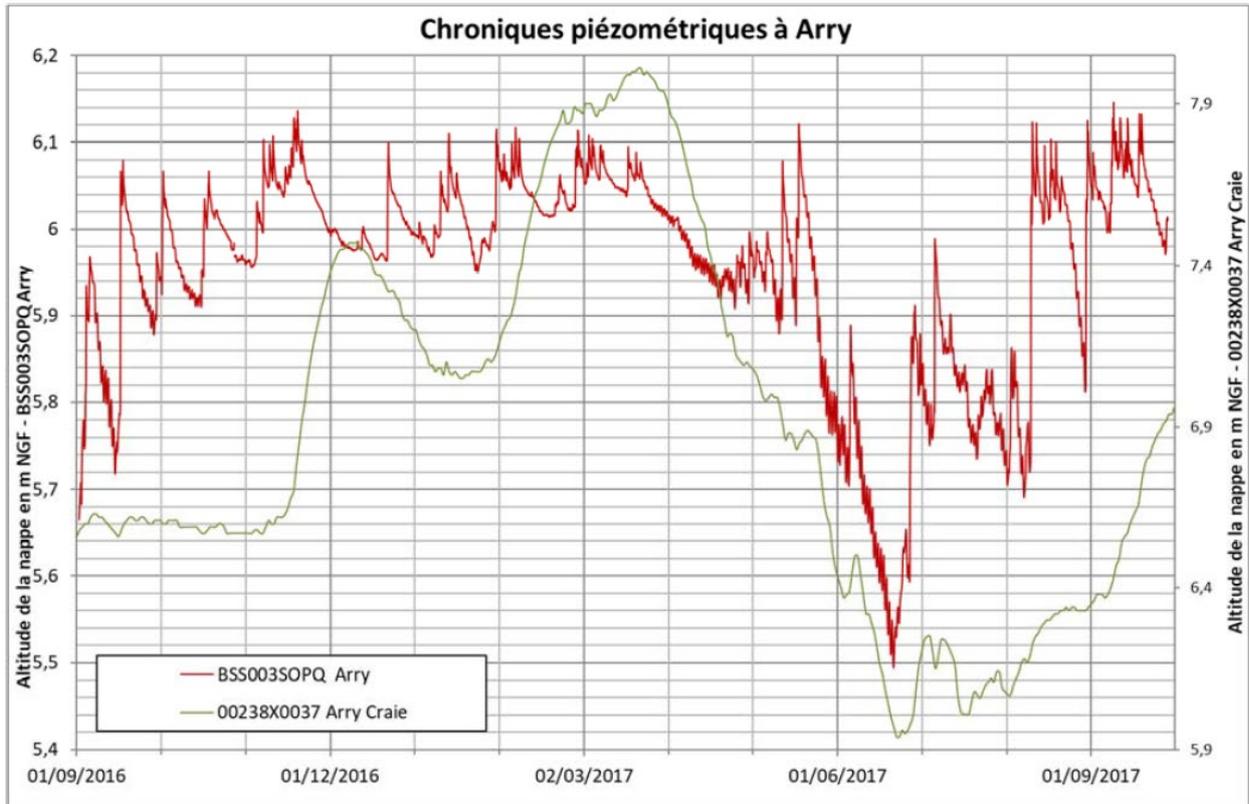


Illustration 9. Chroniques piézométriques à Arry de la nappe de la craie et des alluvions (Bault et al., 2019)

La Maye s'écoule sur 38 km, depuis sa source à + 40 m NGF à Fontaine-sur-Maye jusqu'à son estuaire dans la baie de Somme. Au droit du plateau de Ponthieu, la Maye ne reçoit aucun affluent. La pente du cours d'eau est de 2 ‰ et la vallée est étroite, entre 200 et 300 m. Le débit du cours d'eau à Arry est suivi depuis 1993 (station hydrologique E6498315, la Maye à Arry, Illustration 10). Les débits moyens mensuels maximums sont enregistrés le plus souvent en février et mars, avec une période de crue de janvier à mai. Les étiages se produisent en août et septembre.

Les travaux de Bault *et al.* (2019) mettent en évidence que les niveaux de la Maye se corrèlent relativement bien avec ceux de la nappe libre de la craie sur le plateau à Arry (coefficient de corrélation de 0,9 sans décalage temporel). La rivière est principalement alimentée par les eaux souterraines mais reste influencée par le ruissellement.

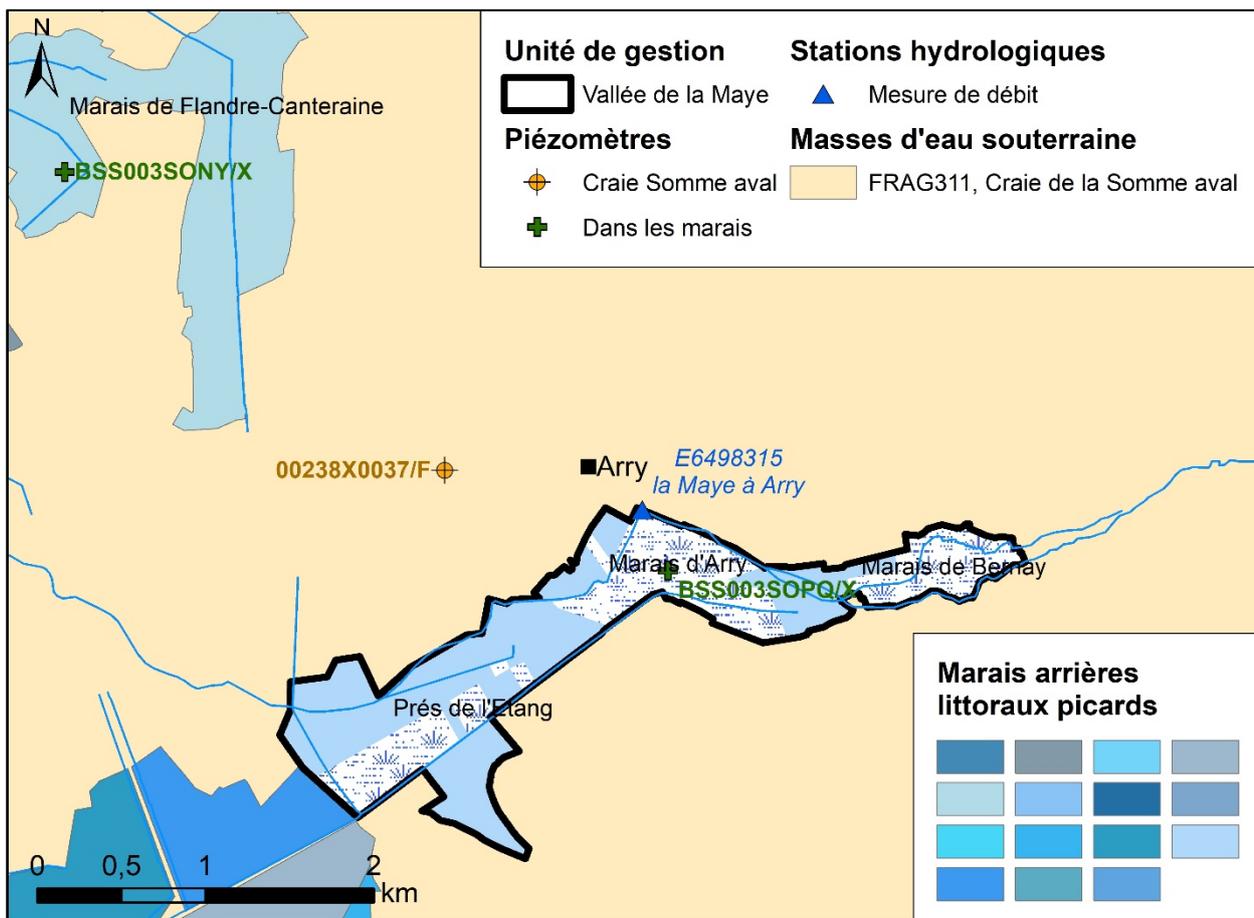


Illustration 10. Instrumentation autour de l'unité de gestion de la vallée de la Maye

Les données piézométriques de la nappe de la craie ont été téléchargées sur le portail ADES d'accès aux données sur les eaux souterraines, les données de débits de la Maye à Arry ont été téléchargées sur le site de la banque Hydro, les données de suivi des piézomètres dans les marais nous ont été fournies par le syndicat mixte Oise-Aronde. A la suite des travaux de Bault *et al.*, (2019), le suivi piézométrique dans le marais (BSS003SOPQ) a perduré. Les données disponibles couvrent dorénavant la période sept. 2016 – avril 2019 (Illustration 12).

Les calculs de corrélation entre les chroniques de suivi de la nappe, du marais et du débit de la Maye ont été menés sur la période commune de disponibilité des données, septembre 2016 – avril 2019.

Le coefficient de corrélation entre le piézomètre dans le marais BSS003SOPQ avec le signal piézométrique de la masse d'eau souterraine AG309/AG311 varie entre 0,54 et 0,69 avec un décalage de 1 mois pour les piézomètres les plus proches (piézomètre 00238X0037/F et 00245X0003/P) et de 3 mois pour les piézomètres les plus éloignés (00241X0012/P1 et 00331X0051/F.SEP). Le coefficient de corrélation croisée le plus élevé, bien qu'inférieur à 0,8, correspond au piézomètre 00238X0037/F, piézomètre le plus proche, qui apparaît comme le piézomètre indicateur des variations piézométriques de la masse d'eau souterraine. Ce résultat est en cohérence avec les conclusions de Bault *et al.* (2019) sur le marais en relation étroite avec la nappe de la craie mais fortement influencée par la pluviométrie.

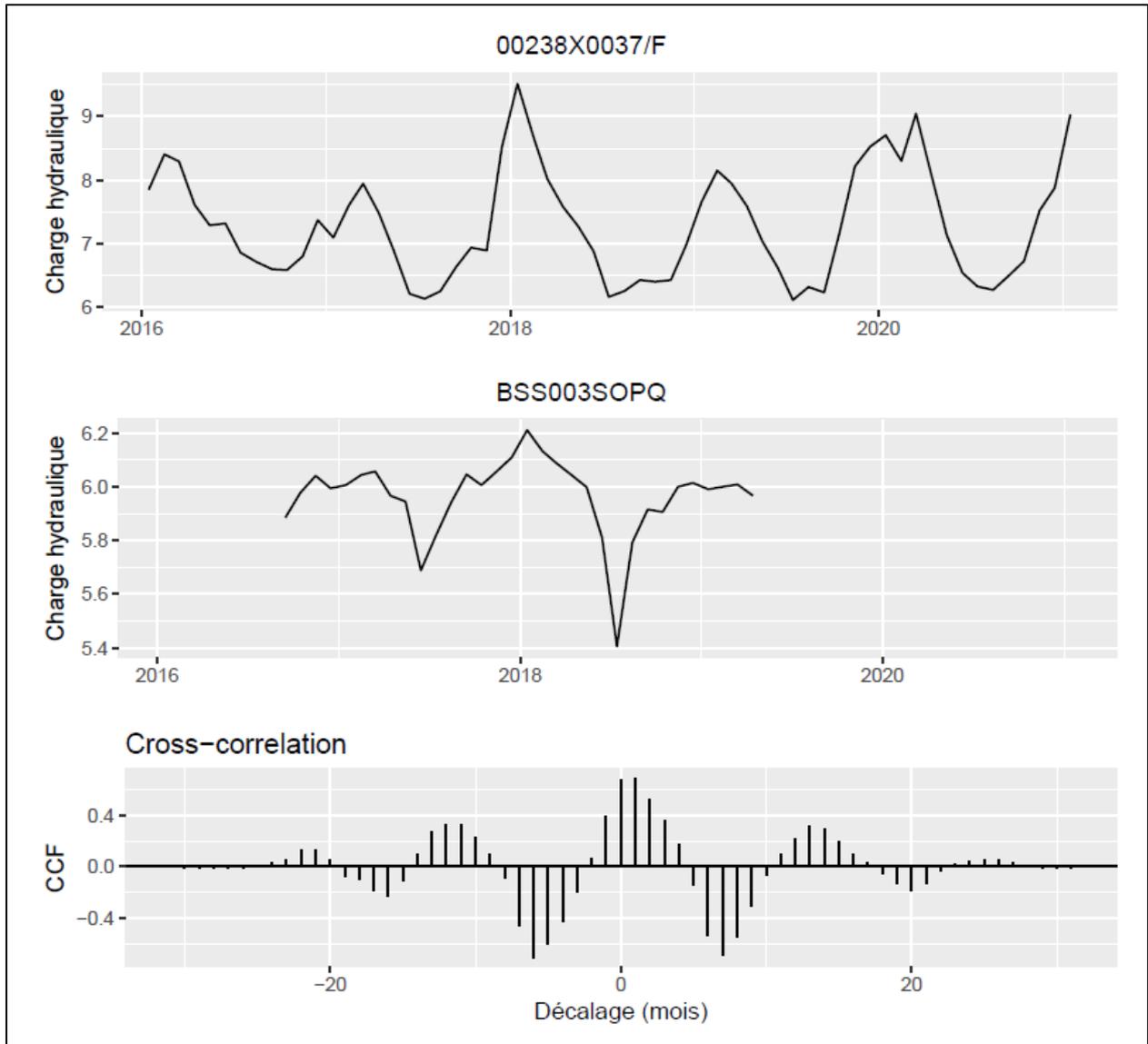


Illustration 11. Variations piézométriques dans la nappe de la craie (00238X0037/F, en haut) et dans le marais (BSS003SOPQ, au milieu) et coefficient de corrélation croisée entre les deux signaux (en bas)

4.2.3. Inondation du marais de la Maye

Bault *et al.* (2019) rapportent que les niveaux des nappes sont peu profonds et ne descendent jamais en dessous de 2 m de profondeur. Cette observation d'une nappe peu profonde est importante dans un contexte de milieu humide. Pour caractériser la profondeur de la nappe ou l'épaisseur de la zone non saturée, il est nécessaire de connaître précisément l'altitude du sol au droit du point d'observation.

L'altitude du sol au piézomètre BSS003SOPQ renseigné dans sur le portail ADES est 6 m (<https://ades.eaufrance.fr/Fiche/PtEau?Code=BSS003SOPQ/X>), l'incertitude de cette valeur n'est pas renseignée. Sur le portail Infoterre, l'altitude renseignée est de 6,167 m (<http://ficheinfoterre.brgm.fr/InfoterreFiche/ficheBss.action?id=BSS003SOPQ/X>). Cette valeur est importante pour connaître les périodes de submersion et d'immersion à proximité de ce piézomètre. L'écart entre les 2 valeurs (source ADES et source INFOTERRE) est faible (16,7 cm) mais dans un contexte où la topographie est très plane, cette différence est significative. En

fonction de la référence utilisée, les périodes d'inondation considérée ne sont pas du tout les mêmes. Avec l'altitude 6 m (source ADES), le point BSS003SOPQ apparaît régulièrement inondé (Illustration 12). Le niveau piézométrique du point dépasse fréquemment la cote NGF du sol à 6 m. Si le sol est à l'altitude 6,167 m, une seule période de submersion est observée (entre le 1^{er} janvier et le 04 février 2018).

Les périodes d'inondation et d'émersion sont importantes pour caractériser le fonctionnement d'un marais. Elles influencent les populations végétales qui vont s'y développer. Et pour caractériser ces périodes et principalement leur durée, il est important de connaître précisément l'altitude du sol au droit du point de suivi du niveau piézométrique. La profondeur maximum du toit de la nappe et la durée d'engorgement en eau du sol sont deux critères prépondérants au fonctionnement des milieux humides et au développement de sols hydromorphes : critère pris en compte pour délimiter une zone humide selon l'arrêté de 2008 modifié. Il est donc nécessaire de connaître l'altitude du sol.

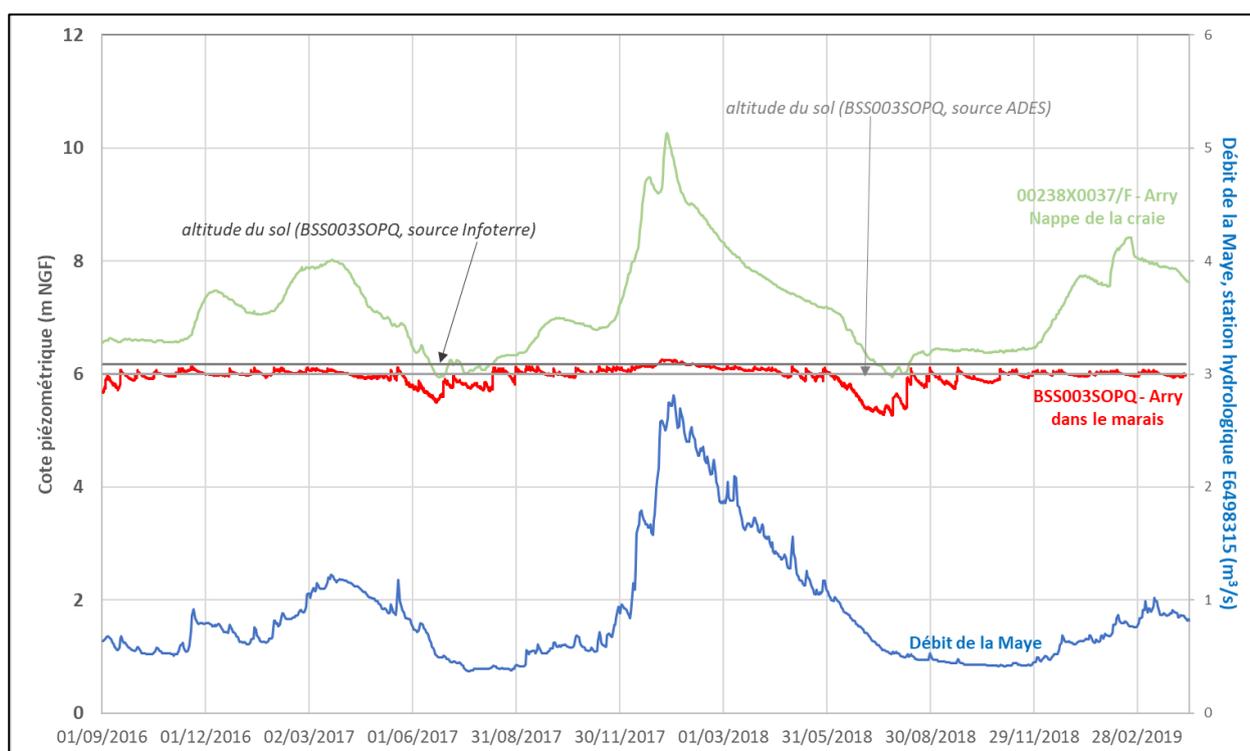


Illustration 12. Chroniques piézométriques à Arry de la nappe de la craie et des alluvions, et des débits de la Maye depuis 2016 (Bault et al., 2019) jusqu'à avril 2019

4.2.4. Exploitation des eaux souterraines

La nappe de la craie constitue la ressource en eau la plus importante de la région, tant par son extension que par son degré d'exploitation. La nappe libre de la craie est sollicitée par de nombreux ouvrages domestiques, agricoles et industriels.

Bault *et al.*, (2019) précisent que les volumes prélevés journaliers voire mensuels ne sont pas connus et ne peuvent donc pas être comparés aux chroniques piézométriques et aux débits. Il est donc difficile dans ce contexte d'appréhender la part de l'impact des prélèvements d'eau

souterraine sur le niveau d'eau dans le marais. Cependant, la corrélation entre la nappe de la craie, la nappe des alluvions et le niveau d'eau dans le marais fait que quel que soit ce qui influence le niveau de la nappe de la craie, les fluctuations de la nappe de la craie se répercutent sur le marais de la Maye.

Un modèle hydrogéologique a été développé pour simuler le comportement de la nappe de la craie avec et sans prélèvements souterrains. Cette étude a permis de constater que le secteur aval de la Maye est impacté localement par des prélèvements en nappe avec des rabattements engendrés dépassant 20 à 40 cm. Ce secteur est également impacté par les prélèvements agricoles, avec des rabattements entre 10 et 20 cm. L'influence des prélèvements déclarés sur la nappe de la craie semble cependant moindre au droit des marais arrières littoraux (Bault *et al.*, 2019). L'évaluation de l'état des deux masses d'eau souterraine (Etat des lieux 2019) conclut au bon état quantitatif des deux masses d'eau souterraine FRAG309 et FRAG311.

Les travaux de Bault *et al.* (2019) ont montré l'influence des précipitations sur le signal piézométrique dans le marais et l'évolution liée aux fluctuations de la nappe de la craie.

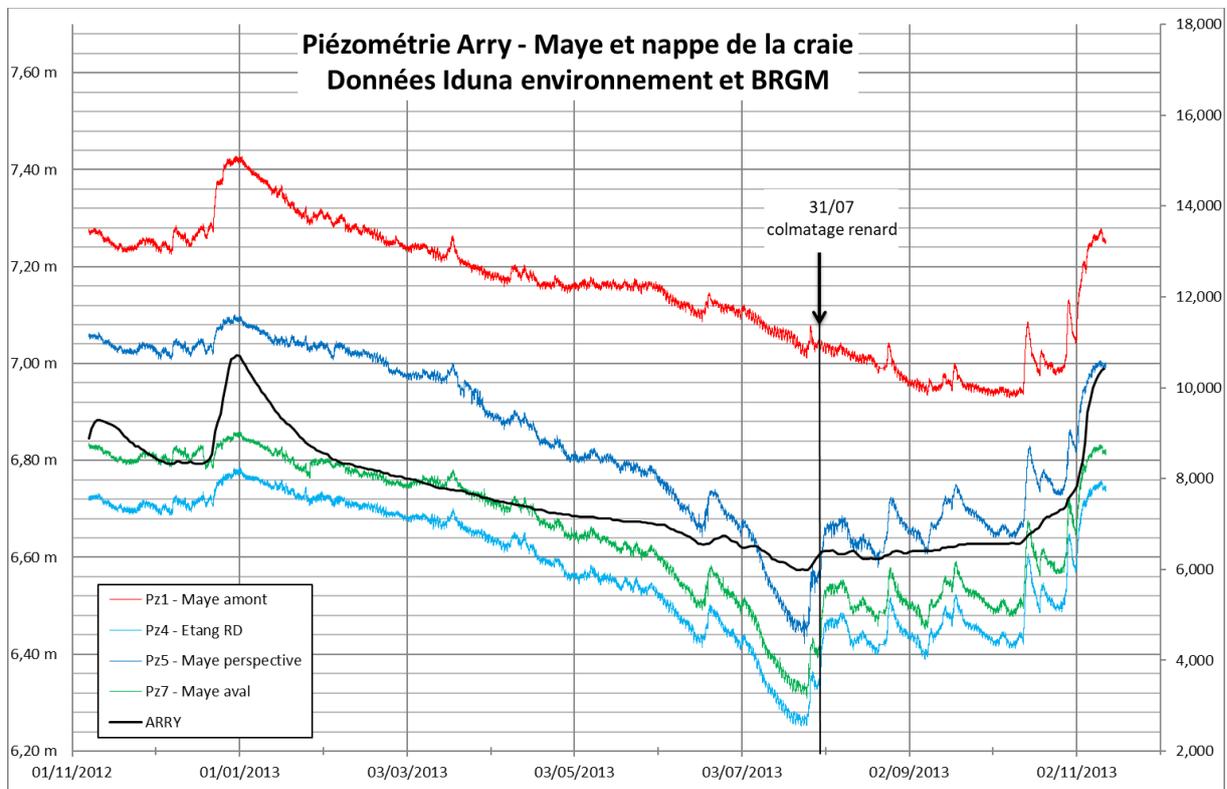


Illustration 13. Piézomètre Arry (marais de la Maye) et nappe de la craie (Bault *et al.*, 2019, données Iduna environnement et BRGM)

4.3. ECOLOGIE

Le marais de la Maye présente une mosaïque d'habitats composée de plans d'eau, de prairies humides, de roselières, de mégaphorbiaies, de boisements hygrophiles à Saules, Aulnes ou Frênes et des tourbières de transition encore appelées « tremblants tourbeux » composées de radeaux végétaux flottant à la surface de l'eau.

Les marais de la vallée de la Maye sont composés de trois entités : les Prés de l'Etang, au sud-ouest, le marais d'Arry (là où est implanté le piézomètre BSS003SOPQ) et le marais de Bernay-Regnière à l'est (Illustration 10). Historiquement, les marais de la Maye étaient utilisés pour l'exploitation de la tourbe et l'utilisation des roseaux. Le grand nombre d'étangs et de marais résulte d'une part de la topographie mais aussi des activités d'extraction de la tourbe.

4.3.1. Approche qualitative

Dans l'état actuel de nos connaissances, 44 habitats naturels ont été recensés sur l'ensemble du marais dont 16 d'intérêt patrimonial et 11 d'intérêt communautaire.

Parmi eux, 26 sont caractéristiques de zones humides au regard des arrêtés de 2008 et 2009 fixant les critères réglementaires de délimitation et de caractérisation des zones humides soit environ 60% de l'ensemble des habitats identifiés sur le site. Le tableau suivant présente les habitats naturels présents au sein du marais de la Maye (Tableau 2)

Habitats naturels	Code CORINE	Code EUNIS	Syntaxon	ZH
Eau libre	22.12	C1.2	/	Non
Herbier de characées des eaux claires	22.44	C1.14	<i>Charetalia hispidae</i>	Non
Voile de tenille eutrophe	22.41	C1.22	<i>Lemnion minoris</i>	Non
Herbier enraciné des eaux douces	22.43	C1.13	<i>Potamion pectinati</i>	Oui
Herbier flottant à Callitriche à angles obtus et Callitriche à fruits plats	22.43	C1.13	Groupement à <i>Callitriche obtusangula</i> et <i>Callitriche platycarpa</i>	Oui
Herbier flottant à Potamot coloré	24.4	C2.1	<i>Potametum colorati</i>	Non
Herbier flottant à Nénuphar jaune et Nymphaea blanc	22.431	C1.241	<i>Nymphaeo albae</i> - <i>Nupharetum luteae</i>	Non
Végétation à Nénuphar jaune	22.431	C1.241	<i>Nymphaeion albae</i>	Non
Cressonnière à Ache nodiflore	53.4	C3.11	<i>Helosciadietum nodiflori</i>	Oui
Bas-marais alcalin	54.253	D4.153	<i>Hydrocotylo vulgaris</i> - <i>Schoenion nigricantis</i>	Oui
Prairie à Hydrocotyle commune et Jonc à fleur obtuses	54.21	D4.11	<i>Juncetum subnodulosi</i>	Oui
Roselière à Baldingère	53.16	C3.26	<i>Phragmition communis</i>	Oui
Végétation à Grande glycérie	53.15	C3.251	Groupement à <i>Glyceria maxima</i>	Oui
Roselière à Roseau commun	53.16	C3.26	<i>Phragmition communis</i>	Oui
Roselière à Phragmite commun et Morelle douce-amère	53.16	C3.26	<i>Solano dulcamarae</i> - <i>Phragmitetum australis</i>	Oui
Cariçaie à Laïche paniculée	53.216	D5.216	<i>Caricetum paniculatae</i>	Oui
Roselière turficole à Fougère des marais et Roseau commun	54.21	D4.11	<i>Thelypetrido palustris</i> - <i>Phragmitetum australis</i>	Oui
Cariçaie des sols non tourbeux	53.21	C3.29	<i>Caricion gracilis</i>	Oui
Mégaphorbiaie méstrophe	37.1	E5.41	<i>Thalictro flavi</i> - <i>Filipendulion ulmariae</i>	Oui
Mégaphorbaie à Cirse de maraîchers et Valériane rampante	37.1	E3.4	<i>Valeriano repentis</i> - <i>Cirsietum oleracei</i>	Oui
Mégaphorbiaie eutrophe	37.71	E5.411	<i>Convolvulion sepium</i>	Oui
Mégaphorbiaie à Eupatoire chanvrine et Liseron des haies	37.71	E5.411	<i>Eupatorio cannabini</i> - <i>Convolvuletum sepium</i>	Oui
Prairie eutrophe surpaturée	37.21	E3.41	<i>Potentillo anserinae</i> - <i>Polygonetalia avicularis</i>	Oui
Prairie humide pâturée mésotrophe	37.24	E3.44	<i>Mentho longifolia</i> - <i>Juncion inflexi</i>	Oui
Prairie mésophile	38.111	E2.111	<i>Arrhenatherion elatitot</i>	Non

Fourré de Saule cendré	44.92	F9.2	<i>Salicion cinereae</i>	Oui
Fourré de Saule cendré (var. piquetée de Saule blanc)	44.92	F9.2	<i>Salicion cinereae</i>	Oui
Fourré à Saule cendré et Ronce bleue	44.92	F9.2	<i>Rubio caesii - Salicetum cinereae</i>	Oui
Fourré à Saule cendré et Fougère des marais	44.921	F9.21	<i>Alno glutinosae - Salicetum cinereae</i>	Oui
Forêt marécageuse méso-eutrophe	44.911	G1.411	<i>Anion glutinosae</i>	Oui
Aulnaie à Fougère des marais	44.912	G1.412	<i>Groupement à Alnus glutinosa et Thelypteris palustris</i>	Oui
Forêt riveraine à Saule blanc	44.13	G1.111	<i>Salicion albae</i>	Oui
Forêt de feuillus caducifoliées sur sols non marécageux	41.5	G1.8	<i>Quercu roboris - Fagetea sylvaticae</i>	Non
Erablaie à Mercuriale vivace	41.2	G1.A1	<i>Mercuriali perennis - Aceretum campestris</i>	Non
Boisement riverain non marécageux	44.2	G1.12	<i>Alnion incanae</i>	Oui
Végétation de coupe forestière et d'ourlet de Fougère aigle	31.87	G5.8	<i>Crataego monogynae - Prunetea spinosae</i>	Non
Fourrés des sols non marécageux	31.8	G5.8	<i>Prunetalia spinosae</i>	Non
Fourré riverain à Sureau	31.81	F3.11	<i>Humulo lupuli - Sambucenion nigrae</i>	Non
Fourré à Sureau noir et Houblon grimpant	31.81	F3.11	<i>Humulo lupuli - Sambucenion nigrae</i>	Non
Boisement de peuplier tremble	41.D	G1.92	/	Non
Ourlets vivaces des sols eutrophes	37.72	E5.43	<i>Galio aparines - Urticetea dioicae</i>	Non
Verger	83.151	G1.D4	/	Non
Plantation de Salix viminalis	83.325	G1.C4	/	Non
Plantation de Peuplier	83.321	G1.C1	/	Non

Tableau 2. Habitats naturels présents au sein du marais de la Maye, données issues du plan de gestion 2019-2023 « Les marais de la Maye »

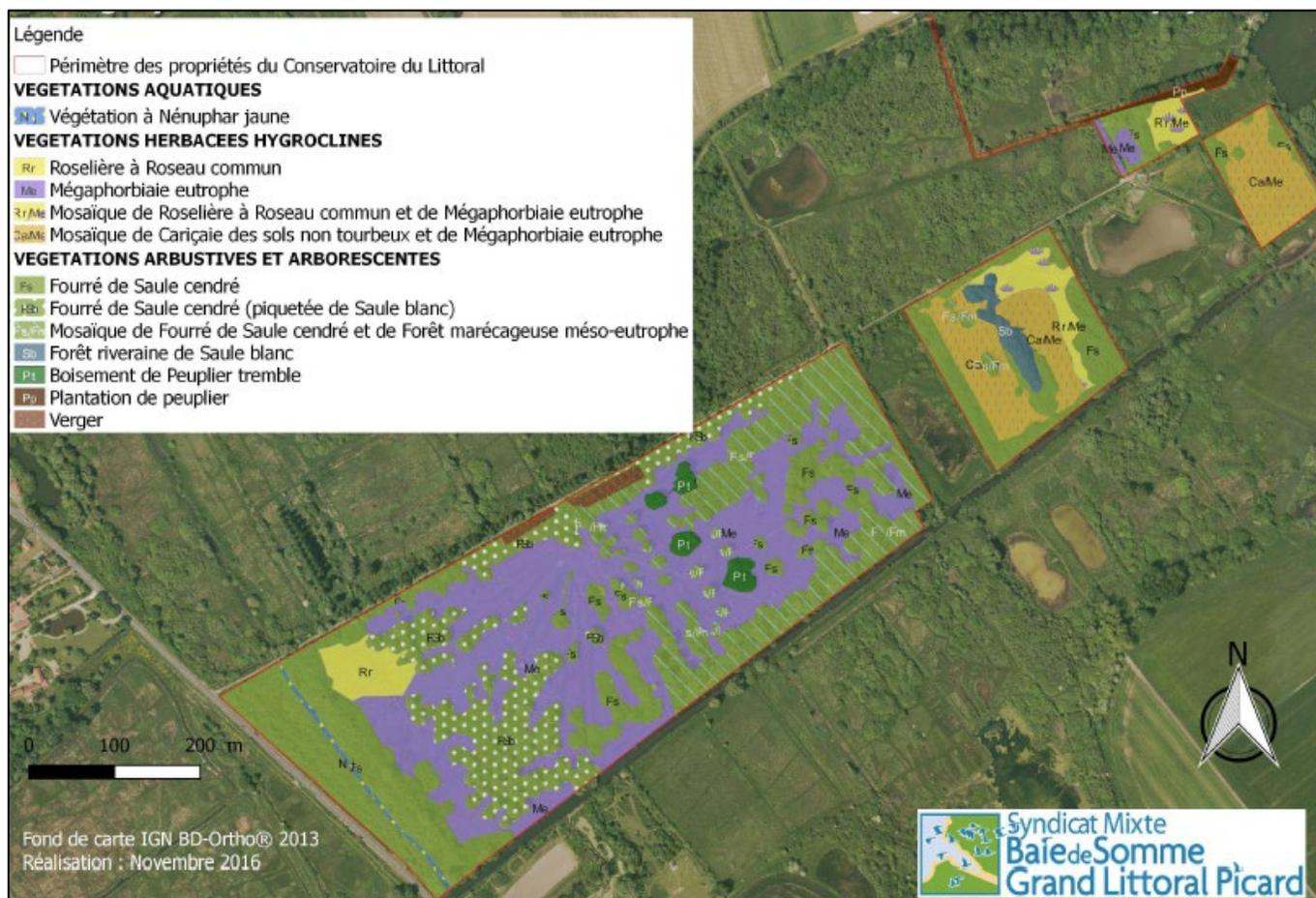


Illustration 14. Cartographie des habitats naturels des Prés de l'Etang (Marais de la Maye) en 2016 (Blondel et Coulombel, 2019)

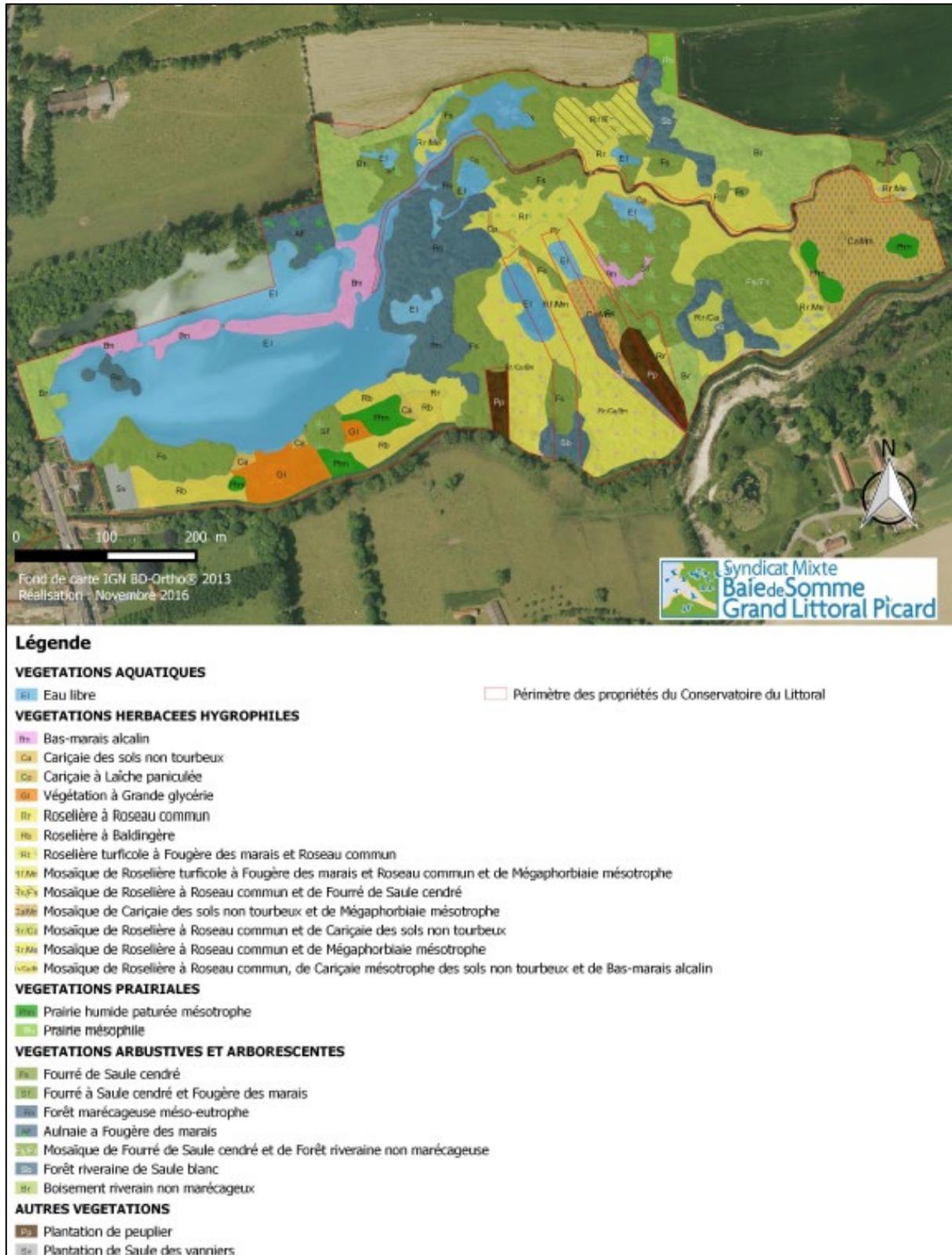


Illustration 15. Cartographie des habitats naturels du marais de Bernay en 2016 (Blondel et Coulombel, 2019)



Légende

VEGETATIONS AQUATIQUES

- Eau libre
- Voile de Lentilles eutrophes
- Herbier flottant à Nénuphar jaune et Nymphaea blanc

Périmètre des propriétés du Conservatoire du Littoral

VEGETATIONS HERBACEES HYGROCLINES

- Bas-marais alcalin
- Prairie à Hydrocotyle commune et Jonc à fleur obtuses
- Roselière à Roseau commun
- Mosaïque de Cariçaie des sols non tourbeux et de Mégaphorbiaie mésotrophe
- Mosaïque de Mégaphorbiaie mésotrophe, de Bas-marais alcalin et de Végétation à Lycope d'Europe et Jonc épars
- Mosaïque de Roselière à Grande glycérie et Baldingère
- Mosaïque de Roselière à Roseau commun et de Cariçaie des sols non tourbeux
- Mosaïque de Roselière à Roseau commun et de Mégaphorbiaie mésotrophe

VEGETATIONS PRAIRIALES

- Prairie humide pâturée mésotrophe
- Prairie eutrophe surpâturée
- Prairie mésophile

VEGETATIONS ARBUSTIVES ET ARBORESCENTES

- Fourré de Saule cendré
- Forêt marécageuse méso-eutrophe
- Forêt riveraine de Saule blanc
- Boisement riverain non marécageux
- Forêt de feuillus caducifoliés sur sols non marécageux
- Erablaie à Mercuriale vivace
- Fourré des sols non marécageux
- Fourré riverain à Sureau
- Végétation de coupe forestière et d'ourlet de Fougère aigle

Illustration 16. Cartographie des habitats naturels du marais d'Arry en 2016 (Blondel et Coulombel, 2019)

4.3.2. Approche quantitative

Les différentes formations végétales identifiées au sein des marais de la Maye ont été regroupées en grands types d'habitats afin d'appréhender de façon plus claire leur représentativité au sein du site à partir de la part surfacique de chaque grand type d'habitat (Illustration 17).

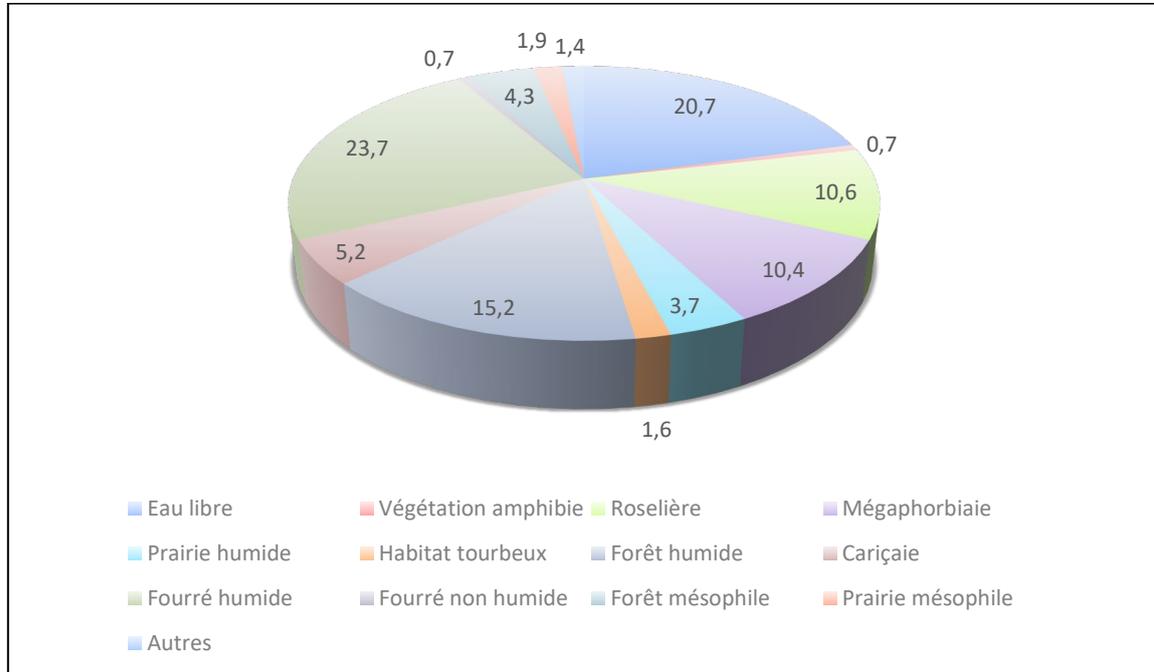


Illustration 17. Représentativité (%) des grands types d'habitats dans les marais de la Maye

Au regard de ces données, les fourrés humides sont les formations végétales les mieux représentées au sein des marais de la Maye. Ils occupent une surface d'environ 27,4 hectares soit presque 24 % des habitats cartographiés dans les marais de la Maye (qui regroupent le « Prés de l'Étang », le « marais de Bernay » et le « marais d'Arry »).

Les secteurs en eau libre sont également fortement présents au sein du site (20,7%). Ces nombreux étangs sont les traces de l'exploitation de la tourbe qui fut entreprise par le passé au sein du marais.

Les forêts humides, comprenant les forêts marécageuses et les boisements riverains non marécageux, font également partie des habitats les plus présents sur le site (15,2%). On les retrouve au sein des marais de Bernay et d'Arry, le plus souvent en contact direct avec les secteurs en eau libre.

Les formations tourbeuses et amphibies, qui sont les habitats avec la plus forte valeur patrimoniale, sont quant à elles beaucoup moins bien représentées sur le site. On les retrouve sur environ 1,7 % du site pour les formations tourbeuses et 0,7% sur les végétations amphibies.

Ces données sont tout de même à relativiser étant donné que la surface de certaines formations amphibies n'a pas pu être évaluée.

Ces données permettent de constater qu'environ 70 % des marais de la Maye sont occupés par des formations humides (Illustration 18). Ces formations se localisent essentiellement en bordure des plans d'eau ainsi que dans les secteurs présentant la topographie la plus basse. A noter que

la grande part des habitats non humides sont dominés par les secteurs en eau libre. En excluant ces secteurs la part d'habitat terrestre non humide représente alors 8,3 %.



Illustration 18. Représentativité des habitats humides dans le marais de la Maye

Les marais de la Maye présentent donc une mosaïque d'habitats humides très intéressante, de par la richesse des habitats présents et également de par leur surface. L'occupation du sol est fortement influencée par la présence de l'eau et les usages historiques entrepris sur le marais (extraction de la tourbe, utilisation des roseaux).

4.4. CONCLUSION

Le piézomètre du marais d'Arry se situe au sein d'une mosaïque de cariçaie des sols non tourbeux et de mégaphorbiaie mésotrophe. Au sein du marais d'Arry, cette formation végétale et celles en contact direct semble être dépendants de la nappe souterraine et particulièrement du niveau d'eau. En effet, les végétations du marais d'Arry nous permettent d'observer une dynamique et un gradient de végétation liés au niveau d'eau dans le marais. Ainsi les communautés végétales présentes au sein du marais d'Arry s'intègrent pour la plupart au sein de la succession écologique menant aux aulnaies marécageuses. Les habitats naturels présents au sein du site et s'intégrant dans cette dynamique végétale sont décrits ci-dessous selon leur gradient de succession :

- Les secteurs en eau libre
- les formations de cariçaie eutrophe du *Caricion gracilis*, les mégaphorbiaies mésoeutrophe du *Thalictro flavi – Filipendulion ulmariae* et les bas-marais alcalin de l'*Hydrocotylo vulgaris – Schoenenion nigricantis*
- les fourrés de Saules cendrés du *Salicion cinereae*
- les boisements marécageux à Aulne glutineux de l'*Alnetea glutinosae*

D'après Laville et Juhel (2017), les cariçaies des sols eutrophes peuvent être des végétations stables ou transitoires selon si les conditions d'inondation sont optimales. Ces derniers notent également qu'en cas d'assèchement, même léger du niveau d'eau, ces formations évoluent par dynamique naturelle, vers des mégaphorbaies puis des fourrés (*Salicion cinerea*) et enfin vers des forêts marécageuses de l'*Alnetea glutinosae*. Toujours d'après Laville (2016), en dehors des

formations citées précédemment, les cariçaies eutrophes se trouvent généralement en contact avec des herbiers aquatiques et des roselières. A noter que l'ensemble de ces végétations sont présentes au sein du marais d'Arry. D'après ces éléments, les niveaux d'eau au sein du marais semblent donc jouer un rôle prépondérant dans l'installation et le maintien des milieux humides.

Les saulaies marécageuses permettent l'assèchement progressif du substrat. Dans le cas où l'engorgement est trop important, la dynamique des forêts marécageuses reste bloquée au stade de la saulaie marécageuse.

Ainsi, au regard de la végétation et de leur localisation, les zones d'eau libre sont les secteurs du marais avec le niveau d'eau le plus important, suivi des formations de bas-marais et de cariçaie avec un niveau d'eau probablement moins haut et une fréquence de submersion moins longue. Lorsque le niveau d'eau est moins important, on y retrouve alors des formations de mégaphorbiaies, de fourrés de saules ou de forêt marécageuse.

Etant donné qu'aucune donnée topographique spécifique au marais d'Arry n'a été transmise, il est difficile de confirmer cette hypothèse. Cependant le niveau d'eau dans le marais semble bien avoir une influence sur la composition végétale et que les habitats évoluent selon le degré d'inondation.

La présence de différentes formes de stade de la succession végétale (forêts marécageuses) peut être un indicateur du niveau d'engorgement d'un site. Une mosaïque d'habitats appartenant à la même succession végétale (Illustration 19). La distribution de la végétation sur le marais de la Maye nous renseigne sur un niveau moyen d'engorgement (niveau moyen de la nappe). Il serait pertinent, dans la perspective de travaux futurs, d'avoir des données pédologiques dans les différents secteurs identifiés à partir de la végétation et de faire le lien avec les caractéristiques du sol.

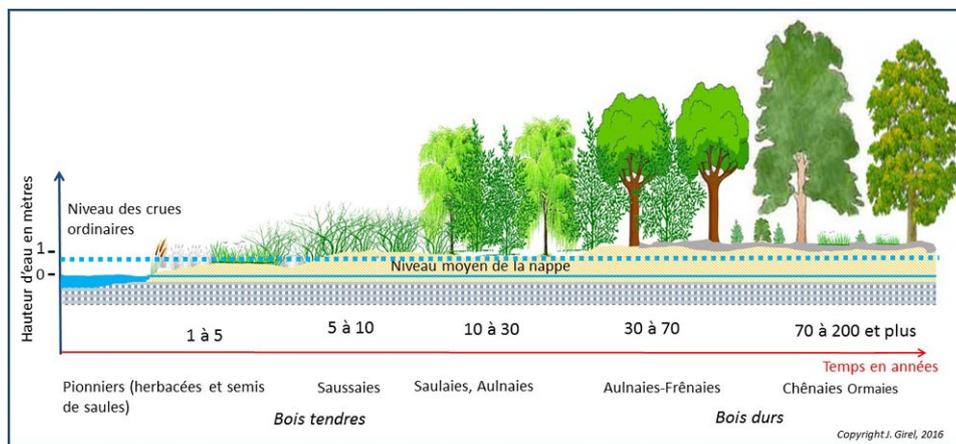


Illustration 19. Chronoséquences d'une succession végétale sur un dépôt alluvial (Girel, 1997, 2018)

L'analyse du fonctionnement hydrodynamique du marais de la Maye a mis en évidence que le niveau piézométrique des marais dépend de celui de la nappe de la craie (00238X0037/F) avec un décalage d'un mois. La nappe de la craie contrôle le niveau de base dans les marais. Si le niveau de la nappe de la craie augmente ou diminue, cela se répercute sur le niveau dans le marais avec un décalage d'environ 1 mois. Cependant, le marais, de par son bassin versant topographique, enregistre également le signal pluviométrique, les précipitations sont visibles et influencent le niveau du marais. Pour aller plus loin, il serait pertinent de faire l'analyse des hydrogrammes de crue pour séparer le signal des précipitations (volume des eaux de ruissellement) de l'écoulement de base (signal des eaux souterraines). On pourrait alors voir le

degré de corrélation entre le signal « débit de base » et le signal piézométrique de 00238X0037/F. Une corrélation forte entre les deux signaux permettrait de proposer à partir de la végétation ou de la pédologie une valeur « seuil » dans le marais qui correspondrait à un niveau piézométrique de la nappe (piézomètre 00238X0037/F) avec une certaine incertitude, cette valeur serait alors une référence pour la gestion de la masse d'eau souterraine vis-à-vis de l'impact sur l'écosystème terrestre dépendant des marais de la Maye.

Les données disponibles sur le marais de la Maye suggèrent un lien entre la distribution de la végétation et un niveau moyen de la nappe dans le marais. Le signal piézométrique du niveau de la nappe dans le marais est corrélé avec le signal piézométrique de la masse d'eau souterraine (00238X0037/F), les eaux souterraines imposent un niveau de base au marais. Le signal piézométrique observé dans le marais intègre ce niveau de base ainsi que les précipitations locales et la gestion des ouvrages hydrauliques du marais situés plus en aval. Des investigations complémentaires seraient nécessaires pour identifier les différentes composantes du signal piézométrique. Cependant il est possible d'identifier des niveaux de gestion des eaux souterraines en relation avec les niveaux d'eau dans le marais de la Maye.

5. La lagune de Paulin

La lagune de Paulin est localisée sur la commune de Cère, dans le département des Landes. La lagune faisait partie autrefois d'un réseau de zones humides, aujourd'hui disparues (Crabos *et al.*, 2013).

Les lagunes landaises correspondent à de petites étendues d'eau douce généralement circulaires et de taille inférieure à 1 hectare qui parsèment le plateau landais. Elles se sont formées il y a plus de 10 000 ans. L'origine éolienne constitue l'origine la plus probable (Corbier, 2015). Elles constituent au cœur de la forêt, des zones témoins du niveau de la nappe et donc de la ressource en eau, facteur indispensable à la pérennité du massif forestier. Ces dépressions ont un profil très symétrique avec de très faibles pentes.

Aujourd'hui isolée, la lagune de Paulin, dont la superficie (environ 6 ha) est supérieure à la moyenne des lagunes landaises (< 1 ha) n'est pas en connexion avec le réseau hydrographique de surface. Elle se situe aujourd'hui entre deux ruisseaux, l'Huillère au nord et Pébarthe au sud. Tous deux se jettent dans l'Estrigon qui est un affluent de la Midouze dans le bassin versant de l'Adour. La lagune ne présente aucune connexion au réseau hydrographique (Crabos *et al.*, 2013, Illustration 20).

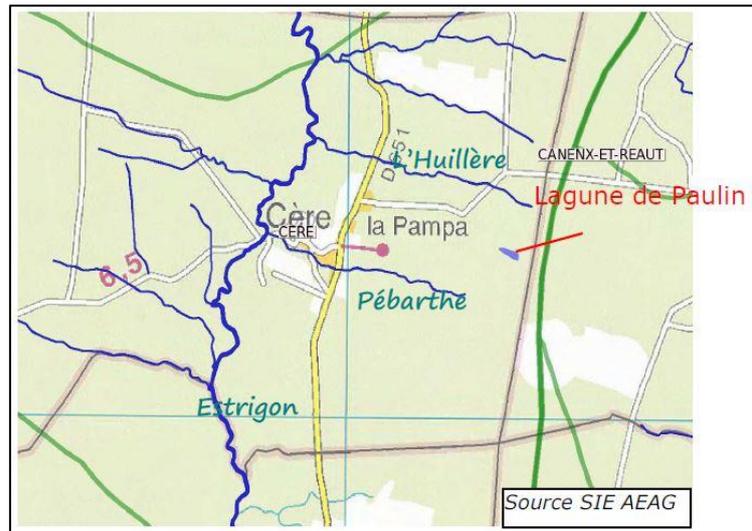


Illustration 20. Localisation de la lagune de Paulin (Crabos *et al.*, 2013)

5.1. HYDROGEOLOGIE

La lagune de Paulin est alimentée par la nappe phréatique superficielle, les eaux de ruissellement et les eaux de précipitations. Les pertes en eau sont alors dues à l'évapotranspiration et à des phénomènes d'infiltration (perméabilité du substrat). Elle faisait partie autrefois d'un réseau de zones humides. Aujourd'hui, elle est isolée et déconnectée du réseau hydrographique.

Selon le système de classification hydrogéomorphologique (Gayet *et al.*, 2016), la lagune de Paulin est une zone humide de versant et bas-versant là où les eaux souterraines sont déchargées en surface. La lagune de Paulin est témoin des niveaux de nappe superficielle. La lagune de Paulin fait partie du territoire du SAGE de la Midouze qui constitue la partie nord du bassin de l'Adour (Illustration 21).

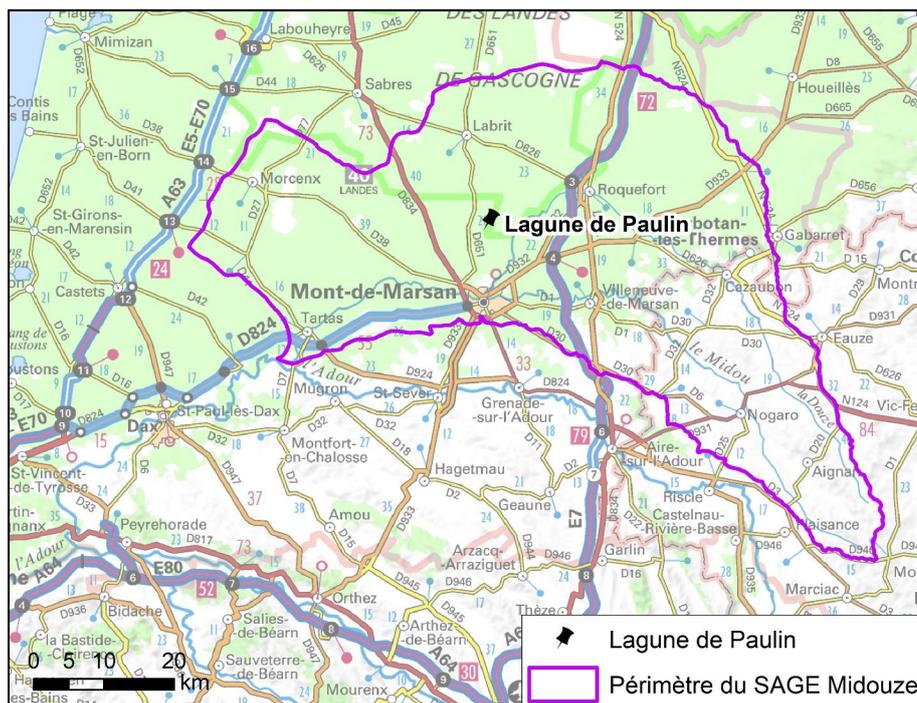


Illustration 21. Localisation de la lagune de Paulin et périmètre du SAGE Midouze

Pour comprendre le fonctionnement hydrologique de la lagune, des piézomètres ont été implantés sur le pourtour de la lagune en décembre 2014 dans le but de mesurer le battement de la nappe dans la lagune.

La lagune de Paulin a été instrumentée en novembre 2014 (Corbier, 2015). Au total 5 piézomètres (Illustration 22) ont été implantés :

- 09257X0109/FEST (PZ1) ;
- 09257X0110/FNORD (PZ3) ;
- 09257X0111/FSW (PZ2) ;
- BSS003OXQO/X (PZ4) ;
- BSS003OXRI/X (PZ5).

Les 3 piézomètres PZ1, PZ2 et PZ3 atteignent une profondeur d'environ 10 m (PZ1, PZ2, PZ3) et les piézomètres PZ4 et PZ5 sont peu profonds, environ 2 m. Le suivi piézométrique a été initié en décembre 2014 et fonctionne jusqu'à aujourd'hui. Les 3 premières années, la fréquence de mesure des niveaux piézométriques est quasiment hebdomadaire, tous les 6-8 jours entre décembre 2014 et décembre 2017. Ensuite, les relevés sont principalement mensuels entre 2018 et 2020. Les variations piézométriques au sein de la lagune de Paulin sont comparables. Les maximums et minimums piézométriques sont synchrones. L'amplitude maximum observée est de 2,70 m (09257X0109/FEST). Les piézomètres 09257X0109/FEST, 09257X0110/FNARD et 09257X0111/FSW sont plus en périphérie de la zone humide. Aucune inondation n'est observée pendant la période 2014-2020 (Illustration 23). Les piézomètres BSS003OXRI et BSS003OXQO sont dans la partie plus interne, où la cote du sol est plus basse (Illustration 24). En période de hautes eaux, le niveau piézométrique de la nappe dépasse la cote du sol ; la lagune, en ces points, est submergée.

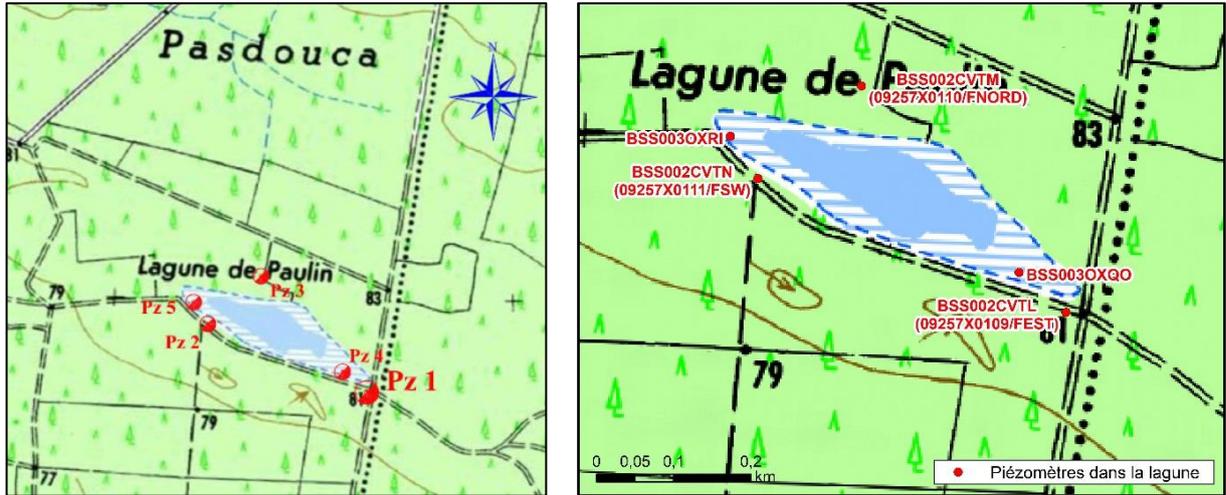


Illustration 22. Localisation des piézomètres de suivi des eaux souterraines dans la lagune de Paulin

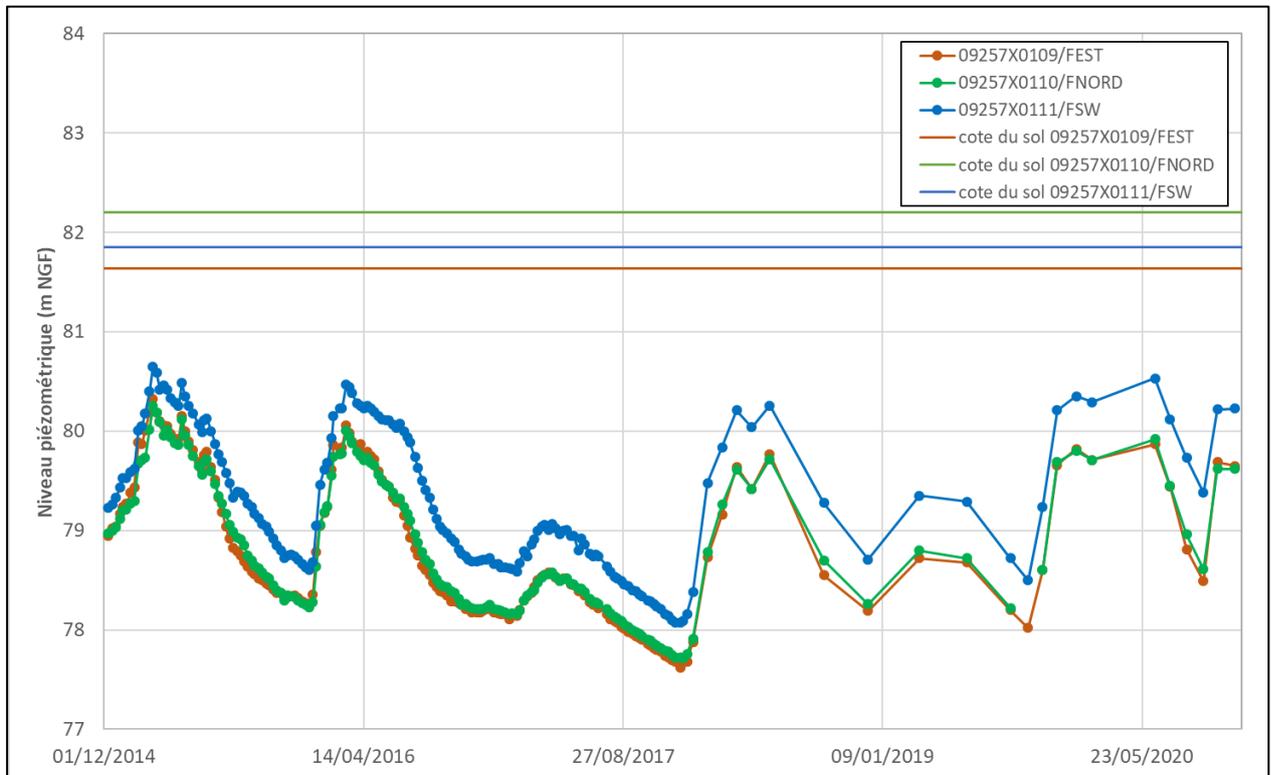


Illustration 23. Piézomètres où le niveau de la nappe ne dépasse pas la cote du sol

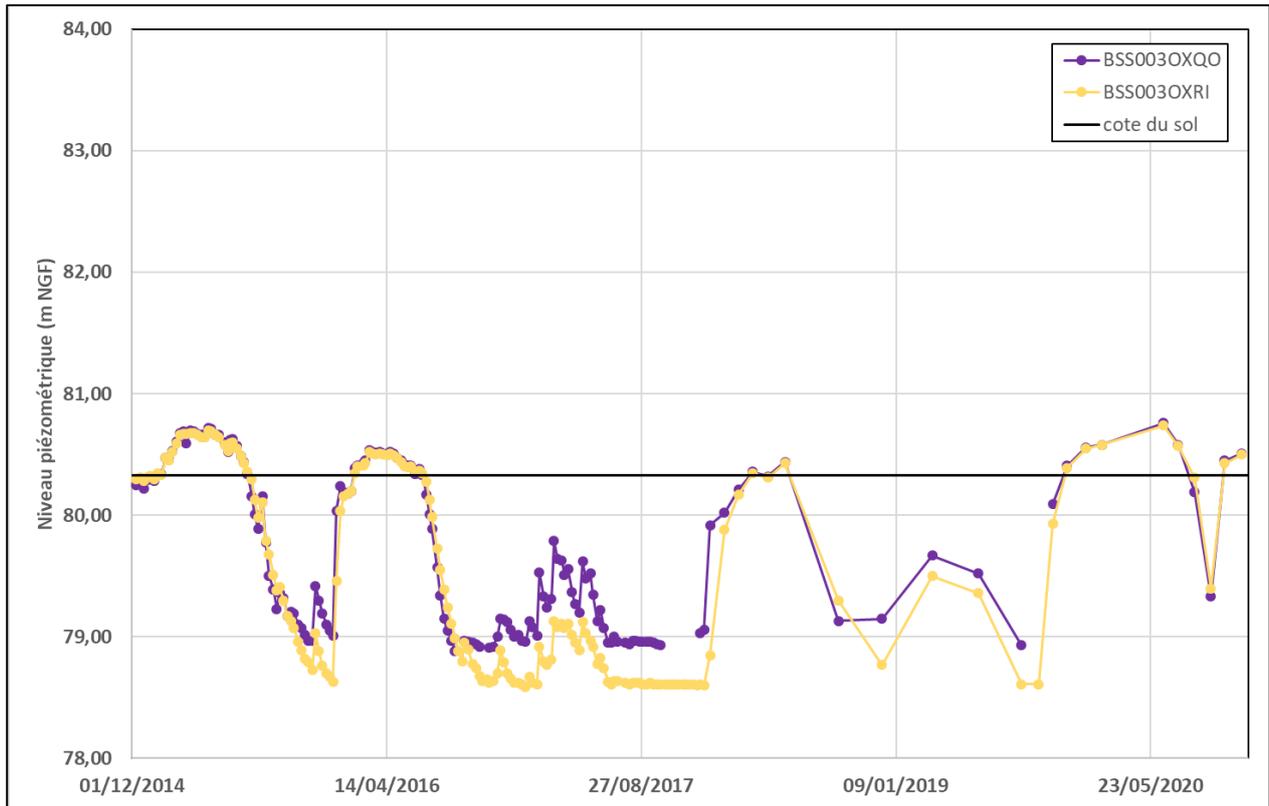


Illustration 24. Piézomètres où le niveau de la nappe dépasse la cote du sol

5.1.1. Masse d'eau souterraine

La lagune de Paulin est en interaction avec la masse d'eau souterraine FRFG046 les sables et calcaires plio-quaternaires du bassin Midouze-Adour. Cette masse d'eau souterraine couvre une superficie de 2 533 km². Onze piézomètres (source <https://ades.eaufrance.fr/>) disposent de données de suivi de la masse d'eau souterraine FRFG046 dont 9 avec des données sur la période 2014-2020, période de suivi de la lagune (Illustration 25, Illustration 27). Des calculs de corrélation croisée entre les chroniques piézométriques de la lagune et les chroniques piézométriques de la masse d'eau souterraine sont réalisés (Illustration 26).

Pour les calculs de la corrélation croisée, l'enjeu réside dans le fait de travailler avec des données qui n'ont :

- pas le même pas de temps ;
- pas les mêmes périodes (plages de définition).

En effet, la méthode de calcul nécessite que les données $Y_{a(t)}$, $Y_{b(t)}$ soient définies pour tout t . Pour contourner le problème, la stratégie suivante est adoptée :

- calcul de la corrélation croisée sur la plage de temps où les deux chroniques sont disponibles (12/2014 – 11/2020) ;
- agrégation du signal au pas de temps mensuel :
 - o le signal conservé est la moyenne des données disponibles au cours du mois.

Le signal conservé est donc lissé car les variations de charges hydrauliques à haute fréquence sont masquées par le calcul de la moyenne sur un mois. Cependant, le signal piézométrique varie en général assez peu au cours d'un mois, et le signal résiduel (moyenne mensuelle) traduit la dynamique générale de l'aquifère. D'autre part, les deux signaux qui sont comparés sont affectés

du même traitement, et sont donc affectés du même type de censure (les hautes fréquences), ce qui n'introduit donc aucun biais lors de la comparaison.

Il faut enfin retenir que l'objectif du calcul de la corrélation croisée est de comparer deux signaux, et que les traitements préparatoires sur les données permettent de disposer d'un signal continu, lisse et donc in-fine plus comparable.

Les calculs de corrélation croisée ont été réalisés entre les chroniques des piézomètres de la lagune de Paulin et les chroniques des piézomètres de la masse d'eau souterraine FRFG046. Les valeurs maximums des coefficients de corrélation croisée sont obtenues avec un décalage de 0 mois (Illustration 26).

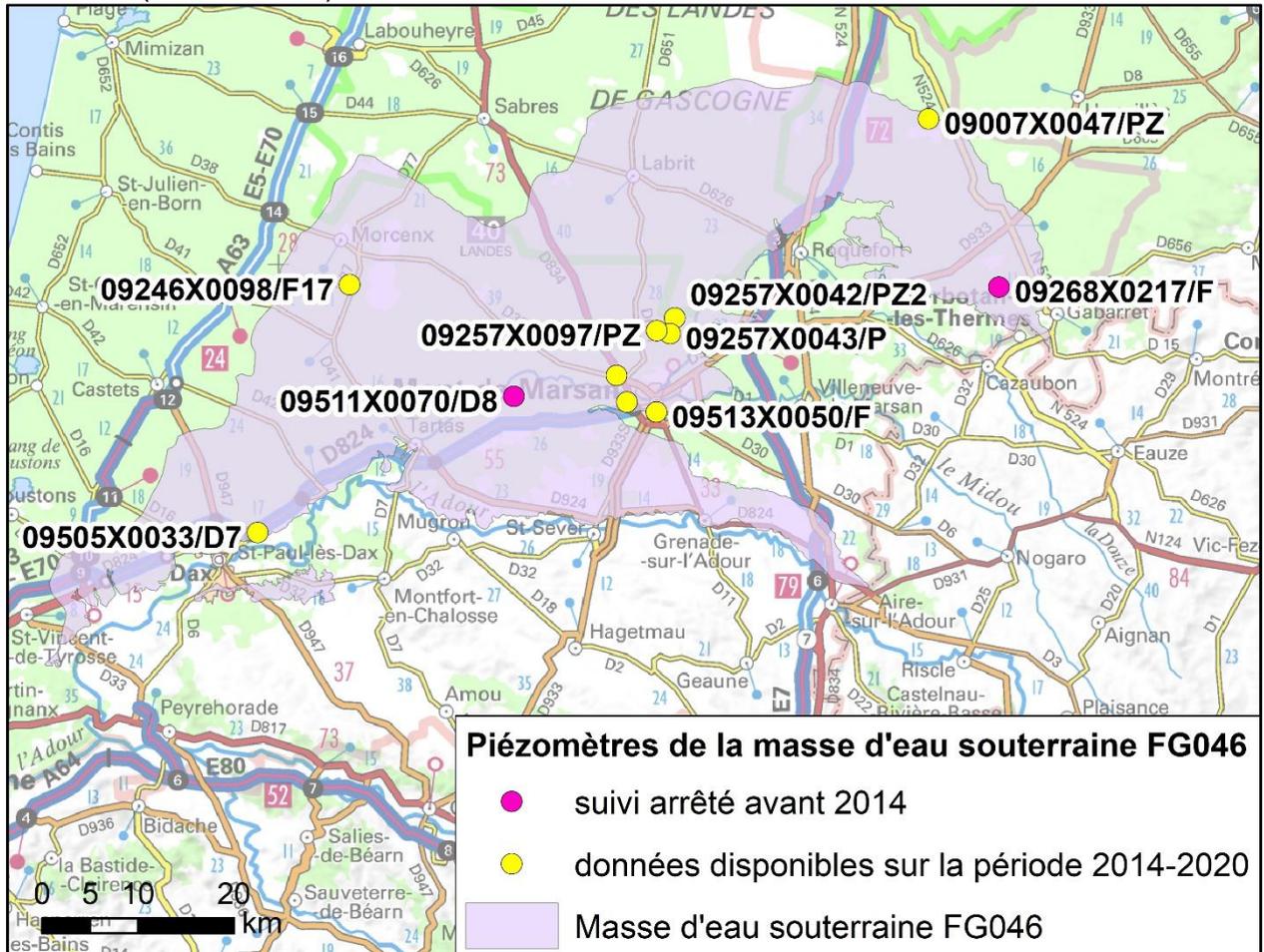


Illustration 25. Localisation des 11 piézomètres de la masse d'eau souterraine FG046, les sables et calcaires plioquaternaires du bassin Midouze-Adour

		Piézomètres de la lagune				
		09257X0109	09257X0110	09257X0111	BSS003OXQO	BSS003OXRI
Piézomètres de la masse d'eau souterraine FG046	09007X0047/PZ	0,8089	0,7957	0,8167	0,8449	0,7819
	09246X0098/F17	0,8609	0,8604	0,8860	0,8931	0,8567
	09257X0042/PZ2	0,7034	0,7015	0,6708	0,5873	0,6739
	09257X0043/P	0,8210	0,8177	0,7882	0,7241	0,7845
	09257X0097/PZ	0,9736	0,9703	0,9534	0,9234	0,9307
	09505X0033/D7	0,9451	0,9592	0,9558	0,8969	0,9220
	09512X0088/PZ4	0,8408	0,8381	0,8470	0,8582	0,8158
	09513X0022/F	0,6847	0,6788	0,6456	0,5917	0,7144
09513X0050/F	0,8005	0,8015	0,7727	0,7218	0,7894	

Illustration 26. Coefficient de corrélation maximum des données piézométriques de la lagune et de la masse d'eau souterraine FG046

Les coefficients de corrélation entre les piézomètres sont élevés, entre 0,89 et 0,99. La relation linéaire est forte entre ces variables et peut permettre d'utiliser un piézomètre de la masse d'eau souterraine comme indicateur du niveau de la nappe dans la lagune. Le piézomètre 09257X0097/PZ est le piézomètre avec les coefficients de corrélation les plus élevés, il apparaît être le meilleur indicateur du niveau de la nappe pour la lagune de Paulin. Les deux signaux évoluent conjointement, une diminution du signal piézométrique de la masse d'eau souterraine FRFG046 est accompagnée d'une diminution du niveau de la nappe de la zone humide, et inversement.

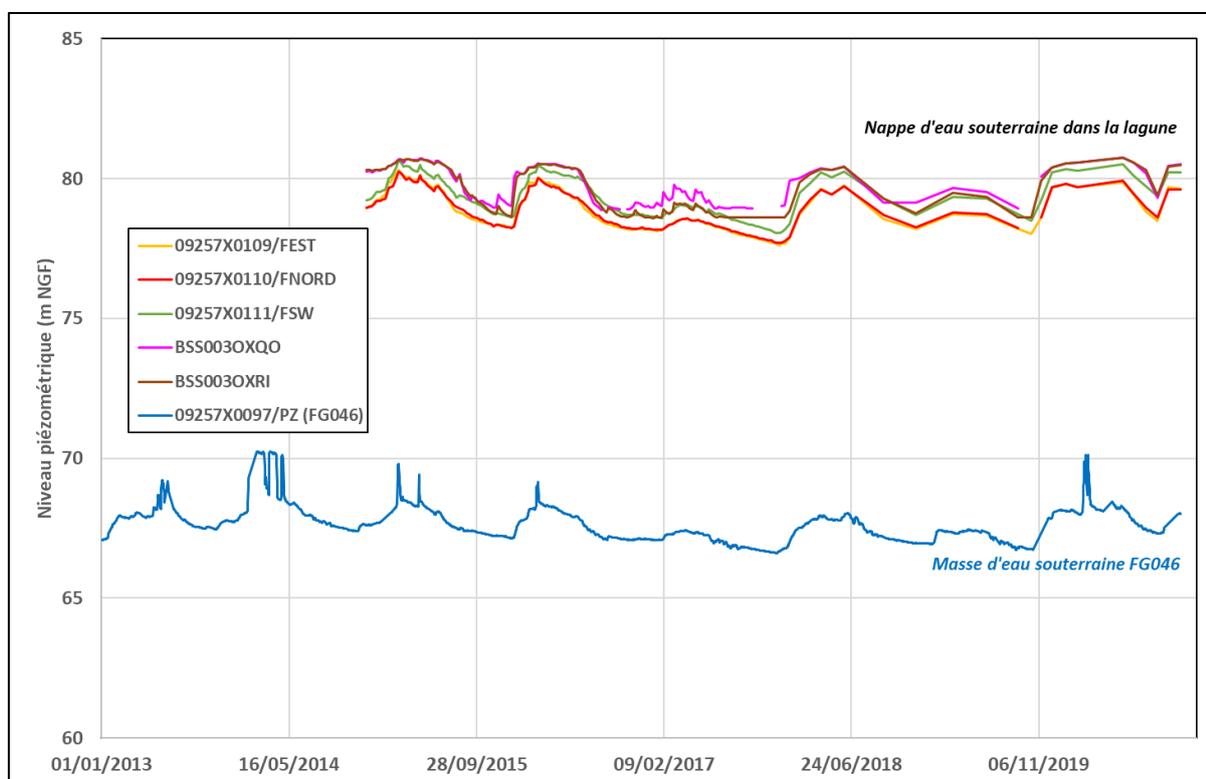


Illustration 27. Fluctuations piézométriques sur la période 2013-2020 de la nappe d'eau souterraine de la lagune et de la masse d'eau souterraine FG046 au droit du piézomètre 09257X0097/PZ

Les moyennes mensuelles du piézomètre 09257X0097/PZ sont un bon indicateur des fluctuations piézométriques de la nappe d'eau souterraine.

5.1.2. Historique

D'après l'étude du GERE¹⁰ (oct.1993 – sept. 1994), la lagune de Paulin était « à l'époque en eau toute l'année » (Crabos *et al.*, 2013) notamment dans sa partie centrale qui hébergeait des espèces aquatiques telles que les utriculaire ainsi que la formation d'un important tapis flottant de sphaignes. La zone périphérique subissait également une inondation prolongée. Depuis environ 1999, la lagune n'était plus en eau.

Lors de l'élaboration du diagnostic écologique de la lagune de Paulin en 2012 (avenant au programme de gestion pluriannuel 2013-2017 de la lagune de Paulin), celle-ci était sèche depuis une dizaine d'années. Ce manque d'eau a provoqué l'installation d'une lande à molinie sur une grande partie de la lagune ainsi qu'une colonisation néfaste par les pins et la bourdaine. Depuis l'hiver 2012-2013, la région a bénéficiée d'une pluviométrie assez conséquente permettant dès lors à la lagune de retrouver un fonctionnement hydraulique normal.

Sur la période 2007-2013, le niveau piézométrique de la masse d'eau souterraine au piézomètre 09257X0097/PZ était plus bas en moyenne (67 m NGF) que sur la période 2014-2020 (67,6 mNGF). La corrélation entre les deux signaux permet de supposer que le niveau piézométrique dans la lagune était plus bas, ce qui est en cohérence avec l'observation d'une lagune sèche sur la dizaine d'années antérieures à 2012.

La masse d'eau souterraine, hormis l'évapotranspiration, est le seul exutoire de la lagune. Si le niveau piézométrique dans la masse d'eau souterraine s'abaisse, conjointement le niveau piézométrique dans la lagune s'abaisse. L'état des lieux 2019 de la masse d'eau souterraine FG046¹¹, Sables et graviers plio-quadernaires de la Midouze et de l'Adour (1 737 km²) fait état d'un bon état quantitatif de la masse d'eau cependant elle est exploitée pour l'alimentation en eau potable et pour un usage industriel. La pression prélèvement est estimée comme significative.

¹⁰ Groupe d'Etudes et de Recherche en Ecologie Appliquée

¹¹ http://adour-garonne.eaufrance.fr/upload/DOC/FICHES/ME/EDL2019/EDL2019_FRFG046A.pdf

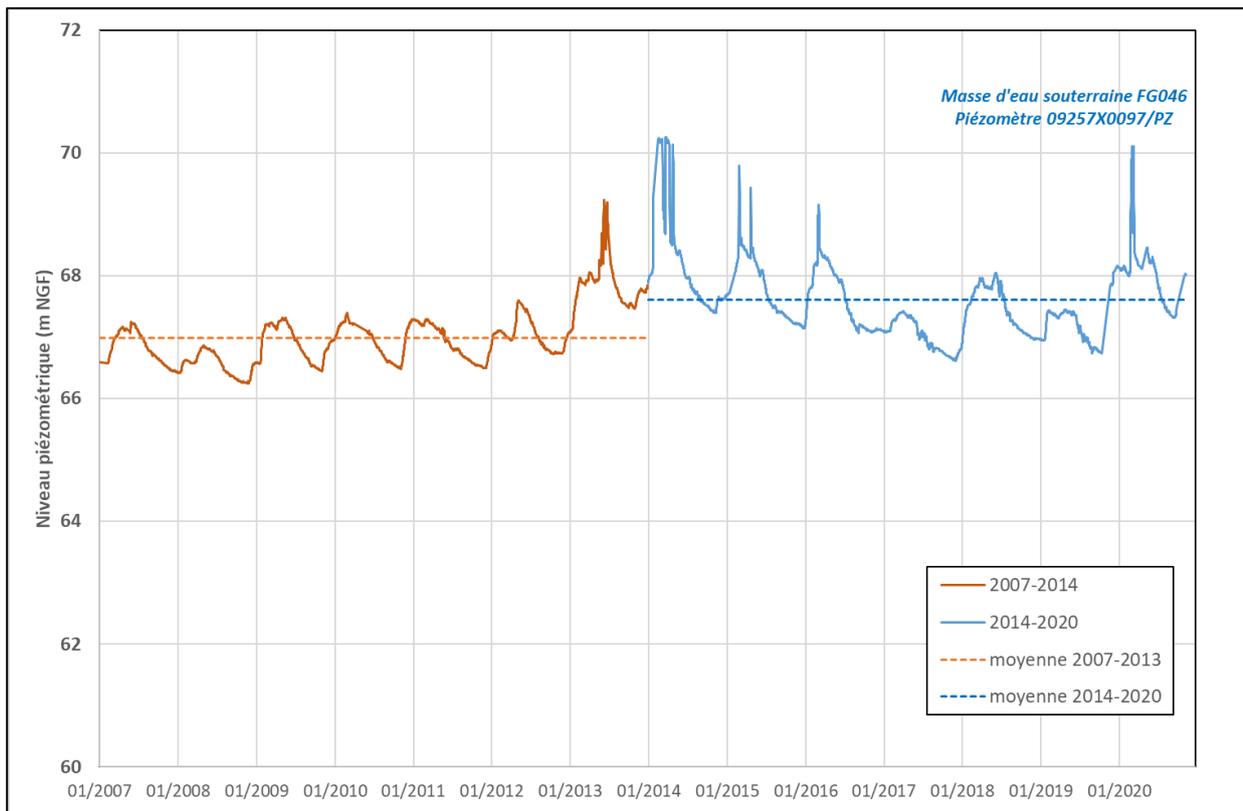


Illustration 28. Niveau piézométrique sur la période 2007-2020 du piézomètre 09257X0097/PZ (FG046)

Le niveau piézométrique enregistré au point 09257X0097/PZ de la masse d'eau souterraine FRFG046 peut être utilisé comme indicateur moyen des niveaux de nappe dans la lagune de Paulin. Si le niveau baisse dans la masse d'eau (faible précipitation, changement climatique, prélèvements d'eau souterraine), cela aura un impact sur le niveau de la nappe au niveau de la lagune.

La lagune de Paulin est très dépendante des eaux souterraines, elle est dépendante du niveau d'eau dans la masse d'eau souterraine FRFG046. L'état quantitatif de la masse d'eau souterraine peut influencer les fonctions hydrologiques, biogéochimiques ou d'accomplissement du cycle biologique des espèces (Gayet *et al.*, 2006) de la lagune de Paulin.

5.2. ECOLOGIE

5.2.1. Approche qualitative

Les habitats naturels au sein de la lagune de Paulin sont peu diversifiés (Tableau 3, Illustration 29). On y retrouve essentiellement des formations à Molinie (*Molinia caerulea*) plus ou moins envahies par la bourdaine (*Frangula alnus*). Ces formations sont localisées au centre de la lagune et semblent être la formation végétale la mieux représentée au sein du site. Les limites nord et sud de la lagune sont quant à elles dominées par des fourrés de bourdaine avec par endroit des faciès d'envahissement par le pin maritime (*Pinus pinaster*). Les limites sud-est et nord-ouest de la lagune présentent des formations moins humides dominées par le chêne pédonculé (*Quercus robur*). Enfin, le nord-ouest du site est dominé par des gazons amphibies à jonc bulbeux (*Juncus bulbosus*) et à souchet à tiges nombreuses (*Eleocharis multicaulis*).

Habitats naturels	Code CORINE	Code EUNIS	Syntaxon	Zone humide
Gazon des niveaux supérieurs	22.31	C3.41	<i>Littorelletea uniflorae</i>	Oui
Gazon des niveaux supérieurs avec envahissement par le Pin	22.31	C3.41	<i>Littorelletea uniflorae</i>	Oui
Moliniaie	37.31	E3.51	<i>Molinion caeruleae</i>	Oui
Moliniaie avec envahissement par la Bourdaine	37.31	E3.51	<i>Molinion caeruleae</i>	Oui
Fourré à Bourdaine	44.92	F9.2	<i>Salicion cinereae</i>	Oui
Fourré à Saule acuminé	44.1	G1.11	<i>Salicion cinereae</i>	Oui
Boisement de Chênes	41.2	G1.A1	<i>carpinion betuli</i>	Non
Boisement de Pins	42.81	G3.71	<i>Pino pinastri-Quercetum ilicis</i>	Non

Tableau 3. Habitats naturels de la lagune de Paulin

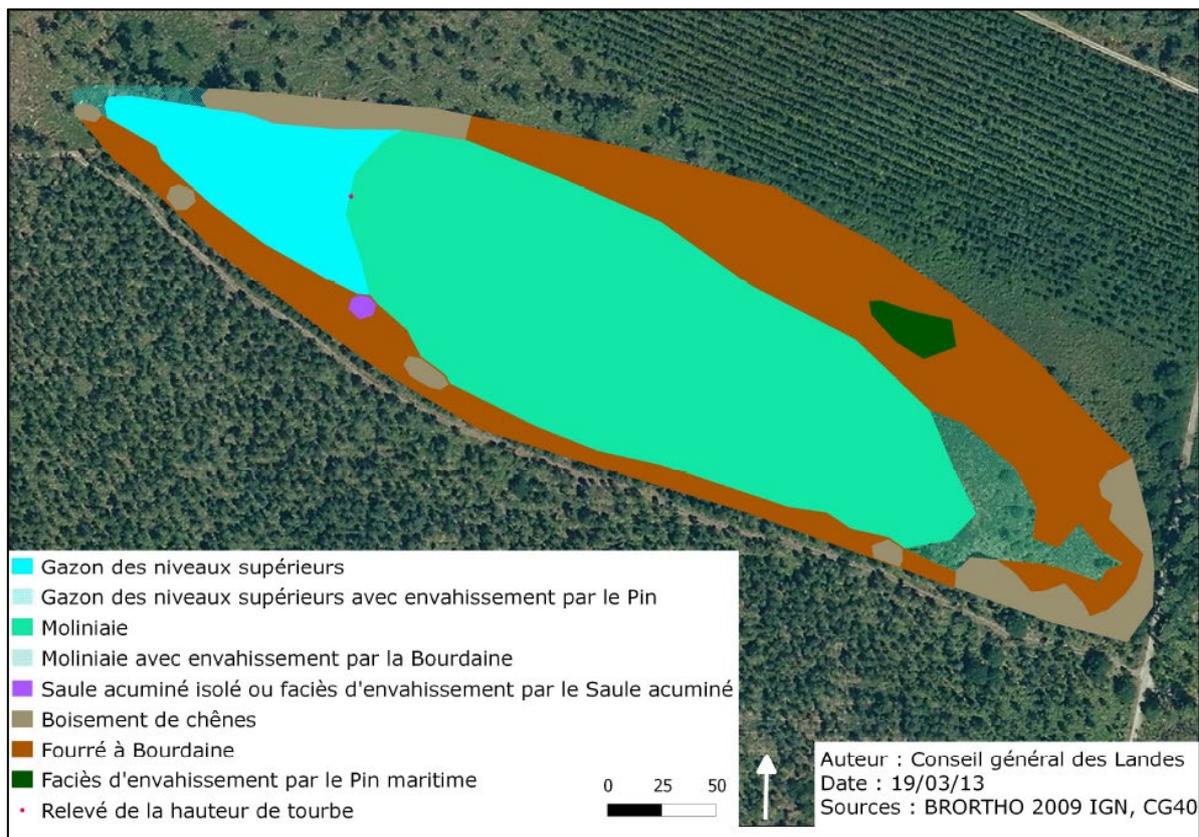


Illustration 29. Cartographie des habitats naturels (Crabos et al., 2013)

5.2.2. Approche quantitative

Le Tableau 4 et l'illustration 30 représentent la surface de chaque habitat et leur part relative au sein de la lagune de Paulin.

Habitats naturels	Surface (Ha)	Représentativité (%)
Gazon des niveaux supérieurs	0,558	9,36

Gazon des niveaux supérieurs avec envahissement par le Pin	0,048	0,8
Moliniaie	2,77	46,49
Moliniaie avec envahissement par la Bourdaine	0,261	4,38
Fourré à Bourdaine	1,833	30,76
Fourré à Saule acuminé	0,011	0,18
Boisement de Chênes	0,414	6,95
Boisement de Pins	0,064	1,08
Total	5,959	100

Tableau 4. Surface (en ha et en %) des habitats naturels de la lagune de Paulin

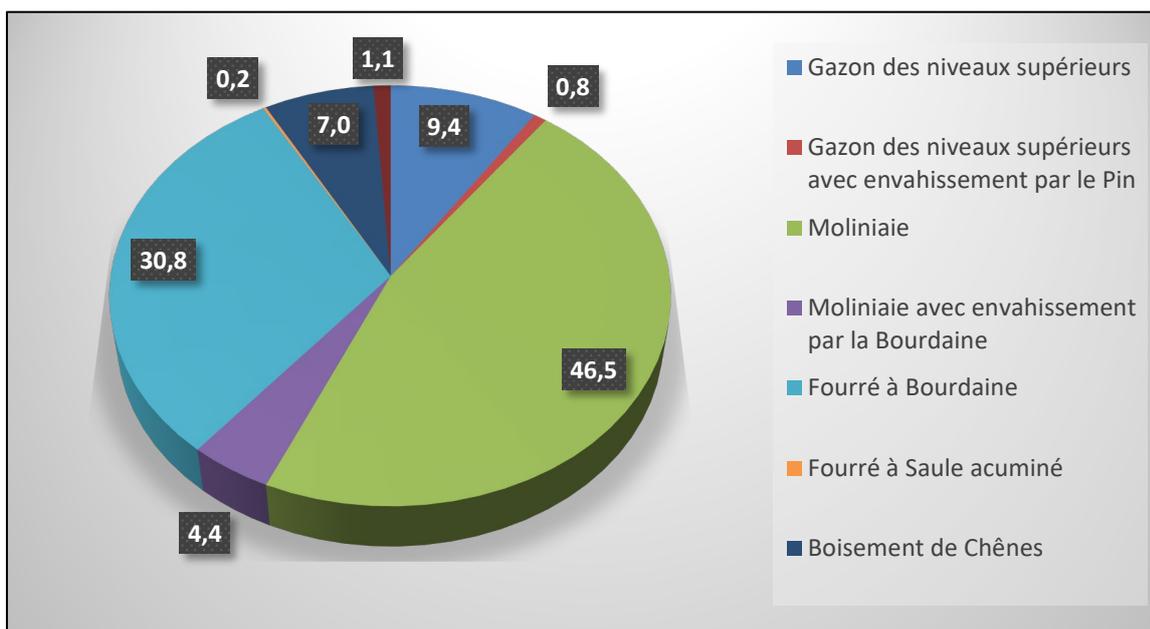


Illustration 30. Représentativité (%) des habitats naturels de la lagune de Paulin en 2013

Au regard de ces données, l'habitat naturel le mieux représenté au sein de la lagune de Paulin est la moliniaie. Cette formation occupe une surface d'environ 2,77 hectares soit près de 47% de la surface totale du site. En y ajoutant les faciès envahis par la Bourdaine, la part de cet habitat au sein de la lagune de Paulin s'élève à plus de 50%. Ainsi près de la moitié du site est dominé par la même formation végétale.

Les fourrés à Bourdaine sont également bien représentés au sein du site avec une part relative de près de 31%.

Les gazons amphibies, qui sont les habitats avec la plus forte valeur patrimoniale, occupent une surface d'environ 0,7 hectare soit près de 9,5 % de la surface totale de la lagune de Paulin.

Globalement, la lagune de Paulin présente une diversité d'habitats peu diversifiés et largement dominés par certaines formations végétales. Cependant, elle accueille sur près de 10 % de sa surface des communautés amphibies relativement rares et à haute valeur patrimoniale.

5.3. PEDOLOGIE

Concernant les sols de la lagune de Paulin les données disponibles sont issues d'un rapport du BRGM de 2015 sur les caractéristiques géologiques et hydrogéologiques des lagunes landaises

(Corbier, 2015). Les profils correspondent à des prélèvements réalisés sur 5 sites de lagunes landaises (Illustration 31). Les sondages ont été réalisés à la tarière manuelle jusqu'à 70 cm de profondeur. D'un point de vue pédologique, seule la description schématique d'un solum est donnée. La lagune de Paulin, située à Cère, est composée d'une tourbe sur des sables bruns fins à 10 cm puis des sables roux à 40 cm (Corbier, 2015). Cette information est insuffisante pour permettre une interprétation des conditions hydriques actuelles ou passées du sol.

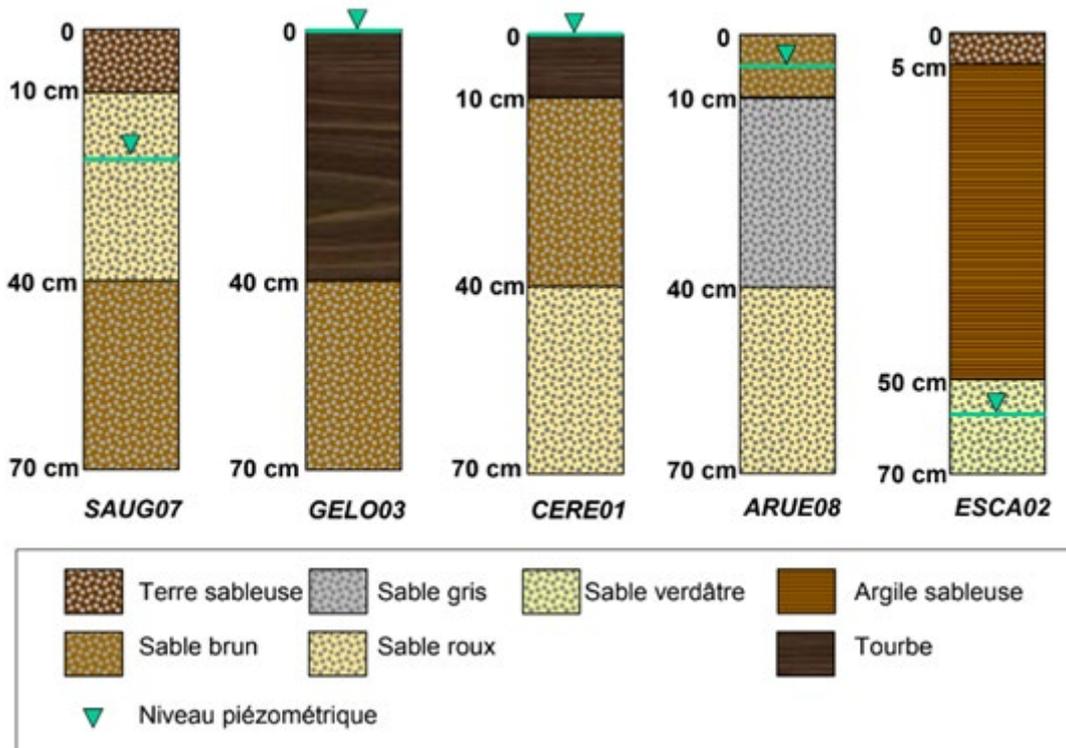


Illustration 31. Horizons superficiels de 5 sites de lagunes landaises (Corbier, 2015), l'horizon CERE01 correspond à la lagune de Paulin

5.4. INDICE FLORISTIQUE ET BATTEMENT DE LA NAPPE

D'après l'étude réalisée par le GERE (oct. 1993 – sept. 1994, Crabos *et al.*, 2013), la lagune de Paulin ne subit plus de submersion depuis 1999. A cette époque, la partie centrale de la Lagune était occupée par une zone en eau hébergeant des espèces aquatiques telles que les utriculaires ainsi que des formations de tapis flottant de sphaignes. L'avenant au programme pluriannuel de gestion 2013-2017 de la lagune de Paulin précise que le diagnostic écologique entrepris en 2012 a permis de mettre en évidence une évolution de la composition végétale du site. Les données disponibles de 2012 montrent que la partie centrale de la lagune de Paulin a évolué vers des formations dominées par la molinie bleue (*Molinia caerulea*). L'installation de la molinie bleue ainsi que de la bourdaine (*Frangula alnus*) et du pin maritime (*Pinus pinaster*) serait le résultat de l'assèchement constaté de la lagune.

Afin d'évaluer la contribution de la masse d'eau souterraine sur l'évolution des communautés végétales du site, l'indice floristique d'engorgement ([Indicateur I02](#)) de la boîte à outils de suivi des zones humides RhoMeo a été calculé (collectif RhoMéo, 2014). Les données utilisées pour l'évaluation de cet indicateur sont les relevés botaniques réalisés en 2012, 2015 et 2019. Les données phytosociologiques transmises n'ont pas été utilisées pour le calcul de l'indicateur étant donné que la localisation précise des relevés n'a pu être établie et que les jeux de données entre les différentes années sont relativement différents.

Deux jeux de données différents seront utilisés dans le cadre du calcul de cet indicateur :

- Les relevés botaniques de 2012, 2015 et 2019 réalisés sur l'ensemble de la lagune ;
- Les relevés botaniques de 2019 réalisés au sein des gazons amphibies du site.

L'indice floristique d'engorgement RhoMéo permet d'évaluer l'optimum de chaque espèce vis-à-vis du niveau moyen de la nappe : c'est sa valeur indicatrice. Les valeurs indicatrices utilisées ici sont celles d'Ellenberg (1974) et Ellenberg *et al.* (1992). Les valeurs indicatrices vont de 1 à 10 : espèces des milieux les plus secs vers les milieux les plus humides. L'indice de niveau d'engorgement sera ensuite calculé comme la moyenne des valeurs indicatrices des espèces présentes à l'échelle d'une placette.

Les résultats suivants (Illustration 32, Illustration 33, Illustration 34, Illustration 35, Illustration 36) présentent la note moyenne de l'indice par relevé (H_e) ainsi que l'histogramme du nombre d'occurrences d'espèces par valeurs indicatrices.

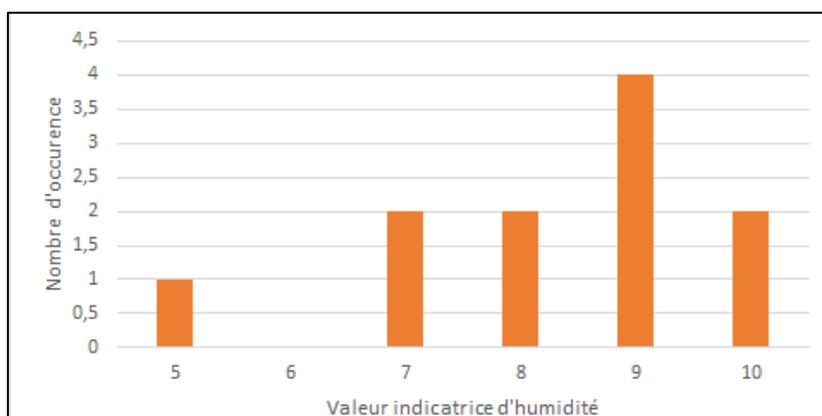


Illustration 32. Relevé 1, lagune de Paulin, août 2012, indice floristique d'engorgement (H_e) = 8,27

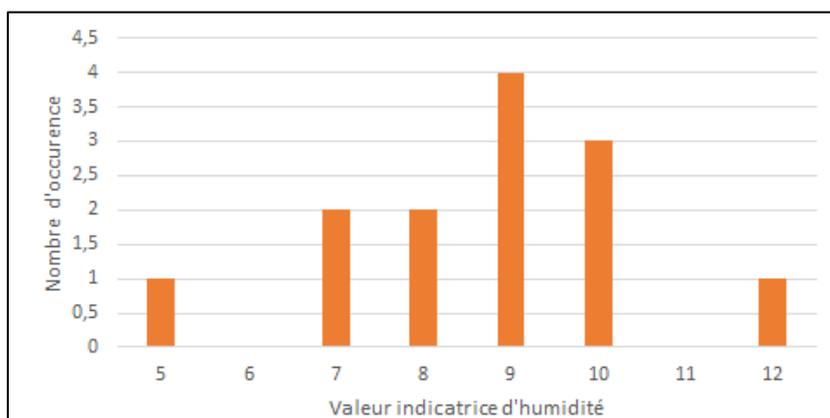


Illustration 33. Relevé 2, lagune de Paulin, 22/09/2015, indice floristique d'engorgement (H_e) = 8,69

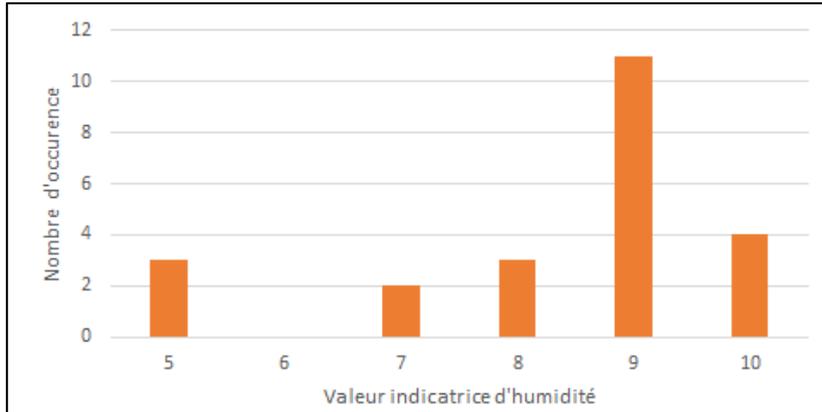


Illustration 34. Relevé 3, lagune de Paulin, 26/08/2019, indice floristique d'engorgement (He) = 8,34

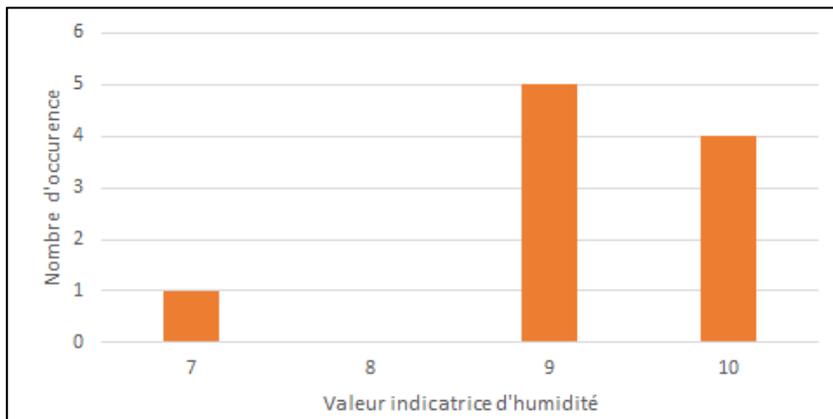


Illustration 35. Relevé 4, gazon amphibie à *Eleocharis multicaulis*, 26/08/2019, indice floristique d'engorgement (He) = 9,2

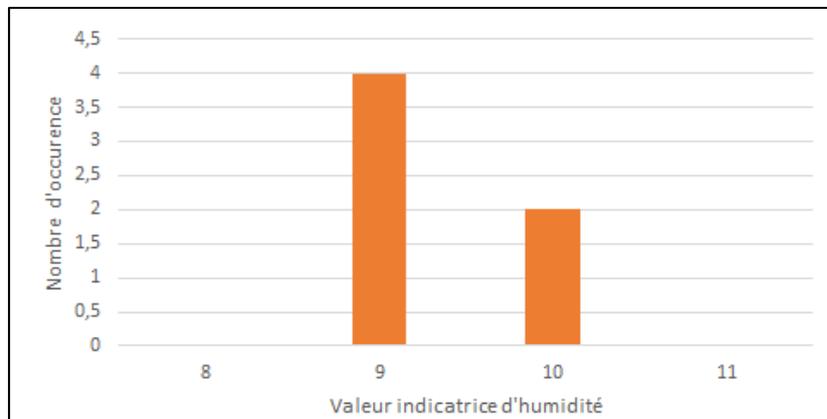


Illustration 36. Relevé 4, gazon amphibie à *Agrostis canina*, 26/08/2019, indice floristique d'engorgement (He) = 9,33

Le résultat du calcul de l'indice floristique d'engorgement se corrèle positivement avec le niveau moyen annuel ou estival de la nappe. C'est-à-dire que plus la valeur de l'indice est élevée, plus le niveau moyen de la nappe est proche de la surface. Les valeurs médianes pour les zones humides varient de 3,77 pour les marais de plaine drainée ou les marais de pente à 8,25 ou plus pour les tourbières à sphaigne non altérée.

Les résultats obtenus pour les trois premiers relevés (Illustration 32, Illustration 33, Illustration 34) concernant l'ensemble du site (8,27 à 8,69) permettent donc bien de constater le caractère fortement humide de la lagune. Les résultats variant entre 8,27 et 8,69, le niveau de fluctuation

de la nappe au niveau de la lagune semble peu important entre 2012 et 2019. Il est ainsi possible de constater une augmentation de la hauteur de la nappe entre 2012 et 2015 puis un léger abaissement entre 2015 et 2019.

Les résultats entre 2015 et 2019 sont cependant à relativiser au regard de la richesse spécifique de chacun de ces relevés. En effet, le relevé de 2019 présentant une richesse spécifique plus importante que celui de 2015, la note obtenue est moins importante étant donné que l'indice se base sur la moyenne des valeurs indicatrices. Ce résultat s'interprète soit par un réel abaissement du niveau de la nappe soit par un possible biais observateur.

Les histogrammes du nombre d'occurrences d'espèces par valeurs indicatrices permettent de constater la dominance des espèces appartenant à la classe 9. Cette classe intègre les espèces se développant au sein des sols souvent trempés et pauvres en air. Parmi les espèces appartenant à cette classe, on peut citer l'agrostide des chiens (*Agrostis canina*) ou le millepertuis des marais (*Hypericum elodes*). Le nombre d'espèces présentes au sein des classes de valeurs indicatrices 7, 8 et 10 semble quant à elle relativement similaire selon les relevés.

L'analyse des données piézométriques a permis de constater que le niveau de la masse d'eau souterraine était plus bas en moyenne sur la période 2007-2013 que sur la période 2014-2020 (Illustration 28). Ceci semble également cohérent avec les observations d'une lagune sèche sur la dizaine d'années antérieures à 2012. Les relevés botaniques transmis débutant en 2012, il n'est pas possible d'attester de cette tendance à l'aide de cet indicateur cependant les résultats obtenus semblent cohérents avec cette hypothèse. En effet, la valeur de l'indice floristique d'engorgement est la plus faible en 2012 et sa valeur augmente avec le temps. Comme cité précédemment, la valeur de 2019 est à relativiser mais semble également suivre cette tendance.

Concernant les relevés réalisés au sein des communautés végétales amphibies, les résultats présentent une différence notable avec ceux de l'ensemble de la lagune. Ces communautés végétales sont celles identifiées comme potentiellement en interaction directe avec la masse d'eau souterraine. Un relevé a été réalisé au sein d'une communauté dominée par le souchet à tiges nombreuses (*Eleocharis multicaulis*, Illustration 35), l'autre dominée par l'agrostide des chiens (*Agrostis canina*, Illustration 36).

Les résultats obtenus permettent de constater que la valeur de l'indice floristique d'engorgement est nettement plus importante que pour l'ensemble de la lagune (relevé 1,2 et 3). En effet, les valeurs obtenues varient entre 9,2 et 9,33. Ainsi il est possible d'affirmer que les secteurs dominés par ces communautés amphibies sont ceux où le niveau de la nappe est le plus haut. La bibliographie stipulant que ces communautés végétales sont tributaires de l'alternance entre des périodes d'inondations et d'exondations, les résultats obtenus semblent cohérents.

Le piézomètre BSS003OXRI permet également de constater cette tendance. Ce piézomètre est celui localisé le plus proche de ces communautés végétales et les résultats obtenus sur ce dernier semblent être en adéquation avec la nécessité de ces communautés à subir des périodes d'inondation et d'exondation. En effet, les résultats de ce piézomètre permettent de constater que le niveau de la nappe dépasse la cote du sol (Illustration 24).

Il est possible d'affirmer que l'installation et le maintien de ces communautés végétales est liée aux battements de la nappe souterraine. De plus, les observations antérieures à 2012 indiquaient la présence d'une zone en eau au centre de la lagune avant son atterrissement et la colonisation de la molinie. Il est possible de supposer que la surface de communauté amphibie devait être beaucoup plus importante auparavant étant donné que ces formations se développent en bordure des plans d'eau au niveau des zones d'exondations.

Les gazons amphibies semblent donc fortement liés aux fluctuations du niveau de la nappe et en particulier à des périodes de submersion et d'immersion. Ainsi une nappe qui ne dépasserait pas la cote du sol serait un facteur limitant au développement de ces communautés amphibies. Cependant le manque de données brutes sur la lagune de Paulin et en particulier des données avant 2012 ne permet pas de confirmer cette hypothèse.

5.5. CONCLUSION

La lagune de Paulin, zone humide de versant et bas-versant, est très dépendante des eaux souterraines. Elle est témoin des niveaux de nappe superficielle représentée par la masse d'eau souterraine FRFG046, les sables et calcaires plio-quaternaires du bassin Midouze-Adour. Les signaux piézométriques dans la zone humide et de la masse d'eau souterraine sont très fortement corrélés, le piézomètre 09257X0097/PZ peut être utilisé comme indicateur des eaux souterraines et de la zone humide.

Les données disponibles ont permis de mettre en évidence le lien entre végétation et conditions hydriques. Lorsque ces dernières changent, la végétation de la lagune évolue. En fonction des espèces d'intérêt floristique, on pourrait estimer des indicateurs de bon fonctionnement du milieu humide comme une profondeur maximum du niveau d'eau dans la zone humide, une période minimum d'immersion chaque année, une fréquence d'inondation pluriannuelle, un niveau maximum d'inondation. Ces indicateurs, compte tenu de la corrélation forte entre le signal piézométrique dans la lagune et dans la masse d'eau, pourraient être reliés à des cotes piézométriques au piézomètre indicateur 09257X0097/PZ. Ils permettraient de déterminer des seuils de gestion de la masse d'eau souterraine, des seuils au-delà desquels s'ils sont dépassés à long terme, ces dépassements remettraient en cause le bon fonctionnement de l'écosystème terrestre dépendant des eaux souterraines qu'est la lagune de Paulin et pourraient conduire à sa dégradation et remettraient également en cause le bon état de la masse d'eau souterraine FRFG046.

6. Les marais de Sacy-le-Grand

Les informations relatives aux marais de Sacy-le-Grand, leur fonctionnement et leurs caractéristiques sont principalement issues des rapports d'études de STUCKY & ARMINES-CIG (2000), STUCKY (2008) et de SETEC-HYDRATEC et al. (2020) sur les Marais de Sacy.

Les marais de Sacy-Le-Grand, proche de la vallée de l'Oise (Illustration 37), se situent au contact de deux régions naturelles, le plateau Picard au nord et les monts et collines du Clemontois au sud (STUCKY, 2008). Ils constituent une vaste zone humide et tourbeuse (près de 1 000 ha). Ils forment une dépression elliptique (8 km sur 2 km) allongée dans la direction est-ouest (Illustration 37). Tous les écoulements de surface convergent vers les marais qui sont drainés en leur centre par la Frette canalisée qui rejoint l'Oise au lieu-dit Saint Antoine.

Les marais de Sacy sont enclavés ; une zone plane de faible altitude (~ 32 m) entourée de collines boisées culminant autour de 150 m qui bordent le sud du marais. Le réseau hydrographique de surface présente une extension très faible et se limite essentiellement au système hydraulique de la Frette, cours d'eau canalisé au XVIII^{ème} siècle et qui assure le drainage des marais. Des plans d'eau et mares, naturels ou totalement artificiels s'étendent (environ 1,2 km²) dans le marais mais également en périphérie (SETEC-HYDRATEC et al., 2020).

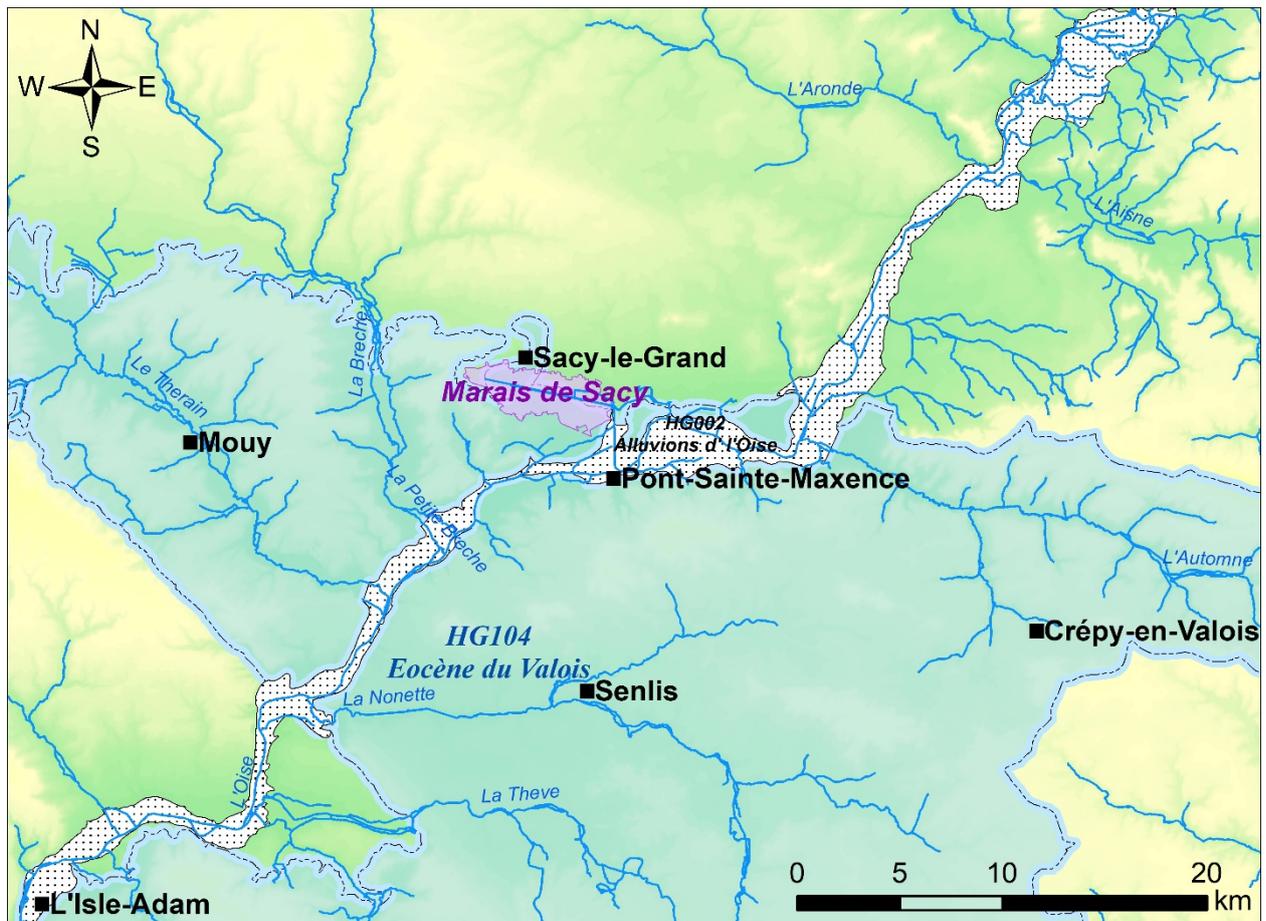


Illustration 37. Localisation du marais de Sacy

6.1. GEOLOGIE

Cette région appartient à la grande unité sédimentaire du bassin de Paris. C'est une zone de transition entre les collines tertiaires du sud du marais et le plateau crayeux au nord. Les marais de Sacy-Le-Grand occupent une dépression allongée de direction ouest-est au contact de la craie campanienne surmontée d'argiles à silex qui se prolonge de quelques degrés en direction du sud – sud-ouest sous des formations tertiaires peu perméables. La succession des terrains du sommet à la base est la suivante (Illustration 38, Illustration 39) :

- Formations récentes de limons de plateau ;
- Calcaires marins du Lutétien très fossilifères ;
- Formation sableuse à intercalations argileuses du Cuisien surmontée par les argiles de Laon ;
- Sables fins quartzeux (1-2 m) et argiles grises à bleuâtres (~20 m) du Sparnacien ;
- Sables fins glauconieux du Thanétien (sables de Bracheux) ;
- Craie blanche à silex noirs du Crétacé supérieur (d'environ une centaine de mètres).

Les sables de Bracheux (Thanétien) constituent le substratum des marais sur une grande partie au nord des Marais (SETEC-HYDRATEC *et al.*, 2020). Les argiles sparnaciennes surmontent les sables de Bracheux (Thanétien). Elles ne sont présentes qu'au sud des marais (Illustration 40). Elles constituent le substratum des marais dans son bord centre sud.

Les zones de dépression développée sur les argiles sparnaciennes et les sables de Bracheux ont permis la formation de tourbes dans la vallée de l'Oise, au niveau de la grande dépression topographique des marais de Sacy-Le-Grand, formant ainsi une importante tourbière qui a été exploitée. La tourbe, qui est présente dans tout le marais, repose au nord directement sur les sables de Bracheux et au sud sur les argiles sparnaciennes. Son épaisseur varie de 4 m au nord et moins d'un mètre vers Monceaux et le bois des Ageux.

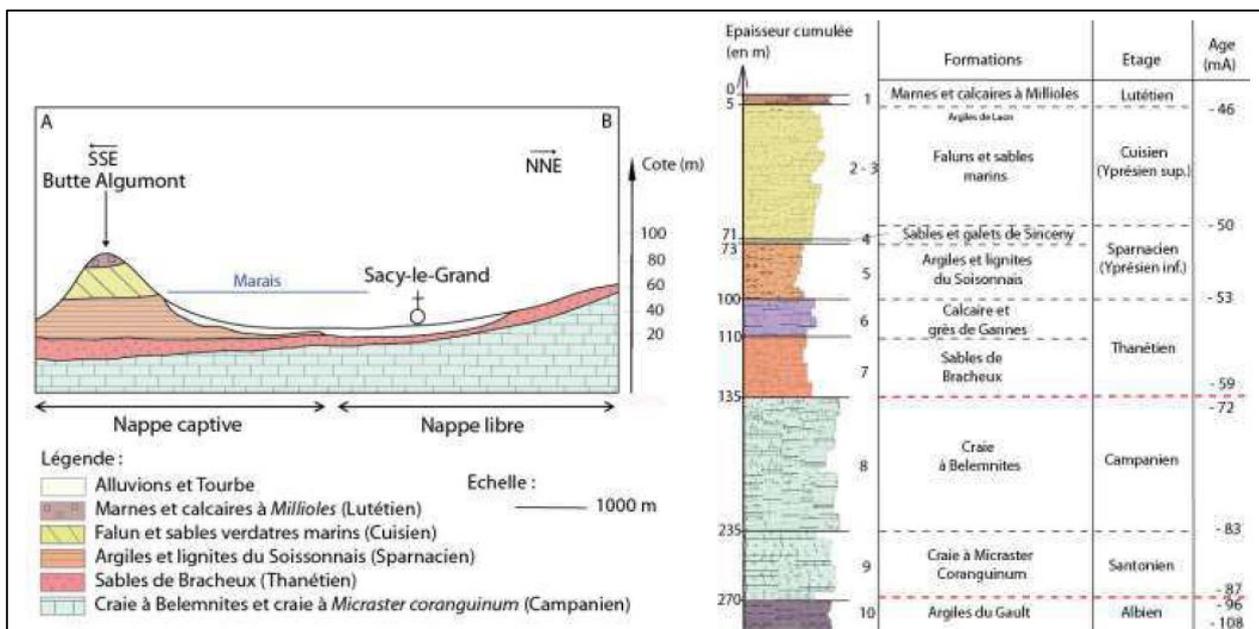


Illustration 38. Coupe géologique des marais de Sacy et log stratigraphique (Gallois, 2011)

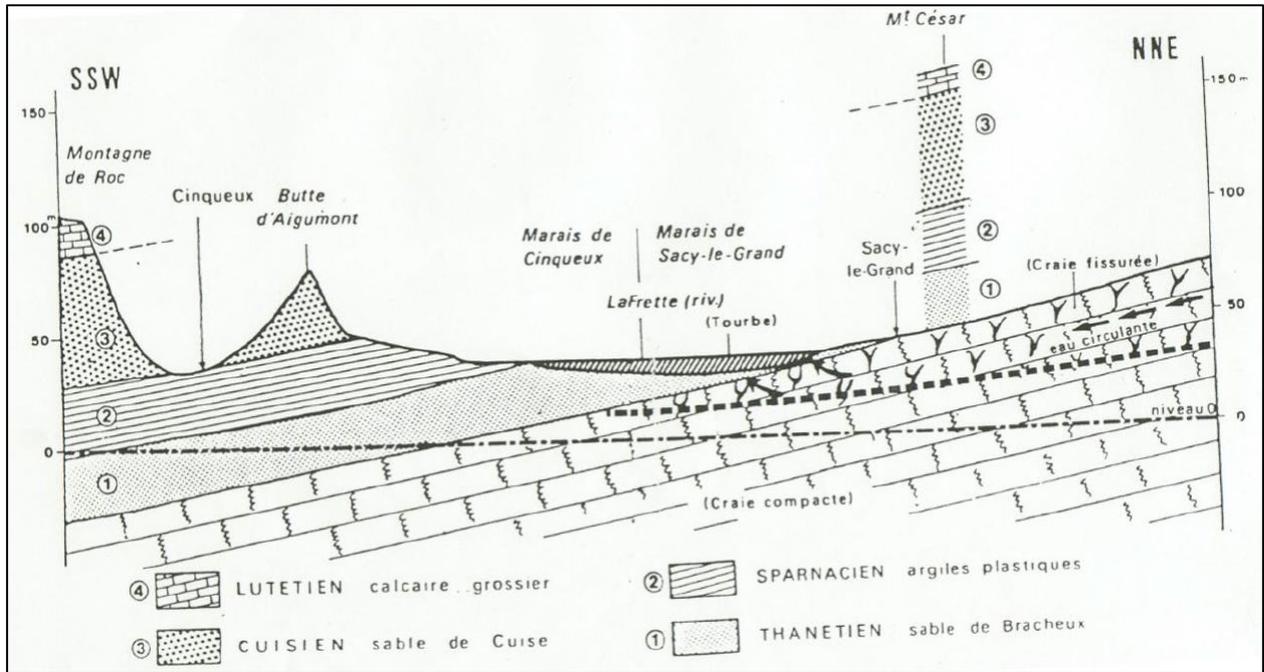


Illustration 39. Coupe géologique des marais (SETEC-HYDRATEC et al., 2020 source BRGM)

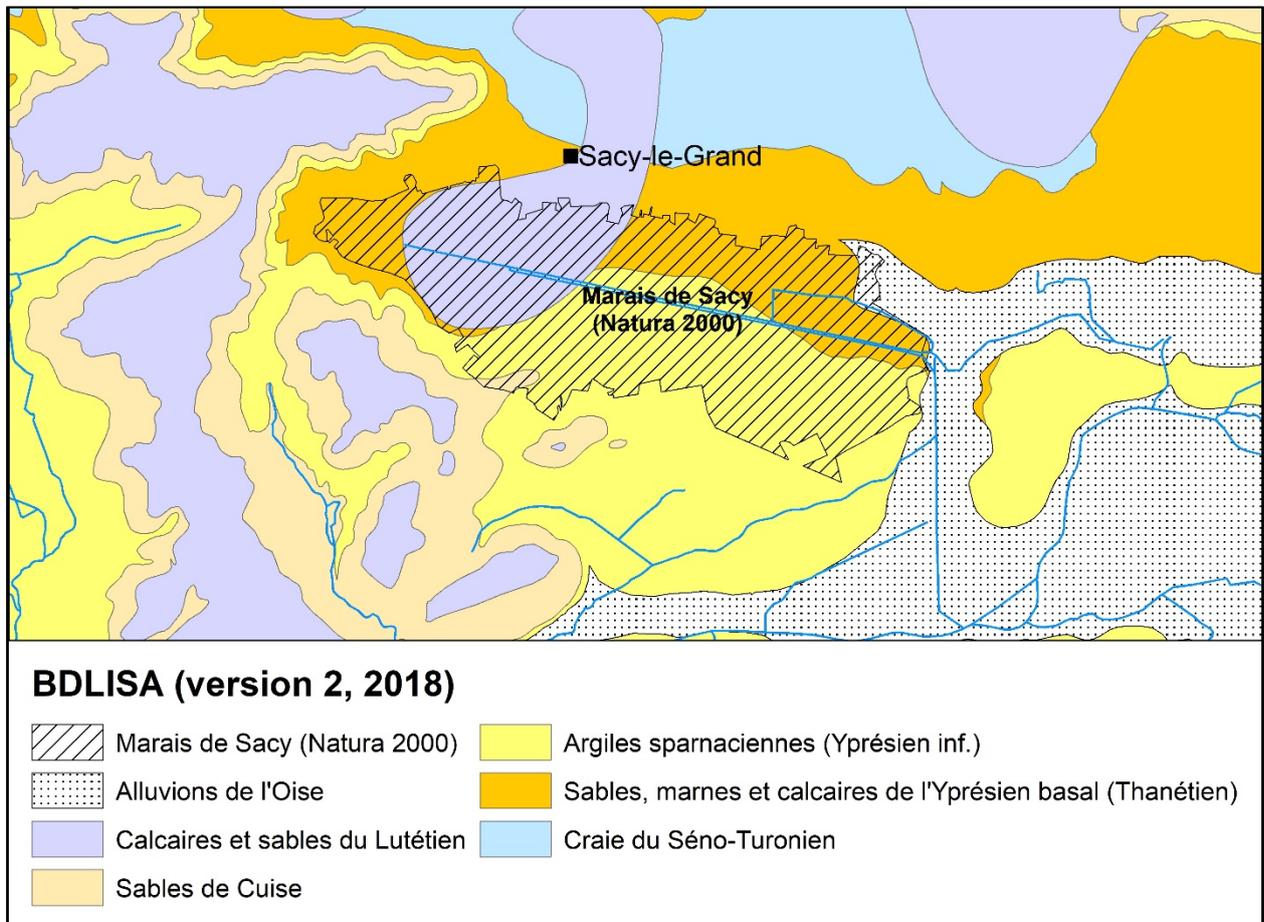


Illustration 40. Référentiel hydrogéologique BDLISA (version 2, 2018, niveau 3) autour des Marais de Sacy

6.2. FONCTIONNEMENT HYDRAULIQUE

Les marais se développent dans une cuvette alimentée principalement par les émergences artésiennes de la nappe de la craie sur sa bordure nord et par son impluvium direct. En raison de la faible extension du bassin versant, les eaux de ruissellement ne représentent un apport significatif que sous des régimes de fortes précipitations.

L'analyse du fonctionnement hydraulique des marais montre une différenciation entre les zones situées au nord de la Frette et celles situées au sud (STUCKY, 2008). Les marais situés au nord de la Frette sont presque exclusivement alimentés par les émergences de la nappe de la craie qui soutiennent également les plans d'eau en période estivale.

En zone centrale, la Frette draine l'ensemble des marais et constitue le seul exutoire.

En zone sud, le marais est alimenté par les apports des coteaux. Il dépend des réserves en eau des horizons tertiaires peu productifs et des précipitations. Ils sont donc sous l'influence directe des conditions climatiques et subit les plus grandes variations de niveau d'eau.

6.3. HYDROGEOLOGIE

6.3.1. Les nappes d'eau souterraine

Dans le secteur des Marais de Sacy, trois nappes d'eau sont présentes : la nappe de la craie du Séno-Turonien, les nappes de l'Eocène inférieur (Yprésien) et la nappe des alluvions de l'Oise (Illustration 40).

La nappe de la craie (Séno-Turonien)

La nappe de la craie constitue la ressource la plus importante et la plus exploitée de la région.

Elle s'écoule selon son pendage régulier vers la vallée de l'Oise. Lorsque l'écoulement souterrain parvient aux abords des Marais de Sacy, sa direction d'écoulement est inchangée, elle se met en pression sous les niveaux peu perméables des sables de Bracheux et des argiles sparnaciennes (Illustration 39, Illustration 40). Ces dernières isolent la nappe de la craie des nappes superficielles de l'Eocène (Tertiaire).

La nappe de la craie est libre sur la majeure partie du bassin de l'Aronde, au nord nord-est des marais de Sacy (Illustration 37). Elle devient captive sous les buttes témoins (butte d'Algumont, Illustration 38 et 39). Dans la vallée de l'Oise, la nappe de la craie est libre au nord de l'Oise, sur la majeure partie du bassin de l'Aronde, et captive au sud de l'Oise et des marais de Sacy. Lorsque la nappe est captive, les données bibliographiques sont moins nombreuses. (SETEC-HYDRATEC *et al.*, 2020). L'artésianisme est abondant sur la moitié nord du marais (une centaine d'ouvrages sont encore actifs) où la nappe de la craie est en contact direct avec la tourbe.

La masse d'eau souterraine [FRHG205 de la Craie picarde](#)¹² correspond à la nappe de la craie précédemment décrite. Là où la nappe de la craie affleure, dans la partie nord, la masse d'eau souterraine est de niveau 1 (Illustration 42, horizon 1). Dans la partie sud, la masse d'eau souterraine FRHG205 est de niveau 2 (Illustration 42, horizon 2), elle passe sous la masse d'eau

¹² sigessn.brgm.fr/files/FichesMESO/Fiches_resumees/Fiche_resumee_MESO_FRHG205_Seine-Normandie.pdf

souterraine FRHG104 l'Eocène de Valois qui correspond aux nappes superficielles du Tertiaire, situées au sud de la Frette.

La nappe des alluvions

La nappe des alluvions est en équilibre avec les niveaux de la Frette. Elle peut être en équilibre avec la nappe de la craie ou la nappe des sables de Bracheux. La nappe de la tourbe des marais est en condition contrôlée avec la nappe alluviale de l'Oise à travers le corridor constitué par la confluence entre la Frette et l'Oise. Son réservoir est constitué d'environ 2 m d'horizon tourbeux reposant sur des sables du Thanétien. Le niveau de base de cette nappe est constitué par la partie basale argileuse des sables de Bracheux. Les chroniques à disposition montrent une tendance à la baisse de 3 cm depuis 2012 dans le Marais (SETEC-HYDRATEC *et al.*, 2020, calcul par régression linéaire).

La masse d'eau souterraine [FRHG002 des alluvions de l'Oise](#)¹³ (276 km² à l'affleurement) correspond à la nappe des alluvions précédemment décrite (Illustration 42, horizon 1). Cette masse d'eau souterraine correspond à la partie inférieure de la vallée de l'Oise, au niveau du bassin tertiaire, jusqu'à la confluence avec la Seine.

Les nappes superficielles du Tertiaire

Les horizons de l'Eocène inférieur, les calcaires du Lutétien et les sables de Cuise, contiennent une nappe qui repose sur les argiles sparnaciennes. Ces dernières isolent la nappe des calcaires de la nappe de la craie. C'est une nappe perchée et peu étendue sur le secteur de l'étude mais qui alimente les marais par des sources lorsqu'elle déborde (Illustration 41).

La masse d'eau souterraine [FRHG104 l'Eocène du Valois](#)¹⁴ (Illustration 42, horizon 1, 2864 km² à l'affleurement et horizon 2, 95 km² sous couverture) correspond à la nappe du Tertiaire. Elle est caractérisée par une succession de formations géologiques aquifères d'âge Tertiaire, séparées par des horizons plus ou moins imperméables formant un aquifère multicouche. La masse d'eau est cloisonnée verticalement par des niveaux stratigraphiques et horizontalement par des variations latérales de faciès (notamment dues à la présence de structures tectoniques). Le réservoir principal est celui de l'Eocène moyen et inférieur comprenant le Calcaire du Lutétien et les Sables de Cuise et du Soissonnais (Yprésien). Des échanges sont très probables avec les alluvions de l'Oise (FRHG002) au niveau des vallées (Agence de l'eau Seine Normandie, 2015). Cette masse d'eau souterraine est limitrophe de la bordure sud des marais de Sacy.

¹³ sigessn.brgm.fr/files/FichesMESO/Fiches_resumees/Fiche_resumee_MESO_FRHG002_Seine-Normandie.pdf

¹⁴ sigessn.brgm.fr/files/FichesMESO/Fiches_resumees/Fiche_resumee_MESO_FRHG104_Seine-Normandie.pdf

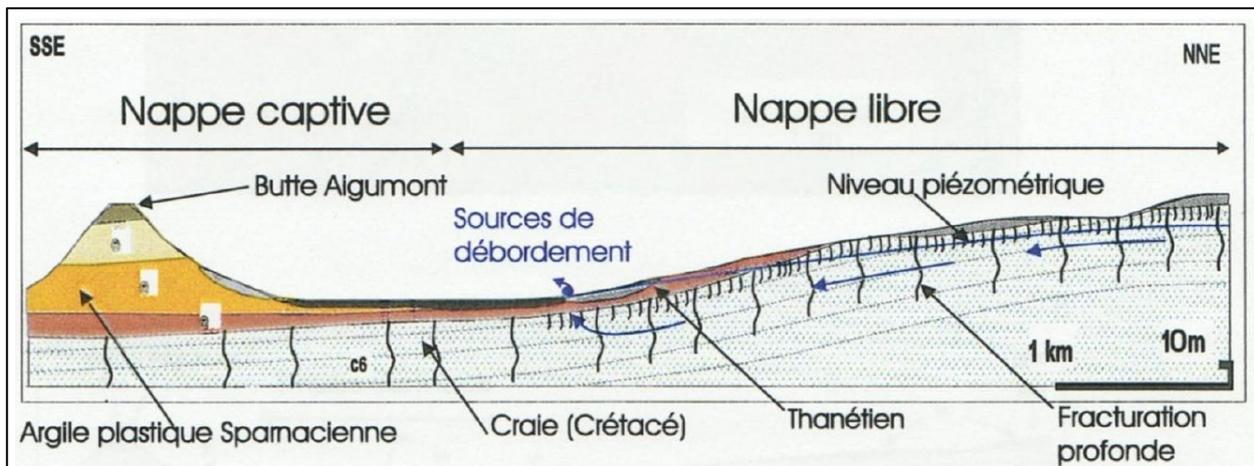


Illustration 41. Contexte hydrogéologique des marais de Sacy (STUCKY & ARMINES-CIG, 2000)

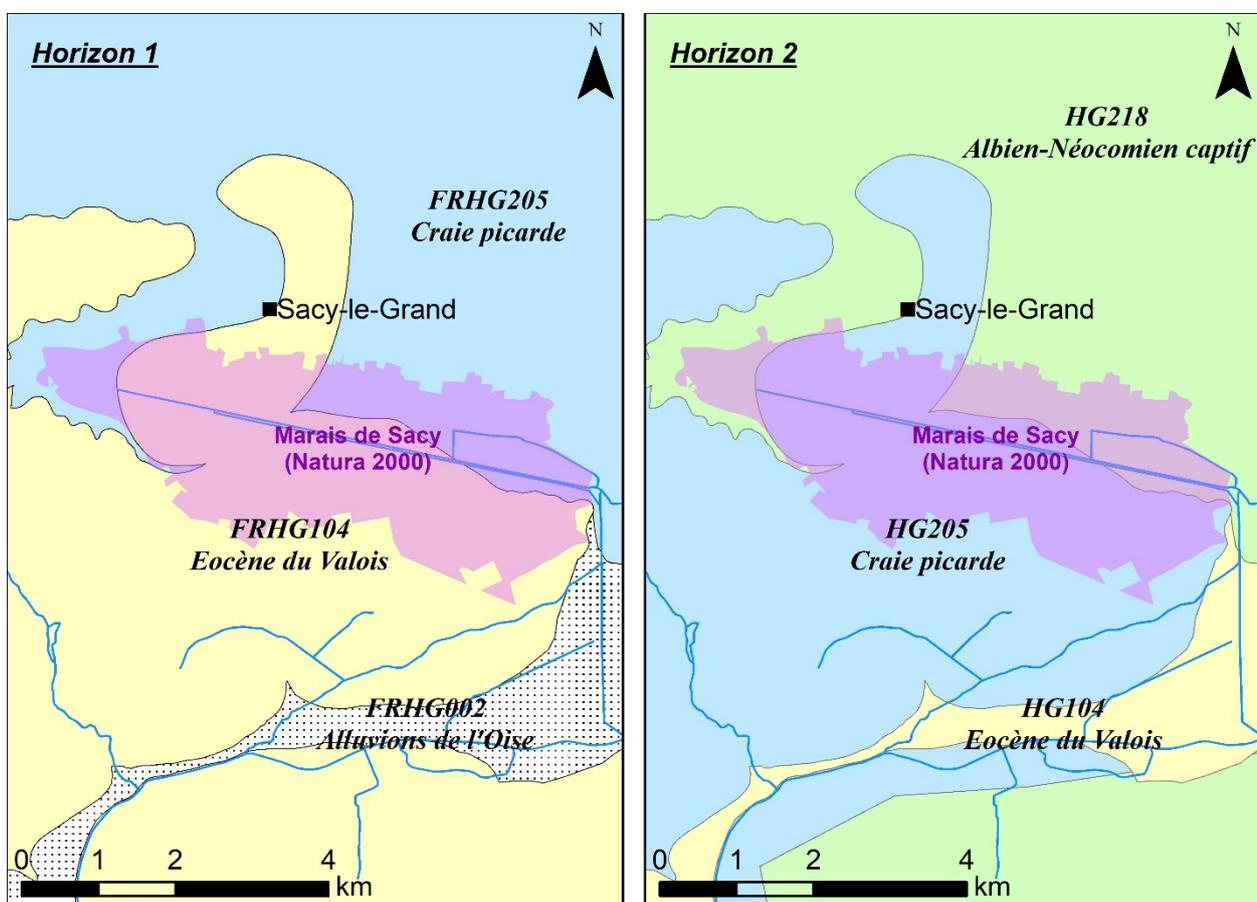


Illustration 42. Horizon 1 et 2 des masses d'eau souterraine (référentiel 2019) autour des marais de Sacy

6.3.2. Prélèvement en eau souterraine

La nappe de la craie (masse d'eau souterraine FRHG205 de la Craie picarde) est captée dans les vallées pour l'eau potable, l'irrigation agricole ou l'utilisation industrielle. Le champ captant de Liancourtois (Illustration 43) est composé de 11 puits (dont 5 encore actifs), entre 20 et 50 m de profondeur, qui captent la nappe de la craie et prélèvent en moyenne 1,3 millions de m³ par an (SETEC-HYDRATEC *et al.*, 2020). Il y a également 3 ouvrages de prélèvement d'eau potable sur la commune de Sacy-Le-Grand et 11 ouvrages agricoles sur le secteur de Sacy. Les

prélèvements pour l'alimentation en eau potable constituent une pression stable et globalement continue toute l'année.

Les prélèvements agricoles (deux fois plus importants en volume que les prélèvements AEP – hors Liancourtois) interviennent uniquement pendant les périodes de basses eaux, leur impact est donc localisé aux périodes de stress hydrique de la nappe. La temporalité des prélèvements agricoles aggraverait les situations d'étiage de la nappe (SETEC-HYDRATEC *et al.*, 2020).

Les chroniques disponibles mettent en évidence une tendance à la baisse des niveaux piézométriques de 80 cm depuis 1970 sur les coteaux agricoles et de 3 cm depuis 2012 dans les marais (SETEC-HYDRATEC *et al.*, 2020).

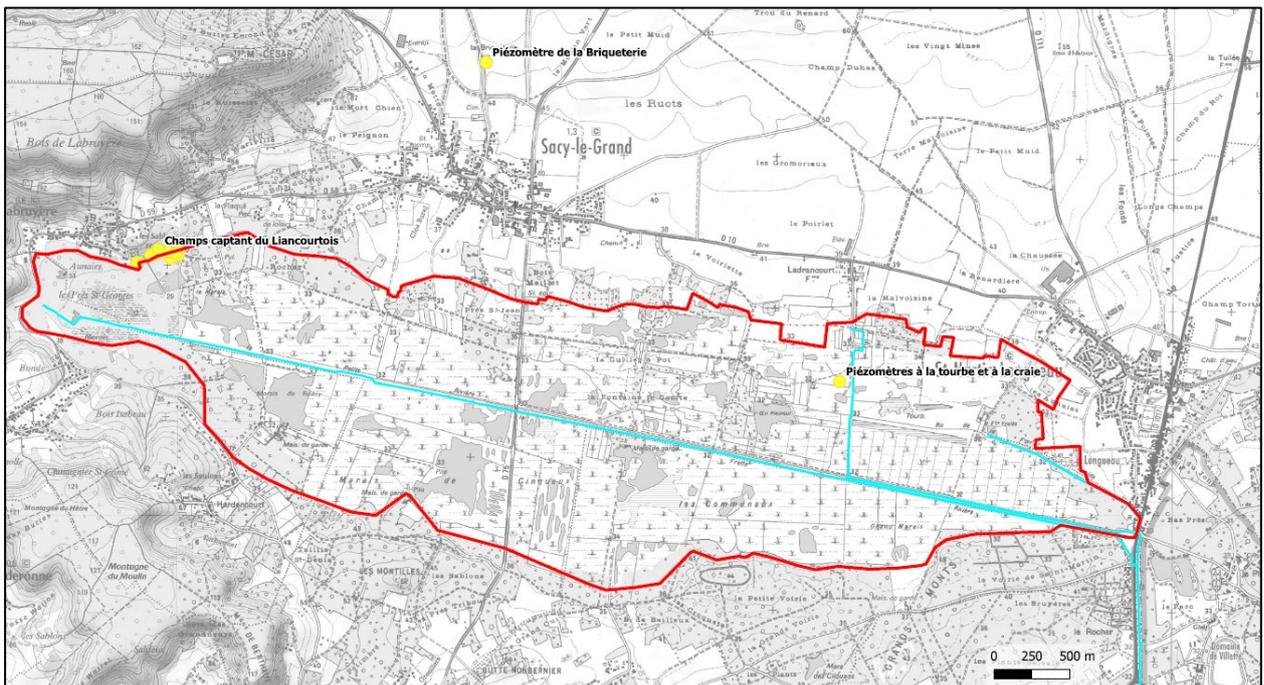


Illustration 43. Champ captant de Liancourtois et piézomètres de la nappe de la Craie (SETEC-HYDRATEC *et al.*, 2020)

6.3.3. Interaction eau souterraine et Marais de Sacy

L'étude bibliographique met clairement en évidence la contribution majeure de la nappe de la craie au fonctionnement des Marais de Sacy. La partie nord des Marais est alimentée par les apports provenant de la nappe de la craie. Au centre des Marais, les niveaux d'eau sont corrélés aux niveaux d'eau de la nappe des alluvions, l'alimentation directe de la nappe de la craie dans ce secteur y est moindre. A l'est des Marais, le niveau des deux plans d'eau relevé semble corrélé à la nappe de la Craie (SETEC-HYDRATEC *et al.*, 2020).

Le dernier état des lieux établi (SETEC-HYDRATEC *et al.*, 2020) conclut que :

- La nappe des alluvions est alimentée par la nappe de la craie sous-jacente ;
- La nappe de la tourbe est alimentée directement par la nappe des alluvions ;
- L'influence de la nappe de la craie est forte au nord des Marais et diminue vers le sud.

Trois piézomètres sont présents sur le secteur d'étude (Illustration 43) :

- BSS000HAUG (01045X0105/PZ_AL), dit « à la tourbe » (profondeur 6 m), qui capte en réalité la nappe des alluvions sous la tourbe dans les Marais et est suivi depuis 2012 ;
- BSS000HAUH (01045X0106/PZ_CR), dit « à la craie » (profondeur 16 m), qui capte la nappe de la craie dans les marais, en doublet avec BSS000HAUG, le suivi a démarré en 2012 ;
- BSS000HAQN (01045X0015/S1), dit « de la Briqueterie » (profondeur 16 m), qui capte la nappe de la craie sur le plateau agricole de Sacy-le-Grand et dont le suivi a démarré en 1970.

Le suivi des niveaux de la nappe montre que celui des alluvions suit globalement celui de la craie (Illustration 44). Des décrochements ponctuels sont observés du niveau de la nappe des alluvions, principalement marqués lorsque la cote de la nappe de la craie atteint 32,8 m NGF (SETEC-HYDRATEC *et al.*, 2020).

- Quand le niveau est plus bas, l'abaissement de la nappe des alluvions se fait de manière abrupte jusqu'à -50 cm. Il est mesuré 2 m de tourbe au niveau des piézomètres, la nappe des alluvions et l'aquiclude de la tourbe sont en connexion : même à son niveau le plus bas, la tourbe est saturée sur 1,3 m. (SETEC-HYDRATEC *et al.*, 2020). Lors de ces périodes de fortes basses eaux, un « décrochage » dans la piézométrie est observé dans la nappe de la craie et une baisse des niveaux des plans d'eau s'en suivent. Ces points de décrochement correspondent par ailleurs aux périodes de baisse des débits de la Frette et à la déconnexion d'une partie des puits artésiens en période estivale.
- Quand le niveau est plus haut, il y a une stabilisation de la nappe des alluvions à un niveau proche du niveau de la nappe de la craie.

L'analyse des données de suivi piézométrique et la construction du modèle hydraulique de SETEC-HYDRATEC *et al.* (2020) montrent que l'abaissement du niveau piézométrique de la nappe des alluvions, en connexion avec la nappe de la tourbe, ne participe pas au soutien des débits de la Frette en période d'étiage. L'incidence de l'évapotranspiration est d'autant plus marquée que le niveau de la nappe de la craie est bas et que les apports de débits via les puits artésiens sont donc réduits. Après ces périodes d'étiage, la nappe des alluvions se rééquilibre avec celui de la craie.

La cote 32,8 m pour la nappe de la craie apparaît comme un seuil de gestion critique pour le marais, seuil à partir duquel on observe une baisse des niveaux des plans d'eau, une déconnexion d'une partie des puits artésiens, un décrochement dans la piézométrie de la nappe des alluvions. La question suivante est : quand observe-t-on un impact sur la végétation, le sol ou le fonctionnement du marais ? Laplade-Dolonde (1994) propose un seuil de 80 cm de profondeur dans les tourbières (+ ou - 20 cm). Ce seuil de 80 cm, fixé par expérience de terrain dans les tourbières, représente un abaissement de la nappe (dans le marais) tel qu'elle est incapable de restaurer même transitoirement les niveaux supérieurs. L'étape suivante serait de regarder quand ce seuil de 80 cm est atteint ? Combien de temps (jours, semaines ?) après que la cote de 32,8 m ait été atteinte par la nappe de la craie ?

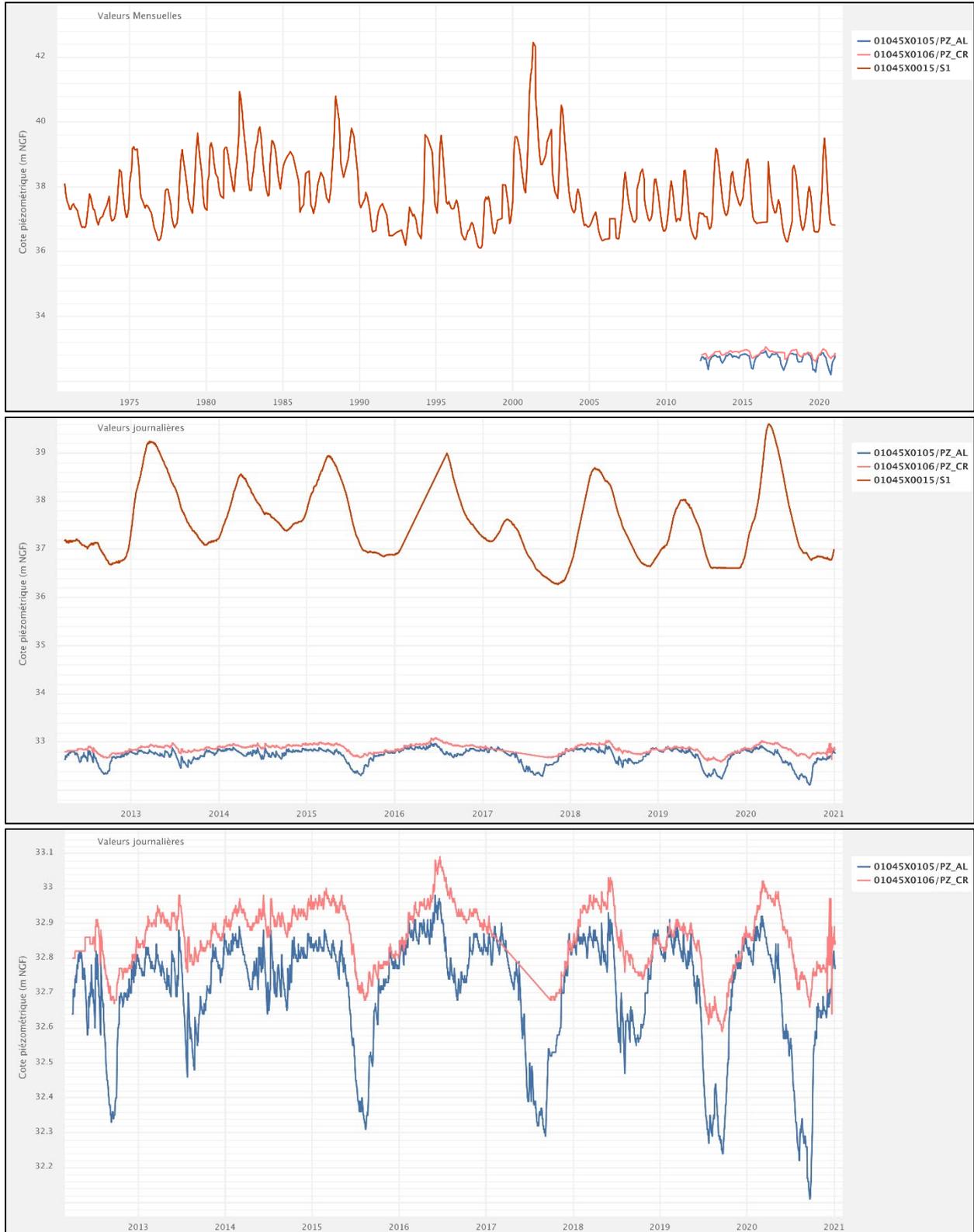


Illustration 44. Fluctuations piézométriques des piézomètres BSS000HAUG (01045X0105/PZ_AL), BSS000HAUH (01045X0106/PZ_CR) et BSS000HAQN (01045X0015/S1), sur la période 1970-2020 (a) et 2012-2020 (b et c) (Graphiques et Données issues du portail <https://ades.eaufrance.fr/>)

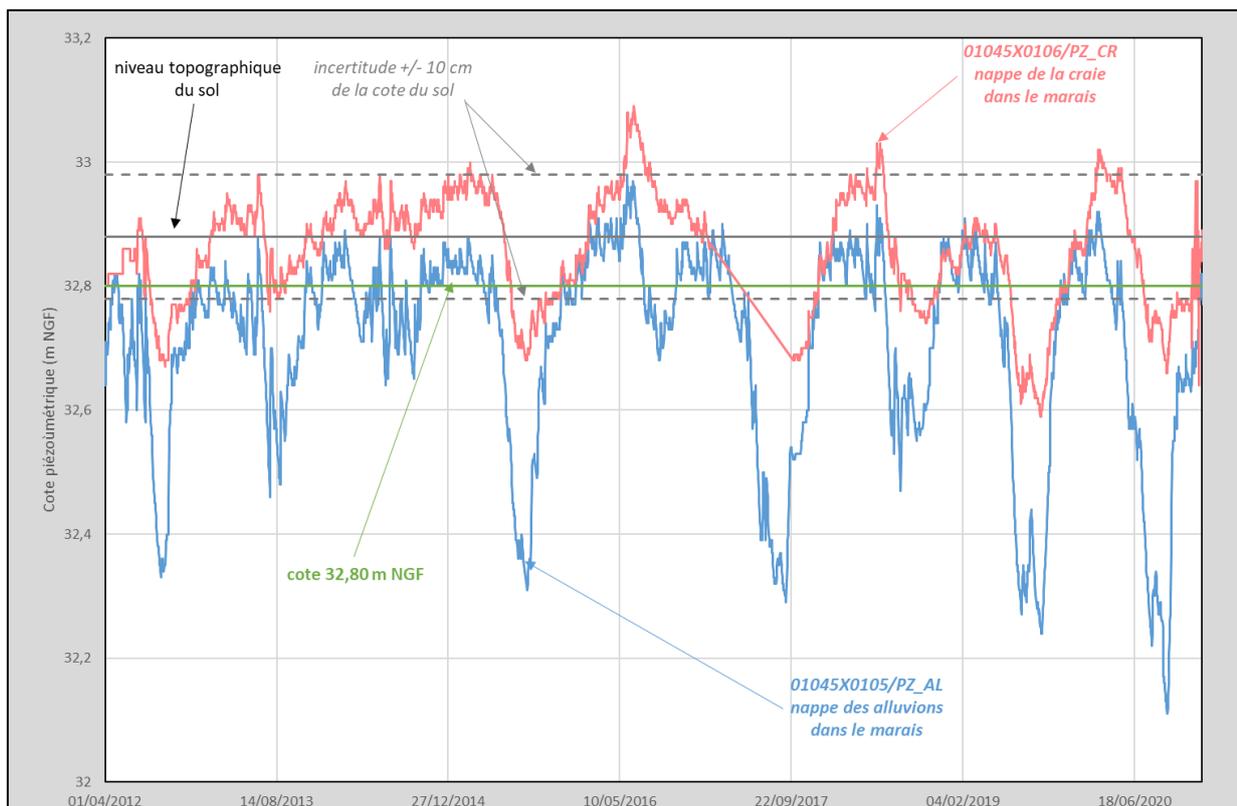


Illustration 45. Variations piézométriques dans le marais par rapport au sol et à la cote 32,80 m NGF

Topographie et période de submersion

La cote du sol au niveau du doublet de piézomètres est de 32,88 m NGF¹⁵. On peut distinguer les périodes de submersion (au droit du doublet), quand le niveau piézométrique dépasse la cote du sol pour le niveau du piézomètre dit « à la tourbe » à savoir en 2016 (Illustration 45). Entre 2012 et 2015, aucune submersion n'est observée, le niveau affleure quelques jours tout au plus. En 2016, on observe une période de submersion au droit du doublet avec 50 jours consécutifs où la cote piézométrique égale ou dépasse celle du sol. En 2017, deux périodes de 5 jours consécutifs sont observées ; en 2018, on compte 23 jours distribués entre janvier et décembre, la période la plus longue (mai) n'excède pas 5 jours ; en 2019, 12 jours au total sont répartis sur l'année ; en 2020, 26 jours sont comptés dont 18 jours consécutifs (février-mars 2020). Evidemment cette analyse des périodes de submersion/émersion est directement dépendante de l'exactitude de la cote du sol. Cette cote est renseignée sur Infoterre¹⁶ avec une incertitude à 10 cm près, ce qui se traduit par une cote du sol comprise entre 32,78 et 32,98 m NGF, ce qui influence significativement la durée des périodes de submersion si on considère la valeur la plus haute ou la valeur la plus basse (Illustration 45).

¹⁵ <http://ficheinfoterre.brgm.fr/InfoterreFiche/ficheBss.action?id=BSS000HAUG>

¹⁶ <http://infoterre.brgm.fr/>

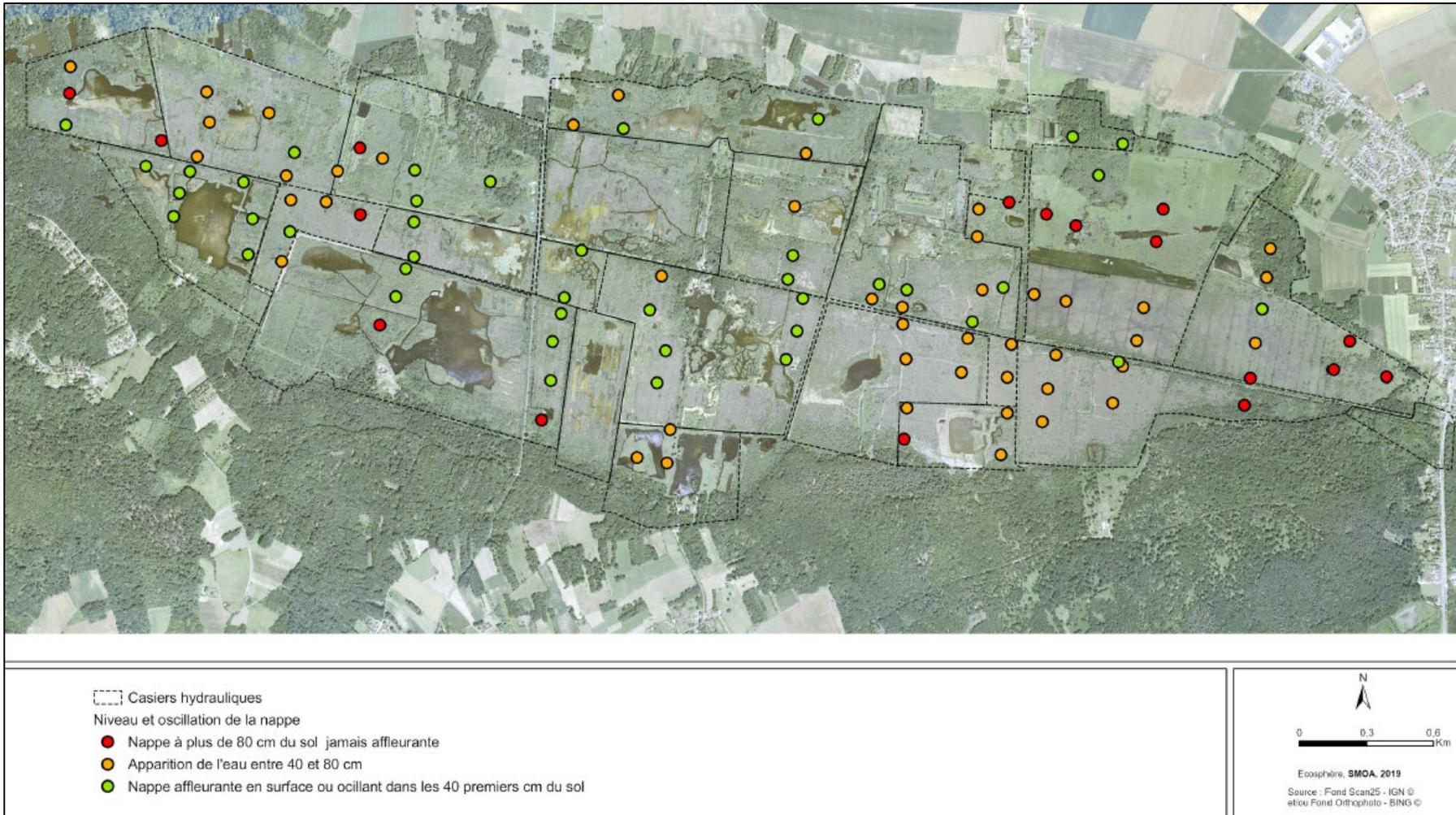


Illustration 46. Niveaux de la nappe (SETEC-HYDRATEC et al., 2020)

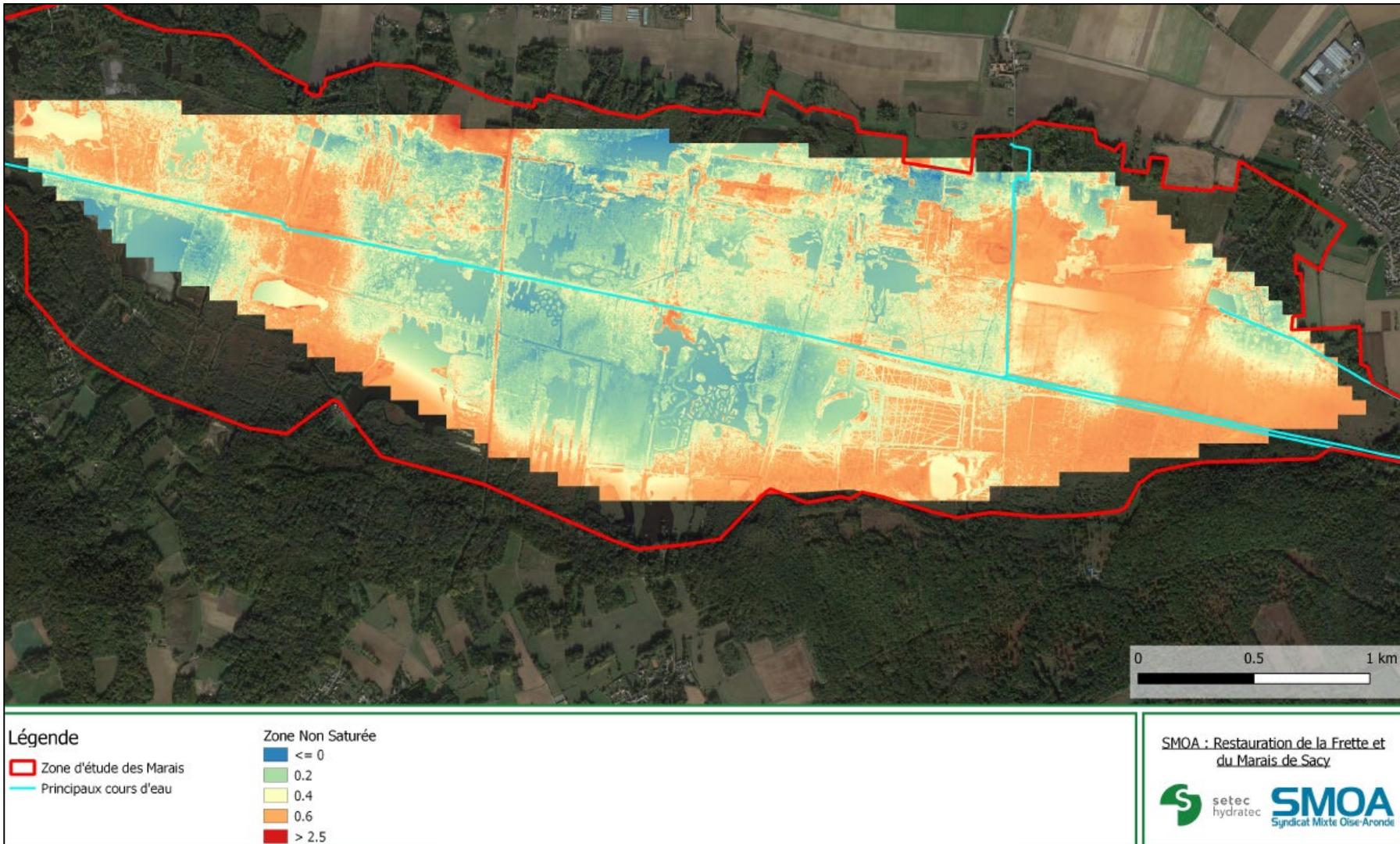


Illustration 47. Epaisseur des zones non saturées (ZNS), sept-octobre 2019 (SETEC-HYDRATEC et al, 2020)

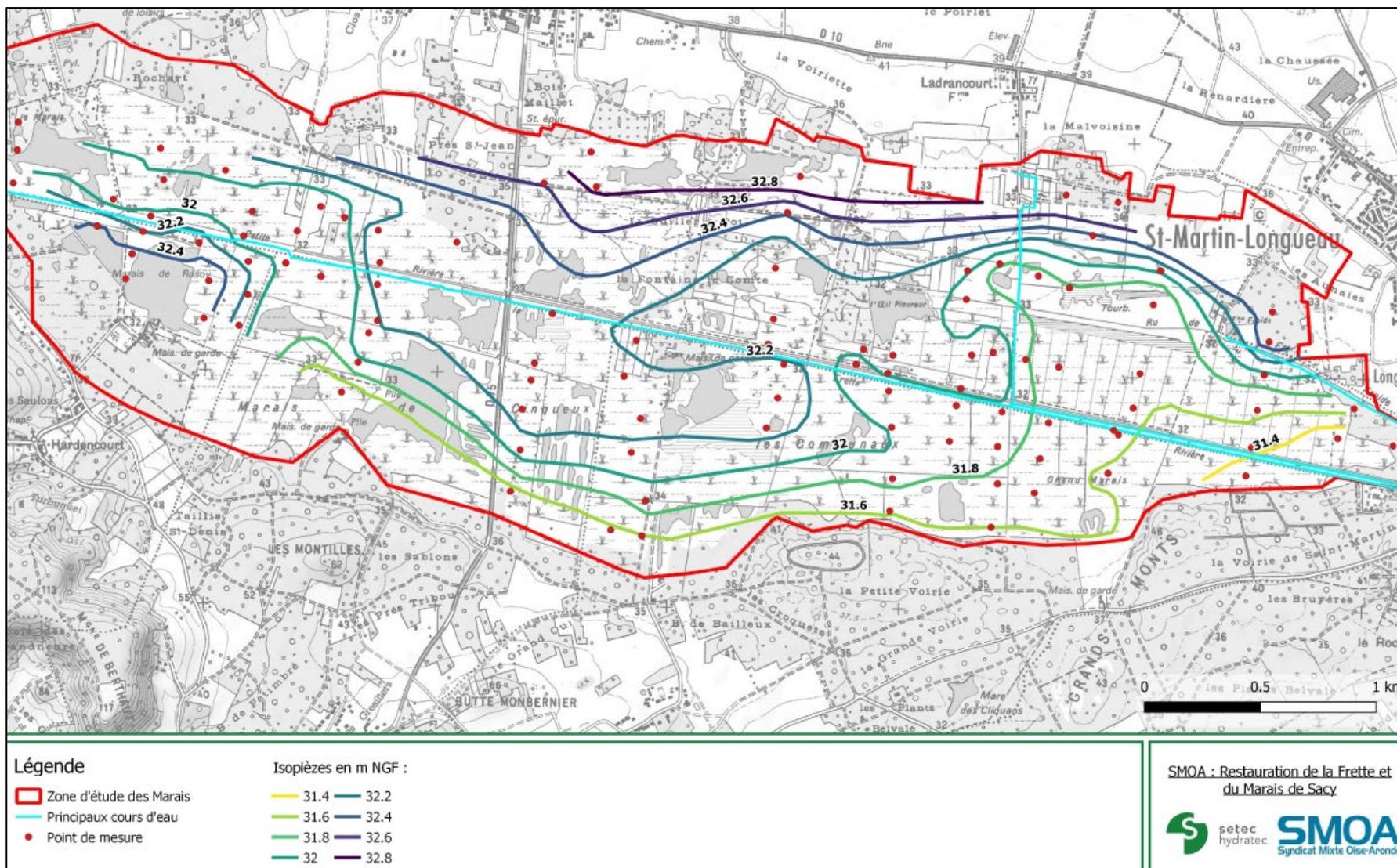


Illustration 48. Carte piézométrique des basses eaux des Marais de Sacy, sept-octobre 2019 (SETEC-HYDRATEC et al., 2020)

Ce point a été illustré et discuté sur le site pilote des marais de la Maye (cf. chapitre 4) mettant en évidence l'importance de connaître la cote du sol au droit des piézomètres où le niveau de la nappe est mesurée. Dans un contexte où la topographie est très plane, une incertitude de 10 cm est trop importante. La valeur de la topographie va nous permettre de caractériser la durée des périodes de submersion (durée d'engorgement en eau) mais également la profondeur de la surface libre, c'est-à-dire l'épaisseur de la zone non saturée, qui influence directement les populations végétales et les habitats des marais. Une connaissance précise de la topographie est importante.

Les travaux de SETEC-HYDRATEC *et al.*, (2020) mettent en évidence l'importance de la topographie (Illustration 46). Sur près d'une centaine de points de mesure, il relève la profondeur de la nappe superficielle pour cartographier l'épaisseur de la zone non saturée (Illustration 47). A l'échelle du site, cette épaisseur peut varier de proche de 0 m (submersion du secteur) à plus de 2,50 m. Ce paramètre va directement influencer les populations végétales, les habitats qui vont se développer et le type de sol.

Corrélation des signaux piézométriques

La démarche proposée de regarder le degré de corrélation entre les signaux piézométriques des différents points de suivi est appliquée à ces marais. Les données disponibles ont permis de mener des calculs de corrélation croisée entre les différents signaux piézométriques : la nappe de la craie dans le marais (01045X0106/PZ_CR), la nappe de la craie au nord de la zone humide (01045X0015/S1) et la nappe des alluvions dans le marais (01045X0106/PZ_AL).

Pour les deux piézomètres de la nappe de la craie, le coefficient de corrélation maximum (0,82) est observé pour un décalage de 0 mois (Illustration 49) et indique une relation linéaire significative entre les deux signaux. Il est possible d'envisager un piézomètre en dehors du milieu humide comme indicateur d'évolution piézométrique de la masse d'eau souterraine. Il est à noter que ce coefficient reste élevé avec un décalage d'un mois indiquant une certaine inertie du signal entre les deux piézomètres pourtant distants d'environ 3,2 km seulement.

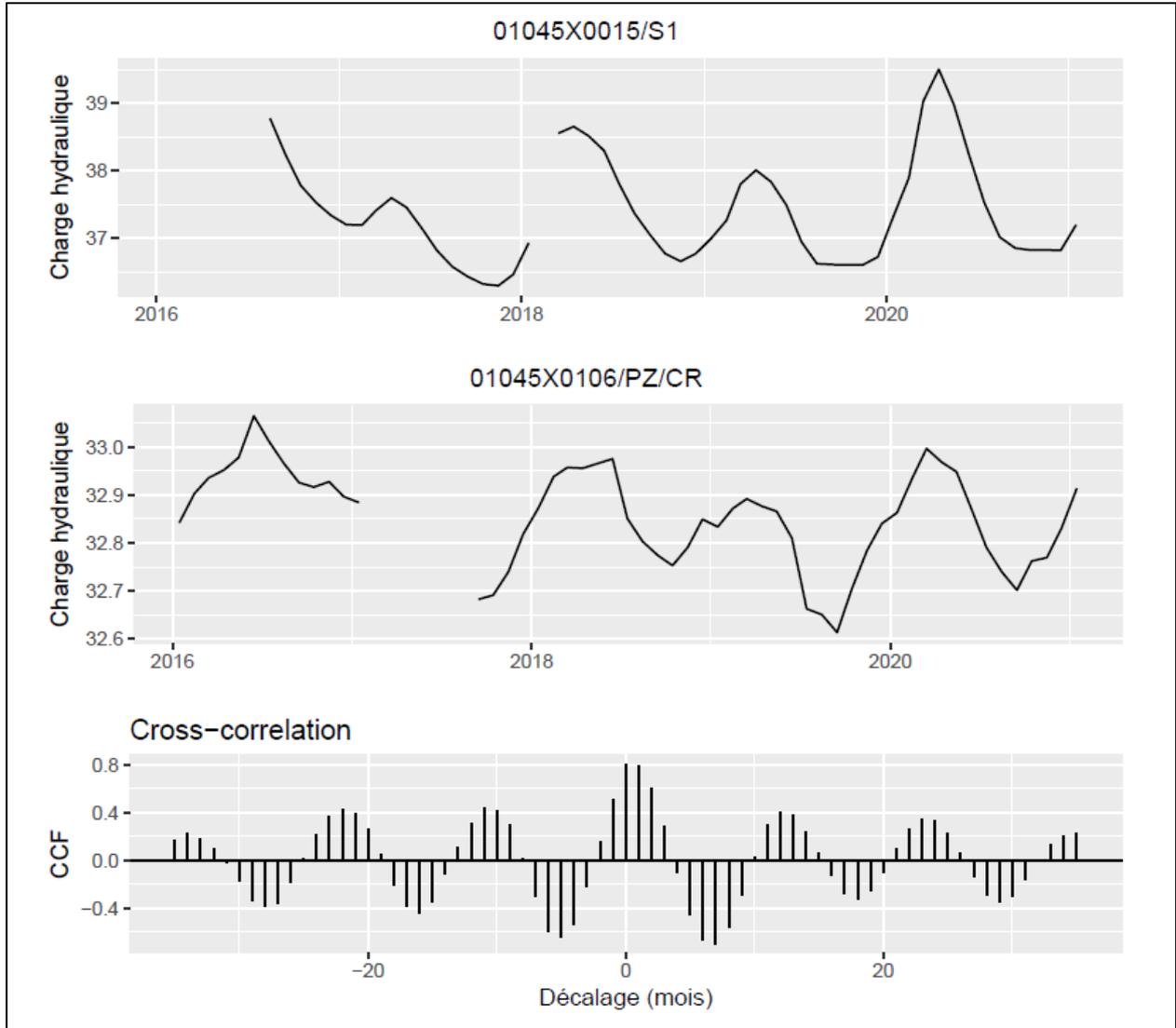


Illustration 49. Evolution de la charge hydraulique (cote piézométrique) des piézomètres de la craie en dehors des marais (01045X0015/S1, en haut) et dans les marais de Sacy (01045X0105/PZ_CR, au milieu), et calcul des coefficients de corrélation croisée entre les deux chroniques (en bas)

Le doublet de piézomètres, un dans les alluvions superficiels et un dans la nappe de la craie sous-jacente, localisés à proximité l'un de l'autre et dans le marais (Illustration 50) permettent de faire des calculs de corrélation entre la nappe de la craie et la nappe des alluvions sans avoir de biais lié à la différence de localisation entre les deux piézomètres. Le signal piézométrique des deux nappes (alluvion et craie) au même endroit permet de calculer un coefficient maximum de 0,82 pour un décalage de 0 mois et un coefficient qui reste élevé (> 0,75) avec un décalage d'un mois.

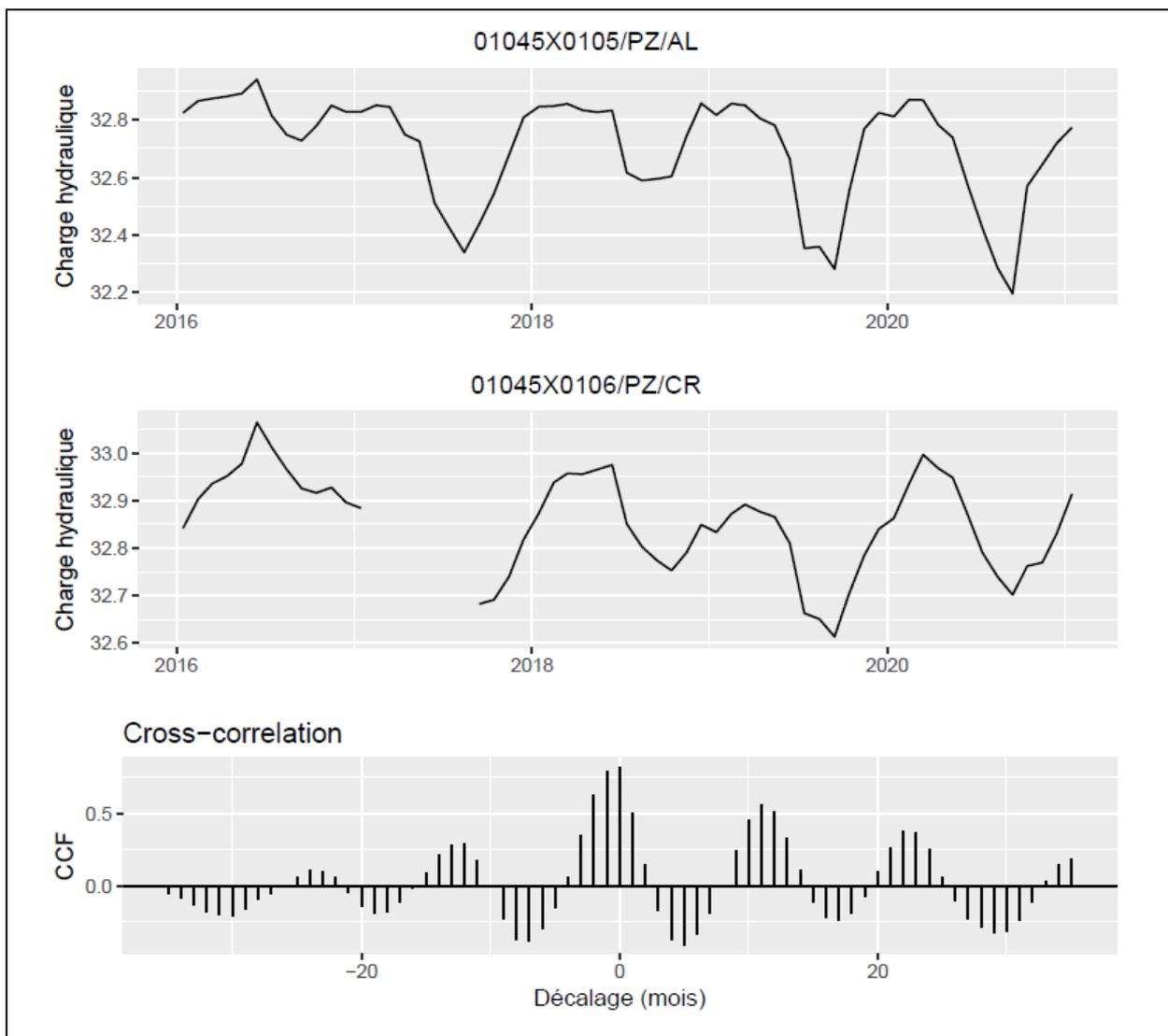


Illustration 50. Evolution de la charge hydraulique (cote piézométrique) du doublet de piézomètres dans les marais de Sacy : 01045X0105/PZ_AL (nappe des alluvions, en haut) et 01045X0106/PZ_CR (nappe de la craie, milieu) ; et résultats des calculs des coefficients de corrélation croisée (en bas)

Le calcul de coefficient de corrélation entre le piézomètre de la nappe des alluvions dans les marais (01045X0105/PZ_AL) et le piézomètre de la nappe de la craie en dehors du marais (01045X0015/S1) mettent en évidence une relation linéaire moins significative avec un coefficient de corrélation plus faible (0,68) et un décalage de deux mois (Illustration 51).

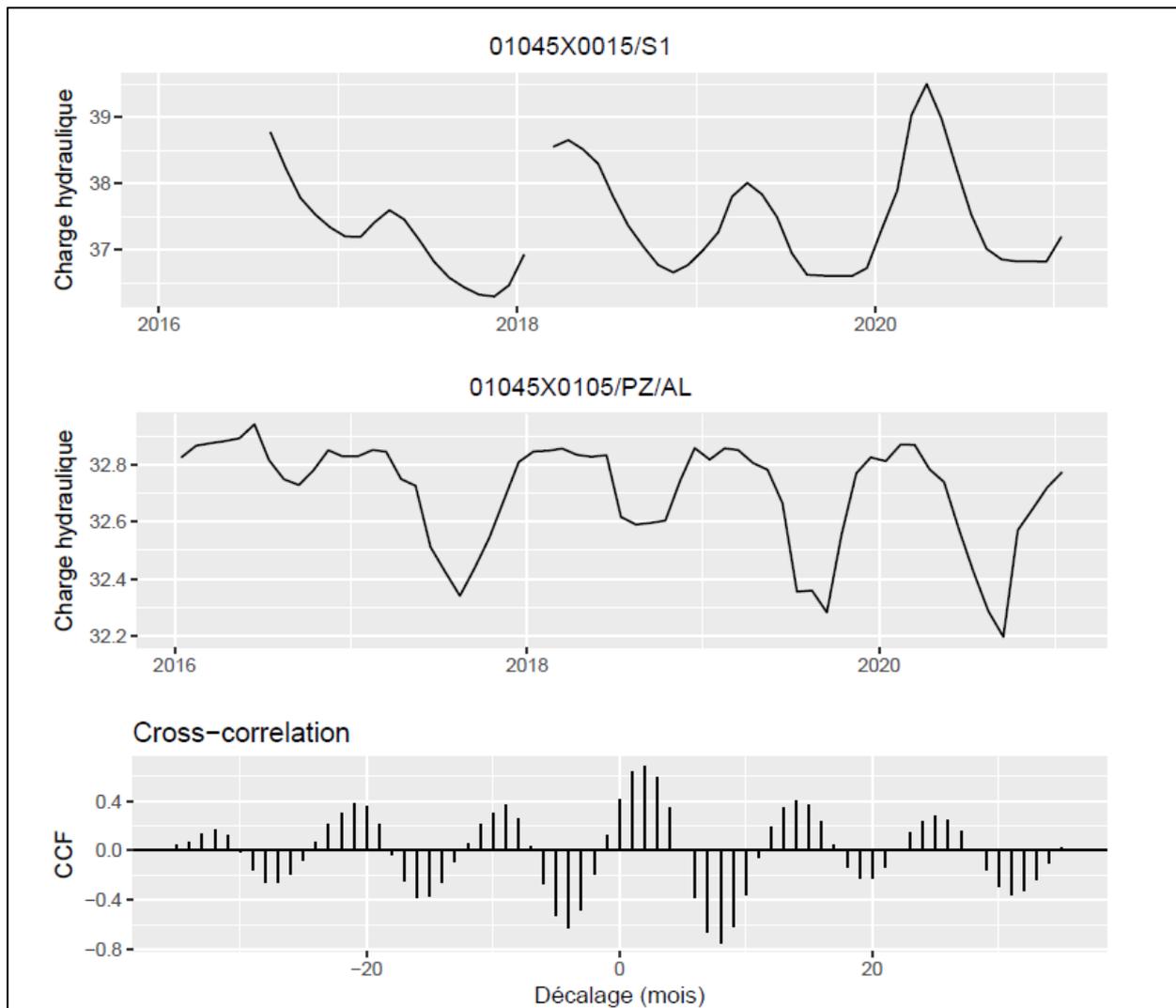


Illustration 51. Evolution de la charge hydraulique (cote piézométrique) entre le piézomètre 01045X0015/S1 (nappe de la craie, en dehors du marais, en haut) et 01045X0105/PZ_AL (nappe des alluvions dans le marais, milieu), et coefficient de corrélation croisée entre les deux signaux (en bas)

Les travaux de SETEC-HYDRATEC *et al.* (2020) et les calculs de coefficient de corrélation croisée des signaux piézométriques dans la nappe de la craie et la nappe des alluvions mettent en évidence la corrélation des signaux. Pour aller plus loin, ils seraient pertinents de renouveler l'analyse avec des chroniques plus longues, d'intégrer le signal pluviométrique pour connaître la part du signal « eau souterraine – nappe de la craie » et « précipitations » décrits par SETEC-HYDRATEC *et al.* (2020). Il serait également intéressant d'avoir un piézomètre dans la nappe des alluvions dans la partie sud des marais pour apprécier la différence d'influence des eaux souterraines dans ce secteur où la contribution de la nappe de la craie y est moindre et où l'influence des nappes tertiaires est visible.

6.3.4. Conclusion

Les marais de Sacy sont un système hydrogéomorphologique en dépression (Gayet *et al.*, 2016). Ils sont en interaction avec trois masses d'eau souterraine : FRHG205 de la craie picarde ; FGHG104 Eocène de Valois et FRHG002 les alluvions de l'Oise. Dans la partie sud, ils sont alimentés par les horizons tertiaires (FRHG104) peu productifs et les précipitations. Dans la partie

nord, les marais sont principalement alimentés par les émergences artésiennes de la craie (FRHG205) et par conséquent très dépendants du niveau de cette masse d'eau. Quand le niveau de la nappe de la craie descend en dessous de la cote 32.80 m NGF, on observe un décrochage du niveau dans la nappe des alluvions et une baisse des niveaux des plans d'eau. La cote 32,80 m peut être une cote de référence de gestion de la masse d'eau souterraine, au-delà de cette cote, il y a un impact visible sur le niveau d'eau dans le marais.

La nappe de la Craie constitue la ressource la plus importante et la plus exploitée de la région ; les données disponibles témoignent d'une tendance à la baisse. A long terme, cela pourrait affecter l'artésianisme de la nappe de la craie dans la partie nord des Marais et en conséquence leur alimentation directe.

La corrélation entre les différents signaux piézométriques a montré qu'il était possible d'avoir un piézomètre représentatif des fluctuations de la masse d'eau souterraine en dehors de la zone humide (01045X0015/S1). Cependant, dans le cas des marais de Sacy, le piézomètre implanté directement dans le marais est mieux corrélé au piézomètre dans la nappe de la tourbe. Si on doit implanter un piézomètre de suivi des eaux souterraines, il est plus pertinent de l'implanter au plus proche de la zone humide et le mieux directement à l'aplomb de la zone humide pour avoir l'image la plus représentative des variations piézométriques des eaux souterraines.

Si un seul point de surveillance apparaît suffisant pour suivre le niveau des eaux souterraines, il est important d'avoir une carte piézométrique de la nappe de surface et les circulations au sein de la zone humide. L'épaisseur de la zone non saturée est également variable à l'échelle du site en lien avec la topographie et les différents flux d'eau souterraine. Cette épaisseur de la zone non saturée et le degré d'immersion (durée, fréquence) des différents secteurs identifiés vont directement influencer le type de sols et les populations végétales qui vont se développer. Il est nécessaire d'avoir un point de suivi temporel des eaux souterraines et une carte piézométrique ponctuelle (hautes eaux et basses eaux) pour connaître l'importance de la zone non saturée (épaisseur) et la direction des écoulements des eaux souterraines de la nappe de surface.

6.4. ECOLOGIE

Les marais de Sacy constituent un vaste ensemble de marais tourbeux essentiellement alcalins, hormis, dans leur partie sud où ils présentent un faciès acide. Les marais sont composés d'une mosaïque d'habitats naturels se caractérisant par des critères physionomiques homogènes (eau, forêt, prairie, roselière, fourré arbustif) et des espèces faunistiques et floristiques dominantes ou typiques. Le site est néanmoins dominé par les formations héliophytiques à marisques et phragmites plus ou moins embroussaillées.

L'ensemble des données et cartes présentées sur les marais de Sacy sont issues du Document d'Objectif Natura 2000 « Marais Sacy-le-Grand » (2005).

6.4.1. Approche qualitative

Les principaux milieux naturels qui composent les marais de Sacy sont les suivants (Illustration 52) :

- Les eaux courantes, constituées des rivières et canaux ;
- Les eaux douces stagnantes (étangs et mares) et la végétation aquatique associée (herbiers à plantes immergées ou flottantes) ;
- Les milieux tourbeux pionniers (sur tourbe dénudée) ;

- Les formations de marais à grandes herbacées en peuplements denses comportant peu d'espèces (différents types de roselières) : elles sont essentiellement composées du roseau commun ou du marisque ;
- Les prairies humides pâturées ;
- Les prairies mésophiles ;
- Les fourrés arbustifs humides ;
- Les boisements arborescents.

Parmi ces formations végétales, plusieurs sont des habitats d'intérêt communautaire pouvant être regroupés en cinq grandes catégories (Tableau 5, Illustration 53, Illustration 54) :

- Les habitats d'eau douce et rivulaires ;
- Les landes et fourrés tempérés ;
- Les formations herbeuses ;
- Les bas-marais alcalins ;
- Les forêts.

Les habitats d'eau douce et rivulaires :

- La végétation pérenne des grèves sableuses (code Natura 2000 : 3130-2)
- La végétation pionnière des sols tourbeux dénudés (code Natura 2000 : 3130-5)
- Les herbiers de plantes aquatiques enracinées particulières – Characées (code Natura 2000 : 3140)
- La végétation aquatique flottante ou immergée caractéristique des plans d'eau eutrophes (code Natura 2000 : 3150)

Les landes et fourrés tempérés :

- Les landes humides à Bruyère quaternée (code Natura 2000 : 4010)
- Les landes sèches européennes (code Natura 2000 : 3150)

Les formations herbeuses :

- Les prairies tourbeuses à Molinie (code Natura 2000 : 6410)
- Les mégaphorbiaies (code Natura 2000 : 6430-1)

Les bas-marais alcalins :

- Les roselières à Marisque (code Natura 2000 : 6410)
- La végétation des tourbières basses alcalines (code Natura 2000 : 7230)

Les forêts :

- La bétulaie ou boulaie à sphaignes (code Natura 2000 : 91D0)
- La chênaie pédonculée à Molinie bleue (code Natura 2000 : 9190)

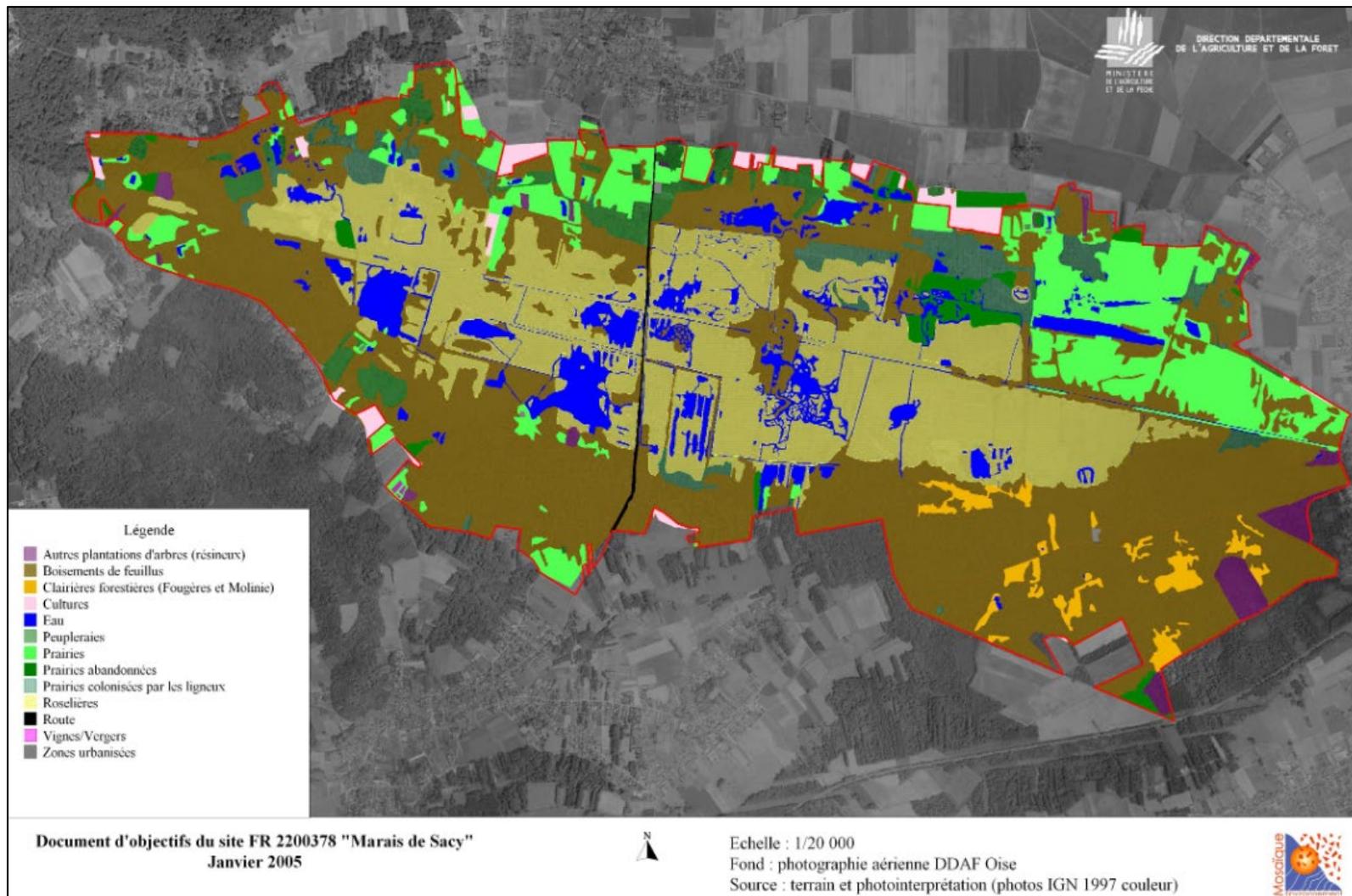


Illustration 52. Occupation du sol des marais de Sacy-le-Grand (Mosaïque Environnement, 2005)

Habitats naturels	Code CORINE	Code EUNIS	Syntaxon	ZH
Végétation pionnière des sols toubeux dénudés	22.11	C1.1	<i>Littorelletea uniflorae</i>	Non
Végétation pérenne des grèves sableuses	22.11 x 22.31	C1.1 x C3.41	<i>Littorelletea uniflorae</i>	Oui
Herbiers de plantes aquatiques enracinées	22.12 x 22.44	C1.2 x C1.14	/	Non
Végétation aquatique flottante ou immergée caractéristiques des plans d'eau eutrophes	22.13	C1.3	<i>Magnopotamion / Hydrochrition</i>	Non
Tourbière basse alcalines	54.2	D4.1	<i>Caricion davallianae</i>	Oui
Roselière à Marisque	53.3	D5.24	<i>Caricion davallianae</i>	Oui
Mégaphorbiaies	37.1	E3.4	<i>Filipendulion ulmariae</i>	Oui
Prairies tourbeuses à Molinie bleue	37.31	E3.51	<i>Molinion caeruleae</i>	Oui
Landes humides à Bruyère quaternée	31.11	F4.11	<i>Ericion tetralicis</i>	Oui
Landes sèches européennes	31.22	F4.22	<i>Calluno-Genistion pilosae</i>	Non
Chênaie pédonculée à Molinie bleue	44.51	G1.131	<i>Osmundo-Alnion</i>	Oui
Bétulaie ou boulaie à Sphaignes	44.A1	G1.51	<i>Betulum pubescentis</i>	Oui

Tableau 5. Liste des habitats d'intérêt communautaire des marais de Sacy

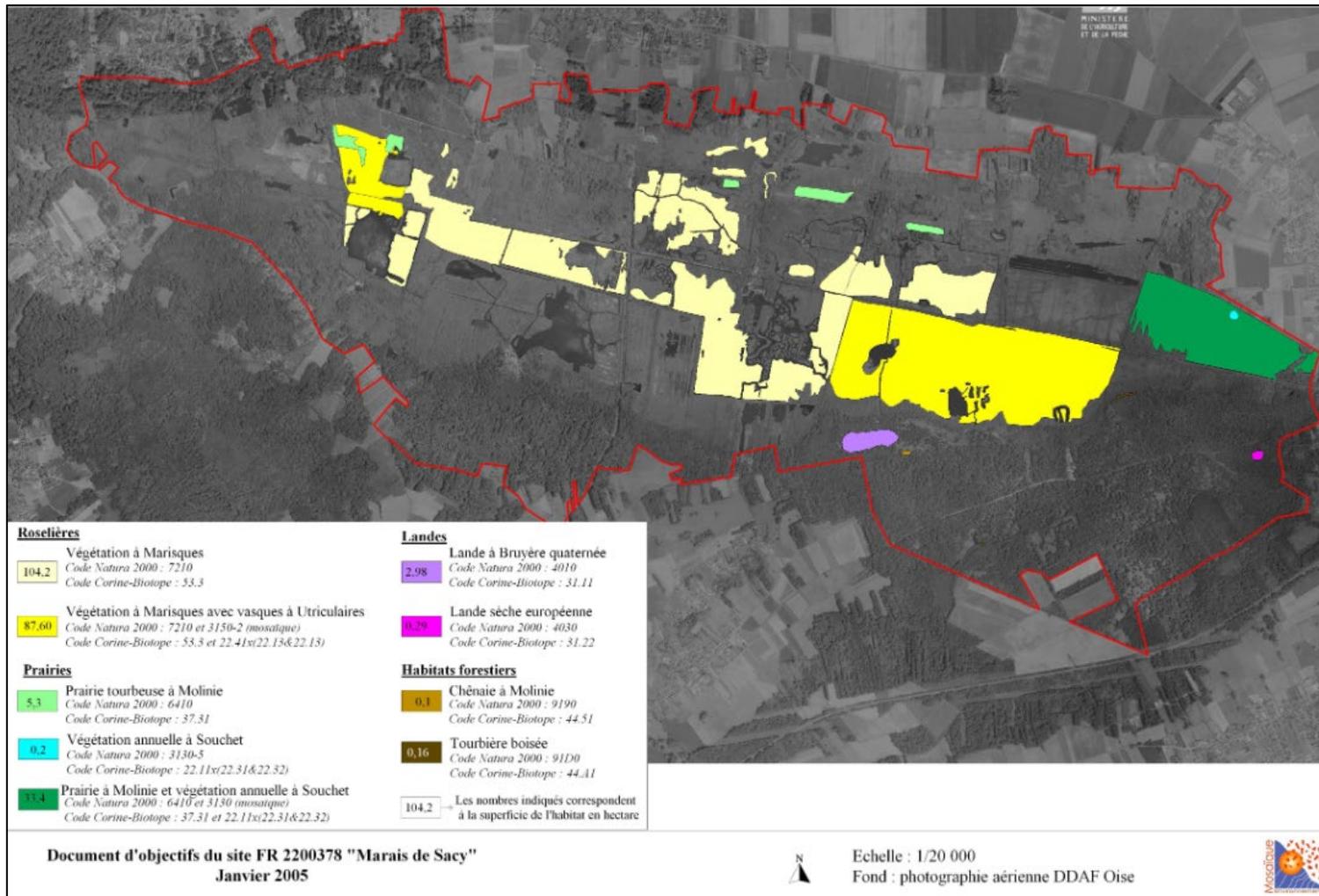


Illustration 53. Habitats d'intérêt communautaire terrestres observés en 2002 dans le marais de Sacy-le-Grand (Mosaïque Environnement, 2005)

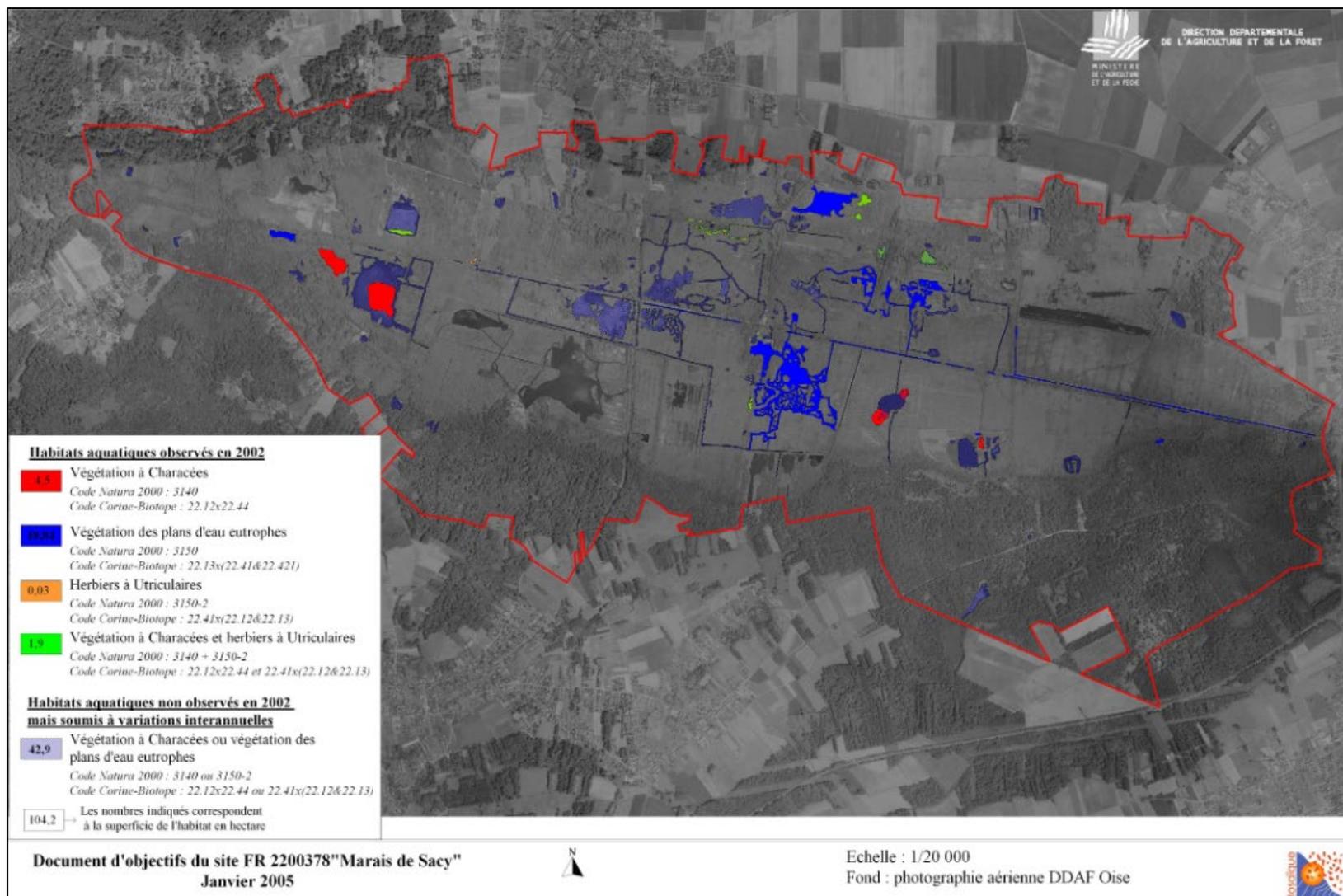


Illustration 54. Habitats d'intérêt communautaire aquatiques sur les zones protégées, marais de Sacy-le-Grand (Mosaïque Environnement, 2005)

6.4.2. Approche quantitative

Les données disponibles se concentrant essentiellement sur les habitats d'intérêt communautaire, cette approche se basera exclusivement sur ces formations. Le Tableau 6 et l'illustration 55 suivants permettent d'appréhender la représentativité de chacun des habitats d'intérêt communautaire au sein des marais de Sacy.

Intitulé	Code	Surface (Ha)	Représentativité
Végétation annuelle à Souchet	3130	0,2	0,08%
Végétation à Characées	3140	4,5	1,73%
Végétation aquatique eutrophe	3150	18,84	7,26%
Végétation à Characées (50%) Herbiers à Utriculaires (50%)	3140 + 3150	1,9	0,73%
Lande humide à Bruyère quaternée	4010	2,98	1,15%
Landes sèches	4030	0,29	0,12%
Prairies à Molinie sur sols calcaires	6410	5,3	2,04%
Prairies à Molinia (70%) Végétation à Souchet (30%)	7210 + 3150	33,4	12,87%
Végétation à Marisques	7210	104,2	40,16%
Végétation à Marisques (95%) Herbiers à Utriculaires (5%)	7210 + 3150	87,6	33,76%
Chênaie à Molinie	9190	0,1	0,04%
Tourbières boisées	91D0	0,16	0,06%
Total		259,47	100,00%

Tableau 6. Surface (en ha, en %) des habitats d'intérêt communautaire

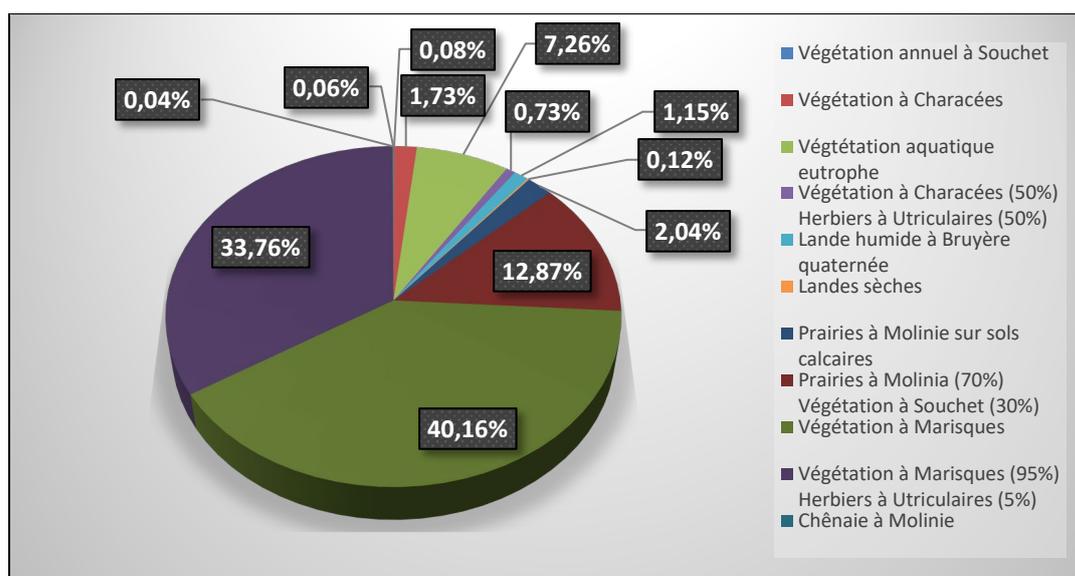


Illustration 55. Représentativité (en %) des surfaces occupées par les habitats d'intérêt communautaire

Les données illustrées permettent de constater une large dominance des formations de roselière à marisques au sein des marais de Sacy. En effet, les formations strictes à marisques représentent environ 40% de l'ensemble des habitats d'intérêt communautaire identifiés sur le site. En y ajoutant la mosaïque d'habitats entre les végétations à marisques et les herbiers à utriculaires ce chiffre s'élève à environ 74%.

Parmi les habitats d'intérêt communautaire les mieux représentés sur les marais de Sacy, nous pouvons également citer les prairies à molinie en mosaïque avec des végétations à Souchet qui occupent une surface de 33,4 hectares soit près de 13% de ces habitats.

La représentativité des autres habitats d'intérêt communautaire ne dépasse pas 2 %.

Les marais de Sacy, bien que présentant une richesse en habitats naturels intéressante, semblent tout de même être dominés par certaines formations végétales, en l'occurrence les roselières à marisques. La part de surface en eau avec ses végétations amphibies associées semblent également bien représentée au sein du marais. Ces dernières se localisent au centre du site, généralement en contact direct avec les formations à marisques. De nombreux habitats naturels patrimoniaux sont également présents sur le site mais sur des surfaces beaucoup plus restreintes.

6.5. PEDOLOGIE

Le rapport présente la méthodologie pour la définition des états de conservation en se basant sur une étude test réalisée dans la vallée de la Somme (Lebrun *et al.*, 2014). Le postulat sur lequel s'appuie cette méthode est que la diminution de la saturation en eau dégrade la tourbe par le processus de minéralisation.

Le terme tourbe est d'avantage employé en géologie et en écologie, alors qu'en pédologie le terme d'Histosol a été retenu par le référentiel pédologique pour la définition de ces solums. On parlera donc d'horizons histiques.

6.5.1. Définition des critères étudiés

Les critères abiotiques pour l'étude de la zone humide sont les suivants :

- **Types d'horizons caractéristiques** correspondant à la description des horizons histiques formés à partir de la dégradation des végétaux morts, en conditions d'anaérobiose générées par un engorgement permanent ou quasi permanent. L'état des fibres détermine la typologie des horizons (*cf.* Tableau 7). Chaque sondage a été décrit en distinguant les horizons fibriques, mésiques et sapriques. Le bon état de conservation de la tourbe se définit par teneur de matière organique peu ou pas décomposée.

Descripteur	Horizon Hf	Horizon Hm	Horizon Hs	Horizon Ha	Horizon HI
Qualificatif	fibrique	mésique	saprique	assaini, <i>muck</i>	labouré, <i>muck</i>
Taux de fibres frottées	>40%	10-40%	<10%	indéterminable	indéterminable
Indice pyrophosphate	1-10	10-30	10-50	>50	>50
Indice de von Post	1-5	5-8	8-10	8-10	8-10
Perméabilité hydraulique	forte	moyenne	faible	faible	faible
Masse volumique apparente (g/cm ³)	<0,10	0,07-0,18	>0,18	gen. >0,18	gen. >0,18
Matière organique amorphe, humifiée	absente	proportion moyenne à élevée	proportion très forte	proportion très forte	proportion très forte
Conditions écologiques (à composition botanique semblable)	très humide en permanence, tourbe en croissance	très humide en permanence, tourbe stabilisée	assèchement temporaire possible, tourbe en décomposition	nappe abaissée, sans mise en culture	nappe abaissée, mise en culture après labourage

Tableau 7 Caractéristique des horizons histiques (AFES, 2009, Gobat et al., 2010, SETEC-HYDRATEC et al., 2020)

- **Épaisseur et profondeur des horizons histiques.** La profondeur d'apparition des horizons ainsi que leur épaisseur sont des critères importants d'une manière générale pour étudier les sols. Un horizon histique peut être surmonté par un horizon minéral, cela impact la classification du sol. Le seuil de 70 cm de profondeur pour l'apparition de l'horizon histique est utilisé comme indicateur. Au-delà, les horizons hydromorphes peuvent être hérités d'anciennes tourbières minéralisées témoignant d'un marais dégradé.
- **Présence d'intercalations minérales.** Les Histosols peuvent être composés de matériaux non holorganiques restés en surface ou intercalés entre les horizons histiques. Il peut s'agir d'anciens horizons histiques minéralisés ou d'apports en minéraux liés à l'historique du marais (phénomène érosif, dépôt en point bas).
- **Engorgement et hydromorphie.** La formation des Histosols et leur conservation nécessite une saturation en eau pendant une grande partie de l'année. D'après l'AFES, un Histosol conserve des conditions réductrices lorsque que la nappe ne descend pas en dessous de 80 cm pendant plus de 2 mois. La profondeur de la nappe peut se mesurer lors de la réalisation des sondages pédologiques, un suivi piézométrique peut également permettre d'appréhender le fonctionnement hydrique d'une tourbière.

Ces critères sont étudiés sur les 103 sondages pédologiques réalisés sur le site. Le contenu des sondages, plus précisément la donnée brute, ne faisait pas partie des documents transmis dans le cadre de cette étude, seule une donnée agrégée est présentée dans ce rapport. Les critères abiotiques présentés précédemment font l'objet de cartes thématiques (Illustration 56, Illustration 57).



Illustration 56. Représentativité des horizons histiques (SETEC-HYDRATEC et al., 2020)

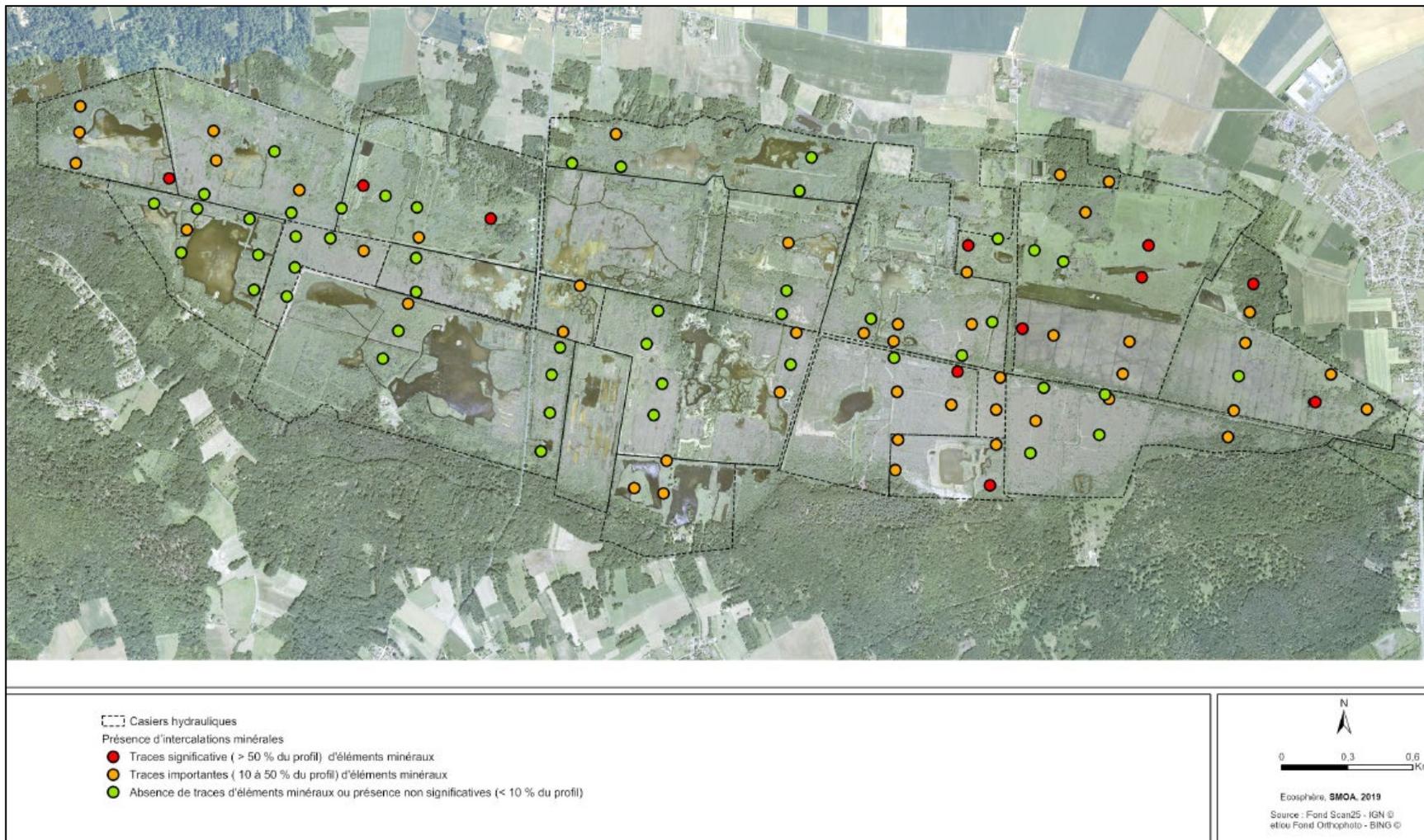


Illustration 57. Carte des intercalations minérales (SETEC-HYDRATEC et al., 2020)

6.5.2. Caractérisation du site

La représentativité des horizons histiques

Globalement la méthode employée définit que 44% des relevés donnent un bon état de conservation des Histosols avec plus de 30 cm cumulés d'horizons fibriques à mésiques.

Les secteurs les plus dégradés par rapport au critère pédologique sont situés à l'est et au tiers amont des Marais.

La distribution de l'épaisseur cumulée des horizons fibriques à mésiques dans les 70 premiers centimètres pour les 103 relevés est la suivante :

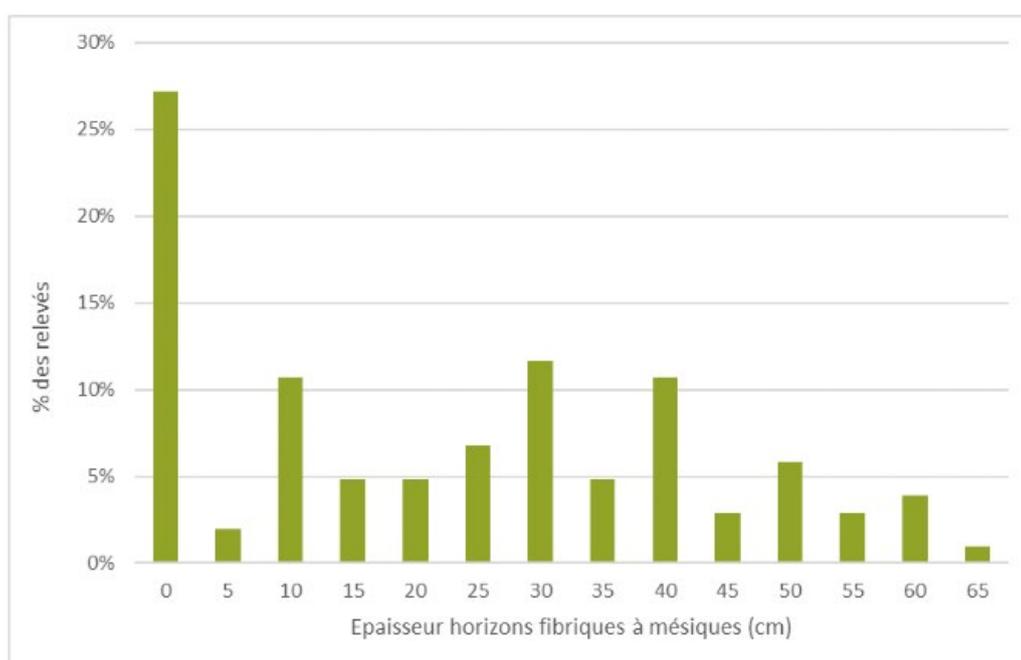


Illustration 58 Épaisseur des horizons fibriques à mésiques dans les 70 premiers cm (SETEC-HYDRATEC et al., 2020).

On observe que :

- L'épaisseur cumulée moyenne d'horizons fibriques à mésiques dans les 70 premiers centimètres est de 23 cm, ce qui est relativement faible.
- 27% des profils ne comprennent aucun horizon mésique à fibrique dans les 70 premiers cm. Les horizons de ces profils sont minéralisés ou sapriques ce qui peut traduire une dégradation de la tourbe.
- Les profils avec une épaisseur cumulée de plus de 60 cm d'horizons fibriques à mésiques sont peu nombreux. Cela traduit la présence quasi permanente d'horizons histiques dégradés ou minéralisés. Cela indique également un engorgement quasi-permanent par endroit.

La profondeur d'apparition des horizons histiques se fait avant 20cm pour plus de 50% des profils. Ces premiers horizons sont surtout mésiques (48%) ou sapriques (39%). Les horizons fibriques sont très peu représentés.

Les traces d'éléments minéraux

Les traces d'éléments minéraux supérieures à 10% sont présentes dans plus de la moitié des relevés (55%). Pour rappel, les horizons minéraux n'indiquent pas nécessairement la dégradation des horizons histiques, ils peuvent être liés à des phases d'érosions des alentours. La différenciation de l'origine des éléments minéraux n'a pas été réalisée.

Corrélation avec les ZNS

Le croisement de l'épaisseur des zones non saturés (ZNS) avec la représentativité des horizons histiques dans les 70 premiers centimètres montre qu'à une exception près, les horizons minéralisés sont situés dans des ZNS de plus de 60 centimètres lors de la campagne.

L'inverse n'est pas vrai, beaucoup de sondages montrent des horizons à texture fibrique à mésique d'une épaisseur de plus de 30 centimètres dans les 70 premiers centimètres sont situés dans des secteurs ZNS à importantes (SETEC-HYDRATEC *et al.*, 2020).

Une ZNS importante n'engendre pas systématiquement une dégradation directe des horizons histiques. L'étude ne permet pas de définir une dynamique de dégradation des horizons histiques en fonction du temps.

Conclusion

Les données issues du marais de Sacy montrent qu'il existe une variabilité dans les résultats des sondages pédologiques pour un même site et une même nappe d'eau souterraine. Cette variabilité souligne l'importance de réaliser une campagne d'observations, notamment par des sondages, pour dresser l'état des lieux pédologique du site.

Le bon état de conservation des Histosols est surtout lié au type d'horizon histique et à la profondeur d'apparition de ces horizons. Ces horizons sont dépendant de l'engorgement du sol.

L'intercalation minérale n'est pas synonyme d'une dégradation de la tourbe directement mais elle pourrait permettre d'appréhender l'historique du territoire dans le cadre d'un suivi.

Les ZNS montrent que la relation entre la nappe et le sol n'engendre pas une modification immédiatement visible sur le profil.

Les indicateurs étudiés ne permettent pas d'établir un état des lieux clair et homogène sur le site, montrant une relation entre l'évolution de la nappe et les critères pédologiques. Pour autant dans le cadre d'un suivi, ces critères pourraient permettre de dresser un état des lieux et afin d'être évalués régulièrement.

6.6. RELATION EAU – SOL – PLANTE

Les marais de Sacy est occupé sur une part importante de sa surface par des communautés végétales identifiées comme potentiellement en interaction avec la masse d'eau souterraine : les roselières à marisques (Bensettiti *et al.*, 2002).

Etant donné qu'aucune donnée brute n'a été transmise pour ce site, l'indice floristique d'engorgement (Indicateur I02) de la boîte à outils de suivi des zones humides RhoMéo (collectif RhoMéo, 2014) n'a pas pu être calculé comme sur le site de la lagune de Paulin (cf. chapitre 5). Cependant, les formations de roselière à *Cladium mariscus* sont des communautés représentées par la présence quasi monospécifique de cette espèce. Ainsi la valeur indicatrice de la marisque pourra tout de même apporter certaine indication sur l'optimum de cette espèce vis-à-vis du niveau moyen de la nappe.

D'après les valeurs indicatrices d'Ellenberg (Ellenberg, 1974 ; Ellenberg *et al.*, 1992), *Cladium mariscus* est une espèce relevant d'un indice d'humidité 10. Cette valeur correspond aux plantes aquatiques survivant de longues périodes sans que le sol soit couvert d'eau.

La valeur indicatrice d'Ellenberg semble donc bien en cohérence avec la bibliographie traitant de cette espèce. Pour rappel, la bibliographie stipule que *Cladium mariscus* est une espèce sensible aux variations du niveau de la nappe tolérant des périodes d'immersion mais supportant mal un abaissement prolongé de cette dernière. Ainsi la présence d'une nappe affleurante ou subaffleurante avec de faibles fluctuations semble être les conditions optimums au développement de cette espèce.

L'étude de la cartographie des habitats naturels du marais de Sacy permet de constater que les roselières à marisque se concentrent essentiellement au centre et au nord du marais en contact direct avec les secteurs en eau libre ou en mosaïque avec les vasques à utriculaire. Les conditions stationnelles des roselières à marisques du marais de Sacy paraissent être en adéquation avec son écologie et en particulier sur la nécessité d'une alimentation hydrique régulière. Les deux fonctionnements hydrogéologiques décrits dans les marais de Sacy (au nord, contribution principale de la nappe de la craie ; au sud contribution additionnelle de la nappe du Tertiaire peu productive là où la nappe de la craie devient captive) ont une influence directe sur la végétation qui s'y développe au sein des marais. Les formations de roselière à marisque du marais de Sacy semblent exclusivement se développer au niveau de la nappe de la craie et non des nappes superficielles du Tertiaire. Ainsi les émergences artésiennes de la nappe de la craie semblent jouer un rôle prépondérant dans la formation de la tourbe et également sur le développement des roselières à *Cladium mariscus*. L'optimum de développement des cladiaies se situant sur des tourbes mésotrophes, l'influence de la nappe souterraine sur le développement de ces formations semble indéniable.

Les marais de Sacy sont un système hydrogéomorphologique en dépression (Gayet *et al.*, 2016) en interaction avec les eaux souterraines avec une dépendance principale à la nappe de la craie (masse d'eau FRHG205) mais également en relation avec la nappe du Tertiaire (FRHG104) dans la partie sud des marais. Cette dernière contribue à alimenter les marais. Les travaux de corrélation entre les différents signaux piézométriques ont montré qu'il est possible d'utiliser un piézomètre indicateur des fluctuations de la nappe qui ne soit pas directement dans la zone humide mais que dans la mesure du possible il est préférable d'avoir un regard sur la nappe directement dans la zone humide.

Pour le suivi temporel des conditions hydrogéologiques (niveau piézométrique de la nappe en relation avec le milieu humide), un seul point peut suffire. Cependant il a été montré par la

centaine de points d'observations quadrillant les marais que les conditions hydriques et les critères pédologiques sont variables à l'échelle du site. Il est important d'avoir une connaissance fine de la topographie et de la piézométrie pour caractériser les écoulements souterrains de la nappe superficielle, ainsi que l'épaisseur de la zone non saturée qui va directement influencer la végétation (période, durée, fréquence de submersion/émersion).

De la même manière et malgré le manque de données brutes en pédologie, les cartographies disponibles des critères abiotiques ont montré la variabilité qu'il peut exister également dans les horizons histiques et les intercalations minérales à l'échelle d'un même site. Le croisement de l'épaisseur des ZNS avec la représentativité des horizons histiques avant 70 centimètres montre qu'à une exception près les horizons majoritairement minéralisés sont situés sur des secteurs à ZNS importante. Ces critères ne semblent pas suffisants pour indiquer clairement une relation de cause à effet directement observable entre la hauteur de la nappe et l'état du sol. Enfin, il est important de réaliser une campagne d'observations avec suffisamment de sondages pour avoir une représentativité des sols à l'échelle du milieu humide.

Le marais de Sacy est le seul site pilote de notre étude où il a été possible de faire le lien entre hydrogéologie – pédologie – écologie et d'illustrer la relation eau – sol – plante et plus précisément la relation eau souterraine – sol – plante.

7. Les marais de Meyranne et Chanoines

Les marais de Raphèle (1 800 ha, Thibault, 2004), localisés en Provence-Alpes-Côte-D'azur, entre Arles et Fos-sur-Mer, comprennent à l'est les marais des Chanoines et à l'ouest les marais de Meyranne (Ros, 2016). Ils se situent à l'interface de la Camargue et de la plaine steppique de la Crau. Les sols semi-tourbeux sont alimentés par une nappe souterraine dépourvue de sel (Ros, 2016). Le climat de la Camargue est typiquement méditerranéen avec des précipitations annuelles faibles qui se concentrent en automne et un ensoleillement important.

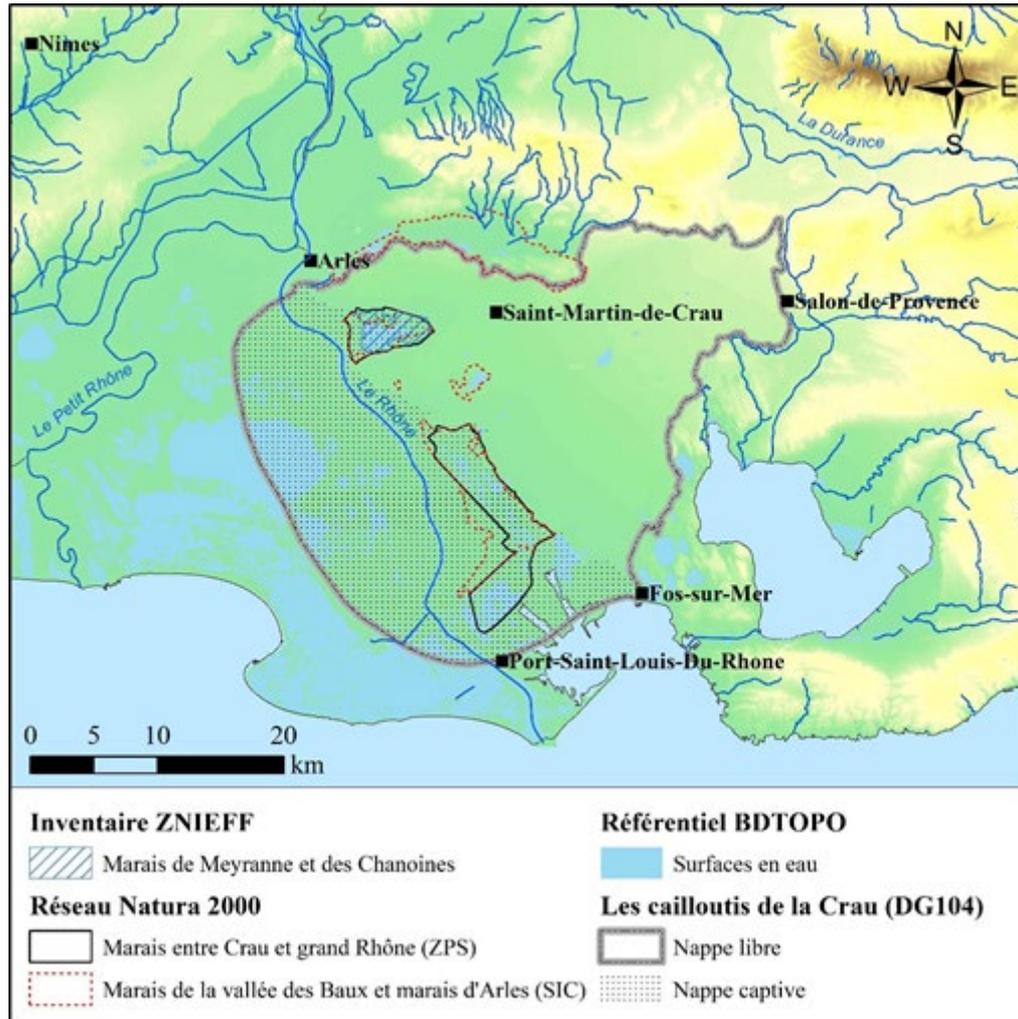


Illustration 59. Localisation des marais de Meyranne et des Chanoines

Les marais de Raphèle (Illustration 59, Illustration 60) sont inclus dans la ZNIEFF de type 1 des marais de Meyranne et des Chanoines (ZNIEFF 930012410¹⁷, 1 310 ha). Ils font partie du réseau Natura 2000, ils sont classés au titre de la directive « Habitat » – site d'importance communautaire (SIC FR9301596¹⁸) des marais de la vallée des Baux et marais d'Arles – et de la directive «

¹⁷ <https://inpn.mnhn.fr/zone/znief/930012410>

¹⁸ <https://inpn.mnhn.fr/site/natura2000/FR9301596>

Oiseaux » – zone de protection spéciale (ZPS FR9312001¹⁹) des marais entre Crau et Grand Rhône – pour leur richesse floristique et faunistique.

La gestion hydraulique des marais de Raphèle est complexe. Ils sont structurés par six ouvrages hydrauliques de drainage (Illustration 60) : les canaux de Ceintureau et du Chalavert au nord, le canal de la Chapelette au sud et les canaux du Viage, du Vigueirat et d'Arles à Fos à l'ouest. Ces canaux sont principalement alimentés par les eaux résiduelles gravitaires du système d'irrigation des prairies de foin répandues sur une grande partie de la plaine de la Crau ce qui entraîne un régime particulier des canaux : des niveaux d'étiage en hiver et des niveaux de hautes eaux en été (Ros, 2016). Ce processus d'irrigation recharge la nappe phréatique : 70 % de la recharge de la nappe se fait par l'infiltration du surplus d'irrigation des prairies de foin et les 30 % restants viennent des précipitations (Oliosio *et al.*, 2013).

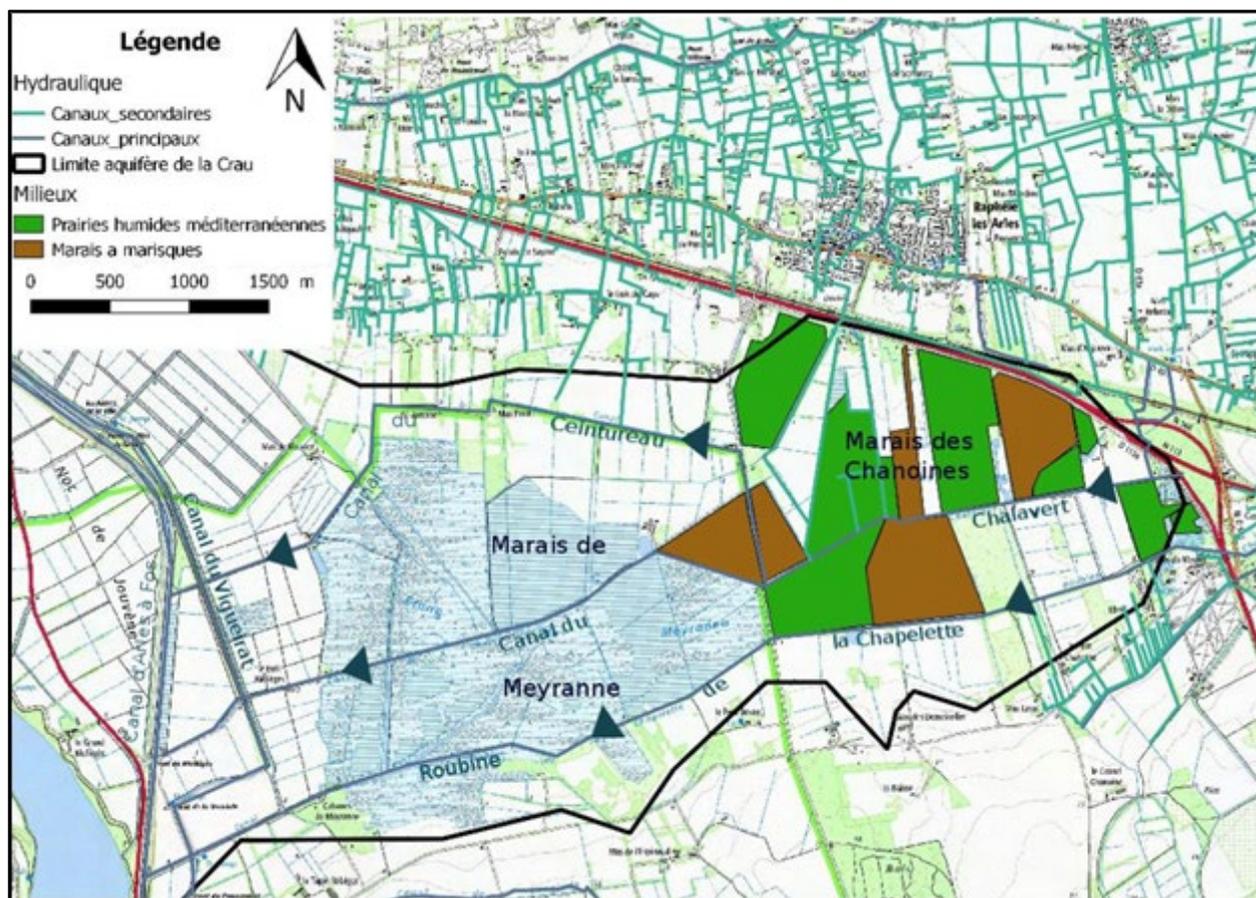


Illustration 60. Carte des marais de Raphèle, milieux patrimoniaux et canaux principaux (Ros, 2016)

7.1. GEOLOGIE

La plaine de la Crau est située à l'est du grand Rhône et forme un triangle dont les pointes sont Arles à l'ouest, Lamanon à l'est et Fos au sud. Elle est formée par des alluvions grossières apportées par l'ancienne Durance (Illustration 61). Sur un substrat de marnes grises, des cailloutis d'origine alpine se sont déposés à la fin du tertiaire et au début de la dernière glaciation

¹⁹ <https://inpn.mnhn.fr/site/natura2000/FR9312001>

quaternaire. Ces dépôts d'une vingtaine de mètres d'épaisseur, sont formés de galets mêlés à des graviers et des sables qui souvent s'agglomèrent en poudingue (Giudicelli *et al.*, 1980).

Le substratum profond de la plaine de la Crau est constitué, à la base, du calcaire crétacé plissé par la phase orogénique pyrénéenne. Puis, durant la transgression marine miocène, de la molasse et des marnes gréseuses se sont déposées de façon non homogène sur la plaine. Lors de la régression messinienne, le niveau marin a considérablement baissé et s'est creusé le canyon messinien de la Durance à travers le substratum en place (Clauzon, 1979). Un nouvel épisode marin au Pliocène comble le canyon de la Durance et une partie de la Crau par des marnes bleues. Ensuite, alluvions de la Durance sur la Crau et cailloutis cryoclastiques se déposent avant que la Durance ne prenne son cours actuel (Colomb *et al.*, 1979).

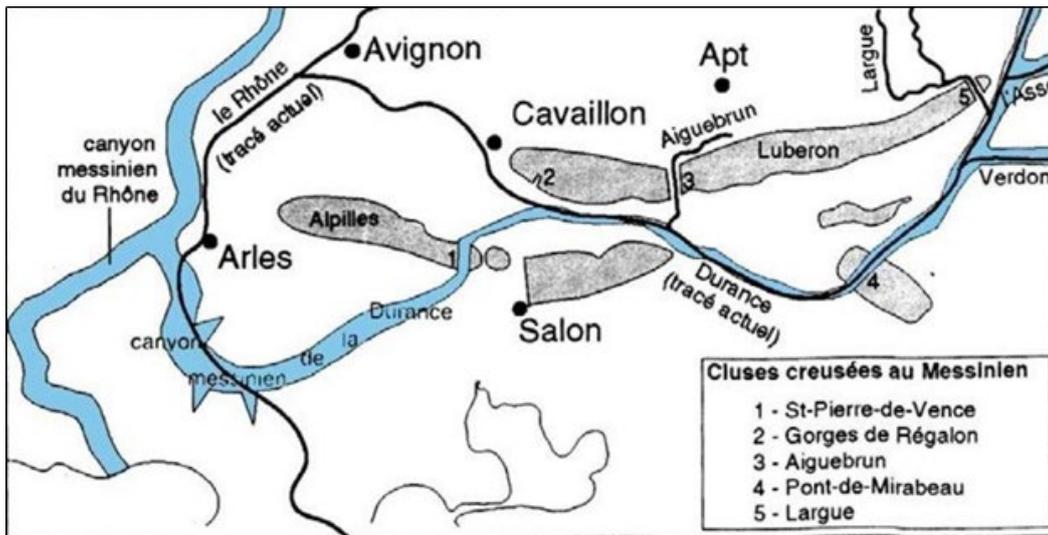


Illustration 61. Les eaux de la Durance au Messinien (Alcazar, 2011)

Cette formation des « cailloutis de la Crau », issue du comblement du delta fluvial (CEREMA, 2015), est caractérisée par des galets de quartzite associés à des galets de calcaire avec une épaisseur moyenne de 30 m. La surface de cette formation est généralement affectée par un paléosol rougeâtre, décarbonaté et la présence d'une dalle de cimentation calcaire. Sous les cailloutis de Crau, le substratum est représenté par l'Astien (Pliocène), horizon sablo-gréseux jaunâtre et par le Vindobonien (Miocène) à faciès de calcarénites détritiques (molasses) (CEREMA, 2015).

Les cailloutis de la Crau sont recouverts de limons et de tourbe entrecoupés de dépôts un peu plus sableux correspondant aux dépôts de débordement du Rhône (Illustration 61). La tourbe est formée par l'accumulation et la fossilisation de débris végétaux dans un contexte très humide car en contact avec la nappe de la Crau. L'épaisseur importante de la tourbe pouvant atteindre jusqu'à 5 m (Dellery, 1987) catégorise les marais de Raphèle en zone de tourbière (Ros, 2016).

7.2. HYDROGEOLOGIE

L'ensemble des cailloutis est le siège de l'importante nappe phréatique de la Crau (CEREMA, 2015) qui correspond à la masse d'eau souterraine FRDG104 « cailloutis de la Crau » (Illustration 59).

La nappe de la Crau s'étend sur 550 km² entre Arles, Salon et Fos-sur-Mer, à l'est de la Camargue. Elle se situe dans les dépôts sédimentaires du delta fossile de la Durance (Illustration 61). Il y a 2 millions d'années la Durance se jette dans la mer au droit de l'actuelle plaine de Crau,

et des cailloutis constitués de galets sont déposés par le fleuve. Il y a 18 000 ans, le lit de la Durance est dévié, et son delta s'assèche pour laisser place à une steppe pierreuse semi-aride « le cossoul ».

Aujourd'hui, ce sont 14 000 ha de prairies qui sont irriguées en gravitaire pour la culture du foin (AOC) via 400 km de canaux. Ces derniers sont alimentés par l'eau de la Durance via le partiteur de Lamanon, qui prend l'eau dans le canal EDF en provenance de la retenue de Serre-Ponçon (Illustration 62). Chaque année, 300 millions de m³ d'eau sont ainsi apportés aux prairies, dont 200 millions de m³ rejoignent la nappe. Cette irrigation des prairies de foin de Crau est à l'origine d'environ 70 % de la recharge annuelle de la nappe (Guichard, 2011).

Les écoulements souterrains de la nappe de la Crau s'effectuent du nord-est, seuil de Lamanon, vers le sud-ouest de la plaine, la zone d'exutoire principal de la nappe (Illustration 62). La piézométrie est comprise entre la cote 80 m au nord-est et 0 m au sud-ouest. L'amplitude de variation de la nappe varie de 2 m à plus de 5 m dans certains secteurs (CEREMA, 2015). Les écoulements sont libres jusqu'à cette zone de marais, marquant la limite sud-ouest de la masse d'eau. Au-delà, la nappe de Crau s'enfonce sous une couche de limons récents qui mettent en charge la nappe, elle devient alors captive et saumâtre (Alcazar, 2011 ; Agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse, 2014).

Au niveau fonctionnel, se distinguent trois zones dans la Crau d'Arles :

- au nord et à l'est, les canaux et l'irrigation alimentent la nappe ;
- au sud, les fossés drainent la nappe ;
- dans la partie centrale, la nappe est drainée en hautes eaux (en été), et alimentée en période de basses eaux (en hiver). Les périodes de hautes eaux et basses eaux sont inversées par rapport à un aquifère alluvial classique : l'alimentation de la nappe se faisant pendant les périodes d'irrigation des prairies sur la plaine de la Crau (fin mars – début septembre) (Ros, 2016).

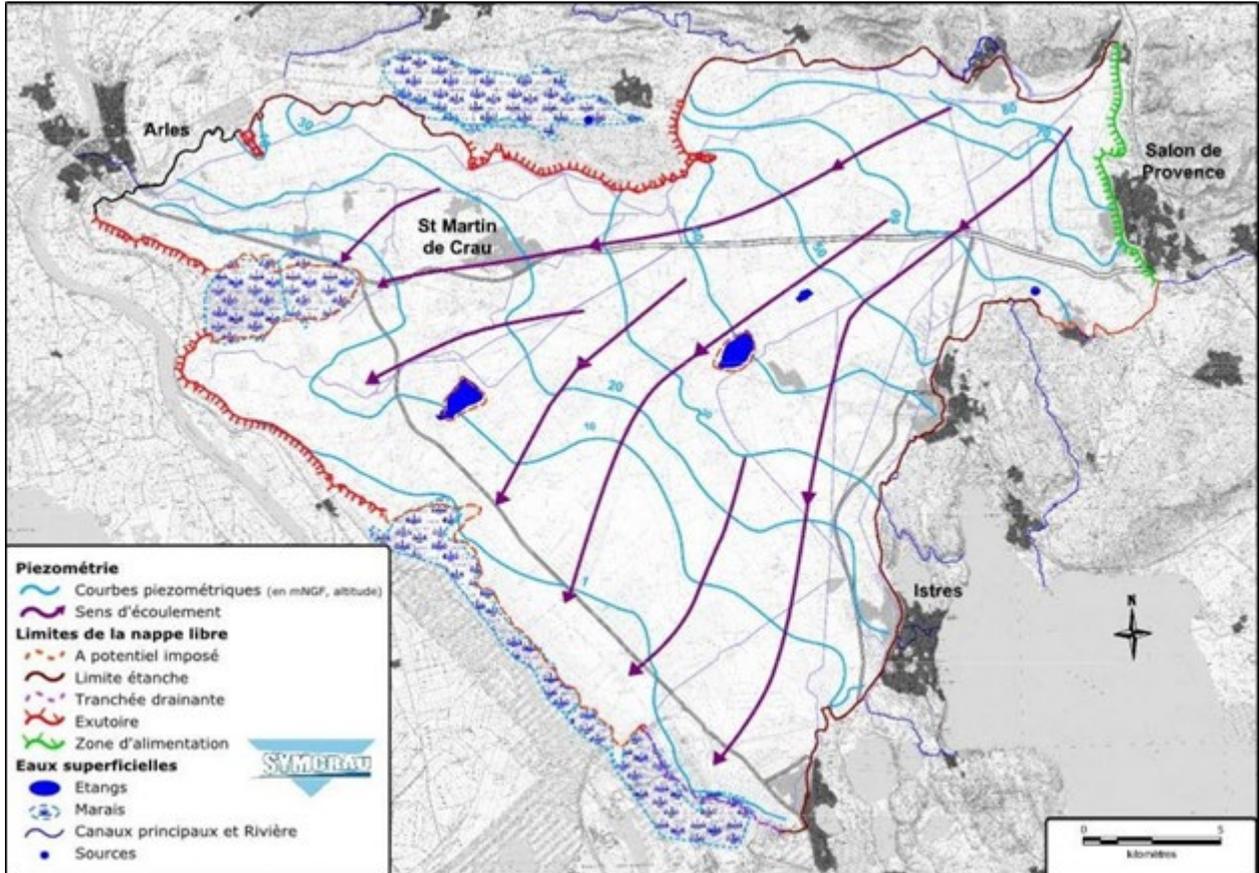


Illustration 62. Carte schématique du fonctionnement hydrogéologique de la nappe de Crau (Alcazar, 2011. Source : SYMCRAU)

Les principaux exutoires de la nappe de la Crau se situent sur la bordure ouest, au niveau des marais de Coustière de Crau, entre Arles et Fos-sur-Mer. Les marais de Meyranne et des Chanoines sont un des exutoires naturels de la nappe de la Crau (Dellery, 1987). Cette zone de marais est constituée de laurons qui sont des puits naturels, ouverts ou fermés dans les alluvions récentes de la Crau (Giudicelli *et al.*, 1980, Illustration 63). Ils constituent des regards sur la nappe (Dellery, 1987). Ces résurgences d'eau douce, fraîche (entre 12 et 16°C ; CEREMA, 2015) et oligotrophe contribuent, en continu, à l'alimentation en eau des marais (Illustration 63, Illustration 64). Les canaux d'irrigation et d'assainissement agricoles contribuent également à l'alimentation en eau de ces zones humides.

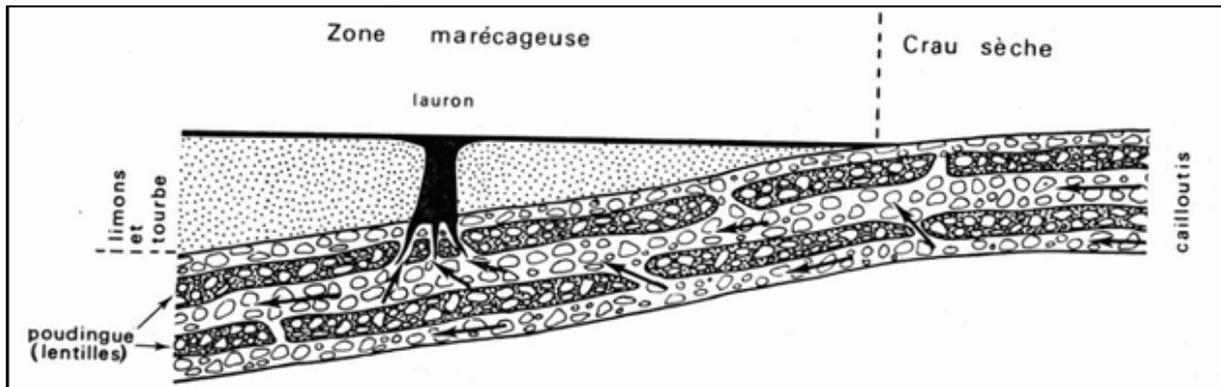


Illustration 63. Coupe schématique d'un lauron, les flèches indiquent la circulation de l'eau de la nappe profonde dans les cailloutis (Giudicelli *et al.*, 1980)

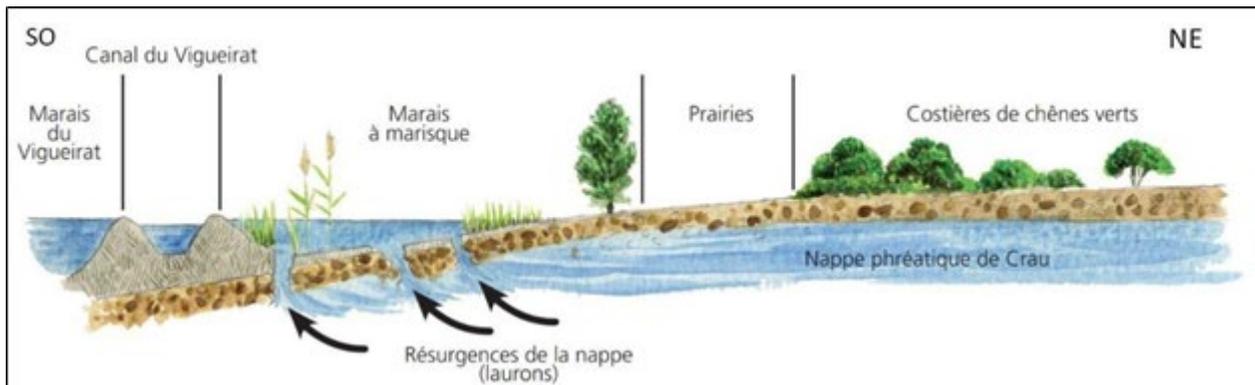


Illustration 64. Coupe schématique du fonctionnement des laurons (crédit Parc naturel régional de Camargue)

Ros (2016) a mené des suivis hydrogéologiques sur une période de 5 mois (avril – septembre 2016), complétés d’investigations pédologiques et géochimiques pour caractériser les échanges entre les différents réservoirs au sein des marais de Raphèle. L’acquisition de données hebdomadaires a concerné des mesures de débit dans deux canaux de drainage principaux des marais (Chalavert et Chapelette) et dans un lauron au nord des marais ; un suivi piézométrique sur six points de mesure (puits cimetière, SNCF1, SNCF2, puits onde, PZ1, PZ2) ; des relevés d’échelles limnimétriques de quatre laurons (LAL, LTR2, LTR1, LTR3) (Illustration 65).

Ces travaux ont abouti à l’établissement d’une carte piézométrique des marais des Chanoines en période de hautes eaux (juin 2016). Elle met en évidence un axe de drainage de l’est vers l’ouest et un second axe nord-sud qui rejoint le premier (Illustration 66). Les isopièzes ne font pas ressortir de relation canaux – nappe mais le niveau de la nappe est plus haut que le niveau d’eau dans le canal (Chalavert et Chapelette). Les eaux souterraines pourraient alimenter les canaux à ces endroits.

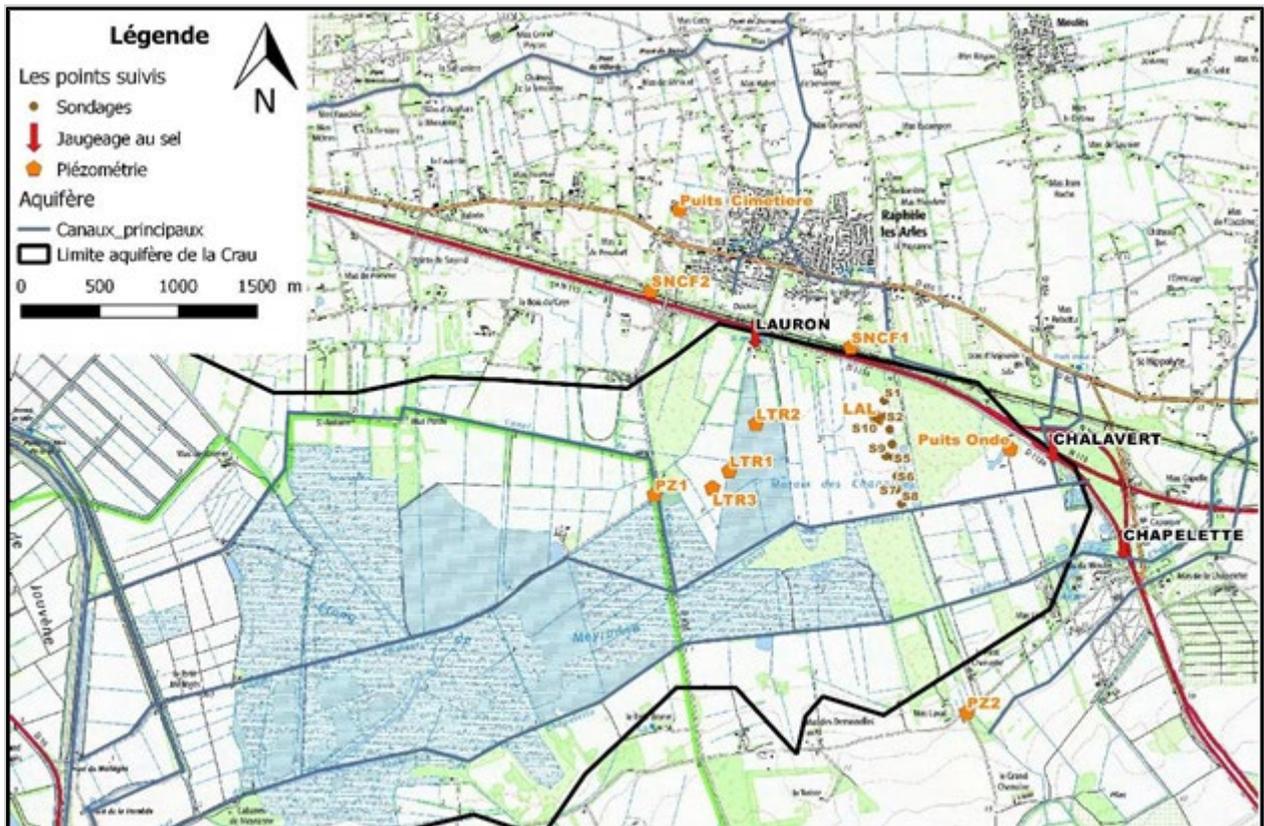


Illustration 65. Carte de localisation des différents points de mesure des travaux de Ros (2016)

Ros (2016) décrit des variations des niveaux piézométriques dans le marais, cohérentes avec les variations piézométriques du niveau de la nappe. Ces relations apparaissent cohérentes mais les données disponibles sont insuffisantes pour corréliser les niveaux de la nappe de la Crau à ceux relevés dans le marais.

L'ensemble des résultats acquis (hydrogéologie, pédologie et géochimie) met en avant la complexité des interactions eaux de surface – eau souterraine. Ils permettent cependant d'établir un premier diagnostic sur la dépendance des milieux humides aux eaux de la nappe. La nappe est proche de la surface et confère au milieu ses propriétés de « milieux humides ». Une carte piézométrique (juin 2016) a pu être proposée (Illustration 66), elle représente une période de hautes eaux. Le niveau d'eau se situe entre 15 et 70 cm sous la surface du sol.

Les marais de Raphèle, de Meyranne et des Chanoines, sont alimentés par la nappe de la Crau et apparaissent dépendants de la masse d'eau souterraine des cailloutis de la Crau (masse d'eau souterraine FRDG104). La nappe de Crau est exploitée pour différents usages (agricole, industriel, alimentation en eau potable) à hauteur d'environ millions de m³/an. Cette pression de prélèvements est à prendre en considération dans un contexte complètement anthropisé de recharge de la nappe (70 % de la recharge par l'irrigation des prairies). L'évaluation de l'état de la masse d'eau souterraine FRDG104 conclut au bon état chimique et quantitatif.

Les marais de Raphèle constituent un système hydrogéomorphologique de versant et bas-versant (Gayet *et al.*, 2016) dépendants des eaux souterraines. Baillieux *et al.* (2019) distinguent dans leur analyse les marais de Meyranne avec une dépendance partielle à la nappe des marais de Chanoines dépendant fortement de la nappe émergente.

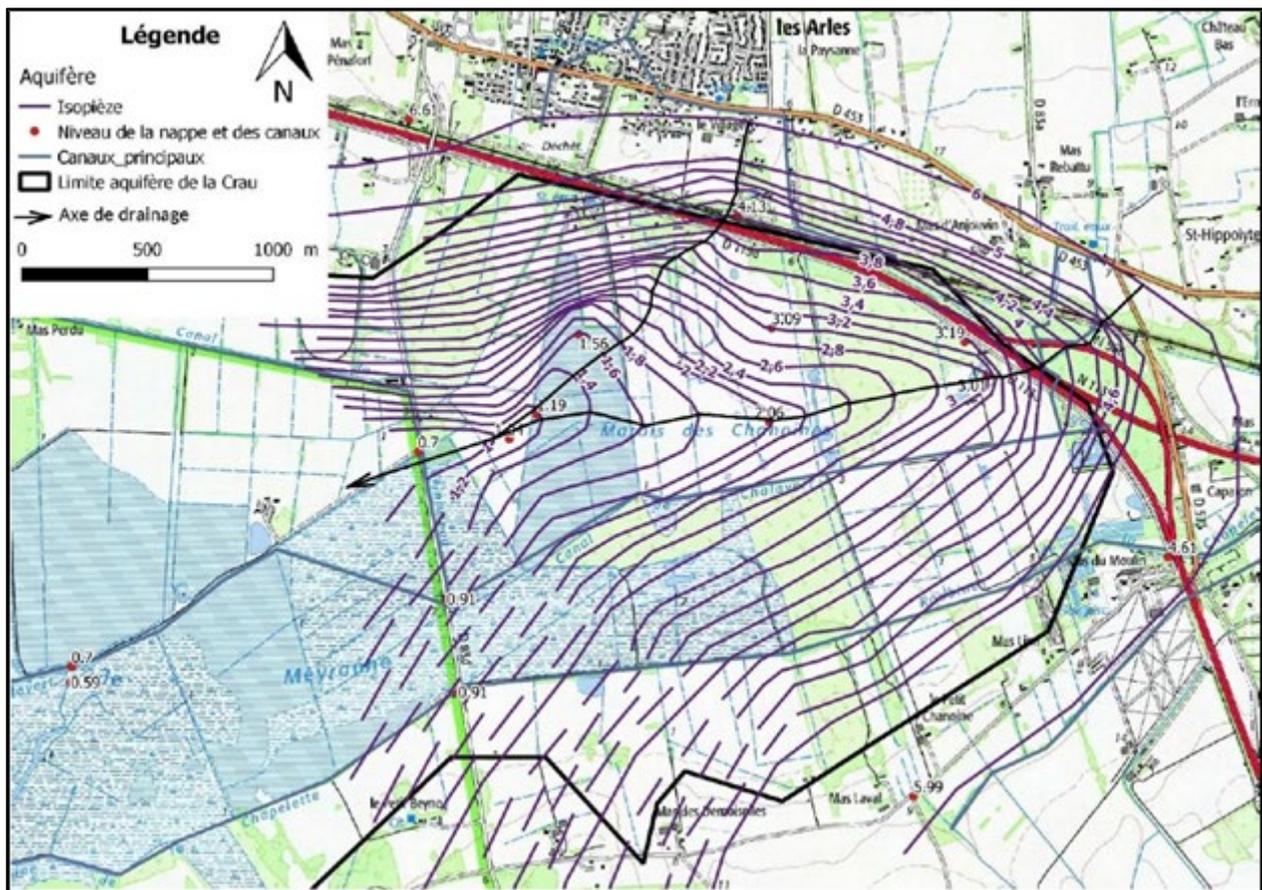


Illustration 66. Carte piézométrique (juin 2016) dans le marais des Chanoines (Ros, 2016)

7.3. ECOLOGIE

Les marais de Meyranne et des Chanoines sont constituées d'un complexe de zones humides associant des prairies fauchées, des secteurs connaissant des remontées salines, et de vastes marais. Parmi les habitats naturels présents au sein de ces sites, on peut citer les forêts riveraines de peupliers (*Populetum albae*), les marais inondables à molinie ou à marisque (*Molinio Holoschoenion* : *Molinietum mediterraneum*, *Gentiano cladietum*), les cariçaie inondée à carex élevé (*Caricetum elatae*) ou les roselières (*Phragmitetum*)

Les marais des Chanoines et la partie orientale des marais de Meyranne sont constituées de prairies et de marais très anciens présentant localement une importante accumulation de tourbe.

Les marais de Meyranne sont quant à eux occupés par des roselières à *Phragmites australis* et parsemés de plans d'eau libre.

7.3.1. Approche qualitative

Les données disponibles sur les marais de Meyranne et Chanoines étant très limitées, les éléments présentés ci-dessous se concentrent essentiellement sur les habitats d'intérêt communautaire. Ces données sont issues du document d'objectifs des sites Natura : « Marais de la vallée de Baux et Marais d'Arles » et « Marais entre Crau et Grand Rhône » et du formulaire standard de donnée de la ZNIEFF de type 1 « Marais de Meyranne et des Chanoines »

Les données disponibles ont permis d'identifier 10 habitats naturels différents (Tableau 8, Illustration 67). Parmi ces groupements végétaux, 6 sont caractéristiques de zones humides au regard des arrêtés de 2008 et 2009 fixant les critères réglementaires de délimitation et de caractérisation des zones humides.

Habitats naturels	Code CORINE	Code EUNIS	Syntaxon	Zone humide
Gazon à Salicorne et Suaeda	15.11	A2.55	<i>Saginetea maritima</i>	Oui
Prés salés méditerranéens	15.5	A2.51	<i>Juncetalia maritimi</i>	Oui
Tapis immergés de Characées	22.44	C1.14	<i>Charetea fragilis</i>	Non
Végétation enracinées immergées	22.42	C1.12	<i>Potamogetonion</i>	Non
Groupements amphibies méridionaux	22.34	C3.42	<i>Isoetalia</i>	Oui
Prairies humides méditerranéennes hautes	37.4	E3.1	<i>Molinio-Holoschoenion</i>	Oui
Prairie des plaines médio-européennes à fourrage	38.22	E2.22	<i>Arrhenatherion</i>	Non
Végétation à <i>Cladium mariscus</i>	53.31	D5.24	<i>Cladietum marisci</i>	Oui
Forêts méditerranéennes de Peupliers, d'Ormes et de Frênes	44.6	G1.3	<i>Populion albae</i>	Oui
Forêts de Chênes verts meso- et supra méditerranéennes	45.3	G2.12	<i>Quercion illicis</i>	Non

Tableau 8. Habitats naturels des marais de Meyranne et des Chanoines

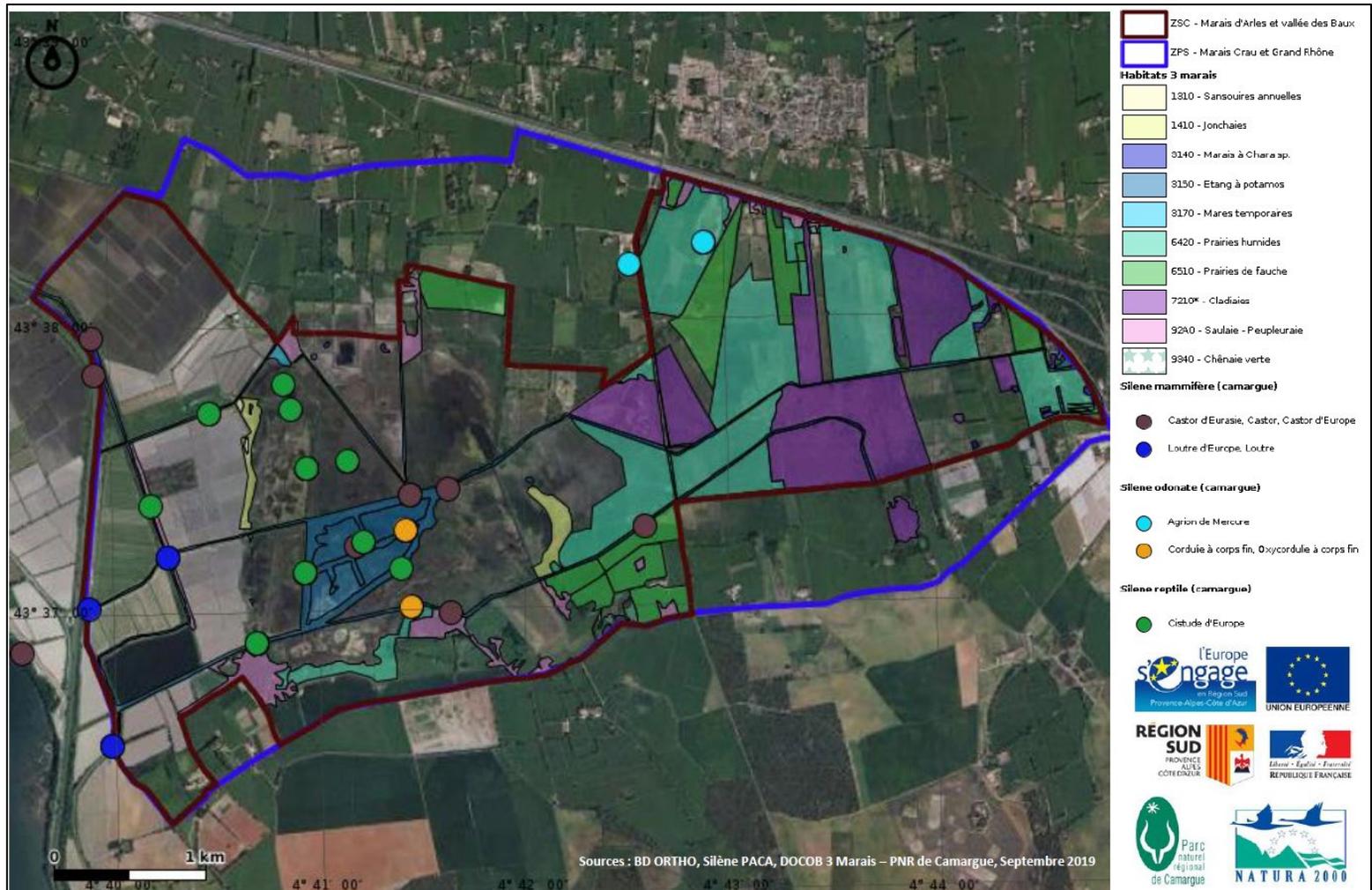


Illustration 67. Enjeux Natura 2000 sur les marais de Meyrannes-Chanoines (DOCOB 3 Marais – PNR de Camargue, sept. 2019)

7.3.2. Approche quantitative

Dans le cadre de ce projet, aucune donnée surfacique spécifique aux marais de Meyranne-Chanoine n'a pu être collectée. L'analyse quantitative des habitats naturels du site n'est donc pas réalisable. La cartographie des habitats d'intérêt communautaire permet cependant de constater de la dominance de certaines formations végétales au sein du marais. Les formations végétales présentant la surface la plus importante semblent être en premier lieu les prairies humides du *Molinio-Holoschoenion*. Ces dernières sont essentiellement localisées à l'est du site, en contact direct avec les roselières à *Cladium mariscus*. Ces dernières également présentent au sein de la moitié est du marais, semblent occuper une surface relativement importante. Les prairies de fauche sont aussi bien représentées au sein du marais. Les autres formations végétales d'intérêt communautaire occupent des surfaces relativement restreintes, essentiellement dans la moitié ouest du marais.

Les prairies humides, les prairies de fauches et les roselières à *Cladium mariscus* semblent donc être les formations végétales caractérisant le mieux les marais de Meyranne-Chanoine.

7.4. CONCLUSION

Les données disponibles sur les marais de Raphèle sont intéressantes et pertinentes mais leur utilisation a été complexe et délicate. Les données les plus intéressantes étaient les travaux de Léa Ros (2016) avec un accès aux fichiers de données brutes. Cependant le suivi hebdomadaire sur une courte période de 5 mois est insuffisant, le minimum requis est au moins un cycle hydrologique.

Baillieux *et al.* (2019) identifient des milieux dépendants des apports en eau souterraine par investigations hydrogéologiques et écologiques. Ils montrent que la distribution des cladaies à marisque et le cortège des espèces qui lui sont associées sont très représentatifs en Crau des milieux froids connectés avec des remontées d'eaux verticales souterraines. La présence de prairies humides fraîches est également un indicateur pertinent des connexions avec la nappe, même lorsque la végétation des marais froids est absente. A l'inverse, la prédominance des roselières à roseau commun traduit plutôt une alimentation par des eaux turbides et chaudes de surface, apportées par les précipitations mais surtout par l'irrigation. Les mares temporaires ne semblent pas dépendantes des apports d'eau de la nappe.

Les travaux de Ros (2016) et de Baillieux *et al.* (2019) mettent en évidence la pertinence de la complémentarité des approches écologiques et hydrogéologiques pour caractériser la dépendance des zones humides de la Crau à la présence de la nappe. Ils proposent une carte de répartition des milieux humides dépendants des eaux souterraines, préalable indispensable à la mise en œuvre d'une gestion de la nappe.

8. Ill Wald, un site de référence en pédologie

8.1. LE(S) SITE(S) REFERENT(S) EN PEDOLOGIE

Comme évoqué précédemment, le volet pédologie s'est révélé être le parent pauvre de cette étude. Les données en pédologie sont rares et en plus, là où la donnée pédologique n'était pas absente, on a collecté des données basées sur la géologie, des descriptions de solum insuffisantes pour permettre des interprétations pertinentes.

Parmi les 4 sites pilotes sélectionnés (marais de la Maye ; lagune de Paulin ; marais de Sacy ; marais de Meyranne et des Chanoines), aucun ne disposait de données suffisantes pour établir un diagnostic pédologique. Cependant le site pilote d'Ill Wald, moins riches en données hydrogéologiques et écologiques, s'est montré très intéressant et pertinent d'un point de vue pédologique. Il a donc été intégré comme site pilote dans cette 2^{ème} phase du projet essentiellement pour le volet « pédologie ». En parallèle, de nouvelles données concernant le marais de Sacy sont venues enrichir notre collecte et permettre d'aborder le volet pédologie sur ce dernier site.

Au final, seuls 2 sites, parmi les 15 étudiés (Auterives *et al.*, 2019 ; Illustration 1) initialement dans l'étude, présentent des données pédologiques intéressantes pour permettre une quantification de l'évolution de la nappe : les marais de Sacy et l'Ill Wald.

Comme évoqué précédemment, l'étude du marais de Sacy (cf. chapitre 6, Illustration 1) présente des données agrégées sur la base de 103 sondages pédologiques. Les données brutes de description précise des sols ne nous ont pas été transmises dans le cadre de cette étude. L'interprétation s'est faite à partir de ces données agrégées. Elles ont montré la grande variabilité qu'il existe à l'échelle d'un même site qui peut traduire la variabilité des conditions hydrogéologiques (contribution de la nappe de la craie du Séno-Turonien et des nappes superficielles du Tertiaire). Le quadrillage du marais a permis de mesurer la variabilité des conditions hydriques et des critères pédologiques à l'échelle du site. Pour caractériser la pédologie d'un milieu humide, un seul sondage est très insuffisant, il est important d'avoir une campagne d'observations avec suffisamment de sondages pour être représentatif du site et dresser l'état des lieux pédologique.

Le chapitre suivant concerne le site de l'Ill Wald et l'intérêt de données pédologiques détaillées.

8.2. ILL WALD

8.2.1. Description du site

La réserve naturelle régionale de l'Ill Wald est située à environ 40 km au sud-ouest de Strasbourg, à proximité de Sélestat, dans le Grand Ried (ou Ried Central) vaste zone inondable entre le Rhin et l'Ill, inondable par remontée de nappe phréatique à moins de 2 m et par débordement des eaux de surface (Schomburgk *et al.*, 2005).

L'Ill Wald est une vaste zone de prairies, de champs et de forêts, incluse dans le champ d'inondation de l'Ill. Le réseau hydrographique et son système de fonctionnement, en liaison avec la nappe phréatique, caractérisent ce secteur. Elle constitue un ensemble riedien typique avec des prairies de fauche entrecoupées de haies lâches et une forêt alluviale parmi les plus étendues de France (1 500 ha d'un seul tenant).

Le massif forestier de l'III Wald se caractérise par une vaste forêt inondable maillée par un important réseau de rivières phréatiques. Le site du Ried central de l'III Wald se caractérise essentiellement par des milieux boisés plus ou moins humides selon les secteurs : bois de frênes et d'aulnes, chênaies-charmaies à stellaire. On y retrouve aussi des prairies de fauches entrecoupées de nombreuses haies ainsi que des formations végétales aquatiques, tourbeuses et de mégaphorbiaies.

La plaine d'Alsace est caractérisée par de nombreux ruisseaux vosgiens qui sont captés par l'III – affluent de la rive gauche du Rhin – entre le Sundgau au sud de l'Alsace et Strasbourg. Cette vaste zone humide vit au rythme de l'eau avec un réseau hydrographique dense et varié : plus de 130 km de rivières (dont l'III), de fossés et de rivières phréatiques alimentés directement par la nappe au niveau de résurgences. La nappe d'Alsace correspond à la masse d'eau souterraine FRCG001 Pliocène du Haguenau et nappe d'Alsace. L'écoulement principal est parallèle au Rhin, du sud vers le nord.

Deux paysages différents, et deux modes de fonctionnement différents de l'III Wald conduit à identifier deux systèmes hydrogéomorphologiques :

(1) de type « alluvial » dans la partie est, le fonctionnement du milieu humide est lié aux débordements de l'III ;

(2) de type « versant et bas-versant » dans la partie ouest où le milieu est parcouru de rivières phréatiques directement alimentées par la nappe.

8.2.2. Pédologie

Sur le site Ried central III Wald, il existe une étude complète des sols réalisée dans le cadre d'une caractérisation de la typologie des stations forestières du massif de l'III Wald (Illustration 68, Illustration 69) et des fiches descriptives par milieu (Oberti et Meny, 1992 ; Illustration 68). L'objectif de l'étude citée ici était une meilleure connaissance du site.

Les données issues de l'III Wald sont intéressantes puisqu'elles donnent différentes informations :

- 1) Les différents types de sol avec une description fine sous la forme d'un schéma ;
- 2) Un schéma du site avec des caractéristiques topographiques et la localisation des différents sols ;
- 3) Une synthèse des caractéristiques du type de sol et de son évolution.

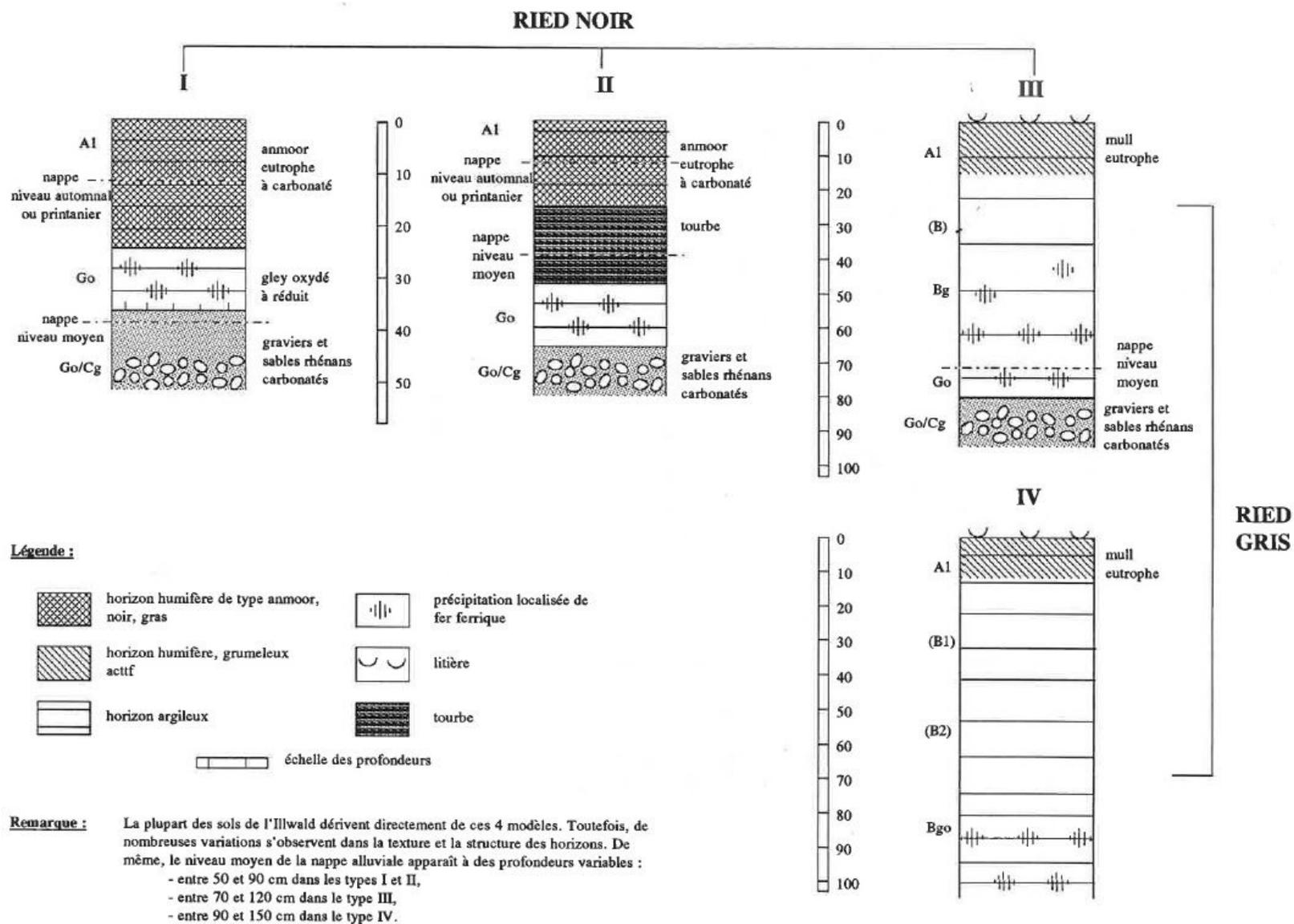
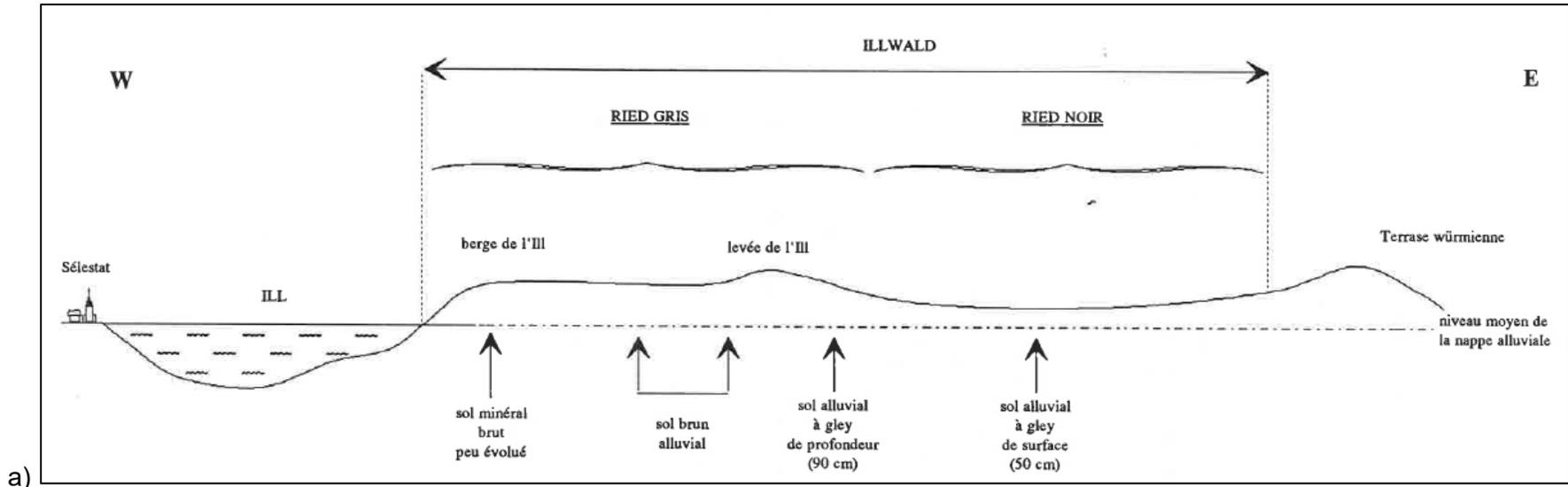


Illustration 68. Principaux types de sols de l'Illwald (Oberti et Meny, 1992)



b)

TYPE DE SOL	sol peu évolué, d'apport alluvial	sol évolué, brun alluvial		
		bien différencié		
EVOLUTION	rajeunissement permanent par les eaux courantes	évolution ± complète du profil en fonction de la hauteur d'eau	drainage moyen	drainage faible
			frais à très frais	très frais à assez humide
CARACTERISTIQUES	minéral brut, peu différencié	marécageux à assez humide		

Illustration 69. Distribution des types de sols de l'Ill Wald (a) et facteurs écologiques (b) discriminants les types de sols (Oberti et Meny, 1992)

Cette étude présente la particularité de coupler une approche phytoécologique et une approche pédologique pour caractériser les différentes stations forestières, elles-mêmes réparties selon la topographie et le régime de la nappe. Il s'agit donc en soi d'une approche dont la méthode semble intéressante dans le cadre de ce projet, le site de l'étude a été décrit entièrement selon cette méthode. D'une part, cette approche mêle les trois disciplines scientifiques qui nous concernent. D'autre part, une clé de détermination a été réalisée afin d'identifier une zone en fonction de la situation, de sa végétation et de son sol.

Si la méthode employée sur le site de l'III Wald ne vise pas un diagnostic sur l'état fonctionnel de la zone humide ou de la nappe, elle permet de mettre en lumière des situations-type à un instant donné, dans le même esprit qu'un état des lieux. Sur les volets hydrogéologique et écologique, les données disponibles étaient peu satisfaisantes. Mais du point de vue pédologique, malgré l'absence de données brutes, il s'agit d'une méthode qui permet d'envisager une expertise plus précise, à la fois sur une évolution des situations dans le temps, et aussi pour mettre en évidence des indicateurs. Les fiches descriptives par typologie de station décrivent des caractères complémentaires mêlant végétation dominante, sol et régime hydrologique (Illustration 70).

CARACTERES ECOLOGIQUES	
Matériaux parentaux :	limons récents de l'ILL peu épais sur graviers vosgéo-ellans
Microtopographie :	légère dépression dans le paysage (maximum de dénivellation : 20 à 30 cm)
Type de sol, caractéristiques :	sol alluvial hydromorphe, graveleux, à niveau de gley proche de la surface
	- texture : limono-argileuse pour les horizons de surface ; argilo-graveleuse pour les horizons de profondeur
	- structure : polyédrique
	- humus : mull eutrophe ou hydromull
	- niveau graveleux visible : à moins de 50 cm de profondeur
	- hydromorphie : de type nappe permanente, assez mobile. Niveau de gley généralement grisâtre, visible à moins de 80 cm de profondeur, souvent masqué ou mêlé aux graviers
Régime hydrologique de la nappe :	nappe permanente à régime océanique (ILL) : inondations hivernales et printanières par remontée de la nappe et par crues débordantes (ILL) ; étiage estival. Submersions annuelles de quelques jours à une semaine.
Basses eaux :	- 50 à - 120 cm
Hautes eaux :	- 20 à - 40 cm

Illustration 70. Extrait d'une fiche descriptive d'un type de station forestière de l'III Wald (Oberti et Meny, 1992)

Quelques limites sont néanmoins présentes. En premier lieu, l'objectif de l'étude est essentiellement descriptif. Il y a peu d'enjeu de diagnostic sur l'état de zone humide dans cette étude. Ensuite, il s'agit ici uniquement des stations forestières, traitant donc des surfaces boisées uniquement. Ces éléments, associés à un contexte géographique localisé (comme pour tous les autres sites) rendent difficile l'utilisation des données pour une utilisation à large échelle. Par ailleurs, l'approche par clé de détermination est assez poussée et peut être complexe sur de grandes surfaces hétérogènes. Enfin, aucune donnée brute n'est disponible sur ce site.

Malgré ces limites, cette étude demeure intéressante dans sa méthodologie et sa manière de réunir les disciplines scientifiques. Sur le plan pédologique, cette étude nous a semblé pertinente puisque le sol est pris comme un élément d'identification des zones étudiées, au même titre que

la végétation. La connaissance d'un site et sa compréhension fine, à travers une approche multidisciplinaire telle que celle-ci, semble une étape importante et nécessaire sur de nombreux autres sites avant de pouvoir réaliser une analyse complète des interactions et la mise en évidence d'indicateurs pédologiques pertinents. Ce constat nous amène à détailler, dans la suite de ce rapport, la nécessité de recueillir de la donnée sur le volet pédologique.

8.3. CONCLUSION : DEFINIR LA PLACE DE LA PEDOLOGIE

Comme évoqué précédemment à l'issue de l'analyse des données de l'ensemble des sites pilotes, le manque de données, à la fois en quantité suffisante et avec une uniformité dans les protocoles et données inventoriées, est la principale conclusion que nous pouvons faire.

Le site d'Ill Wald permet d'entrevoir le potentiel d'une approche à plusieurs entrées, la pédologie en faisant partie.

De façon générale, et au-delà des seules zones humides, l'approche pédologique pour caractériser et comprendre un territoire est peu employée en tant que fin en soi. L'étude des sols appuie généralement une recherche autour d'une problématique précise : appui à l'évaluation de la vulnérabilité de la ressource en eau, à la lutte contre l'érosion, ou pour identifier réglementairement une zone humide. Par l'aspect relativement coûteux des investigations pédologiques (nécessiter de réaliser plusieurs observations et campagnes de terrain), leur emploi est souvent limité. Pour les zones humides, et pour les sites étudiés dans le cadre de ce projet, y compris les sites n'ayant pas été retenus comme sites pilotes, c'est également souvent le cas.

L'approche pédologique est peu développée au regard des autres volets. Pourtant, le premier lien identifiable entre le volet pédologique et les deux précédents est la possibilité de comprendre et caractériser le fonctionnement d'une partie de l'écosystème sous la surface. La pédologie permet, au travers de connaissances des mécanismes hydrauliques, biologiques, physiques ou encore biochimiques en place dans le sol, d'apporter un regard complémentaire aux autres approches. L'objet même de l'étude en pédologie, le sol, correspond à une interface entre le substrat minéral sous la surface et la biosphère qui se développe à sa surface. Cette interface a été façonnée par des processus pédogénétiques au cœur desquels l'eau est essentielle. Le sol est un point de passage indispensable au cycle de l'eau autant qu'à tous les cycles biogéochimiques. Identifier un type de sol, au-delà de la seule description de l'hydromorphie, implique généralement d'identifier comment l'eau circule dans le sol et quel rôle le sol joue dans le cycle de l'eau.

Les interactions entre les données potentiellement exploitables en pédologie et les données hydrogéologiques et écologiques sont donc indéniables. La réalisation d'un état des lieux pédologique initial sur les sites suivis est donc important.

8.3.1. Interaction avec les habitats et la végétation

Pédologie et écologie vont souvent de pair en matière de zone humide, puisqu'il s'agit des deux approches utilisées pour la détermination de zones humides dans le cadre d'études réglementaires au titre de la Loi sur l'Eau.

D'autres interactions entre l'approche pédologique et l'approche écologique tiennent à la caractérisation du niveau trophique offert par le sol, à ses caractéristiques physico-chimiques mais aussi biologiques. Les processus biochimiques en œuvre dans les sols humides sont très particuliers. La composition en nutriments des sols est en lien direct avec la végétation, et dépend notamment de l'activité biologique des sols. Cette activité biologique peut être fortement

contrainte par la saturation en eau. Son étude fine pourrait permettre d'identifier des indicateurs de suivi à la fois du niveau d'engorgement du sol, mais aussi de son évolution. Par exemple, une augmentation franche de l'activité des micro-organismes dans un sol, à une même profondeur, à une même période, associée à une évolution de la fraction humifiée de la matière organique, peut amener à identifier une évolution de l'engorgement du sol à la baisse.

8.3.2. Interaction avec les eaux souterraines

L'interaction avec l'approche hydrogéologique concernera toutes les informations pédologiques pouvant apporter des notions de profondeur de saturation, comme la profondeur et la nature des différents horizons hydromorphes.

Les horizons réductiques sont intéressants ici, car ils témoignent du niveau de saturation actuel dans le sol. Par ailleurs, les horizons réductiques sont de bons indicateurs, car le ressuyage de l'horizon peut amener une réoxydation du fer réduit, se traduisant par des couleurs facilement observables.

La tourbe et les histosols sont également de très bons indicateurs. Dans le cas d'une tourbière, le niveau de nappe ne doit pas descendre en dessous de 80 cm de profondeur sur une durée de plus de 2 mois pour conserver des conditions réductrices nécessaires à la tourbifications (Laplace-Dolone, 1994).

8.3.3. Interactions croisées

Certains critères pédologiques sont à mettre en relation avec les deux autres approches. L'exemple ci-dessous peut illustrer parfaitement une réflexion croisée des trois approches.

Dans le cas d'un sol présentant des traits rédoxiques en surface mais ne se poursuivant pas en profondeur (classe d'hydromorphie Va dans le tableau du GEPPA, 1981, Illustration 71), la caractérisation d'une végétation de zone humide en surface permet d'attribuer un caractère fonctionnel à l'hydromorphie observée, et valide la présence d'une nappe perchée temporaire en surface.

L'absence d'hydromorphie en profondeur peut indiquer plusieurs choses. La première possibilité est que la nappe reste en surface. Dans ce cas le volume d'eau dans le sol est limité, et il peut être intéressant de croiser les chroniques piézométriques et pluviométriques pour comprendre plus finement le lien entre les eaux souterraines et l'alimentation d'une zone humide uniquement en surface. Il peut s'agir d'une zone humide de versant liée à la résurgence d'une source à faible débit dépendant d'un aquifère libre sur le plateau en amont. Cette eau s'écoulerait alors en subsurface sur un sol peu perméable à faible profondeur.

L'absence d'hydromorphie observée en profondeur peut aussi être liée à une circulation de l'eau latérale en profondeur, ou un apport souterrain constant d'eau. Dans le cas d'un renouvellement de l'eau saturant le sol (circulation de nappe par exemple), l'eau présente est toujours relativement oxygénée, et l'hydromorphie peut ne pas se marquer. Dans ce cas, l'observation est à rapprocher de l'approche hydrogéologique, notamment quant aux processus d'alimentation en eau de la zone humide.

8.3.4. Vers une compréhension pédologique des sites humides

L'approche utilisée dans l'étude des stations forestières de l'III Wald implique une connaissance des sols en place. Les données pédologiques disponibles ne sont pas des données brutes spatialisées, mais des informations déjà interprétées de façon assez fine (type de sol bien défini, type d'humus bien détaillé). Même si ce type d'informations est pertinent, il nécessite un minimum de compétences en pédologie. Par ailleurs, envisager une utilisation de données interprétées de la sorte dans le cadre d'un protocole commun nécessite une parfaite uniformité dans la mise en œuvre de l'interprétation. Il semble donc plus pertinent de focaliser les besoins en données sur des données relativement brutes mais complètes, issues d'observations. L'ambition implicite à considérer dans le volet pédologique est l'accessibilité des compétences en pédologie pour les gestionnaires de sites humides.

Il apparaît donc important avant tout de définir ce qu'est une étude pédologique et ce que cela implique concrètement en termes d'investigations. Il convient alors de proposer une approche idéale pour l'acquisition de données, avant de traiter des indicateurs envisageables par une approche pédologique (chapitre 9.2.2).

9. Discussion

9.1. BILAN SUR LES DONNEES COLLECTEES

9.1.1. Hydrogéologie

Pour le volet hydrogéologique étaient attendues :

- Des chroniques piézométriques des eaux souterraines :
 - de la (des) masse(s) d'eau souterraine avec la(les)quelle(s) le milieu humide est en interaction, au plus proche du site pilote voire directement à l'aplomb de celui-ci ;
 - Des eaux dans le marais (nappe superficielle) ;
- Des chroniques de suivi des eaux de surface (débit, hauteur d'eau).

Les données de suivi des niveaux des eaux souterraines et des eaux de surface étaient riches et pertinentes lorsqu'elles provenaient de source comme le portail ADES ou la banque HYDRO. Ces banques de données assurent un format homogène qui facilite leur traitement et une donnée validée.

Les données fournies par les gestionnaires de milieux sont très pertinentes puisqu'elles répondent à un objectif de compréhension des milieux humides mais très hétérogènes dans leur qualité, leur organisation et leur renseignement. Les métadonnées souvent manquantes ont rendu l'interprétation difficile voire impossible. La recherche d'informations dans la littérature (plan de gestion, article scientifique, analyse de terrain, rapports d'études, cartes, etc.) a rendu la tâche très chronophage. Les données de localisation (coordonnées exactes, système de projection, cote du repère altimétrique, cote du sol, unité de mesure, date d'évènements, etc.) sont tout aussi importantes que la donnée brute de mesure du niveau d'eau. L'absence de référentiel commun ou de protocole d'acquisition adoptés par tous montre qu'il y a autant de manière de collecter et de bancariser la donnée qu'il n'y a de sites et de personnes qui collectent cette donnée.

Les travaux menés pour construire un référentiel commun de bancarisation des données d'inventaire des zones humides (RPDZH) et l'existence de protocole de référence pour l'acquisition de données comme les protocoles RhoMéo (2014) changeront à l'avenir ces points et permettront d'automatiser une partie des tâches de traitement des données.

Toutes les informations relatives au point de mesure (coordonnées, système de projection, cote altimétrique, cote du sol, environnement du point, date d'évènements particuliers, etc.) doivent être bancarisées. La donnée ainsi bancarisée permettra de caractériser pour chaque site la durée de l'hydropériode, la durée des périodes de submersion et d'émersion de la zone humide au point d'observation, les niveaux moyens en hautes eaux et basses eaux, les périodes au-dessus et au-dessous d'une certaine cote, etc. Ces indicateurs pourront être suivis dans le temps et, quand cela sera pertinent, être comparés d'un site à l'autre. Ces indicateurs sont dépendants de la donnée brute. Pour les périodes de submersion et d'émersion, la localisation du piézomètre dans la zone humide est très importante.

Cette étude a montré que chaque site est un cas d'étude spécifique en termes de fonctionnement hydrogéologique ce qui rend difficile la construction d'indicateurs communs à tous les milieux

humides. Cependant la donnée de base la mesure du niveau piézométrique permet de construire différents indicateurs (durée de l'hydropériode, les périodes de submersion, d'émersion, les fréquences de submersion, les niveaux moyens des eaux en hautes eaux et basses eaux, etc.) qui pourront être comparés au cours du temps et voire même, quand cela est pertinent, d'un site à l'autre. Il est important d'améliorer l'acquisition et la bancarisation des données piézométriques à l'échelle des sites de milieux humides

Le Réseau Partenarial des Données sur les Zones Humides (RPDZH) va à court terme répondre à cette demande de bancarisation homogène et va faciliter l'échange et le partage des données.

9.1.2. Le volet pédologie, parent pauvre de la collecte de données

L'étude des 4 sites pilotes sélectionnés a montré que le volet pédologie était le parent pauvre quant à la disponibilité des données recherchées pour notre étude :

- Pour les marais de Meyranne et des Chanoines, aucune donnée n'est disponible dans les documents collectés (cf. chapitre 7) ;
- Pour le marais de la Maye, dans la baie de Somme, les données disponibles sont d'ordre géologique et non pédologique. Elles sont issues d'un travail mené par l'INRA d'Amiens sur le Dunkerquien du Marquenterre en 1967 (Bault *et al.*, 2019). Aucune donnée pédologique précise n'est disponible sur ce secteur (cf. chapitre 4).
- Pour la lagune de Paulin, seule la description schématique d'un solum est donnée (taille des horizons, texture, profondeur d'apparition de la nappe), ce qui est insuffisant pour caractériser le type de sol, les conditions hydriques actuelles ou passées, ou encore de faire le lien avec la végétation et les habitats observés sur la lagune (chapitre 5) ;

Parmi les 4 sites pilotes, initialement le marais de Sacy ne disposait d'aucune donnée fiable en pédologie. Seules quelques approximations réalisées à partir de la géologie étaient disponibles et précisaient que la tourbe reposait soit sur des sables soit sur des argiles en fonction des secteurs considérés. Cependant, l'étude du programme pluriannuel de restauration et d'entretien de la Frette et de la gestion quantitative des Marais de Sacy-le-Grand (SETEC-HYDRATEC *et al.*, 2020) transmises en juillet 2020 apportent de nouvelles données sur la pédologie des marais de Sacy (chapitre 6).

Bien que cette étude ne nous ait donné accès qu'à des données interprétées et non pas les données brutes de description précise des sondages pédologiques, elles ont permis de mettre en évidence la variabilité des critères abiotiques à l'échelle du site et l'importance de réaliser une campagne d'observations à l'échelle du site pour dresser un état des lieux pédologique précis.

Cette variabilité est à relier avec les conditions hydriques à l'échelle du site : l'alimentation de la nappe de la craie dans la zone nord et la nappe du Tertiaire, peu productive, dans la zone sud ; la variabilité de la profondeur de la surface libre ; la direction des écoulements souterrains de la nappe superficielle. Un seul sondage est insuffisant pour mettre en évidence cette variabilité des critères pédologiques et des conditions hydriques à relier avec le développement des espèces végétales et des habitats.

La variabilité des contextes écologiques et des contextes hydrogéologiques est assurément déjà conséquente. Des inventaires et suivis écologiques sont souvent mis en place. Caractériser les habitats écologiques sur un site revient à identifier tout un fonctionnement de l'écosystème. Les contextes hydrogéomorphologiques impliquent des suivis piézométriques mis en œuvre pour une compréhension fine du fonctionnement de la nappe. Et malgré des données souvent existantes

sur ces deux approches menées chacune individuellement, la disparité des formats, des échelles de rendus, des fréquences de suivi, etc. rend parfois délicate la mise en œuvre d'un travail d'analyse identique pour chaque site pilote.

Il est indispensable de réaliser une campagne d'observations, notamment par des sondages, pour dresser l'état des lieux pédologique du site et d'avoir accès aux données brutes, c'est à dire la description précise des sondages pédologiques.

Vers la caractérisation pédologique des sites : nécessité d'un état des lieux par le sol

L'idée serait de considérer l'étude du sol comme une discipline permettant d'appréhender une analyse d'un site. Il s'agit ici d'étude pédologique au sens le plus simple, c'est-à-dire une découverte par le terrain d'un site, par la réalisation d'observations (sondages, fosses, etc.) puis une analyse faisant appel à des connaissances et compétences en pédologie. Il s'agit de confronter des observations du sol à un ensemble de connaissances des mécanismes hydriques, physico-chimiques et biologiques en jeu dans le sol, puis d'apporter des conclusions sur ce que les sols nous apprennent quant au fonctionnement du site.

La précision de la donnée relevée peut permettre tout un spectre d'expertise. Un simple relevé du niveau d'hydromorphie apporte en soi une information utile, dont la variabilité spatiale peut même être cartographiée. La notion de texture du sol apporte des informations sur d'autres points, comme par exemple la dynamique de l'eau dans le sol au travers de la notion de perméabilité. Une description très poussée permet d'éclairer sur les conditions de pédogenèse du sol, et peut apporter des précisions sur le fonctionnement hydraulique d'un site, ou venir conforter d'autres expertises d'autres disciplines menées parallèlement.

Cependant, force est de constater que les données existantes sur le volet pédologique pour les sites étudiés ne sont généralement pas très développées. Et quand elles le sont un minimum, elles ne le sont pas de la même manière.

9.1.3. Ecologie

Les données récoltées pour le volet écologie dans le cadre du projet soHUMID sont relativement hétérogènes selon les sites. Ces données se présentent sous différentes formes : données cartographiques, brutes ou élaborées. Selon les sites, les données auront permis soit une analyse approfondie soit une analyse relativement limitée.

Baie de Somme, les marais de la Maye

Les données collectées sur le site des marais de la Maye se présentent sont essentiellement des données cartographiques et élaborées.

Les marais de la Maye s'inscrivant au sein du site Natura 2000 « marais arrière-littoraux picards », une partie des données transmises concernent ce site. Le document d'objectifs Natura 2000 (Mosaïque Environnement, 2005) ainsi que les couches cartographiques des limites du site et de l'occupation du sol ont été récoltées.

Les marais de la Maye se trouvant à proximité de la Réserve Naturelle Nationale de la Baie de Somme et de la ZNIEFF de type 1 « Baie de Somme, parc ornithologique du Marquenterre et Champ Neuf » (N°: 220014314), le plan de gestion et le formulaire standard de données ont respectivement été collectées.

Concernant uniquement les marais de la Maye, les données récoltées se trouvaient essentiellement sous forme élaborée. Ainsi, les plans de gestion de 2011-2015 (Gallois, 2011) et 2019-2023 (Blondel et Coulombel, 2019) ont également été récoltés dans le cadre de ce projet. Ces plans de gestion ont été complétés avec leurs annexes cartographiques.

Enfin aucune donnée brute n'a pu être récoltée pour le site des marais de la Maye.

Les données récoltées sur le site Natura 2000 « marais arrières-littoraux picards » sont les plus intéressantes et permettent la réalisation d'une analyse relativement approfondie des marais de la Maye. Ainsi, le document d'objectifs transmis a permis d'apporter des informations claires et précises sur le fonctionnement des marais, la gestion de l'eau, les activités opérées sur les marais et sur le patrimoine naturel présent. Ces données élaborées ont surtout permis d'appréhender la composition du marais et de son fonctionnement.

A contrario, les données les plus intéressantes transmises dans le cadre de ce projet semblent être les données cartographiques. Ces données ont permis d'appréhender l'occupation du sol ainsi que les différents périmètres réglementaires des marais de la Maye. Une analyse quantitative et qualitative des habitats naturels présents ainsi que des différentes syntaxons a ainsi pu être réalisée sur ce site.

Les données récoltées sur la réserve naturelle nationale et sur la ZNIEFF de type 1 à proximité n'ont quant à elles pas permis de réaliser une analyse sur la contribution de la masse d'eau souterraine.

Concernant les deux plans de gestion transmis sur le marais de la Maye, ces derniers n'ont également pas permis une analyse approfondie.

En l'absence de donnée brute, le site des marais de la Maye n'a pas pu être traité de la façon la plus optimale afin d'évaluer la contribution de la masse d'eau souterraine sur les habitats naturels ou les espèces.

Les marais de Sacy-le-Grand

Les données récoltées sur le site des marais de Sacy-le-Grand sont relativement similaires à celles transmises pour le site des marais de la Maye.

Etant donné que ces marais s'inscrivent également au sein d'un site Natura 2000 (Marais de Sacy-le-Grand « FR2200378 ») et d'une ZNIEFF de type 1 « Marais de Sacy-le-Grand et buttes sableuses des grands monts » (N° :220005063), le document d'objectifs (Agence Mosaïque Environnement, 2005) et le formulaire standard de donnée (INPN, 2014) ont pu être récoltés.

Les données cartographiques des marais de Sacy-le-Grand ont été également pu être récoltées. Ces dernières se composent des délimitations réglementaires du site Natura 2000 et de la ZNIEFF de type 1 ainsi que de l'occupation du sol. Les données présentent les grands faciès de végétation, ainsi que leur surface.

Aucune donnée brute n'a cependant pu être récoltée dans le cadre de ce projet.

Les données élaborées récoltées pour les marais de Sacy-le-Grand sont relativement intéressantes car comme pour les marais de la Maye, elles permettent d'appréhender le fonctionnement, les usages et le patrimoine naturel du site.

Les données cartographiques sont, quant à elles, celles les plus intéressantes disponibles sur le site des marais de Sacy-le-Grand. Ces données datent de 2015, une analyse approfondie semble possible étant donné qu'un changement brutal de l'occupation du site semble peu probable. Ainsi ces données ont permis la réalisation d'analyse surfacique, qualitative et quantitative.

Concernant le volet écologie, une analyse approfondie de la contribution de la masse d'eau souterraine semble donc relativement limitée. Globalement, les données récoltées sur le site des marais de Sacy-le-Grand sont sensiblement semblables à celles récoltées sur les marais de la Maye. Une analyse comparative de ces deux sites paraît donc réalisable mais cette dernière ne pourra être approfondie sans donnée brute.

La lagune de Paulin

Les données récoltées au sein du site de la lagune de Paulin se présentent sous trois formes différentes : élaborées, brutes et cartographiques.

Pour les données élaborées, deux rapports ont été transmis concernant la lagune de Paulin : le programme pluriannuel de gestion 2013-2017 de la lagune de Paulin et le document du Parc Naturel Régional des Landes de Gascogne « Premier éléments pour servir à l'étude floristique, phytosociologique et typologiques des « lagunes » du PNR des landes des Gascognes ». Ce dernier document ne traite pas spécifiquement de la lagune de Paulin mais la mentionne à plusieurs reprises.

Des données brutes ont également pu être récoltées pour le site de la lagune de Paulin. Ces données concernent des inventaires réalisés sur différents groupes biologiques (odonates, rhopalocères, amphibiens, botanique et phytosociologique) entre 2013 et 2019.

Concernant les données cartographiques, les éléments récoltés portent sur la délimitation du site ainsi que l'occupation du sol. Les informations présentes au sein des tables attributaires sont cependant relativement limitées.

Les données disponibles pour le site de la lagune de Paulin semblent être les plus complètes de l'ensemble des sites concernés par ce projet.

Les données brutes (relevés botaniques et phytosociologiques) pourront quant à elles donner lieu à des analyses approfondies tels que le calcul d'indicateur d'engorgement ou de fertilité du sol (RhoMéo) mais aussi d'évaluer l'abondance ou la dominance de certaines espèces au sein des différents faciès de végétation de la Lagune.

De la même façon que pour les sites précédents, les données cartographiques devront permettre de réaliser des analyses surfaciques, qualitatives ou quantitatives.

Les marais de Meyranne-Chanoines

Les données transmises pour le site des marais de Meyranne-Chanoines semblent être les plus incomplètes de l'ensemble des sites du projet. Ces dernières sont soit des données élaborées de document d'objectifs ou de plan de gestion non spécifique à ce site ou des données cartographiques ne traitant pas du patrimoine naturel.

Les marais de Meyranne-Chanoines s'inscrivent au sein du site Natura 2000 « Marais de la vallée des Baux et marais d'Arles » (FR9301596). Le formulaire standard de données a ainsi été transmis pour ce site. Le document d'objectifs de ce site, datant de 2004 et actualisé en 2008

(Chambre d'Agriculture des Bouches-du-Rhône, 2008) a aussi été récolté dans le cadre de ce projet (Thibault, 2004). De plus, le plan de gestion du marais de Viguerat (Debiesse *et al.*, 2016 ; Conservatoire du Littoral, 2017), localisé au sud des marais de Meyranne-Chanoines a été transmis. Le seul document spécifique au marais de Meyranne-Chanoines qui a pu être récolté est un rapport d'activités datant de 2013 (Massez, 2013 ; Goujard *et al.*, 2019).

Les seules données cartographiques utilisables pour le marais de Meyranne-Chanoines sont la cartographie des enjeux Natura 2000 ainsi qu'une couche cartographique localisant les marais à marisque.

Globalement les données récoltées sur le site des marais de Meyranne-Chanoines sont insuffisantes pour effectuer des analyses approfondies des habitats naturels et de leur relation avec la masse d'eau souterraine. Les données élaborées transmises permettent d'obtenir une approche synthétique du fonctionnement du site mais ces données étant mutualisées avec d'autres sites à proximité, l'utilisation de ces dernières semble très limitée. De plus, compte-tenu du fait que les données cartographiques comportent peu voire pas d'éléments sur l'occupation du sol du marais, une analyse surfacique, quantitative ou qualitative ne semble pas réalisable. Les données collectées pour le marais de Meyranne-Chanoines semblent donc largement insuffisantes dans le cadre de ce projet.

Les données récoltées sur les sites sélectionnés dans le cadre de ce projet se présentent sous différentes formes : élaborées, cartographiques et brutes. Les données brutes, étant celles les plus adaptées à la réalisation d'analyse scientifique, sont les plus manquantes pour trois des quatre sites sélectionnés. Les données élaborées et brutes sont quant à elles relativement bien documentées pour l'ensemble des sites excepté les marais de Meyranne-Chanoines. Globalement les données qui sont utilisées dans le cadre de ce projet paraissent donc hétérogènes selon les formes de données et également selon les sites.

9.2. LE PROTOCOL IDEAL

9.2.1. Hydrogéologie

Pour l'acquisition future de données hydrogéologiques dans le but de répondre à la question des interactions eau souterraine – eau de surface en milieux humides, le protocole idéal requière un doublet piézométrique (comme sur le marais de Sacy) dans le milieu humide avec un piézomètre pour la nappe de surface et un piézomètre pour la masse d'eau souterraine en interaction avec le milieu.

Le suivi piézométrique de la masse d'eau souterraine en interaction avec la zone humide peut ne pas être à l'aplomb du site. Les calculs de corrélation entre chronique piézométrique dans le marais et chronique piézométrique de la masse d'eau souterraine pourra aider à identifier le piézomètre le plus pertinent comme indicateur des fluctuations des eaux souterraines.

Le suivi des eaux de surface doit répondre aux mêmes caractéristiques, un suivi journalier, voire horaire si on veut identifier la réactivité du marais à des évènements pluvieux ; un suivi des hauteurs et débits des eaux de surface dans le milieu humide ; sur au moins un cycle hydrologique. L'idéal serait d'avoir plusieurs années aux conditions pluviométriques contrastées.

Pour les eaux de surface et les eaux souterraines, les métadonnées sont importantes : la localisation exacte des points de mesure (coordonnées X et Y, système de projection) ; les données en m NGF ou en profondeur avec la cote altimétrique du repère de mesure pour les

eaux souterraines ou les hauteurs/débites pour les eaux de surface ; l'altitude du sol au droit du point d'eau pour caractériser les périodes de submersion et d'émersion du marais.

Le suivi piézométrique à l'échelle du site d'étude doit couvrir **au moins un cycle hydrologique** complet. L'idéal serait un suivi sur **plusieurs années** avec des conditions contrastées (année sèche, année humide). Le pas de temps d'acquisition de la donnée recommandé est **journalier** voire horaire si on veut caractériser des événements plus fins, comme les événements pluvieux. Le pas de temps hebdomadaire (exemple de la lagune de Paulin) peut permettre des calculs de corrélation mais les chroniques doivent être suffisamment longues (plusieurs années) pour que les résultats soient pertinents dans leur interprétation. Sur le marais de Meyranne, les suivis hebdomadaires sur une période de 5 mois ont été insuffisants pour développer cette approche.

L'importance des métadonnées (coordonnées, cote altimétrique, cote du sol) a été mise en évidence (chapitre 9.1). Ces informations doivent être précises. Cette étude a montré qu'une incertitude de quelques centimètres sur la cote du sol influencent grandement l'interprétation des périodes de submersion/émersion. Si une carte piézométrique est établie, de la même manière, il est important de connaître précisément la topographie pour caractériser l'épaisseur de la zone non saturée et faire le lien avec les critères abiotiques (pédologie) et les espèces végétales (écologie).

9.2.2. Pédologie

La notion d'indicateurs pédologiques autour des besoins en eau des zones humides et d'une possible dégradation de leurs fonctionnalités du fait de prélèvements induisent un suivi des sites et donc d'un état initial. L'absence de données pédologiques sur lesquelles s'appuyer avant le suivi renforce la nécessité de prévoir un état initial. Ce travail doit permettre d'identifier les différents seuils des indicateurs sur l'état de dégradation des sites.

Rappels en pédologie et notions fondamentales en zone humide

- **Compétences en pédologie**

Si l'intérêt d'indicateurs basés sur l'analyse pédologique réside dans une certaine simplicité de mise en œuvre, il dépend tout de même d'une qualité de l'information pédologique renseignée, et de l'uniformité dans la prise de renseignements. L'hydromorphie est le principal élément observé par le pédologue pour identifier et comprendre la relation entre l'eau et le sol. La compréhension des mécanismes sous-jacents à l'apparition des divers traits d'hydromorphie est importante pour décrire et interpréter correctement une observation de sol.

- **L'hydromorphie**

Les zones humides, au sens de l'arrêté du 1^{er} octobre 2009, modifiant l'arrêté du 24 juin 2008, peuvent être identifiées par l'expertise du sol, et plus précisément de l'hydromorphie du sol. L'hydromorphie correspond à une morphologie présentée par le sol (par exemple ses couleurs) en lien direct avec les processus d'engorgement en eau du sol. L'excès d'eau dans les sols peut avoir des causes et des origines variées : précipitations (sols à faible drainage, imperméables...), apports complémentaires de surface (ruissellement) ou de profondeur (remontée de nappe, transferts latéraux). L'action humaine peut aussi provoquer des excès d'eau (compactations, canalisation, rejets, irrigation...).

La saturation limite les échanges gazeux entre le sol et l'atmosphère. Il peut en résulter un déficit plus ou moins prolongé en oxygène qui modifie l'activité biologique du sol. Cette activité

biologique, et les processus biochimiques et physico-chimiques qui l'accompagnent, ont des conséquences sur l'organisation et la nature des constituants du sol : ségrégation du fer liée au développement de processus d'oxydo-réduction, composition particulière de la fraction organique, due à l'existence de conditions anaérobies.

Le plus classique des cas pour l'observation de l'hydromorphie correspond à identifier les traces d'oxydation ou de réduction du fer, élément très présent dans les sols dont l'état d'oxydo-réduction se perçoit par des variations de couleurs marquées. En condition anaérobie, lorsque le sol est saturé, le fer est sous forme réduite (ferreux) et mobile car soluble dans l'eau. Lors du ressuyage du sol, le fer oxydé se fixe sous forme ferrique.

Les horizons rédoxiques

La morphologie des horizons rédoxiques résulte de la succession de processus de réduction et donc de mobilisation du fer (périodes de saturation de toute la porosité par l'eau) et de processus de réoxydation et donc d'immobilisation du fer (par suite d'une réoxygénation). Les horizons rédoxiques correspondent à des engorgements temporaires.

Lors de la réoxydation du fer, le sol est marqué de tâches d'oxydation (rouille, jaune-orange, rouge brique...). Ces zones de précipitation d'oxyde de fer sont généralement associées à des zones d'appauvrissement d'où le fer est parti lors de sa solubilisation. Ces zones de déferrification sont décolorées, plus ternes, et parfois dégradées lorsque les particules argileuses sont elles-mêmes lessivées.

Les horizons réductiques

La morphologie des horizons réductiques résulte de la prédominance des processus de réduction et de mobilisation du fer, lié à l'engorgement permanent en eau. Dans les horizons réductiques, la répartition du fer est plutôt homogène.

L'aspect des horizons réductiques varie sensiblement au cours de l'année, en fonction de la persistance ou du caractère saisonnier de la saturation (battement de nappe profonde) qui les génère. On distingue sur le terrain des horizons réductiques totalement réduits (codés Gr) et d'autres partiellement réoxydés (codés Go).

Lorsque la porosité et les conditions hydrologiques permettent, en milieu acide, le renouvellement de l'eau réductrice, ces horizons s'appauvrissent progressivement en fer. Il peut même y avoir déferrification complète et décoloration de l'horizon (horizon G albique : Ga).

Les formes d'humus humide

La saturation en eau limite les échanges gazeux entre le sol et l'atmosphère. Une réduction de l'oxygène disponible a ainsi des conséquences sur l'activité biologique du sol, notamment la diminution des processus de décomposition et minéralisation de la matière organique.

L'évolution et la composition de la fraction organique du sol dépendent de l'activité biologique, et donc :

- De la persistance de conditions anaérobies, donc du régime hydrique, de la durée de la saturation du sol par l'eau, ainsi que du caractère continu ou discontinu de cette saturation ;
- Du régime thermique, les températures élevées favorisant l'activité biologique du sol.

Deux catégories d'horizons de surface hydromorphes peuvent être identifiées :

- Les horizons de surface temporairement saturés (hydromull, hydromoder ou hydromor) :
 - Couleur gris foncé à gris noir ;
 - Taux de carbone organique généralement < 8 % ;
 - Structure fine à massive selon la durée de saturation, et matières organiques plus ou moins mélangées à la fraction minérale selon l'activité de la microfaune ;
 - Fraction humifiée ;
- Les horizons de surface à longue saturation (anmoor) :
 - Couleur gris-noir ;
 - Taux de carbone organique > 8 % ;
 - Structure massive, toucher onctueux lors de la période de saturation, et matières organiques assez bien mélangées à la fraction minérale du fait de l'activité de la microfaune lors des périodes de non-saturation.

La tourbe : horizons histiques et histosols

Dans le cas d'un milieu apportant très régulièrement des matières organiques, sa très faible décomposition en induit une accumulation. Horizons issus d'accumulation de débris végétaux, les horizons histiques sont des horizons holorganiques formés en milieu saturé par l'eau durant des périodes prolongées (plus de 6 mois dans l'année) et composés principalement à partir de débris de végétaux hygrophiles ou subaquatiques. Les horizons histiques, sont caractéristiques des Histosols.

Un Histosol est composé de matières organiques et d'eau. Le solum se construit à partir de débris végétaux morts qui se transforment lentement, en conditions d'anaérobiose, en raison d'un engorgement permanent ou quasi permanent. Un Histosol est constitué presque exclusivement d'horizons histiques.

La formation des Histosols nécessite :

- Un bilan hydrique positif une grande partie de l'année : les apports (précipitations et apports telluriques) doivent être supérieurs aux pertes (évaporation, ruissellement latéral, drainage, infiltration vers le substrat) ;
- Un bilan d'accumulation de matières organiques excédentaires : la production primaire nette doit être supérieure à la quantité de matières organiques décomposées.

Il existe deux grands processus qui permettent cette formation :

- Le processus d'atterrissement : les végétations hygrophiles et aquatiques s'installent sur les bordures, dans et au-dessus d'un étang ou d'un lac peu profond, et comblent peu à peu de leurs débris le volume d'eau initial ;
- Le processus de paludification : il résulte des changements de conditions du milieu (changements climatiques, tempêtes, perturbations humaines), qui se traduisent par un passage rapide d'une situation sèche à une situation humide.

Les conditions optimales de formation sont celles qui favorisent la saturation permanente du solum par l'eau jusqu'en surface, associées à des conditions de ralentissement de transformation des débris végétaux qui dépendent du climat (température et pluviosité), de la topographie (qui gère l'écoulement), du substrat géologique (à l'origine de la qualité et de la quantité des aquifères) et de la formation végétale qui produit le matériel parental du solum.

Selon l'AFES, pour qu'un histosol conserve des conditions réductrices nécessaires à la turbification, le niveau de la nappe ne doit pas descendre en dessous de 80 cm sur une durée de plus de 2 mois (Laplace-Dolonde, 1994 ; Baize et Girard, 2008).

- **Classification de l'hydromorphie et sols de zones humides**

Les traces d'hydromorphie sont essentielles pour comprendre le fonctionnement hydrique du sol. Afin d'uniformiser la façon de noter l'intensité de l'hydromorphie du sol, des classifications ont été élaborées.

Le GEPPA (Groupe d'Étude des Problèmes de Pédologie Appliquée) a ainsi établi un classement des morphologies des sols présentant des traits hydromorphes qui fait référence. La classification propose 6 groupes en fonction de la profondeur d'apparition des traces, et différents sous-groupes selon l'évolution des traces dans le sol (Illustration 71).

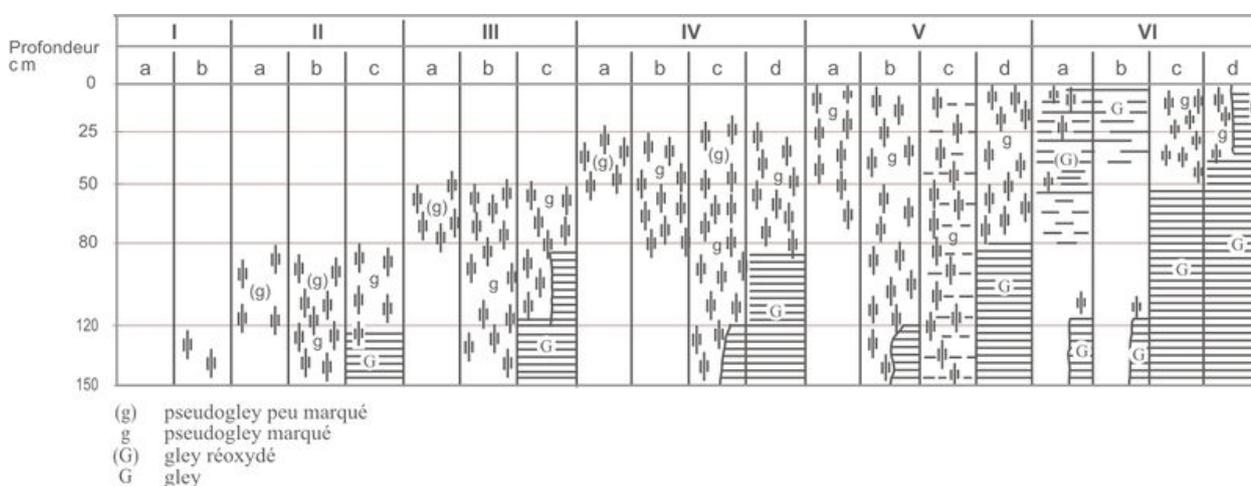


Illustration 71. Classification des classes d'hydromorphie élaborées par le GEPPA (1981)

Réglementairement, les zones humides sont caractérisées par des sols assez fortement hydromorphe, c'est-à-dire d'une classe supérieure à IV d, et par les sols tourbeux. Le classement ci-dessous correspond aux classes du GEPPA retravaillé autour de la notion réglementaire de zone humide (Baize et Girard, 2008).

L'acquisition des données

L'enjeu, pour le volet pédologique, va être tout d'abord d'acquérir des données, afin de réaliser un suivi par la suite.

Pour acquérir de la donnée pédologique pour caractériser les sols d'un site, la seule méthode consiste à réaliser des observations de sol, généralement à la tarière manuelle, à différents endroits afin de mailler le site. Ce maillage doit être réfléchi et doit prévoir un nombre suffisant d'observations au regard de la précision exigée par l'enjeu de l'étude.

La première étape est de réaliser le plan d'échantillonnage des observations à réaliser. Pour cela il est nécessaire que le maillage soit adapté à la taille du site à caractériser. Le tableau suivant est extrait de la norme AFNOR CARTO NF X31-560 sur la cartographie des sols.

Échelle de restitution		Sondages	Fosses pédologiques
Petite échelle	1 : 250 000	1 pour 200 ha à 600 ha	1 pour 2 000 à 6 000 ha
Moyenne échelle	1 : 100 000	1 pour 30 ha à 60 ha	1 pour 500 à 1 000 ha
	1 : 50 000	1 pour 10 ha à 30 ha	1 pour 200 à 300 ha
	1 : 25 000	1 pour 5 ha à 10 ha	1 pour 50 à 100 ha
Grande échelle	1 : 10 000	1 pour 2 ha à 3 ha	1 pour 10 à 50 ha

La réalisation d'investigations sur des sites humides concerne souvent des sites dont la petite taille (se comptant en centaines d'hectares pour les plus vastes) nécessite des investigations à une échelle supérieure à 1 : 10 000, généralement 1 : 5 000 voire plus précis.

Le nombre de sondages à réaliser peut donc être de plusieurs par hectare, notamment pour les petites surfaces. Dans tous les cas, répartir des observations de façon optimale est en soit une première expertise du site, puisqu'il s'agit d'estimer a priori les variations pédologiques sur la base des données en notre possession.

Dans un site humide à la topographie relativement plane, la répartition des sondages doit être réfléchie en fonction des microreliefs, de l'occupation du sol et des habitats écologiques. Même en l'absence de topographie marquée, et dans le cas où la zone humide est associée à une vallée ou un cours d'eau, il peut être intéressant de procéder à une analyse par transects perpendiculaires à ceux-ci.

Les données géologiques donnent également des indices pour orienter les investigations pédologiques. Les données géologiques sont disponibles à l'échelle nationale sur le navigateur Infoterre du BRGM (<https://infoterre.brgm.fr/>).

Parallèlement, des données pédologiques sont disponibles sur Géoportail. Il s'agit d'une mutualisation d'informations via le Réseau Mixte Technologique Sols & Territoires et le groupement GISSOL dans lesquelles sont détaillés les sols à l'échelle 1 :250000. Il s'agit de données à très petite échelle, identifiant des pédopaysages (unités cartographiques présentant différents types de sols selon leur position dans le paysage). Pour autant sont utiles pour connaître les différents types de sol potentiels dans l'unité paysagère où se trouve le site étudié.

Enfin, il est important de garder à l'esprit que rien n'est figé et que le plan d'échantillonnage peut être adapté si besoin.

La période

Pour dresser l'état des lieux il peut être intéressant pour la première année de réaliser deux observations : une première en hiver et une seconde en été. Ainsi, en période hivernale, les sondages seront faits dans les conditions humides et favorables, avec une pluviométrie suffisante. En période estivale, les observations rendront compte du comportement des sols à l'échelle temporelle des saisons, dans un contexte de stress estival potentiel.

Un suivi bisannuel pourra être observé afin de mettre à jour les indicateurs.

La réalisation des sondages

La réalisation des sondages se fait à pied avec une tarière manuelle permettant d'atteindre 120 cm de profondeur. Le diamètre de sondage est généralement compris entre 4 et 7 cm. Le type de tarière le plus répandue correspond au type Edelman. Cette méthode de sondage induit un léger mélange à chaque passe de la tarière, qui nécessite généralement d'ôter les quelques premiers centimètres de l'échantillon prélevé lors de la remontée. Un œil entraîné arrive facilement à identifier le matériau à éliminer.

L'utilisation de tarières gouges permet généralement un prélèvement non remanié du sol, et réduit les risques de pollution d'une partie de l'échantillon. Toutefois, selon les textures ou les niveaux de saturation, il faut être vigilant à ne pas occasionner de compression de l'échantillon prélevé, sous peine de minimiser les profondeurs et épaisseurs des horizons après tassement des horizons.

La saisie des éléments peut se faire sur fiche papier ou sur smartphone. La position des sondages est repérée par GPS, ou a minima reportée sur une carte papier précisément. La donnée cartographique (localisation, voire la description des observations) est idéalement conservée au format SIG.

9.3. HABITATS, ESPECES ET EAUX SOUTERRAINES

9.3.1. Des espèces inféodées aux eaux souterraines

Au regard des formations végétales pouvant être influencées par la contribution d'eau souterraine, certaines espèces caractéristiques de ces habitats semblent l'être également. Trois espèces ont donc été identifiées comme potentiellement indicatrices d'une contribution d'eau souterraine à la zone humide (Bissardon *et al.*, 1997 ; Tison *et al.*, 2014a ; Tison *et al.*, 2014b ; Gygax *et al.*, 2018).

***Juncus bulbosus* L., 1753 – Jonc bulbeux**

Le jonc bulbeux est une plante amphibie vivace hémicryptophyte des pelouses exondées sur sols acides. Il se retrouve au sein de marais, fossés, tourbières, landes humides ou en bordure d'étang. Il se développe sur des sols détrempés à humidité fortement variable, acide (pH 3,5 – 6,5) et pauvres en nutriments. C'est une espèce subatlantique se retrouvant de l'étage montagnard inférieur à collinéen supérieur. La dépendance de cette espèce aux eaux souterraines n'a pas été analysée.

***Cladium mariscus* (L.) Pohl – marisque**

La marisque est une plante vivace de la famille des Cypéracées. C'est une espèce héliophyte et hémicryptophyte, se développant au sein de marais, tourbières, bords de lacs et zones d'atterrissement, particulièrement dans des sites à bonne disponibilité de nutriments. Il se développe au sein de sol submergé à humidité fortement variable, basique (pH 6.5 – 8.5), moyennement pauvre à moyennement riche en nutriments. C'est une espèce subatlantique se retrouvant à l'étage collinéen. Il se rencontre habituellement dans les zones humides à eau douce en régions chaudes, mais il tolère également l'eau saumâtre et les périodes fraîches. Il s'épanouit sur des sols organiques profonds inondés entre 6 et 9 mois par an ou davantage. La profondeur d'eau idéale est de 15 cm sous la surface du sol jusqu'à 40 cm au-dessus du sol. C'est une espèce cosmopolite, fréquente dans les lieux humides d'Eurasie, d'Amérique et d'Afrique, mais aussi en Océanie, en Australie et à Hawaï. Ces formations végétales sont assez bien réparties en France, mais souvent assez rares. Elles sont relativement communes dans l'ouest et le sud-ouest alors qu'elles se font beaucoup plus rare en Alsace-lorraine et dans le Nord.

***Littorella uniflora* (L.) Asch., 1864 – Littorelle à une fleur**

La littorelle à une fleur est une plante vivace hémicryptophyte de la famille des plantaginacées. Elle se développe au sein des zones exondées de préférence sur des sols sablonneux. Elle se développe sur des sols détrempés à humidité fortement variable, légèrement acides à neutres (pH 4,5 – 7,5) et pauvres en nutriments. C'est une espèce héliophile, subatlantique de l'étage collinéen. C'est une espèce aquatique des rives sableuses ou graveleuses des étangs, sur sol siliceux ; ne s'élevant guère au-dessus de 500 mètres dans les montagnes. Espèce strictement européenne, présente de la Scandinavie et de l'Islande au nord jusqu'à l'Espagne, la Sardaigne et l'Italie au sud, de l'Irlande et du Portugal à l'ouest jusqu'aux pays baltes et à l'Ukraine à l'est ; également aux Açores. En France, elle est très inégalement répartie : manquante presque complètement de la région méditerranéenne (mais présente en Corse), elle est très rare et disséminée ailleurs (Normandie, Bassin parisien, Champagne, lorraine, Alsace) ; elle n'est assez fréquente que dans l'ouest (Bretagne, Pays de la Loire, Poitou), dans le centre (Limousin, Auvergne) et dans le centre-est (Rhône Alpes, Franche-Comté, Bourgogne).

9.3.2. Des habitats inféodés aux eaux souterraines

L'analyse et la comparaison des données récoltées sur chacun des sites sélectionnés ont permis d'identifier des formations végétales qui sembleraient être influencées par la présence d'eau souterraine (Bensettiti *et al.*, 2002). Ces formations végétales ont été retenues soit par leur présence récurrente sur les différents sites sélectionnés soit par leur condition stationnelle laissant penser à une dépendance aux eaux souterraines. Ainsi deux formations végétales ont ainsi été remarquées comme dépendantes aux eaux souterraines :

- Les gazons amphibies
- Les roselières à *Cladium mariscus*

Les gazons amphibies

• Généralités

Les gazons amphibies sont des communautés végétales herbacées relativement basses occupant des dépressions longuement inondées. Ces types de gazons comprennent deux ensembles de formations végétales bien distincts :

- Les gazons amphibies non méditerranéens installés sur les grèves des pourtours de plans d'eau et de mares ;
- Les gazons amphibies méridionaux des micro-dépressions et des mares temporaires sur corniches, dalles rocheuses et plus rarement au sein d'ornières forestières inondées.

Ces gazons amphibies sont des habitats héliophiles, liés à une alternance de périodes d'inondations et de périodes sèches parfois très prononcées.

L'installation des gazons amphibies de bord de plans d'eau nécessite la présence de berges en pente douce afin de permettre un marnage plus ou moins important. Cet habitat occupe des surfaces très variables (jusqu'à quelques dizaines de m²), il se présente toujours comme un fin gazon peu stratifié d'herbes souvent très peu élevés. Il s'agit d'habitat formé essentiellement de plantes vivaces dicotylédones et de ptéridophytes très clairsemées laissant ainsi la possibilité aux espèces annuelles de pénétrer cet habitat. Les espèces végétales y sont très spécialisées étant donné la nécessité d'être adapté à une alternance de périodes de submersion prolongée et de périodes d'assec parfois important. La phénologie des espèces caractérisant cet habitat est souvent tardive (fin d'été – automne) en relation avec les variations de la lame d'eau en été. Les espèces forment leurs fleurs et leurs fruits lors des périodes d'exondation (étiage). Cet habitat peut présenter une grande variabilité selon la texture du substrat. Ces formations sont à rapprocher de l'ordre phytosociologique des *Littorelletalia uniflorae*.

Les gazons amphibies méridionaux correspondent à des pelouses méso-hygrophiles installées au niveau de suintements et de sources rocheuses granitiques ou gréseuses. Les espèces composant cet habitat sont essentiellement des herbacées méso-hygrophiles dont des ptéridophytes (*Isoetes*, *Ophioglossum*) et des bryophytes avec un recouvrement variable formant des pelouses ouvertes. La phénologie des espèces est plutôt printanière précoce. Ces formations sont à rapprocher de l'ordre phytosociologique des *Isoetetalia durieui*. Cet ordre phytosociologique regroupe plusieurs alliances, celle qui sera traitée dans l'ensemble de ce rapport sera celle des *Isoetion durieui*. Les communautés de l'*Isoetion* correspondent à des pelouses plus ou moins hautes, ouvertes, submergées en hiver, dominées par les thérophytes, les hémicryptophytes et les géophytes. Les surfaces occupées par ces habitats varient de quelques décimètres carrés à un demi-hectare.

- **Caractéristiques stationnelles**

Littorelletalia uniflorae

Cet habitat se développe aux étages planitaires à collinéens sous climat de type thermo-atlantique à sub- et nord-atlantique. Les situations topographiques sont essentiellement les eaux plus ou moins profondes des lacs, étangs, petites mares, dépressions dunaires, plus rarement les bords de ruisseaux des tourbières.

Les substrats sont toujours oligotrophes, souvent acides, parfois basiques (dépressions dunaires), grossiers à fins. Le niveau de l'eau est obligatoirement variable, la durée d'exondation contribuant à la variabilité de l'habitat amphibie et le niveau étant au plus bas en été et début d'automne. Le courant d'eau doit être quasi nul à légèrement fluent.

Isoetion durieui

Cette formation végétale se retrouve dans les zones les plus chaudes de l'étage méditerranéen en France continentale et en Corse. L'habitat se rencontre depuis le littoral jusqu'à des altitudes atteignant 1 200 mètres au sein de mares et cuvettes sur silice (dépressions temporairement inondées) et en bordure de ruisseaux temporaires. Il se développe sur des sols pauvres en

carbonates, oligotrophes, à pH proche de la neutralité et submergés pendant l'hiver et une partie du printemps avec un assèchement complet en été.

La mise en eau de ces mares temporaires se fait par une alimentation directe ou indirecte (ruissellement du bassin versant) provenant des précipitations atmosphériques. Parfois les eaux souterraines contribuent à l'alimentation en eau des mares. Les niveaux d'eau sont très variables en fonction de la topographie, de l'imperméabilité de la roche sous-jacente et de la pluviométrie. La gamme de profondeur d'eau, comprises entre quelques centimètres et 40 cm, détermine les formations végétales qui s'y installeront.

- **Dynamique de la végétation**

Littorelletalia uniflorae

Cet habitat est souvent assez stable, le battement de nappe très contraignant pour les végétaux (l'alternance de submersion et de sécheresse pouvant être prononcée) empêche le développement de plantes peu adaptées. Les formes sur substrat minéral peuvent dériver vers les formes plus turficoles sous l'effet de l'enrichissement naturel en matières organiques de ce substrat. En revanche, cet habitat est très sensible à l'altération de la qualité des eaux et à la stabilisation du niveau d'eau. Ces influences peuvent favoriser l'installation des grandes et petites roselières très concurrentielles.

Isoetion durieui

La persistance des espèces caractéristiques de l'habitat dépend du maintien des phases submergées en hiver, sélectionnant les espèces tolérantes à l'inondation. Le niveau de la nappe, donc la durée de submersion, conditionne la répartition des ceintures de végétation entre l'*Isoetion*, le *Serapion* et l'*Helianthemion*. La dynamique naturelle de végétation peut conduire à la dominance d'hélophytes dans le cas où la durée de la phase d'assèchement diminue pendant plusieurs années, ou par la suite d'une perturbation hydrologique du site et de son bassin versant.

- **Relation avec les sites sélectionnés**

Littorelletalia uniflorae

Les groupements des *Littorelletalia uniflorae* au sens strict se retrouvent uniquement au sein du site de la Lagune de Paulin. Ils se localisent à l'est du site et semblent se développer sur une part relativement importante (+/- 10%) au regard de la surface très restreinte qu'occupent ces formations généralement.

Les données récoltées sur le marais de Sacy-le-Grand permettent de constater la présence de la classe des *Littoreletea uniflorae* au sein du site. Cette classe s'exprime sous deux formes au sein de ce site :

- Les végétations vivaces oligotrophiques à mésotrophiques planitaires des eaux stagnantes,
- Les communautés annuelles oligotrophiques et mésotrophiques des *Isoeto-Juncetea*.

Isoetetalia durieui

Des groupements de mares temporaires méditerranéennes sont présents au sein d'un site pilote : il s'agit des marais de Meyranne-Chanoines. La cartographie des habitats d'intérêts communautaires transmis pour ce site permet de constater de la présence de ces communautés

végétales. Etant donné qu'aucune autre donnée concernant ces formations n'ont été transmises dans le cadre de ce projet, l'analyse de la contribution de la masse d'eau souterraine sur ces formations végétales semblent fortement limitée.

Les roselières à *Cladium mariscus*

- **Généralités**

La végétation des formations à marisque est largement dominée par des populations hautes (2 m) et denses de *Cladium mariscus*. Elle forme des mosaïques au sein des complexes de marais alcalins, prairies humides alcalines, mégaphorbiaies et roselières. La marisque est une robuste cypéracée vivace, pouvant atteindre 2,5 mètres de hauteur, à souche traçante dont le rhizome rampant est peu profondément ancré dans le sol, en deçà de 30 cm en général. Il est de ce fait sensible aux variations du niveau de la nappe qu'il ne tolère que modérément : si des périodes d'immersion ne lui sont pas préjudiciables, un abaissement prolongé de la nappe sera mal supporté. Il se développe ainsi dans les zones humides bénéficiant d'une alimentation hydrique régulière tout au long de l'année, sur des sols riches en matière organique, mais également sur des substrats minéraux sableux et graveleux, ou à la surface d'eau libre. Il possède une vaste amplitude écologique et une stratégie monopoliste qui se traduit par l'envahissement de différents groupements végétaux.

Il est extrêmement difficile de positionner les cladiaies au sein de la nomenclature phytosociologique. En effet, les formations à Marisque ne constituent pas un syntaxon à part entière, cette espèce au large spectre écologique ayant la capacité de se développer au sein de groupements très variés est capable de déstructurer une communauté en éliminant les espèces caractéristiques. Ainsi, les cladiaies seront tantôt à rattacher aux groupements des tourbières de transition (*Caricion lasiocarpae*), tantôt aux bas-marais alcalins (*Caricion davallianae* ou *Hydrocotylo vulgaris* – *Schoenion ngricantis*), tantôt aux magnocariçaies (*Magnocaricion elatae*), tantôt aux roselières (*Phragmition australis*), tantôt même aux tourbières actives (*Oxycocco palustris* – *Sphagnetum magellanicum*) ... en fonction du cortège d'espèces caractéristiques accompagnant le Marisque.

On rencontre deux principaux types de cladiaies :

- Les cladiaies-radeaux, se développent à la surface d'eaux libres par la progression centripède d'un radeau flottant constitué de l'enchevêtrement des rhizomes de *Cladium* formant un lacis racinaire.
- Les cladiaies terrestres se développent selon une dynamique d'envahissement de groupements végétaux préexistants, notamment à la suite de leur abandon.

- **Caractéristiques stationnelles**

Ce sont des formations essentiellement planitaires à collinéennes (relativement fréquentes dans les grands marais de plaine) pouvant s'élever jusqu'à l'étage submontagnard (maximum 800 m) où elles deviennent alors rares. Les cladiaies se développent sur des substrats de nature variée, préférentiellement organiques (optimum sur tourbes mésotrophes), mais également sur des graviers fluviatiles gorgés d'eau. La nappe est affleurante ou subaffleurante avec de faibles fluctuations ; des périodes d'inondations étant possibles. Le Marisque peut également se développer à la surface d'eau libre de nature variée (mais de profondeur inférieure à 80 cm en général, les racines ayant besoin d'un ancrage dans le sol), alcaline à neutre, où son réseau de racines, associé ou non à celui d'autres espèces, est à l'origine de la formation de radeaux

flottants. Le pH des tourbes est variable, généralement autour de 6, mais il peut descendre à 4 en surface dans les cladiaies en voie d'acidification.

- **Dynamique de la végétation**

Les cladiaies représentent un stade dynamique des bas-marais sur tourbe, principalement alcaline. L'importance des inondations (fréquence et durée) va conditionner l'évolution de l'habitat. Ainsi, au sein des stations les moins inondées, les cladiaies sont généralement moins denses et donc plus diversifiées. Lorsque les inondations sont plus répétées et prolongées, ce sont des roselières sur tourbe qui persistent.

Lors du développement à la surface d'une eau peu profonde, les cladiaies conduisent à l'atterrissement de la mare ou de l'étang, par progression vers le centre, mais aussi vers le fond par épaissement du radeau formé par les racines. L'alimentation en eau de pluie du réseau flottant se trouvant alors au-dessus de la surface de l'eau, conduit à une certaine acidification du milieu. La cladiaie évolue alors progressivement vers un groupement plus acidophile, la cariçaie de transition, dans laquelle les espèces acidophiles, ainsi que les buttes de sphaignes, peuvent se développer.

Comme pour les « cladiaies-radaux », si l'alimentation en eau de pluie est importante, les cladiaies « terrestres » peuvent connaître une acidification du milieu qui permettra l'installation des sphaignes et des espèces des bas-marais et haut-marais acides. En revanche, si l'alimentation par les eaux de pluies est faible, les sphaignes ne pourront s'installer et la dynamique naturelle conduira au stade ultime d'une cladiaie dense.

La fauche peut faire apparaître temporairement des espèces des bas-marais alcalins (*Caricion davallianae*), avant la repousse assez rapide de la cladiaie.

L'assèchement du milieu va quant à lui remettre en cause la préservation de la cladiaie au profit d'espèces plus adaptées, alors que l'eutrophisation de l'eau va être favorable au Roseau commun au détriment du Marisque.

Relation avec les sites sélectionnés :

Les formations à marisques se retrouvent au sein de trois des quatre sites pilotes du projet :

- Les marais de Meyranne et des Chanoines, où ces formations occupent une part importante du marais
- Le marais de Sacy-le-Grand est occupé en son centre par de grandes surfaces de communautés à Marisques. Ces dernières sont généralement en contact direct avec des secteurs en eau libre et des vasques à Utriculaires
- Le site de la baie de Somme. Ces formations ne sont pas présentes au sein du marais de la Maye, cependant la cartographie des habitats naturels a permis de constater de la présence de ces formations au sein du marais de Quend et de Villers-sur-Authie

9.4. POSSIBILITE D'UTILISATION DES INDICATEURS RHOMEO

9.4.1. Piézométrie – Indicateur I03

L'indicateur RhoMeO I03 de la dynamique hydrologique de la nappe a pour objectif de s'intéresser à la relation eau / sol / végétation puisque c'est dans les horizons superficiels du sol que se joue la disponibilité de l'eau pour la végétation. Cet indicateur repose sur les données

acquises conformément au protocole P03 Piézométrie (Collectif RhoMeO, 2014) qui recommande d'installer une sonde de pression dans un piézomètre servant de puits d'observation et une acquisition au pas de temps horaire.

Les données acquises dans le cadre du protocole RhoMeO sont tout à fait pertinentes et pourraient répondre à l'objectif de l'indicateur I03 de suivi des zones humides et l'objectif de notre étude à savoir évaluer la contribution des eaux souterraines au fonctionnement des milieux humides.

Le point délicat sera la localisation du piézomètre. Un seul piézomètre peut être installé par site. La nappe d'eau du sol étant continue dans l'espace, les piézomètres sont dépendants les uns des autres (Gentil *et al.*, 1983, collectif RhoMeO, 2014). Enregistrer la dynamique de la nappe en un seul point d'une zone humide peut nous renseigner sur son fonctionnement général.

Cependant, ce piézomètre sera un indicateur du niveau général de la nappe. Les phases d'émersion et de submersion, caractérisées sur ce piézomètre devront prendre en compte la localisation du piézomètre dans la zone humide. Si celui-ci est sur le bord de la zone humide, dans les parties les plus souvent émergées ou au contraire dans les parties les plus internes de la zone humide, dans les zones les plus longuement et les plus fréquemment immergées, les indicateurs sur les périodes de submersion ou sur l'épaisseur de la zone non saturée n'auront pas du tout les mêmes valeurs. Ce point est important à prendre en compte.

Par exemple, pour qu'un Histosol conserve des conditions réductrices nécessaires à la turbification, le niveau de la nappe ne doit pas descendre en dessous de 80 cm sur une durée de plus de 2 mois selon l'AFES (Laplace-Dolonde, 1994 ; Baize et Girard, 2008). Même si le niveau de la nappe superficielle du marais fluctue de la même manière sur tout le milieu humide, l'épaisseur de la zone non saturée ne sera pas la même en tout point de la tourbière. Le seuil de 80 cm proposé par l'AFES est à ajuster en fonction de la localisation du piézomètre dans la tourbière.

9.4.2. Pédologie – Indicateur I01

Les investigations pédologiques nécessitent l'intervention de compétences particulières et peuvent nécessiter du temps d'observation.

Certains indicateurs existent déjà sur le plan pédologique, construits notamment autour de la principale information facilement identifiable sur le terrain : l'hydromorphie. Les niveaux d'hydromorphie tels qu'ils ont été classés par le GEPPA sont facilement interprétables pour estimer les variations d'intensité d'engorgement. Hormis le suivi piézométrique en continu à faible profondeur, c'est la lecture de l'hydromorphie qui permet souvent de statuer qualitativement sur une sensibilité à l'engorgement d'un horizon. La fréquence de l'engorgement est effectivement appréciée de façon qualitative. En revanche, l'hydromorphie apporte des informations quantitatives facilement mesurables, au travers des profondeurs des horizons. Correctement identifiée, une limite entre un horizon rédoxique et un horizon réductique donne une profondeur précise fixant la limite entre deux intensités d'engorgement.

Cette hydromorphie est en soit un indicateur directement utilisé par la réglementation pour identifier une zone humide au titre de la Loi sur l'Eau.

Par ailleurs, le niveau d'hydromorphie du sol est, de façon assez sommaire, utilisée pour l'élaboration d'un indicateur dans la méthode nationale d'évaluation des fonctions des zones humides. Cet indicateur est dans ce cas précis utilisé pour juger des possibilités d'expression des processus de dénitrification.

Un indicateur existant est adapté pour la problématique d'évaluation de l'état de la zone humide face à ses besoins en eau. Il s'agit de l'indicateur pédologique I01 « niveau d'humidité du sol » de la Boîte à Outils RhoMéO (Collectif RhoMéO, 2014). Cet indicateur correspond, de façon résumée, à une note quant à l'intensité de la saturation en eau, en fonction de l'hydromorphie et de la profondeur d'apparition. Cette note s'inscrit dans une démarche de suivi sur plusieurs années. L'évolution de l'indicateur donne ainsi une évolution de la saturation des sols au cours du temps. Une diminution de la note correspond ainsi à un assèchement de la zone humide.

Cet indicateur relativement simple est particulièrement adapté à la problématique. La limite à y voir est qu'il serait nécessaire d'aller plus loin sur son interprétation pour croiser des indicateurs, écologiques bien sûr, mais aussi hydrogéologiques. Force est de constater que lors de l'analyse des sites pilotes, sélectionnés pour leur diversité mais aussi pour leur richesse en données existantes, cet indicateur n'est pas connu. Les informations pédologiques disponibles sont encore insuffisantes pour renseigner cet indicateur et pour réaliser des croisements d'informations répétées afin d'identifier des tendances intéressantes.

Par ailleurs, la variabilité des contextes potentiels (contexte hydrogéomorphologique, type de relation aux eaux souterraines, types d'habitats et types de sols) nécessite de croiser assez de données afin de cerner les tendances essentielles à retenir. Et sur ces aspects biochimiques du sol, la donnée existante sur les sites est généralement bien moindre par rapport aux données classiques sur l'hydromorphie, déjà insuffisantes ici.

9.4.3. Flore – Indicateur I02

Parmi les indicateurs de suivi proposés au sein de la boîte à outils Rhoméo (Collectif RhoMéO, 2014), un d'entre eux pourrait être utilisés dans le cadre d'étude de l'influence des eaux souterraines sur le fonctionnement des zones humides. Il s'agit de l'indicateur I02 « Indice floristique d'engorgement ».

Cet indicateur permet d'évaluer le niveau de la nappe à travers un indice appelé indice de niveau d'engorgement. Il est calculé comme la moyenne des valeurs indicatrices des espèces présentes à l'échelle d'une placette, puis comme la médiane des valeurs des placettes à l'échelle de la zone humide. La valeur indicatrice d'une espèce est l'optimum de cette dernière vis-à-vis du niveau moyen de la nappe. Les valeurs indicatrices à utiliser dans le cadre de ce suivi varie selon la région biogéographique dans laquelle se trouve la zone humide à étudier. Pour l'Europe centrale, les valeurs indicatrices à utiliser sont celles établies par Ellenberg *et al.* (1992) alors que pour le bassin Rhône-Méditerranée, les valeurs établies pour la Suisse par Landolt *et al.*, (2010).

Cet indicateur permet ainsi d'évaluer le niveau moyen de la nappe. La valeur de l'indice obtenu se corrèle positivement avec le niveau moyen annuel ou estival de la nappe. Plus la valeur de l'indice est élevée, plus le niveau moyen de la nappe est élevé.

9.5. CLASSIFICATION DES ZONES HUMIDES : SYSTEMES HYDROGEOMORPHOLOGIQUES

Pour certaines zones humides, il semble que les eaux souterraines soient indispensables pour maintenir un niveau ou un écoulement d'eau nécessaire au bon fonctionnement de ces dernières.

D'après le rapport de Vernoux *et al.* (2010), reprenant les résultats du projet BRIDGE (2006), les écosystèmes dépendant des eaux souterraines sont souvent classés selon des indicateurs écologiques. Selon le rapport Bridge, l'environnement topographique et hydrogéologique devrait

ainsi permettre d'identifier les types de zones humides pour lesquelles les eaux souterraines sont en interaction avec l'écosystème terrestre.

Au regard des sites pilotes sélectionnés dans le cadre du projet soHUMID, l'influence des eaux souterraines sur les écosystèmes terrestres humide semble être plus ou moins importante selon le système hydrogéomorphologique dans lequel s'inscrit le site.

L'approche hydrogéomorphologique proposée par Smith *et al.* (1995) est basée sur le postulat que les fonctions dépendent d'abord de l'hydrologie, de l'hydrogéologie et de la géomorphologie de la zone humide. Elle fait appel au système de classification hydrogéomorphologique de Brinson (1993). Trois aspects fondamentaux sont décrits pour identifier le système hydrogéomorphologique d'une zone humide :

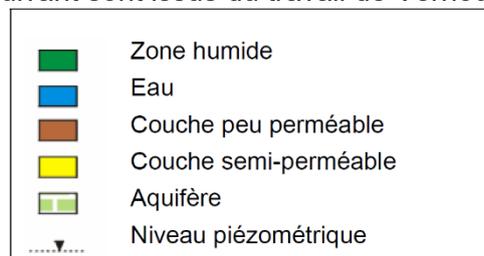
- La configuration géomorphologique
- La source d'alimentation en eau
- L'hydrodynamique

La classification établie par Brinson (1993) aboutit à sept principaux types de systèmes hydrogéomorphologiques. En France, les travaux de Gayet *et al.* (2016) ont permis de retenir 5 systèmes hydrogéomorphologiques adaptés sur ce système de classification :

- Les zones humides alluviales
- Les zones humides riveraines des étendues d'eau
- Les zones humides de dépression
- Les zones humides de versant et bas-versant
- Les zones humides de plateau

L'influence des masses d'eaux souterraines sur les écosystèmes seront analysée sur ces 5 systèmes hydrogéomorphologiques.

Les schémas et la légende suivant sont issus du travail de Vernoux *et al.* (2010) :



Les mécanismes d'alimentation en eau sont décrits ci-dessous :

- P = précipitations
- E = évapotranspiration
- R = ruissellement
- L = arrivée d'eau latéral. L'eau s'écoule à travers le sol depuis un fossé, une rivière ou un lac vers la zone humide (ZH)
- D = drainage
- OB = (*over bank flow*). L'eau s'écoule depuis un fossé, une rivière ou un lac vers la ZH
- OF = (*surface out flow*). L'eau s'écoule depuis la ZH vers un cours d'eau.
- S = source
- GD = vidange de nappe
- GR = recharge de nappe
- GS = exutoire de nappe

Les zones humides alluviales

Ce type de zones humides correspond à celles situées en fond de vallée des cours d'eau, zone comprenant les habitats fluviaux (flots, grèves, berges, ...) et les annexes alluviales (prairies inondables, marais tourbeux, ripisylves, forêts alluviales, ...) ainsi que les zones humides de tête de bassin. Elles sont alimentées principalement par le débordement du cours d'eau dans les plaines alluviales pour les cours d'eau d'ordre élevé, et des ruissellements occasionnels provenant des terres adjacentes pour les cours d'eau d'ordre faible. L'alimentation en eau peut également provenir de ruissellement et plus occasionnellement des flux des affluents et des précipitations (Gayet *et al.*, 2016).

D'après Vernoux *et al.* (2010), les zones humides alluviales peuvent aussi être alimentées par les eaux souterraines mais toujours avec des échanges avec les eaux de surface (Illustration 73).

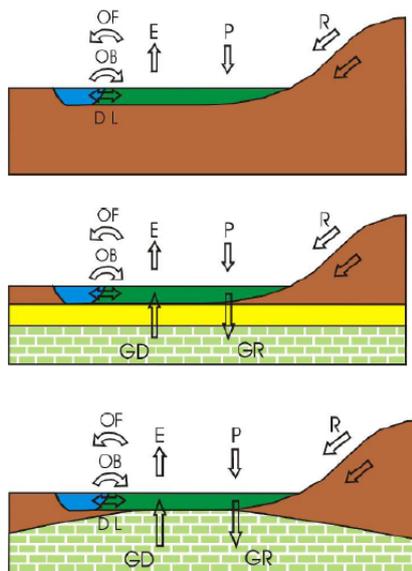


Illustration 73. Mécanismes d'alimentation en eau des zones humides alluviales (Vernoux *et al.*, 2010)

Les zones humides riveraines des étendues d'eau

Les zones humides riveraines des étendues d'eau sont adjacentes ou proches d'une étendue d'eau. Les fluctuations du niveau d'eau dans l'étendue d'eau régulent le niveau d'eau dans la zone humide. L'alimentation principale de ces zones humides sont donc liée à la décharge des eaux souterraines (Gayet *et al.*, 2016). Les précipitations sont également une source d'alimentation mais de façon moins importante. Peu de données sont disponibles sur ce système hydrogéomorphologique, cependant au regard des éléments apportés par la bibliographie, il semble que ces zones humides soient donc relativement dépendantes des eaux souterraines.

Les zones humides de dépression

Les zones humides de dépression se localisent dans des dépressions topographiques dont l'altitude élevée des contours permet l'accumulation des eaux de surface dans la dépression, sans former de plans d'eau. Les sources principales d'eau sont les précipitations, les apports d'eau souterraine et les ruissellements issus des terres hautes adjacentes. Toutes les combinaisons d'entrée et de sortie d'eau semblent possibles au sein des zones humides dépressionnaires. Les pertes en eau peuvent être liées à un drainage intermittent ou permanent vers un exutoire, à l'évapotranspiration ou la recharge des nappes. Les fluctuations verticales sont cependant les principales variations hydrodynamiques (Gayet *et al.*, 2016). Le mode d'alimentation de ces zones humides semble donc relativement proche des zones humides riveraines des étendues d'eau. L'illustration suivante schématise l'alimentation de ce système hydrogéomorphologique.

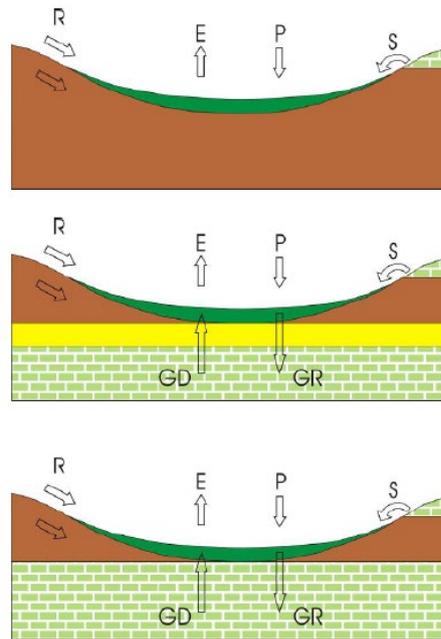


Illustration 74. Mécanismes d'alimentation en eau des zones humides dépressionnaires (Vernoux et al., 2010)

Les zones humides de versants et bas-versants

Ces zones humides se situent là où les eaux souterraines sont déchargées vers la surface. Elles sont communément observées dans les secteurs dont la topographie est en pente, et dont le gradient altitudinal peut varier d'un versant de colline raide à une pente plus douce. Les entrées d'eau incluent principalement les flux souterrains, le ruissellement diffus et les apports des précipitations. L'hydrodynamique de ces zones humides est principalement caractérisé par des flux d'eau unidirectionnels dirigés vers le bas de la pente (Gayet et al., 2016). D'après Vernoux, les zones humides de pente se trouvent dans les zones d'exutoire de l'aquifère. Au regard de ces éléments, les zones humides de pente semblent donc bien en interaction avec les eaux souterraines.

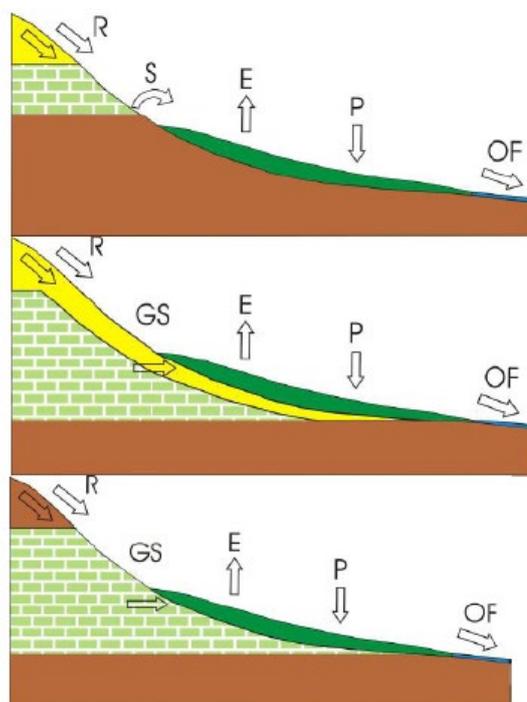


Illustration 75. Mécanismes d'alimentation en eau des zones humides de pente (Vernoux, 2010)

Les zones humides de plateau :

Les zones humides de plateau sont courantes sur les interfluviaux, dans le fond d'anciens lacs qui ont disparu ou sur les grandes terrasses des plaines inondables où la principale source d'alimentation en eau est liée aux précipitations. Ces zones humides ne reçoivent a priori pas d'eau souterraine, ce qui les distingue des zones humides de dépression et de versant et bas-versant. Les fluctuations verticales sont les principaux flux hydrodynamiques (Gayet et al., 2016). Les zones humides de plateau ne semblent donc généralement pas alimentées par les eaux souterraines.

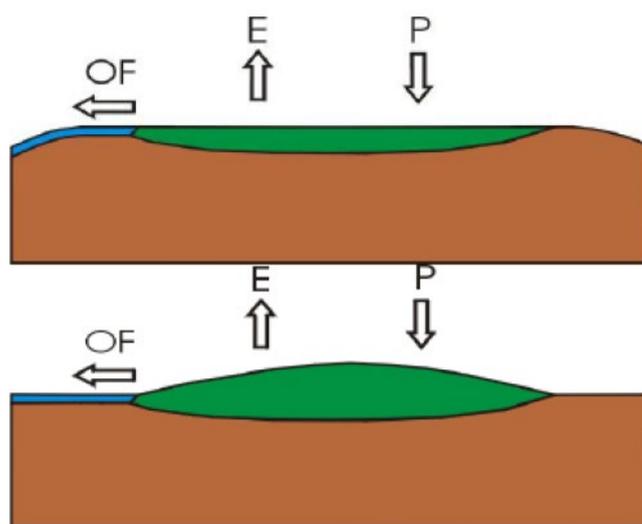


Illustration 76. Mécanismes d'alimentation en eau des zones humides de plaine (Vernoux, 2010)

Les recherches bibliographiques réalisées sur les mécanismes d'alimentation en eau des zones humides permettent de constater que la contribution des eaux souterraines sur le fonctionnement des écosystèmes terrestres varie selon le système hydrogéomorphologique dans lequel s'inscrit la zone humide. Ainsi les eaux souterraines peuvent être la source principale d'alimentation de la zone humide au sein des systèmes hydrogéomorphologique de dépressions et de versants et bas-versants alors que leur contribution au sein des zones humides de plateau ou alluviale semble secondaire ou totalement absente.

Le tableau suivant dresse un bilan de la contribution des différents mécanismes d'alimentation en eau sur les zones humides selon le système hydrogéomorphologique.

	Alluviale	Riveraine des plans d'eau	Dépression	Versants et bas-versants	Plateau
Eaux souterraines	X	XXX	XX	XXX	-
Eaux de surfaces	XXX	-	-	-	-
Autres mécanismes d'alimentation en eau (ruissellement, précipitations, ...)	XX	XX	XX	X	XXX

Alimentation : XXX = Principale ; XX = Secondaire ; X = Occasionnel

Au regard de ces éléments, la contribution de la masse d'eau souterraine sur le fonctionnement des zones humides varie selon le système hydrogéomorphologique. Les zones humides riveraines des plans d'eau et de versant et bas-versant sont principalement alimentées par les eaux souterraines. La masse d'eau souterraine contribue également à l'alimentation des zones humides de dépression. A contrario, les zones humides de plateau ne semblent pas alimentées par les eaux souterraines. L'eau alimentant un écosystème terrestre dépendant des eaux souterraines peut être entièrement d'origine souterraine ou seulement à quelques % (Vernoux *et al.*, 2010). Néanmoins, une faible contribution peut avoir une importance capitale pour la survie de l'écosystème.

Concernant les sites pilotes, ces derniers ont été sélectionnés pour leur alimentation en eau liée à la masse d'eau souterraine. Il convient donc de déterminer leur système hydrogéomorphologique afin de conforter les observations faites précédemment :

- Baie de Somme, Marais de la Maye : système alluviale
- Les marais de Sacy-le-Grand : système dépressionnaire
- La lagune de Paulin : système dépressionnaire
- Les marais de Meyranne et Chanoines : système de versant et bas-versant
-

Selon les systèmes hydrogéomorphologique, l'ensemble des sites sélectionnés dans le cadre de ce projet semblent donc bien être en relation avec une masse d'eau souterraine. En se basant sur l'hypothèse que selon le système hydrogéomorphologique dans lequel se situe une zone humide, la contribution de la masse d'eau souterraine sur ces dernières est plus ou moins importante, il serait possible d'affirmer que le site de la baie de Somme serait celui dont l'influence des eaux souterraines sur le fonctionnement des écosystèmes terrestres est le plus faible. A l'inverse, le site des marais de Meyranne et Chanoines serait le plus dépendants de la nappe souterraine l'alimentant.

Les travaux de recherches sur les interactions entre eaux souterraines et fonctionnement des zones humides étant rare, il est encore difficile de confirmer ce constat.

9.6. INFLUENCE DES PRELEVEMENTS

La dégradation d'un écosystème terrestre par l'état quantitatif d'une masse d'eau souterraine peut conduire au classement de la masse d'eau souterraine en état moins que bon et conduira nécessairement à des mesures de gestion pour que l'état de la masse d'eau soit bon au regard des critères d'évaluation de la DCE.

La comparaison des chroniques piézométriques des nappes superficielles des milieux humides et des masses d'eau souterraine avec lesquels ils étaient en interaction a montré que les deux étaient corrélés. Les deux signaux évoluent ensemble. Ce qui implique que quand le niveau de la masse d'eau souterraine diminue, le niveau dans le milieu humide diminue également.

Dans des conditions de périodes de précipitations moindres, d'années plus sèches par exemple, et/ou de prélèvements d'eau souterraine plus importants, si le niveau de la nappe diminue, le niveau dans le milieu humide diminuerait également.

La question de l'influence des prélèvements d'eau souterraine sur le milieu humide n'était pas dans les objectifs du projet soHUMID, cependant la mise en place d'un suivi au pas de temps horaire, comme le préconise le protocole RhoMeO I03 (cf. paragraphe 9.4.1), permettrait d'appréhender cette question. Deux aspects sont à envisager les prélèvements au long court comme pour l'alimentation en eau potable représentent des prélèvements relativement constants et caractérisent un état de pression quasi-stationnaire. L'influence sur la nappe peut être cartographiée (zone d'influence) et estimée (importance du rabattement) en fonction des propriétés du milieu. Il y a également l'influence des prélèvements d'irrigation qui ne sont pas constants et dont les volumes sont variables au cours du temps. Une connaissance des débits journaliers, voire horaires d'exploitation, des forages les plus proches des milieux humides en relation avec le niveau piézométrique mesuré dans le marais, permettrait de juger de l'influence éventuelle de ces captages.

L'influence des prélèvements sur l'occupation des sols d'un marais pourrait être également intéressante à étudier. Le site pilote du marais de la Maye a permis de constater de l'importance du niveau d'eau dans le marais sur le développement spatial des végétations. Il était ainsi possible d'observer un gradient dans la dynamique végétale selon le niveau d'eau et les périodes d'inondation. Etudier la composition végétale d'un site avant et après l'installation d'un captage permettrait d'évaluer l'influence des prélèvements et de la diminution des niveaux d'eau associés à ces captages.

Pour évaluer l'influence des prélèvements en eau souterraine sur le fonctionnement des milieux humides, il apparaît nécessaire de connaître *a minima* l'évolution du niveau piézométrique dans le marais et pour l'interprétation les chroniques d'exploitation des forages qui prélèvent dans l'aquifère en interaction avec le milieu humide. Les masses d'eau souterraine, comme dans le bassin Artois-Picardie pour la nappe de la Craie, parfois découpent un même aquifère. Il est important de s'intéresser aux prélèvements de la masse d'eau souterraine en interaction avec le milieu humide mais aussi aux masses d'eau environnantes s'il s'agit du même aquifère.

9.7. PROPOSITION DE SUIVI DES MILIEUX HUMIDES

Des protocoles d'acquisition de données spécifiques aux milieux humides existent, comme les protocoles RhoMéo (collectif RhoMéo 2014) qui répondent à un objectif celui d'évaluer les fonctions des milieux humides. Un protocole se définit par rapport à un objectif donné.

L'étude des 5 sites pilotes du projet soHUMID a permis d'identifier les données pertinentes dans le suivi des milieux humides pour répondre à la question de la contribution des eaux souterraines (au sens de masse d'eau souterraine) au fonctionnement des milieux humides. Dans les trois volets, pédologique, écologique et hydrogéologique, sont identifiées les données à collecter, le matériel nécessaire et les indicateurs que cela permet de construire (Illustration 77). Certaines de ces données sont communes à certains protocoles RhoMéo montrant que l'on peut évaluer les fonctions des milieux humides et la contribution des eaux souterraines à partir de mêmes données brutes mais que les indicateurs (ou données élaborées) sont différents puisqu'ils répondent à des objectifs différents.

Suivi dans les milieux humides en interaction avec les eaux souterraines

HYDROGEOLOGIE



Matériel :

- 1 piézomètre peu profond
 - suivi de la nappe superficielle
 - localisation : dans la zone humide
- 1 piézomètre profond
 - suivi de la masse d'eau souterraine
 - localisation : dans la zone humide
 - idéalement en doublet avec le précédent
 - à défaut recherche à proximité (ADES)
- 1 station hydrométrique
 - suivi des eaux de surface
 - localisation : à proximité du doublet de piézomètres

sonde de pression pour enregistrement en continu

Données collectées :

- Profondeur du niveau d'eau (protocole RhoméO : P03)
- Acquisition journalière (voire horaire)
- Durée : plusieurs années (période humide et sèche)
- au minimum 1 cycle hydrologique

Informations complémentaires :

- Nivellement repère altimétrique
- Nivellement du sol à proximité du piézomètre
- Coordonnées X,Y des piézomètres

Indicateurs :

- Hydropériode
- Durée et période de submersion/émersion
- Fréquence de submersion
- Niveau moyen hautes eaux/basses eaux
- Dépassement d'une valeur seuil
- Degré de corrélation signaux piézométriques

PEDOLOGIE



Matériel :

- Tarière
- Plan d'échantillonnage
(AFNOR CARTO NF X31-560)
- transect par rapport au cours d'eau,
microrelief, occupation du sol, habitats écologiques

Echelle de restitution	Sondages
Petite échelle	1 : 250 000
	1 pour 200 ha à 600 ha
	1 : 100 000
	1 pour 30 ha à 60 ha
Moyenne échelle	1 : 50 000
	1 pour 10 ha à 30 ha
	1 : 25 000
	1 pour 5 ha à 10 ha
Grande échelle	1 : 10 000
	1 pour 2 ha à 3 ha

Données collectées :

- Relevés pédologiques (protocole RhoméO : P01) :
- modalités, descripteurs de texture, structure et couleur
- Etat initial : 2 relevés (année 1) hiver et été
- Fréquence : tous les deux ans

Indicateurs :

- Niveau d'humidité du sol
- Classe d'hydromorphie
- Profondeur de l'eau, épaisseur de la zone non saturée
- Carte piézométrique de la zone humide
- Horizons histiques et inter
- Variations spatiales et temporelles

HABITATS et ESPECES



Matériel :

- Quadrat (la taille du quadrat varie selon les communautés végétales échantillonnées)
- GPS
- Plan d'échantillonnage
- Protocole d'inventaire standardisé et reproductible

Données collectées :

- Inventaire floristiques exhaustif
- Recouvrement des espèces présentes
- Localisation précise et taille de placette
- Physionomie de la végétation
- Hauteurs des différentes strates de végétation
- Fréquence : A minima tous les ans
- voire plusieurs relevés par an (printaniers, estival, automnal)

Résultats attendus :

- Liste exhaustive des espèces présentes au sein de la placette avec leur coefficient d'abondance/dominance
- Syntaxon ou groupement végétal identifié au sein de la placette
- Cartographie des habitats naturels du site

Informations complémentaires :

- Gestion opérée sur les sites échantillonnés
- Action de restauration entreprise
- Fonctionnement et usage du site

Indicateurs :

- Indice de niveau d'engorgement du sol (Protocole RhoméO: I02)
- Richesse spécifique par placette
- Diversité spécifique
- L'état de conservation des groupements végétaux

Illustration 77. Protocole de suivi recommandé dans les milieux humides pour répondre à la problématique de la contribution des eaux souterraines au fonctionnement des milieux humides

10. Conclusions et perspectives

Concernant la recherche des sites pilotes et l'acquisition des données, ce volet s'est révélé très chronophage. La donnée existe mais elle est disparate, dispersée et très hétérogène. Chaque fichier a nécessité un traitement manuel spécifique, sans compter les informations et données à rechercher dans la littérature grise transmise.

Ces travaux ont mis en évidence les besoins d'acquisition de données en pédologie. Bien que la délimitation des zones humides se fassent sur des critères sol ou végétation²⁰, on constate que les données concernant le sol sont peu présentes. Malgré le manque de données brutes, il a été mis en évidence la pertinence de la complémentarité des approches en pédologie, hydrogéologie et écologie pour caractériser la dépendance des milieux humides aux eaux souterraines.

Les milieux humides sont des hydrosystèmes complexes à l'interface entre eau souterraine et eau de surface, entre milieu terrestre et milieu aquatique. L'eau y est un facteur déterminant. Les fluctuations du niveau d'eau sont à l'origine de la formation de sols particuliers, d'une végétation et d'une faune spécifique. Les cinq sites pilotes choisis ont permis d'illustrer la relation eau souterraine – sol – plante dans les milieux humides. Cette notion d'eau souterraine fait référence à des aquifères d'extension au moins régionale, définis par une ou plusieurs masses d'eau souterraine selon la définition de la Directive Cadre Eau.

Cette étude a fait le lien entre les critères pédologiques du sol, la présence d'espèces végétales en lien avec le niveau d'engorgement du sol et indicatrices d'une contribution des eaux souterraines. Le niveau moyen de la nappe de surface dans la zone humide est corrélé avec le niveau piézométrique de la masse d'eau souterraine dont le milieu est dépendant.

Ces relations mettent en évidence la faisabilité d'identifier des seuils de gestion du milieu humide, c'est-à-dire des niveaux de nappe de surface moyen établis sur des critères pédologiques et/ou écologiques. Cet indicateur (niveau de la nappe de surface) peut alors être relié à un niveau piézométrique de la masse d'eau souterraine qui alors permet de proposer un indicateur de gestion de la masse d'eau vis-à-vis d'un écosystème terrestre identifié comme dépendant des eaux souterraines.

Pour aller plus loin, il serait intéressant de se rapprocher des gestionnaires de milieux humides pour définir des valeurs seuils du milieu humide au droit du piézomètre de suivi de la nappe de surface ; d'approfondir les travaux de corrélation en fonction du degré de dépendance des milieux humides, c'est-à-dire distinguer le signal de l'écoulement de base dans les chroniques ; et aboutir à la proposition de seuils de gestion dans le milieu humide.

²⁰ <https://www.legifrance.gouv.fr/loda/id/JORFTEXT000019151510/>

11. Bibliographie

Agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse, 2014. Etat des connaissances. Fiche masse d'eau souterraine V2 FRDG104 Cailloutis de la Crau. <http://www.rhone-mediterranee.eaufrance.fr/docs/eaux-souterraines/MESoutV2/FRDG104.pdf>

Agence de l'eau Seine-Normandie, 2015. Fiche de caractérisation de la masse d'eau souterraine HG104 l'Eocène du Valois, fiche éditée en 2015, cycle DCE 2016-2021, <http://sigessn.brgm.fr/files/FichesMESO/Fiches completes/Fiche MESO FRHG104 Seine-Normandie.pdf>

Alcazar, C. 2011. Le cycle de l'eau en Crau, un modèle de développement durable en danger. Actes des conférences « *L'eau en Pays d'Arles, trop et trop peu...* » Novembre 2011. CPIE Rhône Pays d'Arles. 45-58. http://www.cpierpa.fr/wp-content/uploads/2015/09/2011_eau.pdf

Auterives C., Allier D., Pinson S., 2012. Proposition d'une méthodologie d'identification des liens entre eau souterraine et écosystèmes terrestres. Rapport final. BRGM/RP-61677-FR, 85 p., 46 ill., 5 tabl. <http://infoterre.brgm.fr/rapports//RP-61677-FR.pdf>

Auterives C., Veirman A., Percheron T., 2019. Projet soHUMID: les sites pilotes. Rapport intermédiaire. BRGM/RP-69356-FR, 100 p., 69 ill., 1 ann. <http://infoterre.brgm.fr/rapports//RP-69356-FR.pdf>

Baillieux A., Gomila H, Verbeke A., Penart P., Oules E., Scarpari M., Lombardini K., Massez G., Pirastru J.-M., Quoniam I., Ruiz C., Alcazar C. 2019. Investigation croisée entre écologues et hydrogéologues sur la nappe de la Crau, pour une identification des écosystèmes dépendants des eaux souterraines. *Géologues* 202 : 67-72.

Baize D., Girard M.C., 2008. Référentiel pédologique 2008, Association française pour l'étude du sol (AFES), Editions Quæ, Collection *Savoir-faire*, http://www.afes.fr/wp-content/uploads/2017/11/Referentiel_Pedologique_2008.pdf.

Bault V., Bourguine B., Cary L., Gourcy L., Korotchansky A., Winckel A., 2018. Etude du fonctionnement global de l'hydrosystème du Marquenterre en lien avec les marais arrière-littoraux. Rapport final. BRGM/RP-67430-FR, 298 p., 128 ill., 12 tabl., 10 ann., 1 DVD. <http://infoterre.brgm.fr/rapports//RP-67430-FR.pdf>

Bensettiti F., Gaudillat V., Haury J. (coord.), 2002. Cahiers d'habitats NATURA 2000 : Connaissance et gestion des habitats et des espèces d'intérêt communautaire, Tome 3 Habitats humides, ed. La documentation française, 457p. <https://www.natura2000.fr/documentation/references-bibliographiques/cahier-habitats-natura-2000-habitats-humides>

Bissardon M., Guibal L., Rameau J.-C., 1997. CORINE Biotopes - Version originale - Types d'habitats français ; Ecole nationale du génie rural et des eaux et forêts, Laboratoire de recherches en sciences forestières, Nancy (France), 339 p.

Blondel B., Coulombel R., 2019. Les marais de la Maye. Plan de gestion 2019-2023 – Syndicat Mixte Baie de Somme – Grand Littoral Picard. 187 pages + annexe cartographique (26 pages)

Brinson MM., 1993. A hydrogeomorphic classification for wetlands. Wetlands research program technical report WRP-DE-4. U.S. Army Corps of Engineers, Washington, DC. 79 p. http://www.zones-humides.org/sites/default/files/images/interets/brinson_1993_a_hydrogeomorphic_classification_for_wetlands.pdf

Bufková I., Prach K., Bastl M. 2005. Relationships between vegetation and environment within the montane floodplain of the Upper Vltava River (Šumava National Park, Czech Republic), *Silva Gaberta* suppl. 2:1-78.

Cadoret B., Paroissien J.B., Auterives C., Parmentier M., Devau N., Brugeron A., 2019. Redélimitation des masses d'eau souterraine du bassin Artois-Picardie. Rapport final. BRGM/RP-68633-FR, 244 p., 120 fig., 24 tabl., 1 Annexe, 1 CD.

CEREMA, 2015. Projet de contournement autoroutier d'Arles : Etude hydrogéologique du fonctionnement des laurons et interactions avec le projet, 43 p.

Clauzon, G., 1979. La canyon messinien de la Durance (Provence, Alpes) : une preuve paléogéographique du bassin profond de dessiccation. *Paleogeography, Paleoclimatology, Paleoecology* (29) : 15-40. [https://doi.org/10.1016/0031-0182\(79\)90073-7](https://doi.org/10.1016/0031-0182(79)90073-7)

Collectif RhoMéo. 2014. La boîte à outils de suivi des zones humides du bassin Rhône-Méditerranée. www.rhomeo-bao.fr Conservatoire d'espaces naturels de Savoie. 147 pages + annexes. Février 2014. Version 1.

Colomb *et al.* 1979. Notice de la carte géologique de la France à 1/50000 de Châteaurenard, 25 p.

Conservatoire du Littoral – Markedia, 2017. Plans de gestion des sites du Conservatoire du littoral - Site des marais du Vigueirat, 8 p.

Corbier P., 2015. Caractéristiques géologiques et hydrogéologiques des lagunes landaises. Rapport final. BRGM/RP-64633-FR. 98 p., 96 ill., 2 ann. <http://infoterre.brgm.fr/rapports//RP-64633-FR.pdf>

Crabos, F., Cazalis, S., Guéguen V., 2013. Programme pluriannuel de gestion 2013 – 2017 : Lagune de Paulin, Cère. Programme départemental en faveur des lagunes des Landes, Conseil Général des Landes, *mars 2013*, p. 12.

Dahl, M., Nilsson B., Langhoff, J.H., Refsgaard, J.C., 2007. Review of classification systems and new multi-scale typology of groundwater-surface water interaction, *Journal of Hydrology* 344: 1-16, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.06.027>.

Debiesse, L., Lucchessi J.L., Moncourtois C., 2016. Plan de gestion des marais du Vigueirat 2016-2025 – section A. 198 p.

Dellery B. 1987. Etude sommaire des possibilités d'un gisement de tourbe dans les marais de Meyranne et des Chanoines, communes d'Arles, BRGM/87-SGN-179-PAC, 38 p. 6 cartes.

Ellenberg H., 1974. Zeigerwerte des Gefasspflanzen Mitteleuropas. *Scripta Geobotanica* 9 : 1-97.

Ellenberg H., Weber H., Dull R., Wirth H., Werner W., Paulissen D., 1992. Zeigerwerte von Pflanzen in Mitteleuropa. Ed 3. Scripta Geobotanica 18 : 1-258.

Gallois, N., 2011. Plan de suivi et de gestion des eaux des marais de Sacy-le-Grand (60). Rapport d'étude, Agence de l'eau Seine-Normandie et Syndicat mixte des marais de Sacy. 80 p. et annexes.

Gayet G., Baptist F., Baraille L., Caessteker P., Clément J.-C., Gaillard J., Gaucherand S., Isselin-Nondedeu F., Poinsot C., Quétier F., Touroult J., Barnaud G., 2016. Méthode nationale d'évaluation des fonctions des zones humides – version 1.0. Fondements théoriques, scientifiques et techniques. Onema, MNHN, p. 310. Rapport SPN 2016 – 91. http://www.zones-humides.org/sites/default/files/images/methode%20ZH/meth-nat-eval-fonctions-zh-fondements-theor-scient-et-techn-2016-vf_0.pdf

Gentil S., Kosmelj, K., Lachet B., Laporte P., Pautou G., 1983. Classification statistique et modélisation des niveaux de la nappe phréatique près de Brégnier-Cordon, en relation avec les apports d'eau et la température. In : *Revue de la géographie alpine*. Tome 71 N°4 : 353-362.

GEPPA (Groupe d'études des problèmes de pédologie appliquée), 1981. Synthèse des travaux de la commission de cartographie 1970-1981, Doc. multcopié. 20 p.

Gygax A., Lauber K., Wagner G., 2018. Flora Helvetica – Flore illustrée de Suisse, Haupt, 1686 p.

Girel J., Garguet-Duport B. & Pautou G., 1997. *Present structure and construction processes of landscapes in Alpine floodplains. A case study: the Arc-Isère confluence (Savoie, France)*. Environmental Management, 21(6), 891-907.

Girel J., 2018. Paysages alluviaux alpins et biodiversité, Encyclopédie de l'environnement, www.encyclopedie-environnement.org, 9 p.

Giudicelli J., Mouyabed Z., Tourenq J.N., 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 – International Journal of Limnology* 16 (3) : 271-297. <https://doi.org/10.1051/limn/1980002>

Goslee S.C., Brooks R.P., Cole C.A. 1997. Plants as indicators of wetland water source. *Plant Ecology* 131 : 199-206.

Goujard G., Michaud H., Beltra S., Renet J., Pires M., Paquier T., Brault F., Richaud S. 2019. Marais de Meyranne et des Chanoines – identifiant national 900012410 - INPN, SPN-MNHN Paris, 16p. <https://inpn.mnhn.fr/docs/ZNIEFF/znieffpdf/930012410.pdf>

Guichard G., 2011. L'eau en Crau. Une eau partagée réutilisée. Actes des conférences « *L'eau en Pays d'Arles, trop et trop peu...* » Novembre 2011. CPIE Rhône Pays d'Arles. 25-44. http://www.cpierpa.fr/wp-content/uploads/2015/09/2011_eau.pdf

Hunt, R.J., Krabbenhoft, D.P., Anderson, M.P., 1996. Groundwater inflow measurements in wetland systems, *Water Resources Research* 32(3): 495-507, <https://doi.org/10.1029/95WR03724>

INPN (Inventaire National du Patrimoine Naturel), 2014. NATURA 2000 - Formulaire Standard de Données - FR2200378 - Marais de Sacy-le-Grand, 11 p.

Krause, S., Bronstert A., 2005. An advanced approach for catchment delineation and water balance modelling within wetlands and floodplains. *Advances in Geosciences* 5: 1-5. <https://doi.org/10.5194/adgeo-5-1-2005>

Landolt E. *et al.*, 2010. Flora indicativa. CJB Geneve, Haupt, Berne, 376 p.

Laplace-Dolonde A., 1994. L'histosol, descripteur privilégié du marais tourbeux, *Bulletin de l'Association de Géographes Français*, 71 – 3 : 294-306. https://www.persee.fr/doc/bagf_0004-5322_1994_num_71_3_1749

Laville L., Juhel C., 2017. Identification des végétations de zones humides par bassin versant, l'Orne et la Dives. Tome 4 : Fiches descriptives des groupements végétaux de zones humides. Agence de l'eau Seine Normandie / Région Normandie. Villers bocage : Conservatoire Botanique National de Brest, 276 p.

Lebrun J., François R., Coulombel R. 2014. Inventaire et cartographie des tourbières de Picardie – Phase 1 : méthodologie et premier test en moyenne vallée de la Somme – Conservatoires d'espaces naturels de Picardie – Centre régional de phytosociologie agréé Conservatoire botanique national de Bailleul, 154 p. + annexes.

Massez G., 2013. Rapport annuel d'activités 2013 - Marais de Meyranne, Les amis du Vigueirat, 32 p. + annexes.

Mosaïque Environnement, 2005. Document d'objectifs Natura 2000, Marais de Sacy- le-Grand, site FR 220 0378, janvier 2005. 297 p.

Munger J.L., Pellerin S., Larocque M., Ferlatte M., 2014. Espèces végétales indicatrices des échanges d'eau entre tourbière et aquifère, *Le Naturaliste Canadien* 138 (1): 2-74. <https://doi.org/10.7202/1021038ar>.

Oberti D., Meny G., 1992. Typologie des stations forestières du Massif de l'IIIWald (Bas-Rhin). 131 p. et annexes.

Oliosio, A., Lecerf R., Baillieux A., Chanzy A., Ruget F., Banton O., Lecharpentier P., Trolard F., Cognard-Plancq A-L. 2013. Modelling of drainage and hay production over the Crau aquifer for analysing impact of global change on aquifer recharge. *Procedia Environmental Sciences* 19: 691-700. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2013.06.078>

Ros, L. 2016. Interactions eaux souterraines – eaux de surface des milieux humides naturels : Etude des résurgences de la nappe de la Crau sur le site Natura 2000 des « trois marais ». Mémoire de Master. 45 p. et annexes. http://www.parc-camarque.fr/getlibrarypublicfile.php/fe3ef9a12e534747a575bd1e39637391/parc-camarque/ /collection_library_fr/201800145/0001/Interactions.eaux.souterraines-eaux.de.surface.dans.les.milieux.humides.pdf

Roux J.C. *et al.* 2006. Aquifères et eaux souterraines en France. Ouvrage collectif publié aux Editions BRGM.

Schleuß U., Trepel M., Wetzel H., Schimming C.G., Kluge W. 2002. Interaction between hydrology, pedology and vegetation at three minerotrophic peatland ecosystems. *In*: Broll G., Merbach W., Pfeiffer EM. (eds) *Wetlands in Central Europe*. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-662-05054-5_6.

Schomburgk S., Pinault J.L, Longuevergne L. 2005. Méthodologie de définition des zones de remontée de nappe. Cartographie de l'aléa sur la plaine d'Alsace. Rapport final. BRGM/RP-53579-FR, 84 p. 61 fig.

SETEC-HYDRATEC - ECOSPHERE - CBNBL, 2020. Etude du programme pluriannuel de restauration et d'entretien de la Frette et de la gestion quantitative des Marais de Sacy-le-Grand. Rapport phase 1, Etat des lieux et diagnostic, juin 2020 (v3), 212 p.

Smith R.D., Ammann A., Bartoldus C., Brinson M.M., 1995. An approach for assessing wetland functions using hydrogeomorphic classification, reference wetlands, and functional indices. *Wetland Research Program*. Technical Report WRP-DE-9, final report, prepared for U.S. Army Corps of Engineers. <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a307121.pdf>

STUCKY, ARMINES-CIG., 2000. Etude des Marais de Sacy-le-Grand. Fonctionnement hydraulique et hydrogéologique. Rapport d'études, mai 2000, 84 p. et annexes.

STUCKY, 2008. Etude hydraulique en basses eaux et hautes eaux des marais de Sacy le Grand. Rapport d'études FR 3360, juin 2008, 80 p. et annexes

Thibault M., 2004 (révision 2008). Documents d'objectifs des sites Natura 2000 : FR 9301596 Marais de la vallée des Baux et Marais d'Arles et FR 9312001 Marais entre Crau et Grand Rhône, Tome 1 Diagnostic, enjeux et objectifs de conservation et de développement durable ; Tome 2 Volet opérationnel.

Tison J.M., Jauzein P., Michaud H., 2014. Flore de la France méditerranéenne continentales. Ed. Naturalia/ Conservatoire botanique national méditerranéen de Porquerolles publications, Turriers, 2879 p.

Tison J.M., De Foucault B. (coords), 2014. Flora Gallica – Flore de France, Ed. Biotope (Mèze), 1196 p.

Vernoux, J.F., Lions, J., Petelet-Giraud, E., Seguin, J.J., Stollsteiner, P., Lalot E. 2010. Synthèse bibliographique sur les relations entre eau souterraine, eau de surface et écosystèmes en lien avec la DCE. Rapport final. BRGM/RP-57044-FR, 207 p., 1 ann. <http://infoterre.brgm.fr/rapports//RP-57044-FR.pdf>



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Centre scientifique et technique
Direction Eau, Environnement, Procédés et Analyses
3, avenue Claude-Guillemin
BP 36009 – 45060 Orléans Cedex 2 – France – Tél. : 02 38 64 34 34
www.brgm.fr