



RAPPORT D'ETUDE

2024

Suivi annuel de l'expérimentation d'aplanissement de mottureaux de la Réserve Naturelle régionale du Marais communal du Poiré-sur-Velluire

Etude 2024-259



Responsables scientifiques du projet :
COSENZA Philippe – CANER Laurent
Participation au projet :
HEDAN Stephen
LAFOREST Claude



Laboratoire d'appui : UMR 7285 IC2MP/HydrASA, Université de Poitiers / ENSI Poitiers

Avec le concours financier de :



Table des matières

<i>1. INTRODUCTION ET PROBLEMATIQUE</i>	5
1.1 Contexte général	5
1.2 Rappel des résultats de l'étude de 2023	5
1.3 Objectifs de l'étude 2024	7
<i>2. MATERIELS ET METHODES</i>	9
2.1 Sondages à la tarière	9
2.2 Mesures de la teneur en eau	9
2.3 Nivellement géométrique relatif	9
2.4 Mesure de la résistance de pointe	10
2.5 Tomographie de résistivité électrique	11
2.6 Scanner laser 3D	12
<i>3. RESULTATS</i>	13
3.1 Placette 1	13
<i> 3.1.1 Profils topographiques</i>	13
<i> 3.1.2 Profils de résistance de pointe</i>	14
<i> 3.1.3 Profil de teneur en eau massique</i>	15
3.2 Placette 2	16
<i> 3.2.1 Profils topographiques</i>	16
<i> 3.2.2 Profils de résistance de pointe</i>	18
<i> 3.2.3 Profil de teneur en eau massique</i>	19
3.3 Placette 3	20
<i> 3.3.1 Profils topographiques</i>	20
<i> 3.3.2 Profils de résistance de pointe</i>	21
<i> 3.3.3 Profil de teneur en eau massique</i>	22
3.4 Comparaison entre placettes	23
<i> 3.4.1 Comparaison des profils topographiques</i>	23
<i> 3.4.2 Comparaison via une tomographie de résistivité électrique transversale aux trois placettes</i>	26
<i> 3.4.2 Comparaison des pénétrogrammes et des profils de teneur en eau</i>	27
3.4 Comparaison entre zones sans mottureaux et zones à mottureaux	28
<i> 3.5.1 Comparaison via les tomographies de résistivité électrique</i>	28
<i> 3.5.2 Comparaison via les pénétrogrammes</i>	28
<i> 3.5.3 Comparaison via les données du scanner laser 3D</i>	30
<i>4. DISCUSSION ET CONCLUSION</i>	34
4.1. La cinétique de « repousse » des mottureaux	34

4.2 L'incidence de la pâture	34
4.3. Les facteurs influents sur le mécanisme de formation des mottureaux	34
BIBLIOGRAPHIE	37

1. INTRODUCTION ET PROBLEMATIQUE

1.1 Contexte général

Le site étudié du Marais communal du Poiré-sur-Velluire est situé sur la commune des Velluire-sur-Vendée qui en est propriétaire. Il se situe au cœur du Parc naturel régional du Marais poitevin. Ce Marais communal a été classé en Réserve Naturelle Régionale (RNR) en 2012. La commune et la Région ont désigné le Parc naturel régional gestionnaire pour le Plan de gestion 2020-2025. Le marais est une prairie naturelle humide. Il est pâtré depuis le XII^e siècle en pâturage plurispécifique (vaches, chevaux, oies). Le marais de 241 ha n'aurait jamais été travaillé. Cette prairie humide n'est utilisée pour le pâturage qu'une partie de l'année lorsque le marais est « sec » et que la portance des sols est suffisante pour les animaux. En hiver le marais est couvert d'eau douce provenant de la pluie, il n'est qu'en partie alimenté par le fossé de ceinture lors des épisodes de crue. Le niveau d'eau est géré grâce à trois ouvrages hydrauliques internes à la Réserve. Ils sont gérés par le PNR et réglés sur des niveaux hauts pour la période hivernale et des niveaux intermédiaires au printemps puis le communal se ressied naturellement. Cette gestion permet de maintenir une lame d'eau sur le communal en hiver afin d'accueillir l'avifaune, la faune piscicole, les amphibiens, etc. jusqu'au printemps.

Le marais communal présente un microrelief formant des baisses (zones inondées) et des belles (zones plus hautes). Ces reliefs sont issus des anciennes laisses de mer. La topographie est aussi marquée par la présence de mottes plus hautes que la surface du sol appelées localement les *mottureaux*. Ils mesurent en général quelques décimètres de haut et quelques dizaines de cm² à quelques m² pour les plus gros (Caner et Cosenza, 2021). Les mottureaux sont principalement observés sur les zones basses du marais (les baisses) et dans les zones d'altitude intermédiaire. Les zones les plus hautes du marais, de topographie plane, sont marquées par l'absence de buttes. Ces formes sont peu courantes dans le Marais Poitevin et ont été également décrites sur la Réserve Naturelle Nationale Saint-Denis-du-Payré ainsi que sur d'autres marais communaux de même typologie (marais sub-saumâtres, pâtrés, non affectés par le travail du sol ou le passage de rouleau d'aplanissement). Le Marais communal du Poiré-sur-Velluire présente plusieurs morphologies de mottureaux identifiées par les éleveurs et les agents de la RNR. Une proportion importante de ce Marais est recouverte par les mottureaux.

Le microrelief des mottureaux crée des zones accidentées qui rendent l'accès difficile pour les éleveurs lorsqu'un animal est en difficulté. Les éleveurs se posent des questions sur la possibilité de limiter l'expansion des mottureaux. Sur le plan écologique les mottureaux créent des habitats différents pour les communautés végétales. Ils multiplient les habitats sur quelques mètres carrés. Ce sont des îlots d'accueil pour de nombreuses espèces de plantes d'insectes, de mammifères et d'oiseaux.

Ces deux enjeux sont opposés. Il est donc important dans un premier temps de comprendre les raisons de la présence importante des mottureaux sur le site et d'expliquer la croissance de ce phénomène au fil des ans.

Suivant ces objectifs, une expérimentation d'aplanissement de mottureaux a été initiée le 26 janvier 2023. La mise en œuvre et le suivi de l'expérimentation en 2023 sont décrits dans Cosenza et Caner (2024). Le présent rapport apporte les données acquises par le suivi de cette expérimentation au cours de l'année 2024.

1.2 Rappel des résultats de l'étude de 2023

L'étude menée sur le Marais Communal du Poiré-sur-Velluire durant l'année 2023 a concerné la mise en place et le suivi d'une expérimentation d'aplanissement de mottureaux sur trois placettes constituants un parallélogramme de 21 m de largeur sur 30 m de long (Figure 1). Chacune de ces trois placettes de

surface égale à 7mx30m correspond à des conditions différentes de pâture. La placette 1 est non clôturée et accessible toute l'année aux animaux. La placette 2 est clôturée en début d'année puis accessible le 24 juillet lorsque le sol a été plus porteur, permettant une entrée plus tardive des animaux dans le communal. Enfin la placette 3 est un exclos permettant de comprendre la formation des mottureaux sans aucune intervention des animaux dans le processus.

L'aplanissement des mottureaux des trois placettes a été réalisé le 26 janvier 2023 à l'aide du plat d'un godet de nivellation porté par une pelle mécanique. Le suivi de l'expérimentation a été assuré à quatre dates de 2023 (avec une période de trois mois environ) par le déploiement in situ de méthodes variées : mesures de nivellation, prélèvements d'échantillons pour la mesure de teneur en eau, mesures de la résistance de pointe au pénétromètre dynamique léger, réalisation de tomographies de résistivité électrique.

L'ensemble des données acquises en 2023 a permis d'apporter des éléments sur les trois aspects suivants :

- Les conditions initiales de l'expérimentation et la cinétique de « repousse » des mottureaux ;
- L'incidence de la pâture ;
- Les éléments constitutifs du mécanisme de formation des mottureaux.



Figure 1 : Localisation de l'expérimentation (source : SIG PNR Marais Poitevin).

Concernant l'item a), les indicateurs topographiques utilisés i.e., le « max-min » des dénivélés mesurés et le coefficient de variation d'altitude relative ont peu varié sur l'année étudiée. Ces indices n'ont donc pas montré une croissance verticale i.e, une « repousse » des mottureaux aplatis.

Concernant l'item b), bien qu'il n'ait pas été observé d'indice d'une « repousse » des mottureaux, les conditions différentes de pâture des trois placettes ont eu une incidence sur au moins deux familles

d'indicateur : (a) les indicateurs topographiques utilisés et (b) la résistance de pointe mesurée sur épaisseur de sols d'épaisseur décimétrique.

Concernant l'item c), comparativement aux études menées en 2021 et 2022, les investigations menées en 2023 ont mis en lumière quatre nouveaux éléments qui ont permis d'alimenter les réflexions sur les mécanismes de genèse des mottureaux : (i) Le suivi au pénétromètre a montré que la rigidité mécanique (i.e., la résistance mécanique dynamique) du bri saturé avait évolué durant l'année 2023 ; (ii) les tomographies de résistivité électrique ont mis en évidence des digitations verticales d'anomalies résistantes (électriquement) probablement associées aux fentes de dessiccation verticales du site. ; (iii) le phénomène de retrait-gonflement a été observé sur le site à l'échelle de ce suivi annuel et enfin (iv) la comparaison des altitudes moyennes de la zone sans mottureaux des placettes et de la zone avec mottureaux peu après l'aplatissement ont suggéré que les mottureaux ne sont pas *stricto sensu* des *micro-reliefs* mais pourraient être considérés aussi *pro parte* comme des *micro-dépressions*. Ce dernier constat permet alors de considérer des mécanismes induisant non seulement un soulèvement ou gonflement local du sol mais également une *érosion ou déstabilisation/affaissement* du sol en surface probablement associée aux fentes de dessiccation (Figure 35 de Cosenza et Caner, 2024).

1.3 Objectifs de l'étude de 2024

L'objectif de l'étude proposée en 2024 était triple :

- i) Poursuivre le suivi de l'évolution de mottureaux aplanis du Communal à travers la mesure des mêmes paramètres : topographie du sol, teneur en eau, tomographie de résistivité électrique et résistance au pénétromètre.
- ii) Comparer les zones à mottureaux aplanis à la zone sans mottureaux mitoyenne des 3 placettes. En effet, cette zone sans mottureaux située au nord des trois placettes n'a pas été investiguée alors qu'elle pourrait servir de référence pour la compréhension des mécanismes à l'origine des mottureaux.
- iii) Vérifier l'intérêt d'utiliser un scanner 3D pour cartographier la surface des placettes avec une résolution centimétrique. Il a été ainsi envisagé de réaliser une imagerie 3D de la surface des deux placettes 1 et 2 pâturées (non enherbées) au moyen d'un scanner 3D Faro.

2. MATERIELS ET METHODES

L'étude menée en 2024 sur le Marais communal du Poiré-sur-Velluire a comporté essentiellement des campagnes de terrain (sondages à la tarière, opérations de nivellation, tomographies de résistivité électrique et mesures de résistance de pointe), un scan 3D du site et des mesures de teneur en eau des sols menées au laboratoire.

Les dates et les méthodes utilisées sont résumées dans le tableau 1. Les protocoles de mesure associés à chacune de ces méthodes sont détaillés dans la suite. La figure 2 indique les positions des sondages à la tarière et pénétrométriques ainsi que celles des tomographies de résistivité électrique.

Date	Méthodes	Remarques
5 mars 2024	4 sondages pénétrométriques et nivellation des 3 placettes.	Sol saturé d'eau et nappe en surface entre les mottureaux qui a empêché la pénétrometrie et le prélèvement d'échantillon pour les mesures de teneur en eau. La placette 2 est clôturée jusqu'au 2 août..
8 octobre 2024	Nivellement des 3 placettes, 2 grandes Tomographies de Résistivité Electrique-TRE (une transversale aux 3 placettes et une perpendiculaire à la placette 2), 3 sondages pénétrométriques, prélèvements d'échantillons.	Sol saturé d'eau et nappe entre mottureaux
11 octobre 2024	Utilisation du scanner laser 3D visant l'acquisition de coordonnées tri-dimensionnelles de la surface du sol des 3 placettes, 3 sondages pénétrométriques.	Sol saturé d'eau et nappe entre mottureaux

Tableau 1 : Dates d'intervention et méthodes utilisées pour l'étude.

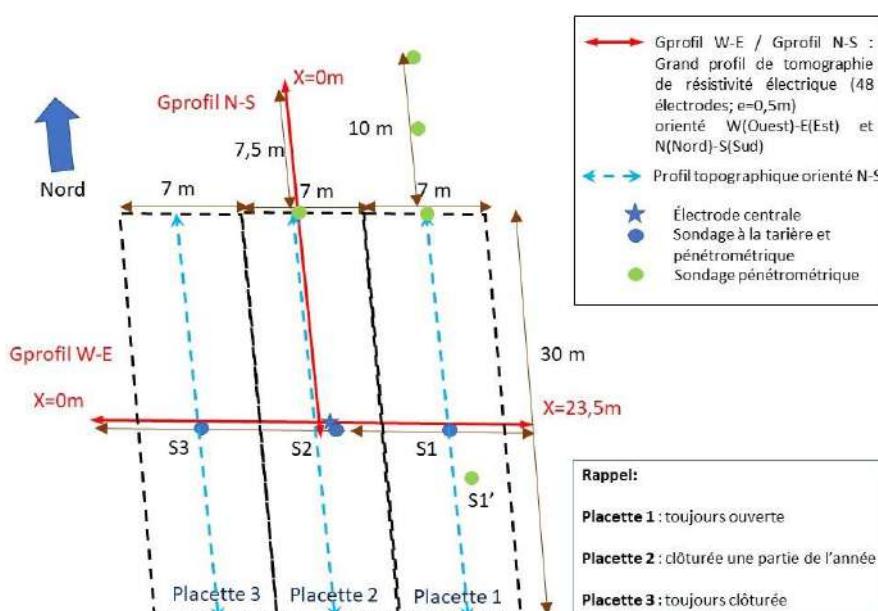


Figure 2. Schéma d'implantation des tomographies de résistivité électrique, des sondages à la tarière et pénétrométriques et des profils topographiques.

2.1 Sondages à la tarière

Un sondage du sol a été réalisé au centre de chaque placette (Figure 2) à l'aide d'une tarière manuelle à rallonges de 4 m de longueur et 5 cm de diamètre.

Pour chaque profil, des échantillons ont été prélevés tous les 20 cm de la surface jusqu'à 3,50 m voire 4 m pour les analyses de laboratoire. Leur profondeur est référencée au milieu de la profondeur prélevée. Pour les profondeurs supérieures à 2m nous pouvons considérer que les valeurs obtenues (teneur en eau) sont indicatrices car du fait de la teneur en eau élevée (sol plastique à liquide) des mélanges de niveaux lors du prélèvement ne peuvent être exclus.

2.2 Mesures de la teneur en eau

La teneur en eau est mesurée sur une masse de 10g de sol désagrégée, pesée et mise à sécher à 105°C pendant 24h puis pesée à nouveau. La teneur en eau W est obtenue par la formule suivante.

$$Teneur \text{ en } eau \text{ } W \text{ } (\%) = \frac{\text{masse de sol humide} - \text{masse de sol sec}}{\text{masse de sol sec}} \times 100$$

Sur les graphiques représentant la teneur en eau en fonction de la profondeur la teneur en eau à la limite de retrait ($Wr = 30\%$), la teneur en eau à la limite de plasticité ($Wp = 40\%$) et la teneur en eau à la limite de liquidité ($Wl = 70\%$) obtenues sur le Marais Poitevin et le Marais de Rochefort (Bernard, 2006 ; Bernard et al. 2007, Gallier, 2011) sont mentionnées.

2.3 Nivellement géométrique relatif

Le principe du niveling géométrique a consisté ici en la mesure d'une succession de différences d'altitude. Ces mesures de différences d'altitude pourraient être ramenées en altitudes absolues à partir d'une altitude absolue de référence connue sur le site.

La mesure a été réalisée au niveau optique et à l'aide d'une mire graduée. Le principe est simple, le niveau faisant toujours une lecture à l'horizontale, chaque dénivelé est lu sur la mire qui est tenue à la verticale (Figures 3a et 3b). La précision des mesures a été estimée à environ 5 mm.

Un profil de niveling Nord-Sud par placette a été effectué suivant un pas d'échantillonnage de 50 cm (Figure 2).

Dans notre cas, les mesures n'ont pas été ramenées en altitudes absolues. Les altitudes souvent indiquées sur les figures de ce rapport sont relatives à la valeur la plus basse de dénivelé obtenue sur le profil étudié i.e., relatives à l'altitude du point le plus élevé (Figure 3b). Autrement dit, les altitudes relatives indiquées sur les figures du rapport correspondent aux valeurs du dénivelé lues sur la mire graduée soustraite de la valeur la plus petite du dénivelé obtenu sur le même profil étudié. L'altitude relative égale à 0 sur les graphes correspond donc au point à l'altitude la plus haute du profil.

Ces altitudes relatives peuvent être analysées quantitativement au moyen de deux indicateurs :

- *Le « max-min » des dénivelés mesurés* : la différence d'altitude entre le point le plus haut du profil et le point le plus bas. Une augmentation du « max-min » du profil peut être interprétée comme une croissance des mottureaux sur ce profil.
- *Le coefficient de variation des altitudes relatives* : l'écart-type des valeurs de dénivelé lues sur la mire graduée divisé par la moyenne des valeurs de dénivelés obtenues sur le même profil. Ce paramètre permet de comparer la variabilité spatiale (suivant le profil horizontal) des altitudes mesurées entre chaque profil de chaque placette. Une augmentation du coefficient de variation peut être interprétée comme une augmentation de la hauteur des « pics » et des « creux » par

rappor t à l'attitude moyenne du terrain sur le profil considéré. Ainsi, une augmentation du coefficient de variation peut être considérée comme une croissance des mottureaux sur ce profil.



Figure 3a. Au premier plan à gauche : le niveau optique sur trépied. Au second plan à droite : la mire tenue verticalement.

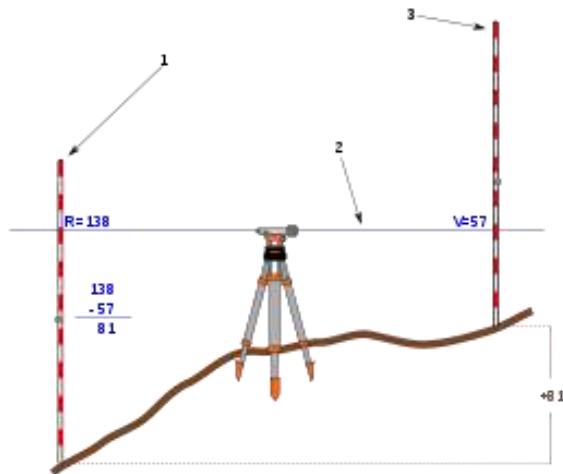


Figure 3b. Principe du niveling géométrique relatif. NB : la valeur de dénivelé la plus petite lue sur la mire graduée correspond au point le plus haut (source : Wikipedia).

2.4 Mesure de la résistance de pointe

Comme pour le sondage à la tarière, un sondage pénétrométrique a été réalisé au centre de chaque placette (Figure 2).

La pénétrométrie permet de quantifier la compacité du sol. Les sondages pénétrométriques ont été effectués à l'aide d'un pénétromètre dynamique portable de type PANDA® (Pénétromètre Automatique Numérique Dynamique Assisté par ordinateur) couramment utilisé en génie-civil pour le contrôle de compactage et la reconnaissance des sols (Zhou, 1997). L'essai consiste à enfoncer, par battage, un train de tiges de 50 cm de longueur dans le sol à l'aide d'un marteau normalisé (Figure 4). Pour chaque coup donné, la vitesse du marteau au moment de l'impact est mesurée, ce qui permet de déterminer l'énergie E fournie à l'ensemble du dispositif. La valeur de l'enfoncement de la pointe est mesurée de manière simultanée. Après traitement par la centrale d'acquisition de ces deux informations, un profil de résistance de pointe (Qd en MPa) en fonction de la profondeur encore appelé *pénétrogramme* est obtenu. L'appareil permet des mesures comprises entre 0,1 et 40 MPa. Les mesures ont été réalisées avec une pointe perdue conique (angle 30°) en acier de 4 cm² de section pour limiter les forces de frottements entre le train de tige de section 1 cm² et le sol argileux. La résistance de pointe Qd a été mesurée jusqu'à une profondeur de 4 m environ.

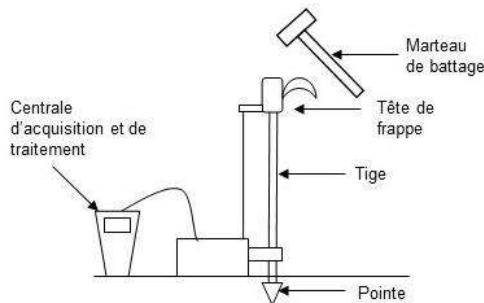


Figure 4 : Principe du pénétromètre dynamique PANDA®.

2.5 Tomographie de résistivité électrique

La méthode de tomographie de la résistivité électrique (TRE) est basée sur la mesure d'un ensemble de résistivités électriques apparentes du sous-sol, le long d'un dispositif rectiligne de n électrodes (e.g., Florsch et Mulhach, 2018) (Figure 5).

En pratique, les n électrodes sont disposées en ligne selon un espacement déterminé, en fonction de la profondeur d'investigation et de la résolution désirée de l'image électrique (appelée tomographie). La procédure consiste alors à « interroger » quatre par quatre (quadripôle par quadripôle) les électrodes en ligne via un câble multi-conducteur (appelé « flûte »), et suivant une séquence prédéfinie dans un programme informatique. Pour chaque quadripôle, deux électrodes permettent l'injection d'un courant électrique, les deux autres servant à mesurer la tension électrique résultante. La « flûte » est elle-même reliée via une boîte de commutation à un résistivimètre (Syscal R1+ de la société Iris-Instrument), véritable ordinateur portable, qui gère le courant injecté, stocke la valeur de la tension mesurée pour chaque quadripôle et calcule *in fine* la résistivité apparente associée. La collection obtenue de valeurs de résistivité apparente est ensuite analysée ou « inversée » pour une obtenir une répartition 2D (dans la direction horizontale et dans la direction verticale) de la résistivité électrique, c'est-à-dire une tomographie de la résistivité électrique (TRE). L'inversion se fait avec le logiciel Res2DInv®.

Dans l'étude 2024, un dispositif suivant une configuration Wenner-Schlumberger a été programmé et utilisé. Il s'agit d'un dispositif de 48 électrodes d'espacement inter-electrode de 0.5 m de longueur de 23.5 m et profondeur d'investigation d'environ 4 m. Cette configuration est intermédiaire aux deux configurations précédentes utilisées en 2023 (pour rappel, d'espacement inter-electrodes de 0.2 et 1 m). Ce dispositif a été utilisé suivant deux profils perpendiculaires aux 3 placettes (voir leur disposition Figure 2).



Figure 5. Dispositif d'acquisition de Tomographie de Résistivité Electrique (TRE) à 48 électrodes utilisé dans l'étude. Il est ici mis en place avant l'aplatissement des mottureaux le 26 janvier 2023.

2.6 Scanner laser 3D

La méthode consiste à acquérir les coordonnées (x,y,z) de la surface d'un objet physique (ici la surface du sol) pour décrire sa forme dans un format numérique tridimensionnel. Cette acquisition se fait au moyen d'un laser émis par un scanner (technologie de décalage de phases) disposé sur un trépied. Pour chaque position du dispositif (scanner + trépied) souvent appelée « point de scan » ou « station », une collection de coordonnées (x,y,z) ou « nuage de points » est ainsi acquis. La méthode d'acquisition comprend alors plusieurs stations qui sont positionnés à des emplacements permettant de couvrir toute la surface à numériser. L'ensemble de nuages de points ainsi obtenu est assemblé (associé) dans une phase de post-traitement grâce à des objets (ici des sphères blanches) communs à tous les nuages de points (Figure 6a).

Un scanner 3D S150 FARO® a été utilisé dans cette étude permettant de travailler à une distance de 6 à 150 mètres des cibles envisagées (Figure 6b). La résolution du scanner (la distance en deux points d'un nuage de points) dépend de la distance entre le scanner et le point rencontré par le laser à la surface du sol. Elle est typiquement de 7.7 mm pour une distance de 10 m entre le scanner et la cible. Dans les cartes présentées dans ce rapport, la résolution moyenne a été estimée à 0.5 cm. Chaque station ou point de scan permet d'acquérir un nuage de 28 millions de points. Le scanner S150 FARO® est également équipé d'une caméra couleur intégré et d'un système GPS.

Dans l'étude, 34 stations séparées d'environ 3 mètres ont été mises en œuvre le 11 octobre 2024 correspondant à une acquisition de 130 millions de points sur une durée d'environ 4 heures. Les acquisitions ont été effectuées suivant deux profils longitudinaux placés sur les placettes 1 et 2 (la placette 3 étant trop difficile d'accès de par l'eau stagnante et l'épaisseur de l'herbe).



Figure 6a. Trois sphères fixes sont utilisées pour chaque point de scan afin de permettre l'assemblage des différents nuages de points acquis.



Figure 6b. Scanner 3D S150 FARO® utilisé pour l'étude.

3. RESULTATS

3.1 Placette 1

La placette 1 est non clôturée et accessible toute l'année aux animaux. Elle représente la condition actuelle de formation de mottureaux (i.e., sans exclus).

3.1.1 Profils topographiques

La Figure 7 montre les 2 profils d'altitude relative acquis aux 2 dates d'intervention (Tableau 1). Comme l'indique la Figure 2, ces 2 profils topographiques ont été acquis dans le sens de la longueur de la placette (orientation nord-sud) et sensiblement aux mêmes points. Le point $x=0$ sur la Figure 8 est situé sur la bordure Nord de la placette.

Comme souligné en section 2.3, les altitudes indiquées sont relatives à la valeur la plus basse du dénivélé lu sur la mire (et donc au point ayant l'altitude la plus élevée du profil, Figure 3b). L'altitude relative égale à 0 sur la Figure 7 correspond donc au point à l'altitude la plus haute du profil. Tous les points de cette figure se trouvent à une altitude plus basse (altitude « négative »).

Pour faciliter la comparaison des profils acquis à différentes dates d'intervention, les valeurs lues sur la mire ont été soustraite de la valeur de dénivélé la plus petite lue à la date d'intervention donnée.

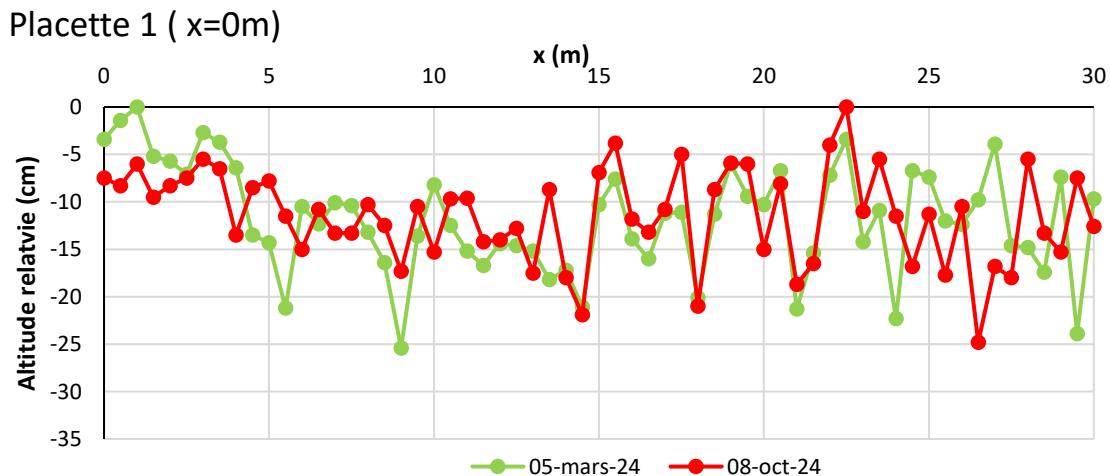


Figure 7. Profils d'altitude relative mesurés aux deux dates d'intervention (Tableau 1) sur la placette 1. Les altitudes indiquées sont donc relatives au point le plus haut de chaque profil (possédant donc une altitude relative égale à 0).

La Figure 7 permet de retrouver des caractéristiques déjà observées en 2023 :

- Dans la zone à mottureaux (i.e., pour les points situés entre $x=5$ m et $x=30$ m), on observe des « pics » et des « creux » d'amplitude variable de l'ordre de 20 cm et avec une période spatiale métrique. Ils attestent la persistance de mottureaux qui n'ont pas été complètement aplatis sur le site.
- Suivant le profil acquis le 5 mars 2024, dans la zone sans mottureaux au Nord de chaque placette (i.e., pour les points situés en $x=0$ et $x=5$ m environ), les altitudes des points de cette zone sont en moyenne plus hautes que celles mesurées dans les zones à mottureaux aplatis. Autrement dit, la zone sans mottureaux a une altitude plus haute que la zone à mottureaux. Dans cette zone, pas de grands « pics » d'altitude ni de « creux » ne sont observés : c'est bien une zone sans mottureaux.

Compte tenu de notre objet d'étude, la Figure 8 montre les profils topographiques acquis sur *des points ne comprenant que des mottureaux* i.e., sur des profils sectionnés ici de $x=8$ m à $x=30$ m (les points dans la zone sans mottureaux au Nord du profil ne sont donc pas pris en compte). Comme pour la Figure 8, les altitudes relatives correspondent aux valeurs d'altitude lue sur la mire soustraite de la valeur la plus basse d'altitude lue sur la mire (i.e., altitude relative au point le plus haut en altitude). L'altitude relative égale à 0 sur la Figure 8 correspond donc au point à l'altitude la plus élevée du profil considéré. On retrouve une relativement bonne reproductibilité du positionnement des mesures à l'exception de la fin du profil pour $x>24$ m (mauvais positionnement probable du décamètre au sol). Comme en 2023, la hauteur moyenne entre les « pics » et « creux » reste sensiblement autour d'une vingtaine de centimètres environ.

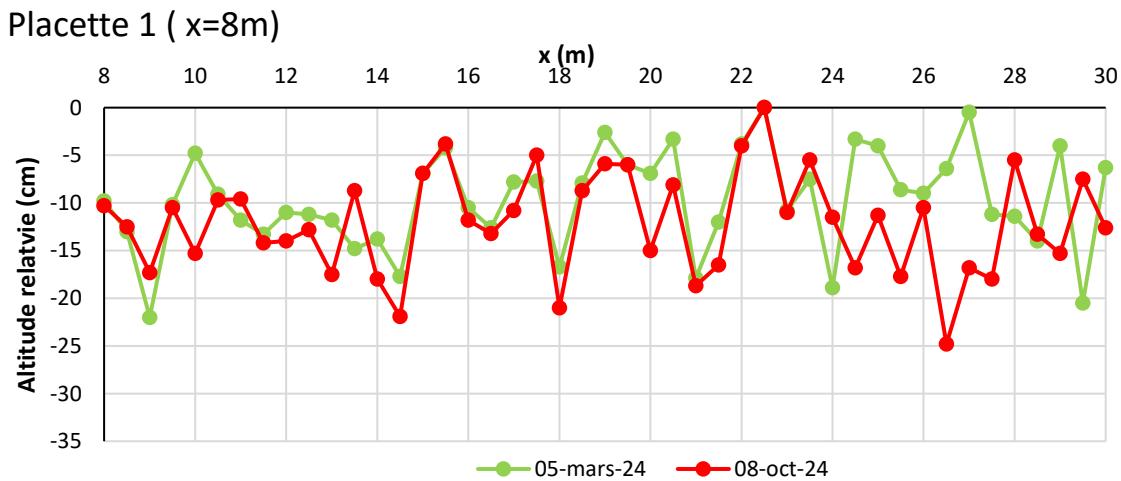


Figure 8. Profils d'altitude relative mesurés aux deux dates d'intervention (Tableau 1) sectionné ici de $x=8$ m à $x=30$ m i.e., dans la zone à mottureaux (placette 1). Les altitudes indiquées sont donc relatives au point le plus haut de chaque profil.

3.1.2 Profils de résistance de pointe

Les pénétrogrammes acquis au centre aux points S1 et S1' de la placette 1 (voir positions sur la Figure 2) aux 2 dates d'intervention (Tableau 1) sont présentés sur la Figure 9. On souligne que les deux pénétrogrammes visualisés n'ont pas été réalisés strictement au même point. Au cours de l'essai réalisé en S1 le 5 mars au centre de la placette, le train de tiges du pénétromètre s'est enfoncé par son propre poids (i.e., sans battage) attestant ainsi la rencontre d'un sol à l'état (très) liquide. L'essai a donc été répété en S1' à quatre mètres de ce premier test sur la placette 1 (voir Figure 2).

Les pénétrogrammes montrent les caractéristiques suivantes :

- De 0 à environ 1m, la résistance de pointe Qd est d'environ quelques MPa correspondantes aux valeurs mesurées en 2023 en période humide. Cette zone se présente l'été sous la forme d'une « croute » sèche très résistante mécaniquement et électriquement et reste associée à une zone de battement de nappe superficielle (mise en évidence dans la campagne de 2021, voir Caner et Cosenza, 2021).
- de 1m à environ 2.20 m, la résistance de pointe diminue fortement pour atteindre des valeurs inférieures à 1 MPa, valeur correspondant à la transition « argile molle » à « argile très molle » selon Langton (1999). Cette zone correspond au bri saturé constitué d'argile très molle.

- De 2.20 à environ 4 m, la résistance de pointe augmente progressivement avec la profondeur pour atteindre le substratum calcaire (résistance de pointe supérieur à 5 MPa). La profondeur de 4 m de ce substratum est cohérente avec celle mesurée en 2023.

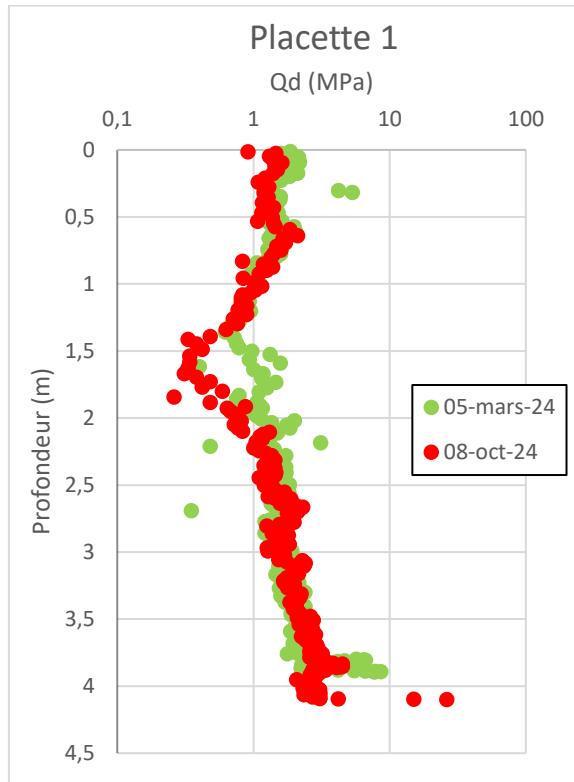


Figure 9. Pénétrogrammes acquis sur la placette 1 aux deux dates d'intervention.

La résistance de pointe du bri saturé (profondeur supérieure à 1 m jusqu'à 4 m environ) mesurée au 8 octobre montre des valeurs nettement plus faibles que celles acquises le 5 mars. Cette résistance de pointe peut chuter jusqu'à des valeurs très faibles de 0.2 MPa. Autrement dit, la rigidité mécanique du bri saturé en profondeur semble évoluer avec le temps. Contrairement à ce qui avait été observé en 2023, cette rigidité semble avoir diminué après l'été. Cette tendance contraire à celle observée en 2023 pourrait s'expliquer par la pluviométrie élevée en septembre et début octobre 2024 qui ont rendu les sols gorgés d'eau (et donc moins rigides) par une infiltration d'eau douce par les fissures de dessication produites en été (en outre, une infiltration d'eau dans le sondage d'octobre n'est pas à exclure).

3.1.3 Profil de teneur en eau massique

Les échantillons ont été prélevés en S1 au centre de la placette 1 à la date du 8 octobre pour laquelle il était possible de faire des prélèvements (Figure 10). Le sol étant trop détrempé le 5 mars, il n'a pas fait l'objet de prélèvement d'échantillons.

La Figure 10 permet d'identifier les unités suivantes :

- De 0 à environ 0.9 m, la couche de surface présente de faibles variations de teneur en eau autour de 39%.
- De 0.9 m à environ 1.7 m, la teneur en eau augmente progressivement avec la profondeur pour atteindre une valeur maximum de 86.5%. Cette zone correspond au bri saturé. Cette évolution de la teneur en eau permet de constater que le bri devient plastique (au sens des limites d'Atterberg) à partir de 0.9 m environ (i.e., au passage de la limite de plasticité W_p estimée à

40 %) pour évoluer vers un état liquide à environ 1.5 m (i.e., au passage de la limite de liquidité WL estimée à 70 %). Au-delà d'environ 1.7 m, la teneur en eau stagne.

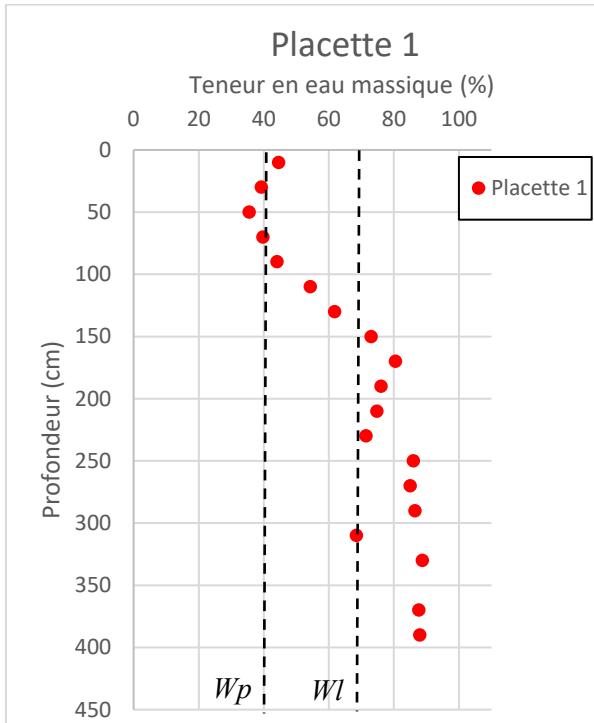


Figure 10 : Profil de teneur des sols de la placette 1 au 8 octobre 2024.

Wp : limite de plasticité ; WL : limite de liquidité.

1.2 Placette 2

La placette 2 est clôturée au début de l'expérimentation puis accessible lorsque le sol a été plus porteur, simulant une entrée plus tardive des animaux dans le communal. La placette 2 a été déclôturée le 2 août 2024.

3.2.1 Profils topographiques

La Figure 11 montre les deux profils d'altitude relative acquis aux deux dates d'intervention. Comme l'indique la Figure 2, ces 2 profils topographiques ont été acquis dans le sens de la longueur de la placette (orientation nord-sud) et sensiblement aux mêmes points. Le point x=0 sur la Figure 11 est situé sur la bordure nord de la placette.

Comme souligné en section 2.3, les altitudes indiquées sont relatives à la valeur la plus basse du dénivellation sur la mire i.e. ; au point le plus élevé du profil (Figure 4b). L'altitude relative égale à 0 sur la Figure 11 correspond donc au point le plus haut en altitude du profil.

La Figure 11 permet de formuler les commentaires suivants :

- Dans la zone à mottureaux (i.e., pour les points situés entre x=5 m et x=30m), on retrouve les plus grands « pics » et des « creux » sensiblement aux mêmes positions pour les deux dates d'intervention. Comme en 2023, ce résultat souligne la bonne reproductibilité des mesures.
- Dans la zone sans mottureaux au nord de la placette (i.e., pour les points situés en x=0 et x=5 m environ), les altitudes des points de cette zone sont en moyenne plus hautes que celles mesurées

dans les zones à mottureaux aplatis. Dans cette zone, pas de grands « pics » d'altitude ni de « creux » ne sont observés : c'est bien une zone sans mottureaux.

- La placette 2 montre en $x=30\text{m}$ un « point haut » aux dates d'intervention qui pourrait correspondre à un mottureaux non aplani de la zone mitoyenne au sud de la placette.

Placette 2 ($x=0\text{m}$)

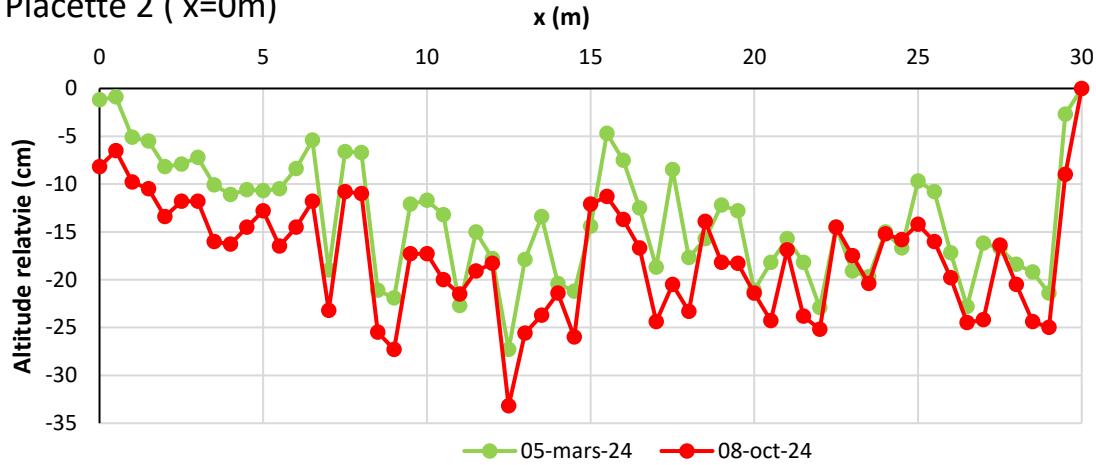


Figure 11. Profils d'altitude relative mesurés à deux dates d'intervention (Tableau I) sur la placette 2. Les altitudes indiquées sont donc relatives au point le plus haut de chaque profil (l'altitude relative égale à 0 correspond donc au point le plus haut en altitude du profil).

Comme pour la placette 1, cette première analyse de données de nivellation met en lumière une caractéristique attendue : la zone sans mottureaux se comporte de manière différente comparativement à la zone à mottureaux aplatis. Dans la suite, nous nous focaliserons donc dans la zone à mottureaux aplatis (i.e. pour des points situés entre $x=8\text{ m}$ et $x=30\text{ m}$; les points entre $x=5\text{ m}$ et $x=8\text{ m}$ pouvant être une zone de transition) pour dégager des caractéristiques propres à ces zones.

Placette 2 ($x=8\text{m}$)

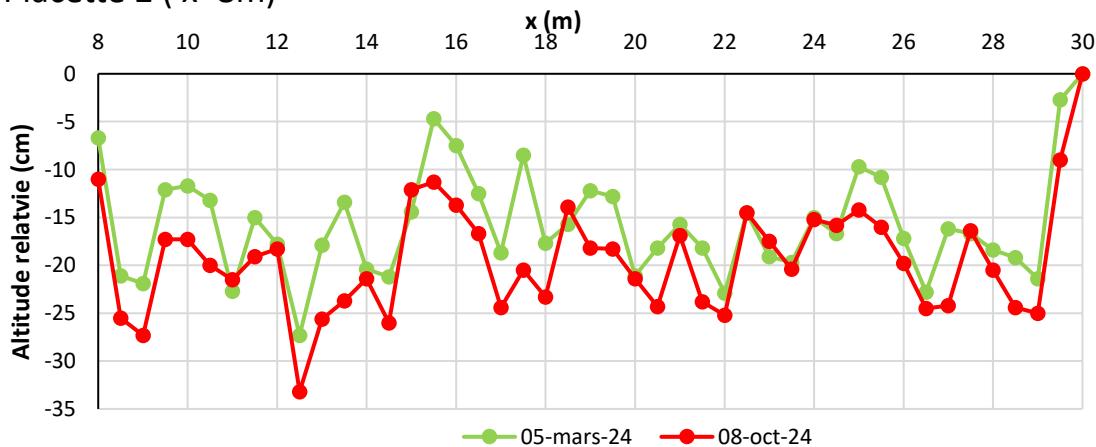


Figure 12. Profils d'altitude relative mesurés à deux dates d'intervention (Tableau I) sectionné ici de $x=8\text{ m}$ à $x=30\text{m}$ i.e., dans la zone à mottureaux (placette 2). Les altitudes indiquées sont donc relatives au point le plus haut de chaque profil (possédant donc une altitude relative égale à 0) dans la zone de $x=8\text{ m}$ à $x=30\text{m}$.

Comme pour la placette 1 (Figure 8), la Figure 15 montre également la bonne reproductibilité du positionnement des mesures (i.e., les « pics » et « creux » sont localisés sensiblement aux mêmes points

sur le profil). Les mottureaux aplatis de cette placette semblent globalement avoir peu évolué dans le temps.

3.2.2 Profils de résistance de pointe

Les pénétrogrammes acquis au point S2 (au sommet d'un mottureau aplati) au centre de la placette 2 (voir position sur la Figure 2) aux deux dates d'intervention (Tableau 1) sont présentés sur la Figure 13. Ils confirment les observations obtenues sur la placette 1 :

- De 0 à environ 1m, la résistance de pointe Qd est de l'ordre du MPa correspondant aux valeurs mesurées en période humide en 2023. Cette zone correspond à une couche de bri en partie insaturée identifiable également avec la TRE (Figures 23 et 26).
- De 1 m à environ 3 m, la résistance de pointe fluctue fortement autour de la valeur de 1 MPa. Le 8 octobre 2024, la résistance de pointe atteint des valeurs inférieures à 1 MPa, valeur correspondant à la transition « argile molle » à « argile très molle » selon Langton (1999). Cette zone correspond au bri saturé constitué d'argile très molle.
- De 3 m à environ 3.5-4 m, la résistance de pointe augmente progressivement avec la profondeur pour atteindre le substratum (résistance de pointe supérieur à 5 MPa).

On notera que la profondeur du substratum (i.e., l'épaisseur du bri) évolue elle-aussi avec la date d'intervention. A la date du 5 mars en période humide, la profondeur du substratum se situait à environ 4 m, alors qu'à la fin de l'été, elle a été mesurée à environ 3.5m. Cet écart de profondeur pourrait s'expliquer par (a) un tassement/retrait du sol argileux en surface par dessiccation pendant l'été et/ou (b) des variations locales de la topographie du substratum (les sondages pénétrométriques étant réalisés à environ 30 cm de distance entre chaque intervention).

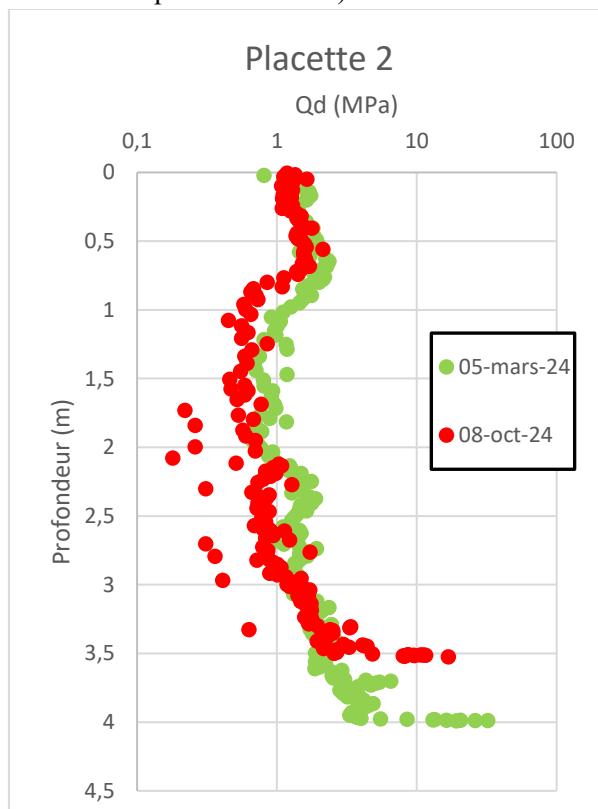


Figure 13. Pénétrogrammes acquis sur la placette 2 au point S2 aux deux dates d'intervention.

3.2.3 Profil de teneur en eau massique

Les échantillons ont été prélevés en S2 au centre de la placette 2.

Le profil obtenu à la date du 8 octobre pour laquelle il était possible de faire des prélèvements est donné sur la Figure 14. Le sol étant trop détrempé le 5 mars, il n'a pas fait l'objet de prélèvements d'échantillon.

La Figure 14 confirme les unités suivantes :

- De 0 à environ 0.9 m, la couche de surface présente une teneur en eau sensiblement égale à 40%.
- De 0.9 m à environ 3.3m, la teneur en eau augmente progressivement avec la profondeur pour atteindre une valeur maximum de 105.3% à 3.3m. Cette zone correspond au bri saturé. Cette évolution de la teneur en eau permet de constater que le bri devient plastique (au sens des limites d'Atterberg) à partir d'environ 0.9 m (i.e., au passage de la limite de plasticité W_p estimée à 40 %) pour évoluer vers un état liquide à environ 1.6 m (i.e., au passage de la limite de liquidité W_l estimée à 70 %).
- Au-delà d'environ 3.3 m, la teneur en eau diminue pour atteindre la valeur de 75.2% à 4.0 m de profondeur le 12 septembre. Cette profondeur de 4 m correspond au toit du substratum. Ce dernier est positionné 50 cm plus bas que la profondeur donnée par le pénétromètre soulignant possiblement une variation locale de la profondeur du toit du substratum autour du point S2.

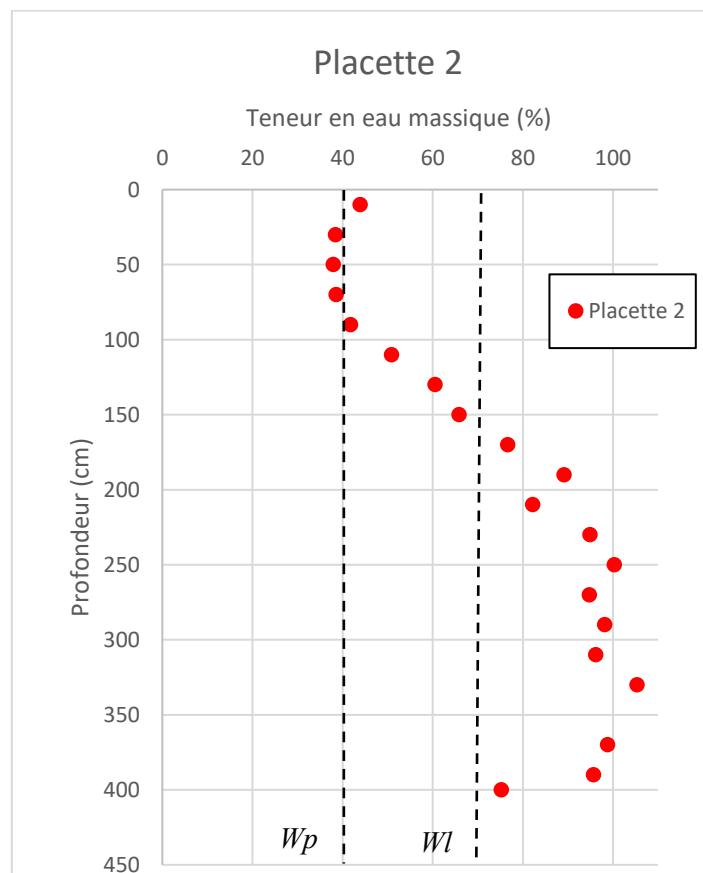


Figure 14 : Profil de teneur des sols de la placette 2.

W_p : limite de plasticité ; W_l : limite de liquidité.

3.3 Placette 3

La placette 3 est un exclos permettant de comprendre la formation des mottureaux sans aucune intervention des animaux dans le processus.

3.3.1 Profils topographiques

La Figure 15 montre les 2 profils d'altitude relative acquis aux 2 dates d'intervention (Tableau 1). Comme l'indique la Figure 2, ces 2 profils topographiques ont été acquis dans le sens de la longueur de la placette (orientation nord-sud) et sensiblement aux mêmes points. Le point $x=0$ sur la Figure 15 est situé sur la bordure Nord de la placette.

Comme souligné en section 2.3, les altitudes indiquées sont relatives à la valeur de dénivelé la plus basse lue sur la mire i.e., au point le plus haut en altitude du profil (Figure 4b). L'altitude relative égale à 0 sur la Figure 15 correspond donc au point le plus haut en altitude du profil.

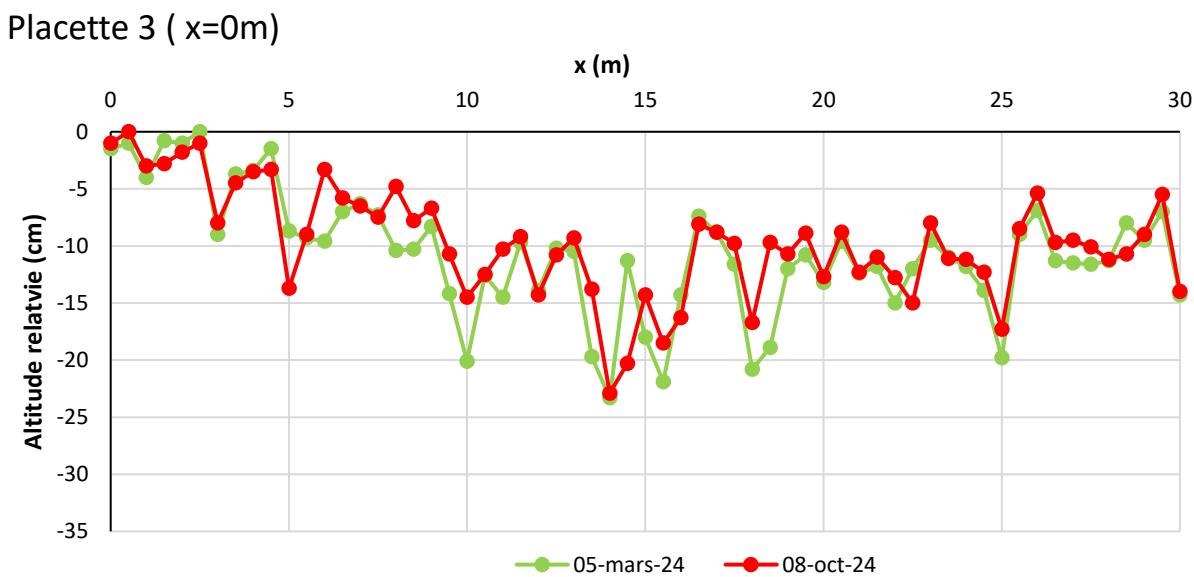


Figure 15. Profils d'altitude relative mesurés à deux dates d'intervention (Tableau 1) sur la placette 3. Les altitudes indiquées sont donc relatives au point le plus haut de chaque profil (l'altitude relative égale à 0 correspond donc au point le plus haut en altitude du profil).

Comme pour les deux autres placettes, dans la zone sans mottureaux au nord de la placette (i.e., pour les points situés en $x=0$ et $x=5$ m environ), les altitudes des points de cette zone sont en moyenne plus hautes que celles mesurées dans les zones à mottureaux aplatis. Autrement dit, comme pour les placettes 1 et 2, la zone sans mottureaux est ici plus haute en altitude que la zone à mottureaux.

Comme pour les placettes 1 et 2, on se focalise dans la zone à mottureaux aplatis (i.e. pour des points situés entre $x=8$ m et $x=30$ m ; les points entre $x=5$ m et $x=8$ m pouvant être une zone de transition) pour dégager des caractéristiques propres à ces zones (Figure 16). La Figure 16 montre que les mottureaux aplatis de cette placette semblent globalement avoir peu évolué dans le temps. Il est difficile d'établir qualitativement une tendance claire.

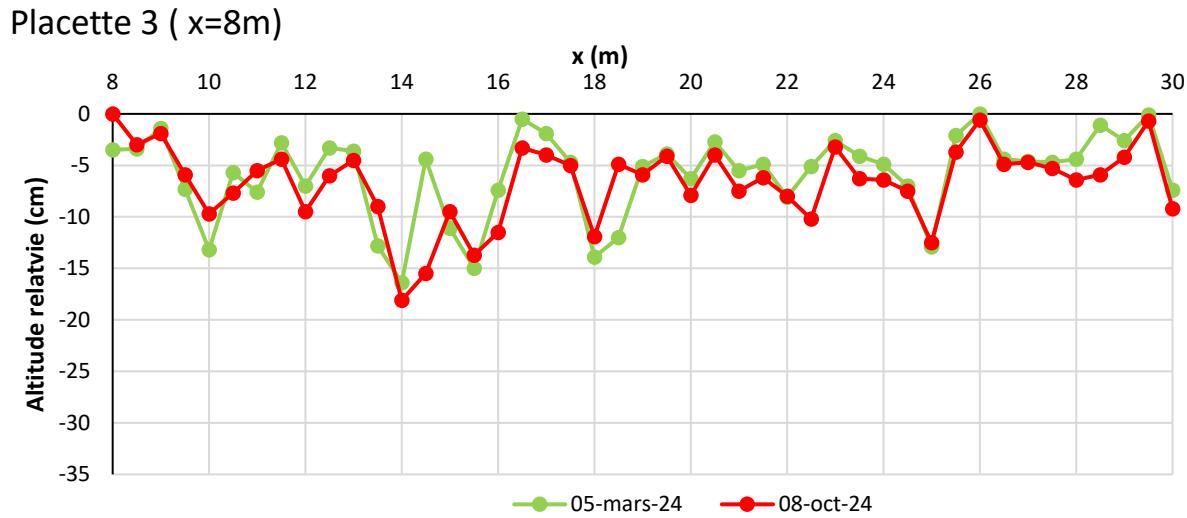


Figure 16. Profils d'altitude relative mesurés aux deux dates d'intervention (Tableau 1) sectionné ici de $x=8\text{ m}$ à $x=30\text{ m}$ i.e., dans la zone à mottureaux (placette 3).

3.3.2 Profil de résistance de pointe

Le pénétrogramme acquis au point S3 au centre de la placette 3 (voir position sur la Figure 2) le 8 octobre 2024 (Tableau 1) est présenté sur la Figure 17. On rappelle que l'état détrempé du sol le 5 mars 2024 n'avait pas permis l'acquisition de données pénétrométriques.

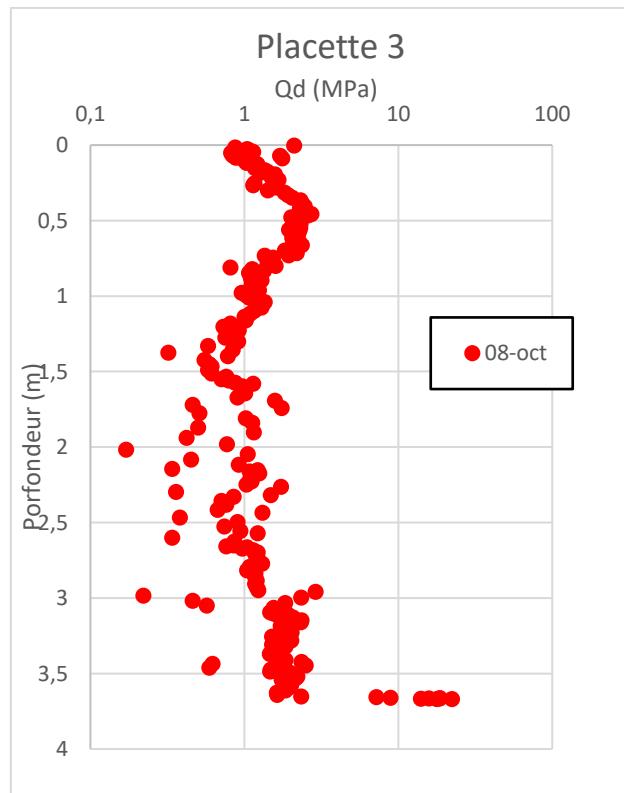


Figure 17. Pénétrogramme acquis sur la placette 3 au point S3 le 8 octobre 2024.

Le pénétrogramme confirme les observations obtenues sur les deux placettes 1 et 2 :

- De 0 à environ 1.2m, une zone où la résistance de pointe Q_d prend des valeurs de quelques MPa, valeurs typiques mesurées en surface du sol en période humide.

- de 1.2 à environ 2.50 m, la résistance de pointe diminue pour fluctuer autour de la valeur de 1 MPa, valeur correspondant à la transition « argile molle » à « argile très molle » selon Langton (1999). Cette zone correspond au bri saturé constitué d'argile molle à très molle.
- De 2.50 à 3.5-4 m, la résistance de pointe augmente progressivement avec la profondeur pour atteindre le substratum (résistance de pointe supérieure à 5 MPa) à 3.7m.

3.3.3 Profil de teneur en eau massique

Les échantillons ont été prélevés en S3 au centre de la placette 3. Le profil obtenu le 8 octobre date à laquelle il était possible de faire des prélèvements est donné sur la Figure 18. Le sol étant trop détrempé le 5 mars, il n'avait pas fait l'objet de prélèvement d'échantillons.

La Figure 18 confirme les unités suivantes :

- De 0 à environ 0.9 m, la couche de surface présente des valeurs de teneur en eau entre 36.4% et 49.0% dans la même gamme que celles observées sur les placettes 1 et 2.
- De 0.9 à environ 2.7m, la teneur en eau augmente progressivement avec la profondeur pour atteindre une valeur maximum de 90.8% à 2.7m. Cette zone correspond au bri saturé. Cette évolution de la teneur en eau permet de constater que le bri devient plastique (au sens des limites d'Atterberg) à partir d'environ 0.8 m (i.e., au passage de la limite de plasticité W_p estimée à 40 %) pour évoluer vers un état liquide à environ 1.6 m (i.e., au passage de la limite de liquidité W_l estimée à 70 %).
- Au-delà d'environ 2.7 m, la teneur en eau diminue lentement pour atteindre la valeur de 43.3% à 3.9 m de profondeur. Cette profondeur de 3.9 m correspond au toit du substratum. On notera l'écart de 20 cm avec la profondeur estimée par pénétrométrie.

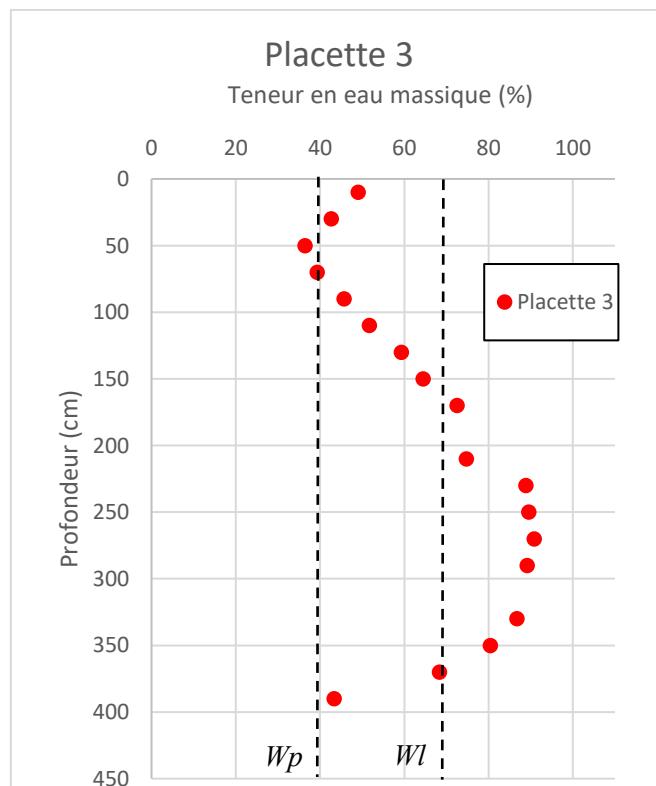


Figure 18 : Profil de teneur des sols de la placette 3.

W_p : limite de plasticité ; W_l : limite de liquidité.

3.4 Comparaison entre placettes

Après avoir analysé les résultats placette par placette, cette section apporte un regard croisé sur l'ensemble des données. Il s'agira notamment de comparer (i) les profils et indicateurs topographiques, (ii) les distributions de valeurs de résistivités inversées issues d'une tomographie transversale, (iii) les profils de teneur en eau et enfin (iv) les pénétrogrammes. On gardera en « ligne de mire » les deux objectifs suivants : (a) apprécier l'impact des conditions de pâture et (b) identifier des éléments qui pourraient nous indiquer une « repousse » des mottureaux.

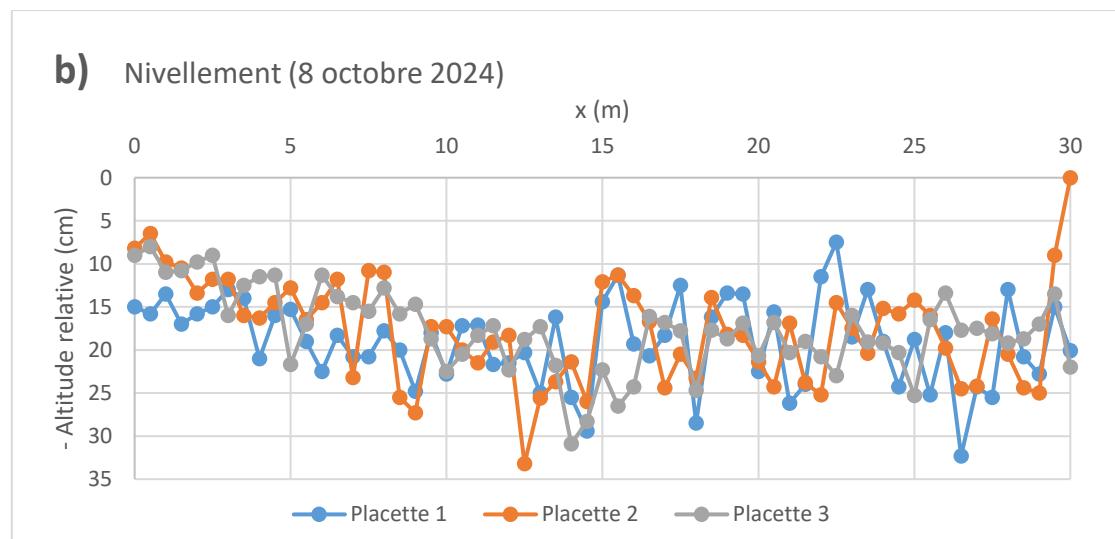
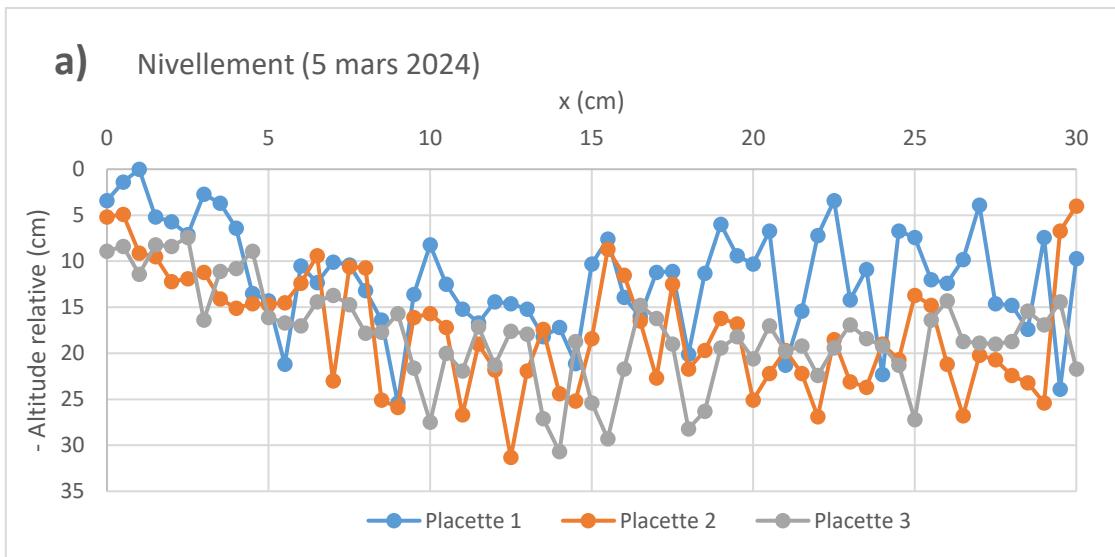
3.4.1 Comparaison des profils topographiques

Les Figures 19a et 19b synthétisent l'ensemble des profils topographiques acquis sur les trois placettes aux deux dates d'intervention. Elles permettent de mener une comparaison qualitative des profils topographiques.

Pour faciliter la comparaison, pour une date d'intervention donnée, les dénivélés mesurés ont été soustraits du dénivelé du point le plus bas *des trois profils* i.e, le point le plus haut des trois profils acquis sur les trois placettes. Pour une date d'intervention donnée, il est donc possible de comparer les altitudes relatives des 3 placettes.

Les Figures 19a et 19b permet de mettre en avant les observations suivantes :

- Les figures confirment que dans la zone à mottureaux (i.e., pour les points situés entre $x=5$ m et $x=30$ m), des « pics » et des « creux » d'amplitude variable de l'ordre de 20 cm et avec une période spatiale métrique sont observés. Ils attestent l'existence de mottureaux qui n'ont pas été complètement aplatis sur le site.
- Dans la zone sans mottureaux au nord de chaque placette (i.e., pour les points situés en $x=0$ et $x=5$ m environ), les altitudes des points de cette zone sont en moyenne plus hautes que celles mesurées dans les zones à mottureaux aplatis (à l'exception de la placette 1, le 8 octobre). Autrement dit, les zones sans mottureaux sont plus hautes en altitude que les zones à mottureaux aplatis.
- On note que le profil (bleu) de la placette 1 se positionne de manière différente des deux autres placettes suivant les deux dates d'intervention. Ainsi, le 5 mars, les points du profil de la placette 1 ont une altitude significativement plus haute que les points des deux autres placettes. Alors que le 8 octobre, les points du profil de la placette 1 se situent, au premier ordre, aux mêmes altitudes de ceux des deux autres placettes. Cette caractéristique qui n'avait pas été observée en 2023 suggère que la placette se serait tassée entre les deux dates d'intervention. Compte tenu des exclos présents sur les placettes 2 et 3, il apparaît naturel d'associer le tassement apparent de la placette 1 à l'effet de la compaction due au bétail présent sur le site durant sur cette période.



Figures 19a et 19b. Résultats du nivellement des trois placettes aux deux dates d'intervention :
a) 5 mars, b) 8 octobre

Pour mener à bien une comparaison quantitative des profils topographiques, les indicateurs introduits dans la section 2.3 sont utilisés, i.e., le « max-min » des dénivélés mesurés et le coefficient de variation des altitudes relatives. On rappelle que (i) l'altitude relative est ici définie comme la différence entre le dénivélé lu du point considéré et le dénivélé du point le plus haut du profil i.e., comme la différence entre l'altitude du point considéré et le plus haut du profil (ii) une augmentation de ces deux indicateurs sera interprétée comme une croissance i.e., une « repousse » des mottureaux.

Compte tenu des observations qualitatives précédentes, ces indicateurs sont calculés pour les parties des profils possédant avec certitude des mottureaux (i.e., de $x=8$ m à $x=30$ m sur le profil topographique soit 45 points).

Les résultats des calculs du « max-min » des dénivélés mesurés et le coefficient de variation des altitudes relatives sont donnés respectivement dans le tableau 2 (Figure 20) et le tableau 3 (Figure 21). Les valeurs de ces deux indicateurs obtenus en 2023 ont été également ajoutées dans les deux tableaux pour comparaison.

	07-avr-23	23-juin-23	14-sept-23	14-nov-23	5-mars-24	8-oct-24
Placette 1	24.5	21.5	14.5	19.6	22	24.8
Placette 2	26.5	28.5	26.2	29.5	27.3	33.2
Placette 3	19	18.5	21.2	17.7	16.4	18.1

Tableau 2. Valeurs calculées du paramètre « max-min » (en cm) de l'altitude relative pour les trois placettes aux dates d'intervention de 2023 et 2024.

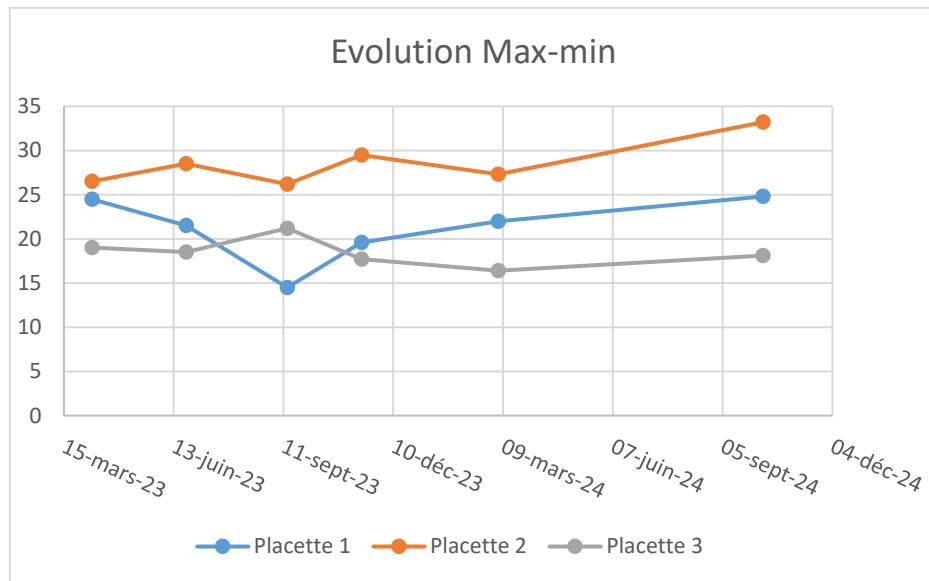


Figure 20. Evolution du paramètre « max-min » (en cm) pour les trois placettes aux dates d'intervention de 2023 et 2024.

	07-avr-23	23-juin-23	14-sept-23	14-nov-23	5-mars-24	8-oct-24
Placette 1	0.050	0.044	0.026	0.037	0.037	0.036
Placette 2	0.047	0.053	0.039	0.047	0.038	0.039
Placette 3	0.036	0.040	0.035	0.032	0.028	0.025

Tableau 3. Valeurs calculées du coefficient de variation de l'altitude relative (sans dimension) pour les trois placettes aux dates d'intervention de 2023 et 2024.

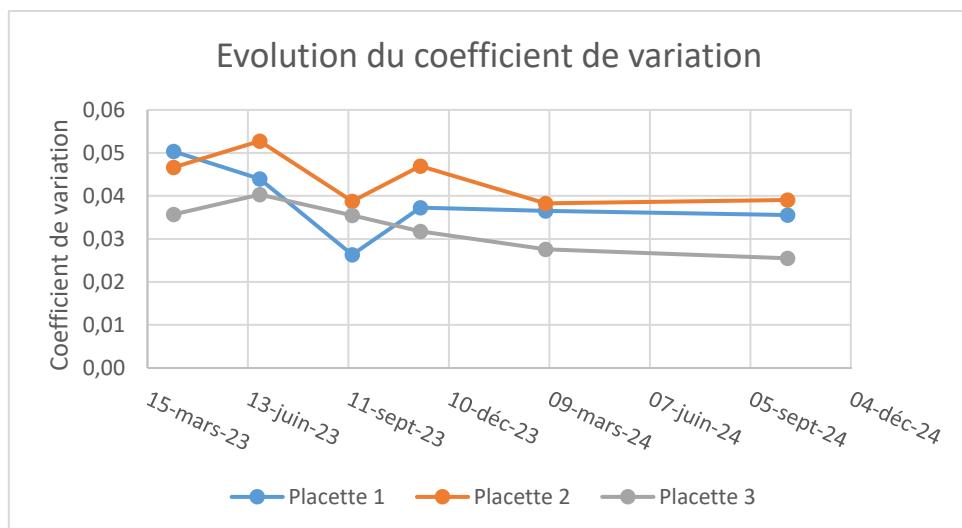


Figure 21. Evolution du coefficient de variation de l'altitude relative (sans dimension) pour les trois placettes aux quatre dates d'intervention.

Les Figures 20 et 21 et les tableaux 2 et 3 permettent de formuler les commentaires suivants :

- L'indicateur « max-min » des 3 placettes a augmenté en 2024. Toutefois, cette augmentation a été (i) la plus marquée pour la placette 2 et (ii) la plus faible pour la placette 3. L'indicateur des placettes 1 et 3 a retrouvé son niveau du début du suivi topographique au 7 avril 2023.
- L'indicateur « coefficient de variation » des placettes 1 et 2 est resté stable en 2024. Seule la placette 3 a vu son coefficient de variation diminuer cette même année.
- Au regard de l'évolution de ces deux indicateurs, il apparaît que la placette 3, en exclos permanent, montre un comportement différent des deux autres placettes. L'absence de compaction associée au bétail et la présence d'une végétation sans fauchage ni pâturage pourraient expliquer cette différence de comportement.
- Bien que le « max-min » de la placette 2 augmente significativement sur 2023, les valeurs du coefficient de variation de cette même placette apparaît stable la même année. Autrement dit, les deux indicateurs de la placette 2 n'apportent pas le même constat, il est difficile de conclure sur l'existence d'une dynamique de « repousse » sur cette même placette.
- En conclusion, les valeurs des deux indicateurs considérés ensemble varient peu sur l'année étudiée et n'indiquent pas clairement une « repousse » des mottureaux.

3.4.2 Comparaison via une tomographie de résistivité électrique transversale aux trois placettes

La TRE acquise le 8 octobre suivant un grand profil Est-Ouest est donnée sur Figure 23 (rappel : dispositifs de 48 électrodes d'espacement inter-electrode de 0.5m voir Figures 2 et 5).

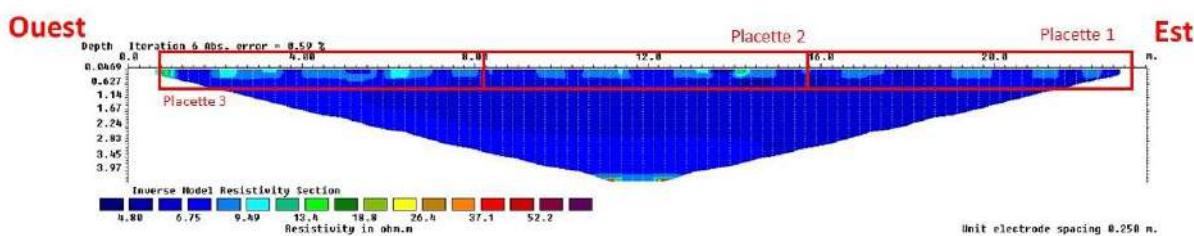


Figure 23. Tomographie de résistivité électrique transversale aux trois placettes acquise le 8 octobre.
Les positions des placettes sont aussi indiquées.

La Figure 23 confirme l'organisation verticale du sous-sol du site en trois couches. Le substratum calcaire que l'on devine à environ 4 m de profondeur (couleurs chaudes) est surmonté du bri saturé (couleurs bleu-vert clair) d'épaisseur plurimétrique. La couche de surface d'épaisseur métrique correspond au sol insaturé (couleur bleu clair) d'environ 0.5m d'épaisseur.

On observe que la placette 3 (exclos permanent) présente des anomalies moins conductrices (taches bleu clair) plus nombreuses et plus étendues que sur les deux autres placettes. Ces anomalies pourraient attester (i) la présence d'une eau plus douce (conduisant moins facilement le courant électrique) associée à une végétation plus nombreuse sur cette placette et/ou (ii) a contrario une remontée capillaire de sels dans les sols des placettes 1 et 2 facilitée par la compaction liée à la pâture.

3.4.3 Comparaison des pénétrogrammes et des profils de teneur en eau

Les propriétés mécaniques des sols dépendant fortement de leurs teneur eau, nous avons jugé intéressant ici de croiser les données pénétrométriques et le profil de teneur en eau acquis sur les trois placettes à la même date i.e., le 8 octobre.

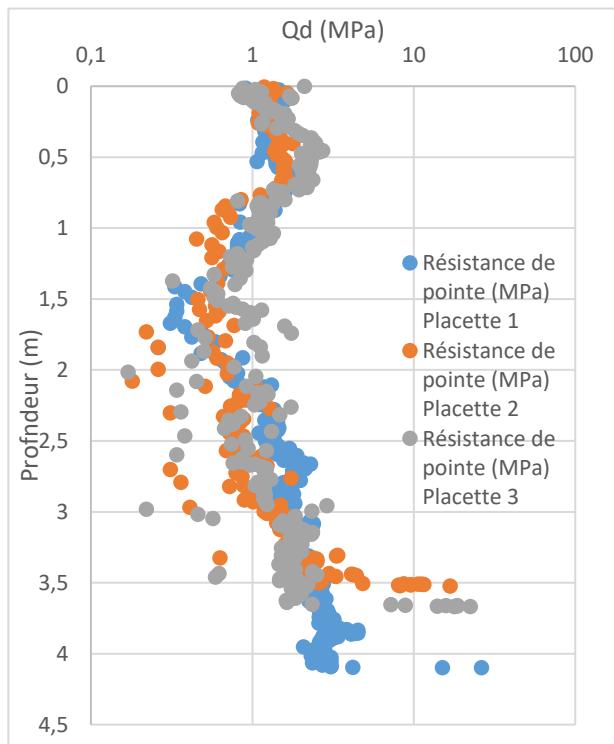


Figure 24. Pénétrogrammes des trois placettes acquis le 8 octobre.

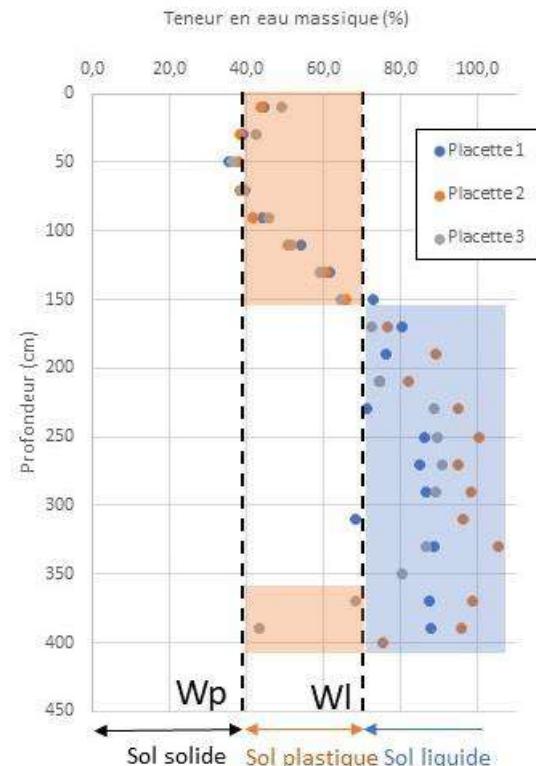


Figure 25. Profils de teneur en eau des trois placettes acquis le 8 octobre

W_p : limite de plasticité ; W_l : limite de liquidité.

La comparaison des deux Figures 24 et 25 confirme une structure à trois couches :

- 0-1.5 m (environ): sol en partie insaturé et en partie plastique ;
- 1.5 m-3,5/4 m: Bri saturé plastique à liquide (la résistance de pointe Q_d oscille autour de la valeur de 1 MPa et chute parfois jusqu'à 0,2 MPa)
- > 3,5/4 m : Substratum calcaire ($Q_d > 5$ MPa)

Alors que les données de résistance de pointe et de teneur en eau montrent sensiblement les mêmes valeurs pour les trois placettes sur l'épaisseur 0-1,5 m, on note qu'au-delà de 1,5 m de profondeur, ces mêmes paramètres apparaissent nettement plus dispersés. Cette dispersion peut s'expliquer par plusieurs facteurs : présence de lits discontinus de sols-bri à l'état liquide sur le site ; infiltrations d'eau de surface dans les fissures de dessiccation ou même via les sondages au cours des essais.

3.5 Comparaison entre zones sans mottureaux et zones à mottureaux

On vise dans cette section à confronter les données acquises dans les zones sans mottureaux (au nord des 3 placettes) à celles issues des zones à mottureaux (mottureaux aplatis des placettes et mottureaux non aplatis sur la partie sud du site). Ces données concernent les deux TRE perpendiculaires acquis le 8 octobre, les pénétrogrammes de la placette 2 réalisés aux deux périodes d'intervention et enfin des données topographiques issues du scanner laser 3D mis en œuvre sur les trois placettes et sur la partie sud mitoyenne des 3 placettes, occupée par des mottureaux non aplatis.

3.5.1 Comparaison via les tomographies de résistivité électrique

La Figure 26 présente les deux TRE acquises le 8 octobre sur les trois placettes. Leur disposition sur le site est donnée sur la Figure 2. Les positions des trois placettes ainsi que la position de la zone à mottureaux aplatis de la placette 2 sont indiquées en rouge sur les TRE. Les deux TRE sont tracées avec la même échelle de résistivité inversée pour permettre la comparaison.

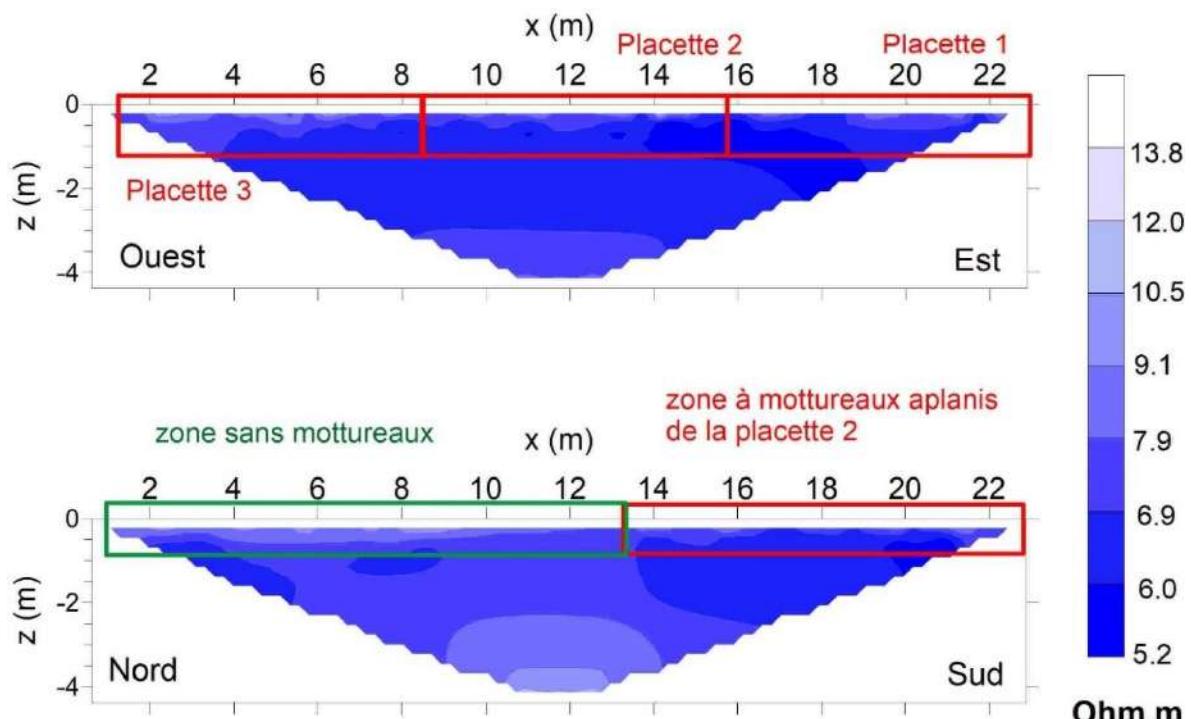


Figure 26. Tomographies de résistivité électrique perpendiculaires acquises le 8 octobre présentées avec la même échelle de résistivité inversée.

En comparaison avec les sols des trois placettes et celui de la zone à mottureaux aplatis, les sols de la zone sans mottureaux (zone indiquée en vert de $x=1\text{m}$ à $x=13\text{m}$ environ sur la TRE orientée nord-sud) présentent des résistivités un peu plus élevées (couleur bleu plus claire). Ces résistivités inversées plus élevées pourraient être associées à la présence d'une eau moins salée. Ce résultat suggère que la résistivité permettrait de discriminer « zone à mottureaux » et « zones sans mottureaux ». Il devra être confirmé dans le suivi de 2025 compte tenu des très faibles écarts de résistivité (de quelques Ohm.m).

3.5.2 Comparaison via les pénétrogrammes

Les figures 27 et 28 présentent les pénétrogrammes de la placette 2 acquis respectivement en mars et octobre 2024. Sur la figure 28, seuls les sondages réalisés au centre, au bord nord et à 5 m de ce même bord (voir positions Figure 2) sont figurés afin de faciliter la comparaison avec ceux acquis en mars 2024 aux mêmes points. La figure 29 présentent tous les sondages acquis en octobre sur la placette 2.

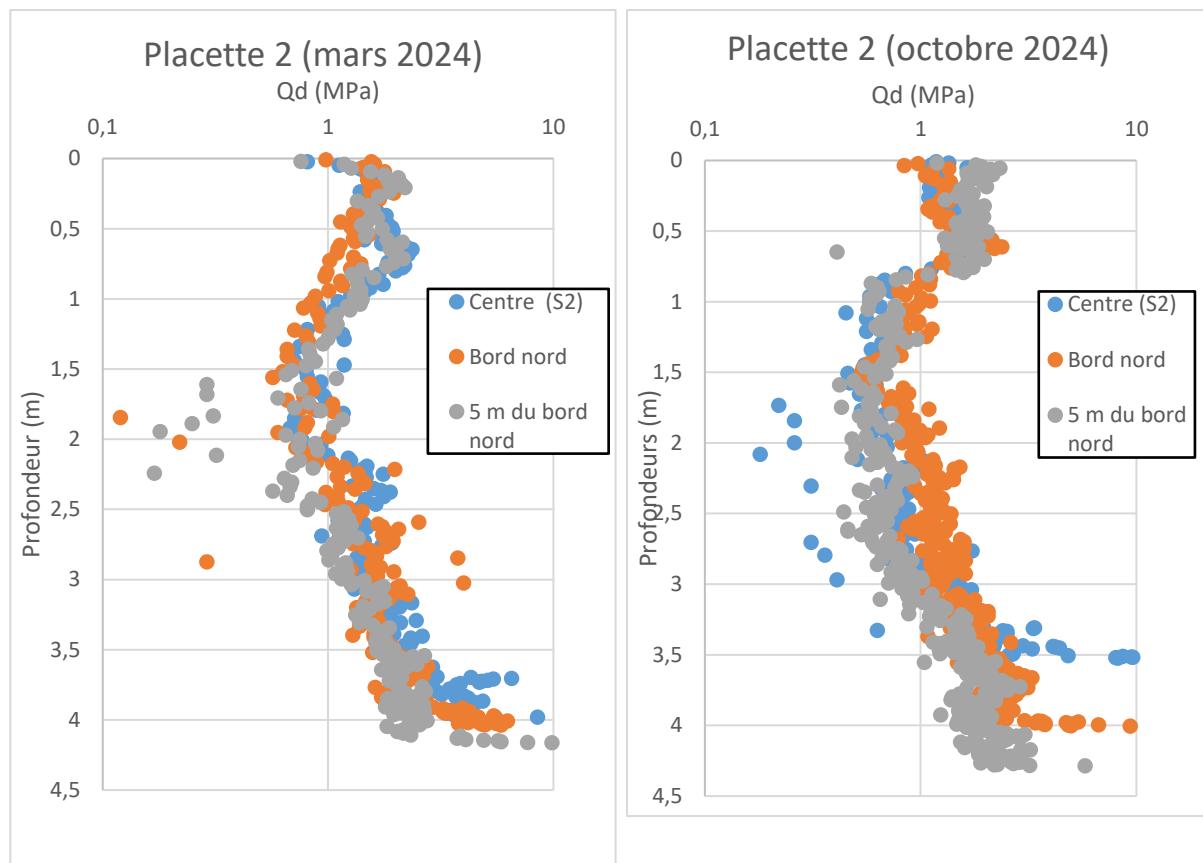


Figure 27. Pénétrogrammes acquis sur la placette 2 en mars. Le sondage en S2 au centre de la placette est situé dans une zone à mottureaux. Les deux autres sondages (bord nord et 5 m du bord nord) ont été réalisés dans une zone sans mottureaux.

Figure 28. Pénétrogrammes acquis sur la placette 2 en octobre. Le sondage en S2 au centre de la placette est situé dans une zone à mottureaux. Les deux autres sondages (bord nord et 5 m du bord nord) ont été réalisés dans une zone sans mottureaux.

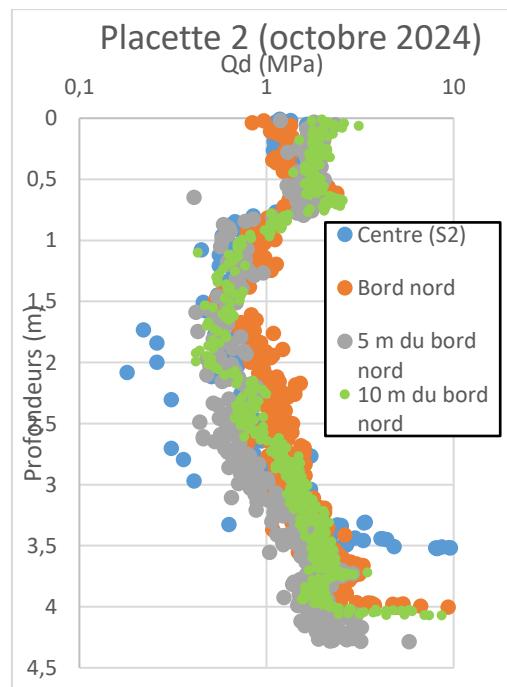


Figure 29. Tous les pénétrogrammes acquis sur la placette 2 en octobre. Le sondage en S2 au centre de la placette est situé dans une zone à mottureaux. Les trois autres sondages ont été réalisés dans une zone sans mottureaux.

On rappelle ici que

- i. Nous n'avons pu acquérir de données pénétrométriques sur la placette 1 (en S1) et placette 3 en mars à cause du caractère fortement détrempé des sols. Nous nous sommes donc concentrés sur la placette 2 et sa partie nord ne présentant aucun mottureaux.
- ii. Les pénétrogrammes acquis sur le bord nord de la placette 2, à 5 et 10 m de ce même bord ont été réalisés sur un sol sans mottureaux (voir positions sur Figure 2). Le pénétrogramme acquis au centre de la placette 2 (en S2 voir Figure 2) sur un mottureau aplani constitue ainsi une référence pour la comparaison.

Les Figures 27 et 28 montrent que pour les deux périodes d'intervention, les pénétrogrammes acquis dans la zone à mottureaux (au centre S2 de la placette 2) sont peu différents de ceux acquis dans les zones sans mottureaux :

- i. Les valeurs de résistance de pointe sont sensiblement identiques dans les deux zones (zone à mottureaux et zone sans mottureaux) ;
- ii. Les profondeurs du substratum (ou de manière équivalente l'épaisseur du bri) données par les pénétrogrammes (rappel : pour des $Q_d > 5 \text{ MPa}$) sont également sensiblement similaires dans les deux zones et égales à 3.5-4.3m. Compte tenu des résultats de la campagne de 2022 qui avaient montré des épaisseurs de bri les plus faibles dans la « belle » du nord du communal exempté de mottureaux (Cosenza et Caner, 2022), on se serait attendu à une épaisseur de bri beaucoup plus petite dans la zone sans mottureaux.

Ce constat montre que la résistance de pointe et l'épaisseur de bri ne permettent pas de discriminer « zone à mottureaux » et « zones sans mottureaux » (en tout cas pour le type de mottureaux mis en jeu sur le site de l'aplanissement).

Si les valeurs de résistance de pointe dans le bri de la zone sans mottureaux sont visiblement proches de celles mesurées dans la zone à mottureaux, cette ressemblance signifie que la densité du bri est sensiblement identique dans les deux zones (NB : on rappelle ici que les travaux de Bernard et al., 2007 avaient montré une corrélation positive entre résistance de pointe et densité sèche ou indice des vides des sols de marais). Ce fait remet donc en question le mécanisme de micro-diapirisme (i.e., remontée en surface d'une formation moins dense que celle qui la surplombe de la même manière que la « bulle de savon » remontant du fond de la baignoire). En effet, si un tel mécanisme avait joué, on se serait attendu à une densité et donc à une résistance de pointe significativement plus élevée dans le bri de la zone sans mottureaux.

3.5.3 Comparaison via les données du scanner laser 3D

La Figure 30 montre les résultats du scanner acquis sur les trois placettes et sur une zone à mottureaux non aplanis mitoyenne placettes 1 et 2 et située au sud de ces mêmes placettes. L'origine de l'échelle d'altitude donnée sur la figure correspond au point rouge O situé en bordure nord de la placette 2.

L'examen de cette figure permet d'avancer les éléments suivants :

1. Les données du scanner sont cohérentes avec celles acquises par le niveau. Les taches et spots en bleu de la figure 30 coïncident bien à des mottureaux aplanis situées plus bas en altitude que l'origine O du niveling des placettes 1 et 2 (voir Figures 11 et 7). Les mottureaux aplanis dans la zone sud de la placette 1 se distinguent bien par des spots kaki sur la carte.
2. Les mottureaux non aplanis mitoyens des placettes 1 et 2 sont bien identifiables par des spots rouges sur la carte.
3. Les ornières de la pelle utilisée pour l'aplanissement sont encore bien visibles par des bandes bleues orientées quasi-nord-sud sur la carte (on rappelle que ces ornières étaient *pro parte* immergées à la date d'intervention).
4. Les données du scanner sur la placette 3 sont plus parcellaires. Elles mettent en lumière la difficulté d'acquérir des données avec un couvert végétal important.

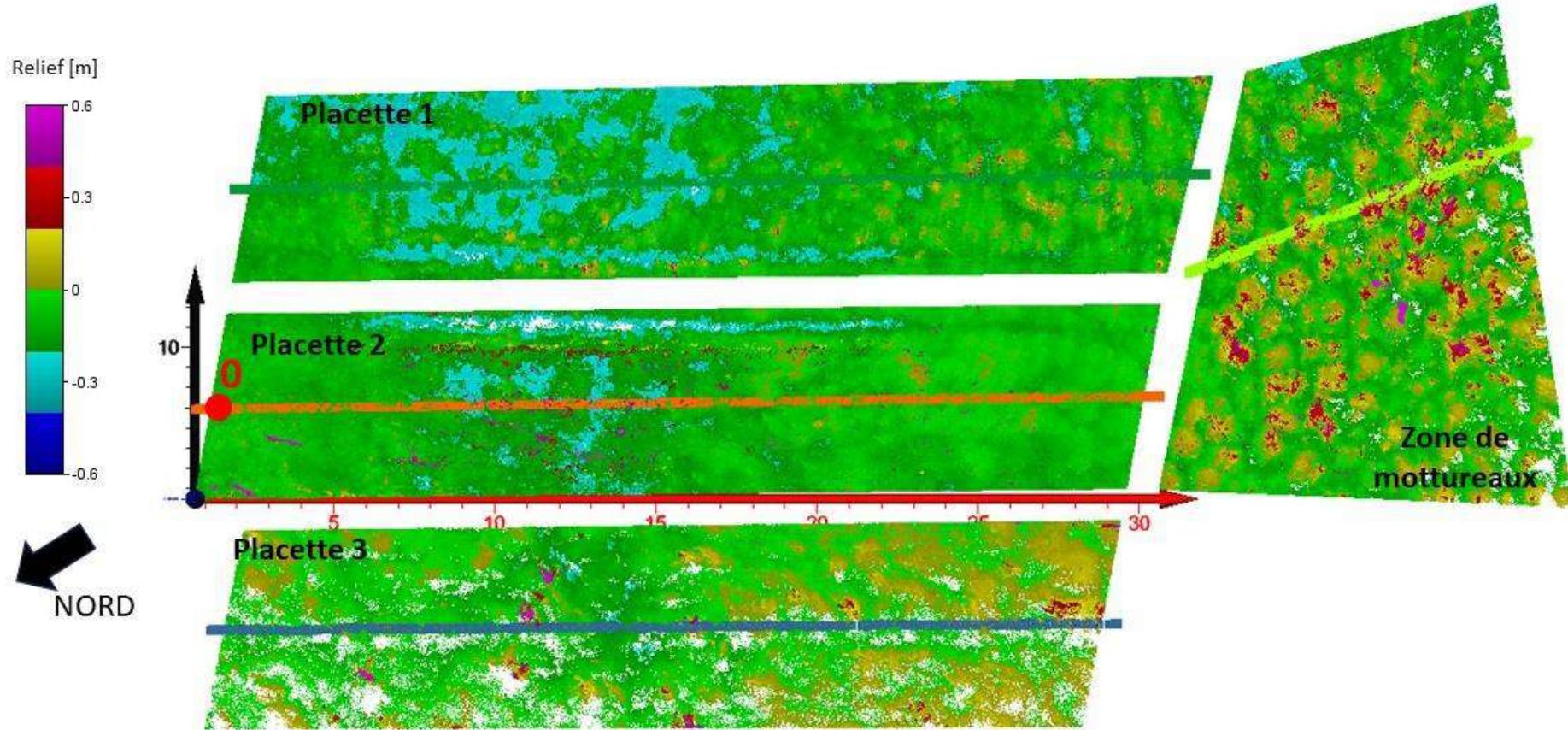


Figure 30. Résultats du scanner laser 3D sur les trois placettes et sur une zone de mottureaux non aplani. Le zéro de l'échelle de relief correspond à l'altitude du point O, en rouge, localisé en bordure nord de la placette 2. Les quatre bandes de couleur traversant les trois placettes et à la zone sud de mottureaux non aplani coïncident aux quatre profils extraits donnés sur la figure 31.

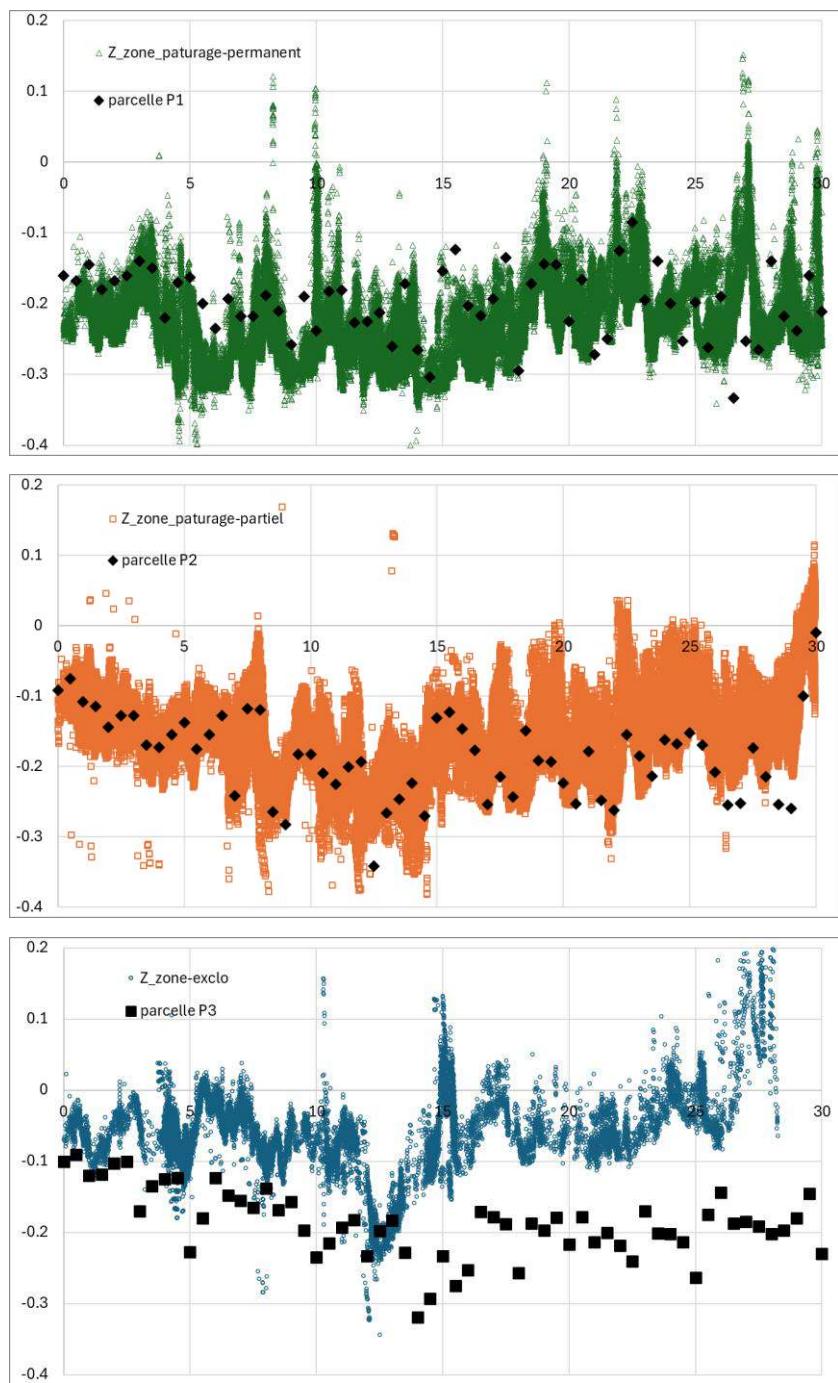


Figure 31. Comparaison entre données du scanner laser 3D et données du niveau optique. Les 3 profils sur la carte de la figure 30 sont indiquées par des traits de couleur vert foncé, orange et bleu dans le sens de la longueur des placettes.

La figure 31 montre une tentative de calage entre données du scanner laser et données de niveling obtenues par niveau optique sur les trois placettes. Le calage est relativement satisfaisant pour les placettes 1 et 2 : les « pics » et les « creux » sont positionnés sensiblement aux mêmes abscisses sur les trois profils.

Le calage est plus mauvais avec les données de la placette 3. Il confirme la difficulté d'acquérir des données de scanner laser avec un couvert végétal important.

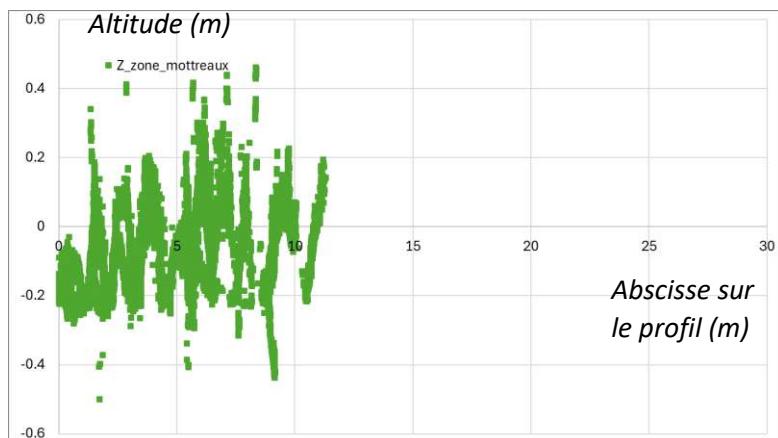


Figure 32. Profil topographique extrait des données du scanner laser 3D dans la zone à mottureaux non aplanis mitoyenne des placettes 1 et 2.

La Figure 32 présente un profil topographique extrait des données du scanner laser dans la zone à mottureaux non aplanis mitoyenne des placettes 1 et 2. Le profil confirme que la hauteur des mottureaux non aplanis se situe dans la gamme 30-40 cm. Notons que cette gamme constitue probablement un minorant de la hauteur réelle des mottureaux. En effet, on rappelle que les bas des mottureaux à la date d'intervention du 11 octobre étaient immersés et donc non accessibles par le laser du scanner.

4. DISCUSSION ET CONCLUSION

L'étude menée sur le Marais communal du Poiré-sur-Velluire durant l'année 2024 a concerné le suivi d'une expérimentation d'aplanissement de mottureaux sur trois placettes constituant un parallélogramme de 21 m de largeur sur 30 m de long (voir les détails du protocole expérimental dans Cosenza et Caner, 2023)

Le suivi de l'expérimentation a été assuré à trois dates de 2024 (5 mars, 8 et 11 octobre) par le déploiement in situ de méthodes variées : mesures de nivellation au niveau optique, prélèvements d'échantillons pour la mesure de teneur en eau, mesures de la résistance de pointe au pénétromètre dynamique léger, réalisation de tomographies de résistivité électrique. Il a été également réalisé pour la première fois sur le site, une cartographie de la surface des deux placettes 1 et 2 pâturées (non enherbées) au moyen d'un scanner laser 3D FARO®.

L'ensemble des données acquises en 2024 permet d'apporter des éléments sur les trois aspects suivants :

- i. La cinétique de « repousse » des mottureaux ;
- ii. L'incidence de la pâture ;
- iii. Les éléments constitutifs du mécanisme de formation des mottureaux.

4.1 La cinétique de « repousse » des mottureaux

Comme pour le suivi 2023, la cinétique de « repousse » des mottureaux des trois placettes a été investiguée à l'aide de deux indicateurs topographiques : le « max-min » des dénivélés mesurés des profils et le coefficient de variation des altitudes relatives correspondantes.

Bien que l'indicateur « max-min » des 3 placettes ait augmenté en 2024, il a retrouvé en réalité pour les placettes 1 et 3, son niveau du début du suivi topographique au 7 avril 2023.

L'indicateur « coefficient de variation » des placettes 1 et 2 est resté stable en 2024. Seule la placette 3 a vu son coefficient de variation diminuer cette même année. Autrement dit cet indicateur n'atteste pas de « repousse » de mottureaux en 2024.

En conclusion, les valeurs des deux indicateurs considérés ensemble varient peu sur l'année étudiée et n'indiquent pas une « repousse » franche des mottureaux.

4.2 L'incidence de la pâture

Bien que nous n'ayons pas observé d'indice d'une « repousse » des mottureaux en 2024, l'incidence des conditions différentes de pâture des trois placettes sur les données topographiques a été confirmée. D'une part, la placette 3 en enclos permanent montrent une évolution de ses indicateurs topographiques différente de celles des deux autres placettes soumises à une pâture significative. D'autre part, les profils topographiques de la placette 1 en pâture permanente ont montré un tassement relatif mesurable comparativement aux niveaux altimétriques moyens des deux autres placettes.

4.3. Les facteurs influents sur le mécanisme de formation des mottureaux

Comparativement aux études menées entre 2021 et 2023, les investigations réalisées en 2024 mettent en lumière deux nouveaux éléments qui vont permettre d'alimenter les réflexions sur les mécanismes de genèse de ces objets morphologiques si particulier :

1. Le suivi au pénétromètre en 2024 a montré que l'épaisseur du bri saturé dans la zone sans mottureaux du site n'était pas significativement différente de celle de la zone à mottureaux aplatis (voir section 3.5). Ce résultat ne confirme pas les observations de la campagne de 2022 au cours de laquelle il avait été constaté que l'épaisseur du bri saturé dans la « belle » au nord du Marais

communal (zone ne présentant pas de mottureaux) se montrait significativement plus faible que celles des « baisses » et zones riches en mottureaux. Le(s) mécanisme(s) participant à la genèse des mottureaux dépendraient donc peu de l'épaisseur de bri saturé et serai(en)t associé(s) à des phénomènes très superficielles i.e., opérant dans le premier ou les deux premiers mètres en surface du bri.

2. La campagne de 2024 montre qu'en période humide, les résistances de pointe dans la zone sans mottureaux du site ne sont pas significativement différentes de celles des placettes à mottureaux aplatis. Les gradients verticaux de résistance mécanique (et donc de densité) existants dans le bri saturé des deux zones sont sensiblement identiques. Cette similitude remet donc en cause des mécanismes de morphogenèse basés sur des écoulements ascendants de sols liquides dus à un contraste de densité entre couches (phénomènes dit de microdiapirisme) ou opérant à travers une discontinuité du sol (cf. Figure 4 de Caner et Cosenza, 2021).

Sur la base de travaux réalisés sur le Marais communal de 2021 à 2024, nous proposons dans le tableau 4 de synthétiser les rôles et l'importance de facteurs potentiellement influents sur la genèse des mottureaux : les gradients de salinité opérant à plusieurs échelles d'espace, la pâture, les fissures de dessiccation, l'épaisseur du bri saturé (dans un état plastique à liquide) et la résistance mécanique des sols. Deux caractéristiques essentielles se dégagent de ce tableau : l'existence de gradients de salinité à plusieurs échelles d'espace (du mottureaux à l'échelle du communal) et le caractère très superficiel probable des causes à l'origine des mottureaux. Les mécanismes possédant au moins l'une de ces deux caractéristiques sont :

- **Le gonflement et le retrait du sol argileux sous l'effet d'une pression de gonflement associée aux minéraux argileux** gonflants abondants dans les sols de marais (Figure 33a). Cette pression serait générée par l'arrivée d'eau douce dans le sol (plus salé) par les fentes de dessiccation. Les minéraux argileux dans un milieu contenant du NaCl dilué par l'apport d'eau douce pourraient présenter un gonflement alors qu'en présence d'une concentration plus élevée en NaCl ce gonflement est empêché.
- **Un phénomène d'instabilité hydrodynamique** de surface associé à une faible pente topographique (e.g. solifluxion des sols de talus saturés en eau et observée en contexte montagneux) (Figure 33b). Le bri après immersion passe d'un état solide (rigide) ou plastique à l'état liquide (comme attesté par les mesures au pénétromètre et les teneurs en eau) peut perdre sa cohésion et 'couler' même sur une pente douce. Ce phénomène expliquerait ainsi l'absence de mottureaux dans la « belle » située en partie haute du Marais communal et peu soumise à l'immersion. C'est l'interaction complexe entre cette instabilité hydrodynamique et les fentes de dessiccation (ou leurs traces) qui généreraient les formes observées des mottureaux.

Ces deux phénomènes qui viennent assez naturellement à l'esprit peuvent s'opérer sous forme de cycle annuel (au rythme des immersions du marais), se combiner voire s'associer avec d'autres processus non identifiés à ce jour. Pour permettre d'identifier le(s) mécanisme(s) de formation le(s) plus probable(s), il conviendrait toutefois de mener une campagne de mesures au laboratoire, i.e., en conditions contrôlées, pour confirmer et quantifier notamment la pression de gonflement évoquée et pour caractériser les rhéologies des matériaux argileux présents à différents états physiques (solide, plastique et liquide) et finalement de leurs mélanges tels qu'ils sont observés à l'échelle du Marais communal.

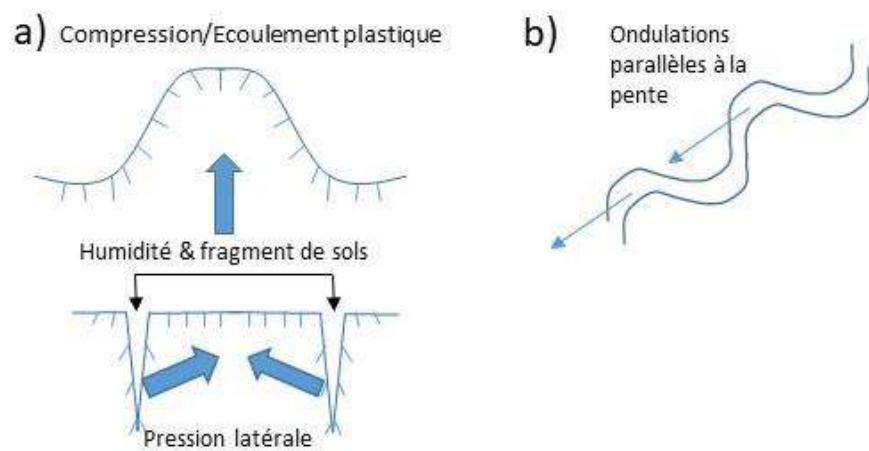


Figure 33. a) mécanisme de gonflement du sol argileux sous l'effet d'une pression associée aux minéraux argileux, b) phénomène d'instabilité hydrodynamique de surface associé à une faible pente topographique (extraits de la figure 4 de Caner et Cosenza, 2021).

Facteurs potentiellement influents	Observations & résultats	Rôle et importance
Gradients de salinité	<ul style="list-style-type: none"> Gradient local de salinité à l'échelle du mottureau : la racine ou noyau du mottureau apparaît plus salé que le sol du bas de mottureau (Caner et Cosenza, 2021). Sols de « belle » moins salés que sols de « baisses » (Cosenza et Caner, 2022). Pas de gradient clairement mis en évidence à l'échelle plurimétrique (interprétation par TRE, Cosenza et Caner, 2022, 2023). Mais à l'échelle de l'expérimentation d'aplanissement : faible gradient possible entre zones à mottureaux et zones sans mottureaux (interprétation par TRE dans ce rapport, à confirmer en 2025). 	Un gradient local de salinité à l'échelle du mottureau pourrait impliquer l'existence d'une pression de gonflement osmotique. Toutefois l'amplitude de celle-ci sur le site du Poiré demeure inconnue à ce jour.
Pâture	La placette en exclos permanent présente des profils et des indicateurs topographiques différents de ceux des placettes subissant une pâture plus ou moins permanente (Cosenza et Caner, 2023 et ce rapport).	Il n'y a donc aucune raison de penser qu'une compaction des sols d'origine animale n'ait pas d'impacts sur la cinétique de mise en place des mottureaux. Cela reste encore à montrer.
Fissures de dessiccation	<ul style="list-style-type: none"> La forme des contours horizontaux des mottureaux ressemble aux polyèdres que forment les fissures de dessiccation dans les sols argileux. Elles sont probablement en communication avec le bri plastique en profondeur. Ces fentes permettraient ainsi la circulation d'eau douce et créeraient des gradients verticaux de salinité et de teneur en eau entre le bri plastique et liquide salé (interprétation par TRE, Cosenza et Caner, 2023). 	<ul style="list-style-type: none"> Leur rôle dans la genèse des mottureaux avait été suspecté par Verger (1964). Ce dernier avait imaginé un mécanisme de pression de gonflement provoquée par des matériaux accumulés dans les fentes de dessiccation. Ce mécanisme est écarté du fait de la rhéologie du matériau. L'étude sur le communal du Poiré n'a pas permis d'identifier un rôle direct dans la genèse des mottureaux.
Epaisseur du bri saturé (plastique-liquide)	<ul style="list-style-type: none"> L'épaisseur du bri saturé dans la « belle » au nord du communal ne présentant pas de mottureaux est significativement plus faible que celles des « baisses » et zones riches en mottureaux (Cosenza et Caner, 2022) Toutefois, les données de 2024 de l'expérience d'aplanissement montrent que l'épaisseur du bri dans la zone sans mottureaux n'est pas significativement différente de celle de la zone à mottureaux aplani (ce rapport). 	Les données de 2024 montrent que l'épaisseur du bri saturé (à l'état plastique et liquide) n'aurait pas un rôle important.
Résistance mécanique du bri	<ul style="list-style-type: none"> Les données de pénétrométrie de l'expérience d'aplanissement de 2023 montrent que la résistance de pointe du bri diminue en période humide pouvant contribuer à générer une instabilité hydrodynamique. Toutefois, la campagne de 2024 montre qu'en période humide, les résistances de pointe dans la zone sans mottureaux du site d'aplanissement ne sont pas significativement différentes de celles des placettes à mottureaux aplani. 	Les données de 2024 montrent que des gradients verticaux de résistance mécanique (et donc de densité) existants dans le bri saturé n'auraient pas un rôle aussi important.

Tableau 4. Synthèse sur le rôle et l'importance des facteurs identifiés comme potentiellement influents sur la morphogénèse des mottureaux du communal.

BIBLIOGRAPHIE

- Bernard, M., 2006. Etude du comportement des sols de marais : Evolution minéralogique,structurale et hydromécanique (Marais de Rochefort et Marais Poitevin). Thèse de Doctorat. Université de Poitiers, 300 pp.
- Bernard, M., Dudoignon, P., Pons, Y., Chevallier, C. and Boulay, L., 2007. Structural characteristics of clay-dominated soils of a marsh and a palaeosol in a crossed diagram. European Journal of Soil Science, 58, 1115-1126.
- Caner, L., Cosenza, P. (2021). Etude de la structure des sols des mottureaux de la Réserve Naturelle régionale du Marais communal du Poiré-sur-Velluire. Rapport Parc naturel régional du Marais Poitevin. 66 p.
- Cosenza, P. Caner, L (2022). Cartographie de la salinité du sol de la Réserve Naturelle Régionale du Marais communal du Poiré-sur-Velluire. Rapport Parc naturel régional du Marais Poitevin. 51 p.
- Cosenza, P. Caner, L (2024). Suivi annuel de l'expérimentation d'aplanissement de mottureaux de la Réserve Naturelle régionale du Marais communal du Poiré-sur-Velluire, Rapport Parc naturel régional du Marais Poitevin. 47 p.
- Florsch, N., & Muhlach, F. (2018). Géophysique appliquée pour tous 1: Méthodes électriques (Vol. 1). ISTE Group.
- Gallier J., 2011. Caractérisation des processus d'évolution structurale et de salinité des sols de marais côtiers par mesures mécaniques et géo-électriques in situ. Thèse doctorat université de Poitiers, 239p.
- Langton, D. D. (1999). The Panda lightweight penetrometer for soil investigation and monitoring material compaction. Ground Engineering, Sept, 33-37.
- Verger, F. (1964). Mottureaux et gilgais. In *Annales de géographie* (Vol. 73, No. 398, pp. 413-430). Armand Colin.
- Zhou, S. (1997). Caractérisation des sols de surface à l'aide du pénétromètre dynamique léger à énergie variable type "panda" (Thèse de doctorat de l'Université de Clermont-Ferrand 2).