

RAPPORT D'ETUDE

2023

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

Etude 2023-259



Responsables scientifiques du projet :
COSENZA Philippe – CANER Laurent
Participation au projet :
BRUNET Julien
LAFOREST Claude



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

Avec le concours financier de :

Table des matières

1. INTRODUCTION ET PROBLEMATIQUE	5
1.1 Contexte général	5
1.2 Rappel des résultats de l'étude de 2022	5
1.3 Objectif de l'étude	6
2. MATERIELS ET METHODES	7
2.1 Procédure d'aplanissement	7
2.2 Prospections de terrain	8
<u>2.2.1 Sondages à la tarière</u>	9
<u>2.2.2 Mesures de la teneur en eau</u>	10
<u>2.2.3 Nivellement géométrique relatif</u>	10
<u>2.2.4 Mesure de la résistance de pointe</u>	11
<u>2.2.5 Tomographie de résistivité électrique</u>	12
3. RESULTATS	13
3.1 Placette 1	13
<u>3.1.1 Profils topographiques</u>	13
<u>3.1.2 Tomographies de résistivité électrique</u>	15
<u>3.1.3 Profils de résistance de pointe</u>	17
<u>3.1.3 Profil de teneur en eau massique</u>	19
3.2 Placette 2	20
<u>3.2.1 Profils topographiques</u>	20
<u>3.2.2 Tomographies de résistivité électrique</u>	21
<u>3.2.3 Profils de résistance de pointe</u>	23
<u>3.2.3 Profil de teneur en eau massique</u>	25
3.3 Placette 3	26
<u>3.3.1 Profils topographiques</u>	26
<u>3.3.2 Tomographies de résistivité électrique</u>	27
<u>3.3.3 Profils de résistance de pointe</u>	28
<u>3.3.3 Profil de teneur en eau massique</u>	31
3.4 Comparaison entre placettes	32
<u>3.4.1 Comparaison des profils topographiques</u>	32
<u>3.4.2 Comparaison des tomographies de résistivité électrique</u>	36
<u>3.4.2 Comparaison des pénétrogrammes</u>	38
III. DISCUSSION ET CONCLUSION	40
3.1 Les conditions initiales de l'expérimentation et la cinétique de « repousse » des mottureaux	40
3.2 L'incidence de la pâture	40
3.3. Sur les éléments constitutifs du mécanisme de formation des mottureaux	42
BIBLIOGRAPHIE	45
ANNEXE 1	46

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 pâturé 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 ressuie 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, pâturés, 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 en janvier 2023 dont la mise en œuvre et le suivi annuel sont décrits dans ce rapport.

1.2 Rappel des résultats de l'étude de 2022

En 2022 l'équipe HydrASA de l'IC2MP (Institut de Chimie des Milieux et Matériaux de Poitiers, Unité Mixte de Recherche CNRS-Université de Poitiers) a réalisé une campagne de mesures visant à mieux préciser le rôle de la salinité ou des gradients de salinité dans la formation des mottureaux. Elle fait suite à une étude de caractérisation de quatre zones présentant différents types de mottureaux et d'une zone de référence sans mottureaux (Caner et Cosenza, 2021).

Pour mener à bien cette caractérisation de la salinité des sols mis en jeu, des profils de salinité des sols du Communal par des mesures de la résistivité électrique du sol ont été effectués en développant la méthode utilisée en 2021 pour pouvoir la déplacer le long de diagonales dans le communal. Des zones sans mottureaux et des zones avec les différents types de mottureaux analysés en 2021 ont été ainsi explorées.

Les prospections géo-électriques ainsi menées en 2022 n'ont pas mis en évidence de gradients horizontaux de salinité dans les sols (i.e. dans les premières dizaines de cm de profondeur) à l'échelle des zones d'étude riches en gros mottureaux. Suivant cette dernière observation, il apparaît que la genèse des gros mottureaux ne soit pas contrôlée par des gradients horizontaux de salinité des sols à l'échelle de la zone d'étude i.e., à des échelles pluri-métriques. Ce constat ne remet néanmoins pas en cause l'existence de gradients de salinité très locaux à l'échelle d'un mottureau i.e., entre partie basse et partie haute du mottureau à l'échelle décimétrique (Caner et Cosenza, 2021).

Dans la zone 2 sans mottureaux, ces prospections de 2022 ont toutefois clairement mis en lumière un gradient Nord-Sud de salinité. Ce gradient pourrait correspondre à une alimentation en eau douce du site depuis les plateaux calcaires situés au Nord du marais (formations Jurassiques du Bajocien (J2) et du Bathonien (J3) d'après la carte géologique au 1/50000 de Marans).

Des mesures de tomographie de résistivité électrique couplées à des sondages à la tarière et pénétrométriques ont également été réalisées pour obtenir un modèle de répartition verticale des couches de sols le long d'un profil. Ces mesures ont permis d'identifier schématiquement trois unités d'épaisseur variable suivant les zones. Depuis la surface, on distingue :

1. Une couche de bri insaturée (où les pores sont remplis d'air et d'eau).
2. Une couche de bri saturé.
3. Une ou des formations calcaires (roche altérée, sables et graviers calcaires).

La couche de bri saturé est formée d'une argile très molle et plastique possédant des lits plus ou moins épais d'argile liquide (liquide au sens des limites d'Atterberg). Elle se montre plus salée que les formations sus-jacentes. Suivant les données pénétrométriques et les tomographies de résistivité électrique, cette couche d'argile très molle et plastique présente des épaisseurs pluri-métriques dans les zones à gros mottureaux et mottureaux en boule et seulement pluri-décimétriques dans la zone de référence sans mottureaux. Cette couche d'argile très molle et plastique aurait donc un rôle certain dans la genèse des mottureaux. La campagne géoélectrique a également mis en évidence la présence de fissures de dessiccation pluridécimétriques nombreuses à proximité des mottureaux. Celles-ci nous semblent jouer un rôle important dans la mise en place de ces objets géomorphologiques si particulier que sont les mottureaux.

1.3 Objectif de l'étude

L'objectif de l'étude proposée en 2023 est de suivre l'évolution de mottureaux aplanis du Communal à travers la mesure de paramètres de nature variée : topographie du sol, teneur en eau, résistivité électrique et résistance au pénétromètre.

2. MATERIELS ET METHODES

2.1 Procédure d'aplanissement

L'expérimentation d'aplanissement a consisté à enfoncer les mottureaux dans le sol sur une surface de 630 m² (parallélogramme de 21m de largeur sur 30 m de long). Afin d'observer la « repousse » des mottureaux dans différentes conditions de pâture. Ce parallélogramme a été divisé lui-même en 3 bandes de 7m par 30 m (Figures 1).

- La première zone (placette 1) est non clôturée et accessible toute l'année aux animaux. Elle représente la condition actuelle de formation de mottureaux.
- La deuxième zone (placette 2) est clôturée (fils électriques sur 5 rangs) en début de saison puis accessible lorsque le sol est plus porteur après ressuyage et baisse des niveaux d'eau dans les fossés, simulant une entrée des animaux dans le communal plus tardive.
- Enfin la troisième zone (placette 3) est un exclos isolé de tout pâturage par une clôture permanente permettant de comprendre la formation des mottureaux sans aucune intervention des animaux dans le processus.

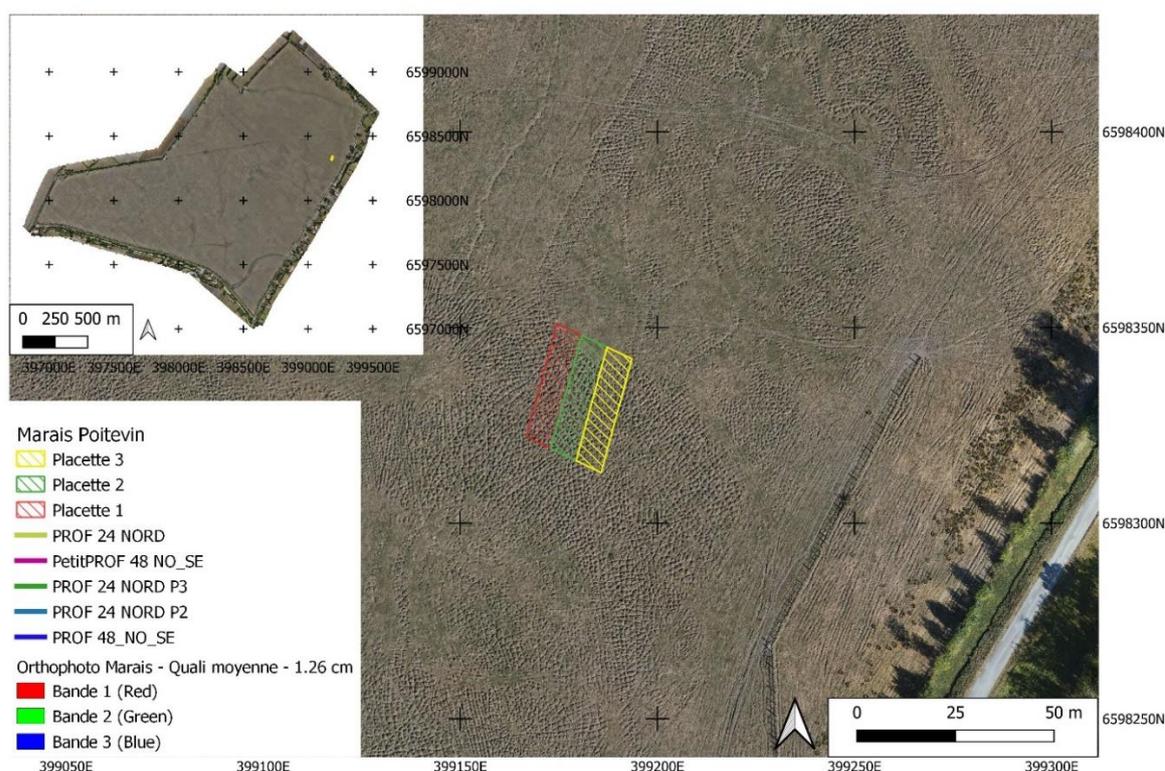


Figure 1 : Localisation de l'expérimentation (source : SIG PNR Marais Poitevin).

On note que

- ce parallélogramme de trois placettes se situe dans la zone 1 des études de Caner et Cosenza (2021) et Cosenza et Caner (2022) dans laquelle des gros mottureaux d'environ 40 cm de hauteur avaient été observés ;
- la partie Nord des trois placettes présente une surface sans mottureaux qui constituera une zone de référence ou « zone témoin » pour le suivi à long terme de l'expérimentation.

L'aplanissement des mottureaux des trois placettes a été réalisé le 26 janvier 2023 à l'aide du plat d'un godet de nivellement porté par une pelle mécanique (Figure 2 et photo de la couverture du rapport).

La placette 2 a été déclôturée et débroussaillée le 24 juillet 2023.



Figure 2. Opération d'aplanissement de mottureaux. Au premier plan, on devine les empreintes des mottureaux aplanis indiqués en traits pointillés blancs.

2.2 Prospections de terrain

L'étude menée en 2023 sur le Marais Communal du Poiré-sur-Velluire a comporté essentiellement des campagnes de terrain (sondages à la tarière, opérations de nivellement, tomographies de résistivité électrique et mesures de résistance de pointe) 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 fréquence des interventions sur site fut environ bimestrielle (tous les deux mois).

La figure 3 indique les positions des sondages à la tarière et pénétrométriques ainsi que celles des tomographies de résistivité électrique.

Date	Méthodes	Remarques
26 janvier	1 Tomographie de résistivité électrique (TRE) sur chacune des 3 placettes+ 2 TRE transversales aux 3 placettes, 3 sondages pénétrométriques, prélèvements, positionnement GPS du prospect	Mesures effectuées avant l'aplanissement réalisé à la même date. Sol détrempe
7 avril	Nivellement, 3 TRE (1 grand transversal et 2 petits sur placettes 1 et 2), 3 sondages pénétrométriques, prélèvements	La placette 2 est clôturée
23 juin	Nivellement, 3 TRE (1 grand transversal et 2 petits sur placettes 1 et 3), 3 sondages pénétrométriques, prélèvements	La placette 2 est clôturée
12 septembre	1 TRE sur chacune des 3 placettes+ 1 grande TRE transversale aux 3 placettes, 3 sondages pénétrométriques, prélèvements.	La placette 2 est déclôturée. Présence de fissures de dessiccation d'ouverture centimétrique
14 septembre	Nivellement	
14 novembre	Nivellement, 3 sondages pénétrométriques	La placette 2 est déclôturée. Sol détrempe

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

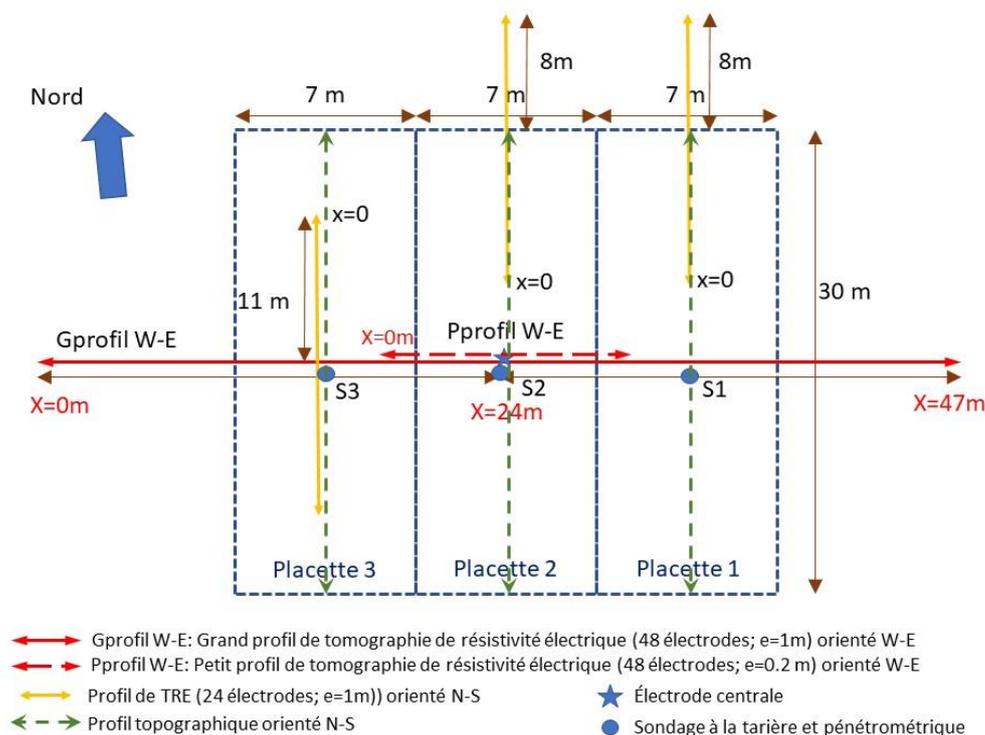


Figure 3. Localisation schématique des tomographies de résistivité électrique, des sondages à la tarière et pénétrométriques et des profils topographiques.

2.2.1 Sondages à la tarière

Un sondage du sol a été réalisé au centre de chaque placette (Figure 3) 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 à au moins 1,20 m pour les analyses de laboratoire. Leur profondeur est référencée au milieu de la profondeur prélevée. Le

niveau de référence a été pris au bas des mottureaux. Des sondages ont été réalisés à des profondeurs comprises entre 2 m et 3,50 m dans certaines zones. 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.

2.2.2 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.

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

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

2.2.3 Nivellement géométrique relatif

Le principe du nivellement géométrique a consisté ici en la mesure d'une succession de différences d'altitude. Ces mesures de différences d'altitude peuvent 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 simplement lu sur la mire qui est tenue à la verticale (Figures 4a et 4b). La précision des mesures a été estimée à environ 5 mm.

Un profil de nivellement Nord-Sud par placette a été effectué suivant un pas d'échantillonnage de 50 cm (Figure 3).

Dans notre cas, les mesures n'ont pas été ramenées en altitudes absolues. Les altitudes 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 en altitude (Figure 4b). 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. 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 rapport à l'altitude 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 4a. Au premier plan à gauche : le niveau optique sur trépied. Au second plan à droite : la mire tenue verticalement.

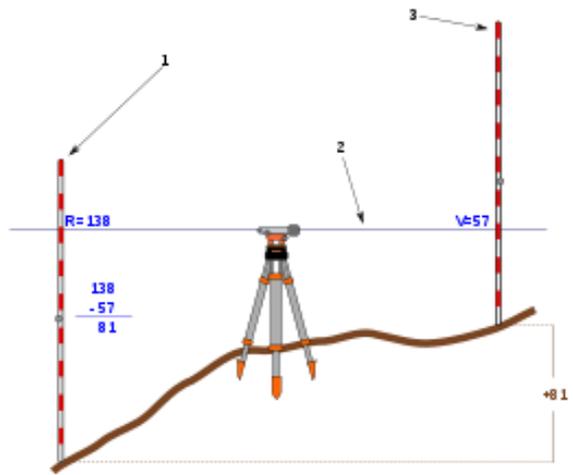


Figure 4b. Principe du nivellement géométrique relatif. NB : la valeur de dénivelé la plus petite lue sur la mire graduée correspond au point le plus haut en altitude (source : Wikipedia).

2.2.4 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 3).

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 5). 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 (Q_d en MPa) en fonction de la profondeur encore appelé *pénétrogramme* est obtenu. L'appareil permet des mesures comprises 0,1 à 40 MPa. Les mesures ont été réalisées avec une pointe 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 Q_d a été mesurée jusqu'à une profondeur de 4 m environ.

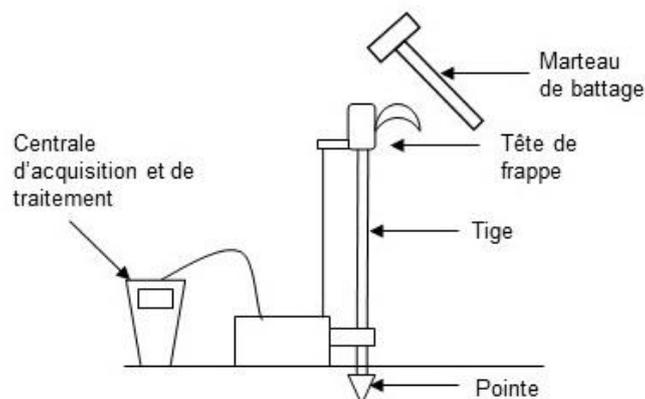


Figure 5 : Principe du pénétromètre dynamique PANDA[®].

2.2.5 Tomographie de résistivité électrique

La méthode de tomographie de la résistivité électrique 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 6). 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 ou tomographie. La procédure consiste alors à « interroger » quatre par quatre les électrodes en ligne via un câble multi-conducteur (appelé « flûte »), et suivant une séquence prédéfinie dans un programme informatique. 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 de la résistivité électrique (TRE). L'inversion se fait avec le logiciel Res2DInv®.

Dans notre étude, trois séquences d'électrode ou dispositifs suivant une configuration Wenner-Schlumberger ont été programmées :

- Deux dispositifs de 48 électrodes d'espacement inter-électrode de 0.2 m et 1m permettent d'obtenir deux TRE de longueur, de profondeur et donc de résolutions différentes (configuration Wenner-Schlumberger à 463 quadripôles pour les deux dispositifs)). La TRE d'espacement inter-électrode de 0.2 m (respectivement de 1m) possède une longueur de 9.6 m (respectivement 47m) et de profondeur d'investigation d'environ 1.75 m (respectivement 8.75m).

Ces deux dispositifs ont été mis en place transversalement aux trois placettes (Figure 3).

- Un dispositif de 24 électrodes d'espacement inter-électrode de 1m possède une longueur de 23 m d'investigation d'environ 5 m (configuration Wenner-Schlumberger à 121 quadripôles). Ce dispositif a été mis en place sur les bordures Nord des trois placettes (Figure 3).



Figure 6. 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.

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.

3.1.1 Profils topographiques

La Figure 7 montre les 4 profils d'altitude relative acquis aux 4 dates d'intervention (Tableau 1). Comme l'indique la Figure 3, ces 4 profils topographiques ont été acquis dans le sens de la longueur de la placette (orientation Nord-Sud) et sensiblement aux mêmes points. Ils sont disposés à cheval entre la zone sans mottureaux (zone de référence) et la placette 1 elle-même. Le point $x=0$ sur la Figure 8 est situé sur la bordure Nord de la placette.

Comme souligné en section 2.2.3, les altitudes indiquées sont relatives à la valeur la plus basse du dénivelé lu sur la mire (et donc au point ayant l'altitude la plus élevée du profil, Figure 4b). L'altitude relative égale à 0 sur la Figure 7 correspond donc au point à l'altitude la plus haute du profil.

En effet, pour faciliter la comparaison des profils acquis à différentes dates d'intervention, les valeurs lues sur la mire ont été soustraites de la valeur de dénivelé la plus petite lue sur la même mire de chaque profil acquis à la date d'intervention donnée. Cette soustraction ou translation permet en outre de visualiser des altitudes relatives systématiquement positives.

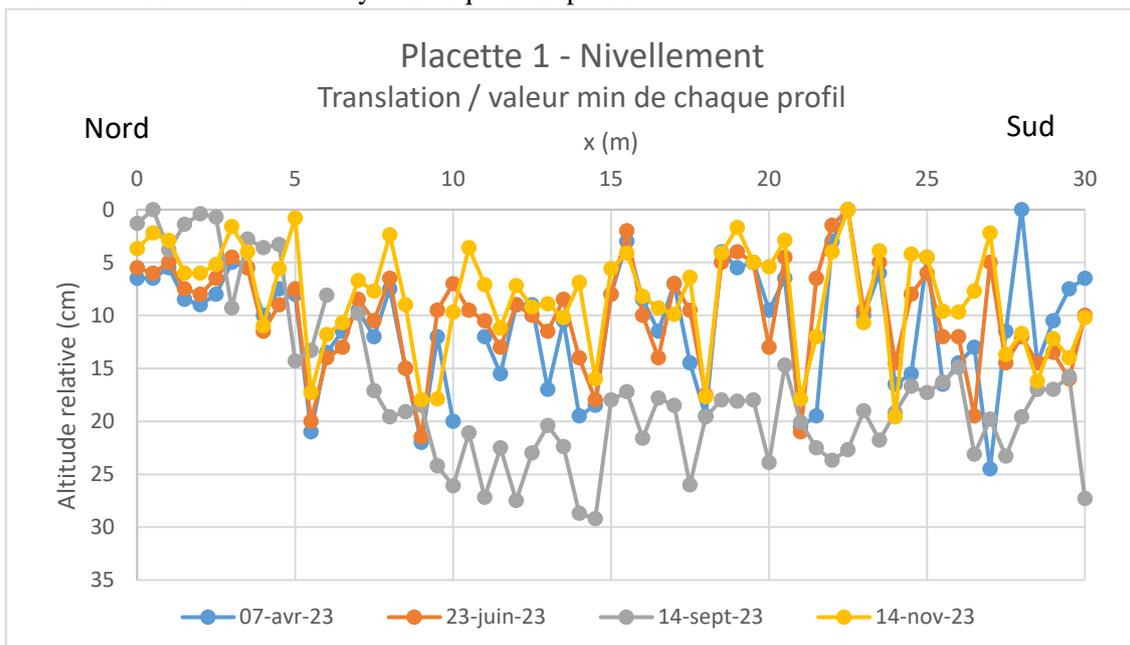


Figure 7. Profils d'altitude relative mesurés à quatre dates d'intervention (Tableau 1) sur la placette 1. Les altitudes indiquées sont donc relatives au point le plus haut de chaque profil (possédant donc une altitude relative égale à 0).

La Figure 7 permet de formuler les observations suivantes :

- 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 l'existence de mottureaux qui n'ont pas été complétement aplatis sur le site. Autrement dit, l'expérimentation initiée met en jeu malgré tout de petits mottureaux à tête aplatie.

- 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 est plus haute en altitude que la zone à mottureaux. Dans cette zone, pas de « pics » d'altitude ni de « creux » ne sont observés : c'est bien une zone sans mottureaux.
- Ainsi globalement, pour les quatre dates d'intervention, l'altitude relative mesurée sur les trois profils varie dans une amplitude d'une trentaine de centimètres. L'amplitude maximum de 33 cm d'altitude a été mesurée le 14 septembre sur la placette 2.
- La campagne de mesures du 14 septembre se distingue nettement de celle des trois autres par les caractéristiques suivantes : (a) l'amplitude des variations spatiales d'altitude relative est la plus élevée (b) la zone sans mottureaux est significativement plus haute que la zone à mottureaux aplatis. Cette dernière caractéristique correspondant à un tassement du sol dans la zone à mottureaux plus élevé que celui de la zone à mottureaux. Ce tassement plus important dans la zone à mottureaux est à associer à un retrait par dessiccation plus important dans cette zone à cause d'une surface d'échange sol-air plus grande offerte par les mottureaux (comparativement à la surface plate de la 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 le plus haut en altitude du profil considéré.

La Figure 8 permet de formuler les commentaires suivants :

- On retrouve une relativement bonne reproductibilité du positionnement des mesures (à l'exception de la fin du profil pour $x>24$ m et de celui acquis le 14 septembre) : les « pics » et « creux » sont localisés sensiblement aux mêmes points sur le profil.
- L'amplitude relative entre « pics » et « creux » associée aux mottureaux aplatis semble s'être atténuée après l'été pour la date du 14 septembre (points gris) pour ensuite réaugmenter le 14 novembre après les pluies automnales (points jaunes).

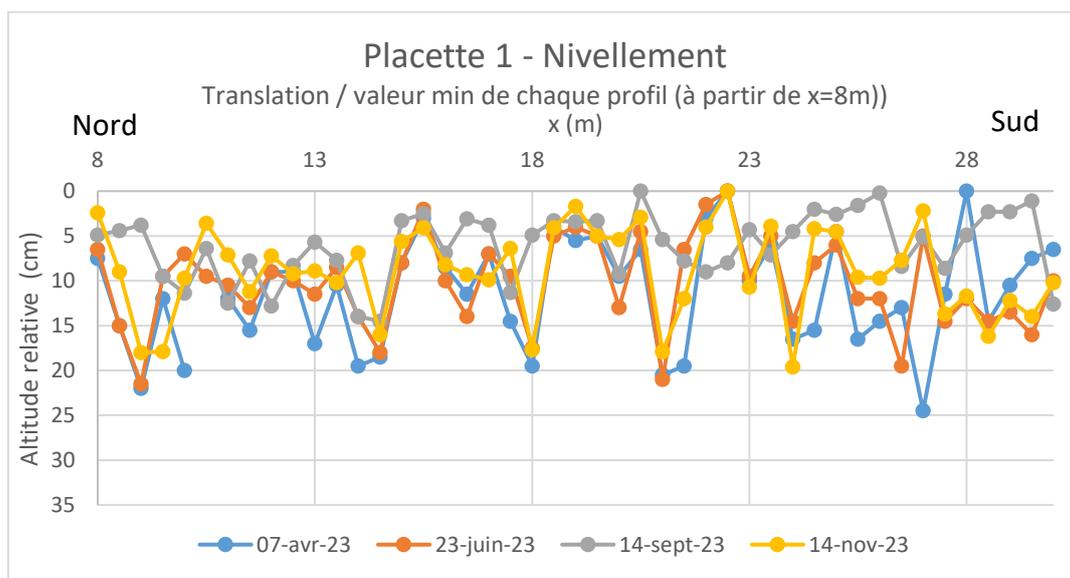


Figure 8. Profils d'altitude relative mesurés à quatre dates d'intervention (Tableau 1) sectionné ici de $x=8$ m à $x=30$ m i.e., dans la zone à mottureaux (placette 1). Les altitudes indiquées sont donc relatives au point le plus haut de chaque profil.

3.1.2 Tomographies de résistivité électrique

Les quatre tomographies de la résistivité électrique (TRE) acquises sur la placette 1 sur l'année 2023 sont données sur les Figures 9a, 9b, 9c et 9d avec quatre échelles différentes de résistivité (échelles adaptées à chacune des TRE) et sur la Figures 10 avec une même échelle de résistivité pour comparer les quatre TRE. Les positions des TRE sont données sur la Figure 3 (avec la position du point $x=0$ m).

L'ensemble de ces figures confirme une organisation verticale du sous-sol du site en trois couches (Cosenza et Caner, 2022) :

- de 0 à 1 m environ de profondeur, une couche de sol hétérogène et insaturé en période sèche.
- de 1 à 4m environ, la couche de bri saturé caractérisée par des valeurs de résistivité inversée très faibles typiquement inférieures à 8 Ohm.m (dégradé de couleurs bleues).
- A partir de 4 m, une formation plutôt stratifiée caractérisée par des valeurs de résistivité supérieures à 10 Ohm.m (couleurs chaudes). Il s'agit probablement du calcaire plus ou moins altérée.

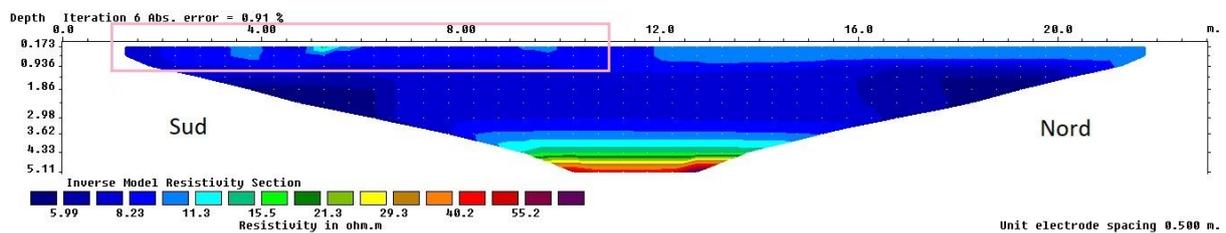


Figure 9a : Tomographie de la résistivité électrique sur la placette 1 acquise le 26 janvier 2023 avant aplatissage des mottureaux.

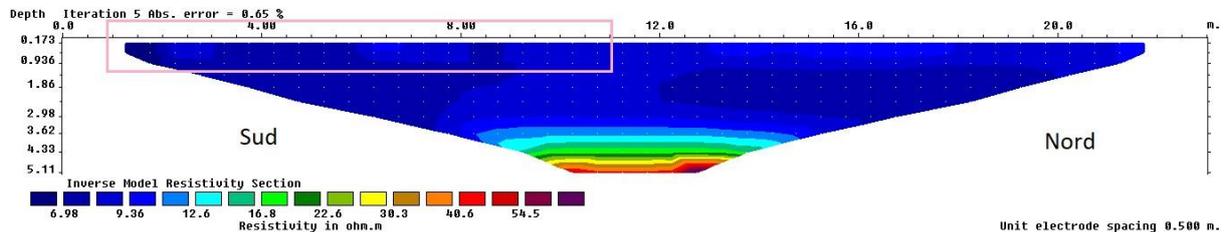


Figure 9b : Tomographie de la résistivité électrique sur la placette 1 acquise le 7 avril 2023 après aplatissage des mottureaux.

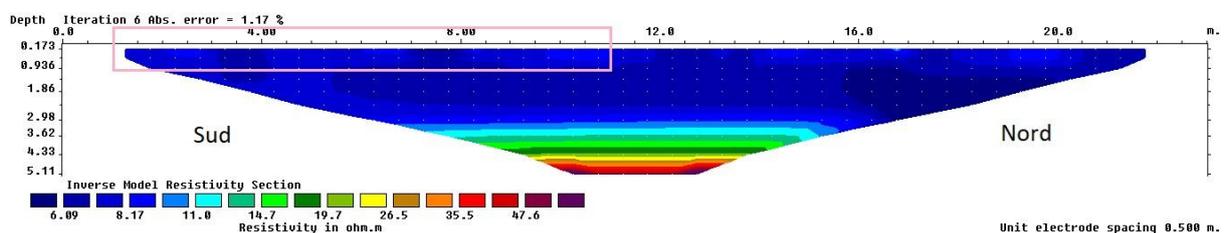


Figure 9c : Tomographie de la résistivité électrique sur la placette 1 acquise le 23 juin 2023 après aplatissage des mottureaux.

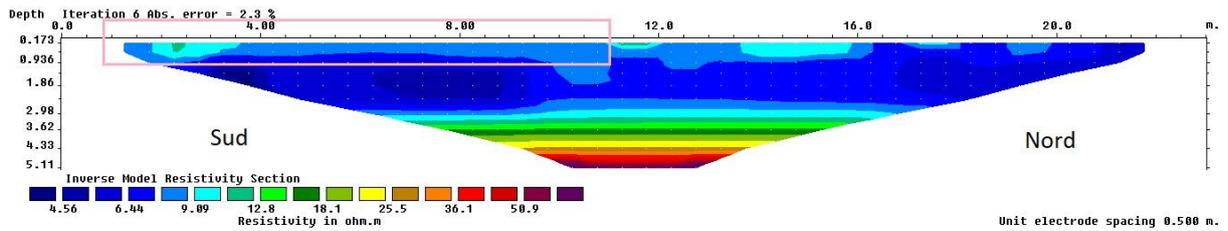


Figure 9d : Tomographie de la résistivité électrique sur la placette 1 acquise le 12 septembre 2023 après aplatissage des mottureaux.

La zone encadrée en rose indique approximativement la zone présentant de gros mottureaux aplanis. L'« electrode spacing » de 0.5 m indiqué sur la figure correspond à la taille des cellules utilisées pour l'inversion (option « use model refinement » du logiciel Res2DInv).

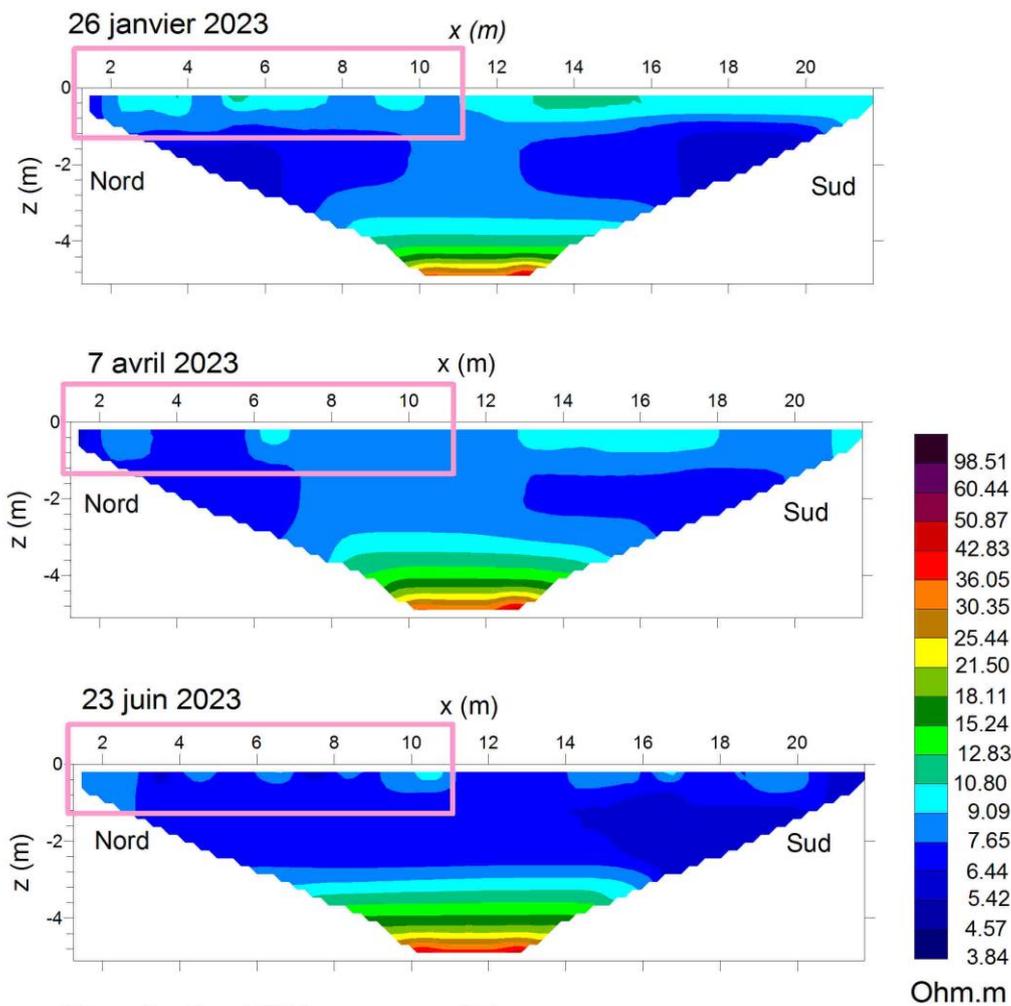


Figure 10. Représentation synthétique des 4 tomographies de la résistivité électrique acquises aux 4 dates d'intervention sur la placette 1 avec la même échelle de résistivité inversée. La zone encadrée en rose indique approximativement la zone de gros mottureaux aplanis.

Au niveau de la couche de bri, on ne distingue pas clairement de contraste de résistivité électrique entre la zone à mottureaux ($x > 6\text{m}$) et la zone sans mottureaux au Nord des sections ($0 < x < 6\text{m}$). Il n'existe pas de gradient horizontal clair de résistivité électrique et donc de salinité à l'échelle de la placette. Ceci confirme les résultats de l'étude de 2022.

3.1.3 Profils de résistance de pointe

Les pénétrogrammes acquis au point S1 (au sommet d'un mottureau aplati) au centre de la placette 1 (voir position sur la Figure 3) aux 5 dates d'intervention (Tableau 1) sont présentés sur les Figures 11, 12a et 12b. Dans un souci de clarté, les Figures 12a et 12b distinguent respectivement les pénétrogrammes obtenus lors de périodes humides (i.e., 26 janvier, 7 avril et 14 novembre) et ceux acquis durant l'été (i.e., 23 juin et 13 septembre). Ils montrent les caractéristiques suivantes :

- De 0 à environ 1m, on distingue une zone où la résistance de pointe Q_d varie fortement avec la date d'intervention. La résistance de pointe Q_d est d'environ 1 MPa en période humide (Figure 13a) pour augmenter jusqu' à 14 MPa en été (Figure 12b). Cette zone correspond à une couche de bri insaturée identifiable également avec la TRE. Elle 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 1 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 (résistance de pointe supérieur à 5 MPa) qui correspond au calcaire. La profondeur de 4 m de ce substratum est cohérente avec celle estimée par TRE (Figures 9 et 10).

La comparaison des Figures 12a et 12b permet de mettre en lumière les deux aspects supplémentaires suivants :

- La résistance de pointe du bri saturé (profondeur supérieure à 1 m jusqu'à 2.2 m environ) mesurée au 26 janvier montre des valeurs nettement plus faibles que celles acquises aux autres dates. 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. Elle diminuerait après une longue immersion du Communal. A ce stade, il apparait difficile d'avancer une explication définitive (artéfact expérimental lié à une communication de l'eau en surface vers le bri saturé via le train de tiges du pénétromètre ?). Cette observation doit être confirmée sur les autres placettes et lors du suivi pluriannuel du site.
- La profondeur exacte du substratum évolue elle-aussi avec la date d'intervention. A la date du 14 novembre en période humide, la profondeur du substratum se situait à 4.1 m. Alors qu'à l'été, elle a été mesurée à 3.95m. Cet écart de profondeur peut s'expliquer par (i) un retrait du sol argileux en surface par dessiccation pendant l'été ou (ii) par de variations très locales de la topographie du substratum (les sondages pénétrométriques étant réalisés à environ 30 cm de distance entre chaque intervention).

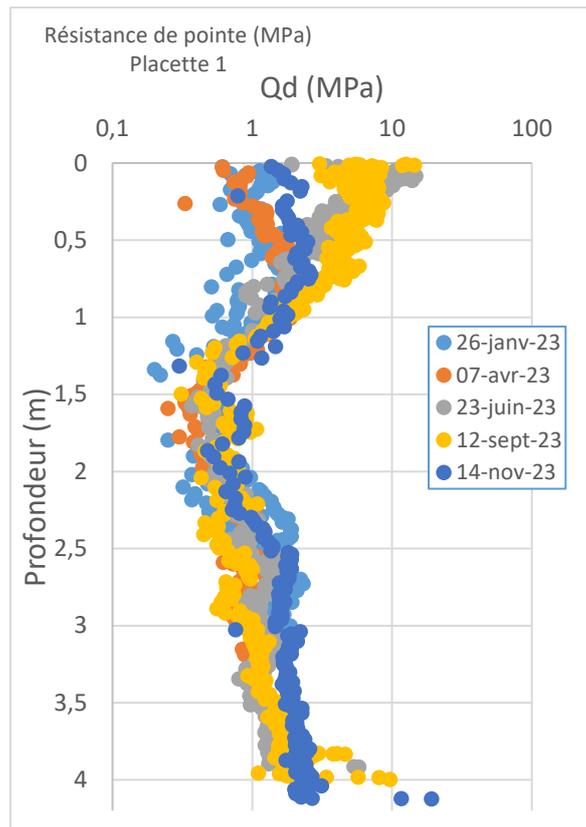


Figure 11. Pénétrogrammes acquis sur la placette 1 au point S1 à 5 dates différentes.

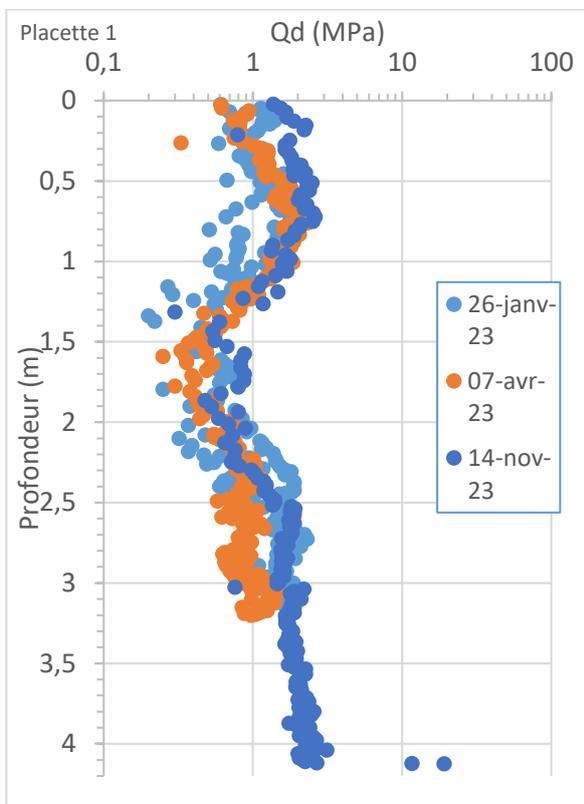


Figure 12a. Pénétrogrammes acquis sur la placette 1 au point S1 en périodes humides (26 janvier, 7 avril et 14 novembre).

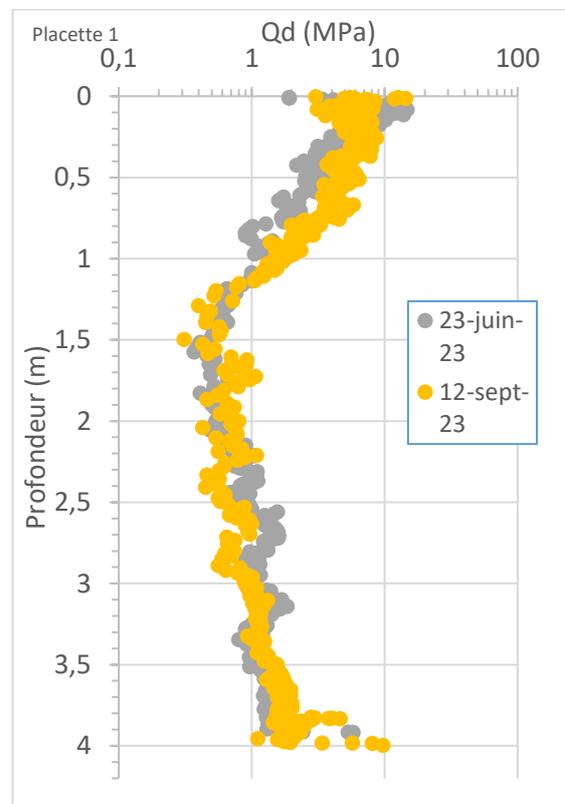


Figure 12b. Pénétrogrammes acquis sur la placette 1 au point S1 l'été (23 juin et 12 septembre).

3.1.3 Profil de teneur en eau massique

Les échantillons ont été prélevés en S1 au centre de la placette 1.

Les profils obtenus à quatre dates d'intervention (26 janvier, 7 avril, 23 juin et 12 septembre) pour lesquelles il était possible de faire des prélèvements sont donnés sur la Figure 14. Le sol étant trop détrempé le 14 novembre, il n'a pas fait l'objet de prélèvement d'échantillon.

La Figure 13 permet d'identifier les unités suivantes :

- De 0 à environ 0.9 m, la couche de surface présente les plus fortes variations de teneur en eau. Celle-ci varie de 22.8% le 12 septembre à 54.4% le 7 avril.
- De 0.9 à environ 2m, la teneur en eau augmente progressivement avec la profondeur pour atteindre une valeur maximum qui varie suivant les dates d'intervention (e.g., jusqu'à 94.3 % à 2.7 m le 12 septembre). 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 1 m environ (i.e., au passage de la limite de plasticité W_p estimée à 40 %) pour évoluer vers un état liquide à environ 1.7 m (i.e., au passage de la limite de liquidité W_l estimée à 70 %).
- Au-delà d'environ 2 m, la teneur en eau stagne voire diminue pour atteindre la valeur de 72.2% à 3.5m de profondeur le 12 septembre. A partir de 4m, le matériau est beaucoup plus compact et contient moins d'eau et est de couleur brune. Au-delà de 4 m, il n'est plus possible de creuser à la tarière car le calcaire est atteint.

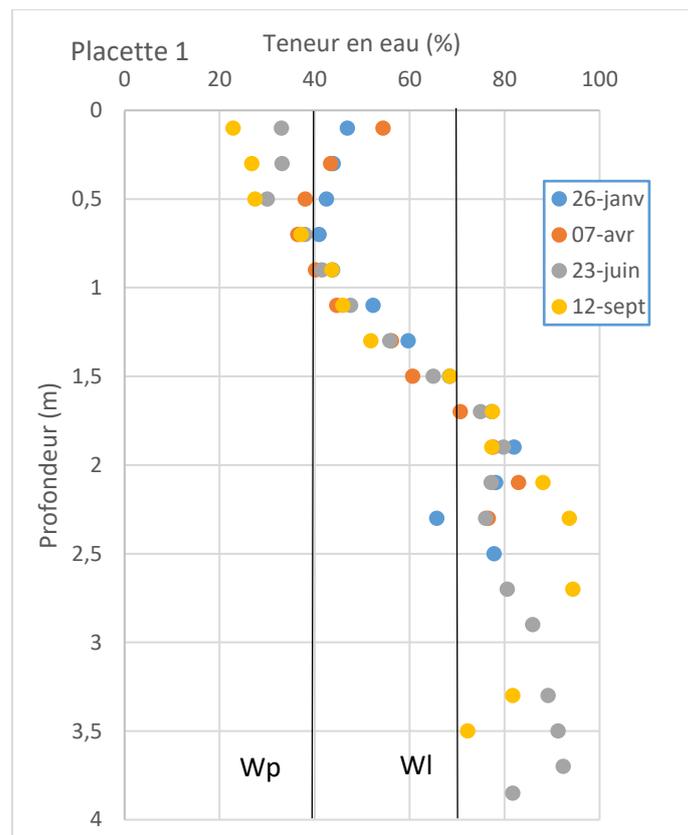


Figure 13 : Profil de teneur des sols de la placette 1.
 W_p : limite de plasticité ; W_l : limite de liquidité.

3.2 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 décloturée le 24 juillet 2024.

3.2.1 Profils topographiques

La Figure 14 montre les 4 profils d'altitude relative acquis aux 4 dates d'intervention (Tableau 1). Comme l'indique la Figure 3, ces 4 profils topographiques ont été acquis dans le sens de la longueur de la placette (orientation Nord-Sud) et sensiblement aux mêmes points. Ils sont disposés à cheval entre la zone sans mottureaux et la placette 2 elle-même. Le point $x=0$ sur la Figure 14 est situé sur la bordure Nord du de la placette.

Comme souligné en section 2.2.3, les altitudes indiquées sont relatives à la valeur la plus basse du dénivelé lu 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 14 correspond donc au point le plus haut en altitude du profil.

En effet, pour faciliter la comparaison des profils acquis à différentes dates d'intervention, les valeurs lues sur la mire ont été soustraites de la valeur de dénivelé la plus petite lue sur la même mire de chaque profil acquis à la date d'intervention donnée. Cette soustraction ou translation permet en outre de visualiser des altitudes relatives systématiquement positives.

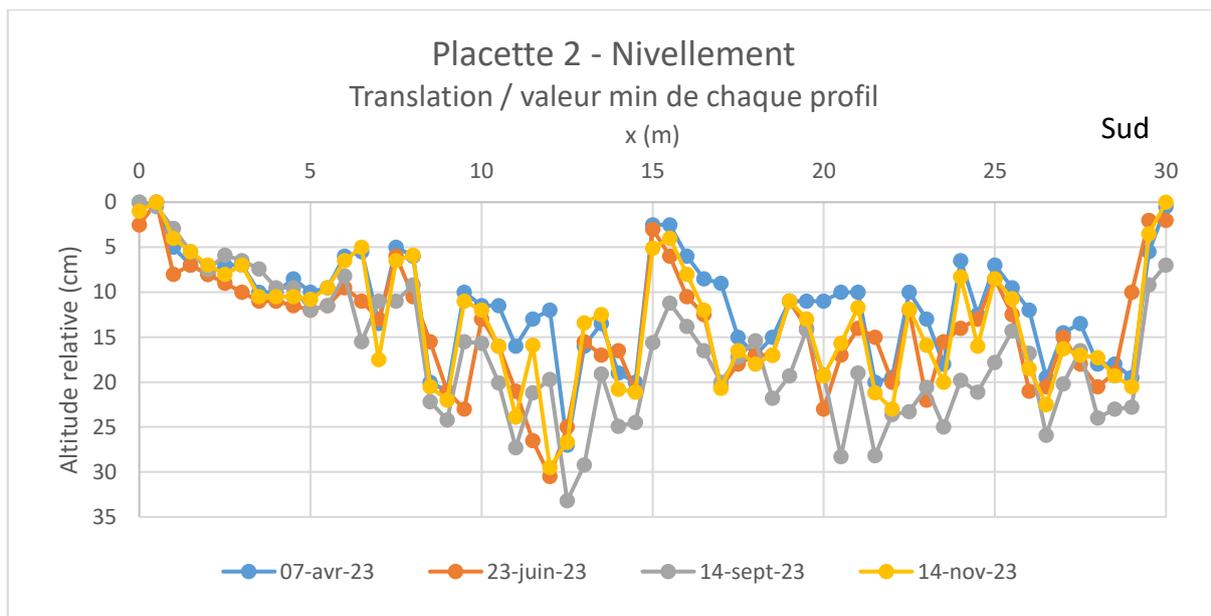


Figure 14. Profils d'altitude relative mesurés à quatre dates d'intervention (Tableau 1) sur la placette 2. Les altitudes indiquées sont donc relatives au point le plus haut de chaque profil (l'altitude relative égale à 0 correspond donc au point le plus haut en altitude du profil).

La Figure 14 permet de formuler les commentaires suivants :

- Dans la zone à mottureaux (i.e., pour les points situés entre $x=5$ m et $x=30$ m), on retrouve les plus grands « pics » et des « creux » sensiblement aux mêmes positions pour les quatre dates d'intervention. 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 « pics » d'altitude ni de

« creux » ne sont observés : c'est bien une zone sans mottureaux. On notera en outre la stabilité dans le temps des altitudes relatives mesurées dans cette zone.

Comme pour la placette 1, cette première analyse de données de nivellement 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 $x=8$ 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.

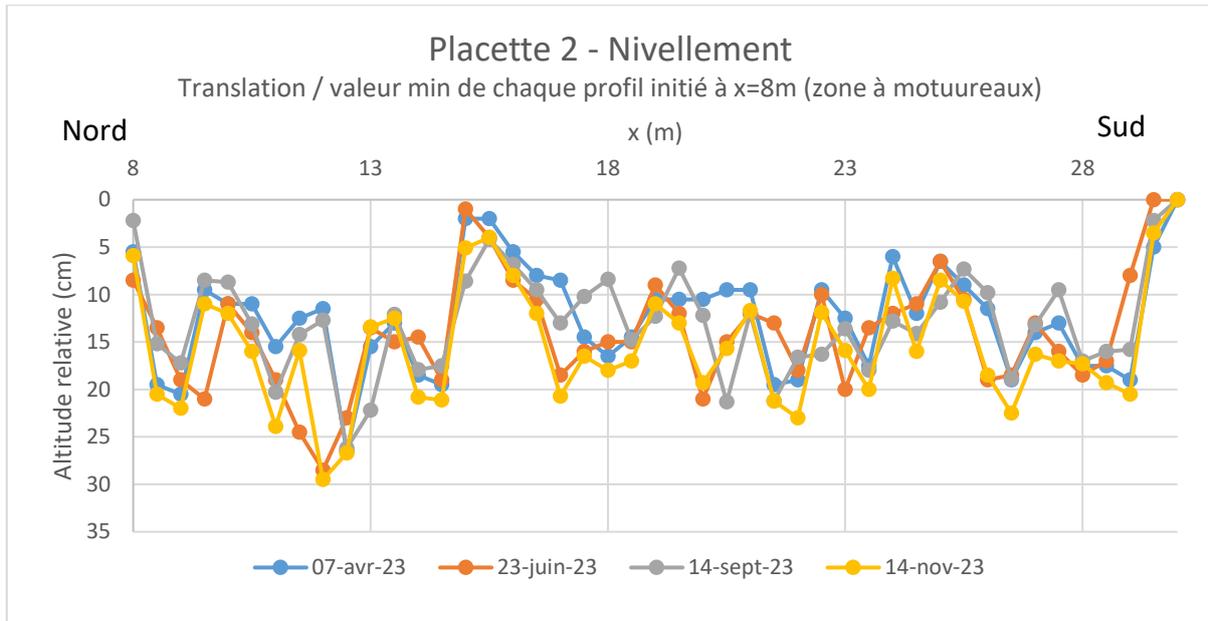


Figure 15. Profils d'altitude relative mesurés à quatre dates d'intervention (Tableau 1) sectionné ici de $x=8$ m à $x=30$ m i.e., dans la zone à mottureaux (placette 2). Les altitudes indiquées sont donc relatives au point le plus haut de chaque profil (possédant donc une altitude relative égale à 0) dans la zone de $x=8$ m à $x=30$ 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. Les altitudes relatives des profils acquis le 23 juin et celles obtenues le 24 novembre se superposent pratiquement.

3.2.2 Tomographies de résistivité électrique

Les trois TRE acquises sur la placette 2 sur l'année 2023 sont données sur les Figures 16a, 16b et 16c avec trois échelles différentes de résistivité (échelles adaptées à chacune des TRE) et sur la Figure 18 avec une même échelle de résistivité pour comparer les trois TRE.

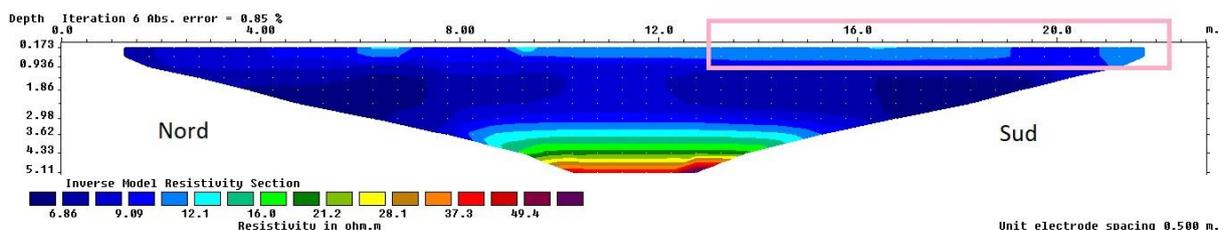


Figure 16a : Tomographie de la résistivité électrique sur la placette 2 acquise le 26 janvier 2023 avant aplatissement des mottureaux.

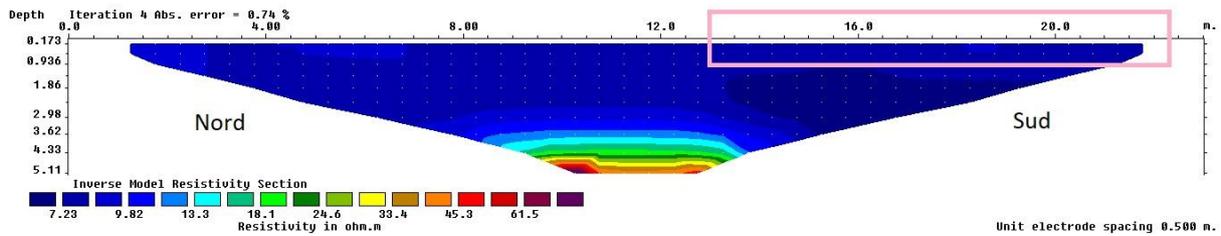


Figure 17b : Tomographie de la résistivité électrique sur la placette 2 acquise le 7 avril 2023 après aplatissement des mottureaux.

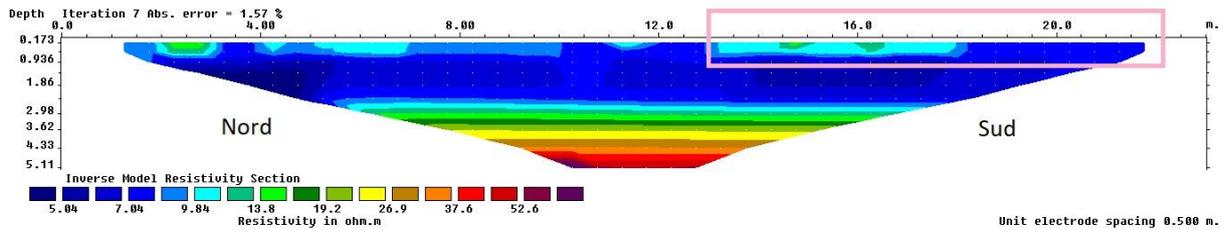


Figure 16c : Tomographie de la résistivité électrique sur la placette 2 acquise le 12 septembre 2023 après aplatissement des mottureaux.

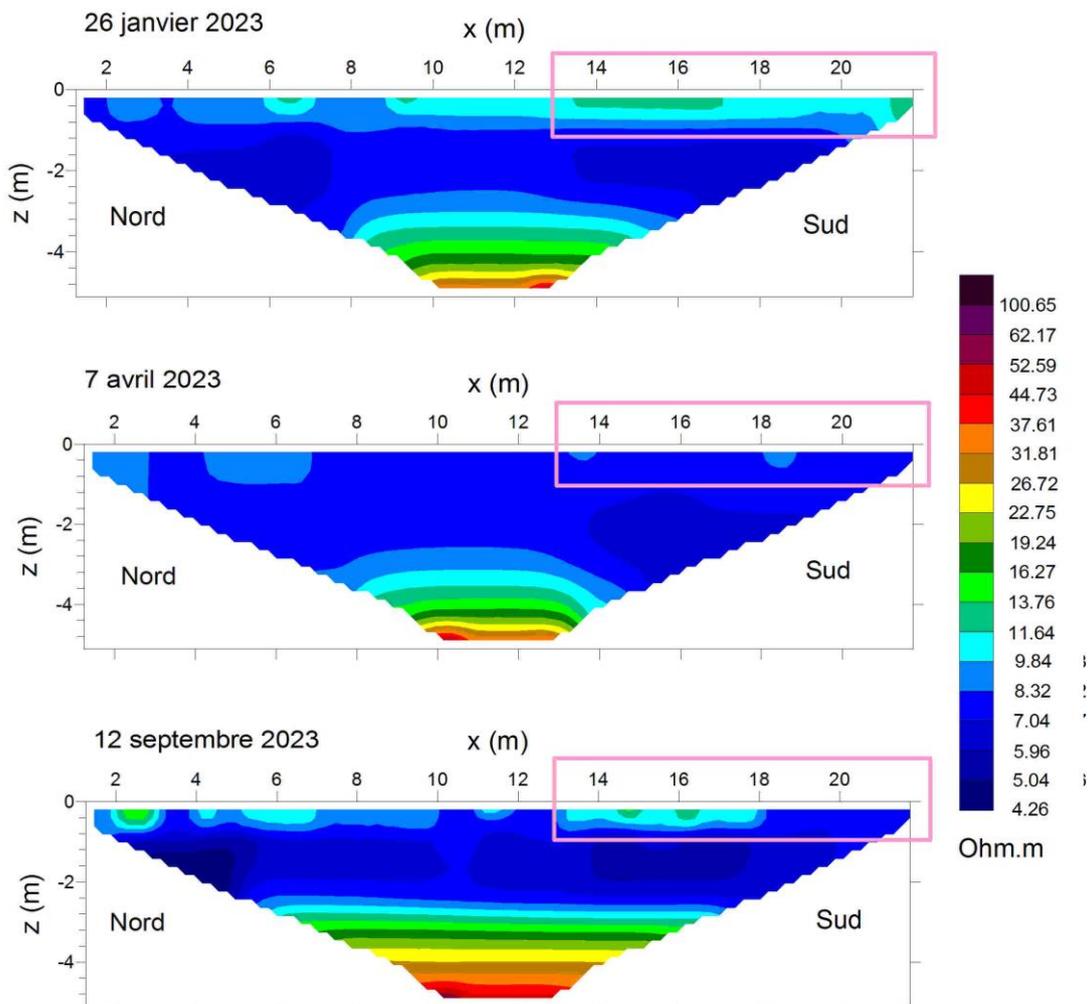


Figure 17. Représentation synthétique des 3 tomographies de la résistivité électrique acquises aux 3 dates d'intervention sur la placette 2 avec la même échelle de résistivité inversée. La zone encadrée en rose indique approximativement la zone de gros mottureaux aplanis.

L'ensemble de ces figures confirme une organisation verticale du sous-sol du site en trois couches (Cosenza et Caner, 2022) :

- de 0 à 1 m environ de profondeur, une couche de sol hétérogène et insaturé en période sèche.
- de 1 à 4m environ, la couche de bri saturé caractérisée par des valeurs de résistivité inversée très faibles typiquement inférieures à 8 Ohm.m (dégradé de couleurs bleues).
- A partir de 4 m, une formation plutôt stratifiée caractérisée par des valeurs de résistivité supérieures à 10 Ohm.m (couleurs chaudes). Il s'agit probablement d'une formation calcaire (du fait du contexte géologique) plus ou moins altérée.

Comme pour la placette 1, aucun gradient de résistivité électrique n'est clairement distingué entre la zone à mottureaux ($x > 6$ m) et la zone sans mottureaux au Nord des sections ($0 < x < 6$ m).

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 3) aux 5 dates d'intervention (Tableau 1) sont présentés sur les Figures 18, 19a et 19b. Dans un souci de clarté, les Figures 19a et 19b distinguent respectivement les pénétrogrammes obtenus lors de périodes humides (i.e., 26 janvier, 7 avril et 14 novembre) et ceux acquis durant l'été (i.e., 23 juin et 13 septembre). Ils confirment les observations obtenues sur la placette 1 :

- De 0 à environ 1m, la résistance de pointe Qd varie fortement avec la date d'intervention et donc la saison. La résistance de pointe Qd varie autour de la valeur de 1 MPa en période humide (Figure 12a) pour augmenter jusqu' à 16 MPa en été (Figure 19b). Cette zone correspond à une couche de bri insaturée identifiable également avec la TRE (Figures 16 et 17).
- de 1 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 augment progressivement avec la profondeur pour atteindre un substratum (résistance de pointe supérieur à 5 MPa). La profondeur de 4 m de ce substratum est cohérente avec celle estimée par TRE.

La comparaison des Figures 19a et 19b confirme également les deux aspects supplémentaires mis en évidence sur la placette 1 :

- La résistance de pointe du bri saturé (profondeur supérieure à 1 m jusqu'à 2.2 m environ) mesurée au 26 janvier montre des valeurs plus faibles que celles acquises aux autres dates. Cette résistance de pointe peut chuter jusqu'à des valeurs très faibles de 0.3 MPa.
- La profondeur exacte du substratum évolue elle-aussi avec la date d'intervention. A la date du 14 novembre en période humide, la profondeur du substratum se situait à 3.7 m. Alors qu'à la fin de l'été (12 septembre), elle a été mesurée à 3.5m. Cet écart de profondeur pourrait s'expliquer par (i) un retrait du sol argileux en surface par dessiccation pendant l'été ou (ii) par de variations très locales de la topographie du substratum (les sondages pénétrométriques étant réalisés à environ 30 cm de distance entre chaque intervention). Un tassement-retrait différentiel entre les deux positions des deux sondages réalisés les 23 juin et 12 septembre n'est pas non plus à exclure et pourrait expliquer les différences de profondeur du substratum mesurées entre ces deux dates.

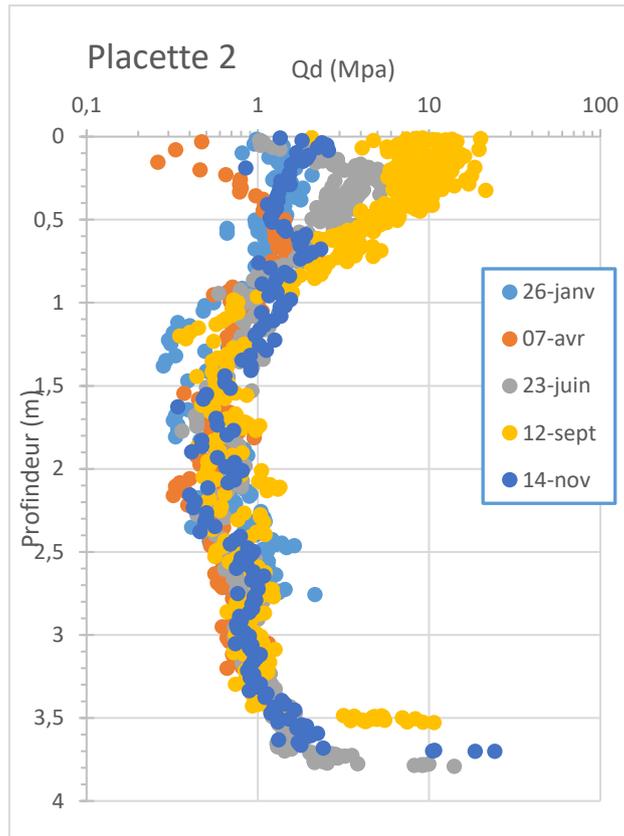


Figure 18. Pénétrogrammes acquis sur la placette 2 au point S2 à 5 dates différentes.

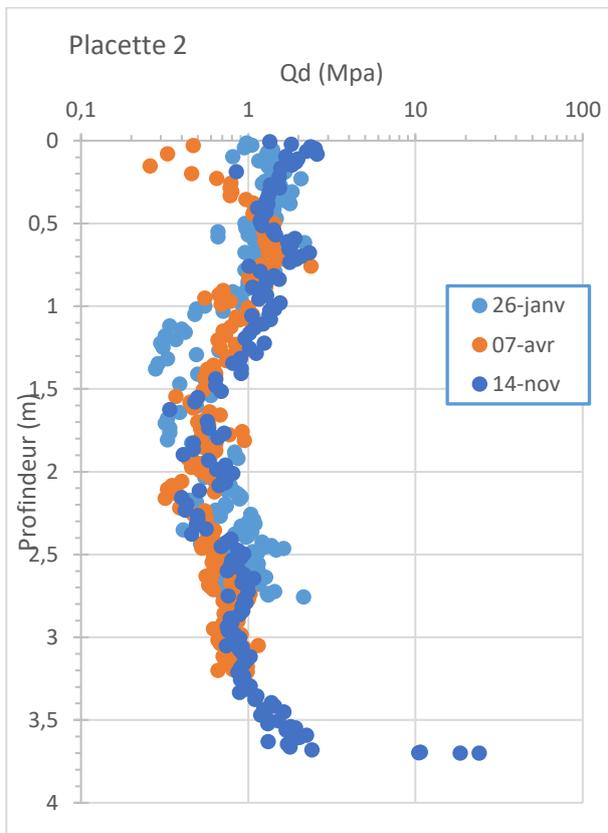


Figure 19a. Pénétrogrammes acquis sur la placette 2 au point S2 en périodes humides (26 janvier, 7 avril et 14 novembre).

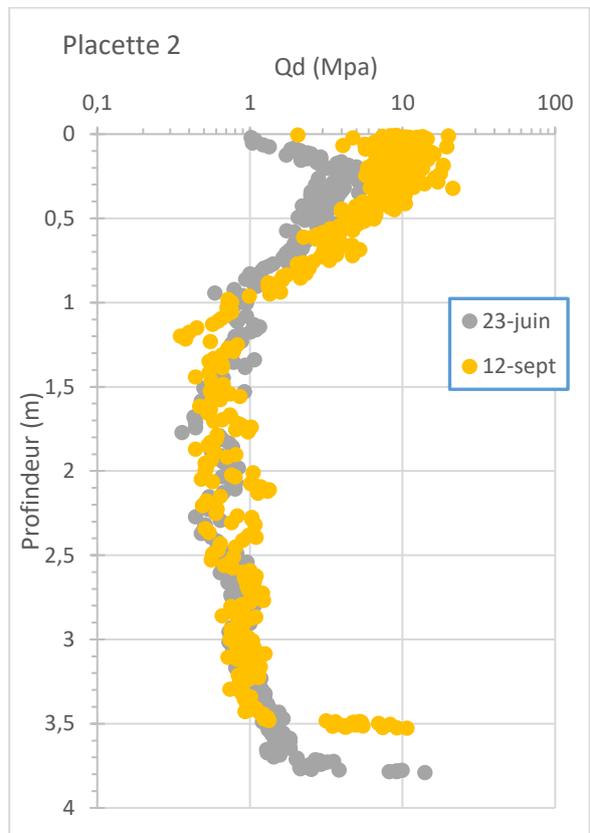


Figure 19b. Pénétrogrammes acquis sur la placette 2 au point S2 à l'été (23 juin et 12 septembre).

3.2.3 Profil de teneur en eau massique

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

Les profils obtenus à quatre dates d'intervention (26 janvier, 7 avril, 23 juin et 12 septembre) pour lesquelles il était possible de faire des prélèvements sont donnés sur la Figure 20. Le sol étant trop détrempé le 14 novembre, il n'a pas fait l'objet de prélèvement d'échantillon.

La Figure 20 confirme les unités suivantes :

- De 0 à environ 0.9 m, la couche de surface présente les plus fortes variations de teneur en eau. Celle-ci varie de 21.1% le 12 septembre à 48.3% le 7 avril.
- De 0.9 à environ 2.4m, la teneur en eau augmente progressivement avec la profondeur pour atteindre une valeur maximum qui varie suivant les dates d'intervention (e.g., jusqu'à 102.8% à 2.5m le 12 septembre). 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 1.7 m (i.e., au passage de la limite de liquidité W_l estimée à 70 %).
- Au-delà d'environ 2.4 m, la teneur en eau stagne voire diminue pour atteindre la valeur de 98.8% à 3.1m de profondeur le 12 septembre.

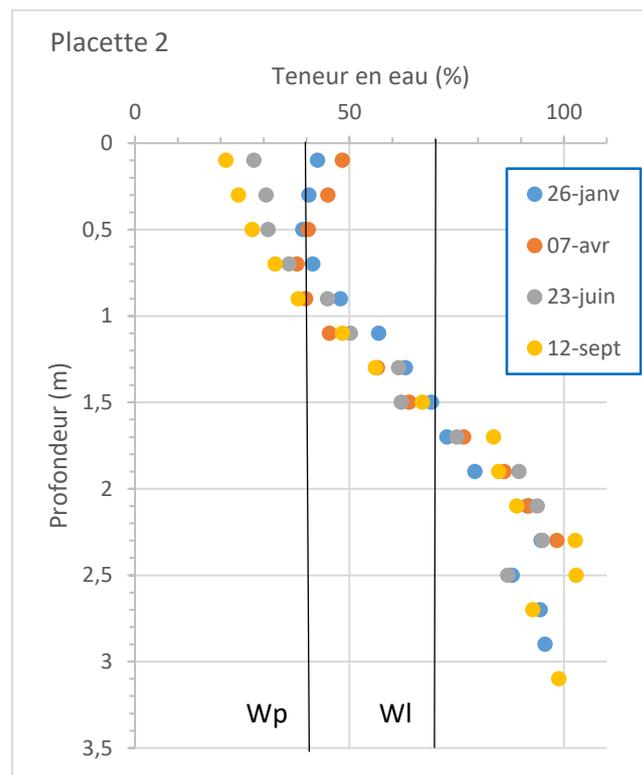


Figure 20 : Profil de teneur des sols de la placette 2.
 W_p : limite de plasticité ; W_l : limite de liquidité.

3.3 Placette 3

La placette 2 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 21 montre les 4 profils d'altitude relative acquis aux 4 dates d'intervention (Tableau 1). Comme l'indique la Figure 3, ces 4 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 13 est situé sur la bordure Nord de la placette.

Comme souligné en section 2.2.3, les altitudes indiquées sont relatives à la valeur de dénivelé la plus basse d'altitude 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 21 correspond donc au point le plus haut en altitude du profil.

En effet, pour faciliter la comparaison des profils acquis à différentes dates d'intervention, les valeurs lues sur la mire ont été soustraites de la valeur de dénivelé la plus petite lue sur la même mire de chaque profil acquis à la date d'intervention donnée. Cette soustraction ou translation permet en outre de visualiser des altitudes relatives systématiquement positives.

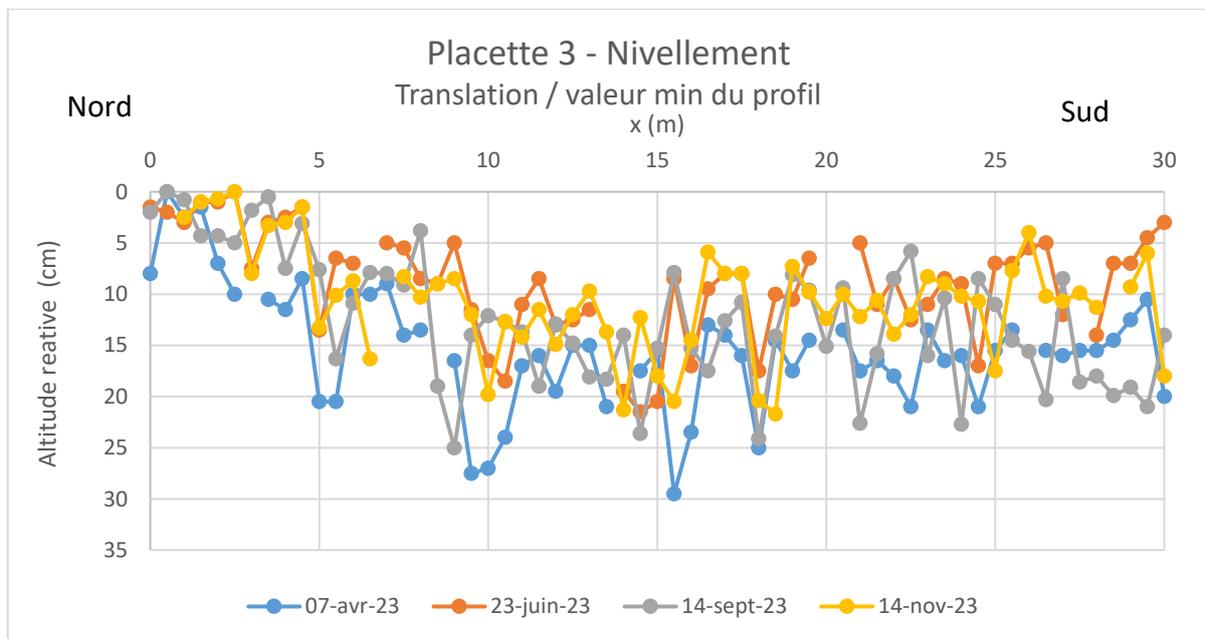


Figure 21. Profils d'altitude relative mesurés à quatre dates d'intervention (Tableau 1) sur la placette 3. Les altitudes indiquées sont donc relatives au point le plus haut de chaque profil (l'altitude relative égale à 0 correspond donc au point le plus haut en altitude du profil).

La Figure 21 permet de formuler les commentaires suivants :

- Dans la zone à mottureaux (i.e., pour les points situés entre $x=5$ m et $x=30$ m), comparativement aux deux autres placettes, il est plus difficile de retrouver les « pics » et les « creux » aux mêmes positions pour les quatre dates d'intervention. Ce résultat s'explique par une plus mauvaise reproductibilité du positionnement des mesurées qui pourrait être lié (i) la présence de nombreuses et grosses fissures de dessiccation observées et surtout (ii) aux herbes très hautes qui ont rendu plus difficile le positionnement précis du décamètre sur le terrain.
- 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, cette première analyse de données de nivellement 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, on se focalise donc 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 22).

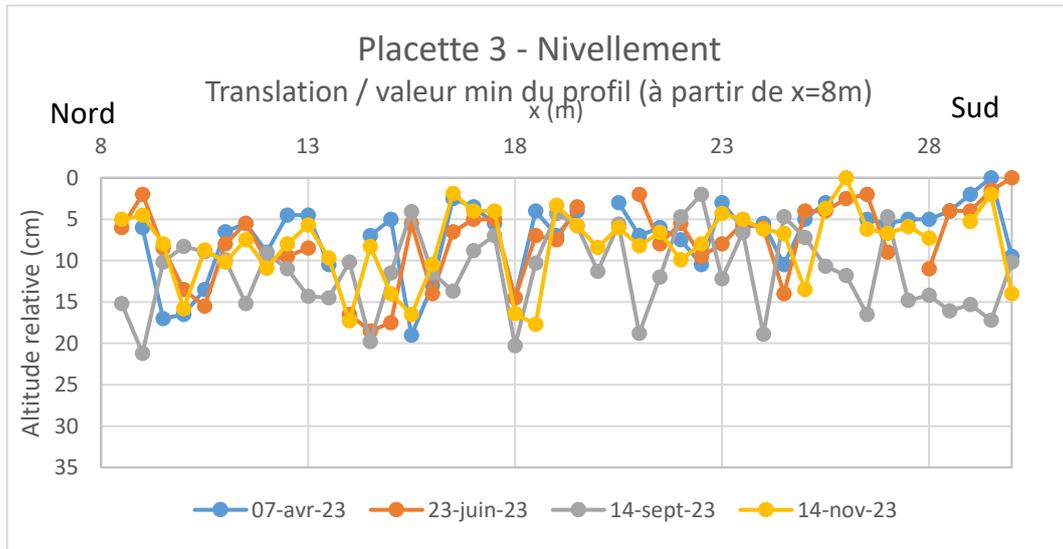


Figure 22. Profils d'altitude relative mesurés à quatre dates d'intervention (Tableau 1) sectionné ici de $x=8$ m à $x=30$ m i.e., dans la zone à mottureaux (placette 2)

La Figure 22 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. On souligne toutefois que sur cette placette de nombreuses grosses fissures de dessiccation d'ouverture pluricentimétrique ont été observées le 14 septembre et pourraient expliquer les altitudes relatives élevées de cette période pour les points situés à $x > 20$ m. Ces données mériteraient une analyse quantitative plus fine (voir la section 3.4).

3.3.2 Tomographies de résistivité électrique

Les trois TRE acquises sur la placette 3 sur l'année 2023 sont données sur les Figures 23a, 23b et 23c avec trois échelles différentes de résistivité (échelles adaptées à chacune des TRE) et sur la Figure 25 avec une même échelle de résistivité pour comparer les trois TRE. Notons que les TRE de la placette 3 sont orientés différemment de celles acquises sur les placettes 1 et 2. Elles ont été mises en œuvre au centre de la placette dans une zone totalement occupée par des mottureaux (Figure 3).

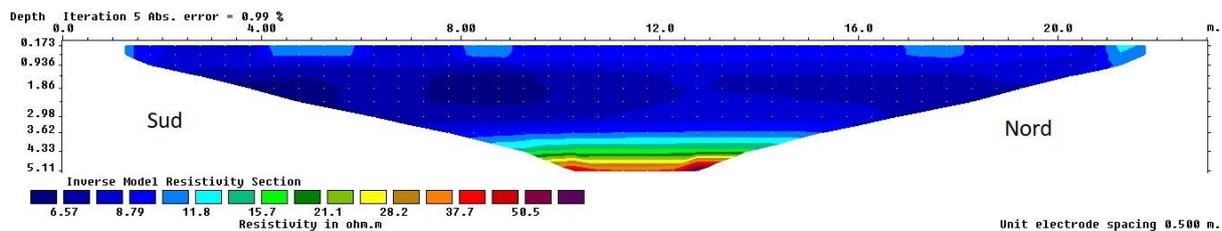


Figure 23a : Tomographie de la résistivité électrique sur la placette 3 acquise le 26 janvier 2023 avant aplatissement des mottureaux.

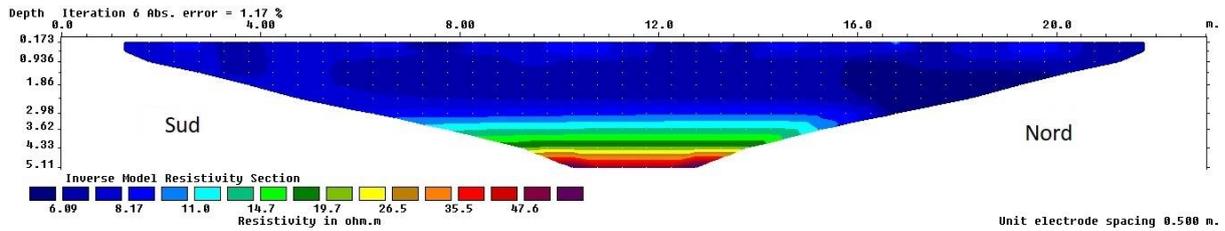


Figure 23b : Tomographie de la résistivité électrique sur la placette 3 acquise le 23 juin 2023 après aplatissement des mottureaux.

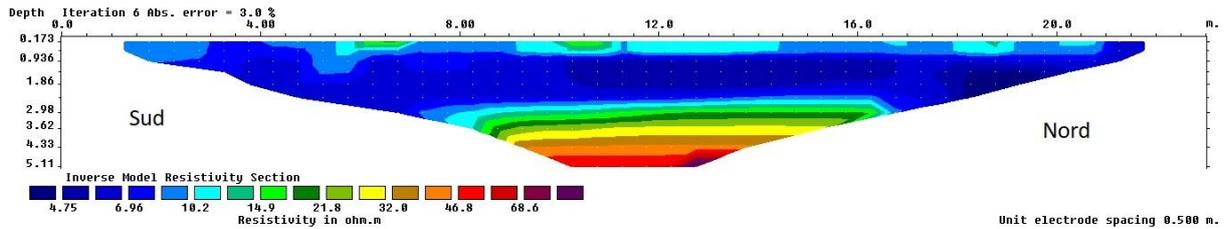


Figure 23c : Tomographie de la résistivité électrique sur la placette 3 acquise le 12 septembre 2023 après aplatissement des mottureaux.

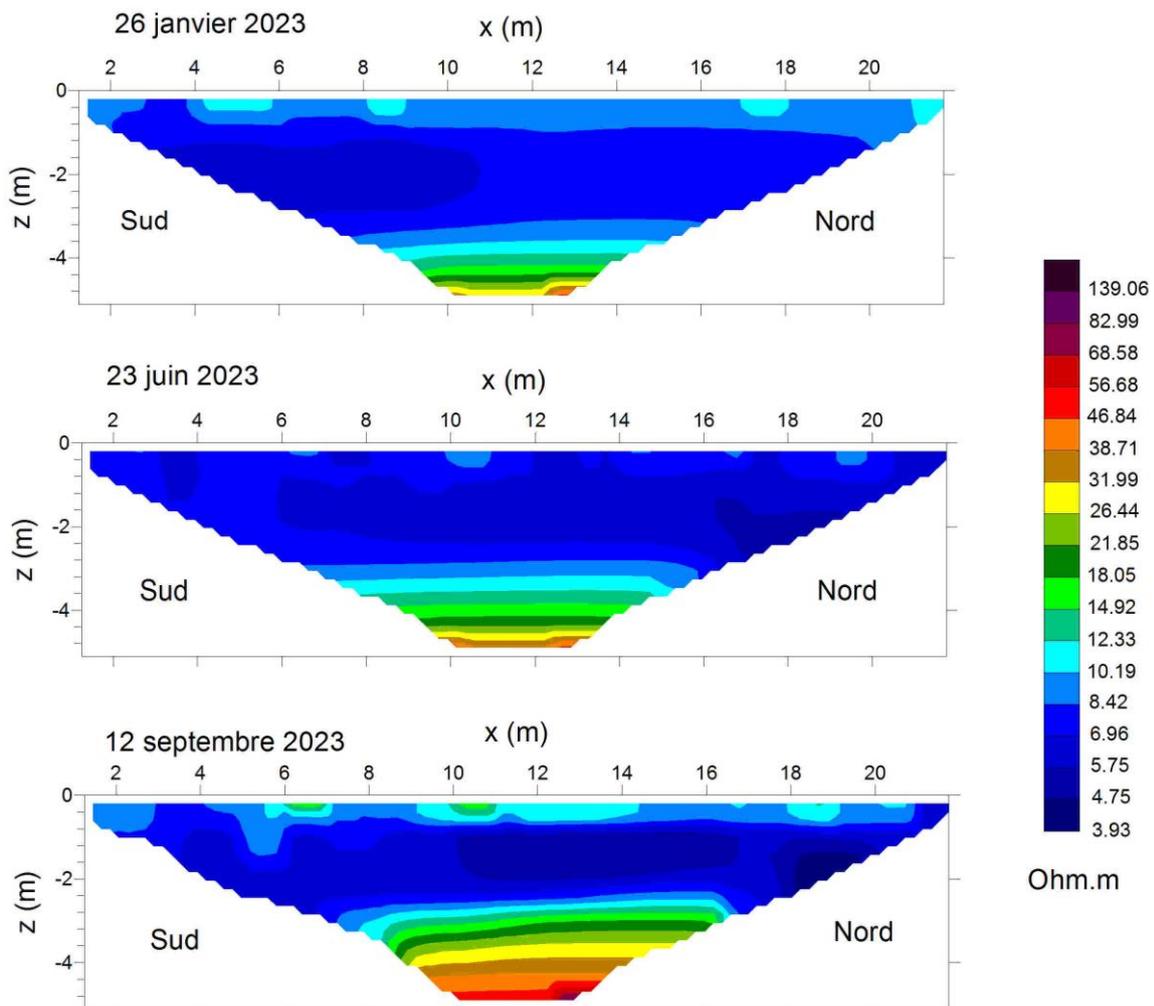


Figure 24. Représentation synthétique des 3 tomographies de la résistivité électrique acquises aux 3 dates d'intervention sur la placette 3 avec la même échelle de résistivité inversée.

L'ensemble de ces figures confirme une organisation verticale du sous-sol du site en trois couches (Cosenza et Caner, 2022) :

- de 0 à 1 m environ de profondeur, une couche de sol hétérogène et insaturé en période sèche. Les spots d'environ 10 Ohm.m (bleu azur) sur la TRE du 26 janvier s'expliquent par la présence d'une eau de surface plus douce d'origine météorique entourant les mottureaux en partie immergés à cette date.
- de 1 à 3.5m environ, la couche de bri saturé caractérisée par des valeurs de résistivité inversée très faibles typiquement inférieures à 8 Ohm.m (dégradé de couleurs bleues).
- A partir de 3.5m, une formation plutôt stratifiée caractérisée par des valeurs de résistivité supérieures à 10 Ohm.m (couleurs chaudes). Il s'agit probablement du calcaire Jurassique (du fait du contexte géologique) plus ou moins altérée.

Comme pour les deux placettes, au niveau de la couche de bri, aucun gradient horizontal de résistivité électrique n'est clairement distingué.

3.3.2 Profils de résistance de pointe

Les pénétrogrammes acquis au point S3 au centre de la placette 3 (voir position sur la Figure 3) aux 5 dates d'intervention (Tableau 1) sont présentés sur les Figures 25, 26a et 26b. Dans un souci de clarté, les Figures 26a et 26b distinguent respectivement les pénétrogrammes obtenus lors de périodes humides (i.e., 26 janvier, 7 avril et 14 novembre) et ceux acquis durant l'été (i.e., 23 juin et 13 septembre). Ils confirment les observations obtenues sur les deux placettes 1 et 2 :

- De 0 à environ 1m, une zone où la résistance de pointe Qd varie fortement avec la date d'intervention est distinguée. La résistance de pointe Qd varie autour de la valeur de 1 MPa en période humide (Figure 26a) pour augmenter jusqu' à 24 MPa en été (Figure 26b). Cette zone correspond à une couche de bri insaturée identifiable également avec la TRE.
- de 1 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 3.5-4 m, la résistance de pointe augment progressivement avec la profondeur pour atteindre un substratum (résistance de pointe supérieur à 14 MPa). La gamme de profondeur de 3.5-4 m du substratum est cohérente avec celle estimée par TRE (Figures 23 et 24).

La comparaison des Figures 19a et 19b confirme également les deux aspects supplémentaires mis en évidence sur les deux placettes 1 et 2 :

- La résistance de pointe du bri saturé (profondeur supérieure à 1 m jusqu'à 2.2 m environ) mesurée au 26 janvier montre des valeurs plus faibles que celles acquises aux autres dates. Cette résistance de pointe peut chuter jusqu'à des valeurs très faibles de 0.3 MPa.
- La profondeur exacte du substratum évolue elle-aussi avec la date d'intervention. A la date du 14 novembre en période humide, la profondeur du substratum se situait à 4.0 m. Alors qu'à la fin de l'été (12 septembre), elle a été mesurée à 3.5 m. Cet écart de profondeur pourrait s'expliquer par (i) un retrait du sol argileux en surface par dessiccation pendant l'été ou moins probablement (ii) par de variations très locales de la topographie du substratum (les sondages pénétrométriques étant réalisés à environ 30 cm de distance entre chaque intervention).

La résistance de pointe mesurée en surface le 23 juin est restée relativement faible (valeurs d'environ 1 MPa) comparativement aux valeurs acquises sur les deux autres placettes à la même période (Figures 12b et 19b). Les valeurs plus élevées mesurées sur les placettes 1 et 2 pourraient s'expliquer par la compaction associée à la pâture réalisée sur ces placettes.

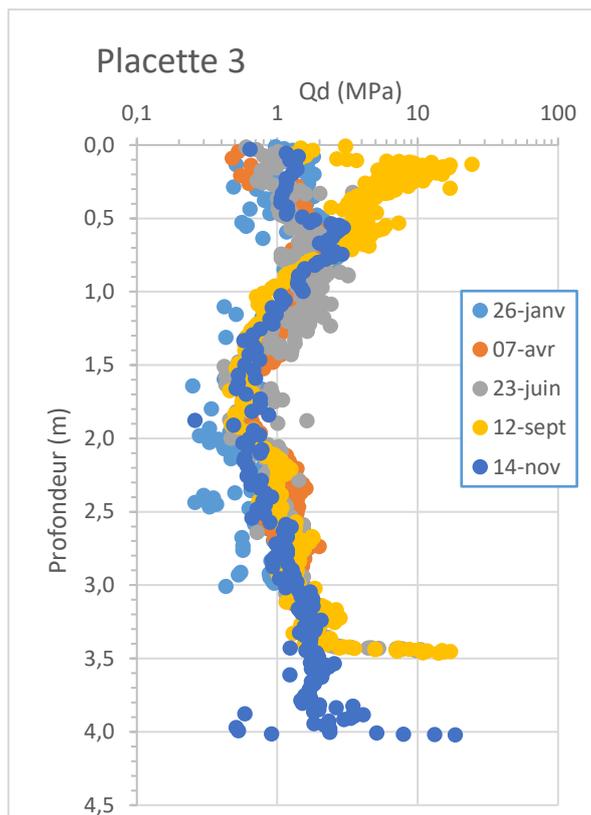


Figure 25. Pénétrogrammes acquis sur la placette 3 au point S3 à 5 dates différentes.

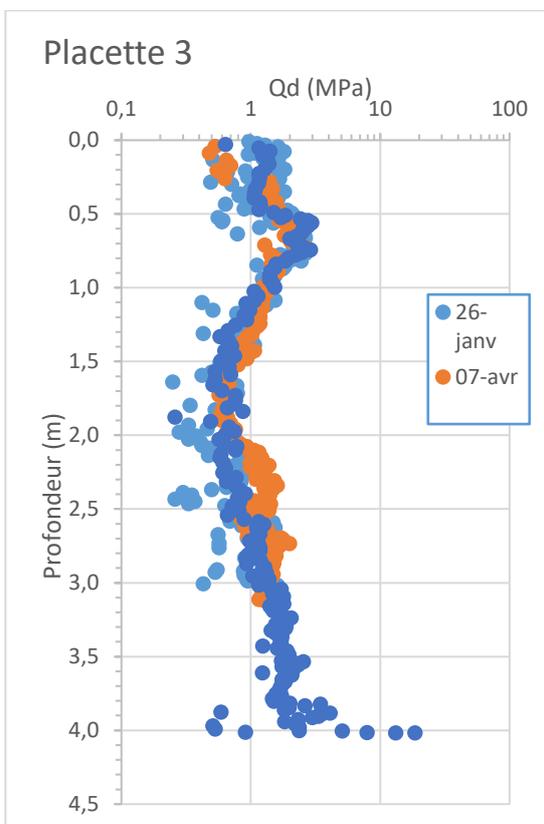


Figure 26a. Pénétrogrammes acquis sur la placette 3 au point S3 en périodes humides (26 janvier, 7 avril et 14 novembre).

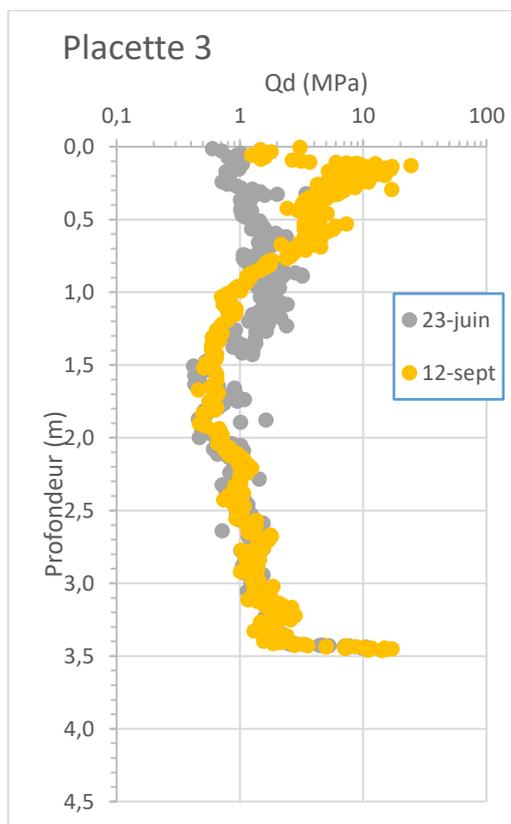


Figure 26b. Pénétrogrammes acquis sur la placette 3 au point S3 l'été (23 juin et 12 septembre).

3.3.3 Profil de teneur en eau massique

Les échantillons ont été prélevés en S3 au centre de la placette 3.

Les profils obtenus à quatre dates d'intervention (26 janvier, 7 avril, 23 juin et 12 septembre) pour lesquelles il était possible de faire des prélèvements sont donnés sur la Figure 27. Le sol étant trop détrempé le 14 novembre, il n'a pas fait l'objet de prélèvement d'échantillon.

La Figure 27 confirme les unités suivantes :

- De 0 à environ 0.9 m, la couche de surface présente les plus fortes variations de teneur en eau. Celle-ci varie de 22.1% le 12 septembre à 55.5% le 7 avril.
- De 0.9 à environ 2.4m, la teneur en eau augmente progressivement avec la profondeur pour atteindre une valeur maximum qui varie suivant les dates d'intervention (e.g., jusqu'à 92.3% à 1.7m le 23 juin). 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 Wp estimée à 40 %) pour évoluer vers un état liquide à environ 1.7 m (i.e., au passage de la limite de liquidité Wl estimée à 70 %).
- Au-delà d'environ 2.4 m, la teneur en eau stagne voire diminue pour atteindre la valeur de 99.2% à 3.45m de profondeur le 12 septembre. La profondeur du substratum est confirmée à 3.5 m à la date du 23 juin (chute de la teneur en eau à 31.7%).

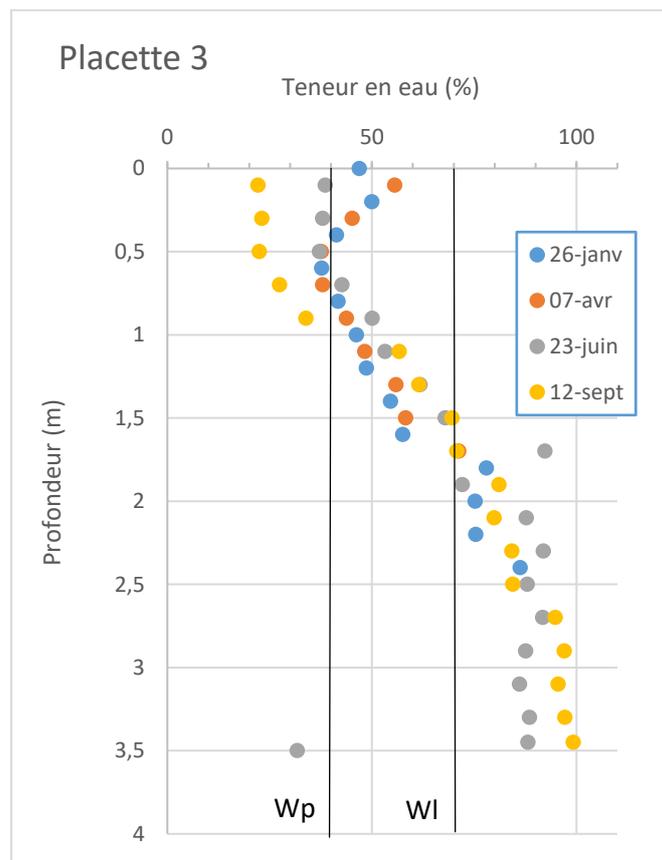


Figure 27 : Profil de teneur des sols de la placette 3.
Wp : limite de plasticité ; Wl : limite de liquidité.

3.4 Comparaison entre placettes

Après avoir analysé les résultats placette par placette, cette section apporte un regard croisé entre chaque placette. Il s'agira notamment (i) de caractériser la variabilité spatiale des propriétés géométriques et physico-chimiques des sols de l'ensemble du prospect i.e., des trois placettes et (ii) d'apprécier l'impact des conditions de pâture qui ont prévalu après l'aplatissement des mottureaux du site. On garde également en « ligne de mire » l'objectif d'identifier des éléments qui pourraient nous indiquer une « repousse » des mottureaux.

3.4.1 Comparaison des profils topographiques

La Figure 28 synthétise l'ensemble des profils topographiques acquis sur les trois placettes à quatre dates d'intervention. Elle permet de mener une comparaison qualitative des profils topographiques.

Pour faciliter la comparaison, pour une date d'intervention donnée, les dénivelés 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.

La Figure 28 permet de mettre en avant les observations suivantes :

- La figure confirme 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 écrasés. Autrement dit, les zones sans mottureaux sont plus hautes en altitude que les zones à mottureaux aplatis.
- Ainsi globalement, pour les quatre dates d'intervention, l'altitude mesurée sur les trois profils varie dans une amplitude d'une trentaine de centimètres. L'amplitude maximum de 33 cm d'altitude a été mesurée le 14 septembre sur la placette 2.
- En effet, la campagne de mesures du 14 septembre se distingue nettement de celle des trois autres par la caractéristique suivante : la zone sans mottureaux est significativement plus haute que la zone à mottureaux aplatis. Cette caractéristique pourrait correspondre à un tassement du sol par dessiccation plus important dans la zone à mottureaux offrant des surfaces d'échanges sol-air plus importantes (comparativement à la zone plate sans mottureaux).
- Les profils acquis le 23 juin et ceux acquis le 14 novembre se ressemblent beaucoup qualitativement. Malgré la dessiccation estivale, les mottureaux aplatis présentent sensiblement les mêmes altitudes à ces deux dates. Autrement dit, lors des pluies automnales (14 novembre), les mottureaux aplatis auraient repris leur taille d'avant l'été (23 juin). Cette observation qualitative sera confirmée plus loin par une analyse quantitative des données.

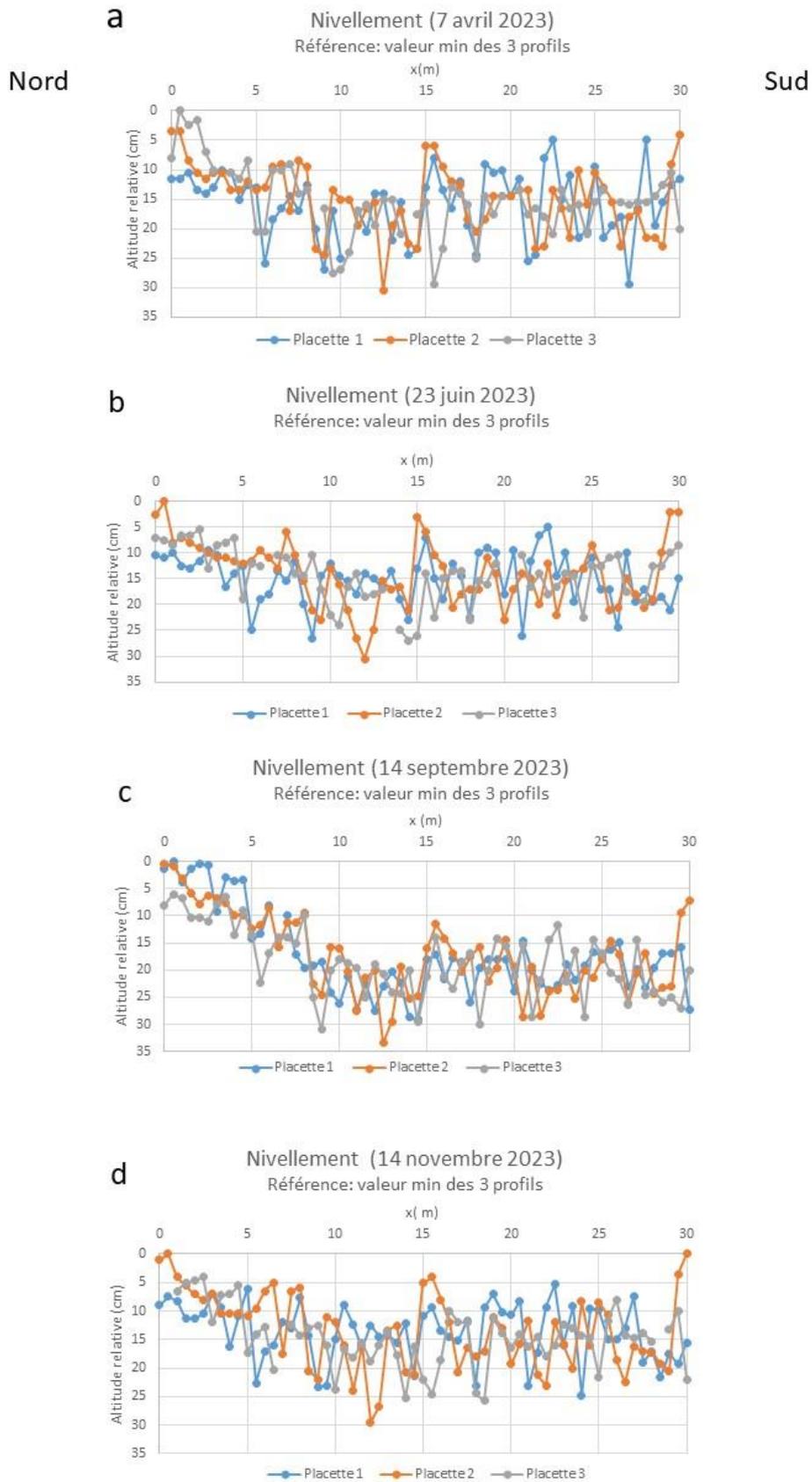


Figure 28. Résultats du nivellement des trois placettes à quatre dates d'intervention : a) 7 avril, b) 23 juin, c) 14 septembre et d) 14 novembre.

Pour mener à bien une comparaison quantitative des profils topographiques, les indicateurs introduits dans la section 2.2.3 sont utilisés : le « max-min » des dénivelés mesurés et le coefficient de variation des altitudes relatives. On rappelle que (i) l'altitude relative est ici définie comme la différence entre le dénivelé lu du point considéré et le dénivelé du point le plus bas du profil i.e., comme la différence entre l'altitude du point considéré et le plus haut en altitude 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 dénivelés mesurés et le coefficient de variation des altitudes relatives sont donnés respectivement dans le tableau 2 (Figure 29) et le tableau 3 (Figure 30).

	07-avr	23-juin	14-sept	14-nov
Placette 1	24.5	21.5	14.5	19.6
Placette 2	26.5	28.5	26.2	29.5
Placette 3	19	18.5	21.2	17.7

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

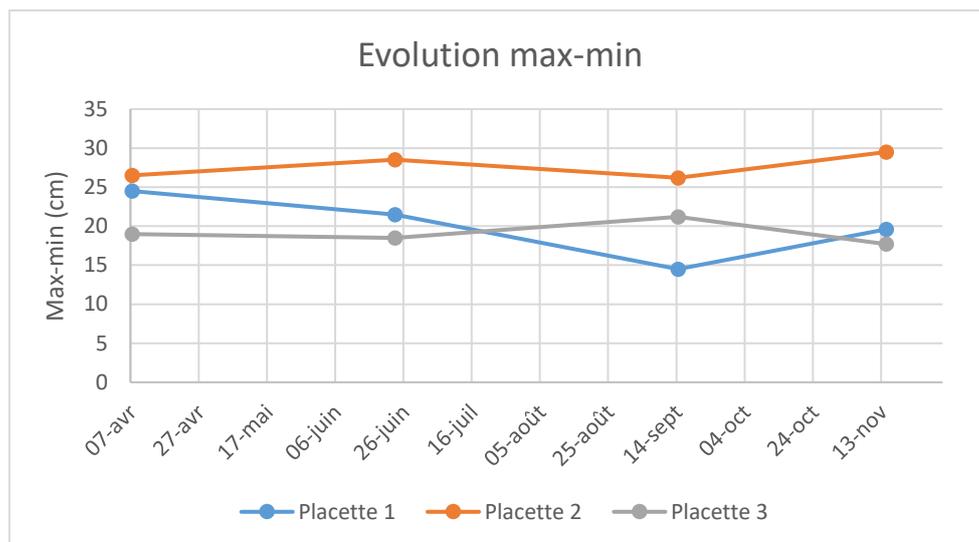


Figure 29. Evolution du paramètre « max-min » (en cm) pour les trois placettes aux quatre dates d'intervention.

	07-avr	23-juin	14-sept	14-nov
Placette 1	0.050	0.044	0.026	0.037
Placette 2	0.047	0.053	0.039	0.047
Placette 3	0.036	0.040	0.035	0.032

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

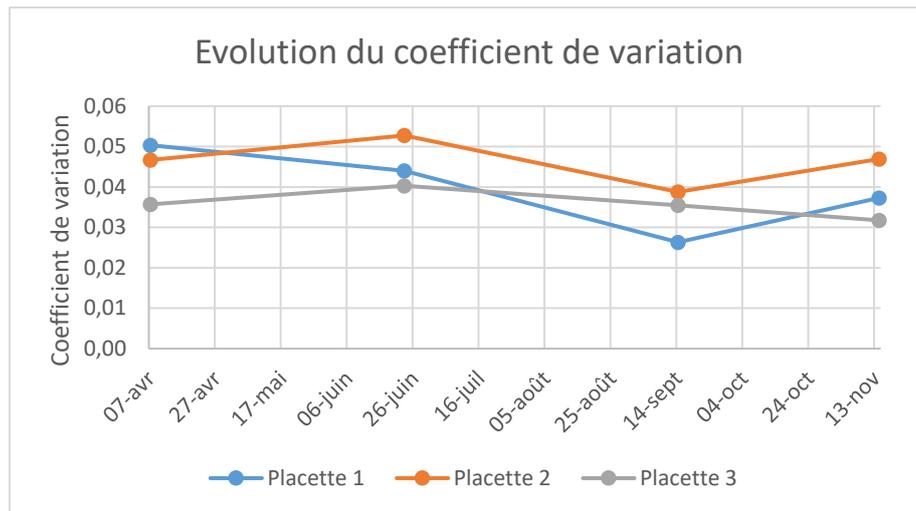


Figure 30. Evolution du coefficient de variation de l'altitude relative (sans dimension) pour les trois placettes aux quatre dates d'intervention.

Les Figures 29 et 30 et les tableaux 2 et 3 permettent de formuler les commentaires suivants

- D'une manière générale, l'indicateur « max-min » indique des valeurs comprises entre 17.7 cm et 28.5 cm. Ces valeurs confirment que les mottureaux sur site n'ont pas été complètement aplatis malgré le constat visuel au commencement de l'expérimentation.
- D'une manière générale, pour une placette donnée, les deux indicateurs varient peu sur l'année étudiée. Le paramètre « max-min » varie suivant une amplitude de 10 cm, 3 cm et 3.5 cm pour respectivement les placettes 1, 2 et 3. Le coefficient de variation des altitudes varie suivant une amplitude de 2.4%, 1.4% et 0.8% pour respectivement les placettes 1, 2 et 3. On note que c'est la placette 1 qui montre les variations les plus importantes. La pâture permanente sur la placette 1 pourrait expliquer cette tendance particulière des deux indicateurs.
- A la date de la première intervention i.e., au 7 avril (sensiblement deux mois après l'aplatissement), les valeurs des deux indicateurs calculés à partir des mesures obtenues sur les placettes 1 et 2 sont sensiblement identiques et différent légèrement de ceux obtenues sur la placette 3. Ce constat suggère que les deux placettes 1 et 2 ont bien été compactées de la même façon. L'aplatissement des mottureaux de la parcelle 3 semble avoir été un peu plus efficace que celui mené sur les parcelles 1 et 2 : les valeurs du « max-min » et du coefficient de variation de la parcelle 3 sont sensiblement plus faibles que celles des placettes 1 et 2.
- Après le 7 avril, les deux placettes 1 et 2 apparaissent avoir évolué de manière différente. Les deux indicateurs calculés sur la placette 1 décroissent globalement sur l'année étudiée avec une chute particulière le 14 septembre après l'été. Les deux indicateurs calculés sur la placette 2 varient peu au contraire sur l'année étudiée. Comme pour la placette 2, les indicateurs de la placette 3 apparaissent plutôt constants sur l'année étudiée. Encore une fois, le comportement particulier des indicateurs de la placette 1 pourrait s'expliquer par la pâture permanente qu'a subie le sol de la placette.
- Le calcul des deux indicateurs sur les mesures acquises le 14 septembre confirme les résultats de l'analyse qualitative précédente. Les mottureaux aplatis de la placette 1 (et probablement dans une moindre mesure ceux de la placette 2) se sont « rétractés » après la dessiccation estivale. Ce retrait ne semble pas avoir été irréversible comme le montrent les mesures du 14 novembre.

- En conclusion, pour une placette donnée, les deux indicateurs, le « max-min » des altitudes relatives et le coefficient de variation des altitudes varient peu sur l'année étudiée. Nous n'avons donc pas d'indice montrant une croissance verticale i.e, une « repousse » des mottureaux aplatis.

3.4.2 Comparaison des tomographies de résistivité électrique

La Figure 31 synthétise l'ensemble des grands profils de tomographie de résistivité électrique transversaux aux trois placettes (rappel : dispositifs de 48 électrodes d'espacement inter-électrode de 1m voir Figure 3) acquis à quatre dates d'intervention. Les résultats du dispositif plus petit de 48 électrodes d'espacement inter-électrode de 0.2m acquis le 26 janvier ne sont pas ici présentés. Le sol détrempe à cette date n'a pas permis d'acquérir des données de bonne qualité.

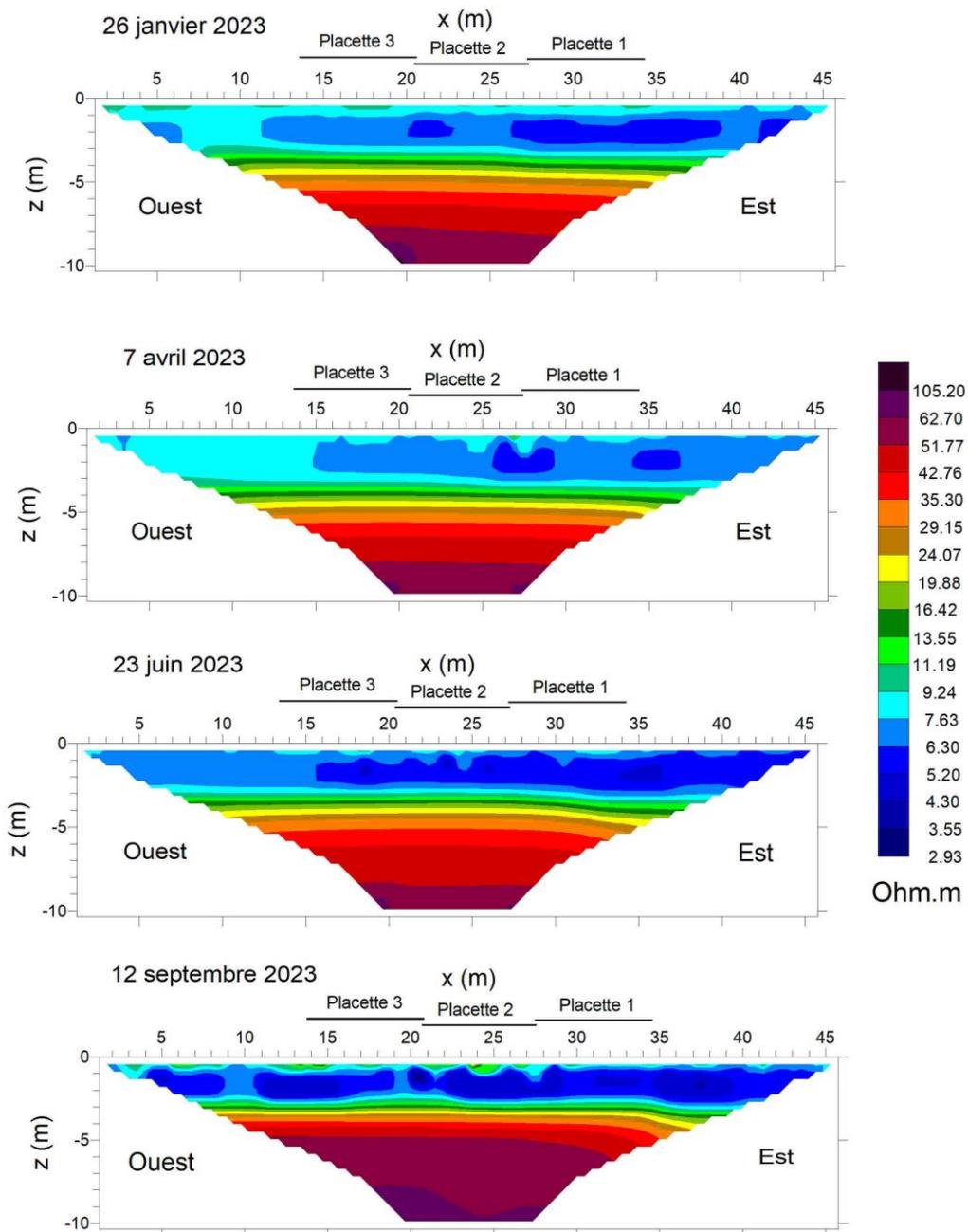


Figure 31. Résultats des grands profils de tomographie électrique acquis sur les trois placettes à quatre dates d'intervention.

La Figure 31 confirme l'organisation verticale du sous-sol du site en trois couches. Le substratum calcaire à environ 4 m de profondeur (couleurs chaudes) est surmonté du bri saturé (couleurs bleues) d'épaisseur plurimétrique. La couche de surface d'épaisseur métrique correspondant au sol insaturé (couleurs bleu clair – vert) apparaît plus clairement en période sèche i.e., les 23 juin et 12 septembre.

La Figure 31 met également en lumière deux éléments nouveaux. Premièrement, elle montre clairement des digitations verticales de haute résistivité e.g., en $x=24.5$ m les 7 avril, 23 juin et 12 septembre ; en $x=2.7$ m les 7 avril et 12 septembre ; en $x=9.5$ m et $x=19.5$ m les 12 septembre. L'existence de ces digitations verticales est aussi confirmée sur les plus petits profils de tomographie électrique acquis le 12 septembre sur les placettes 1 et 2 (Figure 32). Ces digitations pourraient résulter de l'effet d'une intrusion d'une eau plus douce (i.e., de résistivité plus élevée) via très probablement les fissures de dessiccation. En effet, les tomographies électriques ne montrent pas de telles digitations le 26 janvier i.e., à une date où les fissures sont refermées. Elles confirmeraient aussi les gradients de salinité très locaux i.e., à l'échelle du mottureaux observés en 2021 (Caner et Cosenza, 2021).

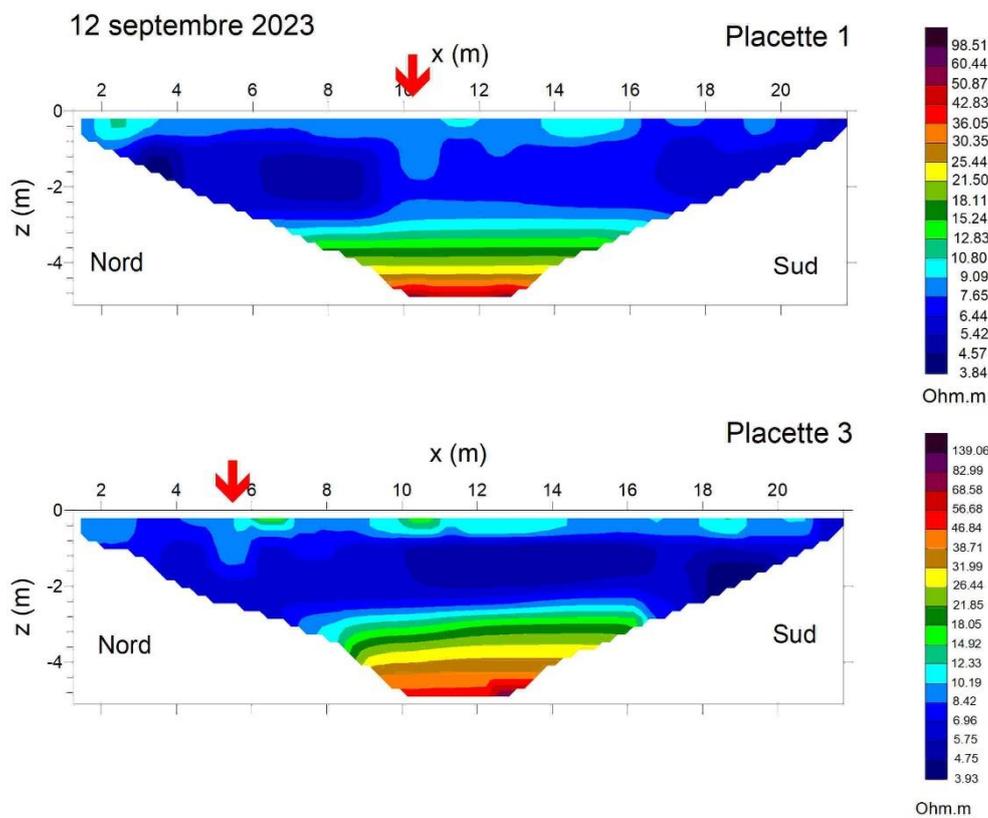


Figure 32. Petits profils de Tomographie de résistivité électriques acquis le 12 septembre montrant des digitations verticales indiquées ici par des flèches rouges.

Deuxièmement, la figure 31 permet de visualiser un léger gradient horizontal Ouest-Est de résistivité dans la couche de bri saturé pour les trois dates 26 janvier, 7 avril et 23 juin. Dans le bri saturé, la résistivité diminue progressivement d'Ouest en Est. Les valeurs de résistivité les plus faibles se situent dans la zone $x=0$ m et $x=15$ m. On note que (i) ce gradient horizontal de résistivité dans le bri saturé n'est plus visible le 12 septembre et (ii) ce gradient horizontal n'est pas clairement visible à l'échelle des petits profils électriques (voir par exemple Figures 10, 17 et 24). A ce stade, il est difficile d'avancer une explication définitive sur l'origine de ce gradient. Toutefois, le fait qu'il disparaisse à la fin de la période sèche laisse penser à un effet associé à une infiltration différentielle i.e., une infiltration verticale d'eau plus douce plus efficace à l'ouest du profil au début de la saison humide automnale, via les fissures de dessiccation qui seraient ainsi plus nombreuses dans cette zone.

3.4.2 Comparaison des pénétrogrammes

La comparaison des pénétrogrammes acquis aux quatre d'intervention confirme deux caractéristiques communes aux trois placettes :

- D'une part, le sous-sol des trois placettes s'organise verticalement en « tricouche » dans lequel le bri saturé est intercalé entre une couche insaturée à son sommet et un substratum probablement calcaire à sa base. La profondeur des interfaces entre ces trois formations est sensiblement la même sur les trois placettes.
- D'autre part, il existe dans le bri saturé, une couche d'argile molle qui voit sa rigidité évoluer au cours du temps. Elle se présente comme « très molle » voire liquide en janvier, en période d'immersion, puis sa rigidité mécanique augmente au cours de l'été. Ces très valeurs de résistance mécanique ont été confirmées lors d'une intervention sur site le 5 mars 2024.

Afin d'identifier l'effet de la compaction (associée à la pâture) sur les mesures de résistance de pointe, nous avons calculé la moyenne de la résistance de pointe mesurée l'été sur une tranche de sols de 50 cm d'épaisseur i.e., sur une épaisseur de sols pour laquelle l'effet de cette compaction est supposé maximum (Tableau 4).

		23 juin	12 septembre
Placette 1	Moyenne (MPa)	6.80	6.10
	Ecart-type (MPa)	3.18	1.56
	Nombre de valeurs	136	147
Placette 2	Moyenne (MPa)	3.22	9.40
	Ecart-type (MPa)	1.07	3.16
	Nombre de valeurs	74	216
Placette 3	Moyenne (MPa)	1.13	6.90
	Ecart-type (MPa)	0.44	3.93
	Nombre de valeurs	44	117

Tableau 4. Calcul des moyennes et écarts-types des valeurs de résistance de pointe (MPa) sur une tranche de sols de 50 cm acquises sur les trois placettes à l'été 2023.

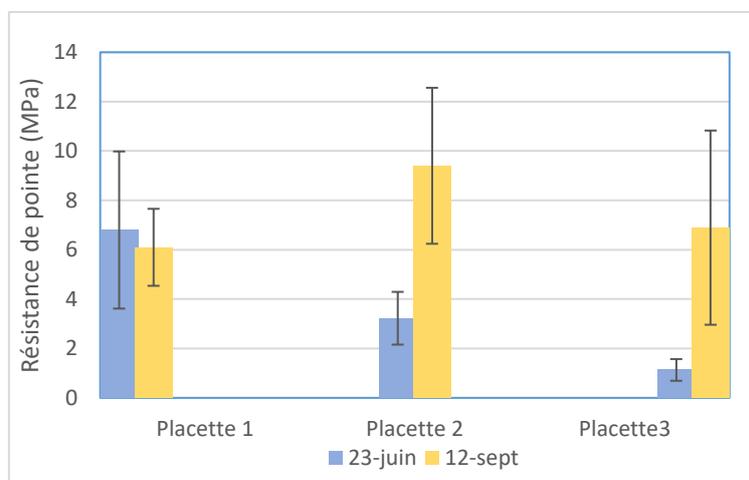


Figure 33. Moyennes et écarts-types des valeurs de résistance de pointe (MPa) sur une tranche de sols de 50 cm acquises sur les trois placettes à l'été 2023.

La figure 33 indique que la résistance de pointe moyenne mesurée en surface sur les deux placettes 2 et 3, non pâturées le 23 juin, est sensiblement plus faible que celle mesurée sur la placette 1 pâturée à cette date d'intervention. Il apparaît donc que la pâture ait eu un effet de compaction sur les propriétés mécaniques des sols de surface.

Cet effet semble toutefois transitoire. En effet, à la fin de l'été (le 12 septembre), les trois placettes présentent des niveaux similaires de résistance de pointe (en intégrant les écarts-types des mesures). Les résistances de pointes des placettes 2 et 3 augmentent ainsi durant l'été par la dessiccation des sols de surface.

III. DISCUSSION ET CONCLUSION

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 constituant un parallélogramme de 21 m de largeur sur 30 m de long. 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 de saison puis accessible lorsque le sol a été plus porteur, simulant une entrée des animaux dans le communal plus tardive. 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. 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 nivellement, 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 permet d'apporter des éléments sur les trois aspects suivants :

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

3.1 Les conditions initiales de l'expérimentation et la cinétique de « repousse » des mottureaux

L'ensemble des données de nivellement acquises environ deux mois après l'aplanissement i.e., le 7 avril montre que les mottureaux du site n'ont pas été complètement aplatis. Il subsiste des mottureaux de hauteur d'environ 20 cm et espacés d'une distance métrique. Nous estimons ainsi que les mottureaux ont été aplatis sur une hauteur d'une quinzaine de centimètres.

Les indicateurs topographiques utilisés i.e., le « max-min » des dénivelés mesurés et le coefficient de variation d'altitude relative indiquent que les placettes 1 et 2 ont été compactées de manière identique. La placette 3 semble avoir été légèrement plus compactée que ses voisines. Cette légère différence n'est toutefois pas rédhibitoire pour la poursuite de l'expérimentation.

Ces mêmes indicateurs topographiques varient peu sur l'année étudiée. *Nous n'avons donc pas d'indice probant montrant une croissance verticale i.e, une « repousse » des mottureaux aplatis.* Ces indicateurs montrent même que les mottureaux aplatis de la placette 1 (et probablement dans une moindre mesure ceux de la placette 2) se sont « rétractés » après la dessiccation estivale puis ont « gonflé » i.e., retrouvé leur taille d'avant l'été, durant les pluies automnales.

3.2 L'incidence de la pâture

Bien que nous n'ayons pas 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.

Premièrement, alors que les deux indicateurs topographiques des placettes 1 et 2 affichent les mêmes valeurs le 7 avril, i.e., deux mois après l'aplanissement, ils divergent ensuite progressivement au cours de l'année. Les indicateurs topographiques sur la placette 2 ont finalement peu évolué sur la période du suivi, alors qu'ils présentent pour la placette 1 à la fin du suivi le 14 novembre des valeurs un peu plus

basses que celles calculées au 7 avril. Cette différence de comportement des indicateurs topographiques peut être attribuée, selon nous, à l'effet de la pâture plus intense sur la placette 1.

Deuxièmement, la résistance de pointe moyenne mesurée en surface sur une tranche de sols de 50 cm sur les deux placettes 2 et 3, non pâturées le 23 juin, est significativement plus faible que celle mesurée sur la placette 1 pâturée à cette date d'intervention. Il apparaît donc que la pâture ait eu un effet de compaction sur les propriétés mécaniques des sols de surface. Cet effet semble toutefois transitoire. En effet, à la fin de l'été (le 12 septembre), les trois placettes présentent des niveaux similaires de résistance de pointe (en intégrant les écarts-types des mesures). Les résistances de pointes des placettes 2 et 3 ont ainsi augmenté durant l'été de par la dessiccation des sols de surface.

3.3. Sur les éléments constitutifs du mécanisme de formation des mottureaux.

Comparativement aux études menées en 2021 et 2022, les investigations menées en 2023 mettent en lumière quatre 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 a montré que la rigidité mécanique (i.e., la résistance mécanique dynamique) du bri saturé avait évolué durant l'année 2023. Des valeurs très basses, jusqu'à 0.2 MPa, de résistance mécanique du bri saturé ont été mesurées le 26 janvier, date à laquelle le Communal se trouvait immergé depuis plusieurs mois. Ces valeurs de résistance ont ensuite augmenté pour atteindre un maximum au début de l'été.
Ces valeurs faibles de résistance dynamique mesurées en hiver sont à associer à des valeurs élevées de teneur en eau, supérieures à 70 % et donc à des valeurs faibles de masse volumique estimées de l'ordre de 1.5 g/cm³ (voire moins). Ainsi, en période d'immersion prolongée, les sols saturés de surface du Communal présentent un gradient vertical ascendant de densité qui pourrait constituer un facteur d'instabilité hydrodynamique comparable au microdiapirisme évoqué dans Cosenza et Caner (2022).
2. Les tomographies de résistivité électrique mettent en évidence des digitations verticales d'anomalies résistantes (électriquement) probablement associées aux fentes de dessiccation verticales du site. Ces digitations confirment les gradients horizontaux très locaux (à l'échelle du mottureau, i.e., entre le cœur du mottureau et la zone « basse » en dépression des mottureaux) observés dans l'étude de 2021. L'extension verticale de ces digitations suggère l'existence de possibles communications entre les fentes de dessiccation et au moins la partie supérieure du bri saturé. Cette communication permettant une infiltration verticale de l'eau en surface vers le bri saturé pourrait expliquer la chute de rigidité du bri observée lors de la période d'immersion prolongée.
3. Le phénomène de retrait-gonflement a été observé sur le site à l'échelle de ce suivi annuel. Les mottureaux aplatis de la placette 1 (et probablement dans une moindre mesure ceux de la placette 2) se sont « rétractés » après la dessiccation estivale puis ont « gonflé » i.e., retrouvé leur taille d'avant l'été, durant les pluies automnales. On note néanmoins que ce phénomène associé à un retrait et gonflement *pro parte* osmotique n'aura pas eu l'amplitude nécessaire pour provoquer une « repousse » visible des mottureaux aplatis.
4. La comparaison des altitudes moyennes de la zone sans mottureaux (localisée dans l'intervalle $x=0$ m et $x=5$ m des profils topographiques) et de la zone avec mottureaux peu après l'aplatissement (i.e., le 7 avril) permet aussi d'envisager l'action de mécanisme(s) supplémentaire(s) accompagnant la genèse des mottureaux.

Si l'altitude moyenne de la zone sans mottureaux constitue l'altitude moyenne du terrain naturel (TN), on constate sur la figure 35 ci-dessous qu'une majorité des points associés aux mottureaux aplatis se situent à une altitude plus basse i.e., *en dessous* de celle du terrain naturel. En outre, si on considère qu'une quinzaine de centimètres de la hauteur initiale des mottureaux a été aplatie alors la figure 34 suggère que les mottureaux ne sont pas *stricto sensu* des *micro-reliefs* mais pourraient être considérés aussi *pro parte* comme des *micro-dépressions*. Ce constat suggère alors de considérer des mécanismes induisant non seulement un soulèvement ou gonflement local du sol mais également une *érosion ou déstabilisation* du sol en surface.

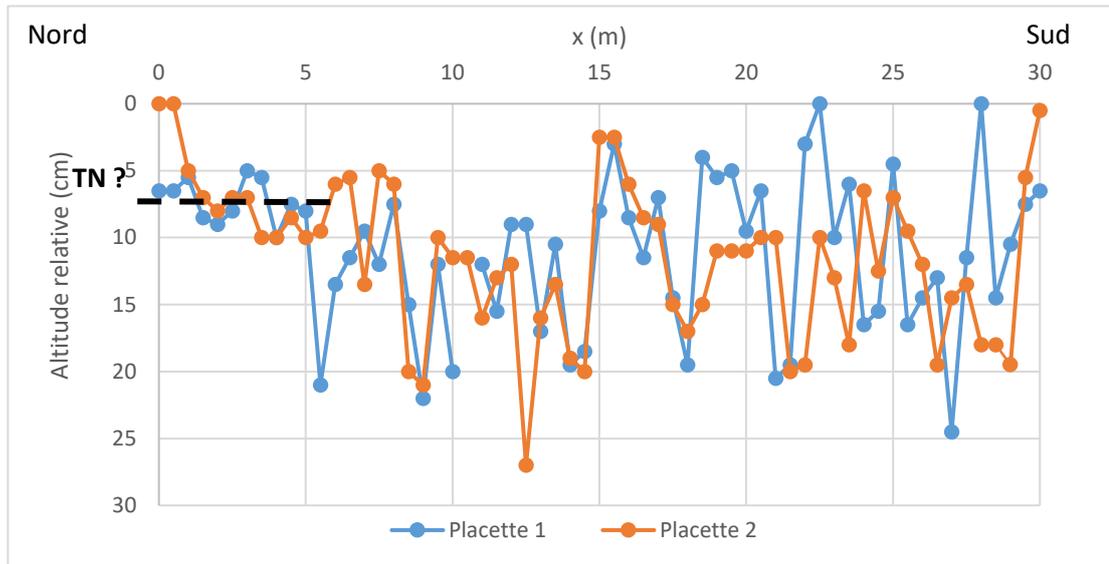


Figure 34. Résultats du nivellement sur les placettes 1 et 2 où la zone de référence sans mottureaux (entre $x=0$ et $x=5m$) est bien identifiée à la date du 7 avril peu après l'aplatissement des mottureaux. Le trait en pointillé noir est une estimation de l'altitude moyenne de cette zone de référence.

Sur la base des travaux de Verger (1960, 1964) et de nos observations antérieures en 2021 et 2022 soulignant le rôle important des fentes de dessiccation, il apparaît naturel de mettre en avant un mécanisme d'instabilité de pente ou dans notre contexte d'instabilité de lèvres de fente de dessiccation (Figure 36). Après une période de dessiccation sévère et la mise en place de fissures de dessiccation d'ouverture pluri-centimétrique (étape 1 de la figure 36), l'immersion du système (étape 2) pendant la saison humide va conduire à installer deux facteurs conduisant à une instabilité des lèvres ou parois des fentes : (i) l'augmentation du poids du terrain (par l'augmentation de la masse volumique du sol saturé en eau) et (ii) la réduction de la résistance au cisaillement du sol induite par la pression interstitielle alors présente (e.g., Durville et Sève, 1996). Si la « vidange » de l'eau dans les fissures est rapide au printemps, la force d'écoulement induite par un écoulement depuis le mottureau vers les fentes peut aussi constituer un troisième facteur d'instabilité. Le matériau déplacé par l'instabilité i.e., la rupture ainsi créée va s'évacuer par (faible) écoulement et/ou se déposer au fond des fentes (étape 2).

Ce mécanisme de rupture peut de nouveau s'opérer, i.e. s'auto-entretenir si après le soulèvement/gonflement local du sol à la saison humide suivante et/ou le retrait à la saison sèche suivante, l'angle déstabilisant α des lèvres/flancs de la fente avec l'horizontale est rétabli (étape 3). Cette nouvelle déstabilisation des flancs des fentes tend ainsi à contribuer à mieux individualiser les futurs mottureaux (étape 4).

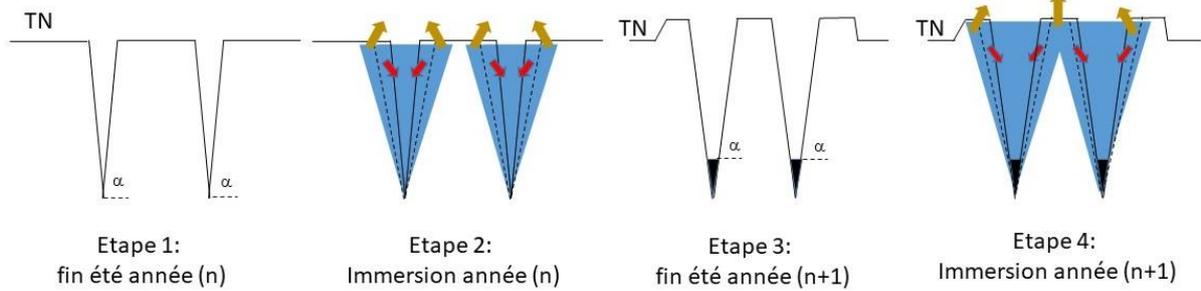


Figure 35. Schéma 2D de mise en place de mottureaux basé sur un couplage entre déstabilisation/rupture de flancs/lèvres de fentes de dessiccation et soulèvement/gonflement voire retrait du sol argileux. Les traits en pointillé des étapes 2 et 4 indiquent des surfaces de rupture (ici supposées planes) générées par l'instabilité mécanique produite par l'immersion des fentes pendant la saison humide. Les flèches rouges indiquent le déplacement de la zone de rupture quittant le massif de sol. Les flèches en marron annoncent le soulèvement/gonflement associé à l'humectation du sol lors de l'immersion des fentes.

Cette proposition ne se veut pas uniquement un hommage aux travaux de Verger qui avait « intuité » le rôle crucial des fentes de dessiccation dans la mise en place des mottureaux. Elle voudrait aussi surtout pointer la nécessité d'intégrer dans les travaux de recherche sur la genèse de ces objets géomorphologiques non seulement le rôle du soulèvement/gonflement du sol dont la nature du moteur reste à clarifier (e.g., projet CNRS MITI/Auto-moteaux ; Caner et Cosenza, 2021 ; Cosenza et Caner, 2022) mais également la dynamique pédologique et mécanique qui a permis l'évolution de fentes de dessiccation (ou de systèmes de fentes de dessiccation) vers les systèmes « mottureaux » tel qu'ils sont observés aujourd'hui.

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.
- Durville, J. L., Sève, G. (1996). Stabilité des pentes: glissements en terrain meuble. *Techniques de l'ingénieur. Construction*, 1(C254), C254-1.
- 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.
- Rousseaux, G., Beaudoin, A. Cordier, L., Hubert, F., de Bouët du Portal, P., Robin, F. 2021. Programme de recherche « AUTO-Organisation des MOTturEAUX (mottes sur les eaux) : motifs, hydrologie, pédologie, préservation » de l'AAP Auto-organisation de la MITI du CNRS, Janvier 2021.
- 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).

ANNEXE 1

Coordonnées GPS des points de la zone d'étude



Figure A1. Localisation des points de mesure GPS

Les quatre sommets du parallélogramme délimitant les trois placettes expérimentales correspondent aux points BALISE AE0, BALISE AE1, BALISE AE2, BALISE AE3.

PROF 48 NO\SE 0

<longitude>-0,9185427599</longitude>

<latitude>46,4178451924</latitude>

PROF 48 NO\SE 24

<longitude>-0,9182555052</longitude>

<latitude>46,4177599556</latitude>

PROF 48 NO\SE 48

<longitude>-0,9179816241</longitude>

<latitude>46,4176790585</latitude>

BALISE AE0

<longitude>-0,9184249882</longitude>
<latitude>46,4176649218</latitude>

BALISE AE1

<longitude>-0,9181718989</longitude>
<latitude>46,4175911460</latitude>

BALISE AE2

<longitude>-0,9180892320</longitude>
<latitude>46,4178558982</latitude>

BALISE AE3

<longitude>-0,9183422305</longitude>
<latitude>46,4179286585</latitude>

PetitPROF 48 NO\SE 0

<longitude>-0,9183114486</longitude>
<latitude>46,4177759651</latitude>

PetitPROF 48 NO\SE24

<longitude>-0,9182556093</longitude>
<latitude>46,4177600748</latitude>

PetitPROF 48 NO\SE48

<longitude>-0,9181990872</longitude>
<latitude>46,4177432925</latitude>

PROF 24 NORD 0

<longitude>-0,9181098667</longitude>
<latitude>46,4179365877</latitude>

PROF 24 NORD 12

<longitude>-0,9181309159</longitude>
<latitude>46,4178666431</latitude>

PROF 24 NORD 24

<longitude>-0,9181739086</longitude>
<latitude>46,4177351837</latitude>

PROF 24 NORD P2debut

<longitude>-0,9181954841</longitude>
<latitude>46,4179611988</latitude>

PROF 24 NORD P2milieu

<longitude>-0,9182159297</longitude>
<latitude>46,4178905206</latitude>

PROF 24 NORD P2fin

<longitude>-0,9182556063</longitude>

<latitude>46,4177591774</latitude>

PROF 24 NORD P3debut

<longitude>-0,9183101468</longitude>

<latitude>46,4178811855</latitude>

PROF 24 NORD P3milieu

<longitude>-0,9183395236</longitude>

<latitude>46,4177847574</latitude>

PROF 24 NORD P3fin

<longitude>-0,9183707160</longitude>

<latitude>46,4176809170</latitude>