



Géosciences pour une Terre durable

brgm

Document public



**Bilan des actions 2018-2021 conduites
pour l'Observatoire du Littoral des
Pays de Monts (OLPM) : l'eau
continentale et son rôle dans la
bordure littorale**

Rapport final

BRGM/RP- 71349-FR

Décembre 2021

Bilan des actions 2018-2021 conduites pour l'Observatoire du Littoral des Pays de Monts (OLPM) : l'eau continentale et son rôle dans la bordure littorale

Rapport final

BRGM/RP-71349-FR
Décembre 2021

Étude réalisée dans le cadre du projet
de Service public du BRGM AP18NAN071

Baudouin V., Bodere G., Chretien P., Courbier P., De Cathelineau T., Idier D., Thieblemont R.

Vérificateur :

Nom : A. Wuilleumier
Fonction : Hydrogéologue
Date : 07/12/2021

Signature :



Approbateur :

Nom : X. Rachez
Fonction : Directeur régional
Date : 10/12/2021

Signature :



Mots-clés :

PIEZOMETRIE, NAPPE EAU, CORDON LITTORAL, DUNE COTIERE, CHANGEMENT CLIMATIQUE, HYDROGEOLOGIE, MILIEU LITTORAL
VENDEE, PAYS DE MONTS, OBSERVATOIRE DU LITTORAL, COMMUNAUTE DE COMMUNES
OCEAN MARAIS DE MONTS

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

Baudouin V., Bodere G., Chretien P., Courbier P., De Cathelineau T., Idier D., Thieblemont R. (2021)
– Bilan des actions 2018-2021 conduites pour l'Observatoire du Littoral des Pays de Monts (OLPM) : l'eau continentale et son rôle dans la bordure littorale. Rapport final. BRGM/RP-71349-FR, 111 p., 70 ill., 4 tab. 4 ann.

Synthèse

Initié en 2009 par la Communauté de Communes Océan-Marais de Monts, l'Observatoire du Littoral des Pays de Monts (OLPM) vise, par son caractère pérenne, à constituer un véritable outil de surveillance et d'aide à la gestion prévisionnelle du trait de côte.

Dans le cadre du programme 2018-2021 de l'Observatoire, les travaux du BRGM se sont orientés sur la thématique des eaux souterraines, ou plus largement, de l'eau continentale et de son rôle dans la bordure littorale.

La première action menée dans ce projet, est la mise en place d'un réseau de suivi piézométrique sur le cordon dunaire. Pour cela, des ouvrages et des points d'affleurement de la nappe libre des sables dunaires ont été sélectionnés et équipés d'un système de mesure de niveau d'eau. Cette action est détaillée dans un rapport technique (BRGM/RP-70248-FR) qui présente l'instrumentation des ouvrages et l'acquisition de mesures. Sa description est actualisée dans le présent rapport.

A la date de rédaction du rapport, le réseau pour le suivi piézométrique de l'Observatoire du Littoral des Pays de Monts est composé de 6 sites de surveillance (4 piézomètres et 2 mares) en fonctionnement. Ces sites sélectionnés sont équipés de sondes d'enregistrement de niveaux d'eau avec des mesures acquises au pas de temps de 15 minutes. Lorsque le site le permet, un système de télétransmission a été installé, soit sur 3 sites. Celui-ci offre la possibilité de suivre à la demande l'état piézométrique de l'aquifère libre du système dunaire.

Une campagne piézométrique de hautes eaux a été conduite en mars 2021 sur 121 points de mesures nivelés au DGPS. La carte piézométrique (isopièzes) de hautes eaux a pu être établie, et la carte d'épaisseur de la zone non saturée (ZNS) de hautes eaux a pu être élaborée. La comparaison de cette piézométrie de hautes eaux avec celle réalisée en 2014 par l'OLPM en situation de basses eaux, a permis l'établissement d'une cartographie du battement de la nappe.

Ces différentes cartographies font apparaître des secteurs de niveaux d'eau proches de la surface, potentiellement sensibles au phénomène de remontée de nappe.

Les chroniques piézométriques constituent, quant à elles, un prérequis pour comprendre le fonctionnement et la réponse de l'hydrosystème du milieu dunaire, au regard de variables environnementales (anthropiques, météorologiques et marines), et de leurs évolutions possibles face aux changements environnementaux.

Un premier travail d'interprétation du signal piézométrique a consisté à le croiser avec d'autres variables environnementales telles que la pluviométrie, l'évapotranspiration, les niveaux de mer et l'énergie des vagues. Ces premières analyses constituent un préalable à l'élaboration d'un modèle de régression linéaire multivarié (MLR), par la décomposition du signal piézométrique au regard des variables environnementales, et à la compréhension des phénomènes en jeu.

En outre, les premières analyses de corrélation avec des facteurs météo-marins qui interagissent avec l'état piézométrique du milieu ont pu être approchées sur le site de la Parée Grollier, au droit du piézomètre le plus influencé par les fluctuations de niveaux de mer. Des corrélations substantielles ont pu être identifiées entre le niveau d'eau piézométrique et (1) la marée, (2) la surcote et (3) la hauteur significative des vagues (Hs).

En tenant compte des déphasages, le modèle linéaire basé sur les conditions marines a permis d'ajuster les observations avec un R^2 supérieur à 0.71. Le R^2 est nettement amélioré par la prise en compte de ces déphasages temporels. Cependant, des résidus subsistent. Ils sont fortement autocorrélés, ce qui entraîne une violation des conditions de Gauss-Markov. Les résultats sont à considérer, à ce stade, avec précaution.

Ces premiers résultats, confrontés avec la littérature, offrent de nombreuses perspectives dans la poursuite de ce volet de travail sur la compréhension et le fonctionnement de l'hydrosystème du massif dunaire des Pays de Monts.

Le réseau de suivi a pour vocation à être maintenu dans le temps, en étroite collaboration entre les différents acteurs de l'observatoire (BRGM, l'ONF et la Communauté de Communes Océan-Marais de Monts), afin de disposer de chroniques piézométriques suffisamment longues pour apporter de la robustesse dans la modélisation et les projections qui pourront être faites.

Sur la durée du projet, et sous l'impulsion de la Communauté de Communes, plusieurs actions de médiation, notamment avec la presse et médias locaux, ont été conduites.

Les actions sur la connaissance du fonctionnement hydrogéologique du milieu dunaire sous influence des conditions météo-marines ont vocation à être poursuivies, afin d'appréhender les variations spatiales et temporelles des surfaces piézométriques, et leur évolutivité face aux changements environnementaux.

Sommaire

1. Introduction	11
2. Mise en place d'un réseau piézométrique	13
2.1. CONTEXTE GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE	13
2.2. PROGRAMME DE TRAVAIL	17
2.3. LE RESEAU DE SUIVI.....	18
2.4. EQUIPEMENT DES PIEZOMETRES.....	20
Piézomètre de la Buzelière (abandonné)	21
Piézomètre des 60 Bornes PA28 (abandonné)	22
Piézomètre des 60 Bornes PA27 (actif).....	23
Piézomètre de La Parée Grollier PG1 (actif)	24
Piézomètre de La Parée Grollier PG3 (actif)	26
Piézomètre de l'hippodrome (actif).....	26
Synthèse des piézomètres	28
2.5. EQUIPEMENT DES MARES	29
Mare de la Grande Côte.....	29
Mare à proximité de Biotopia.....	30
Synthèse des Mares	31
2.6. NIVELLEMENT DU RESEAU DE SUIVI	32
2.7. DONNEES	33
Paramétrage et télétransmission.....	33
Base de données	33
Visualisation des enregistrements.....	34
3. Cartographie de la piézométrie	37
3.1. CAMPAGNE DE MESURES DE BASSES EAUX	37
3.2. CAMPAGNE DE MESURES DE HAUTES EAUX	37
3.3. CARTOGRAPHIE PIEZOMETRIQUE	39
3.4. INTERPRETATION DES RESULTATS.....	41
Piézométrie de hautes eaux 2021	41
Zone non saturée (ZNS)	42
Battement de la nappe	44
4. Analyse croisée de la piézométrie avec les conditions météo-marines.....	47
4.1. OBJECTIF ET METHODOLOGIE APPLIQUEE	47
4.2. ANALYSE DES INDICATEURS METEOROLOGIQUES.....	49

Données météorologiques (Météo-France).....	49
Principes de calcul de la part des précipitations infiltrées	52
Comparaison visuelle de la relation entre les pluies efficaces et les niveaux de nappe enregistrés	56
Analyse des corrélations de la piézométrie avec les données météorologiques.....	58
4.3. ANALYSE DES INDICATEURS MARINS	59
Données de conditions marines.....	60
Analyse des corrélations de la piézométrie avec les données marines.....	67
4.4. RESULTATS DU MODELE DE REGRESSION LINEAIRE MULTIPLE (MLR) .	73
4.5. CONCLUSIONS SUR L'ANALYSE CROISEE ET LE MODELE MLR	74
5. Perspectives.....	75
5.1. POURSUITE DE L'ACQUISITION	75
5.2. COMPREHENSION PHYSIQUE DU SYSTEME ET MODELE PREDICTIF	75
5.3. CHANGEMENTS ENVIRONNEMENTAUX	77
6. Contribution à la vie de l'observatoire	79
6.1. BIOTOPIA	79
6.2. COMMUNICATION	79
7. Conclusion	83
8. Bibliographie	85

Liste des illustrations

Illustration 1 : Carte sédimento-géologique synthétique du littoral des Pays de la Loire à 1/250 000 (modifiée d'après THINON et al., 2013)	13
Illustration 2 : Coupe géologique schématique au niveau de l'hippodrome (Saint Jean de Monts) et propriétés des couches géologiques au droit de la dune	14
Illustration 3 : Position des sondages de la BSS exploitables (points rouges, 135 au total) par rapport au schéma structural du bassin de Challans Noirmoutiers (Borne, 1987) et à l'extension du cordon dunaire (en jaune), et localisation de la zone suffisamment renseignée pour une modélisation 3D de la géologie (contour violet)	15
Illustration 4 : Modèle géologique 3D produit sur le secteur de Saint-Jean-de-Monts à partir de l'exploitation des données de sondage (BRGM, logiciel GDM).....	16
Illustration 5 : Coupes géologiques sur le secteur de Saint-Jean-de-Monts, élaborée à partir du modèle géologique 3D, intégrant la surface de la nappe en basses eaux.....	16
Illustration 6 : Présentation cartographique du réseau de suivi piézométrique final de l'OLPM .	19
Illustration 7 : Piézomètres équipés avant le 1er Janvier 2019.....	20
Illustration 8 : Equipement pour suivi piézométrique.....	21
Illustration 9 : Puits de la Buzelière – 05601X0013.....	21
Illustration 10 : Evolution du niveau d'eau dans le puits de la Buzelière (05601X0013)	22
Illustration 11 : Piézomètre PA28, le 26/05/2016	23
Illustration 12 : Piézomètre PA28, le 21/06/2019	23
Illustration 13 : Coupes lithologique et technique de PA27 – 05602X0066	24
Illustration 14 : Piézomètre PA27, le 26/05/2016	24
Illustration 15 : Piézomètre PA27, le 26/11/2019	24
Illustration 16 : Piézomètre PG1 lors de sa 1ère installation en janvier 2017.....	25
Illustration 17 : Piézomètre PG1 suite au vol de 2018	25
Illustration 18 : Nouveau tubage et capot de protection de PG1.....	25
Illustration 19 : PG3 en 2017 avant dégradation	26
Illustration 20 : PG3 en novembre 2019 après réhabilitation	26
Illustration 21 : Piézomètre de l'hippodrome avant réhabilitation (05345X0164).....	27
Illustration 22 : Piézomètre de l'hippodrome après travaux, mars 2021	27
Illustration 23 : Mare au nord de la zone Grande Côte abandonnée	29
Illustration 24 : Localisation de la mare au sud de la zone « Grande Côte ».....	29
Illustration 25 : Installation de l'équipement sur la mare sud de la Grande Côte.....	30
Illustration 26 : Détail de l'installation à la mare sud de la Grande Côte.....	30
Illustration 27 : Installation d'un système de mesure de niveau d'eau avec télétransmission (cas de la mare de Biotopia).....	31
Illustration 28 : Parcours des données télétransmises.....	33
Illustration 29 : Extrait du journal de suivi du site de la Parée Grollier PG3.....	34
Illustration 30 : Stations intégrées et suivies via le logiciel SIEAU dans le cadre de l'OLPM	34
Illustration 31 : Superposition des niveaux maximum enregistrés du 01/02/2020 au 15/06/202035	

Illustration 32 : Chroniques (valeurs min,max et brutes) de PG3 du 01/06/2020 au 31/08/2020	35
Illustration 33 : Périodes d'investigations de terrain (figurés rouges) sur les eaux souterraines en période de basses eaux comparées à l'évolution saisonnière des niveaux des eaux souterraines au niveau d'un puits dans la dune situé à la Parée Grollier.	37
Illustration 34 : Nivellement du niveau d'eau dans une mare forestière. Crédit photo Ouest-France.	38
Illustration 35 : Répartition géographique et nature des points de mesure de la campagne de hautes eaux (mars 2021).	39
Illustration 36 : Carte piézométrique de hautes eaux (mars 2021) de la nappe libre du système dunaire des Pays de Monts (OMDM).	40
Illustration 37 : Carte piézométrique des basses eaux 2014.	41
Illustration 38 : Détail de la piézométrie à proximité du site de la station d'épuration à la Parée Grollier (Notre-dame de Monts)	42
Illustration 39 : Statistiques sur l'épaisseur de la ZNS	43
Illustration 40 : Carte de l'épaisseur de la zone non saturée, en mètre.	44
Illustration 41 : Statistiques sur le battement de la nappe	45
Illustration 42 : Cartographie du battement de la nappe entre les hautes eaux de mars 2021 et les basses eaux de 2014.	46
Illustration 43 : Photographie du poste 85172001 prise le mardi 17 septembre 2019 (Météo-France)	49
Illustration 44 : Visualisation des données de pluviométrie journalière de la station du Perrier.	50
Illustration 45 : Visualisation des données d'évapotranspiration potentielle de la station du Perrier.	51
Illustration 46 : Les précipitations efficaces (© Agence française pour la biodiversité / Réalisation Matthieu Nivesse (d'après OIEau), 2018)	52
Illustration 47 – Algorithme de calcul de la pluie efficace (à gauche) et processus de recharge (à droite)	55
Illustration 48 : Variations saisonnières de la piézométrie au regard des précipitations efficaces, site de l'hippodrome (Saint-Jean-de-Monts)	56
Illustration 49 : Variations saisonnières de la piézométrie au regard des précipitations efficaces, mare de Biotopia (Notre-Dame-de-Monts)	57
Illustration 50 : Analyse de la corrélation entre la piézométrie et les précipitations et l'ETP.	58
Illustration 51 : Analyse de la corrélation entre la piézométrie et les précipitations et l'ETP, décorrélé de la saisonnalité.	59
Illustration 52 : Localisation des principales données utilisés. Les cotes bathymétriques sont issue des données HOMONIM (résolution horizontale de 100m ; source : SHOM). ...	60
Illustration 53 : Taux de données horaires validées pour les trois marégraphes. Figures extraites de datashom (SHOM) le 29/07/2021.	61
Illustration 54 : Valeurs de référence du niveau moyen par rapport au zéro hydrographique (cartes marines du SHOM) et du zéro hydrographique dans le référentiel IGN69, pour les deux marégraphes (Herbaudière et Les Sables d'O.). Source : SHOM (2020).	62
Illustration 55 : Visualisation rapide sous Marc (IFREMER) de la variabilité spatiale des niveaux d'eau (résultants de la marée et des surcotes, et référencés par rapport au niveau moyen).	62

Illustration 56 : Comparaison des niveaux d'eau observés entre le marégraphe de l'Herbaudière et celui des Sables d'Olonne. Les niveaux d'eau sont ici données par rapport au niveau moyen (NM). Données marégraphiques issues de datashom.....	63
Illustration 57 : Comparaisons des niveaux d'eau (WL) observés avec les données extraites du modèle pour (a) le marégraphe de L'Herbaudière, (b) le marégraphe des Sables d'Olonne. Valeurs exprimées en mètres par rapport au niveau moyen (NM, issu du RAM, 2020).....	64
Illustration 58 : Caractéristiques de la bouée Yeu Nord (source : CANDHIS).	64
Illustration 59 : Variabilité spatiale de la hauteur significative (Hs) des vagues.....	65
Illustration 60 : Variabilité spatiale de la périodes (Tp) et de direction des vagues.	66
Illustration 61 : Profil bathymétrique entre le piézomètre et la bouée Candhis Yeu Nord. Données utilisées : HOMONIM (résolution horizontale de 100m ; source : SHOM).	67
Illustration 62 : Superposition de la chronique piézométrique PG1 (en rouge) avec le niveau d'eau associé aux marées et aux surcotes issues du modèle MARC, au droit de PG1 (en noir). La colonne de gauche - colonne de droite - montre la superposition piézométrie/marées – piézométrie/surcotes – respectivement. La ligne du bas montre des données zoomées sur une période d'un mois.....	68
Illustration 63 : Analyse des décalages temporels entre données de niveaux d'eau et données piézométriques (PG1). Gauche : décalages temporels entre les niveaux de pleine-mer et les maxima locaux de mesures piézométriques, Droite : décalages temporels entre les niveaux de basse-mer et les minima locaux de mesures piézométriques.	69
Illustration 64 : Analyse des corrélations entre la chronique piézométrique PG1 et le niveau d'eau associé aux marées (colonne gauche) et aux surcotes (colonne droite) issues du modèle MARC, au droit de PG1. Les diagrammes de la ligne du bas montre l'évolution du coefficient de corrélation en fonction du décalage temporel entre la chronique de niveau d'eau et celle du piézomètre.	70
Illustration 65 : Superposition de la chronique piézométrique PG1 (en rouge) avec les paramètres de vague (en noir) hauteur significative (colonne gauche) et période pic (colonne droite).	71
Illustration 66 : Analyse des corrélations entre la chronique piézométrique PG1 et la hauteur significative (colonne gauche) et la période (colonne droite) des vagues. Les diagrammes de la ligne du bas montre l'évolution du coefficient de corrélation en fonction du décalage temporel entre la chronique des paramètres de vagues et celle du piézomètre.	72
Illustration 67 : Superposition de la chronique piézométrique PG1 (en noir) avec la chronique reconstruite à partir du modèle de régression de linéaire multiple (en vert). Le diagramme du bas représente un zoom sur 1 mois.	73
Illustration 68 : Schéma illustratif en ne considérant que trois composantes de marées (copyright IFREMER).....	76
Illustration 69 : Article publié dans le Ouest-France du 16 mai 2019.....	80
Illustration 70 : Article publié dans le Ouest-France du 22 mars 2021	82

Liste des tableaux

Tableau 1 : Piézomètres suivis dans le cadre de l'OLPM (actuels et historiques).....	28
Tableau 2 : Ouvrages suivis dans le cadre de l'OLPM (actuels et historiques).....	31
Tableau 3 : Coordonnées en Lambert 93 et nivellement des sites du réseau de suivi piézométrique	32
Tableau 4 - Réserve utilisable du sol en fonction de sa texture (Baize et al., 1995)	54

Liste des annexes

Annexe 1 Coupes techniques des ouvrages suivis	87
Annexe 2 Fiches ouvrages	93
Annexe 3 Chroniques piézométriques.....	101
Annexe 4 Fiche thématique 4 : Quel rôle des eaux souterraines	105

1. Introduction

Dès 2009, le BRGM a contribué, avec l'ONF (Office national des forêts) et l'IGARUN (Institut de Géographie et d'Aménagement Régional de l'Université de Nantes), à la mise en place de l'Observatoire du Littoral du Pays de Monts (OLPM) ainsi qu'à l'acquisition et à l'interprétation de données correspondantes (Le Guern et al (2010, 2011, 2012), OLPM (2015)), dans le cadre d'une convention pluriannuelle s'étant achevée fin 2016.

Pour mémoire, les objectifs de l'OLPM sont les suivants :

- Elaborer un outil permettant une meilleure connaissance des phénomènes et des interactions sur le littoral,
- Construire un élément d'aide à la gestion prévisionnelle de la côte de la Communauté de Communes Océan – Marais de Monts (soit environ 18 km),
- Etablir un point régulier de la qualité écologique (faune et flore) des milieux côtiers,
- Suivre le littoral en établissant des préconisations en matière d'aménagement et d'entretien,
- Effectuer un partage des données entre l'ensemble des partenaires et les services techniques et urbanisme des 3 communes littorales afin d'intégrer les projets locaux liés à l'aménagement du trait de côte,
- Valider et affiner les études globales,
- Expertiser et vérifier les projets d'aménagement (établissement de critères d'évaluation des politiques publiques en matière d'intervention sur l'évolution du trait de côte).

Dans le cadre de la poursuite de l'Observatoire, les actions concernant le BRGM s'articulent autour de trois axes :

- L'eau continentale et son rôle dans la bordure littorale,
- L'observation d'indicateurs continentaux du changement climatique,
- La contribution à la vie de l'observatoire.

Ce rapport présente les travaux conduits sur la période de vie de la convention (2018-2021), soit sur ces quatre années d'exercice.

2. Mise en place d'un réseau piézométrique

2.1. CONTEXTE GEOLOGIQUE ET HYDROGEOLOGIQUE

Pour introduire le contexte, la carte sédimento-géologique produite à partir de de la carte de synthèse terre-mer régionale (Thinon et al., 2013) délimite l'emprise globale du massif dunaire, de St Hilaire-de-Riez à la Barre de Monts. Il s'étend à l'interface entre les sédiments meubles du domaine marin (vases, sables, graviers et cailloutis), et les alluvions marines flandriennes de nature argilo-vaseuses (Illustration 1).

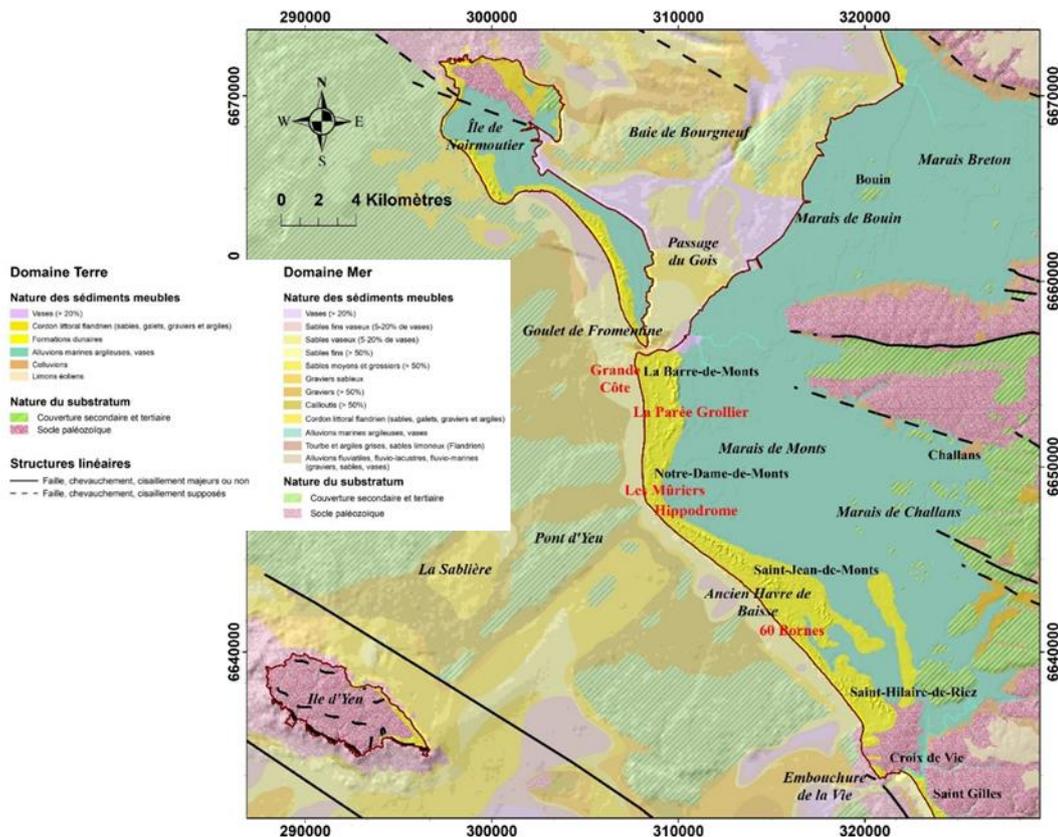


Illustration 1 : Carte sédimento-géologique synthétique du littoral des Pays de la Loire à 1/250 000 (modifiée d'après THINON et al., 2013)

Lors des précédents programmes, le bilan des actions présentées dans le rapport de l'OLPM (2015) ont permis d'apporter des éléments de compréhension du système dunaire des Pays de Monts (Illustration 2).

Le travail réalisé au préalable intégrait notamment : a) une synthèse des données géologiques disponibles à terre et en mer (carte géologique terre-mer locale), b) la réalisation de coupes géologiques sur les zones suffisamment renseignées (Illustration 2) et c) la cartographie de la nappe à partir des données disponibles et d'hypothèses à valider (mares forestières connectées à la nappe, exutoire de la nappe sur la plage).

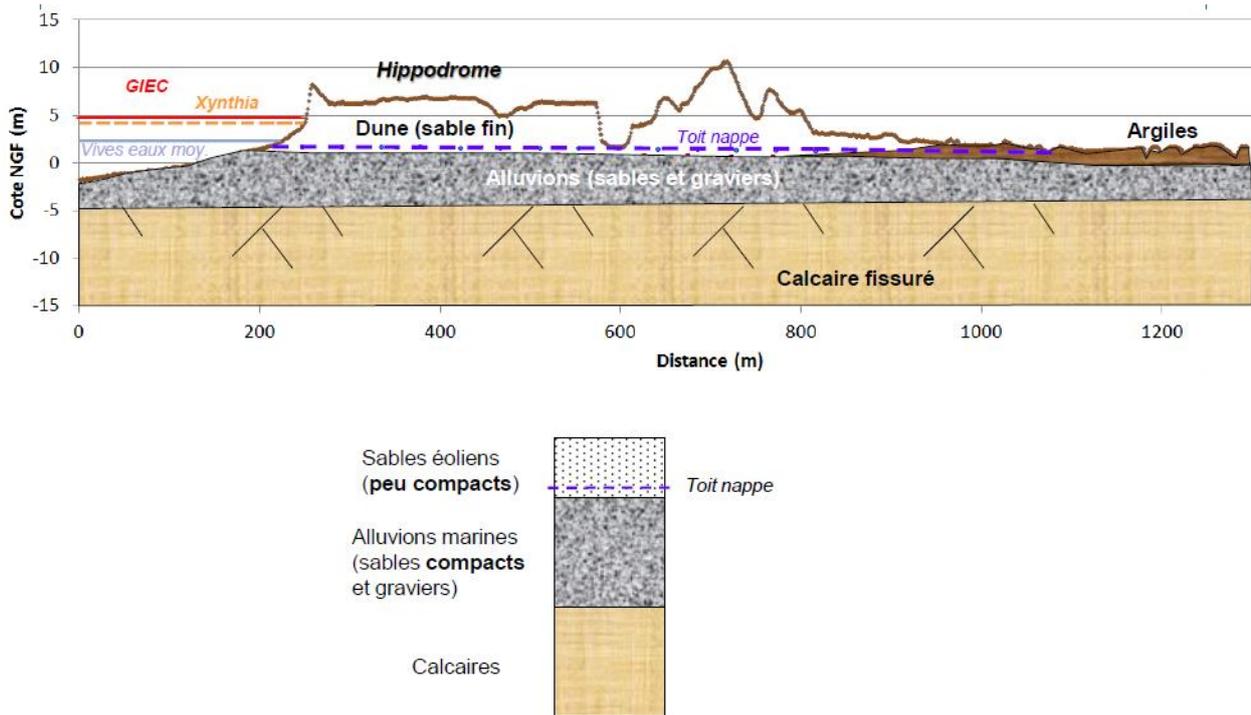


Illustration 2 : Coupe géologique schématique au niveau de l'hippodrome (Saint Jean de Monts) et propriétés des couches géologiques au droit de la dune

L'approfondissement des connaissances géologiques pour la représentation de l'architecture sédimentaire des dépôts holocènes a consisté plus particulièrement à élaborer un modèle numérique 3D du système côtier. Ce modèle intègre la structure des couches géologiques mais aussi la position des eaux souterraines et la topographie de surface du territoire.

La représentation de la structure de couches géologiques est construite à partir des données de sondage. Malgré l'intégration de nouveaux sondages dans la BSS, de nombreuses lacunes d'information subsistent sur le territoire de l'observatoire (Illustration 3). Des secteurs sont ainsi marqués par une absence de sondages. Lorsque des sondages sont présents, ils ne sont toutefois pas toujours exploitables pour construire le modèle. A Notre-Dame-de-Monts, la profondeur des investigations par sondages est insuffisante.

Dans un premier temps, seul un secteur de Saint-Jean-de-Monts a pu être modélisé, délimité par le polygone (contour violet) de l'illustration 3.

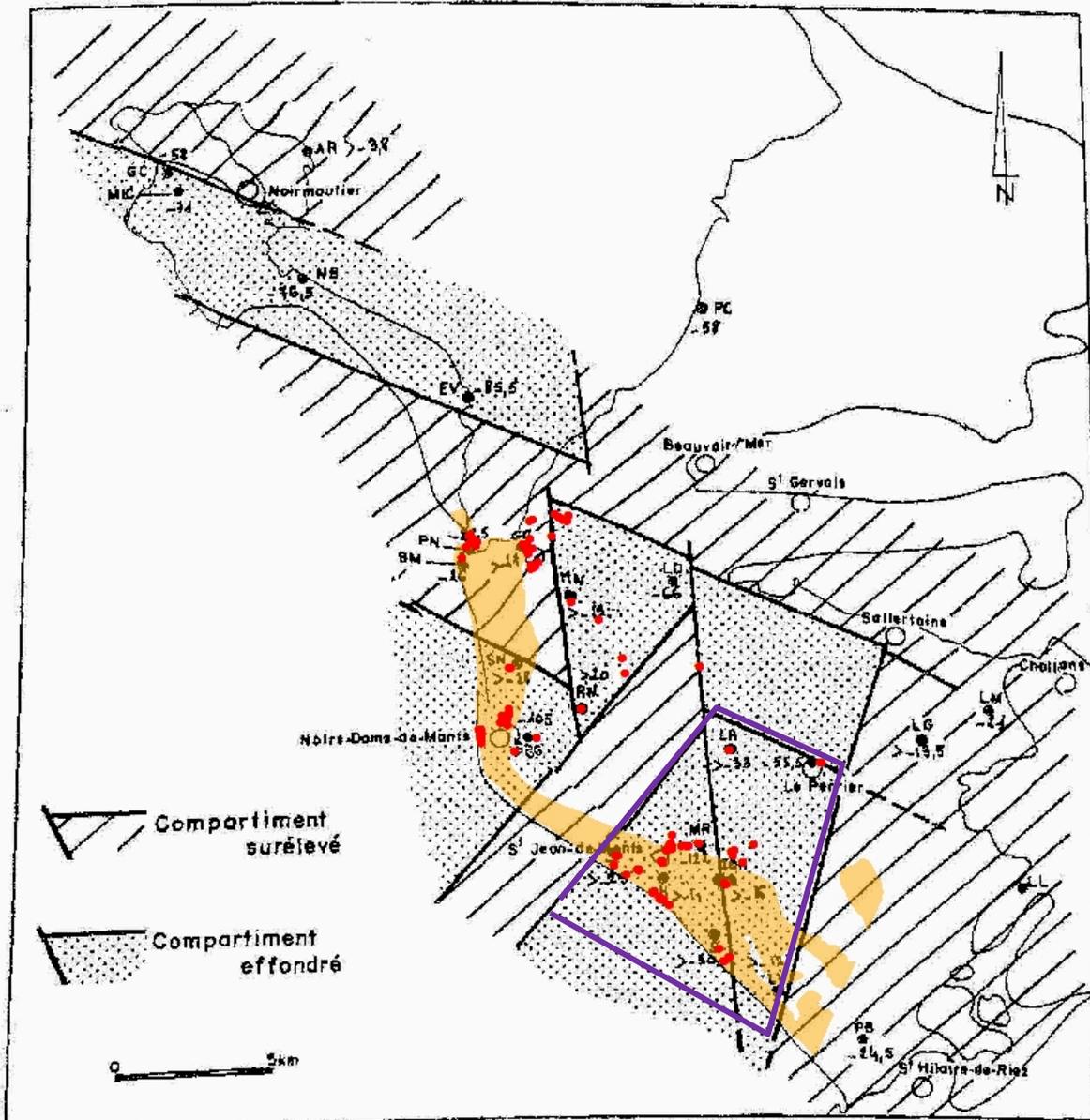


Illustration 3 : Position des sondages de la BSS exploitables (points rouges, 135 au total) par rapport au schéma structural du bassin de Challans Noirmoutiers (Borne, 1987) et à l'extension du cordon dunaire (en jaune), et localisation de la zone suffisamment renseignée pour une modélisation 3D de la géologie (contour violet)

Dans un premier temps, les terrains décrits dans les sondages ont été interprétés en termes d'âge de dépôt et de nature des matériaux : socle ancien, dépôts tertiaires, alluvions quaternaires sablo-graveleuses et argileuses, sable dunaire. Un calage de l'altitude des sondages a également été nécessaire pour certains sondages. Quelques sondages anciens n'ont cependant pu être calés en altitude, faute de référentiel topographique ancien et du fait de l'évolution probable de la topographie locale. La représentation 3D de la structure de matériaux est obtenue par interpolation des sondages interprétés avec l'outil de modélisation GDM, développé par le BRGM (Illustration 4).

La surface piézométrique (niveau de la nappe) a été obtenue par interpolation (sur l'ensemble des Pays de Monts) de valeurs de niveaux de basses eaux, de données complémentaires

(Banque de données du Sous-Sol) et de points de contraintes intégrant les hypothèses de fonctionnement de la nappe dans les zones manquant de données.

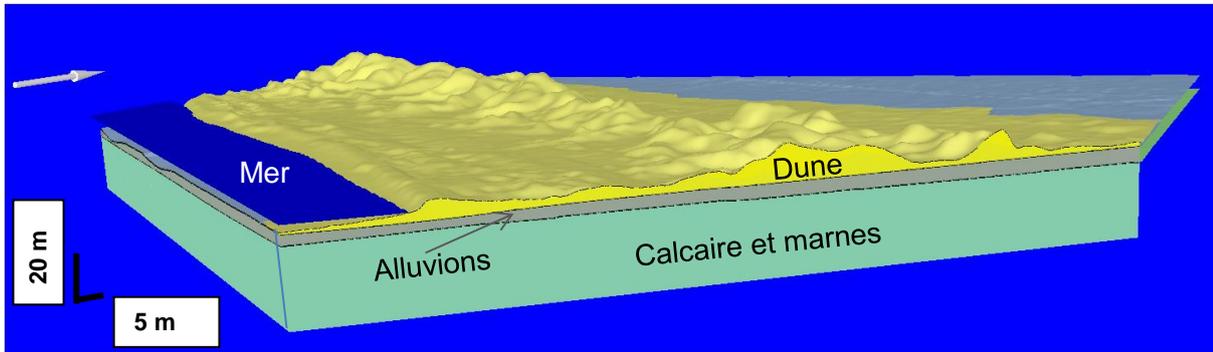


Illustration 4 : Modèle géologique 3D produit sur le secteur de Saint-Jean-de-Monts à partir de l'exploitation des données de sondage (BRGM, logiciel GDM)

Le modèle numérique 3D ainsi obtenu permet la production de documents thématiques comme l'épaisseur de la dune et les coupes associées (Illustration 5), l'épaisseur de la zone non saturée ou l'épaisseur/proportion de la dune située dans la zone saturée.

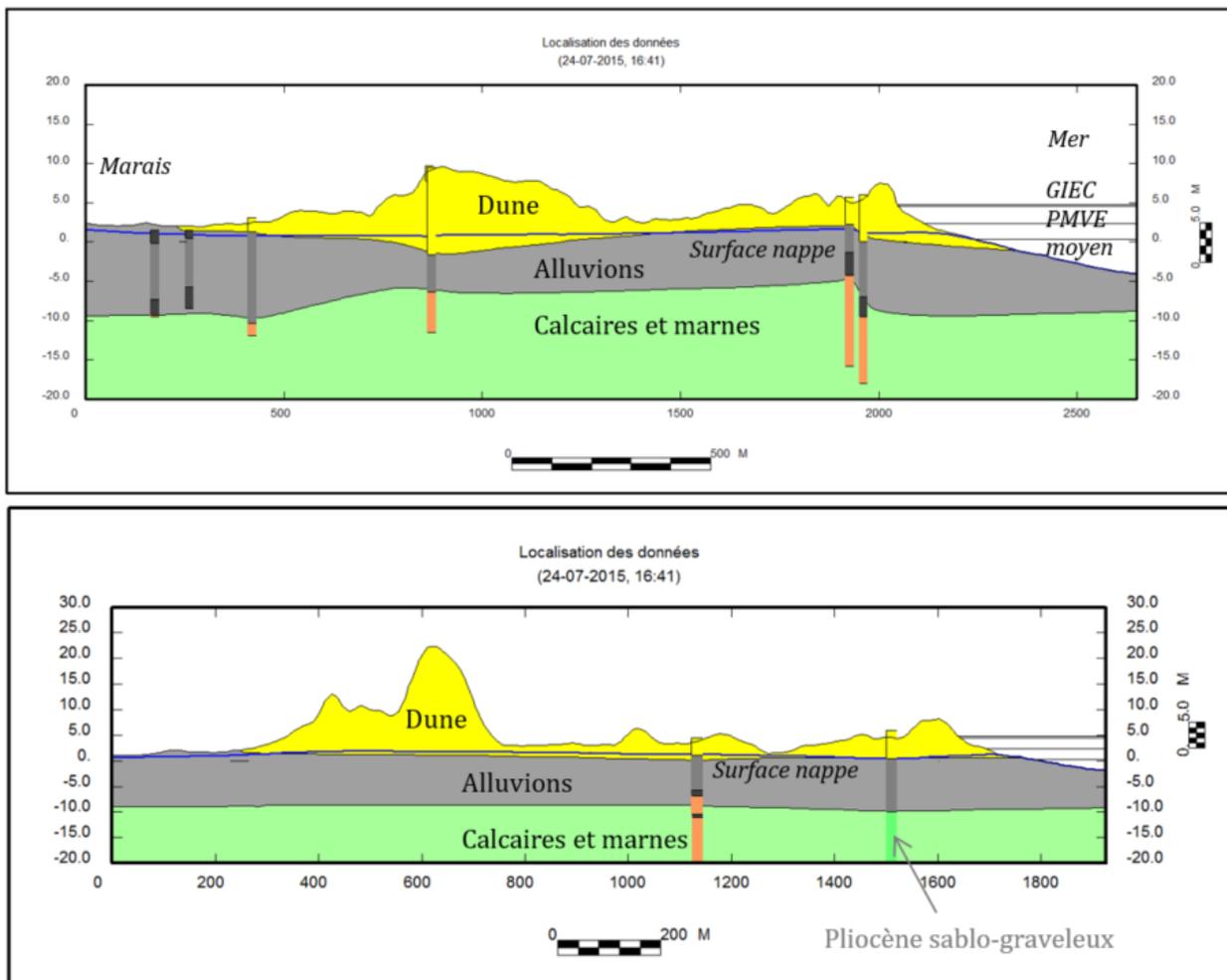


Illustration 5 : Coupes géologiques sur le secteur de Saint-Jean-de-Monts, élaborée à partir du modèle géologique 3D, intégrant la surface de la nappe en basses eaux.

Le modèle numérique 3D réalisé montrait notamment que :

- le toit du substratum éocène (calcaires, marnes, sables et graviers) n'a pas une altitude constante ;
- les alluvions se situent globalement entre -10 et 0 m NGF. Leur lithologie est variable avec la présence de niveaux sablo-graveleux en large proportion sous la dune et un pourcentage d'argile plus important en arrière dune. Ce dernier secteur présente un enchevêtrement de niveaux argileux et sablo-graveleux ;
- la dune repose directement sur les niveaux sablo-graveleux des alluvions (observation confirmée lors des investigations sur les mares forestières en 2011, 2012 et d'octobre 2014 ;
- la surface piézométrique se trouve le plus souvent à la base de la dune. L'aquifère regroupe les alluvions fluvi-marines et les dépôts sableux éoliens.

L'hypothèse de connexion des mares avec la nappe (Le Guern et al., 2012) a pu être validée, confortant l'intérêt de ces observations. Le suivi des mares constitue ainsi un complément utile pour l'observation et la compréhension du système. De la même manière, les informations acquises sur la plage (pouvant être considérée comme exutoire ou limite physique du système aquifère) permettent de contraindre l'interprétation des données et d'affiner la cartographie du toit de la nappe. Il apparaissait ainsi utile de poursuivre les acquisitions, et de les compléter (nouvelles mares, suivi de mares, approfondissement pour les exutoires sur la plage).

Une fiche thématique de synthèse sur le rôle des eaux souterraines avait été produite en 2016 pour l'OLPM (Annexe 4).

L'acquisition de mesures in-situ précises sur les eaux souterraines (chroniques piézométriques et campagnes de piézométrie), est indispensable pour connaître précisément les variations des surfaces piézométriques dans l'espace et dans le temps.

2.2. PROGRAMME DE TRAVAIL

Lors d'une première phase de l'étude, les tâches se sont essentiellement concentrées sur la mise en place d'un réseau de suivi piézométrique de l'aquifère des sables dunaires du cordon littoral.

L'entité hydrogéologique concernée de la BDLISA (Base de Données des Limites de Systèmes Aquifères) correspond aux Sables dunaires en Loire-Atlantique et Vendée (bassin Loire-Bretagne), et porte le code 101AA01. La fiche descriptive de l'entité est consultable à cette adresse : <https://reseau.eaufrance.fr/geotraitement/bdlisa/files/entite/101AA01.pdf>.

Ce réseau piézométrique a la particularité de contenir des points de suivi de différents types : piézomètres et mares. En effet, l'aquifère étudié étant libre et superficiel, le niveau des mares, creusées et entretenues par l'ONF, correspond à son niveau piézométrique, dans la mesure où (1) les observations in-situ permettent de s'assurer que le fond ne présente pas de colmatage et que l'excavation révèle une nature sablo-graveleuse, et (2) le niveau n'est pas perturbé temporairement par un épisode pluvieux intense, donc à l'équilibre. Les ouvrages du réseau de suivi sont sélectionnés de manière stratégique selon leur distance à la mer, leur altitude et leur dispersion Nord/Sud.

Chaque point de suivi (piézomètres et mares) doit être équipé d'un capteur de pression et pour ceux qui le permettent, d'un système de télétransmission. Les mesures de niveau piézométrique s'effectuent au pas de temps de 15min. Toutes les données sont récoltées et stockées selon le même protocole que les réseaux de suivi piézométrique sous la gestion du BRGM. Elles sont valorisées par le logiciel SIEAU et conservées dans une base de données dédiée.

2.3. LE RESEAU DE SUIVI

A la date de rédaction du rapport, le réseau de suivi piézométrique de l'Observatoire du Littoral des Pays de Monts se compose de 6 stations de mesure. Ces stations sont, du Nord au Sud : la mare de Grande Côte, les piézomètres PG1 et PG3 de la Parée Grollier, la mare de Biotopia, le piézomètre de l'hippodrome et le piézomètre PA27 des 60 Bornes (Illustration 6). La télétransmission est totalement opérationnelle sur 3 sites : PG1, Biotopia et PA27.

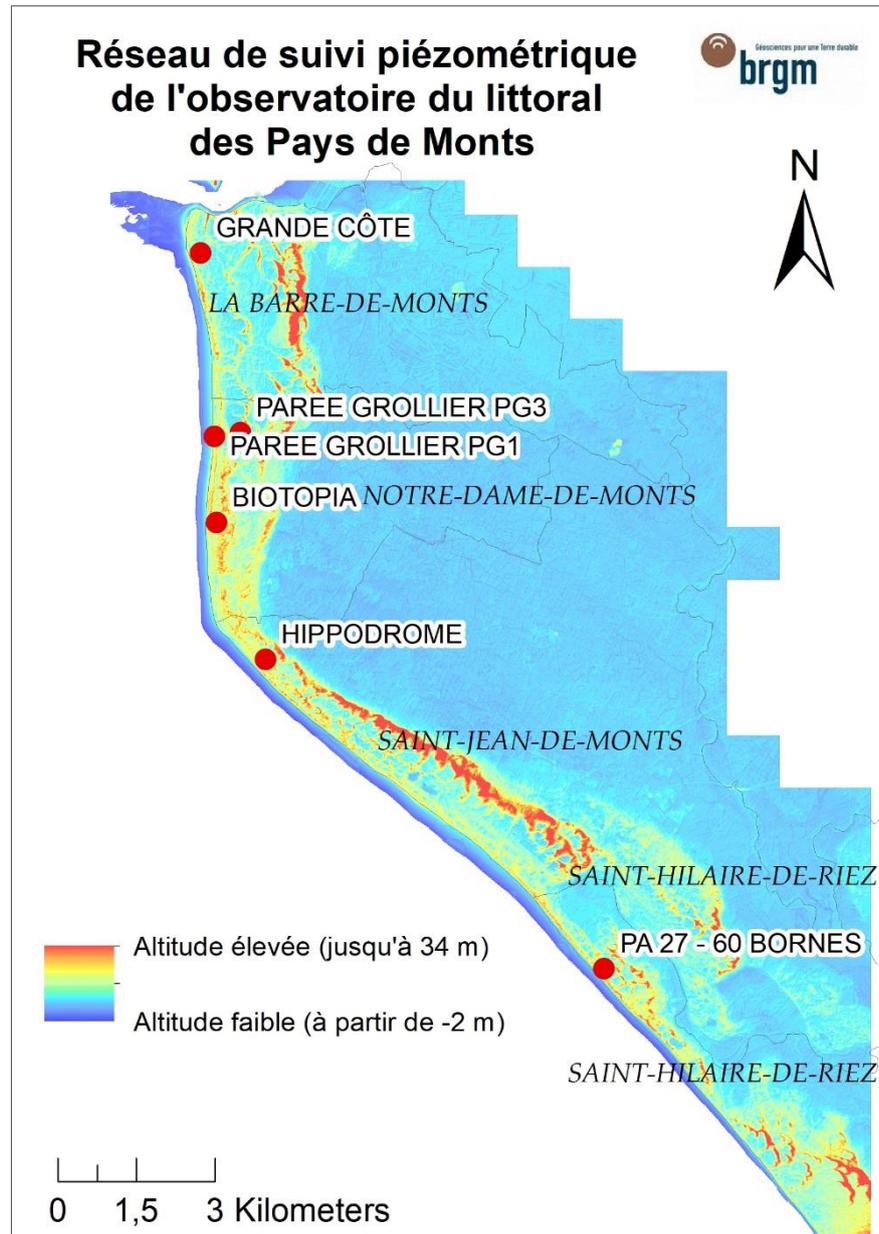


Illustration 6 : Présentation cartographique du réseau de suivi piézométrique final de l'OLPM

Le choix des ouvrages et sites, ainsi que l'historique de leur équipement sont détaillés dans les parties 2.4 et 2.5.

2.4. EQUIPEMENT DES PIEZOMETRES

L'étude de l'eau continentale au niveau de la bordure littorale des Pays de Monts correspond à la connaissance hydrodynamique de l'aquifère des Sables dunaires en Loire-Atlantique et Vendée (entité hydrogéologique 101AA01 de la BDLISA). Les ouvrages sélectionnés pour intégrer le réseau de suivi piézométrique de l'Observatoire du Littoral des Pays de Monts ont donc été choisis pour être représentatifs de cet aquifère.

Lors de précédentes phases de l'observatoire, des équipements de mesure de niveau d'eau avaient été installés dans des piézomètres situés sur la zone d'étude. Au total, 3 ouvrages (Puits de la Buzelière, PA27 et PA28) dans le cadre de l'OLPM et 2 ouvrages (PG1 et PG3) dans le cadre du projet de recherche SIBLES (Baudouin, 2018) ont ainsi été équipés entre 2012 et 2018. L'illustration 7 présente la répartition de ces sites sur l'emprise administrative de la Communauté de Communes.

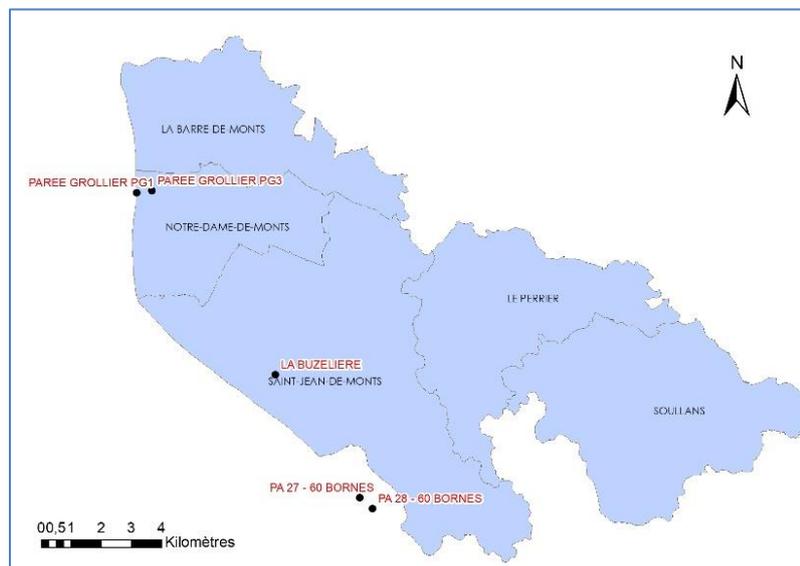


Illustration 7 : Piézomètres équipés avant le 1er Janvier 2019

Le suivi piézométrique est assuré par l'installation d'une sonde enregistreuse munie d'un capteur de pression dans chaque site. Certains ouvrages sont équipés d'un système de télétransmission permettant l'envoi des données par GSM (modem) ou GPRS (site FTP) sur un serveur BRGM. L'illustration 8 présente un équipement complet avant son installation dans un piézomètre.

Bilan des actions 2018-2021 conduites pour l'Observatoire du Littoral des Pays de Monts (OLPM) : l'eau continentale et son rôle dans la bordure littorale.

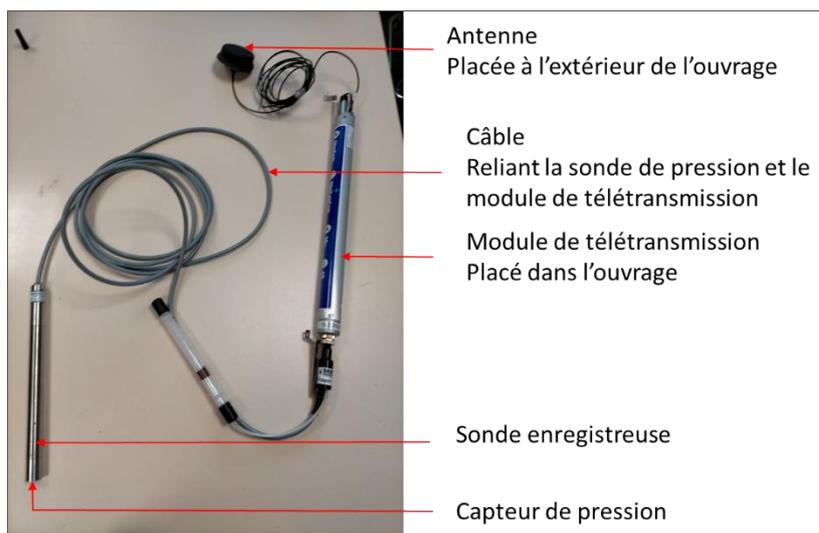


Illustration 8 : Equipement pour suivi piézométrique

Piézomètre de la Buzelière (abandonné)

Le puits de la maison forestière de la Buzelière (05601X0013) à Saint-Jean-de-Monts se situe en arrière dune. Il a été équipé le 7 octobre 2012 d'un système de mesure de niveau d'eau mécanique, un limnigraphe à flotteur (Thalimède OTT) et d'une centrale d'acquisition de données programmée (Illustration 9) pour retenir une valeur de niveau toutes les 15 min.



Illustration 9 : Puits de la Buzelière – 05601X0013

La période d'acquisition effective de cet appareil s'étend d'octobre 2012 à décembre 2017. A partir de cette date, l'appareil de mesure a montré des défaillances comme le montre la chronique ci-après (Illustration 10 - cette chronique présente les valeurs maximales journalières sur la période d'acquisition).

Bilan des actions 2018-2021 conduites pour l'Observatoire du Littoral des Pays de Monts (OLPM) : l'eau continentale et son rôle dans la bordure littorale.

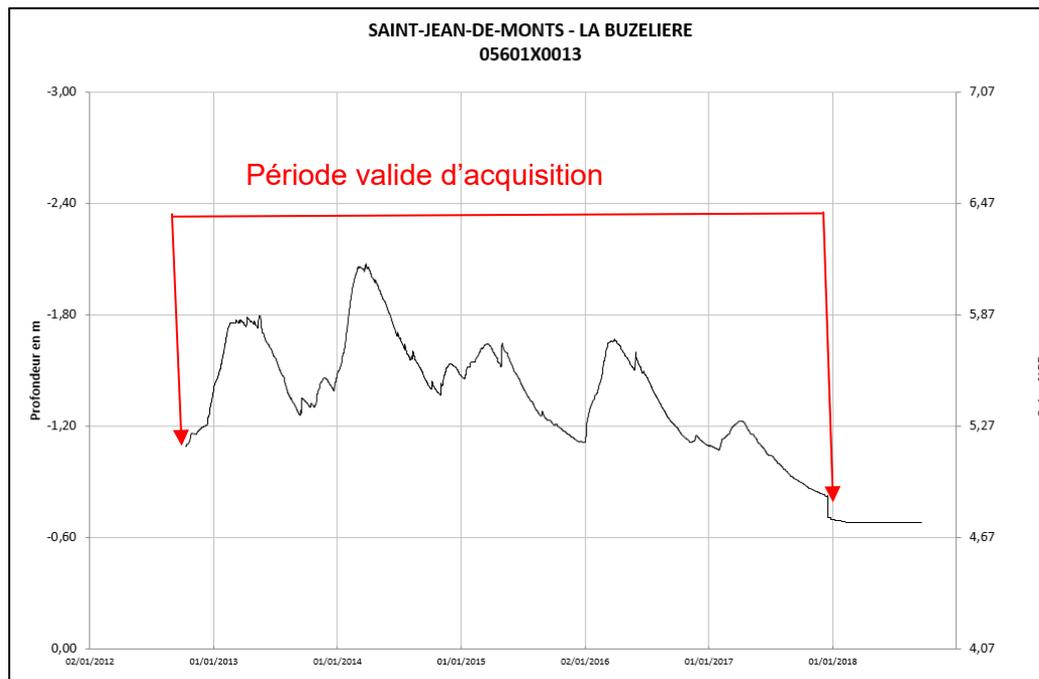


Illustration 10 : Evolution du niveau d'eau dans le puits de la Buzelière (05601X0013)

Afin d'optimiser la base de données piézométriques dédiée à l'observatoire du littoral des Pays de Monts, ces données historiques seront intégrées.

Cependant, le piézomètre n'a pas été équipé d'un nouvel appareil de mesure car son éloignement par rapport à la mer ne le rend pas prioritaire.

Piézomètre des 60 Bornes PA28 (abandonné)

Le piézomètre PA28 des 60 Bornes (05602X0071) est un piézomètre de suivi appartenant au SIVOS des 60 Bornes (Station d'épuration du site des 60 Bornes).

L'ouvrage est en très mauvais état, le capot de protection est rongé par la rouille. Cependant, le 26 mai 2016, un capteur de pression avait été installé à l'intérieur pour mesurer le niveau d'eau (Illustration 11). Les données ont pu être enregistrées jusqu'en juin 2019, date de retrait du matériel en place (Illustration 13).

La corrosion de la tête d'ouvrage étant trop importante, le site ne sera pas rééquipé d'instruments de mesure.



Illustration 11 : Piézomètre PA28, le 26/05/2016



Illustration 12 : Piézomètre PA28, le 21/06/2019

Piézomètre des 60 Bornes PA27 (actif)

Le piézomètre PA27 des 60 Bornes (05602X0066) est un autre piézomètre de suivi appartenant au SIVOS des 60 Bornes. L'ouvrage est équipé d'une crépine de 2 à 11 m comme en atteste la coupe technique (Illustration 13).

L'ouvrage a été équipé par nos soins une première fois le 26 mai 2016 (Illustration 14), les données de niveau d'eau ont été enregistrées et stockées jusqu'en mai 2018. Après un retrait du matériel en mai 2019, sans récupération suite à un dysfonctionnement de l'appareil de mesure, il a été rééquipé d'un capteur de pression et d'un système de télétransmission le 26 novembre 2019 (Illustration 15). Afin d'éviter les risques de vandalisme, tout le matériel est placé à l'intérieur du piézomètre, seule l'antenne fouet GSM sort de l'ouvrage. Elle est entièrement recouverte d'adhésif « Grey-tape » pour éviter d'attirer les curieux.

0560/2/0066--

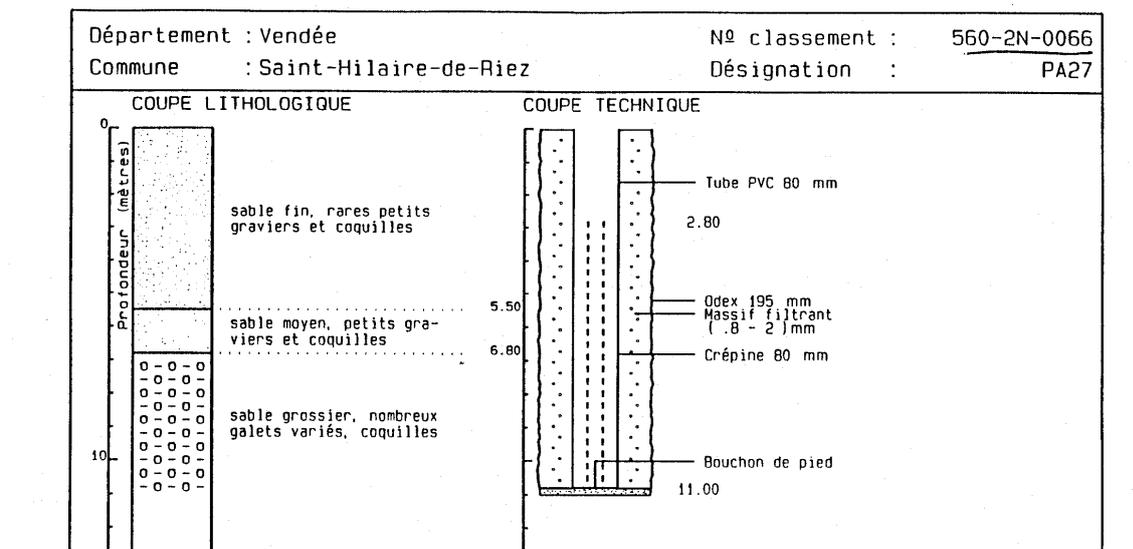


Illustration 13 : Coupes lithologique et technique de PA27 – 05602X0066



Illustration 14 : Piézomètre PA27, le 26/05/2016



Illustration 15 : Piézomètre PA27, le 26/11/2019

Ce piézomètre a été retenu pour intégrer le réseau de suivi piézométrique de l'observatoire du littoral des Pays de Monts.

Piézomètre de La Parée Grollier PG1 (actif)

Dans le cadre d'un projet exploratoire pluridisciplinaire de caractérisation physique des systèmes dunaires côtiers, (projet interne sur les fonds propres du BRGM, SIBLES 2016-2018 (Baudouin et al, 2018), deux sondages carottés ont été aménagés en piézomètres. La coupe technique

figure en Annexe 1. Le piézomètre nommé PG1 (BSS002PWCA), dans cette étude, se situe en haut de dune sur l'accès à la plage de la Parée Grollier au niveau du parking à vélo (Illustration 16). C'est un lieu très passant, et le piézomètre a été forcé lors des étés 2017 et 2018 entraînant la disparition et le dysfonctionnement du matériel en place (Illustration 17).



Illustration 16 : Piézomètre PG1 lors de sa 1ère installation en janvier 2017.



Illustration 17 : Piézomètre PG1 suite au vol de 2018

Ce site étant stratégique pour le réseau de suivi piézométrique de l'OLPM, il a été décidé de renforcer la tête d'ouvrage afin d'éviter tout vandalisme.

Les travaux de réhabilitation de la tête d'ouvrage ont eu lieu le 21 juin 2019. Un nouveau tubage en acier renforcé, fermé par un capot de protection « inviolable », a été fixé sur la margelle (Illustration 18).



Illustration 18 : Nouveau tubage et capot de protection de PG1

Afin d'assurer la télétransmission, une antenne a été fixée sur le capot de protection. Cependant, elle a été arrachée en juin 2020, rien de plus n'a été installé sur ce site pour éviter tout autre vandalisme.

La station est intégrée au réseau de suivi piézométrique de l'OLPM, mais les données ne sont pas télétransmises.

Piézomètre de La Parée Grollier PG3 (actif)

Le piézomètre PG3 (BSS002PWCB) est le second sondage carotté du projet SIBLES transformé en piézomètre (Illustration 19). La coupe technique figure en Annexe 1. Il se situe dans la lette en bordure de chemin.



Illustration 19 : PG3 en 2017 avant dégradation



Illustration 20 : PG3 en novembre 2019 après réhabilitation

Bien qu'en retrait de la plage, il a, lui aussi, subi quelques dégradations volontaires en 2017 et 2019 qui ont entraîné la perte des équipements en place. Comme pour PG1, la tête d'ouvrage a été renforcée (Illustration 20).

L'antenne de télétransmission a été fixée au niveau du capot d'ouverture, visible sur l'illustration 20. Les mesures de niveau d'eau enregistrées par la sonde sont télétransmises quotidiennement sur un serveur FTP du BRGM. Les données sont intégrées mensuellement à la base de données.

Piézomètre de l'hippodrome (actif)

Il s'agit d'un forage de reconnaissance réalisé par le bureau d'études GEOTEC pour le compte de RTE (Réseau de transport d'électricité) situé sur l'hippodrome de l'Atlantique à Saint-Jean-de-Monts. La coupe technique figure en Annexe 1. Cet ouvrage (05345X0164) semblait régulièrement percuté par l'engin d'entretien des espaces verts. La margelle béton avait été totalement détruite et la tête d'ouvrage n'était plus maintenue (Illustration 21). La pérennité du piézomètre n'était pas assurée. Après une consolidation sommaire, le piézomètre a tout de même été équipé d'un capteur de pression. Il était toutefois trop risqué de fixer le système de télétransmission plus lourd et encombrant, compte tenu de l'état de l'ouvrage.

Bilan des actions 2018-2021 conduites pour l'Observatoire du Littoral des Pays de Monts (OLPM) : l'eau continentale et son rôle dans la bordure littorale.



Illustration 21 : Piézomètre de l'hippodrome avant réhabilitation (05345X0164)

Le piézomètre de l'Hippodrome a été intégré au réseau de suivi piézométrique de l'OLPM. Les données ne sont pas télétransmises.

Des travaux ont été réalisés en mars 2021 dans le but de pérenniser l'ouvrage. La dalle béton a été refaite. L'ouvrage se situant sur un parking à forte affluence en été, une signalétique a été mise en place (Illustration 22).



Illustration 22 : Piézomètre de l'hippodrome après travaux, mars 2021

Synthèse des piézomètres

Au total, les données de niveau de 6 piézomètres sont ou ont été récoltées sur le territoire de l'OLPM. A la date de rédaction du rapport, 4 piézomètres ont intégré le réseau de suivi de niveau de l'aquifère des sables dunaires de l'OLPM (Tableau 1)

DONNEES	SITE	RECUPERATION DES DONNEES	DEBUT ACQUISITION	FIN ACQUISITION	ENREGISTREMENT	RESEAU OLPM
PIEZOMETRIE	PIEZOMETRE PAREE GROLLIER 1 (BSS002PWCA)	Collecte des données sur place	20/01/2017		15 min	OUI
PIEZOMETRIE	PIEZOMETRE PAREE GROLLIER 3 (BSS002PWCB)	télétransmission	26/11/2019		15 min	OUI
PIEZOMETRIE	PIEZOMETRE 60 BORNES PA27 (05602X0066)	télétransmission	26/05/2016		15 min	OUI
PIEZOMETRIE	PIEZOMETRE 60 BORNES PA28 (05602X0071)	Collecte des données sur place	26/05/2016	21/06/2019	15 min	NON
PIEZOMETRIE	PIEZOMETRE DE L'HIPPODROME (05602X0071)	Collecte des données sur place	16/06/2020		15 min	OUI
PIEZOMETRIE	PUITS DE LA BUZELIERE	Collecte des données sur place	07/10/2012	21/09/2018	15 min	NON

Tableau 1 : Piézomètres suivis dans le cadre de l'OLPM (actuels et historiques)

Les fiches de synthèses sont présentées en Annexe 2.

2.5. EQUIPEMENT DES MARES

L'installation d'instruments de mesure de niveau d'eau dans les mares sont soumises à plusieurs contraintes :

- Discrétion : il n'a pas été prévu de protéger le matériel par des structures métalliques ; il est donc nécessaire que l'installation n'attire pas l'œil afin d'éviter les actes de malveillance ;
- Pérennité : pour donner des valeurs cohérentes, la sonde de pression doit rester en place, il faut donc éviter tout risque de déplacement au cours de la période d'acquisition ;
- Protection de la biodiversité : la mise en place de l'installation ne doit absolument pas affecter l'écosystème des mares.

Afin d'assurer ce dernier point, un agent de l'ONF a accompagné cette phase d'équipement des deux mares sélectionnées.

Mare de la Grande Côte

La mare de Grande Côte est le point de mesure à l'extrémité Nord de la zone d'étude. A l'origine, la mare sélectionnée se situait sous le pont de Noirmoutier. Cependant, l'installation a été annulée car, la végétation étant trop dense (Illustration 23), la fixation du matériel et la qualité de la donnée n'étaient pas garanties. Une seconde mare, située 600m au sud (Illustration 24) et possédant les mêmes caractéristiques de distance à la côte et d'altitude, a été sélectionnée.



Illustration 23 : Mare au nord de la zone Grande Côte abandonnée



Illustration 24 : Localisation de la mare au sud de la zone « Grande Côte »

Un tubage crépiné en PVC a été enfoncé à la masse dans le fond de la mare sur une trentaine de centimètres. Le capteur de mesure a été fixé à l'intérieur du tube, le câble de connexion ensouillé du pied du tube jusqu'au bord de la mare (Illustration 25). La connectique permettant la récupération de données, située à l'extrémité de la sonde, a été fixée discrètement à un arbuste (Illustration 26).

Bilan des actions 2018-2021 conduites pour l'Observatoire du Littoral des Pays de Monts (OLPM) : l'eau continentale et son rôle dans la bordure littorale.



Illustration 25 : Installation de l'équipement sur la mare sud de la Grande Côte

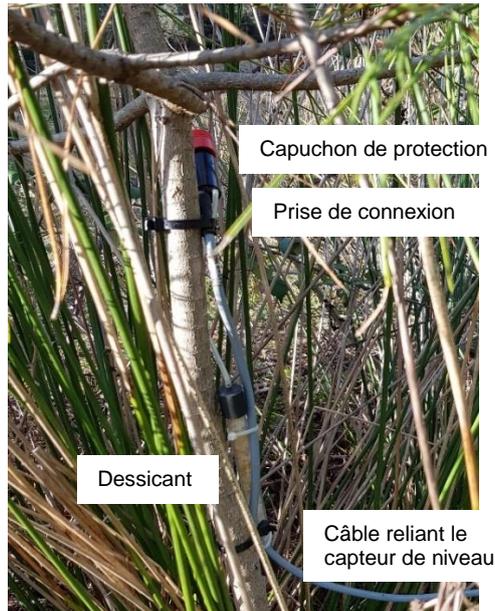


Illustration 26 : Détail de l'installation à la mare sud de la Grande Côte

Ce site a été intégré au réseau de suivi piézométrique de l'OLMP. Les données ne sont pas télétransmises.

Mare à proximité de Biotopia

La mare située à proximité de Biotopia est équipée d'une sonde piézométrique selon la même technique que précédemment. Le schéma (Illustration 27) présente l'installation :

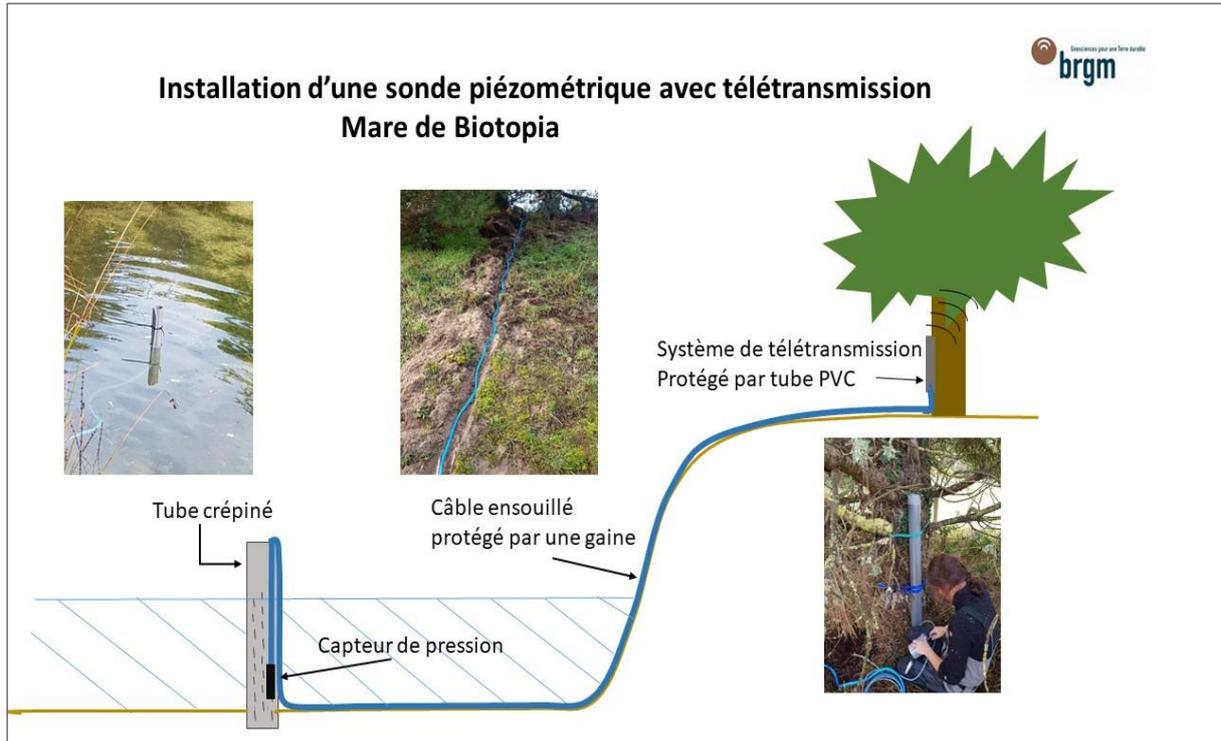


Illustration 27 : Installation d'un système de mesure de niveau d'eau avec télétransmission (cas de la mare de Biotopia)

La mare de Biotopia est intégrée au réseau de suivi piézométrique. Les données sont télétransmises.

Synthèse des Mares

Ces 2 mares complètent le réseau de suivi piézométrique de l'OLPM.

DONNEES	SITE	RECUPERATION DES DONNEES	DEBUT ACQUISITION	FIN ACQUISITION	ENREGISTREMENT	RESEAU OLPM
PIEZOMETRIE	PIEZOMETRE PAREE GROLLIER 1 (BSS002PWCA)	Collecte des données sur place	20/01/2017		15 min	OUI
PIEZOMETRIE	PIEZOMETRE PAREE GROLLIER 3 (BSS002PWCB)	télétransmission	26/11/2019		15 min	OUI
PIEZOMETRIE	PIEZOMETRE 60 BORNES PA27 (05602X0066)	télétransmission	26/05/2016		15 min	OUI
PIEZOMETRIE	PIEZOMETRE 60 BORNES PA28 (05602X0071)	Collecte des données sur place	26/05/2016	21/06/2019	15 min	NON
PIEZOMETRIE	PIEZOMETRE DE L'HIPPODROME (05602X0071)	Collecte des données sur place	16/06/2020		15 min	OUI
PIEZOMETRIE	PUITS DE LA BUZELIERE	Collecte des données sur place	07/10/2012	21/09/2018	15 min	NON
PIEZOMETRIE	PIEZOMETRE MARE DE GRANDE COTE	Collecte des données sur place	29/01/2020		15 min	OUI
PIEZOMETRIE	PIEZOMETRE MARE BIOTOPIA	télétransmission	29/01/2020		15 min	OUI

Tableau 2 : Ouvrages suivis dans le cadre de l'OLPM (actuels et historiques)

Les fiches de synthèses sont présentées en Annexe 2.

2.6. NIVELLEMENT DU RESEAU DE SUIVI

Pour une bonne interprétation des niveaux d'eau enregistrés, il est essentiel de connaître l'altitude exacte d'un point de référence sur chaque site. La campagne de nivellement s'est déroulée en juin 2020. L'altitude et les coordonnées géographiques de chaque sommet de tubage PVC ou métallique ont été mesurées à l'aide d'un GPS de précision centimétrique. Les résultats de ces nivellements sont présentés dans le tableau suivant (Tableau 3).

Site	Nom	IDENTIFIANT	Commune	type	X en m	Y en m	Zref en m	profondeur ouvrage
Parée Grollier - dune	PG1	BSS002PUHQ	Notre Dame de monts	Piézomètre	308229,53	6651745,77	6,79	14,00
Parée Grollier - lette	PG3	BSS002PUHV	Notre Dame de monts	Piézomètre	308727,80	6651814,11	2,05	10,50
Hippodrome	HIPPO	05345X0164	Saint Jean de Monts	Piézomètre	309205,00	6647463,00	7,17	10,30
60 Bornes PA27 - les petits Becs	PA27	05602X0066	Saint Hilaire de Rietz	Piézomètre	315653,91	6641519,20	4,92	11,60
Mare Biotopia	BIOTO	HYD_00261	Saint Jean de Monts	Mare	308271,49	6650090,40	0,76	0,000
Mare Grande Cote	GC	HYD_00242	La Barre de Monts	Mare	307966,81	6655273,31	1,23	0,000

Tableau 3 : Coordonnées en Lambert 93 et nivellement des sites du réseau de suivi piézométrique

2.7. DONNEES

Paramétrage et télétransmission

Chaque sonde installée mesure le niveau d'eau et l'enregistre au pas de temps de 15min. Une mesure de température est aussi enregistrée toutes les heures.

Sur les 3 sites équipés de module de télétransmission, un envoi quotidien des mesures de niveaux et température est effectué sur un site ftp hébergé par le BRGM. Les données récoltées sont ensuite transférées et stockées en base de données (Illustration 28).

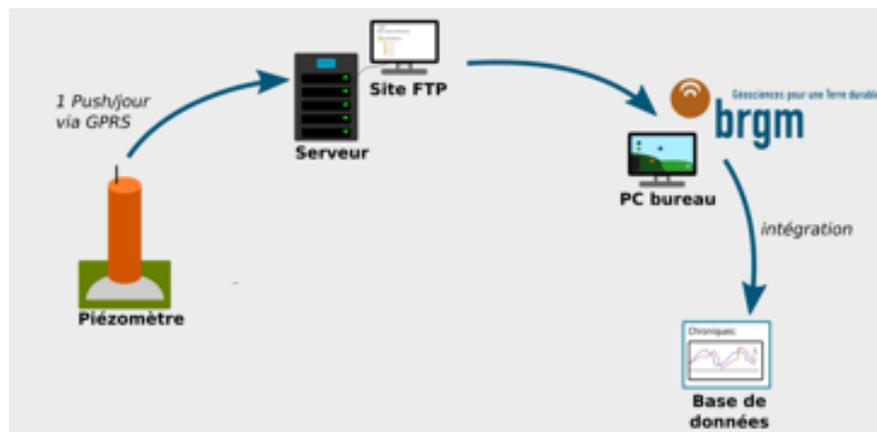


Illustration 28 : Parcours des données télétransmises

Pour les sites non télétransmis, des visites de terrain sont nécessaires pour récupérer les données stockées sur l'appareil.

Base de données

On accède à la base de données par l'intermédiaire du logiciel SIEAU qui permet :

- D'intégrer toutes les données récoltées,
- De recenser toutes les informations connues de l'ouvrage,
- D'exploiter les mesures de niveau d'eau,
- De les visualiser sous forme de graphique.

Les données de niveau d'eau sont stockées sous la forme de données brutes (1 données toutes les 15 min), données minimales journalières (la donnée la plus basse sur une journée) et maximale journalière (la donnée la plus élevée sur une journée).

Chaque passage sur site et les interventions réalisées sont notés dans un journal. L'historique du site est ainsi sauvegardé (Illustration 29).

Bilan des actions 2018-2021 conduites pour l'Observatoire du Littoral des Pays de Monts (OLPM) : l'eau continentale et son rôle dans la bordure littorale.

Date	Heure	Tournée	Problème	Solution	NS	NC	Calage	Piles	Volt	RAZ	Commentaires	Graphique	Export Banque	Temp centrale	Temp sondes
30/01/2020		Préventive [G]			1,660	1,660			5,80		Récupération des données du 1/11/19 au 30/1/20. N°Siscom=SLD00290. N°Dipper=D4L15725	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
26/11/2019		Curative [M]		RE-INSTALLATION							Mise en sécurité du site. Nouvelle tête d'ouvrage (Réhausse)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
21/06/2019		Préventive [G]									récupération des données - Tête d'ouvrage vandalisée - retrait du DIPPER	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
24/04/2019		Préventive [G]									récupération des données	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
23/05/2018		Curative [M]		RE-INSTALLATION	1,360						installation Dipper D4L13232 (pas d'enregistrement=15min)	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
07/12/2017		Préventive [G]									Récupération des données. Retrait du Dipper - Vandalisme sur la tête d'ouvrage, cadenas fracturé	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		
10/04/2017		Préventive [G]			2,110	2,150	-0,040				Récupération des données, recalage	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	13,500	
26/01/2017				INSTALLATION	1,880						repère+HTG (distance HTG/sol=0.44m) sans d'enregistrement=15min	<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>		

Illustration 29 : Extrait du journal de suivi du site de la Parée Grollier PG3

La base de données du réseau de suivi piézométrique de l'OLPM contient les 6 sites sélectionnés pour le suivi, soit PG1, PG3, PA27, Hippodrome, Grande Cote et Biotopia (Illustration 30).

A noter qu'à ces 6 sites sont ajoutés à la base :

- L'historique du puits de la Buzelière
- L'historique du forage PA28 de la Parée Grollier.
- Les données du houlographe de l'île d'Yeu Nord
- Les données du marégraphe des Sables d'Olonne.

Num	Identifiant	Dépt	Commune	Nom de station	A	Repère	Gesti	Agen	D	C	Masse	Création	Fermeture	Réseau
95	OLPMXGCI	85	LA BARRE DE MONTS	GRANDE CÔTE		2,850						29/01/2020		Reseau de suivi des eaux souterraines du cordon dunaire Océan Pays de Monts (cadre
97	BSS000HOUL	85	LA BARRE DE MONTS	HOULOGRAPHE		0,000								Reseau de suivi des eaux souterraines du cordon dunaire Océan Pays de Monts (cadre
98	BSS000MARE	85	LES SABLES D'OLONNES	Marégraphe des Sables d'Olonne		-2,830								Reseau de suivi des eaux souterraines du cordon dunaire Océan Pays de Monts (cadre
89	BSS002FWCA	85	NOTRE-DAME-DE-MONTS	PARÉE GROLLIER PG1		7,430						20/01/2017		Reseau de suivi des eaux souterraines du cordon dunaire Océan Pays de Monts (cadre
90	BSS002FWCB	85	NOTRE-DAME-DE-MONTS	PARÉE GROLLIER PG3		2,950						20/01/2017		Reseau de suivi des eaux souterraines du cordon dunaire Océan Pays de Monts (cadre
94	BSS00BIOT	85	NOTRE-DAME-DE-MONTS	BIOTOPIA		1,150						29/01/2020		Reseau de suivi des eaux souterraines du cordon dunaire Océan Pays de Monts (cadre
92	05602-0066	85	SAINT-HILAIRE-DE-RIETZ	PA 27 - 60 BORNES		4,960						26/05/2016		Reseau de suivi des eaux souterraines du cordon dunaire Océan Pays de Monts (cadre
93	05602-0071	85	SAINT-HILAIRE-DE-RIETZ	PA 28 - 60 BORNES		4,130						26/05/2016		Reseau de suivi des eaux souterraines du cordon dunaire Océan Pays de Monts (cadre
91	05345-0164	85	SAINT-JEAN-DE-MONTS	HIPPODROME		7,580						01/01/1900		Reseau de suivi des eaux souterraines du cordon dunaire Océan Pays de Monts (cadre
96	05601-0013/P	85	SAINT-JEAN-DE-MONTS	LA BUZELIERE		4,070						07/10/2012		Reseau de suivi des eaux souterraines du cordon dunaire Océan Pays de Monts (cadre

Illustration 30 : Stations intégrées et suivies via le logiciel SIEAU dans le cadre de l'OLPM

Visualisation des enregistrements

L'illustration 31 présente la superposition des chroniques enregistrées sur la période estivale. Ce graphique met en évidence la similitude des variations des niveaux de la nappe pour les deux sites de la Parée Grollier (PG1 et 3) et des 60 bornes (PA27) et ceux de la mare de Biotopia en

Bilan des actions 2018-2021 conduites pour l'Observatoire du Littoral des Pays de Monts (OLPM) : l'eau continentale et son rôle dans la bordure littorale.

liaison avec les variations de niveaux de mer. Au contraire, le site de la mare de Grande Côte (courbe verte) semble totalement indépendant de la marée (courbe bleue).

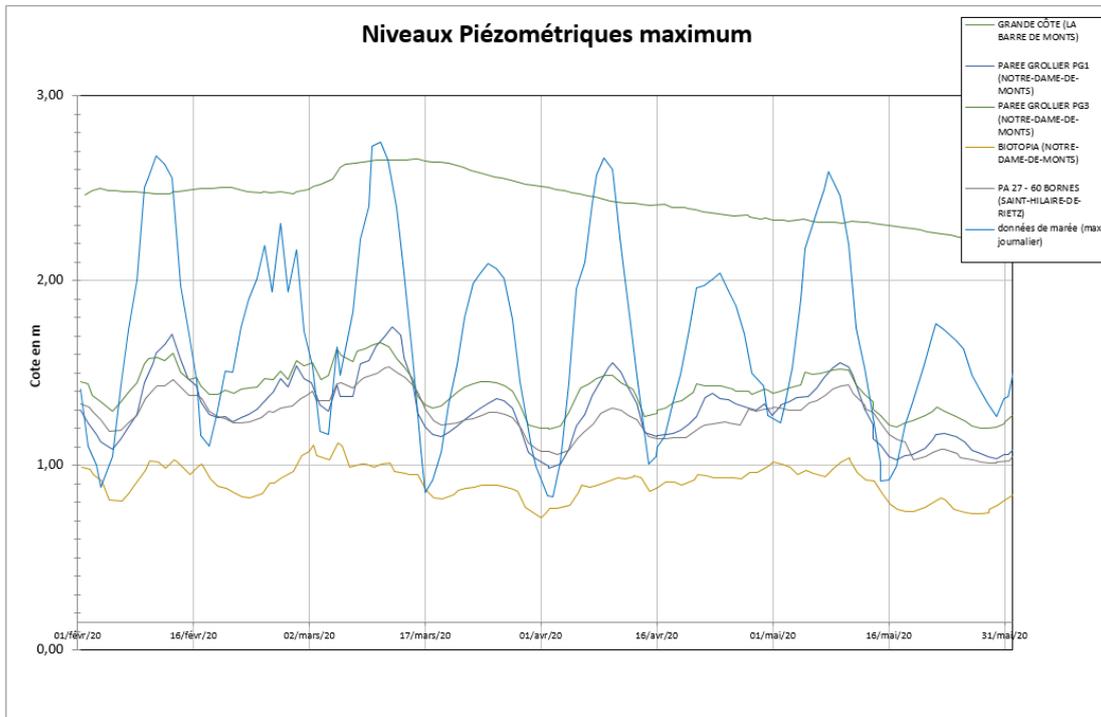


Illustration 31 : Superposition des niveaux maximum enregistrés du 01/02/2020 au 15/06/2020

L'illustration 32 montre que les données brutes enregistrée sur PG3 suivent les cycles de marées.

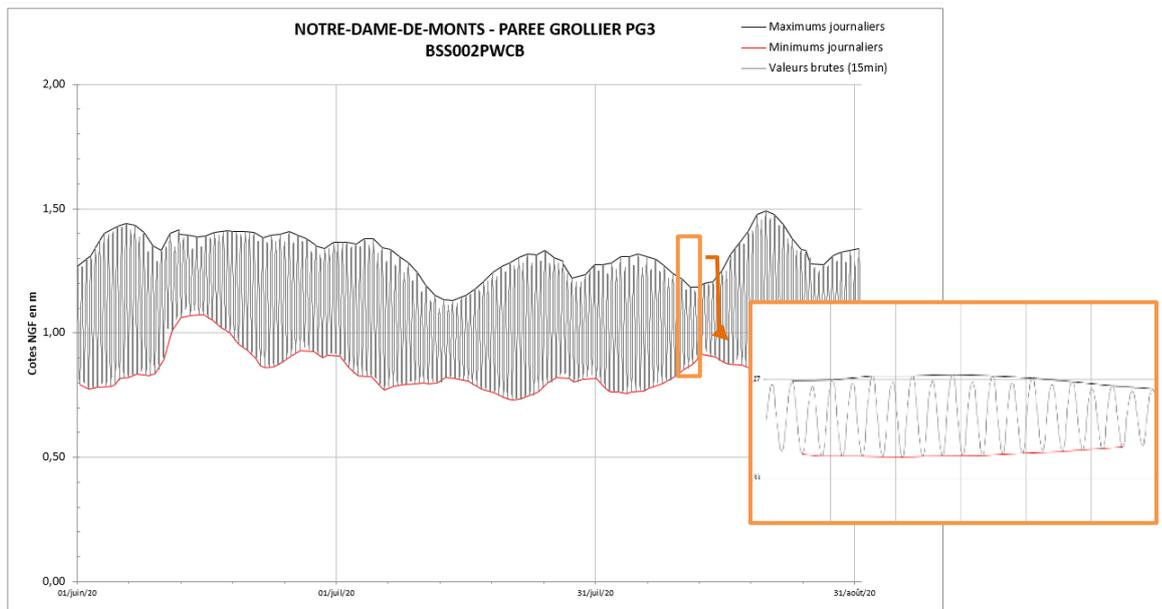


Illustration 32 : Chroniques (valeurs min,max et brutes) de PG3 du 01/06/2020 au 31/08/2020

3. Cartographie de la piézométrie

3.1. CAMPAGNE DE MESURES DE BASSES EAUX

Pour mémoire, la principale campagne d'observation et de mesure de niveaux d'eau en période de basses eaux a été menée du 23 au 30 octobre 2014. A cette période, 63 mares forestières ont été investiguées et complétées par des points de mesure sur le haut de plage (trous réalisés au moyen d'une pelle maraîchine sur la phase de basse mer) pour contraindre la modélisation de la surface piézométrique sur la bordure littorale. Cette campagne complète les précédentes acquisitions en période de basses eaux de 2010 et 2012 principalement réalisée sur des puits domestiques et des mares qui ont pu être nivelés au DGPS. Des comparaisons d'états de basses eaux ont été effectuées à partir (1) de points de mesures communs aux trois campagnes et (2) d'un relevé piézométrique sur un puits de particulier (Illustration 33), pour définir l'enveloppe interannuelle des niveaux de basses eaux (de l'ordre de 30 cm) et valider également les périodes d'acquisition des niveaux de basses eaux.

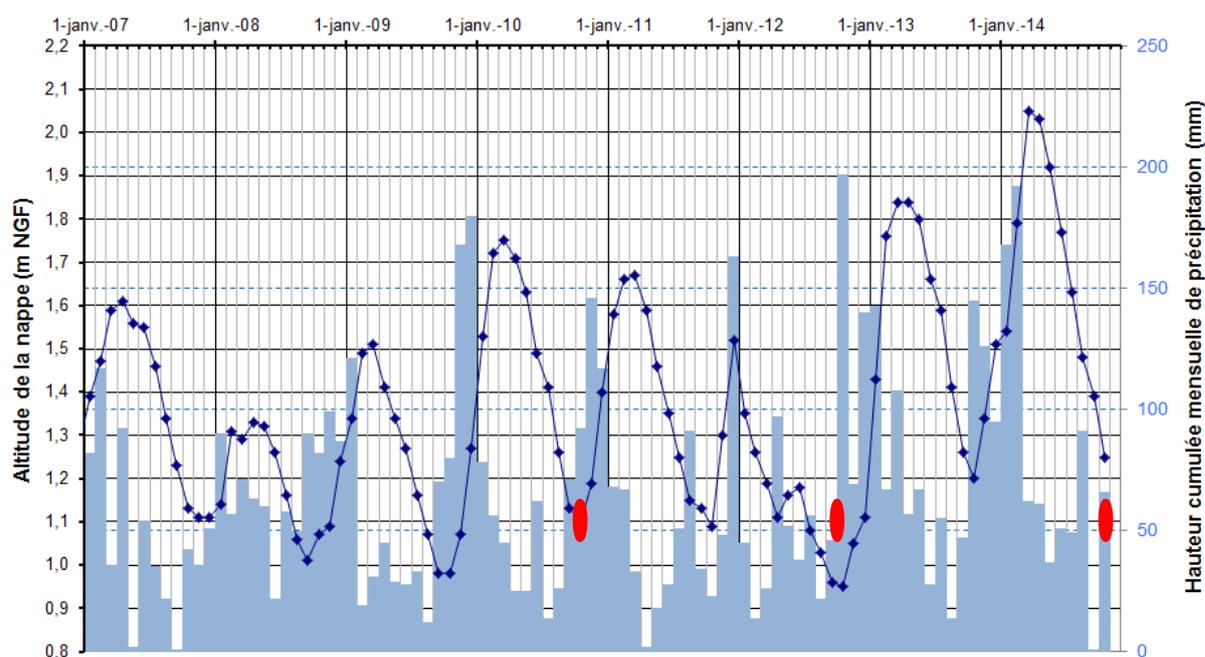


Illustration 33 : Périodes d'investigations de terrain (figurés rouges) sur les eaux souterraines en période de basses eaux comparées à l'évolution saisonnière des niveaux des eaux souterraines au niveau d'un puits dans la dune situé à la Parée Grollier.

Au total, 191 points de mesures ont été retenues pour l'élaboration de la carte des isopièzes en période de basses eaux.

3.2. CAMPAGNE DE MESURES DE HAUTES EAUX

Cette campagne de mesures piézométriques de hautes eaux avait été initialement prévue sur tout le territoire lors des hautes eaux 2020. Elle a dû être reportée au printemps 2021 en raison du confinement imposé lors de cette période.

Bilan des actions 2018-2021 conduites pour l'Observatoire du Littoral des Pays de Monts (OLPM) : l'eau continentale et son rôle dans la bordure littorale.

Lors de cette campagne, les agents de l'ONF s'ont accompagné les opérateurs sur certaines mares difficiles d'accès.

A l'issue des quatre jours de campagne, 121 points (puits, mares, piézomètres, estran) ont été investigués (Illustration 35), avec pour chacun de ces points des mesures de la cote NGF de la nappe ou du niveau d'eau, nivelées au DGPS (Illustration 34).



Illustration 34 : Nivellement du niveau d'eau dans une mare forestière. Crédit photo Ouest-France.

Des mesures complémentaires de conductivité et température ont également été acquises au moyen d'un conductimètre portatif de marque WTW.

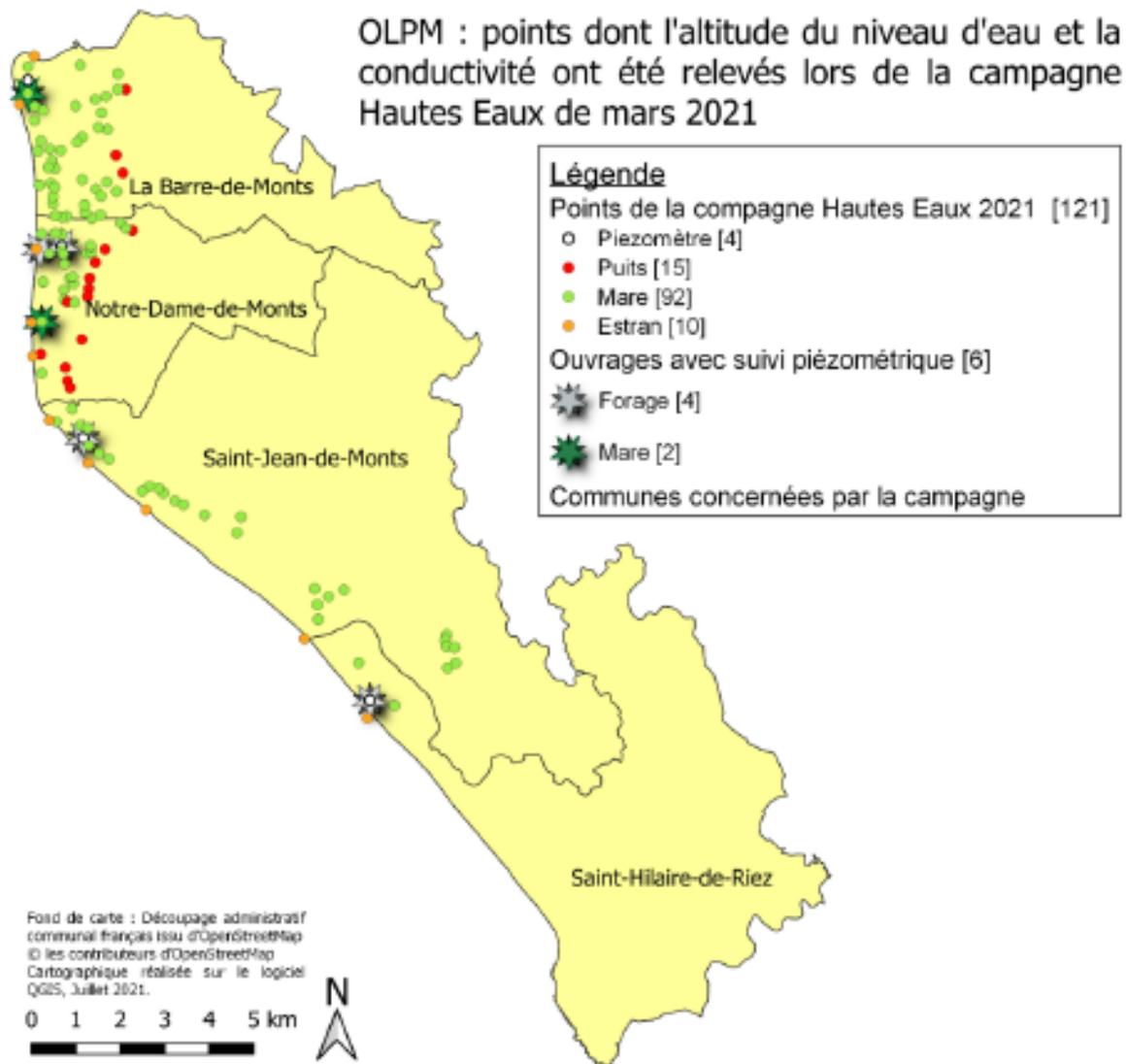


Illustration 35 : Répartition géographique et nature des points de mesure de la campagne de hautes eaux (mars 2021).

Le résultat de ces acquisitions a été transformé en jeu de données pour les besoins de la cartographie du toit de la nappe libre de hautes eaux des sables dunaires.

3.3. CARTOGRAPHIE PIEZOMETRIQUE

La carte piézométrique proposée ci-dessous est obtenue en interpolant les données piézométriques et les données d'altitude des mares. La surface des mares est donc considérée comme représentative du niveau piézométrique à leurs abords.

Deux produits sont associés à cette cartographie : tout d'abord, la couche raster du niveau de la nappe en m NGF au pas de 50 m, et dans un second temps la couche des isopièzes (lignes d'égales altitude du toit de la nappe) représentée ci-dessous au pas de 0,2 m (Illustration 36).

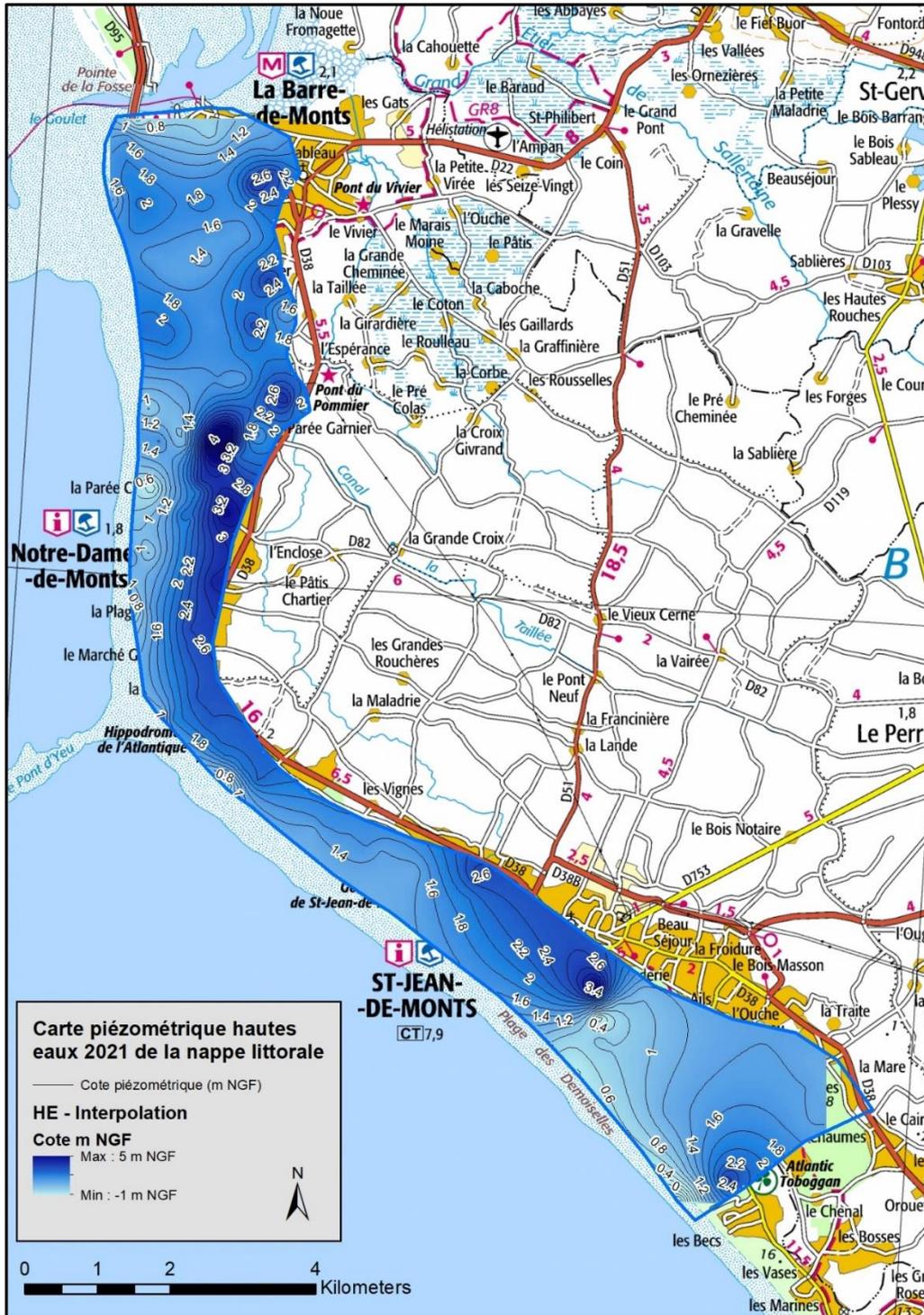


Illustration 36 : Carte piézométrique de hautes eaux (mars 2021) de la nappe libre du système dunaire des Pays de Monts (OMDM).

3.4. INTERPRETATION DES RESULTATS

Piézométrie de hautes eaux 2021

Comme c'était déjà le cas en période de basses eaux en 2014 (Illustration 37), les niveaux les plus hauts sont le plus souvent rencontrés à proximité des zones topographiques les plus élevées (dune).

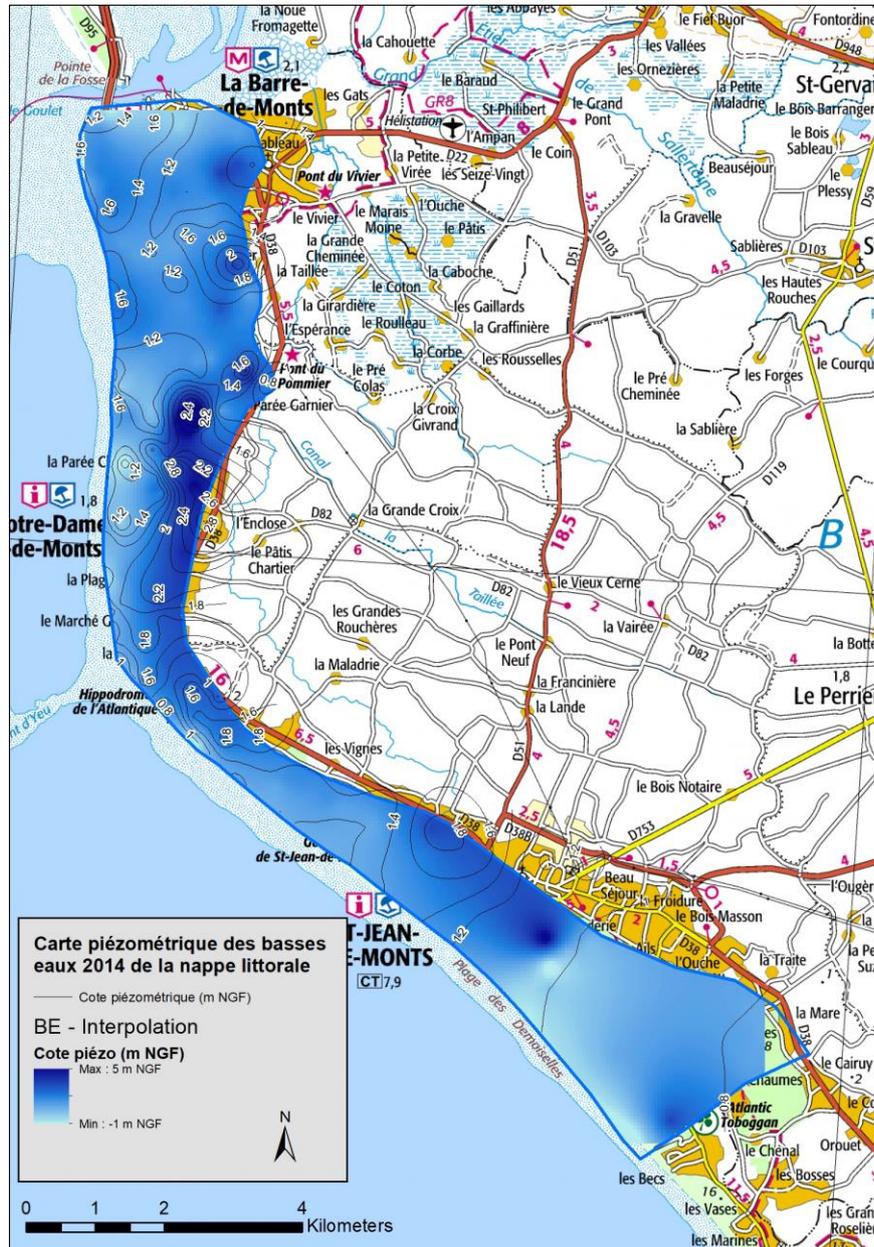


Illustration 37 : Carte piézométrique des basses eaux 2014

La dune agit comme un château d'eau : elle stocke l'eau de pluie, et celle-ci s'écoule par gravité latéralement vers les exutoires que constituent le marais à l'est, et la bordure littorale à l'ouest.

Il est intéressant de relever les singularités suivantes :

- Sur le site de la Parée Grollier est implantée une station d'épuration dont l'exhaure est évacuée par un pompage d'injection vers la nappe des calcaires lutétiens. C'est très vraisemblablement l'effet de cette injection que l'on observe sur la carte piézométrique, qui montre la présence au droit du site d'un dôme piézométrique marqué, associé à une épaisseur de zone non saturée faible (cf. Illustration 38).
- Au droit de Fromentine se développe un axe de drainage des eaux souterraines vers le nord (mais dans un secteur peu pourvu en mesures piézométriques, et donc avec une forte incertitude sur l'interpolation).
- La surface piézométrique au droit du golf de Saint-Jean-de-Monts est caractérisé par une vaste dépression. Dans ce secteur assez peu pourvu en mesures piézométriques, cela pourrait être la conséquence du rabattement de la nappe en lien avec l'exploitation du plan d'eau pour irriguer le golf (84 000 m³ prélevés en 2018 d'après les données de la BNPE). L'altitude moyenne du plan d'eau, d'après le MNT lidar au pas de 1m purgé des valeurs aberrantes (>1,2 m NGF), est de 1,02 m NGF

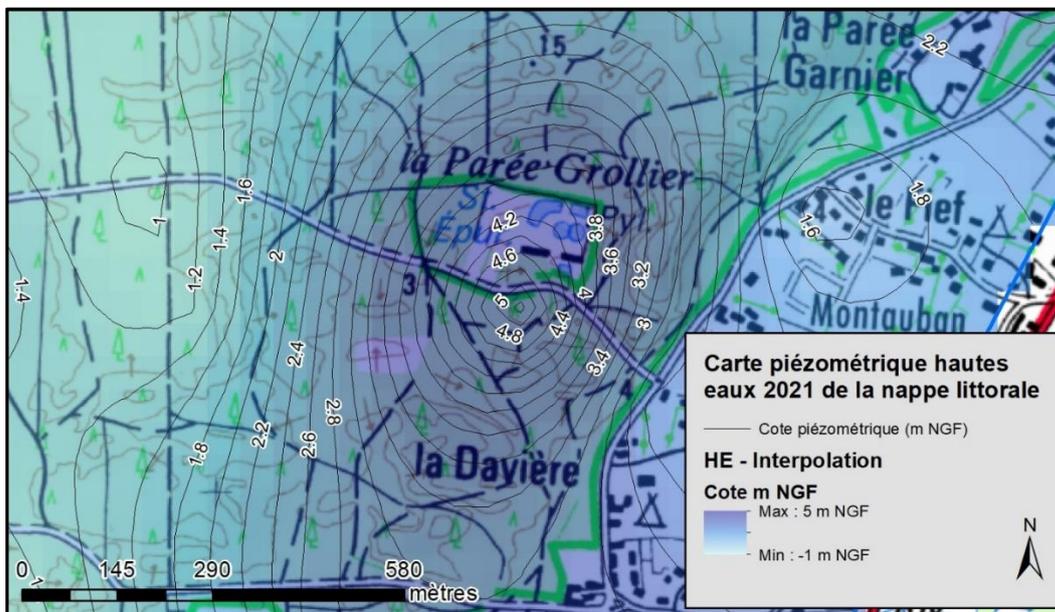


Illustration 38 : Détail de la piézométrie à proximité du site de la station d'épuration à la Parée Grollier (Notre-dame de Monts)

Zone non saturée (ZNS)

L'épaisseur de la ZNS est obtenue par soustraction du MNT au pas de 50 m et de la piézométrie interpolée (au pas de 50 m). L'interpolation de l'altitude de la nappe conduit parfois, dans les secteurs de faible altitude topographique peu pourvus en données piézométriques, à un niveau de nappe supérieur au niveau topographique. Cela se traduit par une valeur négative de ZNS. Elles correspondent aux secteurs où l'interpolation surestime les niveaux piézométriques en raison du manque de données (en rouge sur l'illustration 40)

Le résultat statistique du traitement (Illustration 39) donne une ZNS moyenne de l'ordre de 4,5 m avec des maximums de l'ordre de 20 à 25 m, correspondant aux zones de crêtes des massifs dunaires les plus élevés.

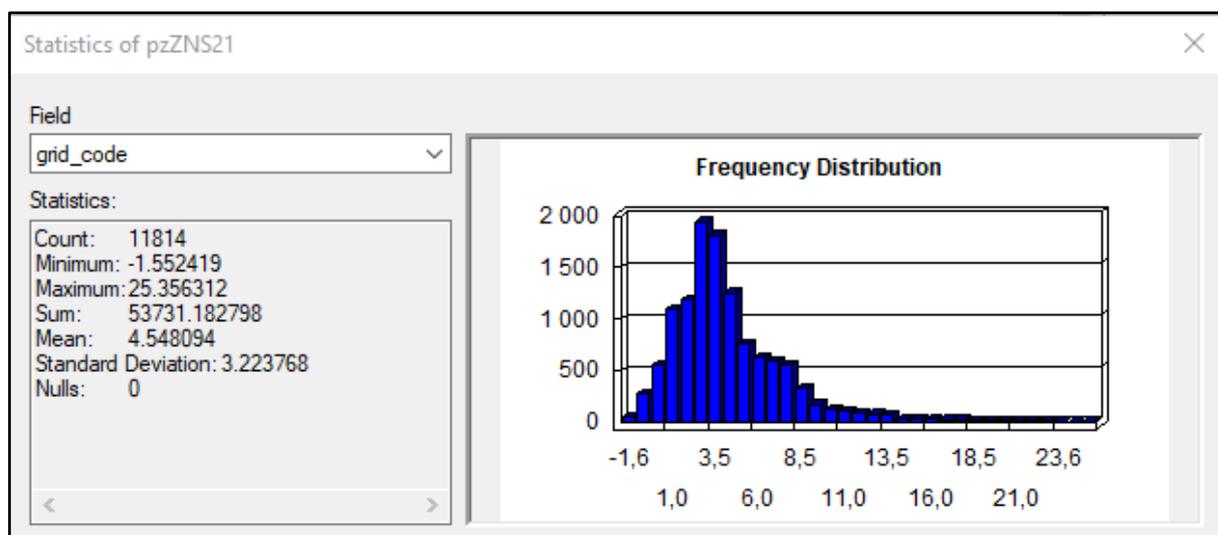


Illustration 39 : Statistiques sur l'épaisseur de la ZNS

Le résultat cartographique est présenté par l'illustration 40. Il traduit la profondeur à laquelle la nappe libre est atteinte. Les secteurs à ZNS faible (< 2 m) correspondent aux espaces interdunaires (lettés) dépourvus de massifs dunaires ou suffisamment espacés.

En zones urbanisées, ces secteurs peuvent ou pourraient être sujets à des phénomènes de remontée de nappes (à des niveaux de très proche surface ou voire même des inondations), pouvant localement entraîner des désordres (sous-sols inondés, remontées de cuves enterrées, piscines, sensibilité accrue aux pollutions, dommages sur les réseaux ...).

En forêt domaniale, ces secteurs correspondent à des milieux plus humides, en zones topographiquement basses, dans lesquels sont implantées les mares forestières gérées et étudiées par l'ONF.

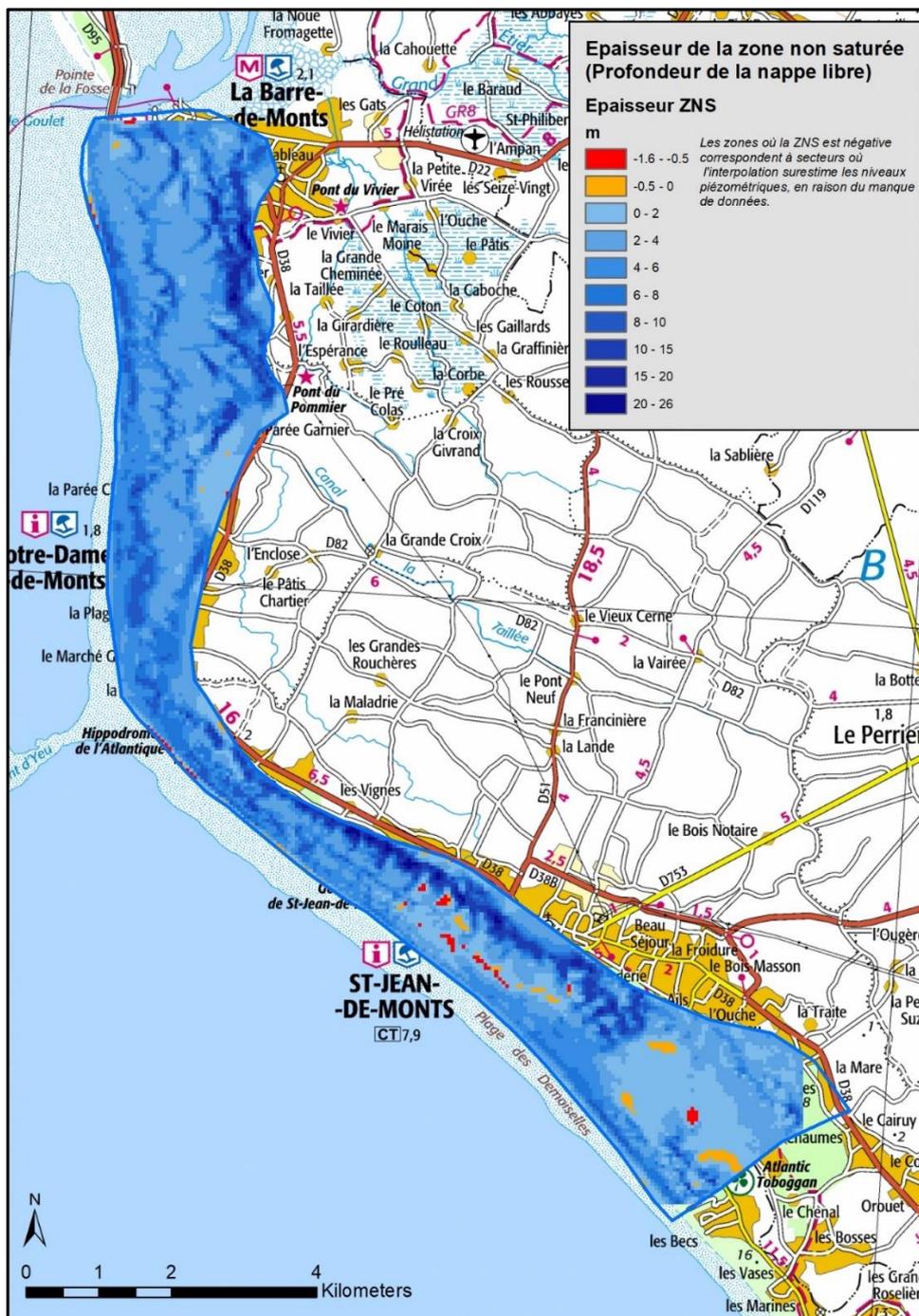


Illustration 40 : Carte de l'épaisseur de la zone non saturée, en mètre.

Battement de la nappe

Le battement de la nappe (Illustration 42) est obtenu par la soustraction entre les hautes eaux (2021) et basses eaux (2014), soit la différence altimétrique entre deux états saisonniers opposés (fin d'hiver et fin d'été).

D'une manière générale, cette analyse vise à quantifier l'amplitude maximum des fluctuations piézométriques par la différence entre les niveaux d'eau les plus élevés et les plus bas.

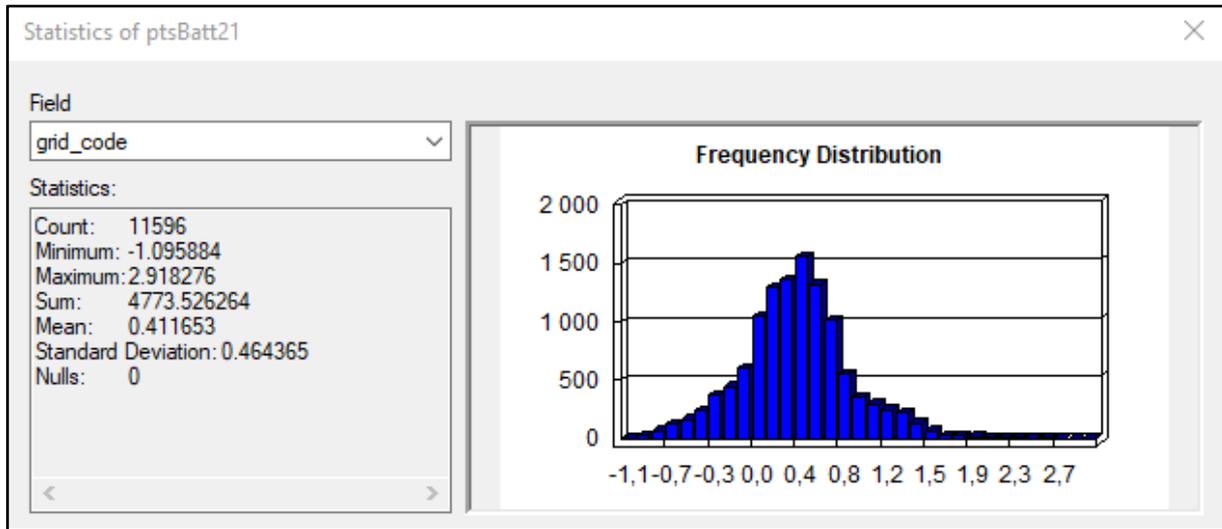


Illustration 41 : Statistiques sur le battement de la nappe

En moyenne, le battement de la nappe (Illustration 41) est de 0,4 m, avec un maximum de 2,9 m. Ces valeurs peu marquées, traduisent à la fois un système aquifère peu vaste et/ou caractérisé par une faculté d'emmagasinement élevée, marqué par une géométrie étirée, avec une capacité de vidange importante.

Les battements de nappe maximum ou les plus marqués (> 1,5 m) sont situés au sein des dunes les plus massives, ou bien sont sous l'effet de perturbations anthropiques qui entraînent des niveaux piézométriques dynamiques ou non stabilisés, comme la réinjection au droit des stations d'épuration (la Parée Grollier, les 60 Bornes) ou à l'inverse des prélèvements (Golf de St Jean de Monts).

Les valeurs négatives (gamme d'orange à rouge) signifient des côtes piézométriques plus hautes en période de basses eaux qu'en période de hautes eaux, sans toutefois dépasser la valeur de 1 mètre.

Aussi ces valeurs (Min, Max, Moy) sont atténuées par des valeurs inverses, négatives, qui laissent transparaître des influences qui peuvent autant être anthropiques (pompage, drainage, réinjection) que naturelles (variations du niveau marin), et de ce fait non calées sur les cycles annuels des aquifères libres continentaux.

Ces secteurs marqués par des battements faibles ou inverses (négatifs) sont cantonnés principalement sur le très proche littoral. Sur la bordure littorale, les effets des cycles de marée sont dominants sur la piézométrie, et de ce fait viennent effacer la cyclicité saisonnière (alternance entre hautes eaux et basses eaux à l'échelle d'une année).

Si on compare à une différence moyenne de 41cm entre HE et BE (Illustration 41), cela montre le peu de sens d'une estimation du battement HE/BE par cette méthode pour une frange littorale sur laquelle ce qui prédomine c'est l'effet de la marée, bien plus que la différence HE/BE.

Ce constat peut être fonction des situations effectives de BE / HE et de la densité des mesures pour chacune des campagnes.

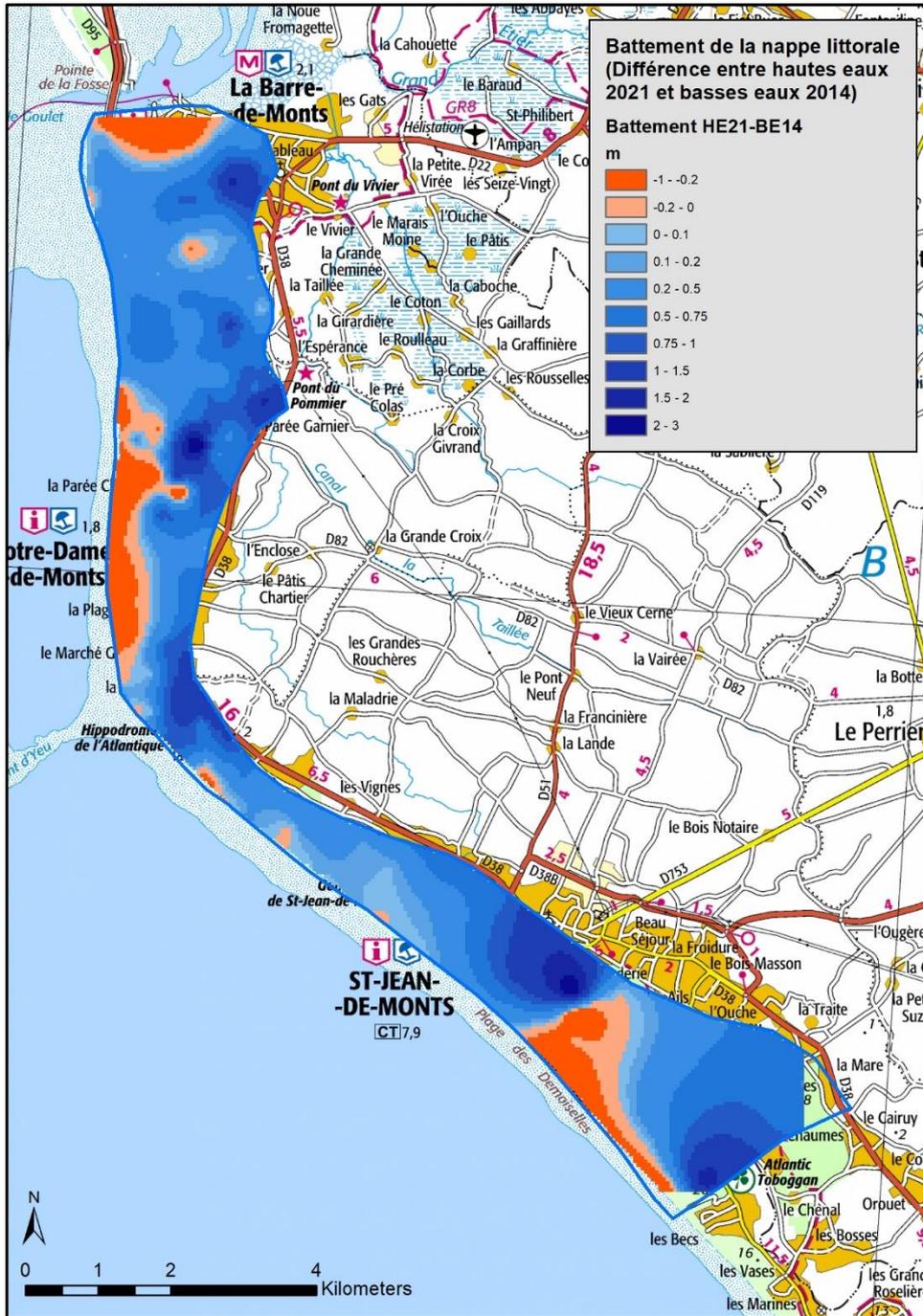


Illustration 42 : Cartographie du battement de la nappe entre les hautes eaux de mars 2021 et les basses eaux de 2014.

Le battement de la nappe libre en contexte littoral ne repose pas uniquement sur l'amplitude des cycles de BE/HE mais demande à mieux considérer le proche littoral sous l'influence des variations de niveaux de mer. A proximité de la bordure littorale, les niveaux piézométriques minimums ou maximums sont respectivement bien plus liés à l'état de basse mer ou pleine mer qu'à la saisonnalité des cycles basses eaux/hautes eaux.

4. Analyse croisée de la piézométrie avec les conditions météo-marines

Les données acquises lors des campagnes de mesures sur les eaux souterraines ont été interprétées pour comprendre les évolutions spatiales (cartes piézométriques, cf. chapitre 3). Une attention a été portée lors de l'interprétation sur les facteurs susceptibles d'impacter l'état des eaux continentales, tels que la pression démographique et les usages qui peuvent exercer par exemple une pression sur la ressource en eau ou des modifications momentanées d'état de la nappe (dôme ou dépression piézométrique).

Ce chapitre est consacré à la mise en perspective du signal piézométrique avec les paramètres environnementaux susceptibles d'influencer ce dernier à l'aide d'une analyse de corrélations et d'un modèle de régression linéaire multivariée entre le signal piézométrique et les paramètres environnementaux.

4.1. OBJECTIF ET METHODOLOGIE APPLIQUEE

Les séries temporelles enregistrées sur les sites équipés (chroniques piézométriques) expriment en premier ordre soit les variations saisonnières annuelles en lien avec des facteurs continentaux tels que la pluviométrie, l'évapotranspiration, soit les variables des états de mer.

Comme le rappellent Trglavcnik et al. (2018), la propagation des signaux de forçage océanique dans un aquifère côtier dépend de la nature du signal de forçage (c'est-à-dire de son amplitude et de sa période), de la connectivité entre l'aquifère et l'océan, ainsi que de la structure et des propriétés hydrauliques de l'aquifère (c'est-à-dire de sa diffusivité hydraulique). La propagation des signaux de marée à travers les aquifères côtiers a été largement étudiée (par exemple, Carr & Van Der Kamp, 1969 ; Guo et al., 2010). Lorsqu'un signal de marée se propage vers les terres à travers un aquifère, le signal est de plus en plus amorti (amplitude réduite) et retardé (déphasage). Les taux d'amortissement de l'amplitude et de déphasage en fonction de la distance à l'intérieur des terres dépendent de la période du signal de marée, des propriétés de l'aquifère (définies par les paramètres hydrodynamiques tels que le coefficient d'emménagement S , la conductivité hydraulique K , mais encore l'épaisseur de l'aquifère) et de la configuration structurelle (c'est-à-dire un système aquifère simple/multicouche).

Comme la diffusivité hydraulique est généralement plus grande dans les aquifères confinés (« nappe captive ») que dans les aquifères non confinés (« nappe libre »), le signal de la marée se propage souvent beaucoup plus loin à l'intérieur des terres dans les aquifères confinés avec moins d'amortissement d'amplitude et de déphasage (Jiao & Tang, 1999 ; Raubenheimer et al., 1999).

Les impulsions induites par surcotes (résultant de la surcote atmosphérique et du wave setup induit par les vagues) ont aussi été étudiées (voir par exemple Housego et al., 2021). Tout comme la marée, ces impulsions entraînent des fluctuations de la nappe qui sont de plus en plus amorties et retardées à mesure que le signal de la tempête se propage vers l'intérieur des terres.

En première approche pour l'étude de ces phénomènes sur le site des Pays de Monts, une analyse croisée préliminaire à partir des données dont on dispose est réalisée.

A partir de l'analyse des corrélations du signal piézométrique avec les facteurs continentaux puis marins, l'objectif est d'établir un modèle de régression linéaire multivarié, qui s'exprime sous la forme d'une équation du type :

$$Y_t = \sum_{i=1}^n \beta_i * X_{i,t-\alpha} + \varepsilon_t$$

Avec :

Y_t , la variable dépendante à expliquer par le modèle, ici la série temporelle piézométrique ;

X_i , les variables indépendantes explicatives, ici les séries temporelles de grandeurs caractérisant les conditions marines et météorologiques ;

β_i , les coefficients de la régression linéaire, estimés à partir de la méthode des moindres carrés ;

ε_t , les résidus de la régression linéaire ;

α , le décalage temporel appliqué aux X_i par rapport à Y_t pour tenir compte des retards possible du signal piézométrique par rapport aux signaux des conditions marines et météorologiques. Un décalage temporel positif indique que les conditions marines et/ou continentales sont en avance sur le signal piézométrique, et réciproquement pour un décalage temporel négatif.

Il faut rappeler que les conditions de Gauss-Markov doivent être au maximum respectées avant l'application d'une régression par moindres carrés, à savoir que les variables explicatives doivent être connues sans erreur, que les résidus (ou l'erreur de la régression) doivent avoir une espérance nulle, une variance constante (homoscédasticité), ne pas être auto-corrélés et ne pas être corrélés avec les variables explicatives, être distribués selon une loi normale, et enfin que les variables explicatives ne présentent pas de corrélations entre elles. Le non-respect de ces conditions, très fréquent dans le traitement des séries temporelles, peut biaiser les résultats et altérer leur interprétation.

Au préalable de l'analyse en régression multi-variée, on examine les corrélations entre le signal piézométrique et chacune des grandeurs caractérisant les conditions météorologiques (précipitations et évapotranspiration) et marines (vagues, surcotes, marées) afin de détecter de possibles liens statistiques entre la variable à expliquer et les variables explicatives. Ces analyses croisées permettent également de détecter d'éventuels décalages temporels α où les liens statistiques sont maximisés.

4.2. ANALYSE DES INDICATEURS METEOROLOGIQUES

Ce chapitre est consacré à la mise en relation des chroniques piézométriques avec les données météorologiques afin d'en analyser les corrélations. Le suivant se penche sur les données marines.

Données météorologiques (Météo-France)

Des données météorologiques au pas de temps journalier ont été commandées sur la période 2012-2021 pour la station du Perrier (85172001) depuis le site de Météo-France.

La fiche du site est consultable à cette adresse :

https://donneespubliques.meteofrance.fr/metadonnees_publicques/fiches/fiche_85172001.pdf

Cette station (Illustration 43) présente l'avantage, bien qu'en dehors de la forêt domaniale, d'être relativement proche et centrée sur le secteur d'étude.



Illustration 43 : Photographie du poste 85172001 prise le mardi 17 septembre 2019 (Météo-France)

Pluviométrie

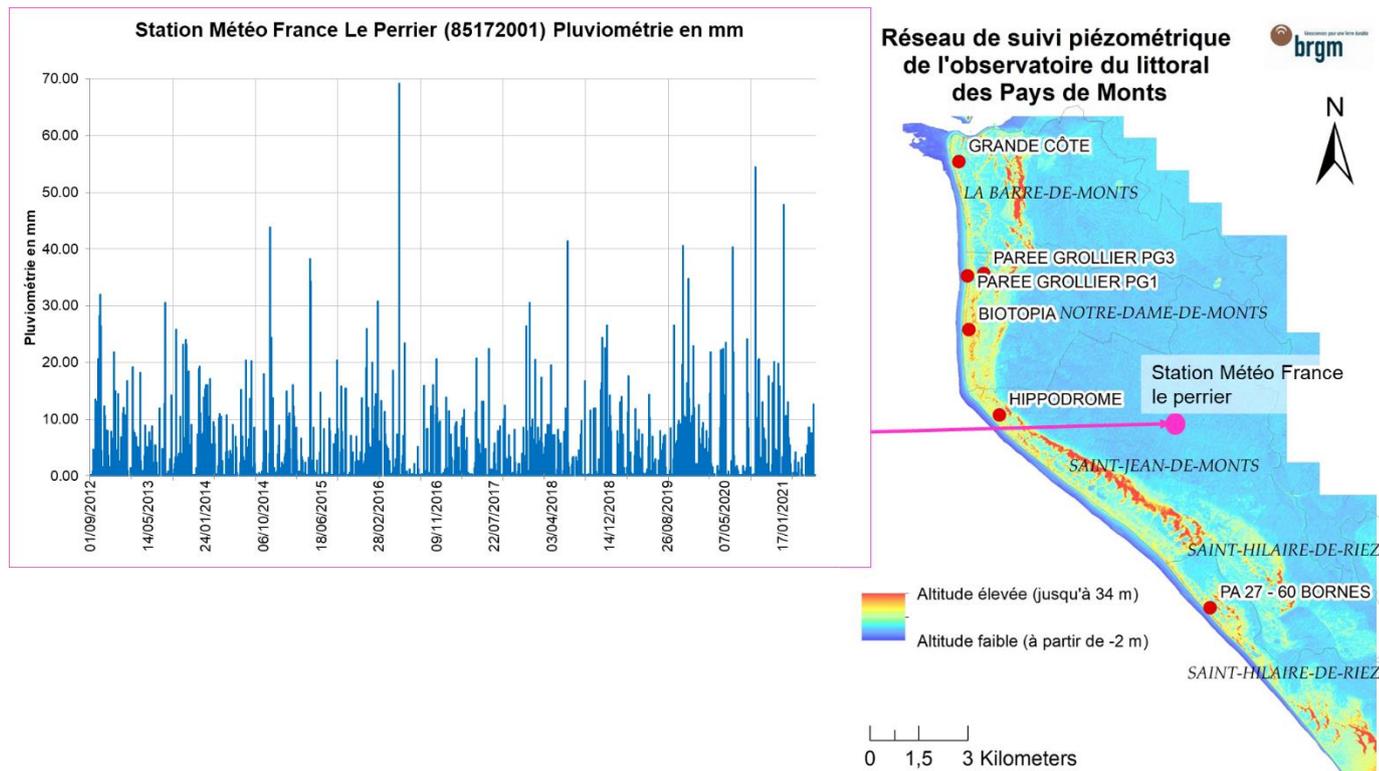


Illustration 44 : Visualisation des données de pluviométrie journalière de la station du Perrier.

Les données de pluviométrie extraites couvrent la période allant de septembre 2012 à juin 2021 (Illustration 44).

Evapotranspiration potentielle (ETP)

L'évapotranspiration potentielle, exprimée en mm, se traduit par une émission théorique de vapeur d'eau. Ces émissions correspondent au cumul de deux phénomènes, à savoir la part des précipitations reprises par la végétation (transpiration des plantes) et l'évaporation du sol ou depuis une surface mouillée (feuilles ...).

L'ETP est fonction (méthode de Penman-Monteith) de plusieurs paramètres tels que les durées d'insolation (rayonnement), la vitesse du vent, l'humidité relative et la température (min-max).

Les données utilisées proviennent de la station du Perrier (Illustration 45) sur une période identique à celle retenue pour la pluviométrie.

Bilan des actions 2018-2021 conduites pour l'Observatoire du Littoral des Pays de Monts (OLPM) : l'eau continentale et son rôle dans la bordure littorale.

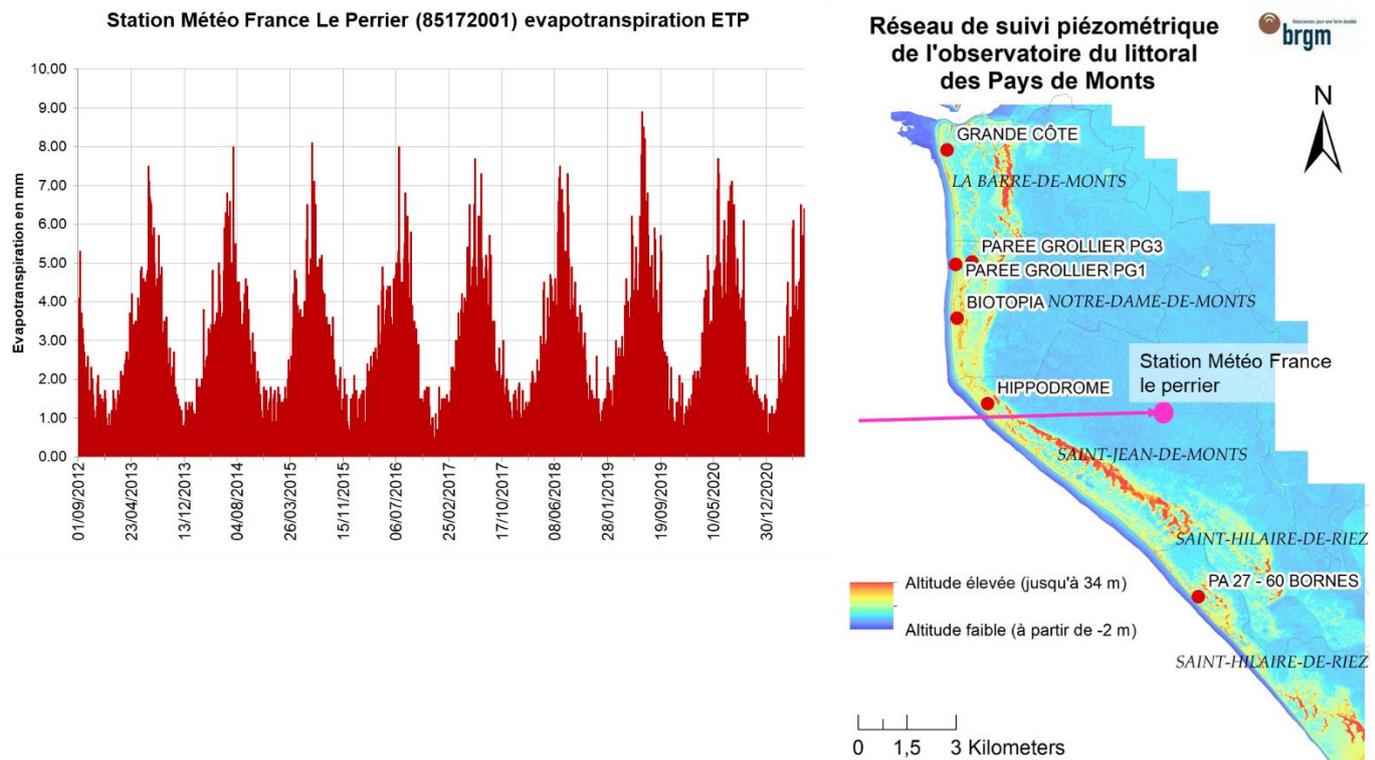


Illustration 45 : Visualisation des données d'évapotranspiration potentielle de la station du Perrier.

Principes de calcul de la part des précipitations infiltrées

Pour un premier exercice rapide (cf. chapitre suivant), les valeurs journalières de pluie efficace sont approchées par une simple différence entre les précipitations (pluviométrie) et l'ETP dont la valeur ne peut être négative (min fixé à 0). Ce type de résultat correspond à une pluie disponible pour les plantes chez les agronomes (Illustration 46).

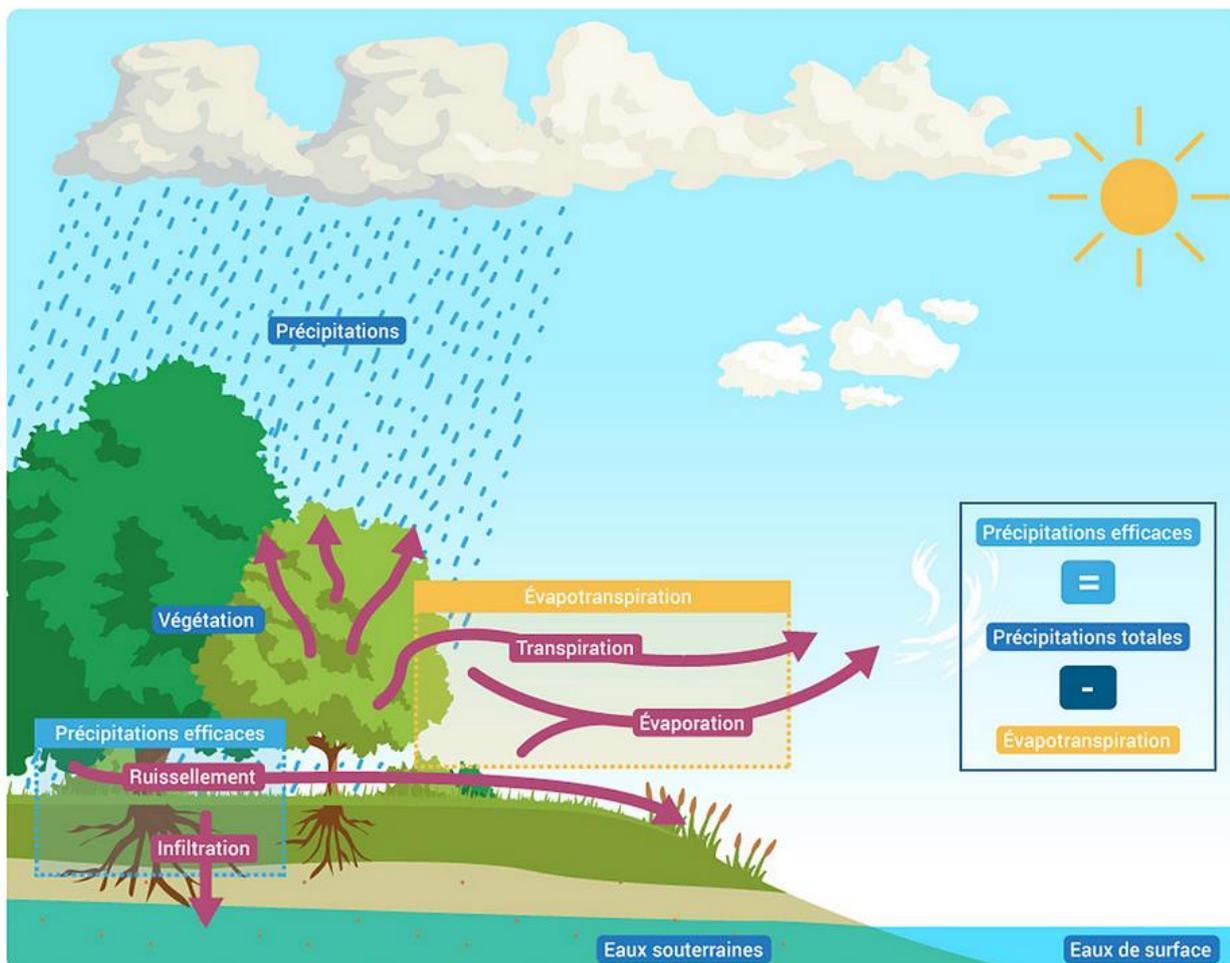


Illustration 46 : Les précipitations efficaces (© Agence française pour la biodiversité / Réalisation Matthieu Nivesse (d'après OIEau), 2018)

Néanmoins, en toute rigueur pour considérer la part infiltrée des précipitations qui réalimente les eaux souterraines, il faut alors considérer la capacité de stockage en eau des sols.

Le calcul de la pluie efficace repose sur l'évaluation de la capacité temporaire du sol à stocker une quantité d'eau susceptible d'être reprise ultérieurement par l'ETP. Plusieurs terminologies ont été utilisées pour qualifier cette capacité temporaire :

- Capacité de rétention ou de stockage du sol (Barthélemy et al., 2016) ;
- Capacité de rétention du sol ou Réserve Disponible pour l'Évapotranspiration (RDE) (Duez et al., 2012).

Cette notion est voisine, mais conceptuellement différente de celle de Réserve Utile (RU) employée en agronomie et qui est définie comme la différence entre le volume d'eau contenu dans le sol à la capacité de rétention et le volume d'eau restant au point de flétrissement. Pour

une surface unitaire et une couche de sol d'épaisseur Δz , on a donc en supposant un sol homogène :

$$RU = (\theta_{\text{ret}} - \theta_{\text{fp}}) \Delta z$$

- *Capacité de rétention*

C'est la teneur en eau θ_{ret} au-delà de laquelle la composante gravitaire de la charge l'emporte sur la pression capillaire.

- *Point de flétrissement permanent*

C'est la teneur en eau θ_{fp} en deçà de laquelle les forces retenant l'eau dans le sol surpassent la capacité d'extraction racinaire.

Rigoureusement, la RU d'un sol dépend donc de l'épaisseur de sol considérée. En pratique, une valeur moyenne souvent utilisée à l'échelle d'un territoire.

Classe de texture (selon le triangle de Jamagne)	Humidité % à la capacité au champ (pF=2.5)	Humidité % au point de flétrissement permanent (pF=4.2)	Eau utile (g d'eau pour 100 g de sol)	Densité apparente (sans dimension)	Réservoir utilisable (mm d'eau par cm de sol)
S	8	3	5	1.35	0.7
SL	12	5	7	1.40	1.0
SA	19	10	9	1.50	1.35
LIS	15	7	8	1.50	1.20
LS	19	9	10	1.45	1.45
LmS	20	9	11	1.45	1.60
LSA	22	11	11	1.50	1.65
LAS	24	12	12	1.45	1.75
LI	17	8	9	1.45	1.30
Lm	23	10	13	1.35	1.75
LA	27	13	14	1.40	1.95
AS	33	22	11	1.55	1.70
A	37	25	12	1.45	1.75
AL	32	19	13	1.40	1.80
A lourde	29	18	11	1.50	1.65

Tableau des réservoirs en eau selon les textures, Service de cartographie des sols de l'Aisne, Jamagne et al., 1977 ; in Baize et Jabiol, 1995).

Tableau 4 - Réserve utilisable du sol en fonction de sa texture (Baize et al., 1995)

En milieu dunaire, le sol est de texture à dominante sableuse, ce qui correspond aux valeurs de réserve utile les plus faibles, soit un maximum de 1 mm par cm d'épaisseur de sol, si on considère un sol sableux ou sablo-limoneux, soit les classes de texture S et SL (Tableau 4).

Ces sols s'apparentent à des régosols, sols très peu évolués, de composition proche de la roche mère, de quelques dizaines de centimètres tout au plus. Les RU sont faibles à très faible, probablement de l'ordre de 20 ou 25 mm.

Une fois la pluie efficace calculée, il reste à faire la part entre ruissellement et infiltration, partition conditionnée par de nombreux paramètres (relief, type de sol, couverture végétale, ...).

Or dans ce contexte de système dunaire, en dehors des phénomènes pluvieux intenses, le ruissellement est négligeable, en raison des propriétés infiltrantes des sables.

Dans ce contexte, la part d'infiltration et de recharge de la nappe des précipitations efficaces peut être alors considérée comme largement majoritaire de l'automne au début du printemps.

La recharge est transmise avec un temps de retard à la nappe qu'il est nécessaire de caractériser. On peut ainsi parler de déphasage temporel induit par la zone non saturée (ZNS). Le pas de temps privilégié pour la caractérisation de ces dynamiques est journalier.

Le schéma de l'illustration 47 propose une représentation simplifiée du processus de recharge (à droite) et un algorithme de calcul pour la pluie efficace (à gauche).

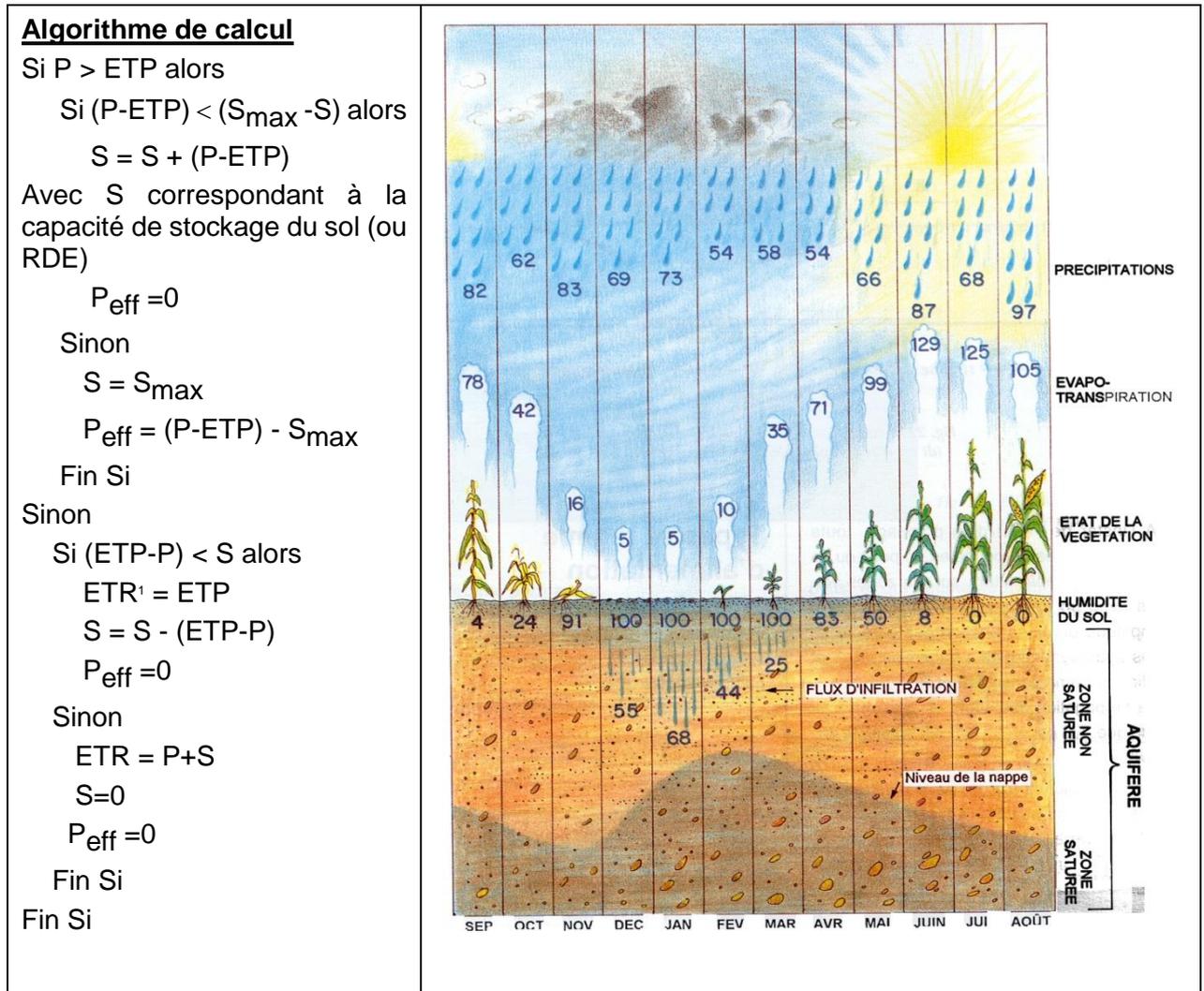


Illustration 47 – Algorithme de calcul de la pluie efficace (à gauche) et processus de recharge (à droite)

Comparaison visuelle de la relation entre les pluies efficaces et les niveaux de nappe enregistrés

Sur un piézomètre peu influencé par la marée (Hippodrome) :

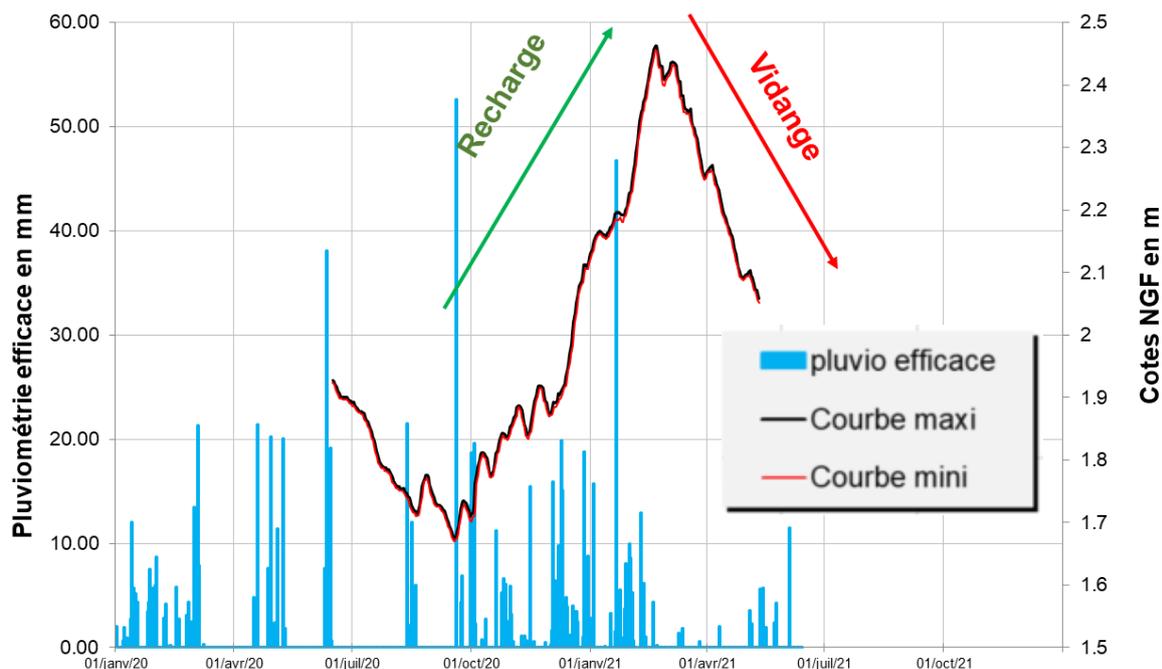


Illustration 48 : Variations saisonnières de la piézométrie au regard des précipitations efficaces, site de l'hippodrome (Saint-Jean-de-Monts)

Le graphique (Illustration 48) montre très explicitement la phase de recharge hivernale (à partir d'octobre 2020) avant d'atteindre un pic fin février ou début mars 2021.

Les minimums et maximums journaliers sont semblables ce qui traduit une faible influence des marées, et donc d'influence marine (variation des niveaux de mer).

Avec des conditions météorologiques de fin d'hiver sèches, la phase de vidange de la nappe s'opère à partir de mi-mars 2021.

Il peut également être observé qu'en période estivale, la réponse piézométrique aux précipitations efficaces est moindre, comme par exemple courant août 2020, où on peut observer une réponse piézométrique quelques jours après un épisode de pluies efficaces, laissant supposer une phase de recharge de la réserve utile.

Sur une mare sous influence de la marée (Biotopia) :

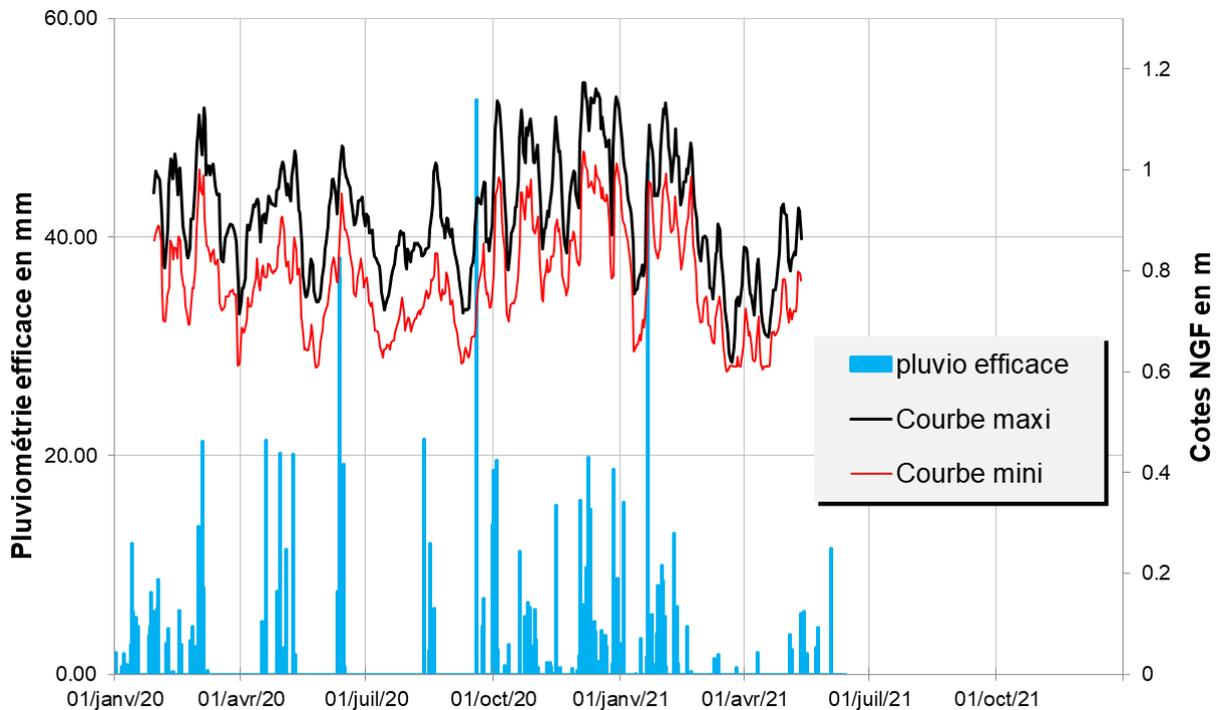


Illustration 49 : Variations saisonnières de la piézométrie au regard des précipitations efficaces, mare de Biotopia (Notre-Dame-de-Monts)

La mare de Biotopia présente des niveaux piézométriques influencés par les variations de niveaux de mer (marées) (Illustration 49).

Les différences entre les maximums en minimums journaliers sont de l'ordre 0,2 m, et le cycle saisonnier (phase de recharge et de vidange de la nappe) est moins bien défini.

En période estivale, la réponse piézométrique aux précipitations efficaces semble plus marquée, immédiate, probablement en raison de la nature même du point de mesure. En effet, les précipitations alimentent directement le point d'eau mesuré (au droit de la mare), et indirectement à proximité immédiate par la faible épaisseur de la zone non saturée (secteurs topographiquement bas).

Les phases de vidange sont très marquées, rapides, avec des niveaux bas hivernaux (de hautes eaux) proches des niveaux bas de périodes de basses eaux.

Pour les sites les plus proximaux du domaine marin, comme la mare de Biotopia et PG1 (piézomètre dans la dune bordière à la Parée Grollier), il est constaté un signal plutôt dominé par l'influence des variations des niveaux de mer.

Analyse des corrélations de la piézométrie avec les données météorologiques

L'analyse des corrélations a été effectuée avec les données du piézomètre PG1 situé à la Parée Grollier, sur le site le plus proximal de la plage, et donc le plus sensible à l'influence des paramètres marins (état de mer ou niveau d'énergie (Hs, Tp), niveau de mer). L'analyse des corrélations avec les paramètres marins est abordée dans le chapitre suivant.

Dans un premier temps, les données de précipitations et d'évapotranspiration ont été croisées avec les niveaux piézométriques de PG1 ajustés en série journalière.

Les corrélations ne sont pas très marquées (Illustration 50) mais elles suggèrent que l'augmentation des précipitations est suivie (après 2 jours) par une augmentation des niveaux piézométriques et l'inverse pour l'ETP (la corrélation - négative - est plus forte pour l'ETP).

Un point de vigilance est que le cycle saisonnier peut jouer fortement, mais cette première analyse sur des séries journalières semble toutefois suggérer des liens.

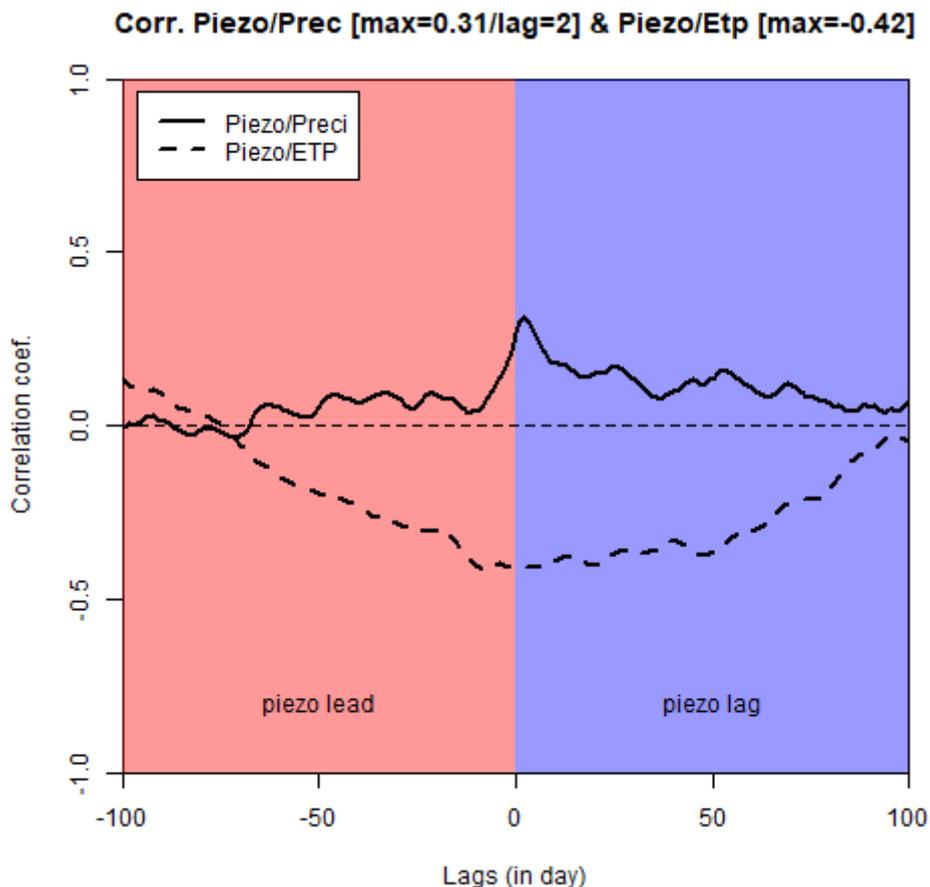


Illustration 50 : Analyse de la corrélation entre la piézométrie et les précipitations et l'ETP.

Dans un second temps, le cycle saisonnier a été soustrait en l'approximant par une somme de sinus et cosinus d'une période de 365 jours.

Cette méthode d'estimation paramétrique de la saisonnalité s'appuie sur la modélisation du cycle saisonnier par décomposition en série de Fourier à l'ordre 1 considérant une période de 365 jours (le détail de la méthode est décrit page 17 du document suivant: https://www.imo.universite-paris-saclay.fr/~goude/Materials/time_series/cours2_tendance_composante_saisonniere.pdf).

Il en résulte que le signal dans l'ETP a complètement disparu (absence de pic de corrélation) mais on peut noter une évolution progressive sur la saison (Illustration 51).

Pour la corrélation avec la pluviométrie, la suppression du cycle saisonnier n'a pas d'incidence. Bien que le signal reste faible, il n'est pas négligeable, et il pourra être ajouté au modèle (4.1).

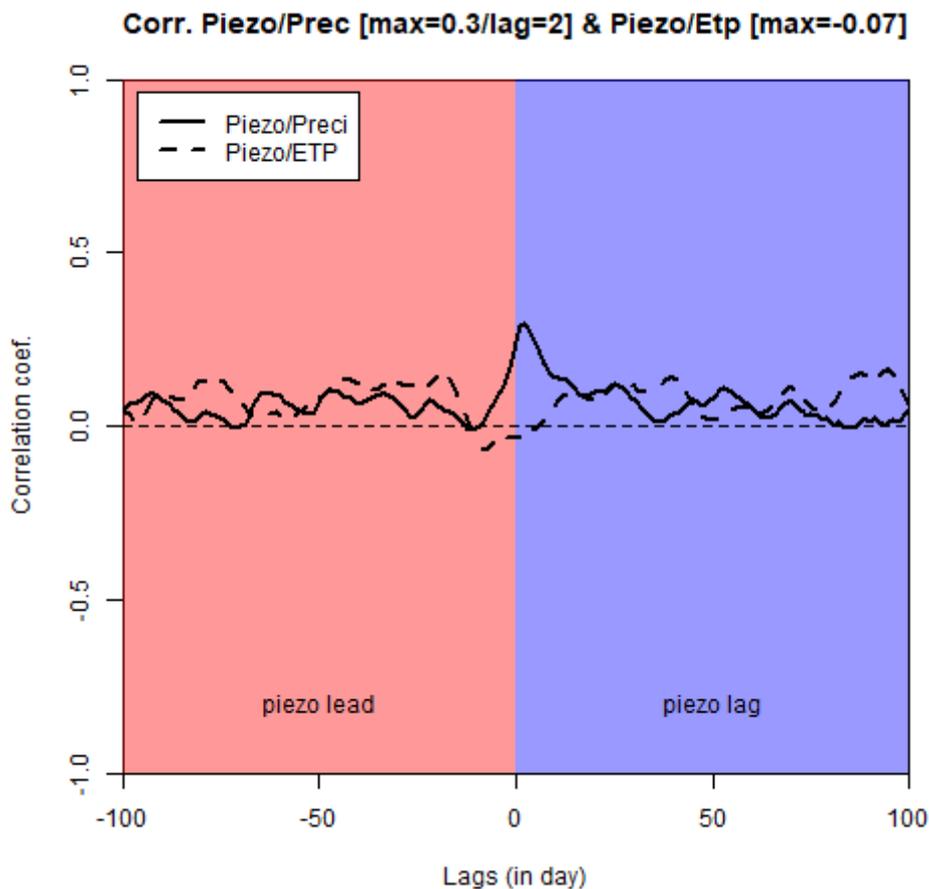


Illustration 51 : Analyse de la corrélation entre la piézométrie et les précipitations et l'ETP, décorrélé de la saisonnalité.

4.3. ANALYSE DES INDICATEURS MARINS

Dans le cadre de cette analyse préliminaire, nous nous concentrons sur les relations entre données piézométriques et données de niveau d'eau et vagues proche du site de suivi PG1.

Données de conditions marines

L'illustration 52 récapitule les données principales utilisées.

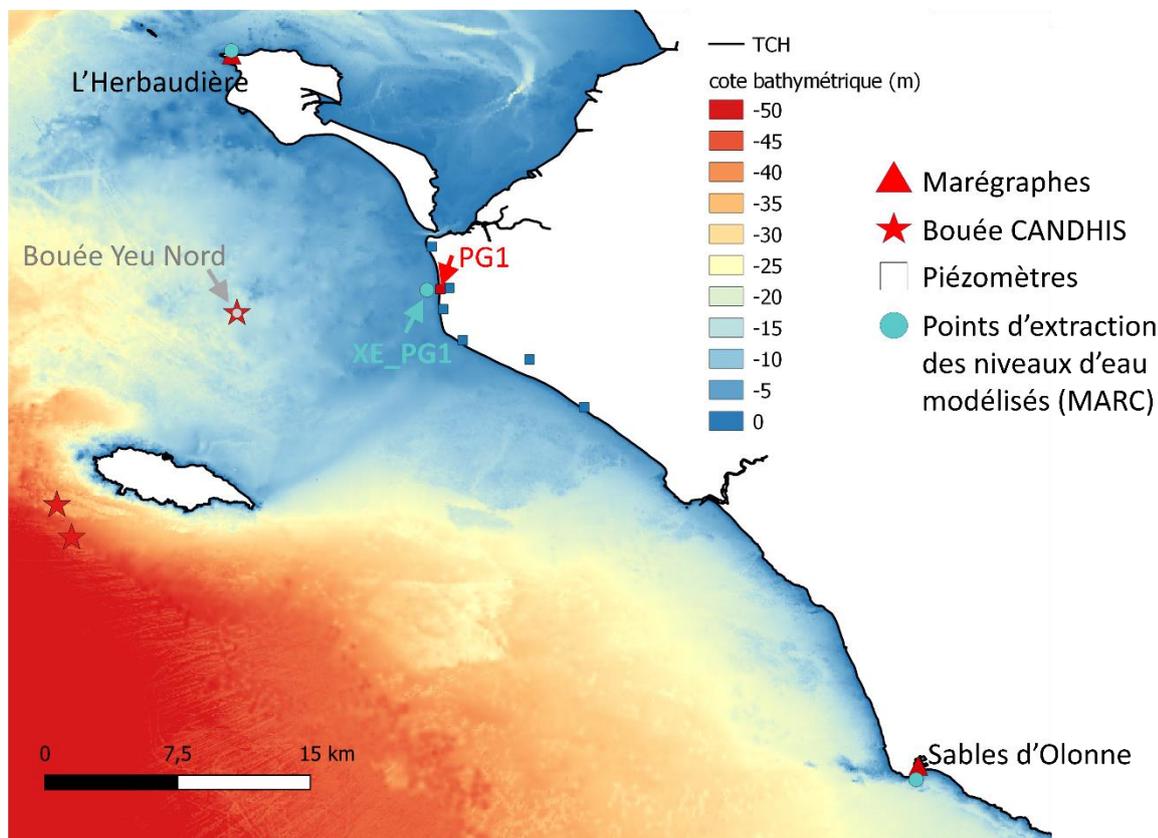


Illustration 52 : Localisation des principales données utilisés. Les cotes bathymétriques sont issue des données HOMONIM (résolution horizontale de 100m ; source : SHOM).

Niveaux d'eau

- **Données mesurées (marégraphes)**

Il existe trois marégraphes proches du site étudié : L'Herbaudière, Saint-Gilles-Croix-de-Vie et Les Sables d'Olonne. Cependant, les données (horaires validées) de niveau sont lacunaires pour les marégraphes les plus proches de la zone d'étude, à savoir ceux de L'Herbaudière et Saint-Gilles-Croix-de-Vie (Illustration 53), sachant que la donnée piézométrique qu'on veut étudier couvre la période 2017-2021. Les données du marégraphe des Sables d'Olonne couvrent par contre la période d'étude.

Bilan des actions 2018-2021 conduites pour l'Observatoire du Littoral des Pays de Monts (OLPM) : l'eau continentale et son rôle dans la bordure littorale.

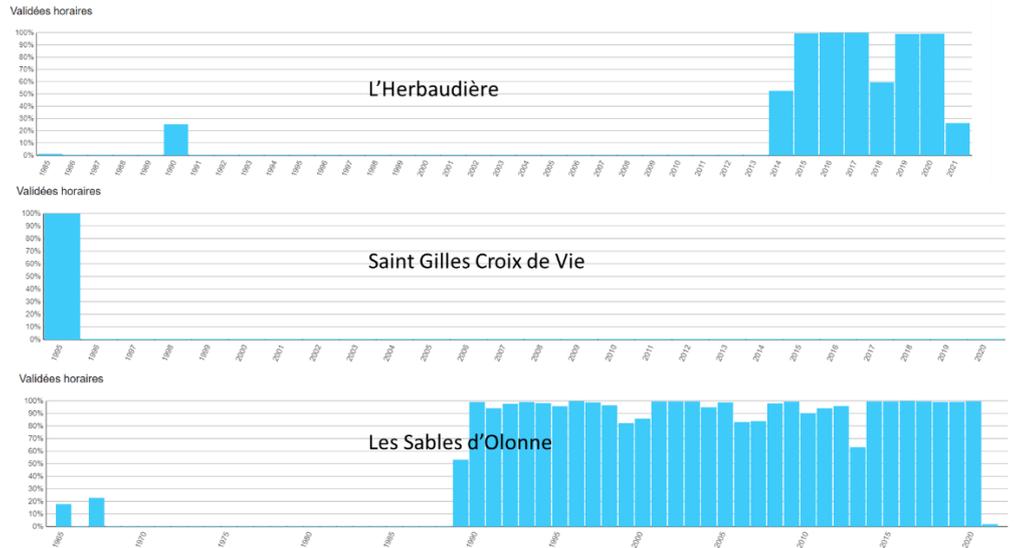


Illustration 53 : Taux de données horaires validées pour les trois marégraphes. Figures extraites de datashom (SHOM) le 29/07/2021.

En termes de mesures du niveau moyen des mers, le réseau SONEL (Système d'Observation du Niveau des Eaux Littorales ; <https://www.sonel.org/>) fournit des données sur l'évolution temporelle du niveau moyen (relatif) de la mer, obtenues à partir de données marégraphiques, ainsi que des mesures géodésiques (déplacements verticaux du sol).

Des données de niveaux moyens relatifs sont disponibles pour les marégraphes des Sables d'Olonne et de l'Herbaudière. Cependant, seul le site des Sables d'Olonne comporte une station géodésique ; or, à cette station, le GPS local n'acquière plus depuis 2016. Par conséquent, on ne peut pas utiliser directement ces données pour estimer les évolutions temporelles du niveau moyen absolu sur la période d'étude. Ceci-étant, au regard de l'amplitude des phénomènes de marée (métrique) et surcotes (décimétrique) dans la zone d'étude et considérant une période d'étude courte (<4 ans), on peut s'attendre à ce que ce soit surtout les variations de niveau d'eau liées à la marée et aux surcotes qui, au 1^{er} ordre, contribuent aux variations de données piézométriques, plutôt que des variations lentes de quelques millimètres à centimètres.

Par ailleurs, le SHOM fournit régulièrement un certain nombre de données de références altimétriques (le RAM, pour Références Altimétriques Maritimes). Ce document fournit entre autres la cote du niveau moyen par rapport au zéro hydrographique. Ces données sont utilisées pour transformer les données marégraphiques (fournies par rapport au zéro hydrographique) en données référencées par rapport au niveau moyen (ici, niveaux moyens issus de SHOM (2020), Illustration 54).

07	Nom	Type	Lat.	Long.	Et.	Année CH	PHMA	PMVE	PMME	NM	BMME	BMVE	PBMA
	Les Sables d'Olonne	R	46 30 N	01 48 W	3.35		05.93	05.20	04.20	03.20	02.05	00.75	-0.02
	L'Herbaudière (île de Noirmoutier)	S	47 02 N	02 18 W	3.44		06.21	05.55	04.40	03.36	02.10	00.75	-0.02

Nom	Repère fondamental	Organisme	Date	RF/ZH	RF/Ref	ZH/Ref	ZH/Elli	Ref
Les Sables d'Olonne	O.HI-65	IGN	2017	7.756	4.928	-2.828	44.51	IGN69
L'Herbaudière (île de Noirmoutier)	O.I.K3-35	IGN	2011	14.163	11.058	-3.105	44.73	IGN69

Illustration 54 : Valeurs de référence du niveau moyen par rapport au zéro hydrographique (cartes marines du SHOM) et du zéro hydrographique dans le référentiel IGN69, pour les deux marégraphes (Herbaudière et Les Sables d'O.). Source : SHOM (2020).

- **Données modélisées (MARC)**

Parallèlement, des données de niveau d'eau modélisées sont disponibles sur la plateforme MARC (LOPS-IFREMER ; <http://marc.ifremer.fr/>). Les données de niveau d'eau fournies sur cette plateforme sont obtenues par modélisation hydrodynamique avec le code MAR3D (en mode 2D), avec une résolution de 250 m sur la zone d'étude. Ces données sont fournies par rapport au niveau moyen et intègrent les phénomènes de marée et surcotes. L'illustration 55 **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** représente le niveau d'eau modélisé pour une date donnée. Ces données sont disponibles de manière continue sur notre période d'étude (2017-2021), et au pas de temps de 15 minutes. Outre les données de niveau d'eau (intégrant phénomènes de marée et surcote), la plateforme MARC fournit aussi les données de surcote seule.

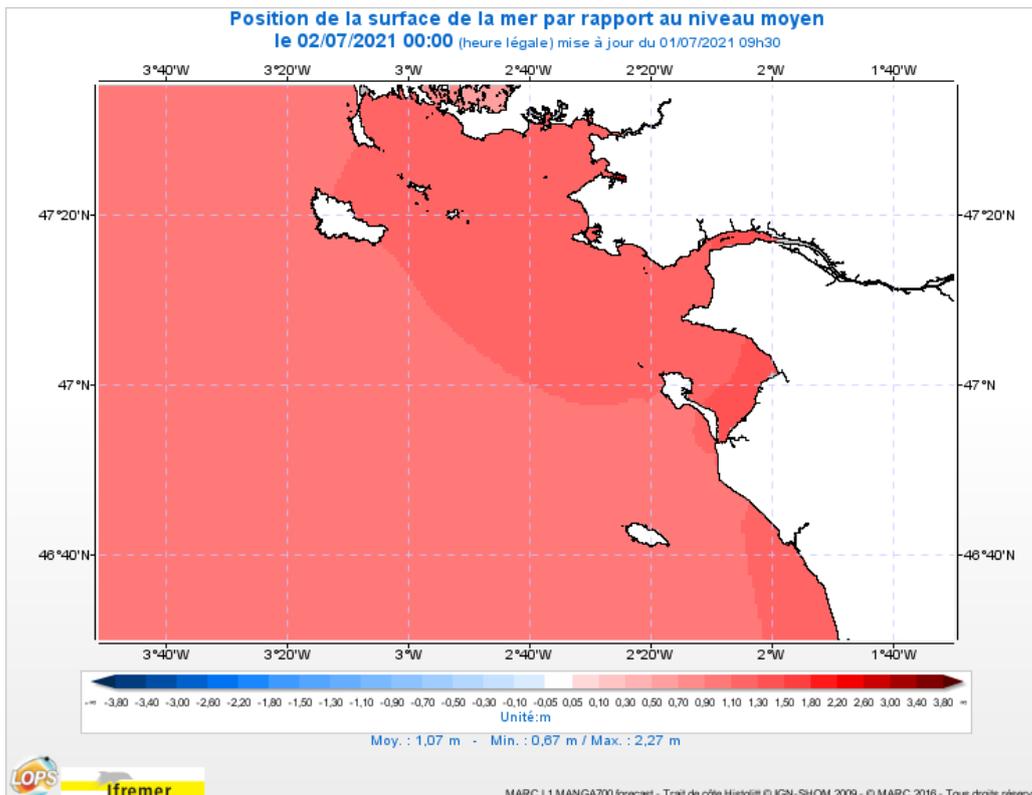


Illustration 55 : Visualisation rapide sous Marc (IFREMER) de la variabilité spatiale des niveaux d'eau (résultants de la marée et des surcotes, et référencés par rapport au niveau moyen).

- **Données finales utilisées**

Les données du marégraphe des Sables d'Olonne pourraient être utilisées. Toutefois, la comparaison des données marégraphiques de L'Herbaudière et des Sables d'Olonne montre des différences (sur les quantiles) de l'ordre de la dizaine de centimètres (Illustration 56). Nous optons donc pour l'utilisation des données modélisées.

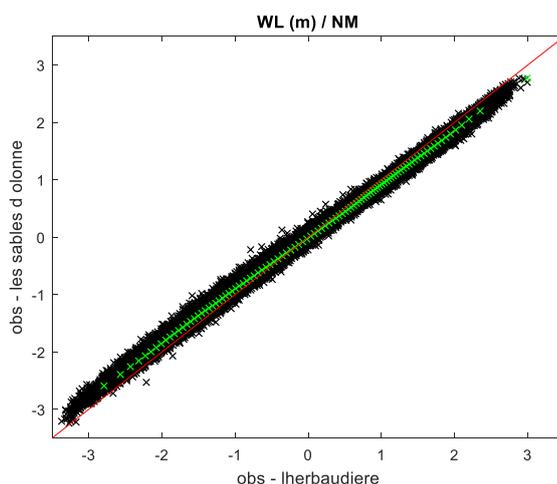


Illustration 56 : Comparaison des niveaux d'eau observés entre le marégraphe de l'Herbaudière et celui des Sables d'Olonne. Les niveaux d'eau sont ici données par rapport au niveau moyen (NM). Données marégraphiques issues de datashom.

Pour cela, les données modélisées sont tout d'abord extraites au niveau des marégraphes de L'Herbaudière et des Sables d'Olonne pour pouvoir estimer la qualité du modèle dans la zone d'étude. L'illustration 57 montre un bon accord entre modèle et mesures. Les données (jeu n°1 : marée et surcote ; jeu n°2 : surcote seule) à utiliser pour l'analyse de PG1 sont donc finalement extraites au droit de PG1 (point nommé XE_PG1 sur l'illustration 52), au point de localisation de coordonnées (-2.1551°E, 46.8504°N ; WGS84).

A partir des jeux de données n°1 et 2, nous pouvons donc étudier les relations entre les données piézométriques et les niveaux d'eau résultant de la marée et des surcotes (Jeu n°1), les surcotes seules (Jeux n°2), les marées seuls (Jeu n°1 - Jeu n°2)

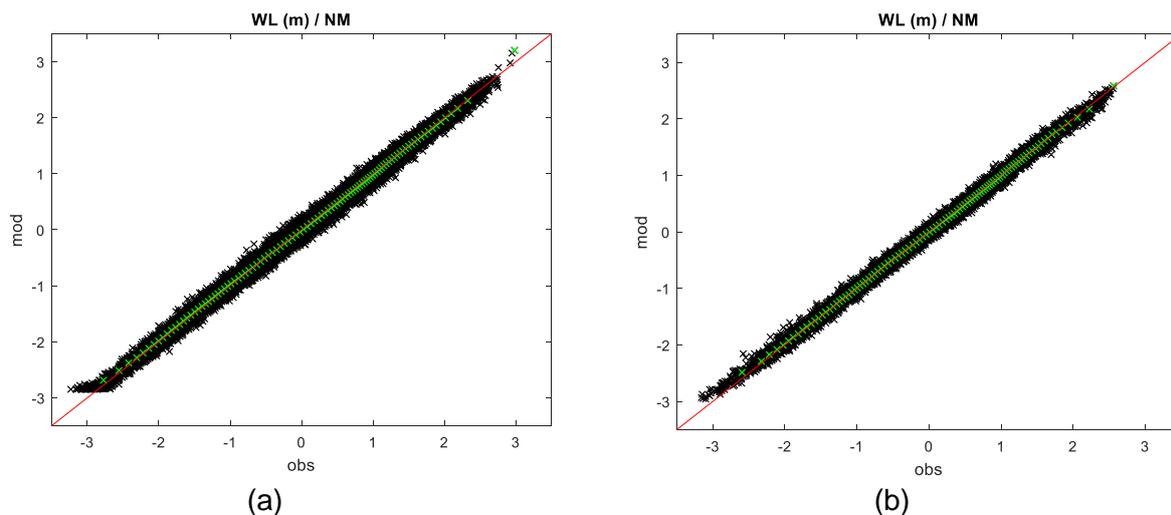


Illustration 57 : Comparaisons des niveaux d'eau (WL) observés avec les données extraites du modèle pour (a) le marégraphe de L'Herbaudière, (b) le marégraphe des Sables d'Olonne. Valeurs exprimées en mètres par rapport au niveau moyen (NM, issu du RAM, 2020).

Conditions de vagues

- **Données mesurées (houlographes)**

Parmi les trois bouées disponibles, la bouée Ile d'Yeu Nord (08504) du réseau CANDHIS (Centre d'Archivage National des Données de Houle In Situ ; <https://candhis.cerema.fr/>), géré par le CEREMA et le Conseil Départemental de la Vendée, est la mieux placée vis-à-vis du site étudié (Illustration 52). Elle se situe dans des fonds de 14 m (Illustration 58) et à environ 11 km de PG1.

La Bouée Yeu Nord est non directionnelle, donc seules des données de hauteur significatives (Hs) et période pic (Tp) sont disponibles. L'extraction des séries temporelles (Hs et Tp) couvre la période de 2017-01-01 22:30 à 2021-03-19 22:00:00.

Code campagne	Nom campagne	Latitude	Longitude
08504	Ile d'Yeu Nord	046°49.993'N	002°17.700'W
Profondeur (mètres)	Marnage VEM (mètres)	Distance à la côte (miles)	Directionnelle
14.00	4.50	6.10	
Nombre de mesures	Date de début	Date de fin	Temps réel
210156	21/06/2005 15:00	31/07/2020 23:00	

Illustration 58 : Caractéristiques de la bouée Yeu Nord (source : CANDHIS).

- **Données modélisées (MARC)**

Parallèlement, des données de vagues modélisées sont disponibles sur la plateforme MARC (LOPS-IFREMER ; <http://marc.ifremer.fr/>). Les données fournies sur cette plateforme sont obtenues par modélisation hydrodynamique avec le code de vagues spectral WW3 (WAVEWATCH III, initialement développé par un consortium international coordonné par la

NOAA). Ce modèle de vagues a été implanté sur la façade Golfe de Gascogne/Nord Atlantique (WW3-NORGAS-UG), avec une grille non structurée qui fournit les états de mer toutes les heures. Ce modèle a une résolution d'environ 250 m près des côtes. Les Illustration 59 et Illustration 60 représentent un exemple de hauteurs significatives, directions et périodes des vagues simulées pour une date donnée.

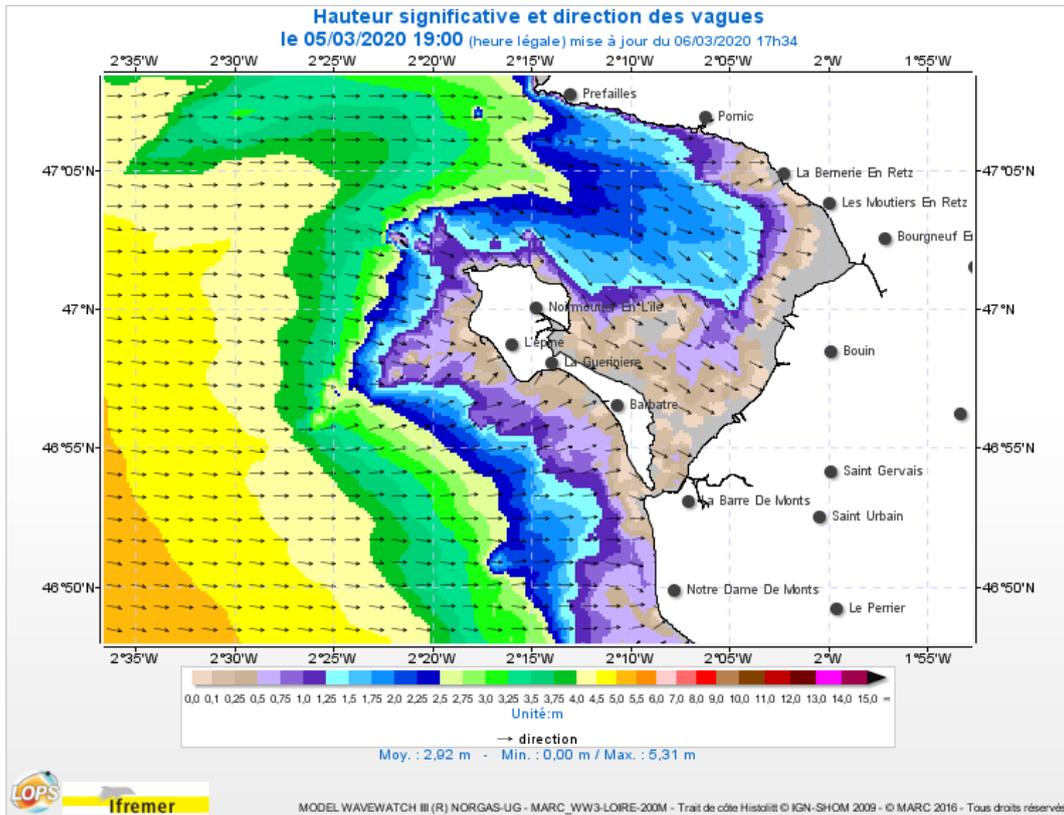


Illustration 59 : Variabilité spatiale de la hauteur significative (Hs) des vagues.

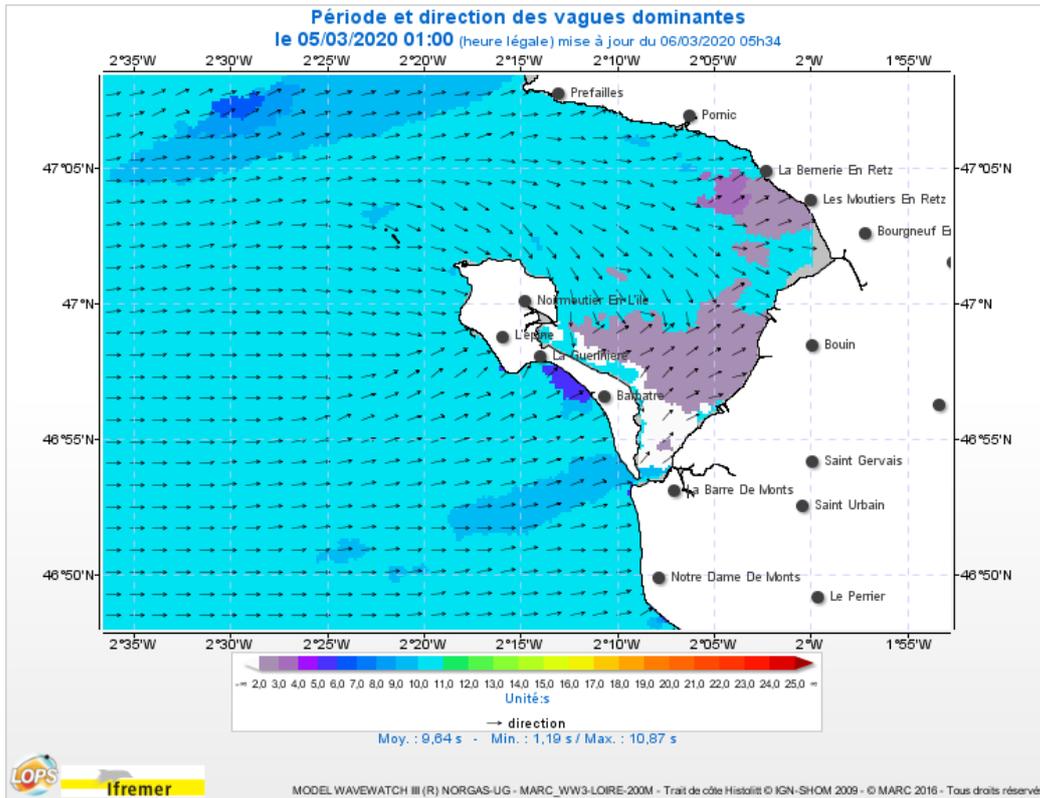


Illustration 60 : Variabilité spatiale de la périodes (T_p) et de direction des vagues.

- **Données finales utilisées**

Si on veut corréler des conditions de mer avec le piézomètre PG1, il faut disposer de conditions de vagues dont les variations sont représentatives de variations au droit du site. Si on considère un point trop proche du site, suivant les conditions météorologiques (et de marée), ce point va se retrouver alternativement en zone déferlée et non déferlée, si bien que les variations des conditions de vagues au niveau de ce site ne seront plus représentatives des conditions de vagues au niveau de la plage. Il convient donc de choisir si possible une location située d'une part dans une zone où peu de déferlement est attendu (i.e. suffisamment profonde). En outre, il convient de s'assurer qu'entre cette zone et la côte, il n'y a pas d'anomalie bathymétrique particulière (e.g. ile ou monts sous-marins).

Concernant les données de vagues observées (bouée), on peut noter que :

- Leur couverture temporelle est suffisante pour notre étude
- La bouée est localisée par 13 m de fond
- La bathymétrie entre la bouée et la côte ne montre pas d'anomalie spécifique (profil bathymétrique relativement régulier ; cf. Illustration 61)

Il apparaît donc pertinent d'utiliser ces données CANDHIS pour notre étude. Plus précisément nous utiliserons les données de H_s , ainsi que l'indicateur d'énergie $H_s^2 T_p$.

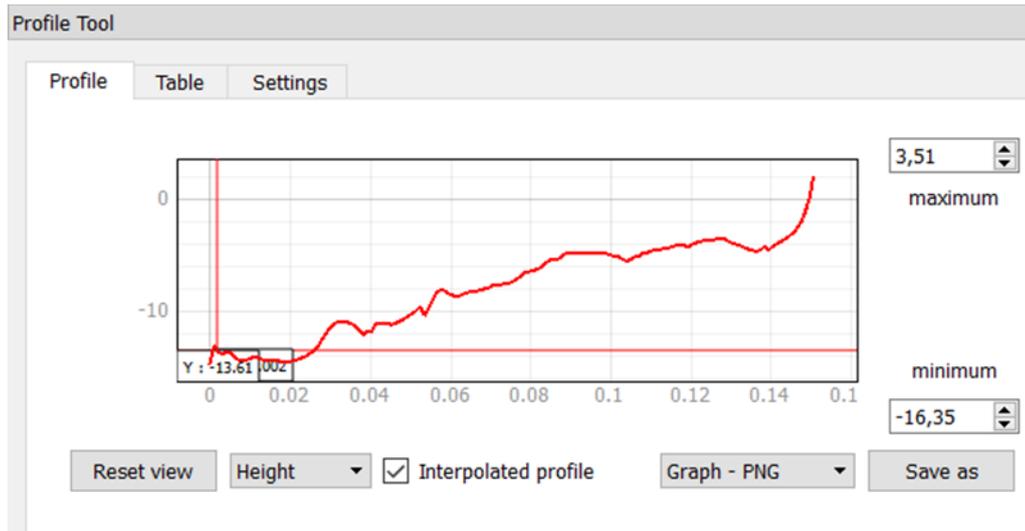


Illustration 61 : Profil bathymétrique entre le piézomètre et la bouée Candhis Yeu Nord. Données utilisées : HOMONIM (résolution horizontale de 100m ; source : SHOM).

Analyse des corrélations de la piézométrie avec les données marines

Cette section présente l'analyse des corrélations individuelles entre la chronique piézométrique PG1 et les données de conditions marines décrites dans la section précédente (4.3.1). Il est à noter que bien que certaines données de conditions marines soient disponibles à un pas de temps de 15 minutes (p.ex. le niveau total), d'autres ne le sont qu'à un pas de temps de 30 minutes (p.ex. les paramètres de vagues). L'ensemble des données est donc préalablement ré-échantillonné à un pas de temps harmonisé de 30 minutes.

- **Corrélation entre les niveaux d'eau et la piézométrie (PG1)**

On analyse ici la corrélation entre les niveaux d'eau issus du modèle MARC et la chronique piézométrique PG1. Les niveaux d'eau associés aux marées et aux surcotes sont d'abord isolés en retranchant la contribution des surcotes au niveau d'eau total, sous l'hypothèse que les interactions marée-surcote sont négligeables dans la zone. Les séries temporelles standardisées (centrer-réduire)² aux pas de temps semi-horaires pour l'analyse croisée sont représentées sur l'illustration 62. La superposition des niveaux d'eau et de la chronique piézométrique permet de déceler visuellement (notamment en examinant les séries zoomées) l'existence de corrélations possibles entre ces différentes séries temporelles, à des fréquences bien distinctes cependant. En effet, la chronique piézométrique semble être corrélée avec la marée à plus haute fréquence que la surcote.

² fait référence à la transformation de données en soustrayant la moyenne de l'échantillon et en la divisant par l'écart-type.

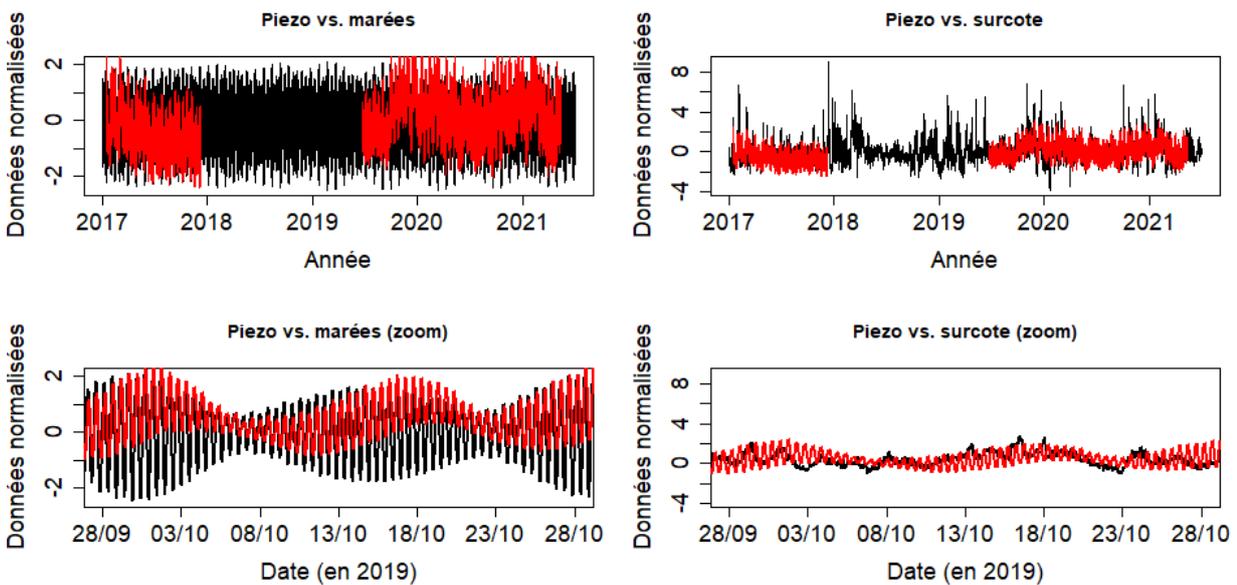


Illustration 62 : Superposition de la chronique piézométrique PG1 (en rouge) avec le niveau d'eau associé aux marées et aux surcotes issues du modèle MARC, au droit de PG1 (en noir). La colonne de gauche - colonne de droite - montre la superposition piézométrie/marées – piézométrie/surcotes – respectivement. La ligne du bas montre des données zoomées sur une période d'un mois.

Conformément à la connaissance dont on dispose sur la réponse piézométrique des nappes aux fluctuations de niveaux d'eau à la côte, on observe un déphasage temporel entre les données piézométriques et les données de marée et surcotes (Illustration 62 – zoom). Pour caractériser ce déphasage, nous avons détecté tous les pics de pleine-mer de niveau d'eau (WL), puis associé le maximum de niveau piézométrique dans une fenêtre de 6h centrée dans cette pleine-mer, et avons, pour chaque pic de pleine-mer calculé le décalage temporel avec le pic de niveau piézométrique dans cette fenêtre de 6h. L'illustration 63 montre la distribution de ces écarts temporels entre pics. L'analyse par nombre d'occurrence des valeurs de déphasage temporel fait apparaître un mode dominant de 1h30. Le même travail a été fait en considérant les basses mers et minima de données piézométriques, menant aussi un mode dominant d'environ 1h30, mais avec un étalement plus faible que pour les maximums locaux. Cette analyse préliminaire a été réalisée avec l'hypothèse sous-jacente d'une certaine réactivité des données piézométriques par rapport aux fluctuations de niveau d'eau (ici moins de 6h). Que cette hypothèse soit vérifiée ou non, notre analyse suggère que les niveaux piézométriques (PG1) répondent aux variations de niveau d'eau avec un décalage temporel d'au moins plusieurs dizaines de minutes.

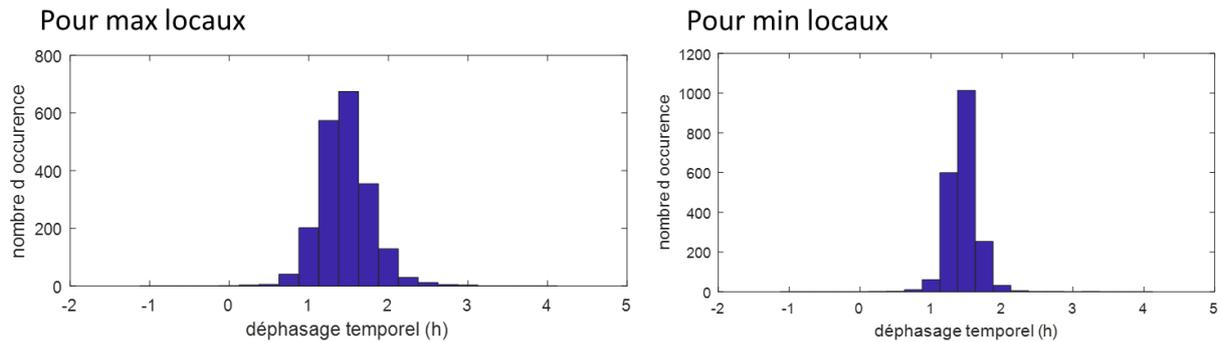


Illustration 63 : Analyse des décalages temporels entre données de niveaux d'eau et données piézométriques (PG1). Gauche : décalages temporels entre les niveaux de pleine-mer et les maxima locaux de mesures piézométriques, Droite : décalages temporels entre les niveaux de basse-mer et les minima locaux de mesures piézométriques.

L'analyse de corrélations est représentée sur l'illustration 64. Sur la base de l'analyse préliminaire ci-dessus soulignant que les pics ne sont pas synchrones, l'analyse est effectuée en considérant différents décalage temporels. Les résultats montrent que le croisement de la chronique piézométrique PG1 avec le niveau d'eau associé aux marées a un coefficient de corrélation ρ maximal de 0.73, atteint avec un décalage temporel de 1h30 (0.0625 jours). Le croisement de la chronique piézométrique avec le niveau d'eau associé aux surcotes suggère également l'existence d'un lien statistique mais moins prononcé : le coefficient de corrélation atteint un maximum de 0.36 avec un retard d'environ 2 jours. Cette analyse confirme donc l'existence d'un lien statistique entre le niveau piézométrique PG1 et les conditions marines avec un déphasage temporel de l'ordre de l'heure pour la marée et du jour pour la surcote. Ces déphasages seront pris en compte pour l'analyse linéaire multivariée décrite par la suite.

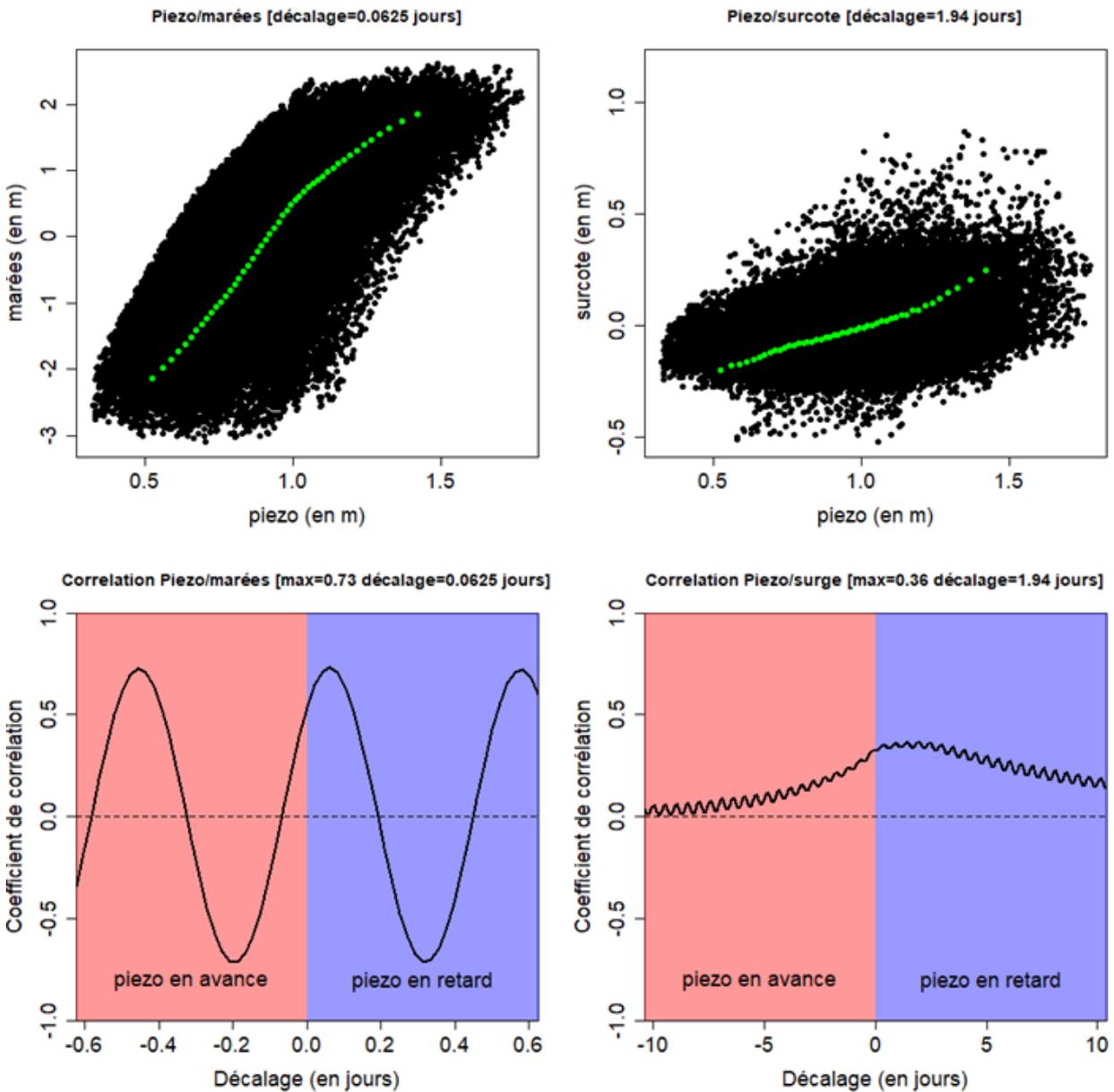


Illustration 64 : Analyse des corrélations entre la chronique piézométrique PG1 et le niveau d'eau associé aux marées (colonne gauche) et aux surcotes (colonne droite) issues du modèle MARC, au droit de PG1. Les diagrammes de la ligne du bas montre l'évolution du coefficient de corrélation en fonction du décalage temporel entre la chronique de niveau d'eau et celle du piézomètre.

- **Corrélation entre les vagues et la piézométrie (PG1)**

Dans cette section, on effectue l'analyse des corrélations (avec considération de décalage temporel) sur les paramètres de vagues Hs (hauteur significative) et Tp (période). Les superpositions des chroniques standardisées sont montrées sur l'illustration 65.

Bilan des actions 2018-2021 conduites pour l'Observatoire du Littoral des Pays de Monts (OLPM) : l'eau continentale et son rôle dans la bordure littorale.

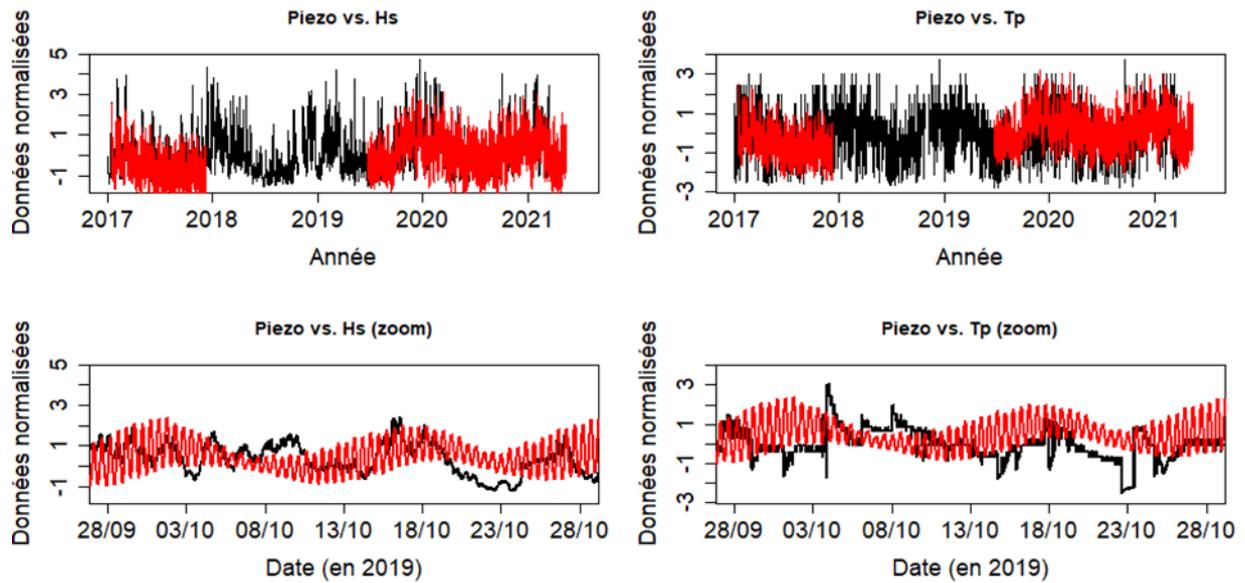


Illustration 65 : Superposition de la chronique piézométrique PG1 (en rouge) avec les paramètres de vague (en noir) hauteur significative (colonne gauche) et période pic (colonne droite).

L'illustration 66 montre les résultats de l'analyse quantitative des corrélations. Le croisement de la chronique piézométrique PG1 avec la hauteur significative des vagues a un coefficient de corrélation maximal de 0.46, atteint avec un retard de 14.5 heures (0.604 jour). Cette valeur est très proche de celle obtenue sans déphasage (0.43, valeur à $t = 0$). Les corrélations avec T_p , H_s^2 , $H_s^2 T_p$ ont pu être testées mais elles se révèlent moins nettes qu'avec H_s . L'analyse des corrélations de la chronique piézométrique avec la période pic des vagues montre une valeur à peu près constante et faible (inférieure à 0.26), donc un lien statistique faible.

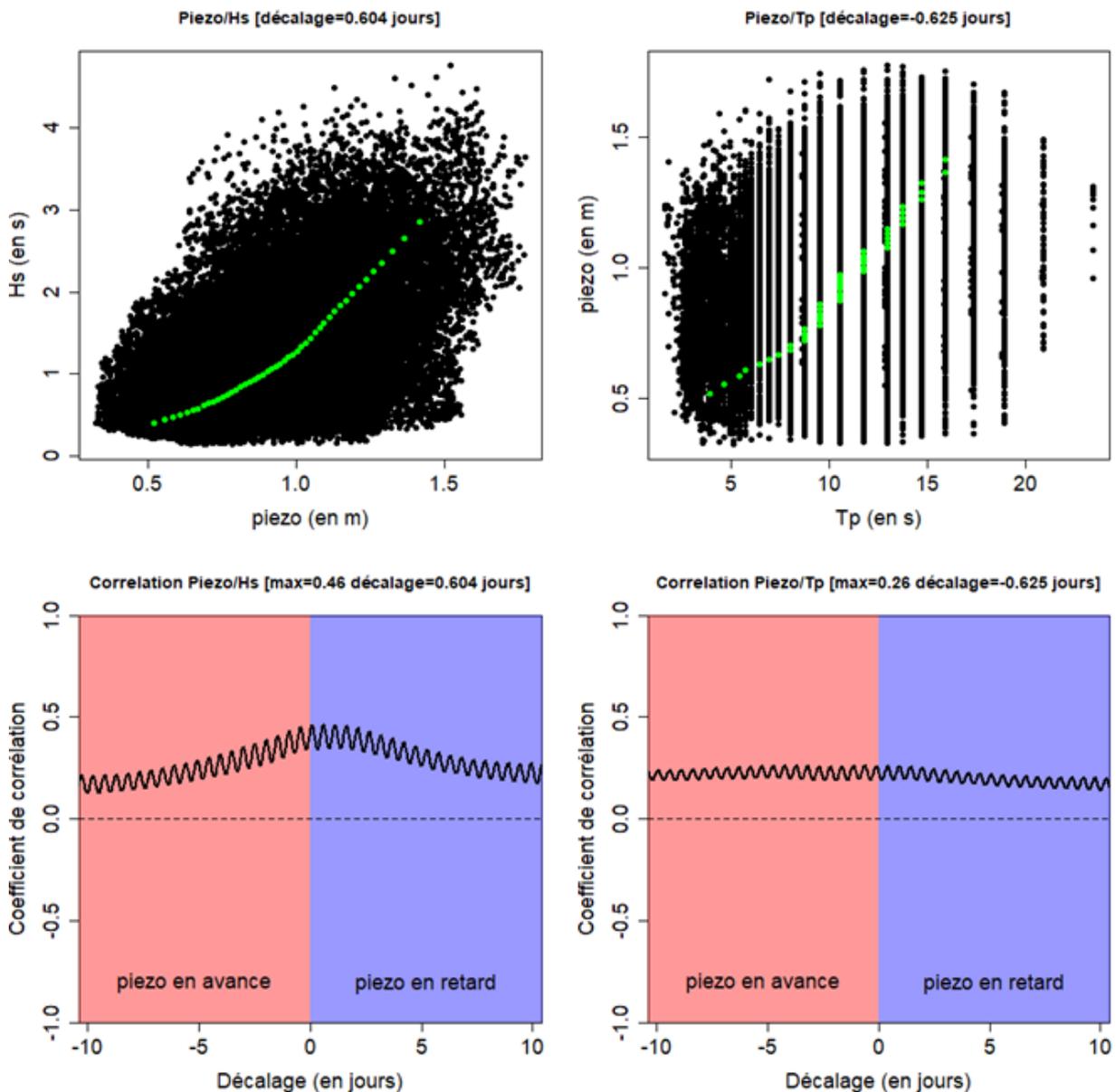


Illustration 66 : Analyse des corrélations entre la chronique piézométrique PG1 et la hauteur significative (colonne gauche) et la période (colonne droite) des vagues. Les diagrammes de la ligne du bas montre l'évolution du coefficient de corrélation en fonction du décalage temporel entre la chronique des paramètres de vagues et celle du piézomètre.

Notons que l'ensemble des analyses présentées précédemment ont été effectuées à partir de chroniques dont le cycle saisonnier a été conservé. Une analyse similaire a été effectuée en soustrayant préalablement à chaque série temporelle un terme saisonnier approximé par une somme de sinus et cosinus d'une période de 365 jours. Cette opération affecte principalement les corrélations entre les paramètres de vagues et les chroniques piézométriques, avec notamment une diminution du coefficient de corrélation maximal de ~ 0.1 pour la hauteur significative et la période.

4.4. RESULTATS DU MODELE DE REGRESSION LINEAIRE MULTIPLE (MLR)

Les analyses de corrélations (4.3.3) ont permis de déceler des liens statistiques marqués entre les conditions marines et le niveau piézométrique PG1. Nous avons aussi identifié que ces liens statistiques présentent des maxima à des décalages temporels qui diffèrent en fonction des conditions marines considérées.

Ces résultats nous amènent donc à construire un modèle de régression linéaire multiple pour évaluer, en première approche, dans quelle mesure le signal piézométrique peut être construit à partir des séries temporelles des différentes conditions marines. La variable indépendante Y_t considérée est donc la chronique piézométrique et les variables dépendantes explicatives sont la hauteur significative des vagues, leur période, la marée et la surcote. Par ailleurs, les variables explicatives sont décalées temporellement par rapport à la variable indépendante afin de les faire coïncider au décalage temporel correspondant à la corrélation maximale.

Il est toutefois important de rappeler que cette construction du modèle de régression linéaire multiple est une analyse très préliminaire qui permet de donner un premier aperçu de l'intérêt d'une analyse croisée entre le niveau piézométrique et les conditions environnementales extérieures mais dont les résultats doivent être appréciés avec prudence. En effet, la formulation proposée ne respecte pas les conditions de Gauss-Markov puisque les données de vagues à la Bouée Yeu Nord et les surcotes ne sont pas indépendantes (le coefficient de corrélation ρ entre les deux chroniques est de 0.47).

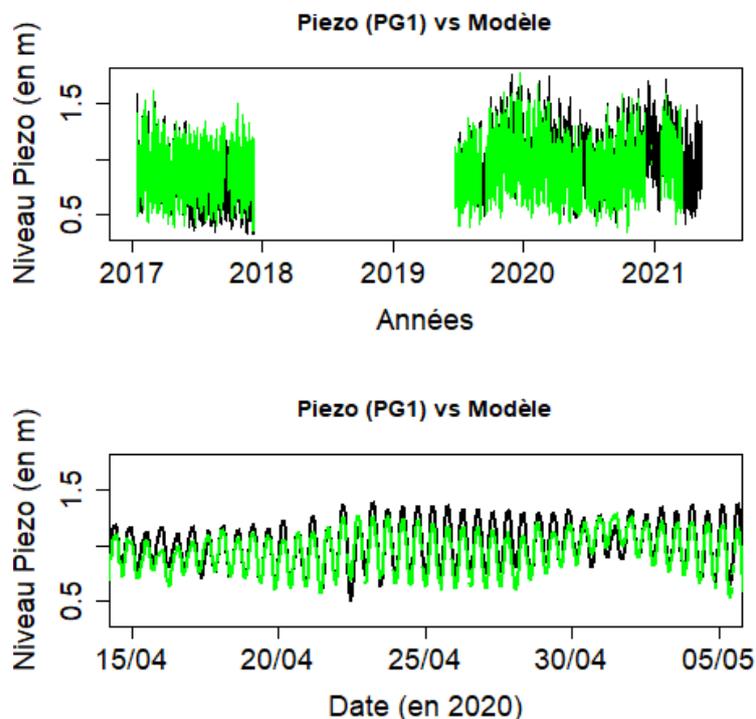


Illustration 67 : Superposition de la chronique piézométrique PG1 (en noir) avec la chronique reconstruite à partir du modèle de régression de linéaire multiple (en vert). Le diagramme du bas représente un zoom sur 1 mois.

L'illustration 67 montre un exemple de résultat obtenu à partir du modèle linéaire. Le coefficient de détermination ρ^2 entre la chronique prédite par le modèle (en vert) et la chronique observée est de 0.71, ce qui indique une reconstruction satisfaisante. Il est à noter cependant que le retrait du terme de marées dans le modèle conduit à une très forte dégradation de la prédiction avec un coefficient de détermination qui chute à 0.23. Les autres termes (paramètres de vagues et surcote) ont une influence plus modérée sur le résultat final. Il est à noter également que si l'on ne tient pas compte des décalage temporels α (c.-à-d. en considérant $\alpha=0$, cf. équation 4.1), le score du modèle est aussi dégradé avec un coefficient de prédiction qui chute à 0.47.

Ces résultats sont cependant à considérer avec une grande précaution car, outre le non-respect des conditions de Gauss-Markov sur la non-colinéarité des variables explicatives, l'analyse des résidus révèlent que ceux-ci ont une autocorrélation significative. Ceci a pour conséquence de sous-estimer l'erreur sur les coefficients de régression β_i et peut conduire à une surestimation de la qualité du « fit » (c.-à-d. du coefficient de détermination).

En résumé, ces résultats préliminaires indiquent que la prédiction de niveaux piézométriques par les conditions de forçage extérieures marines (et météorologiques – même si cela n'a pu être testé ici) est atteignable, mais cela nécessite un travail important sur les méthodes statistiques à mettre en œuvre et les variables à considérer pour mieux cerner la pertinence et le potentiel de tels modèles.

4.5. CONCLUSIONS SUR L'ANALYSE CROISEE ET LE MODELE MLR

L'analyse croisée entre conditions marines et données piézométrique a pu être testée sur la période 2017-2021 à l'aide de corrélations et méthodes de régression linéaires.

Cette première phase de travaux dans l'élaboration d'un modèle MLR conduit à trois points conclusifs :

- Des corrélations substantielles ont pu être identifiées entre le niveau d'eau piézométrique et (1) la marée, (2) la surcote et (3) le Hs. En revanche, le Tp ne montre pas vraiment de corrélation, et celle-ci disparaît quasi totalement lorsqu'on enlève le cycle saisonnier. Le retrait du cycle saisonnier n'a pas d'impact sur les corrélations avec marée, surcote et Hs.
- Les corrélations sont maximisées avec des déphasages temporels qui varient en fonction des conditions marines considérées. Cela suggère un retard de la réponse du piézomètre de 1h30 par rapport à la marée, de 2 jours par rapport à la surcote et de $\sim 1/2$ journée par rapport au Hs.
- En tenant compte des déphasages, le modèle linéaire basé sur les conditions marines nous permet d'ajuster les observations avec un R^2 supérieur à 0.71. Le R^2 est nettement amélioré par la prise en compte de ces déphasages temporels. **En revanche, les résidus sont fortement autocorrélés et ceci n'est pas amélioré lorsque le cycle saisonnier est enlevé, ce qui entraîne une violation des conditions de Gauss-Markov. Les résultats sont à considérer, à ce stade, avec précaution.**

5. Perspectives

5.1. POURSUITE DE L'ACQUISITION

La pérennisation de l'acquisition de chroniques piézométriques est indispensable pour apporter plus de robustesse aux analyses, à l'établissement de modèles et à la caractérisation de changements à long terme. Cette action de suivi de l'état hydrostatique des eaux souterraines est assurée par l'entretien, la maintenance et la surveillance des équipements de mesure. Des interventions sur site seront indispensables pour collecter les données non télétransmises, étalonner les mesures, remplacer les équipements et vérifier le bon fonctionnement des instruments.

La mise en sécurité de certains sites doit être poursuivie afin de limiter le risque de vandalisme et/ou accident, et de surcroît garantir la collecte continue des données.

Tous les piézomètres instrumentés dans le cadre de l'étude sont sur des sites appartenant à l'ONF. Une convention d'usage est en cours avec l'ONF.

L'acquisition pourrait également être élargie à la surveillance de la position du biseau salé, par la réalisation de mesures de conductivité électrique. Dans le contexte présent, la mesure de conductivité dans les eaux souterraines et/ou de surface indique le degré d'interaction de l'eau de mer avec la nappe d'eau douce des sables dunaires.

Il serait intéressant en particulier de surveiller la variabilité éventuelle du biseau salé.

Une campagne de mesure de conductivité électrique était ainsi initialement prévue lors d'évènements météo-marins importants et/ou de conditions hydriques marquées (vives eaux marines, hautes eaux souterraines), mais le contexte sanitaire auquel s'ajoute la dégradation des équipements n'ont pas permis de trouver la bonne fenêtre d'acquisition sur la durée du présent projet.

Cette acquisition de profils de conductivité pourra être reconduite lors d'une prochaine mission. Néanmoins, il pourrait être envisagé, pour suivre le paramètre de conductivité, d'équiper PG1 d'une sonde enregistreuse autonome multi paramètres.

5.2. COMPREHENSION PHYSIQUE DU SYSTEME ET MODELE PREDICTIF

Les résultats de notre étude préliminaire ont été obtenus à partir d'un modèle linéaire simple qui repose sur l'existence de liens statistiques que l'on a pu établir entre les différentes données dont nous disposons. Ces résultats préliminaires prometteurs requièrent désormais de mieux comprendre les phénomènes physiques à l'œuvre afin d'améliorer le modèle prédictif et de pouvoir établir des relations de causalité entre les indicateurs environnementaux et le signal piézométrique.

En particulier, il y a la nécessité d'affiner les (1) composantes marées, (2) les ondes de tempêtes (surcote totale : surcote atmosphérique + setup), et (3) l'infiltration efficace.

Analyse des composantes de marées :

Pour caractériser plus finement la réponse piézométrique à la marée, une approche possible est d'estimer les amplitudes et phases des composantes de marée au sein du signal de niveau d'eau et au sein du signal piézométrique. Pour chacune de ces composantes (Illustration 68), on peut ensuite calculer les coefficients d'amortissement et de déphasage. Pour un exemple de ce type d'analyse, fait uniquement sur l'onde M2, voir les travaux de Trglavcnik et al. (2018). Cette analyse nous semble intéressante car chaque composante ayant des périodes différentes (de quelques heures à plusieurs années), la réponse attendue dans le piézomètre devrait être assez différente, et les distances de propagation dans la nappe aussi.

N.B. : L'onde de marée peut être décomposée en une série d'harmoniques. Ces harmoniques ayant des périodes incommensurables entre elles, la marée est un signal non périodique. Elle ne se répète jamais à l'identique (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). L'harmonique principal est la composante lunaire semi-diurne, provoquée par la résultante de l'attraction gravitationnelle de la Lune sur la Terre et de la force centrifuge.

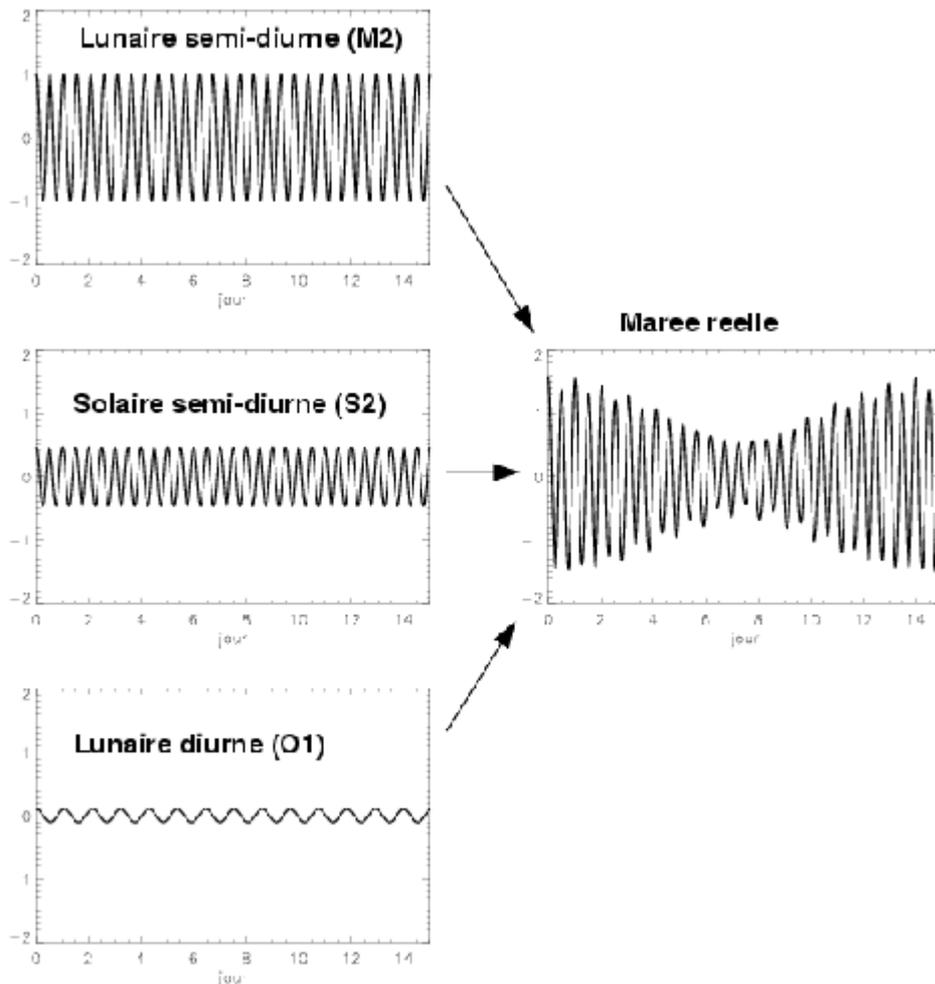


Illustration 68 : Schéma illustratif en ne considérant que trois composantes de marées (copyright IFREMER)

Analyse des ondes de tempêtes :

Concernant les ondes de tempêtes, dans un premier temps, une analyse des corrélations entre piézomètre et surcote totale pourra être réalisée. Par surcote totale on entend la surcote résultant de la surcote atmosphérique et du wave setup (surcote induite par le déferlement des vagues). Le wave setup pourra être estimé par une formule empirique (ex: Hanslow & Nielsen (1993) comme dans l'étude de Trglavcnik et al. (2018), ou Stockdon et al. (2006) qui intègre le paramètre pente de plage et est plus précise). Une analyse plus fine pourra être réalisée sur quelques événements de tempêtes, visant à caractériser la distance de propagation de ces événements de tempête au sein de la nappe.

Amélioration de l'estimation des infiltrations efficaces

Afin de parfaire cette analyse de corrélation entre la piézométrie et les données météorologiques, deux pistes sont envisageables, tout d'abord faire l'acquisition des données météorologiques au pas de temps horaire, et dans un second temps prendre en compte une infiltration déduite du calcul de la pluie efficace.

Cette nouvelle approche pourra être développée lors d'un prochain exercice, dans la continuité des actions de l'OLPM.

5.3. CHANGEMENTS ENVIRONNEMENTAUX

Une première version de modèle relationnel a été établie pour un signal piézométrique donné. Sa construction doit être poursuivie (cf. 5.2) pour établir une relation MLR permettant de faire de la prévision.

Si cet objectif est atteint, ce modèle peut être étendu en d'autres points de l'espace littoral sachant que les composantes dimensionnelles du MLR vont changer, voire qu'il faudra en ajouter (infiltration des eaux de la STEP, prélèvements du golf...).

Les conditions météo-marines que nous avons mises en relation avec le signal piézométrique (c.à.d. la pluviométrie, la température, les vagues, ...) sont à même d'être modifiées (p.ex. fréquence et intensité des précipitations) sous l'effet du changement climatique. Les simulations des modèles climatiques réalisées dans le cadre du GIEC et décrivant différents scénarios d'évolution du climat, pourraient donc être utilisées pour caractériser les changements à long-terme des conditions météo-marines.

Il faut également dans ces projections intégrer la mobilité du trait de côte (recul, accrétion ...) qui entrainerait une variabilité dans le temps des ou de certaines composantes du modèle relationnel.

Il importe donc d'améliorer le modèle prédictif avec toutes les connaissances en notre possession et surtout de le construire avec un lien physique - pas seulement statistique.

Après, dans la mesure où il déterminé que certaines variables ont un rôle explicatif important - même si le modèle est très imparfait - et que ces variables sont susceptibles d'être modifiées par le CC, alors il envisageable de regarder comment leur changement peut affecter le système (avec les incertitudes associées).

Au travers d'un modèle de nappe prédictif validé et dont les limites auraient été bien évaluées, il serait possible de commencer à explorer les effets du changement climatique sur l'hydrosystème dunaire.

Les résultats des analyses de séries temporelles pourraient être mis en perspective avec des indicateurs du changement climatique ou des changements globaux, ayant un impact sur les eaux souterraines continentales et par extension au système dunaire.

D'ores et déjà, il pourrait être envisagé d'étudier quel type de modèle pourrait être utilisé, en comparant les apports de ces différents outils, pour mieux cerner le fonctionnement des écoulements souterrains à l'interface terre-mer, que ce soit pour répondre à la problématique locale ou pour développer la méthode de « déconvolution » du signal piézométrique mise en œuvre.

6. Contribution à la vie de l'observatoire

La contribution à la vie de l'observatoire a pour objectif principal de promouvoir l'observatoire. Dans ce cadre est prévue la participation à des réunions d'échanges avec les autres partenaires de l'observatoire, avec les acteurs locaux. Ces réunions ou temps d'échanges ont pour objectif d'échanger des informations, mais aussi de coordonner les actions des uns et des autres (notamment dans le cadre du comité de pilotage de l'observatoire), afin d'optimiser les interactions entre acteurs.

6.1. BIOTOPIA

A la demande de la communauté de communes d'Océan Marais-de-Monts, une échelle limnimétrique a pu être installée au niveau de la mare de Biotopia. Cet outil pédagogique a pour objectif d'intégrer les écoles locales au suivi du niveau d'eau de la nappe.

6.2. COMMUNICATION

Un premier point-presse s'est tenu vendredi 10 mai 2019 lors d'une mission de terrain de reconnaissance en compagnie de l'ONF, pour l'équipement des mares.

Il a donné lieu notamment à un article publié dans le Ouest-France du 16 mai 2019 (Illustration 69).



Notre-Dame-de-Monts

Le sous-sol, de la dune à la forêt, analysé



Vivien Baudoin, Valentin Metereau agent de l'office national des forêts, Jean Magne et Julie Billy ont vérifié le niveau et la qualité des mares en forêt.

CRÉDIT PHOTO : OUEST-FRANCE

« Le but est de vérifier le niveau des mares avec les sondes piézométriques », indique Vivien Baudoin, chef du projet pour le bureau de recherches géologiques et minières (BRGM) « L'intérêt est de voir l'influence des marées en lien avec le toit des nappes phréatiques pour comprendre le cheminement en forêt que l'on connaît peu. »

Le tracé de ces nappes est influencé par la topologie des milieux sableux et de l'élévation du niveau marin. « Il arrive que nous ayons des variations de plus d'un mètre sachant qu'un massif important de sable sur la dune permet un meilleur stockage de l'eau douce. Le système dunaire est un système éphémère synchronisé avec le marais poldérisé », ajoute Julie Billy du BRGM d'Orléans.

Trois méthodes d'analyse électrique, géo-radar et sismique-terrestre sont réalisées afin d'établir un graphique adéquat de ces milieux. « Aujourd'hui il y a de l'eau douce à 80 cm de profondeur, complète Gwenaëlle Bodéré du BRGM. Les renseignements de niveau sont plus probants lors des périodes d'hiver. »

27 % d'érosion

L'observatoire du littoral des Pays de Monts mis en place par la communauté de communes Océan-Marais de Monts est « pour nous un véritable laboratoire grâce à un foisonne-

ment de données nous permettant d'anticiper des solutions », souligne Vivien Baudoin. Une cartographie est aussi établie à deux périodes de l'année sur laquelle de nombreuses indications sont ressorties.

Elles permettent de comprendre le lien entre les eaux souterraines et la dune révélant différents comportements de sable selon qu'il soit sec ou humide. « Nous sommes sur une partie mouvante qui se modifie avec les tempêtes et avec du sable qui recule », indique Jean Magne, chef du pôle environnement à la communauté de communes. « Cela se caractérise sur les zones du Pont-d'Yeu, la plage de la Bergère et à Fromentine avec 27 % d'érosion sur les 19 km de dunes allant de Saint-Jean-de-Monts à La Barre-de-Monts. Nous solutionnons par la mise en place de fil lisse qui canalise les flux touristiques et engendre 34 % d'engraissement de la plage. Tous les quatre ans, un rechargement en sable issu du dragage du chenal de Fromentine complète l'action pour un montant de 15 000 €.

Dans ces milieux, « tout est important que cela soit la canalisation, la laisse de mer et l'écosystème de la dune. Si on enlève ou détruit un de ces éléments, cela aura une conséquence sur l'homme », conclut Jean Magne.

A l'occasion du démarrage de la campagne piézométrique de hautes-eaux de mars 2021, un deuxième point-presse organisé par la Communauté de Communes Océan-Marais de Monts s'est tenu le mardi 16 mars sur le site de la Parée Grollier.

Il a permis d'aborder un ensemble de sujets et d'actions en lien étroit avec le programme de l'OLPM :

- Présentation OLPM, objectifs, actions et partenaires (Jean MAGNE)
- Présentation de la campagne piézométrique et du suivi piézométrique par le BRGM (Vivien BAUDOIN, Thibault DE CATHELINEAU)
- Actions de l'ONF sur milieu dunaire (Guillaume SIMON)
- Invitation pour autre action : rechargement de sable sur la plage de la Bergère (Jean MAGNE)

Plusieurs médias s'étaient déplacés pour l'occasion, notamment Ouest-France et TV Vendée.

L'article de Ouest-France a été publié le 22 mars 2021 (Illustration 70).

Sur TV Vendée, le reportage intitulé « Une nouvelle technique pour étudier l'évolution du littoral dans le Pays de Monts » a été diffusé dans le journal de 18h lors de l'édition du 19 mars 2021 (<https://tvvendee.fr/journal/edition-du-19-mars-2021-18h/>).

La nappe phréatique est sondée en forêt

Notre-Dame-de-Monts — Sonder la nappe phréatique du massif dunaire s'appelle une campagne piézométrique. C'est ce que réalise le BRGM, afin de cartographier cette présence d'eau.

Pourquoi ? Comment ?

Une campagne piézométrique, c'est quoi ?

C'est un moyen de « cartographier la nappe phréatique au sein du système dunaire », explique Vivien Baudouin, chef de projet au bureau des recherches géologiques et minières (BRGM). Une campagne avait été réalisée en période de basses eaux après l'été 2015. « Actuellement, nous sommes en période de hautes eaux. Durant trois jours, nous allons acquérir une centaine de points en Pays de Monts » de la plage de la Grande Côte à La Barre-de-Monts jusqu'à l'hippodrome à Saint-Jean-de-Monts et même à la station des 60 Bornes.

Pour quoi faire ?

« Nous allons pouvoir étudier l'évolution de la nappe entre deux étapes, et l'interaction entre les eaux continentales et le niveau marin, déclare Vivien Baudouin. Car l'océan effectue une pression créant une onde piézométrique qui s'amortit au fur et à mesure que nous nous éloignons de la plage ». Dans le contexte de changement climatique, ces données s'avèrent « un terreau d'informations utiles pour savoir comment cela se passe dans le milieu dunaire, comment les eaux circulent. À terme, il s'agit d'arriver à réaliser une représentation modélisée pour que tous se l'approprient et pour alimenter aussi Biotopia ». Jean Magne, ingénieur risques littoraux à la communauté de communes Océan-Maraais-de-Monts, acquiesce : « Les milieux sont tellement complexes et évoluent tellement, qu'il nous faut un panel d'infos permettant d'être plus précis dans leur gestion. »

Comment cette campagne se déroule-t-elle ?

Suite à des carottages réalisés dans le cadre d'autres études, le BRGM a conservé les trous pour y installer un



La campagne piézométrique s'effectue également au niveau des mares dispersées en forêt des Pays de Monts. Là, le niveau de la mare par rapport au niveau de la mer est noté scrupuleusement par ces deux techniciens du BRGM. Photo: Ouest-France

appareil capteur, appelé piézomètre. C'est le cas à l'entrée de la plage de la Parée Grollier. Traversant toutes les séries sédimentaires jusqu'au toit du rocher à douze mètres de profondeur, « ce piézomètre contient une sonde de pression qui enregistre la hauteur d'eau », précise Thibaud de Cathelineau, technicien géologue du BRGM. « Il enregistre en continu les niveaux d'eau que nous étudions en fonction des marées », reprend Vivien Baudouin. « Cela s'apparente à de l'imagerie médicale, mais appliquées à la nappe phréatique. La particularité de cette campagne est de s'appuyer aussi sur le réseau de mares car il existe une multitude de facteurs qui les font évoluer tels que les pluies et le coefficient de marées. » Ces mares traduisent également le niveau d'eau dans la nappe phréatique.



Jean Magne, ingénieur risques littoraux, Vivien Baudouin, chef de projet au BRGM et Thibaud de Cathelineau technicien au BRGM, étudient le mouvement de la nappe phréatique, grâce à ce piézomètre, sorte de poteau gns situé à la plage de la Parée Grollier. Photo: Ouest-France

Illustration 70 : Article publié dans le Ouest-France du 22 mars 2021

7. Conclusion

A la date de rédaction du rapport, le réseau en fonctionnement pour le suivi piézométrique de l'Observatoire du Littoral des Pays de Monts, est composé de 6 sites de surveillance (4 piézomètres et 2 mares). Ces sites sélectionnés sont équipés de sondes d'enregistrement de niveaux d'eau avec des mesures acquises au pas de temps de 15 minutes. Lorsque le site le permet, un système de télétransmission a été installé, soit sur 3 sites. Celui-ci offre, en outre, la possibilité de suivre à la demande l'état piézométrique de l'aquifère libre du système dunaire.

Une campagne piézométrique de hautes eaux a été conduite en mars 2021 sur 121 points de mesures nivelés au DGPS. La carte piézométrique (isopièzes) de hautes eaux a pu être établie, et la carte d'épaisseur de la zone non saturée (ZNS) de hautes eaux a pu être élaborée. La reprise de la piézométrie de basses eaux réalisée en 2014, à partir des jeux de données de l'OLPM, a permis, par comparaison de ces deux états hydrogéologiques, de basses et de hautes eaux, l'établissement d'une cartographie du battement de la nappe.

Ces différentes cartographies font apparaître des secteurs de niveaux d'eau proches de la surface, potentiellement sensibles au phénomène de remontée de nappe.

Les chroniques piézométriques constituent, quant à elles, un prérequis pour comprendre le fonctionnement et la réponse de l'hydrosystème du milieu dunaire, au regard de variables environnementales (anthropiques, météorologiques et marines), et de leurs évolutions possibles face aux changements environnementaux.

Un premier travail d'interprétation du signal piézométrique a consisté à le croiser avec d'autres facteurs environnementaux tels que la pluviométrie, l'évapotranspiration, les niveaux de mer et l'énergie des vagues. Ces premières analyses constituent un préalable à l'élaboration d'un modèle de régression linéaire multivarié (MLR), par la décomposition du signal piézométrique au regard des variables environnementales, et à la compréhension des phénomènes en jeu.

En outre, les premières analyses de corrélation avec des facteurs météo-marins qui interagissent avec l'état piézométrique du milieu ont pu être approchées sur le site de la Parée Grollier, au droit du piézomètre le plus influencé par les fluctuations de niveaux de mer. Des corrélations substantielles ont pu être identifiées entre le niveau d'eau piézométrique et (1) la marée, (2) la surcote et (3) la hauteur significative des vagues (Hs).

En tenant compte des déphasages, le modèle linéaire basé sur les conditions marines a permis d'ajuster les observations avec un R^2 supérieur à 0.71. Le R^2 est nettement amélioré par la prise en compte de ces déphasages temporels. Cependant, des résidus subsistant sont fortement autocorrélés, et les résultats sont à considérer, à ce stade, avec précaution.

Ces premiers résultats, confrontés avec la littérature, offrent de nombreuses perspectives dans la poursuite de ce volet de travail sur la compréhension et le fonctionnement de l'hydrosystème du massif dunaire des Pays de Monts.

Le réseau de suivi a pour vocation à être maintenu dans le temps, en étroite collaboration entre le BRGM, l'ONF et la Communauté de Communes Océan-Marais de Monts, afin de disposer de chroniques piézométriques suffisamment longues pour apporter de la robustesse dans la modélisation et les projections qui pourront être établies.

8. Bibliographie

Barthélémy Y., Seguin J.-J., Wuilleumier A., Courrioux G., Bourguine B. (2016) - Modélisation maillée des écoulements souterrains. Principes, démarche et recommandations. Rapport final. Version 2 . BRGM/RP-62549-FR, 140 p., 3 ann.

Baudouin V., Garcin M., Deparis J., Plat E., Bitri A, Portal A. - Méthode pluridisciplinaire de caractérisation physique des systèmes dunaires côtiers. *Journées Nationales Génie Côtier - Génie Civil - JNGCGC 2018*, May 2018, La Rochelle, France. [hal-01778543](https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-01778543)

Carr, P. A., & Van Der Kamp, G. S. (1969). Determining aquifer characteristics by the tidal method. *Water Resources Research*, 5, 1023–1031. <https://doi.org/10.1029/WR005i005p01023>

Douez O., Bichot F. (2012) - Contribution à la gestion quantitative des ressources en eau à l'aide du modèle Crétacé du Sud Charentes. BRGM/RP-61056-FR, 201 p., 202 ill., 3 ann.

Guo, H., Jiao, J. J., & Li, H. (2010). Groundwater response to tidal fluctuation in a two-zone aquifer. *Journal of Hydrology*, 381, 364–371. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2009.12.009>

Housego R., Raubenheimer B., Elgar S., Cross S., Legner C., Ryan D., (2021). Coastal flooding generated by ocean wave- and surge-driven groundwater fluctuations on a sandy barrier island, *Journal of Hydrology*, 603(B), 126920, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126920>

Hanslow, D., & Nielsen, P. (1993). Shoreline set-up on natural beaches. *Journal of Coastal Research*, 15, 1–10.

Jiao, J. J., & Tang, Z. (1999). An analytical solution of groundwater response to tidal fluctuation in a leaky confined aquifer. *Water Resources Research*, 35, 747–751. <http://doi.org/10.1029/1998WR900075>

Le Guern C., Suaud S., Legras L., Fattal P., Gouguet L., Robin M., Baudouin V., Mallet C. avec la collaboration de Maanan M., Ramon N., Debaine F., Renaul R., Jaouen J., Conil P., Bouchet F., Favennec J. (2011) Observatoire du littoral des Pays de Monts - Synthèse des réalisations 2010, Rapport BRGM RP-59538-FR, 211 p.

Le Guern C., P. Fattal, L. Gouguet, V. Baudouin, M. Robin, M. Maanan, F. Debaine, J. Jaouen, R. Renault, M. Juigner, A. Durand, J. Coquin avec la collaboration de P. Conil et F. Bouchet (2012) Observatoire du littoral des Pays de Monts – Rapport d'avancement 2011, Rapport BRGM RP-61098-FR, 88 p.

Le Guern, M. Juigner, V. Baudouin, M. Robin, P. Fattal, C. Rollier, D. Marie, M. Maanan avec la collaboration de P. Conil, F. Debaine, L. Gouguet et F. Bouchet. (2013) – Observatoire du littoral des Pays de Monts – Synthèse 2012 des réalisations des partenaires scientifiques (IGARUN, ONF, BRGM), Rapport d'avancement 2012. BRGM/RP-62937-FR, 63 p.

OLPM (2015) – Observatoire du littoral des Pays de Monts – Synthèse 2013-2014 des réalisations des partenaires scientifiques (IGARUN, ONF, BRGM), Rapport d'avancement 2014, non publié.

Stockdon H.F., Holman R.A., Howd P.A., Sallenger A.H. (2006) Empirical parameterization of setup, swash, and runup, Coastal Engineering, Volume 53, Issue 7, <https://doi.org/10.1016/j.coastaleng.2005.12.005>

Raubenheimer, B., Guza, R. T., & Elgar, S. (1999). Tidal water table fluctuations in a sandy ocean beach. Water Resources Research, 35, 2313–2320. <https://doi.org/10.1029/1999WR900105>

Trglavcnik, V., Morrow, D., Weber, K. P., Li, L., & Robinson, C. E. (2018). Analysis of tide and offshore storm-induced water table fluctuations for structural characterization of a coastal island aquifer. Water Resources Research, 54, 2749– 2767. <https://doi.org/10.1002/2017WR020975>

SHOM (2020) Références Altimétriques Maritimes – Edition 2020.

Annexe 1

Coupes techniques des ouvrages suivis

Notre Dame de Monts – PG1 – BSS002PWCA

Cote		Prof.		Nature du terrain	Echantillons	Eau	Outil	Tubage	Equipement	% Carottage (%)			RQD (%)			Date
6,50	0,00									0	50	100	0	50	100	
					EI n°1				PVC plein	100		0				
				Medium dense light yellowish brown (10YR 6/4) fine to medium SAND with rare fragments of shells	EI n°2					100		0				
2,95	3,55															
2,70	3,80			Loose to medium dense light yellowish brown (10YR 6/4) medium to coarse SAND with few gravel	EI n°3					95		0				
				Medium dense light yellowish brown (10YR 6/4) fine to medium SAND with rare fragments of shells												
2,00	4,50															
1,80	4,70			Medium dense dark yellowish brown (10YR 4/4) fine SAND with few gravel												
1,30	5,20			Dense light yellowish brown (10YR 6/4) fine to medium SAND with rare fragments of shells	EI n°4		STS Ø102	TUB PW		95		0				
0,80	5,70			Dense light yellowish brown (10YR 6/4) medium to coarse SAND with few gravel, rare fragments of shells and some layers of fine sand												
				Dense light yellowish brown (10YR 6/4) fine to medium SAND with rare fragments of shells and gravel					PVC crépiné							
-0,35	6,85									100		0				
-0,50	7,00			Medium dense light yellowish brown (10YR 6/4) coarse SAND with many siliceous gravel	EI n°5											
-0,80	7,30			Dense light yellowish brown (10YR 6/4) fine SAND with rare fragments of shells												
-1,00	7,50			Dense light yellowish brown (10YR 6/4) fine to medium SAND with rare fragments of shells												
				Dense light yellowish brown (10YR 6/4) fine to medium SAND with a few gravel, rare fragments of shells, some layers of coarse sand (from 7.90 to 7.95m, from 8.55 to 8.70m, from 9.20 to 9.35m, from 9.40 to 9.45) and Soft brown (10YR 4/3) small layer of clay at 8.50m	EI n°6					95		0				
-3,05	9,55															
-3,50	10,00			Dense light yellowish brown (10YR 6/4) fine to medium SAND with rare fragments of shells and soft brown (10YR 4/3) small layers of clay (from 9.55 to 9.57m, from 10.25 to 10.27m)	EI n°7											

Observations :
 from 11.60 to 11.63m, from 11.81 to 11.85m)
 Coordonnées planimétriques en LAMBERT 93.
 Sondage avec injection de boue de forage : niveau d'eau non mesuré.
 Arrêt du sondage à 14.00m/TA.
 Pose d'un piézomètre long =14.00m, diam.=52/60mm, crépiné de 2.00 à 14.00m, avec tête de protection hors sol.

Logiciel JEAN LUTZ S.A - www.jeanlutza.fr

EXGTE 2.30

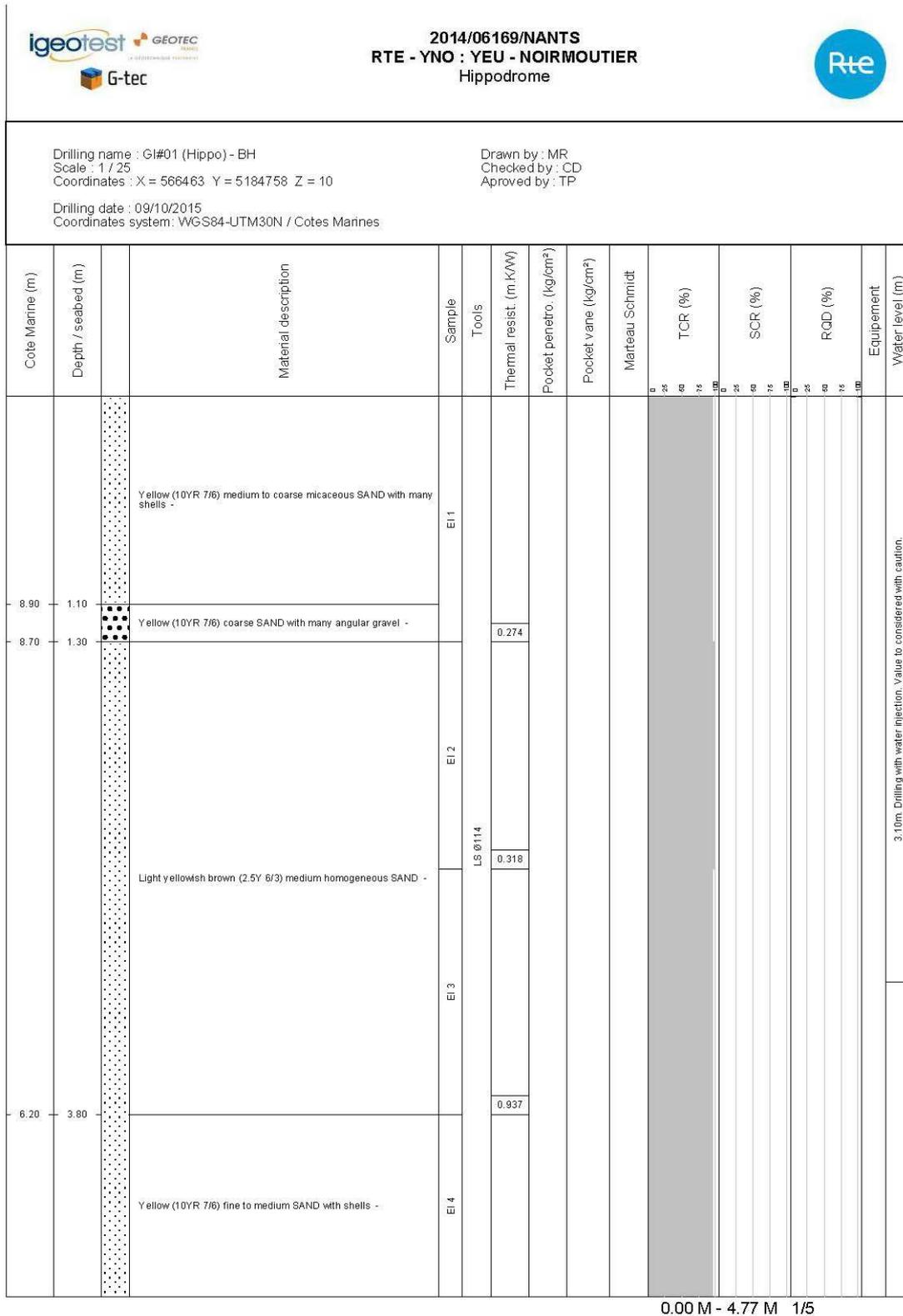
Notre Dame de Monts – PG3 – BSS002PWCB

GÉOTEC FRANCE LE GÉOTECHNIQUE PARTENAIRE		Sondage : SC5+Pz Inclinaison/Verticale :		Date : 12/01/2017										
Site : NOTRE DAME DE MONTS		X : 308728.75 Y : 6651812.90		Echelle : 1/50										
Affaire : 2016/08348/NANTS		Z : 2,20 NGF		Page : 1/2										
Cote	Prof.	Nature du terrain	Echantillons	Eau	Outil	Tubage	Equipement	% Carottage (%)		RQD (%)		Date		
								0	50	100	0	50	100	
2,28	0,00	Loose dark brown (10YR 3/3) silty sand (topsoil)												
1,30	0,90	Loose to medium dense light yellowish brown (10YR 6/4) fine to medium SAND with dark brown (10YR 3/3) vegetal fragments	EI n°1				PVC plein	90			0			
		Medium dense to dense light yellowish brown (10YR 6/4) fine to medium SAND with rare fragments of shells	EI n°2					100			0			
			EI n°3					90			0			
-2,05	4,25	Dense light yellowish brown (10YR 6/4) medium to coarse SAND with gravel			STS									
-2,45	4,65	Dense bluish gray (GLE Y2 5/5B) fine to medium SAND			Ø102									
-2,80	5,00	Medium dense to dense bluish gray (GLE Y2 5/5B) medium to coarse SAND with rare fragments of shells	EI n°4			TUB PW	PVC crépiné	80			0			
-4,10	6,30	Dense bluish gray (GLE Y2 5/5B) fine to medium SAND	EI n°5					85			0			
-5,30	7,50	Medium dense light bluish gray (GLE Y2 7/10B) medium to coarse SAND with gravel and a few fragments of shells	EI n°6					100			0			
-6,10	8,30	Loose to medium dense light bluish gray (GLE Y2 8/10B) clayey SAND with sub angular gravel of limestone	EI n°7					100			0			
-6,30	8,50	Loose to medium dense light bluish gray (GLE Y2 8/10B) SAND with sub angular gravel of limestone	EI n°7					100			0			
-7,15	9,35	Weak to strong light bluish gray (GLE Y2 8/10B) very weathered LIMESTONE												
-7,80	10,00	Strong to very strong light gray (10YR 7/2) fractured and variously vacuolar LIMESTONE with some fossiliferous layers	Caisse n°1		LS									
					Ø114									

Logiciel JEAN LUTZ S.A. - www.jeanlutzsa.fr

Observations :
 Coordonnées planimétriques en LAMBERT 93.
 Sondage avec injection de boue de forage : niveau d'eau non mesuré.
 Arrêt du sondage à 10.50m/TA.
 Pose d'un piézomètre long. = 10.10m, diam. = 52/60mm, crépiné de 1.10 à 10.10m, avec tête de protection hors sol.

Saint Jean de Monts – HIPPODROME – 05345X0164



Bilan des actions 2018-2021 conduites pour l'Observatoire du Littoral des Pays de Monts (OLPM) : l'eau continentale et son rôle dans la bordure littorale.

Cote Marine (m)		Material description	Sample	Tools	Thermal resist. (m.K/W)	Pocket penetro. (kg/cm ²)	Pocket vane (kg/cm ²)	Marteau Schmidt	TCR (%)	SCR (%)	RQD (%)	Equipment	Water level (m)
Depth / seabed (m)													
4.90	5.10	Yellow (10YR 7/6) fine to medium SAND with shells -	EI 4		0.872								
			EI 5		1.657								
			EI 6	LS Ø114	1.739								
		Yellow (10YR 7/6) medium to fine SAND with shells and round quartz gravel Gravelly and coarser SAND between 6.90 and 7.10m. More shells from 9.00m. -	EI 7		1.954								
			EI 8										
0.25	9.75	Round quartz gravel with yellow (10YR 7/6) coarse SAND -											

4.77 M - 10.15 M 2/5

Annexe 2

Fiches ouvrages

PA27 _ 60 Bornes



Référence et localisation du point

Désignation : PA27 (60 bornes)
 Identification : 05602X0066
 Commune : Saint Hilaire de Rietz
 Lieu-dit : Les Petits Becs

Coordonnées (WGS84) : 2°2'22,0" O
 46°45'48,16"N
 315653,97 m
 Coordonnées (Lambert 93) : 6641519,23 m
 Z repère : 4,96 m
 Repère nivelé : bord du tube
 Date nivellement : 15/06/2020

Administratif

Nom propriétaire : ONF
 Adresse : 15 bd Léon Bureau
 Code postal : 44262
 Ville : Nantes
 Contact :
 Fonction :
 Téléphone :
 Nature autorisation : convention en cours
 Accès : Libre

Caractéristiques de l'ouvrage

Repère mesure niveau : Sommet tubage
 Profondeur : 11m
 Diamètre forage : 195mm
 Position des crépines : de 2,80 à 11m
 Diam. des tubes crépinés : 80mm

Contexte hydrogéologique

Aquifère suivi : sables dunaires
 Niveau statique max/min:
 Battement :

Mesure - Télétransmission

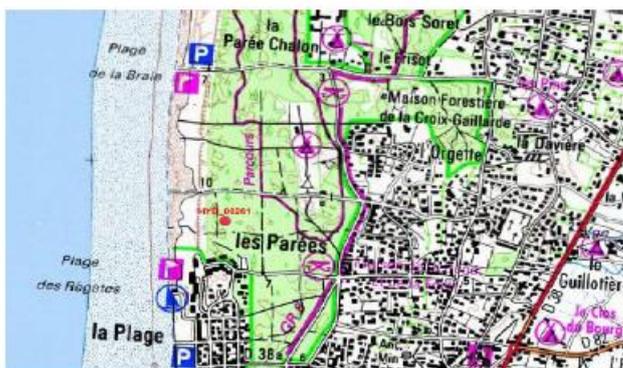
Capteur : Dipper PT
 Télétransmission : SlimCom

Observation

Piezomètre suivi à l'origine du projet SIBLES
 Equipé avec du matériel réformé du réseau DCE

Le piézomètre est télétransmis

BIOTOPIA



Référence et localisation du point		Contexte hydrogéologique	
Désignation :	Biotopia	Aquifère suivi :	sables dunaires
Identification :	BSS00BIOT	Niveau statique max/min :	
Commune :	Notre Dame de Monts	Battement :	
Lieu-dit :	Centre Biotopia		
Coordonnées (WGS84) :	2° 8'35.97"O 46°50'10.15"N		
Coordonnées (Lambert 93) :	308273,31 m 6650093,93 m		
Z repère :	1,15		
Repère nivelé :	bord du tube		
Date nivellement :	15/06/2020		
Administratif		Mesure - Télétransmission	
Nom propriétaire :	ONF	Capteur :	Dipper PT
Adresse :	15 bd Léon Bureau	Télétransmission :	SlimCom
Code postal :	44262		
Ville :	Nantes		
Contact :			
Fonction :			
Téléphone :			
Nature autorisation :	convention en cours		
Accès :	Libre		
Caractéristiques de l'ouvrage		Observation	
Repère mesure niveau :	Sommet tubage	Le capteur de pression est positionné dans un tube PVC crépiné enfoncé dans la mare.	
Profondeur :	30cm	Le système de télétransmission est fixé à l'arbre en haut de la mare.	
Diamètre forage :	NA	Le câble reliant le capteur au système de télétransmission est ensouillé dans la dune.	
Position des crépines :	le long du tube		
Diam. des tubes crépinés :	45mm		
		Le piézomètre est télétransmis	

GRANDE COTE



Référence et localisation du point

Désignation : Grande Côte
 Identification : OLPMXGC1
 Commune : La Barre de Monts
 Lieu-dit : Grande Côte

Coordonnées (WGS84) : 46°52'57.09"N
 2° 9'6.40"O
 Coordonnées (Lambert 93) : 307963,19
 6655273,53
 Z repère : 2,56
 Repère nivelé : bord du tube
 Date nivellement : 15/06/2020

Administratif

Nom propriétaire : ONF
 Adresse : 15 bd Léon Bureau
 Code postal : 44262
 Ville : Nantes
 Contact : Guillaume Simon
 Fonction : Technicien forestier du site
 Téléphone : 06 25 67 33 25
 Nature autorisation : convention en cours
 Accès : Libre

Caractéristiques de l'ouvrage

Repère mesure niveau : Sommet tube PVC
 Profondeur : 30cm
 Diamètre tube : 45mm
 Position des crépines : le long du tube

Contexte hydrogéologique

Aquifère suivi : sables dunaires
 Niveau statique max/min :
 Battement :

Mesure - Télétransmission

Capteur : Dipper PT
 Télétransmission : Sans

Observation

Le câble de la sonde est protégé par une gaine déposée au fond de la mare.
 L'extrémité du câble avec la connectique et le dessicant est caché dans les buissons au bord de la mare.

Le piézomètre n'est pas télétransmis



HIPPODROME



Référence et localisation du point

Désignation : Hippodrome
 Identification : 05345X0164
 Commune : Saint Jean de Monts
 Lieu-dit : Hippodrome de l'Atlantique

Coordonnées (WGS84) : 2° 7'43.94"O
 48°48'47.65"N
 Coordonnées (Lambert 93) : 309206,546 m
 6647462,883 m
 Z repère : 7,58
 Repère nivelé : bord du tube
 Date nivellement : 15/06/2020

Administratif

Nom Exploitant : Hippodrome de l'Atlantique
 Adresse : chemin du petit Sochard
 Code postal : 85160
 Ville : Saint-Jean-de-Monts
 Contact :
 Fonction :
 Téléphone :
 Nature autorisation : convention en cours

Caractéristiques de l'ouvrage

Repère mesure niveau : Sommet tubage
 Profondeur : 10,30 m
 Diamètre forage : inconnu
 Position des crépines : inconnu
 Diam. des tubes crépinés : inconnu

Contexte hydrogéologique

Aquifère suivi : sables dunaires
 Niveau statique max/min:
 Battement :

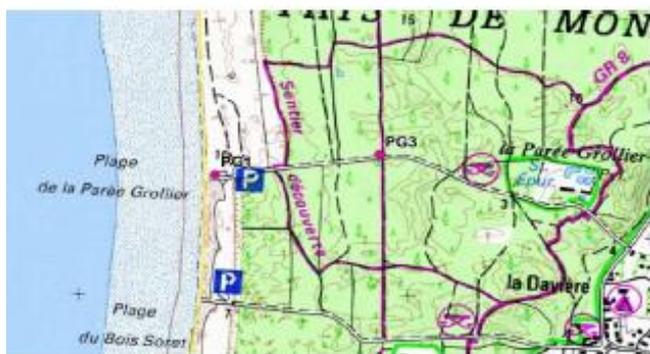
Mesure - Télétransmission

Capteur : Dipper PT
 Télétransmission : sans

Observation

Piezomètre abimé lors de fauchage
 Pas de système de télétransmission installé par manque de place et non fiabilité de la tête d'ouvrage
 Prévoir la mise en place d'une réhausse et margelle

PAREE GROLLIER 1



Référence et localisation du point

Désignation : Parée Grollier 1
 Identification : BSS002PWCA
 Commune : Notre Dame de Monts
 Lieu-dit : La Parée Grollier

Coordonnées (WGS84) : 2° 8'42.86"O
 46°51'3.48"N

Coordonnées (Lambert 93) : 308229,415 m
 6651745,666 m

Z repère : 7,43
 Repère nivelé : bord du tube
 Date nivellement : 15/06/2020

Administratif

Nom propriétaire : ONF
 Adresse : 15 bd Léon Bureau
 Code postal : 44262
 Ville : Nantes
 Contact :
 Fonction :
 Téléphone :
 Nature autorisation : convention en cours
 Accès : Libre

Caractéristiques de l'ouvrage

Repère mesure niveau : Sommet tubage
 Profondeur : 14
 Diamètre forage : 102mm
 Position des crépines : 2 à 14m
 Diam. des tubes crépinés : 60mm

Contexte hydrogéologique

Aquifère suivi : sables dunaires
 Niveau statique max/min:
 Battement :

Mesure - Télétransmission

Capteur : Dipper PT
 Télétransmission : Sans

Observation

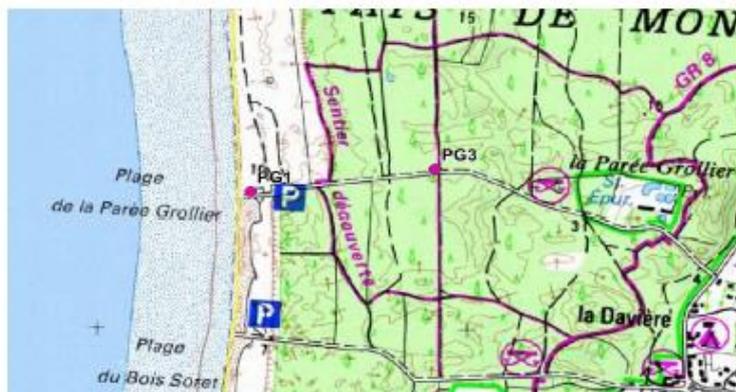
Piézomètre vandalisé régulièrement
 Matériel détérioré ou volé

Mise en place d'une réhausse et d'un capot anti-v
 L'antenne galet permettant la télétransmission de
 est arrachée.

La décision de ne pas la remplacer a été prise.

Le piézomètre n'est plus télétransmis

PAREE GROLLIER 3



Référence et localisation du point

Désignation : Parée Grollier 3
 Identification : BSS002PWCB
 Commune : Notre Dame de Monts
 Lieu-dit : La Parée Grollier

Coordonnées (WGS84) : 2° 8'19.58"O
 46°51'6.72"N
 308727,934 m
 Coordonnées (Lambert 93) : 6651814,161 m
 Z repère : 2,95
 Repère nivelé : bord du tube
 Date nivellement : 15/06/2020

Administratif

Nom propriétaire : ONF
 Adresse : 15 bd Léon Bureau
 Code postal : 44262
 Ville : Nantes
 Contact :
 Fonction :
 Téléphone :
 Nature autorisation : convention en cours
 Accès : Libre

Caractéristiques de l'ouvrage

Repère mesure niveau : Sommet tubage
 Profondeur : 10,50 m
 Diamètre forage : 102mm
 Position des crépines : de 1,10 à 10,10m
 Diam. des tubes crépinés : 60mm

Contexte hydrogéologique

Aquifère suivi : sables dunaires
 Niveau statique max/min:
 Battement :

Mesure - Télétransmission

Capteur : Dipper PT
 Télétransmission : SlimCom

Observation

Piezomètre vandalisé régulièrement
 Matériel détérioré ou volé

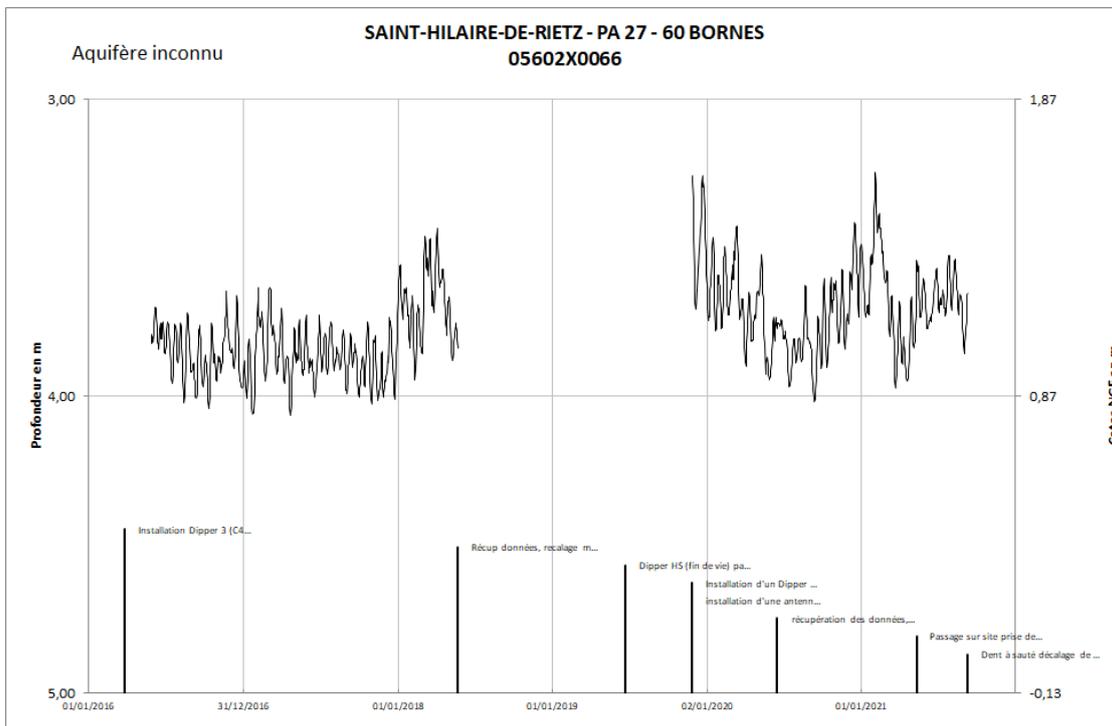
Mise en place d'une réhausse et d'un capot anti-violation

Le piézomètre est télétransmis

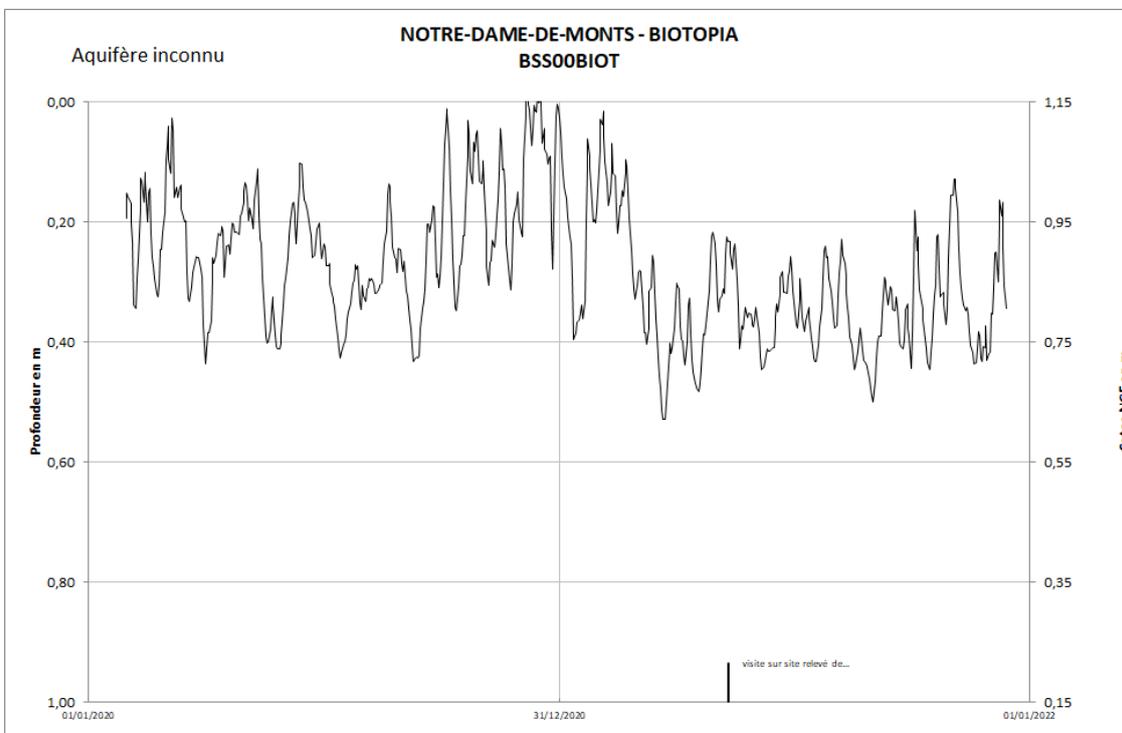
Annexe 3

Chroniques piézométriques

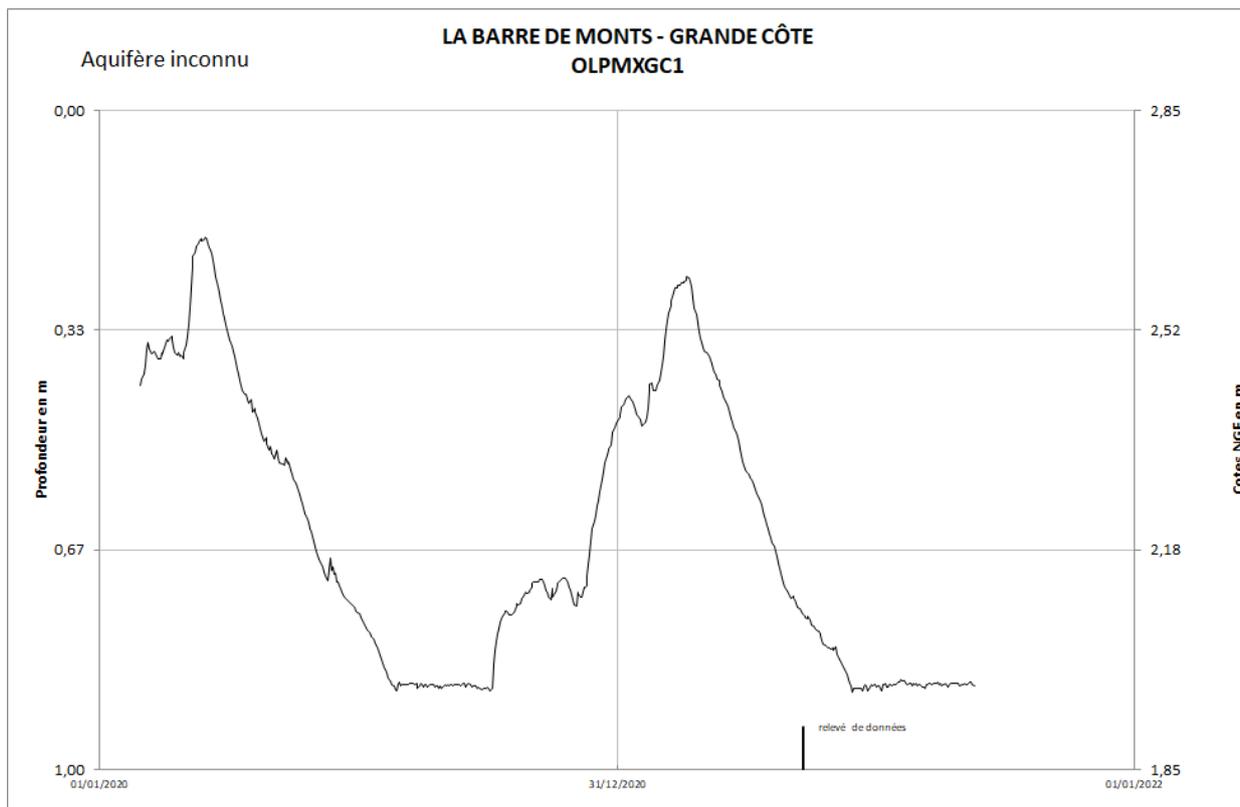
Saint Hilaire de Rietz - PA27 – 05602X0066



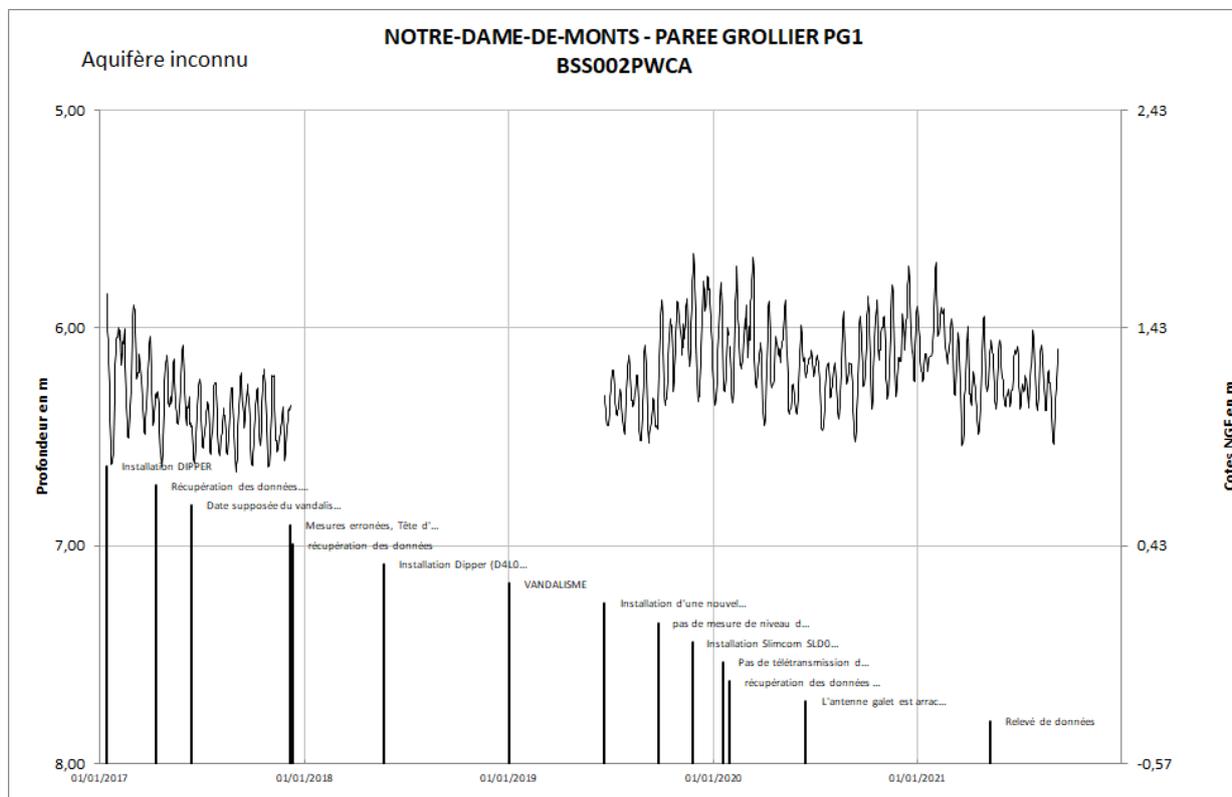
Saint-Jean-de-Monts – BIOTOPIA – BSS000BIOT



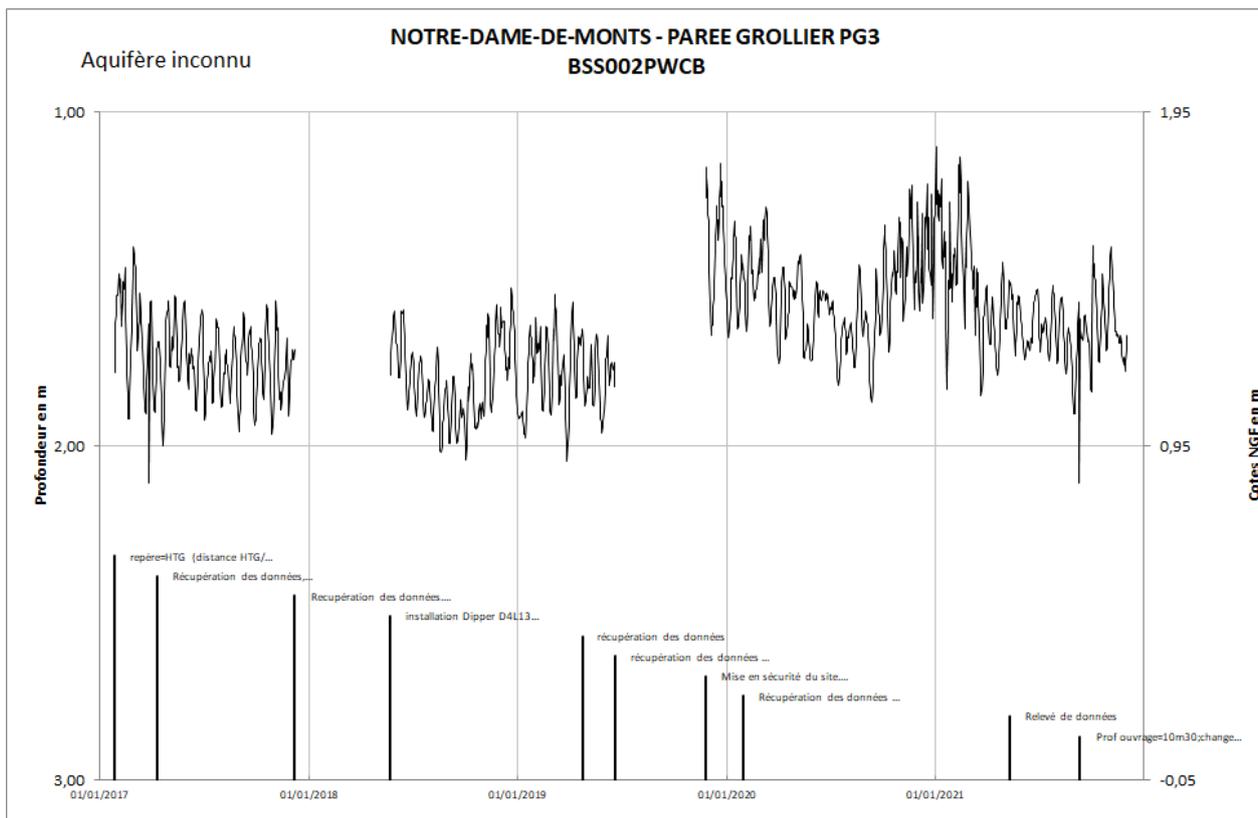
Notre Dame de Monts – Grande Côte – BSS000GC1



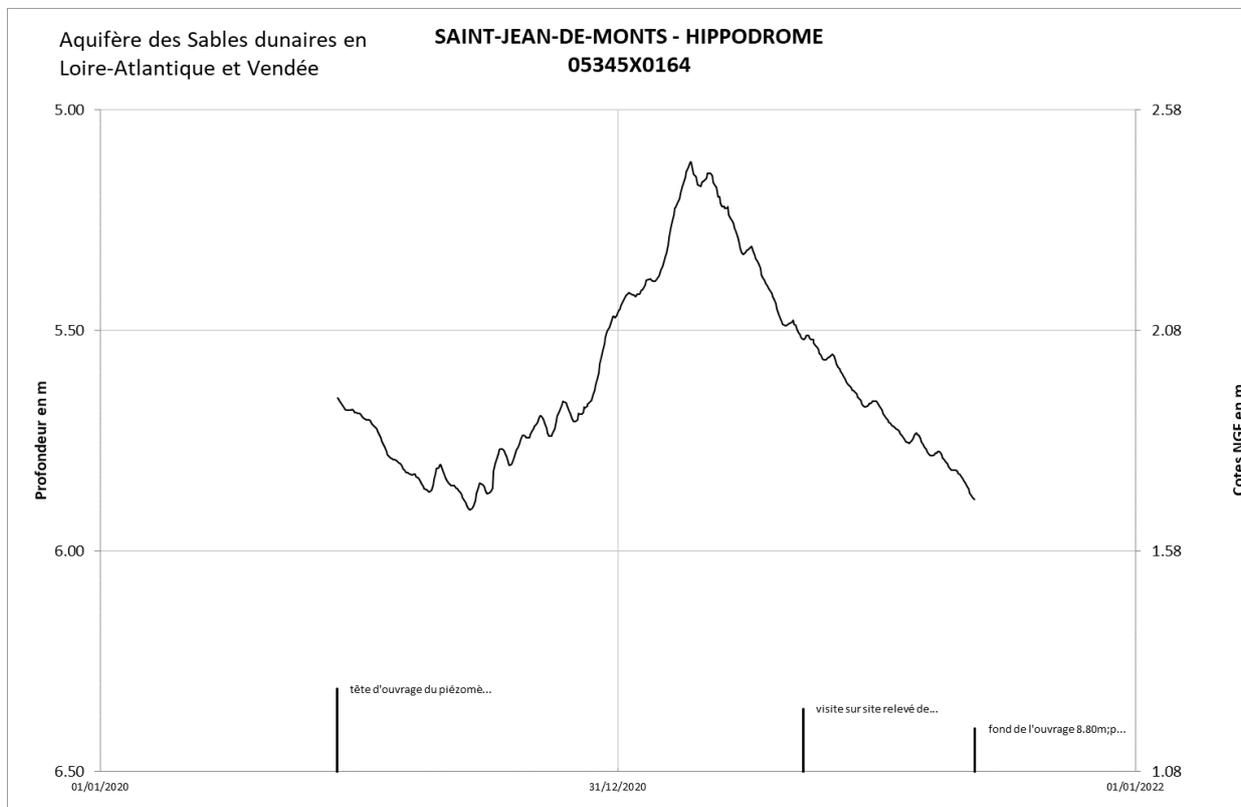
Notre Dame de Monts – PG1 – BSS002PWCA



Notre Dame de Monts – PG3 – BSS002PWCB



Saint Jean de Monts – Hippodrome– 05345X0164



Annexe 4

Fiche Thématique 4 : Quel rôle des eaux souterraines ?

Fiche Thématique 4

Quel rôle des eaux souterraines ?

Les eaux souterraines littorales : cachées mais importantes

Une présence sur tout le territoire

Les eaux souterraines sont présentes partout sur le territoire. Participant à la ressource en eau douce, elles ont été une des conditions de l'installation de l'homme sur le Pays de Monts. De nombreux indices témoignent ainsi de leur présence (Figure 1), comme les puits recensés dans les dunes et les marais. Elles sont visibles également au niveau des mares littorales, qui illustrent la continuité entre les eaux souterraines et superficielles. Autre indicateur, les sources de plage correspondent à un des exutoires de la nappe à l'interface terre-mer, d'autres exutoires étant situés côté marais (étiers, ruisseaux) (Figure 2).



Figure 1 : Puits, sources de plage et mares indiquant la présence d'eaux souterraines sur le littoral montois (crédit photo OLPM)

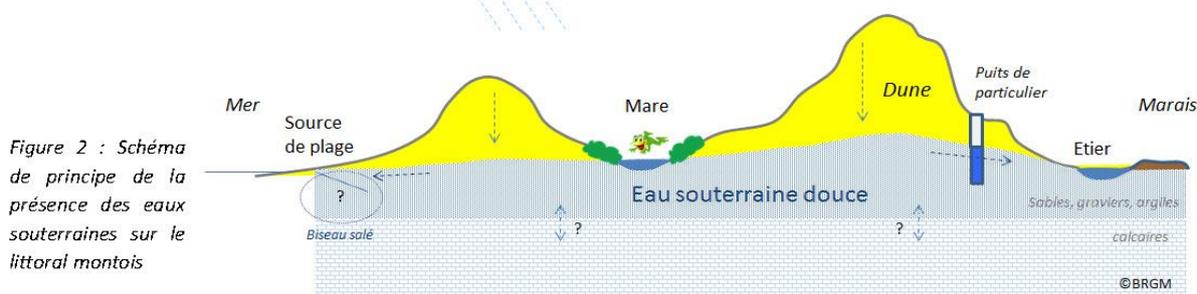


Figure 2 : Schéma de principe de la présence des eaux souterraines sur le littoral montois

Des rôles variés et souvent méconnus

Les eaux souterraines présentes sur le littoral jouent divers rôles :

- Ressource en eau douce (cf. puits et mares utilisées par l'homme et la faune sauvage) ;
- Contribution à la biodiversité (cf. chaîne alimentaire, abris permis par la végétation, lien avec les mares et leurs écosystèmes, ...). Plus proches points d'eau douce vis-à-vis du bord de mer, les mares accueillent ainsi dans les dépressions dunaires une biodiversité qui contraste avec un ensemble dunaire très sec et peu fertile ;
- Stabilité de certaines végétations dunaires (végétations aquatiques à Characées, Cératophylle inerme, Zannichellie pédicellée dans les mares, jonçaises et roselières près des mares, arbres forestiers qui résistent à la sécheresse en puisant l'eau de la nappe en profondeur) ;
- Protection contre l'érosion marine et éolienne (grâce à la cohésion du sable) ou à l'inverse participation à l'érosion du sable de plage (entraînement des grains lors de la vidange de chenaux ou à cause de la perte de cohésion du sable saturé en eau ou sec). Ce rôle est parfois mis à profit pour la gestion des plages (cf. procédé Ecoplage aux Sables d'Olonne), alors que la compréhension des mécanismes associés fait encore l'objet de travaux de recherche.

Des variations spatiales et temporelles

Les mesures des niveaux d'eau dans les puits et les mares permettent de cartographier les variations spatiales et temporelles d'altitude de la surface des eaux souterraines (Figure 3). Leur répartition spatiale (extension, profondeur) dépend de la nature et de la structure des formations géologiques du territoire. La surface de la nappe d'eau douce au niveau du système dunaire du Pays de Monts, plutôt régulière, est conditionnée par la nature des sédiments qui la contiennent (taille des grains) et la forme du relief (importance locale du massif dunaire).

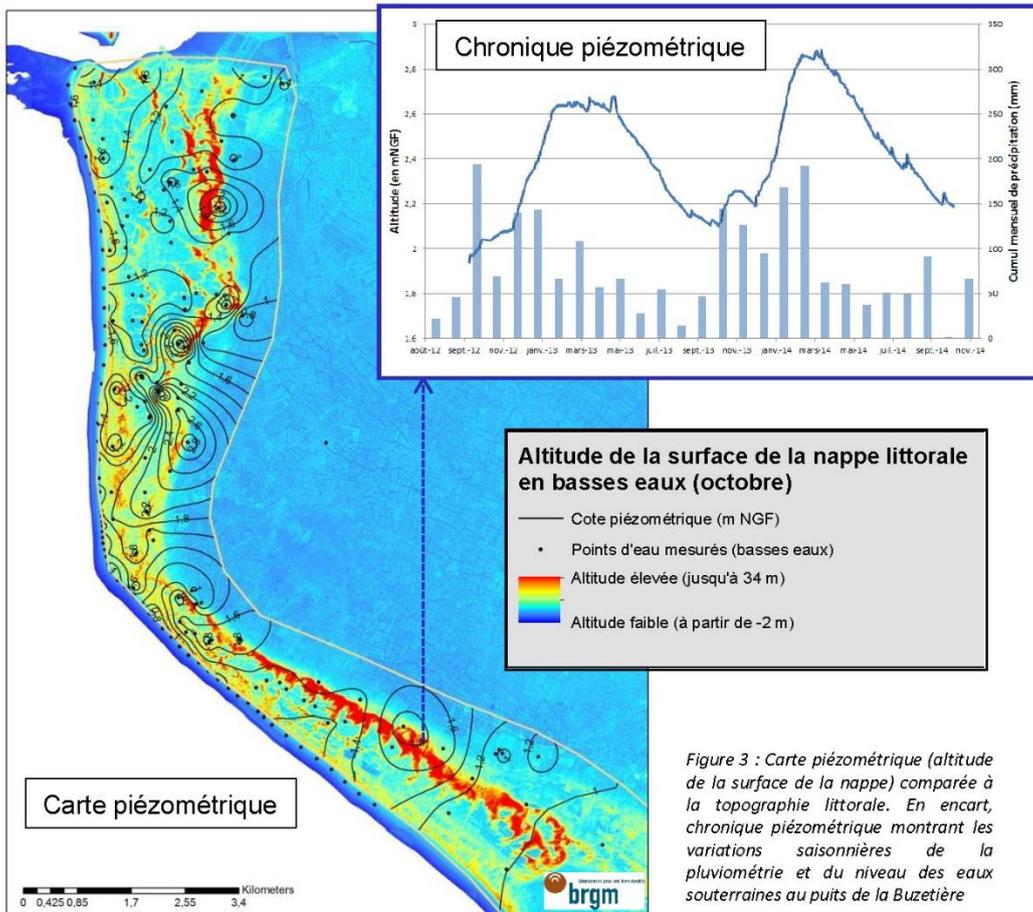


Figure 3 : Carte piézométrique (altitude de la surface de la nappe) comparée à la topographie littorale. En encart, chronique piézométrique montrant les variations saisonnières de la pluviométrie et du niveau des eaux souterraines au puits de la Buzetière

Du fait de leurs nombreuses fonctions, les eaux souterraines apparaissent comme une ressource précieuse à préserver, tant sur les plans qualitatif que quantitatif. L'observatoire du littoral a permis d'acquérir une première connaissance de ces eaux souterraines. La poursuite des suivis dans le temps (chroniques) permettra une gestion de plus en plus pertinente.



Pour en savoir plus

Sur les travaux de l'observatoire

Synthèses des réalisations des partenaires scientifiques (IGARUN, ONF, BRGM) dans le cadre de l'observatoire du littoral du Pays de Monts (OLPM) pour les années 2010 à 2014 : rapports consultables à Biotopia et sur Internet





Centre scientifique et technique
3, avenue Claude-Guillemain
BP 36009
45060 – Orléans Cedex 2 – France
Tél. : 02 38 64 34 34 - www.brgm.fr

Direction régionale Pays de Loire
1 rue des Saumonières
BP 92342
443323 – Nantes Cedex 3– France
Tél. : 02 51 86 01 51