



## RAPPORT D'ETUDE

2022

Cartographie de la salinité du sol de la Réserve  
Naturelle Régionale du Marais communal du Poiré-sur-Velluire

Etude 2022-259



Réserve Naturelle  
MARAIS COMMUNAL  
DU POIRÉ-SUR-VELLUIRE

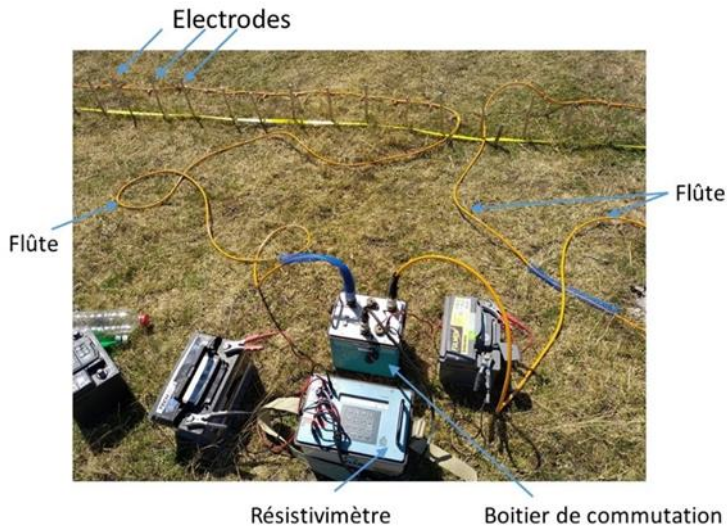
**Responsables scientifiques du projet :**

**COSENZA Philippe – CANER Laurent**

Participation au projet :

**COUSIN Alexis** : Master 1 Hydrogéologie et Transferts de l'Université de Poitiers

**ALI MASSAI Oumarou** : 1<sup>ère</sup> année ENSI Poitiers



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

Avec le concours financier de :



Cofinancé par  
l'Union européenne



## Table des matières

1. INTRODUCTION ET PROBLEMATIQUE .....	4
1.1 Contexte général.....	4
1.2 Rappel des résultats de l'étude de 2021 .....	4
1.3 Objectif de l'étude.....	5
2. MATERIELS ET METHODES .....	6
2.1 Localisation des sites d'étude.....	6
2.2 Prospections de terrain .....	7
2.2.1 Sondages à la tarière.....	7
2.2.2 Mesure de la résistance de pointe.....	8
2.2.3 Profilage électrique à large maille.....	8
2.2.4 Tomographie de résistivité électrique .....	9
3. RESULTATS .....	12
3.1 Zone 2 : zone de référence sans mottureaux.....	12
3.1.1 Profilage électrique à large maille.....	12
3.1.2 Tomographies de résistivité électrique .....	13
3.1.2 Profils de résistance de pointe .....	15
3.1.3 Profil de teneur en eau massique .....	16
3.1.1 Profils de CE 1/5 .....	17
3.2 Zones 1 et 4 : zones à gros mottureaux .....	18
3.2.1 Profilage électrique à large maille.....	18
3.2.2 Tomographies de résistivité électrique .....	20
3.2.2 Profils de résistance de pointe .....	23
3.2.3 Profil de teneur en eau massique.....	24
3.2.4 Profils de CE 1/5 .....	24
3.2.5 Synthèse.....	25
3.3 Zone 3 : zone à petits mottureaux.....	25
3.3.1 Tomographies de résistivité électrique .....	25
3.3.2 Profils de résistance de pointe .....	29
3.3.3 Profil de teneur en eau massique .....	31
3.3.4 Profils de CE 1/5 .....	31
3.4 Zone 5 : zone à mottureaux en boule.....	33
3.4.1 Profilage électrique à large maille.....	33
3.4.2 Tomographies de résistivité électrique .....	34
3.4.3 Profils de résistance de pointe .....	36
3.4.4 Profils de teneur en eau massique .....	37
3.4.4 Profils de CE 1/5 .....	38
III. DISCUSSION ET CONCLUSION .....	40
3.1 Sur l'organisation verticale des sols.....	40
3.2 Sur l'existence de gradients de salinité à l'échelle du Communal .....	43
3.3. Sur les éléments constitutifs du mécanisme de formation des mottureaux. ....	43
 Annexe 1 :	 47
Annexe 2 :	48

## Liste des Figures

Figure 1 : Localisation des profils et des sites d'étude.....	6
Figure 2 : Principe du pénétrromètre dynamique PANDA® .....	8
Figure 3 : Principe de la mesure de la résistivité électrique apparente d'un sol.....	9
Figure 4 : Principe de la Tomographie de Résistivité Electrique (TRE).....	10
Figure 5 : Eléments du dispositif d'acquisition de Tomographie de Résistivité Electrique (TRE).....	10
Figure 6 : Profils électriques acquis dans la zone 2.....	12
Figure 7 : Tomographies de la résistivité électrique acquises dans la zone 2. ....	14
Figure 8 : Représentation synthétique des deux tomographies de résistivité électrique .....	15
Figure 9 : Pénétrrogrammes des sondages de la zone 2.....	16
Figure 10 : Profil de teneur des sols de la zone 2.....	17
Figure 11 : Profil de CE au 1/5 et teneur équivalente en NaCl du sol de la zone 2 .....	17
Figure 12 : Profil électrique de longueur égale à 550 m et de pas de 10m acquis dans la zone 1.....	18
Figure 13 : Profil électrique de longueur égale à 480 m et de pas de 5m acquis dans la zone 4.....	19
Figure 14 : Tomographies de la résistivité électrique acquises dans la zone 4. ....	21
Figure 15 : Représentation synthétique des deux tomographies de résistivité électrique .....	22
Figure 16 : Pénétrrogrammes des sondages réalisés dans la zone 4 .....	23
Figure 17 : Profil de teneur des sols de la zone 4.....	24
Figure 18 : Profil de CE au 1/5 et concentration équivalente en NaCl des sols de la zone 4.....	25
Figure 19 : Extrait du grand dispositif d'acquisition de la TRE.....	26
Figure 20 : Tomographies de la résistivité électrique acquises dans la zone 3. ....	28
Figure 21 : Représentation synthétique des deux tomographies de résistivité électrique .....	29
Figure 22 : Pénétrrogrammes des sondages réalisés dans la zone 3 .....	30
Figure 23 : Profils de teneur des sols de la zone 3. ....	31
Figure 24 : profil de CE au 1/5 et salinité équivalent des sols de la zone 3 .....	32
Figure 25 : Profil électrique acquis à proximité de la zone 5. ....	33
Figure 26 : Tomographies de la résistivité électrique acquises dans la zone 5 .....	35
Figure 27 : Représentation synthétique des deux tomographies de résistivité électrique .....	36
Figure 28 : Pénétrrogrammes des sondages réalisés dans la zone 3. ....	37
Figure 30 : Profils de CE 1/5 et salinité équivalente des sols de la zone 5. ....	39
Figure 31 : Représentation schématique du profil de sol de la zone 2 sans mottureaux. ....	41
Figure 32 : Représentation schématique du profil de sols de la zone 1 et 4 avec de gros mottureaux..	42

## Liste des Tableaux :

Tableau 1 : Dates, zones d'intervention et méthodes utilisées pour l'étude	7
Tableau 2 : Analyse statistique simple des sondages pénétrrométriques	44

# 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 XIII<sup>e</sup> 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 cm<sup>2</sup> à quelques m<sup>2</sup> 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 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.

## 1.2 Rappel des résultats de l'étude de 2021

En 2021 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 étude de caractérisation de quatre zones présentant différents types de mottureaux et d'une zone de référence sans mottureaux (Caner et Cosenza, 2021).

Les premiers résultats révèlent que les mottureaux des quatre zones et la zone de référence présentent une texture argileuse à argileuse lourde (> 54 % fraction argileuse). Le profil de la zone 5 avec des mottureaux en boule est caractérisé par une teneur en argile plus élevée. Les sols présentent également minéralogie similaire dominée par des argiles expansibles du groupe de smectites et interstratifiés illite/smectite. Les sols présentent de forts contrastes dans les propriétés hydriques et mécaniques entre les hauts de mottureaux, les bas de mottureaux et les références. La teneur en eau est un paramètre clé

contrôlant les propriétés mécaniques de gonflement et de retrait du matériau argileux en fonction des cycles de dessiccation humectation du sol. La déshydratation de l'argile se traduit par un retrait et une consolidation révélée par les mesures pénétrométriques.

Sur la base de ces premiers résultats sur le Marais du Poiré-sur-Velluire, il semble que le mécanisme décrit par Verger (1964), de soulèvement entre fissures de retrait provoqué par des « matériaux tombant dans le fond des fentes » est peu probable pour au moins une raison. Les résultats des essais pénétrométriques montrent que les zones basses des mottes sont nettement plus molles que les mottes elles-mêmes. Ces zones basses sont insuffisamment rigides pour transmettre des pressions qui pourraient provoquer les soulèvements observés.

Les résultats des mesures de  $CE_{1/5}$  et de résistivité électrique apparente (qui sont corrélés) révèlent une forte variabilité de la salinité des sols à l'échelle du marais mais surtout à l'échelle des microreliefs avec des gradients de salinité entre les mottureaux et les zones basses entre les mottureaux. Les « cœurs » ou « racines » des mottureaux ont des salinités (ou  $CE_{1/5}$ ) plus importantes que les parties basses entre les mottureaux. Ces gradients de salinité sont observés dans les différentes zones même si la salinité globale est différente.

Les résultats de ces études préliminaires permettent d'émettre l'hypothèse que le mécanisme qui semble le plus probable à l'origine des mottureaux est un soulèvement entre fissures de retrait provoqué par des pressions latérales de gonflement. Le gonflement des argiles serait lié à des gradients de salinité entre le cœur des mottureaux et les zones basses. Ces hypothèses sont également abordées dans le projet de recherche sur la Réserve Naturelle Nationale Saint-Denis-du-Payré (Rousseaux et al. 2021, Fouassier 2021).

La variété des types mottureaux observés sur le site du Poiré-sur-Velluire incite également à penser qu'il existe probablement plusieurs mécanismes ou alors plusieurs variantes d'un mécanisme dominant.

### **1.3 Objectif de l'étude**

L'objectif de l'étude proposée en 2022 est de préciser le rôle de la salinité ou des gradients de salinité dans la formation des mottureaux.

Pour cela nous proposons de réaliser une cartographie de la salinité des sols du Communal par des mesures de la résistivité électrique du sol en développant la méthode utilisée en 2021 pour pouvoir la déplacer le long d'une diagonale dans le communal. Nous explorerons des zones sans mottureaux et des zones avec les différents types de mottureaux analysés en 2021 pour adapter le système de mesures aux petits mottureaux et le rendre mobile. Ces mesures seront calibrées par des mesures de teneur en eau massique et des mesures de  $CE_{1/5}$  répétés sur des zones choisies du marais.

Des mesures de tomographie de résistivité électrique seront également réalisées pour obtenir un modèle de répartition verticale des couches de sols le long d'un profil.

## 2. MATERIELS ET METHODES

L'étude menée sur le Marais Communal du Poiré-sur-Velluire a comporté essentiellement des campagnes de terrain et des mesures de propriétés physico-chimiques des sols menées au laboratoire (teneur en eau, conductivité électrique de l'extrait au 1/5).

### 2.1 Localisation des sites d'étude

Les sites d'étude (Figure 1) sont ceux investigués en 2021 (Caner et Cosenza, 2021) dont on rappelle ici les principales caractéristiques :

- La zone 1 située dans une zone de topographie intermédiaire du Communal présente des gros mottureaux d'environ 40 cm de haut.
- La zone 2 située au Nord du marais sur une zone plane de topographie haute correspond à une zone de référence (R) sans mottureaux. Cette zone représente la zone la plus haute, i.e., la plus grande *Belle* du site.
- La zone 3 située dans une zone basse, i.e., une grande *Baisse*, la baisse de l'Achenal, présente des petits mottureaux d'environ 20 cm de haut au centre du chenal et des mottureaux plus gros en périphérie du chenal.
- La zone 4 située au Sud du marais présentant des gros mottureaux d'environ 40cm de haut, similaires à ceux de la zone 1.
- La zone 5 située à l'est du marais présente des mottureaux en forme de Boules d'environ 40cm de haut.

Les zones 2, 3, 4 et 5 ont fait l'objet de profils de référence de teneur en eau, de pénétrométrie et de tomographie de résistivité électrique dont les principes sont présentés plus loin. Des profilages électriques à large maille de longueur variable ont été réalisés dans les zones 1, 2, 4 et 5 (Figure 1).

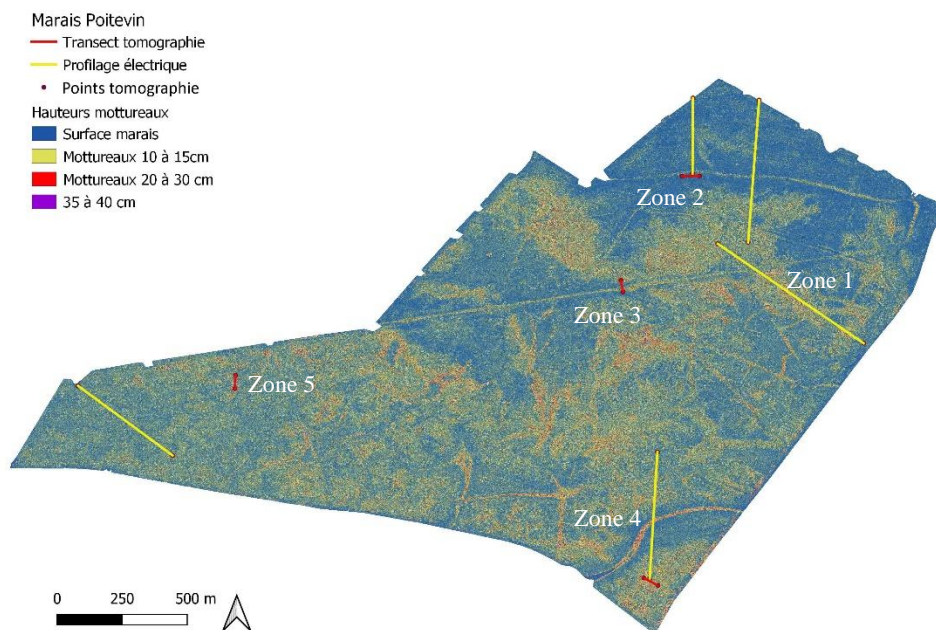


Figure 1 : Localisation des profils et des sites d'étude (source : SIG PNR Marais Poitevin).

## 2.2 Prospections de terrain

Les dates, les zones d'intervention et les méthodes utilisées sont résumées dans le tableau 1.

<b>Zone</b>	<b>Date</b>	<b>Méthodes</b>
1	19 & 20 septembre 2022	Profilage électrique
2	11 juillet 2022	Tomographie de résistivité électrique, pénétrométrie, prélèvements
	9 septembre 2022	Profilage électrique
3	10 octobre 2022	Tomographie de résistivité électrique, pénétrométrie, prélèvements
4	10 juin 2022	Profilage électrique, pénétrométrie, prélèvements
	21 juillet 2022	Tomographie de résistivité électrique, pénétrométrie, prélèvements
5	21 septembre 2022	Profilage électrique
	4 octobre 2022	Tomographie de résistivité électrique, pénétrométrie, prélèvements

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

### 2.2.1 Sondages à la tarière

Pour quatre zones, zones 2 à 5, un à quatre sondages du sol ont été réalisés à l'aide d'une tarière manuelle à rallonges de 4m de longueur et 5 cm de diamètre.

Pour chaque profil, des échantillons ont été prélevés tous les 20cm 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 2m et 3,50m dans certaines zones. Pour les profondeurs supérieures à 2m nous pouvons considérer que les valeurs obtenues (teneur en eau, CE) 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 et de la conductivité de l'extrait au 1/5

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.

Les mesures de la conductivité électrique de l'extrait au 1/5 (CE1/5) ont été réalisées sur une suspension préparée en avec 10g de sol désagrégé séché à l'air et 50 mL d'eau osmosée et agitée pendant 30mn sur

un agitateur rotatif. La conductivité est mesurée grâce à une sonde multi-paramètres 3630 IDS - WTW® équipée d'une sonde de conductivité électrique.

A partir des mesures de conductivité électrique au 1/5 et des teneurs en eau il est possible d'obtenir la conductivité électrique du fluide à l'aide de la formule de Montoroi (1997).

$$CE_{fluide} = CE_{1/5} \times \frac{5}{W}$$

Avec :

$CE_{fluide}$  : conductivité électrique du fluide [ $\mu\text{S cm}^{-1}$ ]

$CE_{1/5}$  : conductivité électrique de l'extrait au 1/5 [ $\mu\text{S cm}^{-1}$ ]

W : teneur en eau de l'échantillon [sans dimension]

La conductivité électrique du fluide est ensuite convertie en concentration équivalente en NaCl en connaissant la température de mesure de la  $CE_{1/5}$  (Aminot et Kérouel, 2004).

Les résultats des mesures de CE 1/5, de salinité du fluide et de concentration équivalent en sels sont présentés en annexe 2.

### 2.2.3 Mesure de la résistance de pointe

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 2). 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 perdue conique (angle  $30^\circ$ ) en acier de 4  $\text{cm}^2$  de section pour limiter les forces de frottements entre le train de tige de section 1  $\text{cm}^2$  et le sol argileux. La résistance de pointe  $Q_d$  a été mesurée jusqu'à une profondeur de 3 m environ i.e., à des profondeurs supérieures à 1.20m visées dans l'étude de 2021 (Caner et Cosenza, 2021).

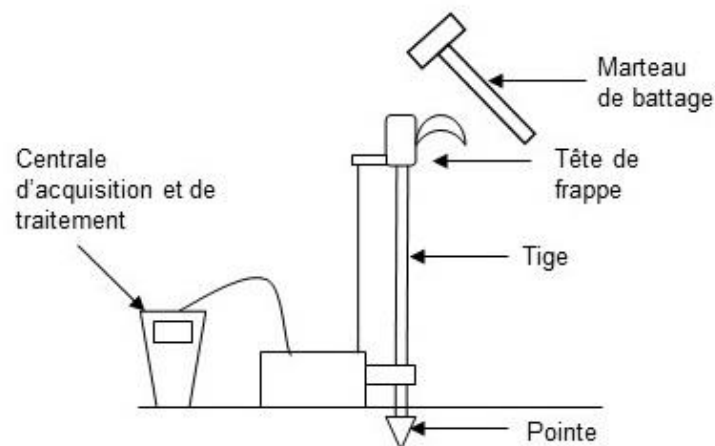


Figure 2 : Principe du pénétromètre dynamique PANDA®.

### 2.2.4 Profilage électrique à large maille

Le profilage électrique est une méthode géophysique dite électrique c'est-à-dire basée sur une mesure de résistivité électrique. Cette mesure s'effectue sur le terrain par un quadripôle (quatre électrodes en



acier inox) relié à un résistivimètre. Un courant d'intensité connue est injecté dans le sol par deux électrodes (deux pôles A et B), et la tension entre les deux autres électrodes, dites de réception, (deux autres pôles M et N) est mesurée pour obtenir une résistance électrique qui est ensuite convertie en résistivité (Figure 3a).

D'une manière générale, la résistivité électrique est sensible à la présence de matériaux conducteurs électriquement i.e., sols salés et sols riches en argile (e.g., Keller & Frischknecht, 1966). Dans le contexte de cette étude, cette propriété physique sera surtout *sensible aux variations de salinité du sol* (la teneur en argile étant relativement homogène à l'échelle du Communal) et en très proche surface à la dessiccation du sol (i.e., perte de l'eau du système porale consécutive à l'évaporation).

Plus exactement, le profilage électrique encore appelé *trainé électrique* vise à mesurer la résistivité électrique sur une tranche de sol plus ou moins constante. Dans notre étude qui utilise la configuration dite *Wenner* (alignement de quatre électrodes équidistantes de 50 cm), *l'épaisseur de cette tranche investiguée de sol est de l'ordre de 40 cm*. Un dispositif équipé d'un résistivimètre de type Chauvin Arnoux CA 6460 a été spécialement conçu pour l'étude (Figure 3b). En déplaçant sur le terrain le dispositif résistivimètre et quadripôle de dimensions fixes, on obtient un *profil horizontal de résistivité électrique dite apparente*. On parle de résistivité apparente car celle-ci correspond à une mesure de résistivité d'un composite solide-eau-air (et non pas à un matériau pur i.e., monophasique). Afin d'éviter une correction topographique, chaque mesure de résistivité apparente a été réalisée en évitant autant que possible de placer une électrode sur un mottureau.

Le pas entre chaque mesure de résistivité apparente est fixé entre 5 à 10 m, suivant les zones et les durées de prospection envisagées. Ces valeurs de pas très grandes par rapport à l'écartement inter-électrode de 50 cm justifient la terminologie « large maille ».

L'objectif principal de ces profils électriques est d'identifier des gradients horizontaux de salinité à l'échelle des zones investiguées voire du Communal.

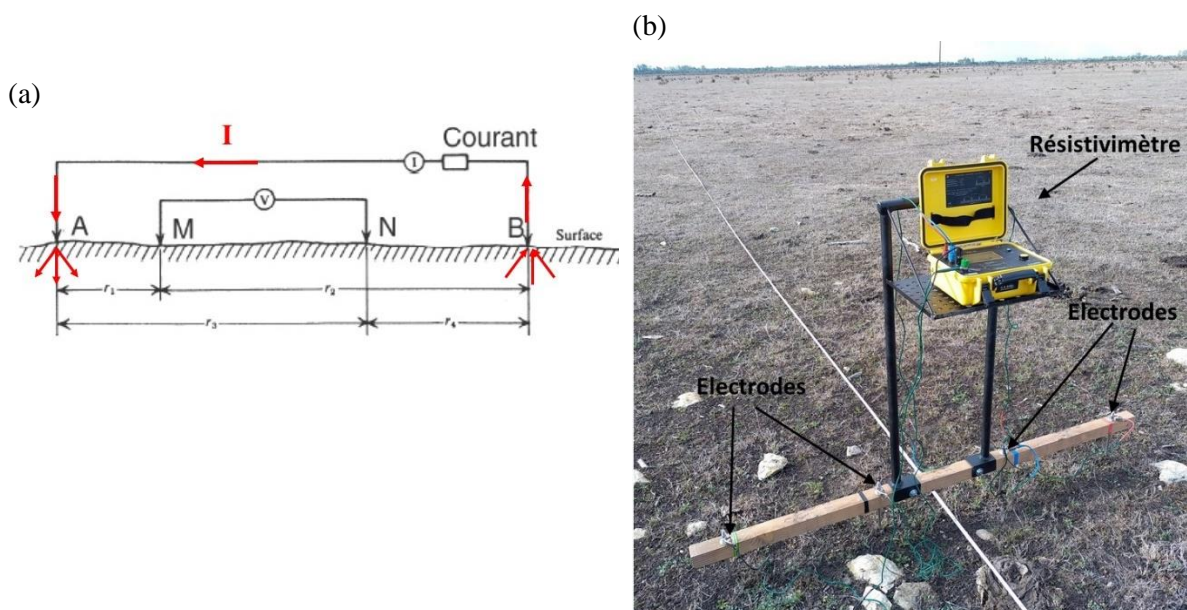


Figure 3 : (a) Principe de la mesure de la résistivité électrique apparente d'un sol suivant un quadripôle électrique A, M, N, B, (b) dispositif équipé d'un résistivimètre et d'un quadripôle de dimensions fixes spécialement conçu pour l'étude.

La distance entre électrodes est de 50 cm.

### 2.2.5 Tomographie de résistivité électrique

Alors que le profilage électrique s'intéresse aux variations *horizontales* de la résistivité électrique, la méthode d'imagerie électrique 2D fut mise au point par la communauté géophysicienne dans le but d'obtenir un modèle du sous-sol où la répartition de résistivité varie *horizontalement* et *verticalement* le long d'un profil (e.g., Florsch et Mulhach, 2018).

Cette méthode est basée sur la mesure d'un ensemble de résistivités électriques apparentes du sous-sol, le long d'un dispositif rectiligne de  $n$  électrodes. 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. 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 (Figure 4). La « flûte » est elle-même reliée via une boîte de commutation à un résistivimètre, 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 (Figures 5a et 5b). 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®.

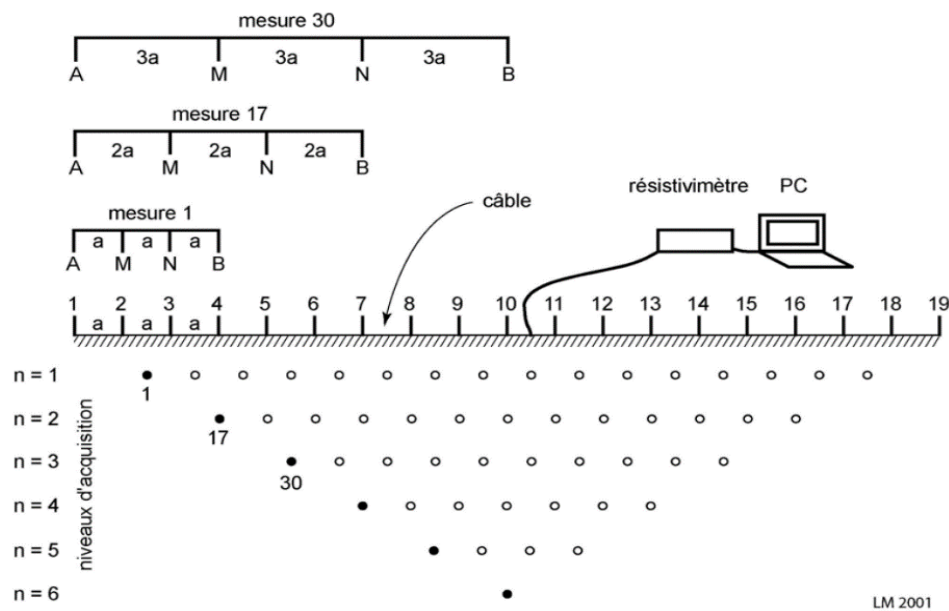


Figure 4 : Principe de la Tomographie de Résistivité Electrique (TRE). Dans cet exemple, trois quadripôles (mesures 1, 17 et 30) correspondant à trois profondeurs d'investigation différentes sont mis en jeu.

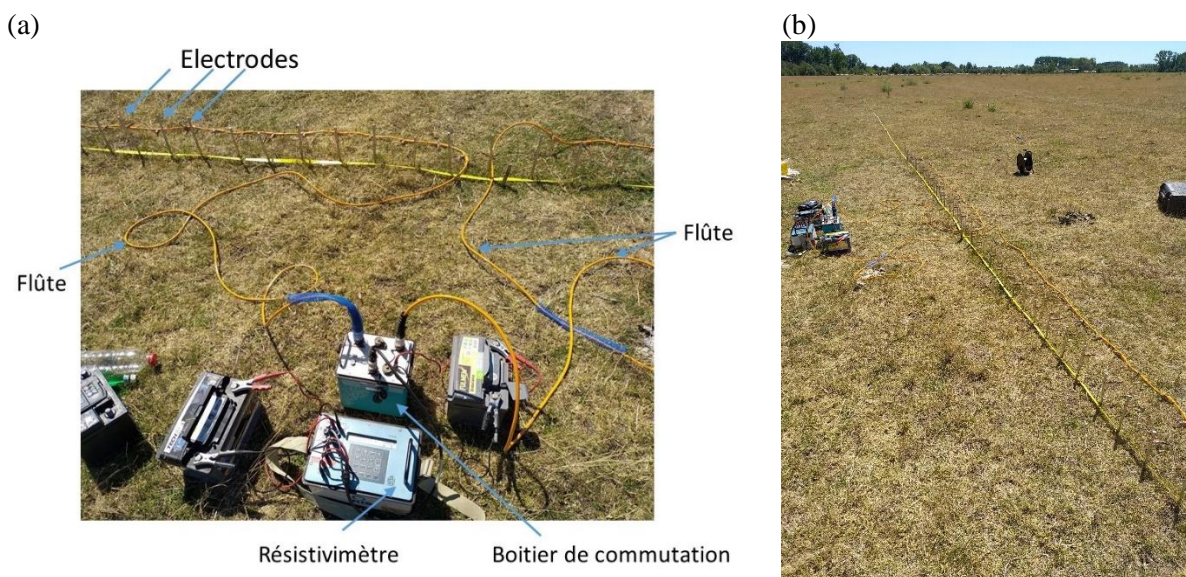


Figure 5 : (a) Eléments du dispositif d'acquisition de Tomographie de Résistivité Electrique (TRE) utilisé dans l'étude, (b) Exemple de dispositif TRE de 48 électrodes espacées de 0,2 m dans la zone 2.

Dans notre étude, deux séquences de 463 quadripôles suivant une configuration Wenner-Schlumberger ont été programmées dans un résistivimètre Syscal R1+ de la société Iris-Instrument. Associées à un dispositif de 48 électrodes sur le terrain, ces deux séquences d'espacement inter-électrode de 0.2m et 1m permettent d'obtenir deux TRE de longueur, de profondeur et donc de résolutions différentes. La TRE d'espacement inter-électrode de 0.2m (respectivement de 1m) possède une longueur de 9.6m (respectivement 48m) et de profondeur d'environ 1.75 m (respectivement 8.75m). Ces deux TRE *réalisées sur une même ligne* apportent donc deux informations complémentaires. La TRE d'espacement inter-électrode de 0.2m apporte une distribution 2D de la résistivité à haute résolution mais sur une profondeur plus limitée i.e., 1,75 m (au lieu de 8,75 m pour la TRE d'espacement inter-électrode de 1m).

### 3. RESULTATS

#### 3.1 Zone 2 : zone de référence sans mottureaux

##### 3.1.1 Profilage électrique à large maille

La zone 2 a fait l'objet de deux profils électriques, P1\_Z2 et P2\_Z2 de longueur respective de 290m et 550m et d'un pas égal à 10m et orientés Nord-Sud (Figures 1, 6 et 7). On rappelle que la profondeur d'investigation de la méthode i.e., l'épaisseur de couche de sols concernés est de l'ordre de 40 cm.

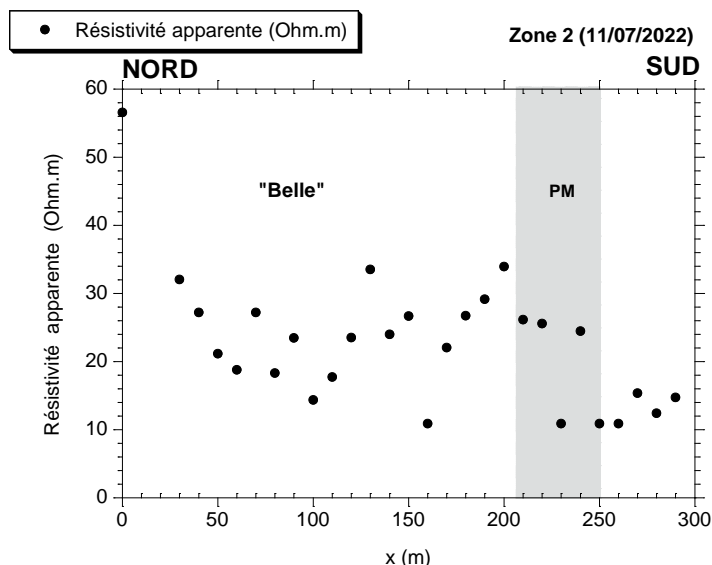


Figure 6a : Profil électrique P1\_Z1 de longueur égale à 290 m et de pas de 10m acquis dans la zone 2 (voir Figure 2).

PM (zone gris clair): présence prépondérante de petits mottureaux (typiquement inférieurs à 20 cm)

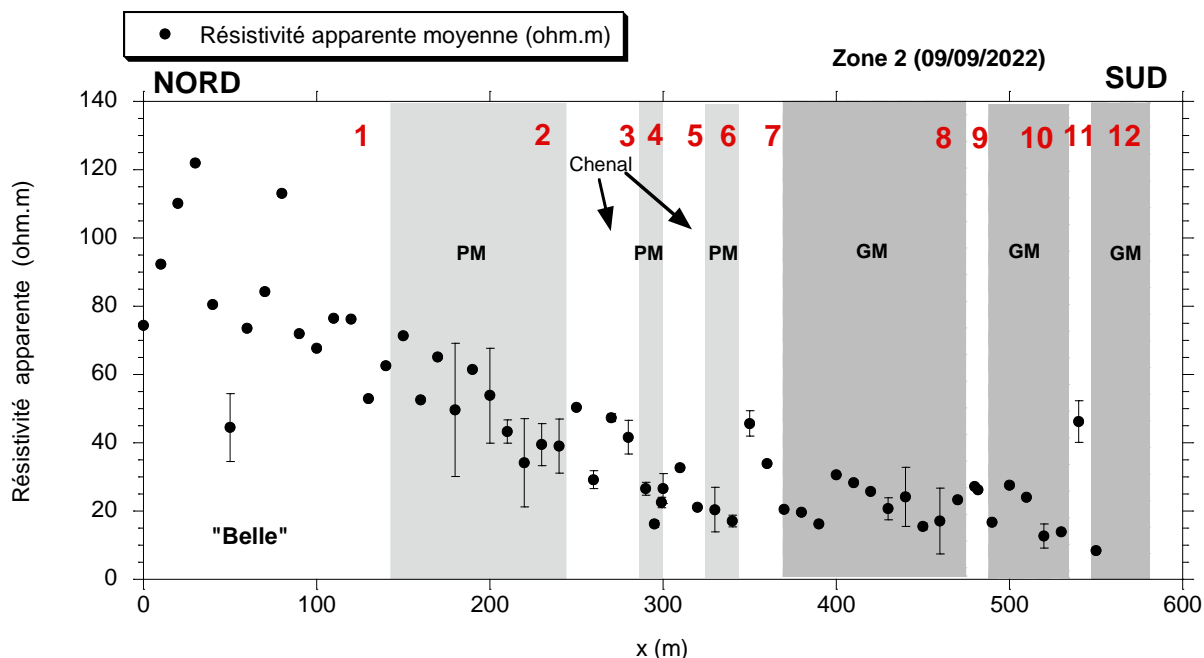


Figure 6b : Profil électrique P1\_Z2 de longueur égale à 550 m et de pas de 10m acquis dans la zone 2. PM (zone gris clair): présence prépondérante de petits mottureaux (typiquement inférieurs à 20 cm). GM (zone gris foncé) : présence prépondérante de gros mottureaux (typiquement supérieurs à 40 cm)

Les nombres en rouge sont utilisés pour faciliter la description du profil dans le texte.

Les figures 6a et 6b permettent de formuler les constats suivants :

- On observe surtout sur la figure 6b une baisse générale de la résistivité électrique apparente du Nord vers le Sud. Cette tendance générale pourrait être attribuée à un gradient Nord-Sud de salinité du sous-sol (si on considère l'argilosité du sous-sol étant sensiblement identique à l'échelle de la zone investiguée). Ce gradient pourrait correspondre à une alimentation en eau douce du site depuis les plateaux calcaires situés au Nord du marais.
- La *Belle* i.e., zone sans mottureaux du profil P2\_Z2 (zone numérotée 1 en rouge sur la figure 6b) possède les valeurs de résistivité les plus élevées du profil (malgré la dispersion des valeurs).
- Sur le même profil P2\_Z2, les zones à grands mottureaux (GM) (zones numérotées 8, 10 et 12) correspondent aux valeurs de résistivité les plus faibles. La résistivité apparente ici mesurée permet donc de discriminer les zones « extrêmes » : grande étendue sans mottureaux (i.e., ici la *Belle*) versus les zones à GM.
- Toutefois, il n'y a pas de correspondance univoque entre une valeur (ou une gamme de valeurs) de résistivité et une zone caractérisée par des mottureaux. Les zones à petits mottureaux (PM) (zones 2, 4 et 6 sur la figure 6b) possèdent des valeurs de résistivités différentes et parfois comparables aux zones sans mottureaux peu étendues (zones 3, 5 et 7 sur la figure 6b). Ce constat est également confirmé sur le profil P1\_Z3 (Figure 6a). Autrement dit la résistivité électrique du sol mesurée suivant cette configuration ne permet pas de discriminer systématiquement les zones à mottureaux des zones sans mottureaux.

### 3.1.2 Tomographies de résistivité électrique

Les sections des valeurs de résistivité inversées appelées tomographies de la résistivité électrique (TRE) acquises dans la zone 2 sont données sur les Figures 7a et 7b. La Figure 7a et la Figure 7b correspondent respectivement à la TRE acquise avec l'espacement inter-électrode de 1m et à la TRE avec l'espacement inter-électrode de 0.2m. On rappelle que les deux TRE ont été obtenues avec un dispositif de 48 électrodes disposées sur la même ligne. Les positions relatives des deux TRE sont indiquées sur la Figure 8 avec la même échelle de résistivité.

La Figure 7a montre une structure très simple : un bicouche (deux couches superposées). La formation de surface est relativement homogène et très conductrice avec des valeurs de résistivité interprétée inférieures à 15 ohm.m (couleurs froides). Cette couche de deux mètres d'épaisseur environ correspond à un sol argileux i.e., le « bri » du marais poitevin. La deuxième formation sous-jacente est plus résistante électriquement et pourrait coïncider au toit altéré d'une formation calcaire.

Comparativement à la Figure 7a, la Figure 7b s'intéresse à des formations plus superficielles suivant un niveau de résolution plus élevé. La Figure 7b montre également un bicouche. La formation de surface d'environ 0.4 m de profondeur est associée à des valeurs de résistivité supérieures à 25 ohm.m (couleurs chaudes). Elle correspond à un sol insaturé (l'adjectif désaturé peut être aussi utilisé) i.e., dont la porosité est occupée partiellement par de l'air. Ce sol insaturé ou désaturé ne peut être visible sur la Figure 7a car la distance inter-électrodes utilisée par le dispositif (1m) est plus grande que l'épaisseur du sol insaturé (environ 0.4m). La formation sous-jacente possède des valeurs de résistivité beaucoup plus faibles, inférieures à 15 ohm.m, et se montre très homogène (peu de variations verticales et horizontales de résistivité). Cette couche correspond au sol argileux, i.e., au bri, de la Figure 7a.

La synthèse des deux TRE présentée sur la Figure 8 permet alors de proposer une organisation verticale du sous-sol de la zone 2 en trois couches :

- de 0 à 0.4 m environ, une couche de sol insaturé.
- de 0.4 à 2m environ, la couche de bri probablement saturé.
- de 2 à plus de 8m, une formation probablement calcaire (du fait du contexte géologique) plus ou moins altérée.



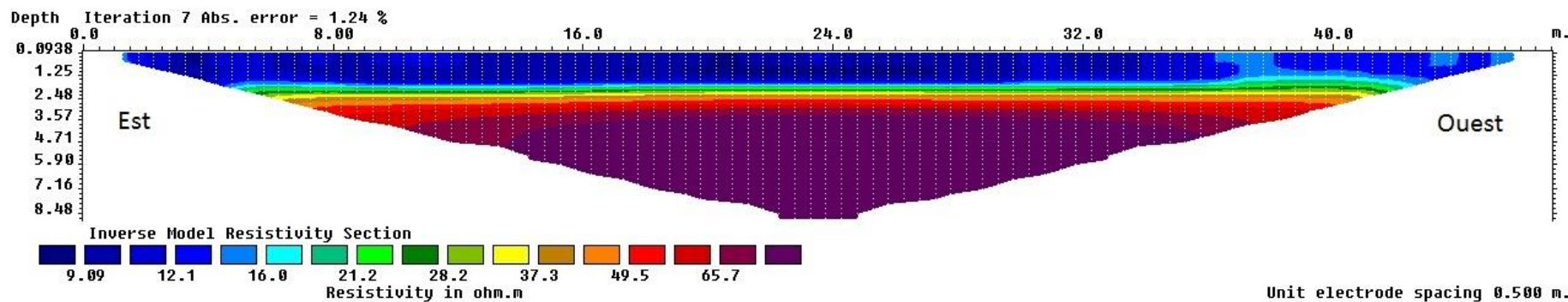


Figure 7a : Tomographie de la résistivité électrique (TRE\_1m\_Z2) acquise dans la zone 2 (sans mottureaux) avec un dispositif Wenner-Schlumberger de 48 électrodes et une distance inter-électrodes de 1m.

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).

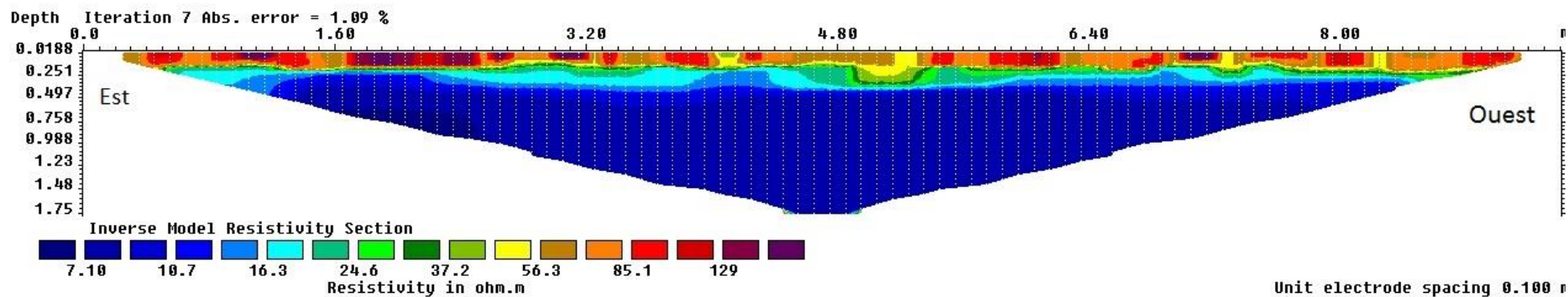


Figure 7b : Tomographie de la résistivité électrique (TRE\_0,2m\_Z2) acquise dans la zone 2 (sans mottureaux) avec un dispositif Wenner-Schlumberger de 48 électrodes et une distance inter-électrodes de 0,2m.

L'« electrode spacing » de 0.1 m indiqué sur la figure correspond à la taille des cellules utilisées pour l'inversion (option « use model refinement » du logiciel Res2DInv).

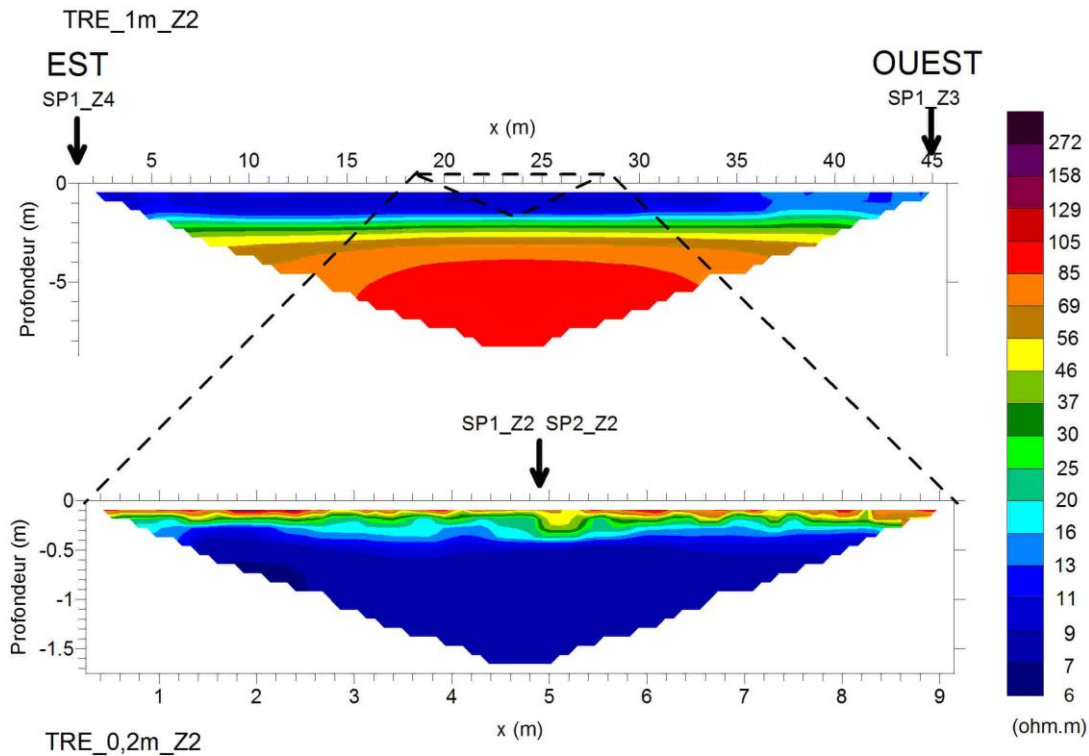


Figure 8 : Représentation synthétique des deux tomographies de résistivité électrique *TRE\_1m\_Z2* (distance inter-électrodes de 1m) et *TRE\_0,2m\_Z2* (distance inter-électrodes de 0,2m) avec la même échelle de résistivité (Zone 2, sans mottureaux). Les positions des sondages pénétrométriques sont aussi indiquées.

### 3.1.2 Profils de résistance de pointe

Les pénétrogrammes issus des quatre sondages pénétrométriques réalisés sur la zone 2 (voir positions relatives sur la Figure 8) présentent les caractéristiques suivantes :

- de 0 à 20 cm, la résistance de pointe varie fortement d'un sondage à l'autre. La couche traversée correspond à la « croûte » sèche à la surface du sol.
- de 20 à 70-80 cm (suivant les sondages), la résistance de pointe varie peu avec la profondeur. Elle présente des valeurs comprises entre 2 et 4 MPa qui correspondent à une argile ferme à raide suivant la classification proposée par Langton (1999). Selon le profil de teneur en eau présenté plus loin (Figure 10), cette argile est dans un état solide (teneur en eau inférieure à la limite de plasticité) (voir profil de teneur en eau en 3.1.3).
- de 70-80 cm à 1.50-1.70 cm (suivant les sondages), la résistance de pointe diminue avec la profondeur pour atteindre un minimum compris entre 0.2 et 0.3 MPa à environ 150-170 cm. Cette dernière gamme de résistance correspond à une argile très molle suivant la classification de Langton (1999). Cet intervalle coïncide à l'état liquide du bri (voir profil de teneur en eau en 3.1.3).
- de 1,50-1.70 cm à 2m environ, la résistance de pointe augmente pour atteindre un pic correspondant à l'interface supposée bri/calcaire altérée mise en évidence par la *TRE\_1m\_Z2* (Figures 7a, 8 et 9).

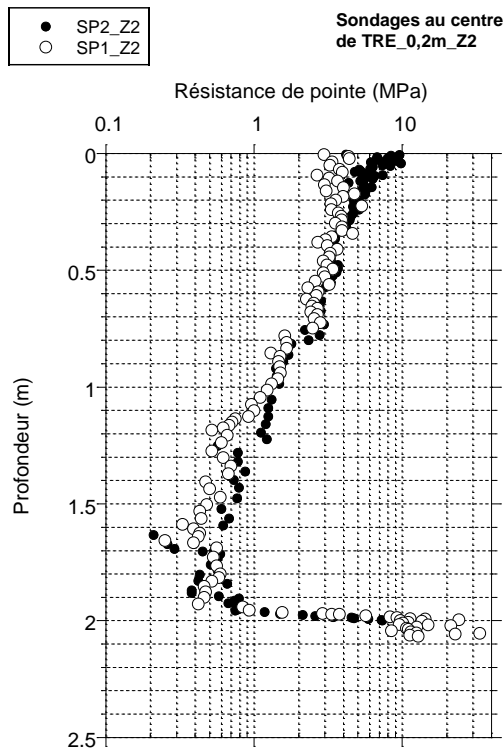


Figure 9a : Pénétrogrammes des sondages réalisés au centre de la TRE\_0,2m\_Z2 (Figure 8).

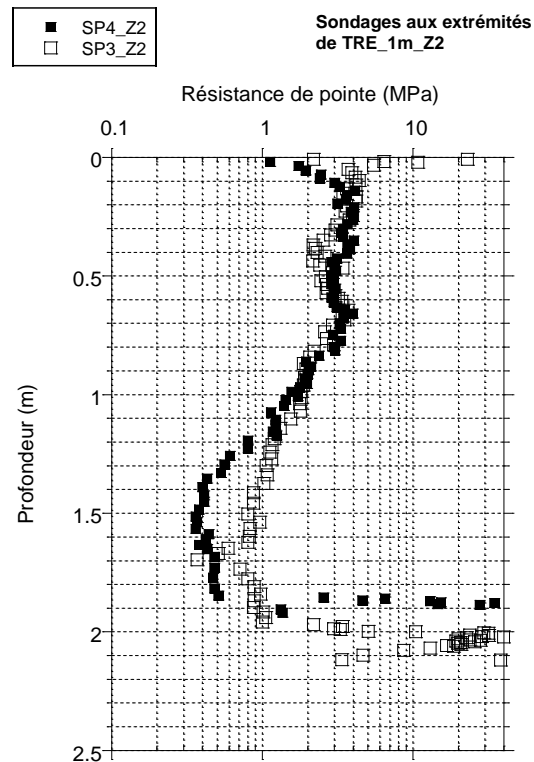


Figure 9b : Pénétrogrammes des sondages réalisés aux extrémités de la TRE\_1m\_Z2 (Figure 8).

### 3.1.3 Profil de teneur en eau massique

Les échantillons ont été prélevés à  $x=23$  m et à  $x=1$  m sur la TRE\_1m\_Z2. La couche de surface possède une teneur en eau de 16.6% à 23m et de 20% à 1m (Figure 10). Elle augmente progressivement avec la profondeur pour atteindre une valeur maximum de 71.8% pour le sondage à 23m, supérieure à la limite de liquidité de 70% estimée sur le site. La tendance est la même pour le profil à 1 m mais avec des teneurs en eau supérieures. Cette évolution permet de constater que le bri devient plastique à partir de 120 cm pour évoluer vers un état liquide à environ 170cm. Au-delà de 170cm, la teneur en eau diminue pour atteindre la valeur de 27.8% à 230cm de profondeur (Figure 10). A partir de 180 cm le matériau contient beaucoup de graviers de calcaire et de silex mélangés au bri. Il est beaucoup plus compact et contient moins d'eau. A partir 220-230 cm il n'est plus possible de creuser à la tarière car le matériau est trop dur.

Il est intéressant de noter que la profondeur de 120 cm caractérisant la transition état solide/état plastique correspond aussi sensiblement à la valeur caractéristique de résistance de pointe de 1 MPa traduisant la transition argile molle/argile très molle (Figures 9a et 9b).



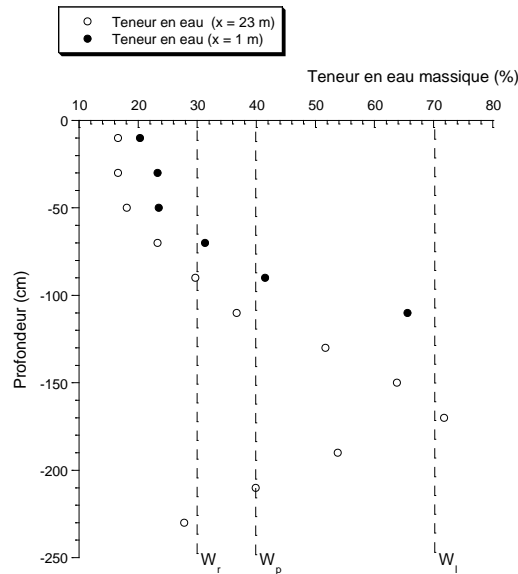


Figure 10 : Profil de teneur des sols de la zone 2.  
 $W_r$  : limite de retrait ;  $W_p$  : limite de plasticité ;  $w_l$  : limite de liquidité.

### 3.1.1 Profils de CE 1/5 et salinité équivalente

Les échantillons ont été prélevés à  $x=23$  m sur la TRE\_1m\_Z2. La couche de surface possède une CE 1/5 de 210 à 230  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (Figure 11). Elle augmente à environ 400-450  $\mu\text{S}/\text{cm}$  jusqu'à 180-200 cm et augmente ensuite à environ 1000  $\mu\text{S}/\text{cm}$ . Dans la dernière couche la valeur élevée peut être liée à la présence de fragments de calcaire dont une partie a pu se dissoudre dans l'eau.

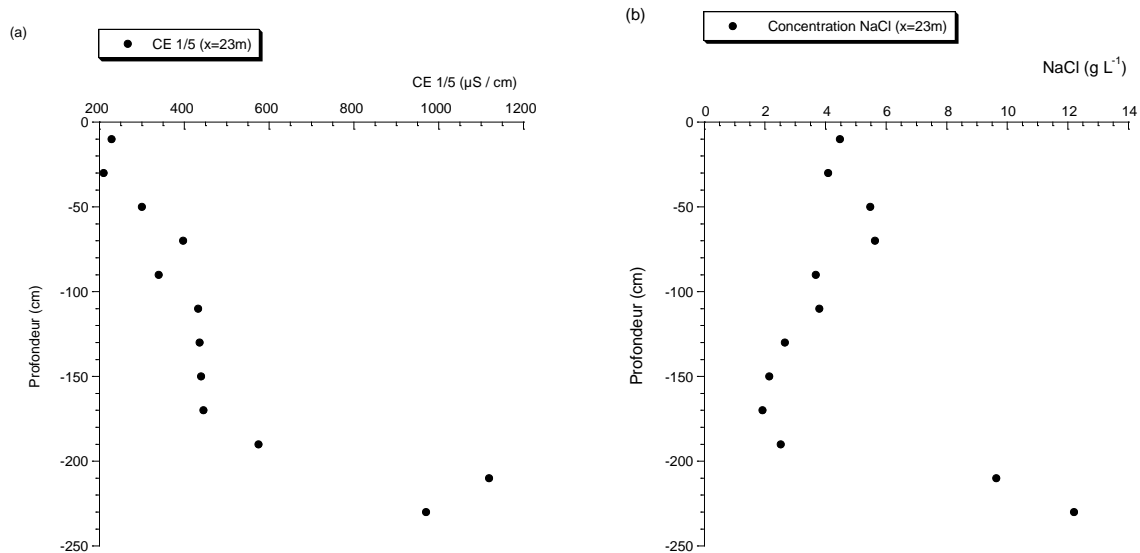


Figure 11 : Profil de CE au 1/5 (a) et teneur équivalente en NaCl du sol de la zone 2 (b)

Les concentrations équivalentes en NaCl la zone 2 sont comprises entre 1,91 et 5,63  $\text{g L}^{-1}$  jusqu'à une profondeur de 2 m et augmentent entre 9,64 et 12,20  $\text{g L}^{-1}$  pour les deux derniers échantillons au contact des graviers et du calcaire altéré (Figure 11b). Les mesures des sels solubles sur les échantillons prélevés en 2021 (Annexe 1) indiquent que dans cette zone les sels solubles contiennent majoritairement du  $\text{Ca}^{2+}$ .

et du  $Mg^{2+}$ . La proportion de  $Na^+$  augmente à 1,20 m mais celui-ci reste minoritaire. L'eau présente dans cette zone est de l'eau douce. La forte proportion de Ca et Mg est reliée à la présence de calcaire à faible profondeur (~2-2,20 m) et la présence de cailloux calcaires dans le profil. La présence de magnésium pourrait être reliée à la nature du calcaire présent, le potassium peut provenir de l'altération des minéraux argileux de la famille des illites qui sont très présents dans ces sols (Caner et Cosenza, 2022).

### 3.2 Zones 1 et 4 : zones à gros mottureaux

On rappelle que la zone 1 et la zone 4 situées respectivement au nord et au sud du Communal en position topographique intermédiaire présentent de nombreux gros mottureaux (GM) de forme polygonale de 35 à 55 cm de hauteur et de 1 à 1,5 m de diagonale (Caner et Cosenza, 2021).

#### 3.2.1 Profilage électrique à large maille

La figure 12 présente les résultats d'un profilage électrique d'une longueur de 550 m orienté Nord-Ouest/Sud-Est suivant un pas d'échantillonnage de 10 m, réalisé dans la zone 1 (Figure 1). Chaque pas a fait l'objet d'au moins deux mesures distantes de quelques décimètres afin d'estimer la variabilité locale de la résistivité apparente. Les mesures ont été réalisées en évitant de placer une électrode sur un sommet d'un mottureau afin d'éviter toute correction topographique.

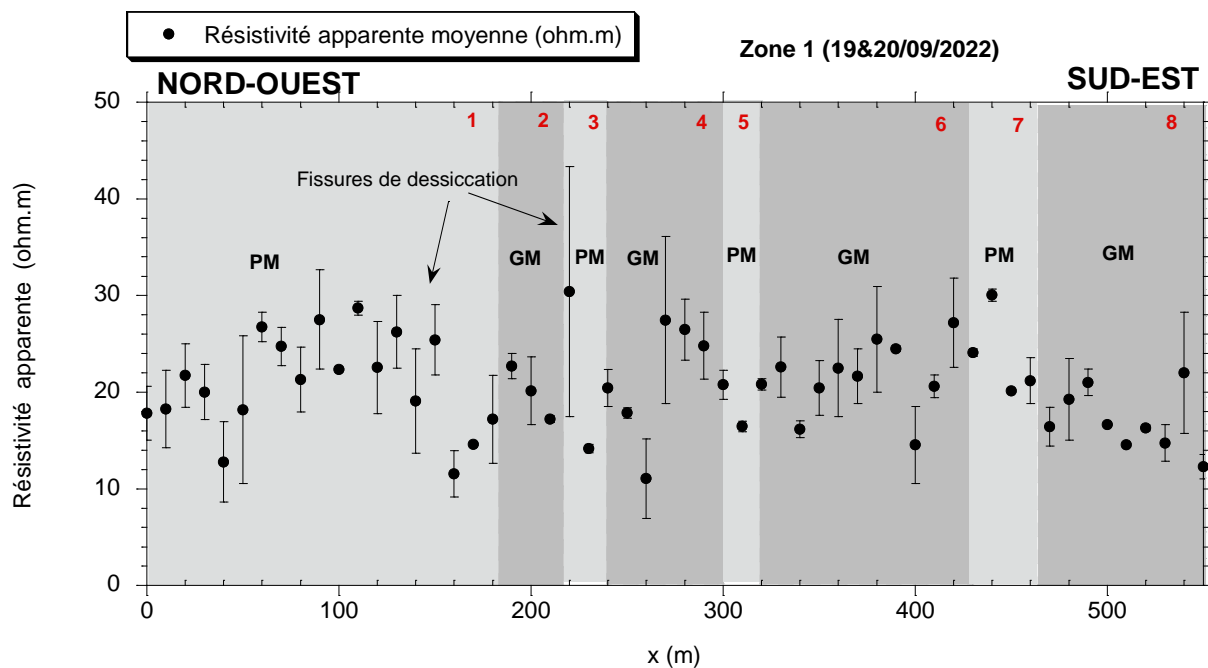


Figure 12 : Profil électrique de longueur égale à 550 m et de pas de 10m acquis dans la zone 1. PM (zone gris clair): présence prépondérante de petits mottureaux (typiquement inférieurs à 20 cm) GM (zone gris foncé) : présence prépondérante de gros mottureaux (typiquement supérieurs à 40 cm) Les nombres en rouge sont utilisés pour faciliter la description du profil dans le texte.

La Figure 12 permet de formuler les commentaires suivants :

- Au regard de l'objectif initial visé par la réalisation de ces profilages, aucun gradient horizontal significatif de résistivité et donc de salinité dans la direction Nord-Ouest/Sud-Est n'est observé dans cette zone.
- Les fortes variabilités spatiales de la résistivité électrique sont principalement associées à des zones où de grandes fissures/fentes de dessiccation (voire de « crevasses ») d'ouverture pluricentimétrique ont été observées.

- La mesure de la résistivité apparente dans la configuration utilisée dans l'étude ne permet pas de discriminer les zones à petits mottureaux (bandes 1,3, 5 et 7) des zones à grands mottureaux (bandes 2, 4, 6 et 8).

La figure 13 présente les résultats d'un profilage électrique d'une longueur de 480 m orienté Nord/Sud suivant un pas d'échantillonnage de 5 m et réalisé dans la zone 4 (Figure 1). Chaque pas a fait l'objet d'une unique mesure en évitant autant que possible de placer une électrode sur le sommet d'un mottureau pour éviter toute correction topographique.

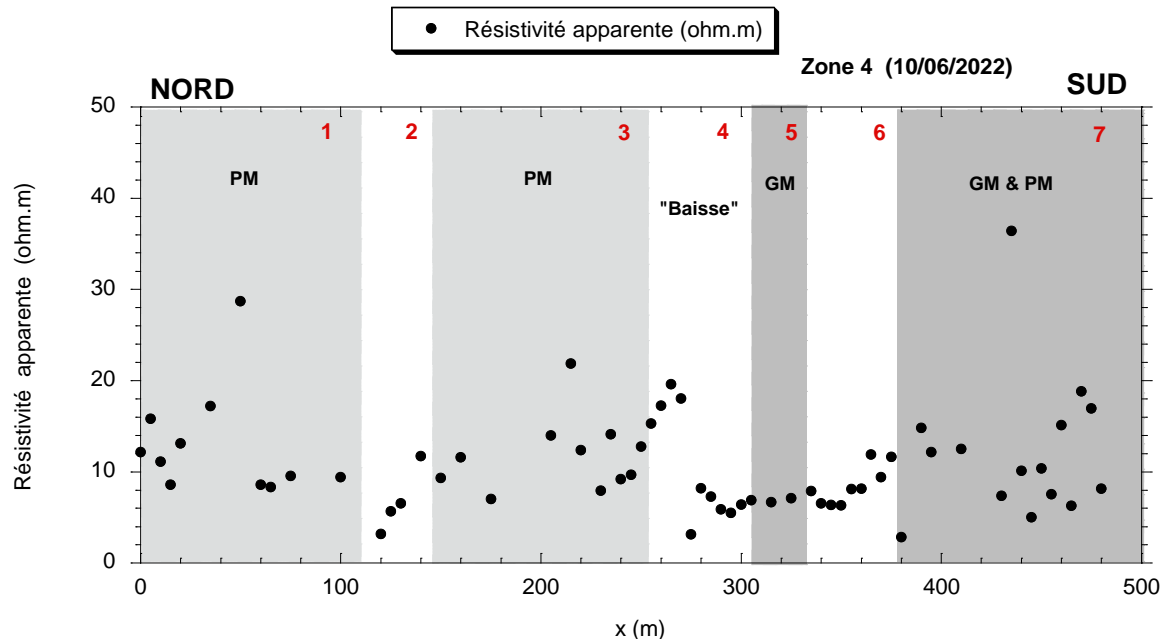


Figure 13 : Profil électrique de longueur égale à 480 m et de pas de 5 m acquis dans la zone 4.  
 PM (zone gris clair): présence prépondérante de petits mottureaux (typiquement inférieurs à 20 cm)  
 GM (zone gris foncé) : présence prépondérante de gros mottureaux (typiquement supérieurs à 40 cm)  
 Les nombres en rouge sont utilisés pour faciliter la description du profil dans le texte.

La Figure 13 permet de formuler les commentaires suivants :

- Au regard de l'objectif initial visé par la réalisation de ces profilages, aucun gradient horizontal significatif de résistivité et donc de salinité dans la direction Nord/Sud n'est observé dans cette zone.
- La mesure de la résistivité apparente dans la configuration utilisée dans l'étude ne permet pas de discriminer les zones à petits mottureaux (bandes 1 et 3) des zones à grands mottureaux (bandes 5 et 7).
- Toutefois, cette propriété physique semble permettre de discriminer, au moins en partie, les zones de *Baisse* (bandes 2,4 et 6) des zones à mottureaux. Les zones de *Baisse* montrent généralement des valeurs de résistivité plus basses que celles mesurées dans les zones à mottureaux.
- Les zones à grands mottureaux présentent ici des valeurs de résistivité plus basses (typiquement comprises entre 2 et 18 ohm.m) comparativement aux valeurs obtenues dans les zones à grands mottureaux de la zone 1 (résistivités typiquement comprises entre 11 et 30 ohm.m, voir Figure 13). Cette différence n'est pas nécessairement due à une différence de salinité des sols entre les zones 1 et 4. Elle peut être aussi associée à une plus forte désaturation (i.e., perte en eau) des sols de la zone 1 dont les mesures ont été acquises les 19 et 20 septembre après une longue période de sécheresse.

### 3.2.2 Tomographies de résistivité électrique

Les TRE acquises dans la zone 4 sont données sur les Figures 14a et 14b. La Figure 14a et la Figure 14b correspondent respectivement à la TRE acquise avec l'espacement inter-électrode de 1m et à la TRE avec l'espacement inter-électrode de 0,2m. On rappelle que les deux TRE ont été obtenues avec un dispositif de 48 électrodes disposées sur la même ligne. Les positions relatives des deux TRE sont indiquées sur la Figure 15 avec la même échelle de résistivité interprétée.

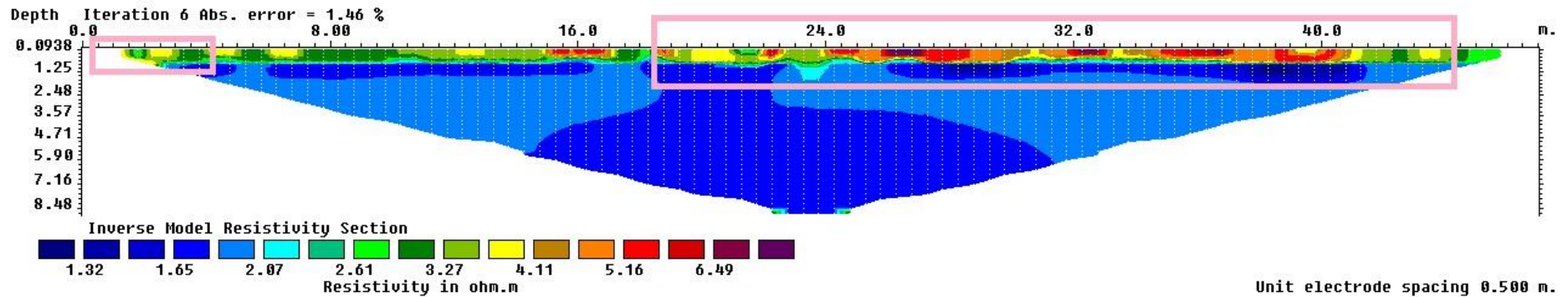


Figure 14a : Tomographie de la résistivité électrique (TRE\_1m\_Z4) acquise dans la zone 4 (zone de grands mottureaux) avec un dispositif Wenner-Schlumberger de 48 électrodes et une distance inter-électrodes de 1m. Les zones encadrées en rose indiquent la présence de gros mottureaux en surface. L' « electrode spacing » de 0.5 m indiquée sur la figure correspond à la taille des cellules utilisées pour l'inversion (option « use model refinement » du logiciel Res2DInv).

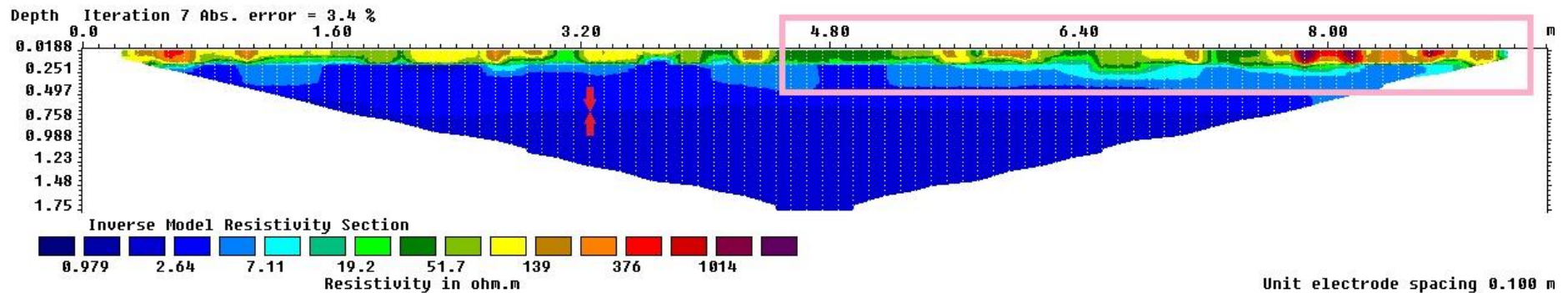


Figure 14b : Tomographie de la résistivité électrique (TRE\_0,2m\_Z4) acquise dans la zone 4 (zone de grands mottureaux) avec un dispositif Wenner-Schlumberger de 48 électrodes et une distance inter-électrodes de 0,2m. La zone encadrée en rose indique la présence de gros mottureaux en surface. Les deux flèches rouges verticales montrent la présence d'une interface horizontale à une profondeur d'environ 60/70 cm. L' « electrode spacing » de 0.1 m indiquée sur la figure correspond à la taille des cellules utilisées pour l'inversion (option « use model refinement » du logiciel Res2DInv).

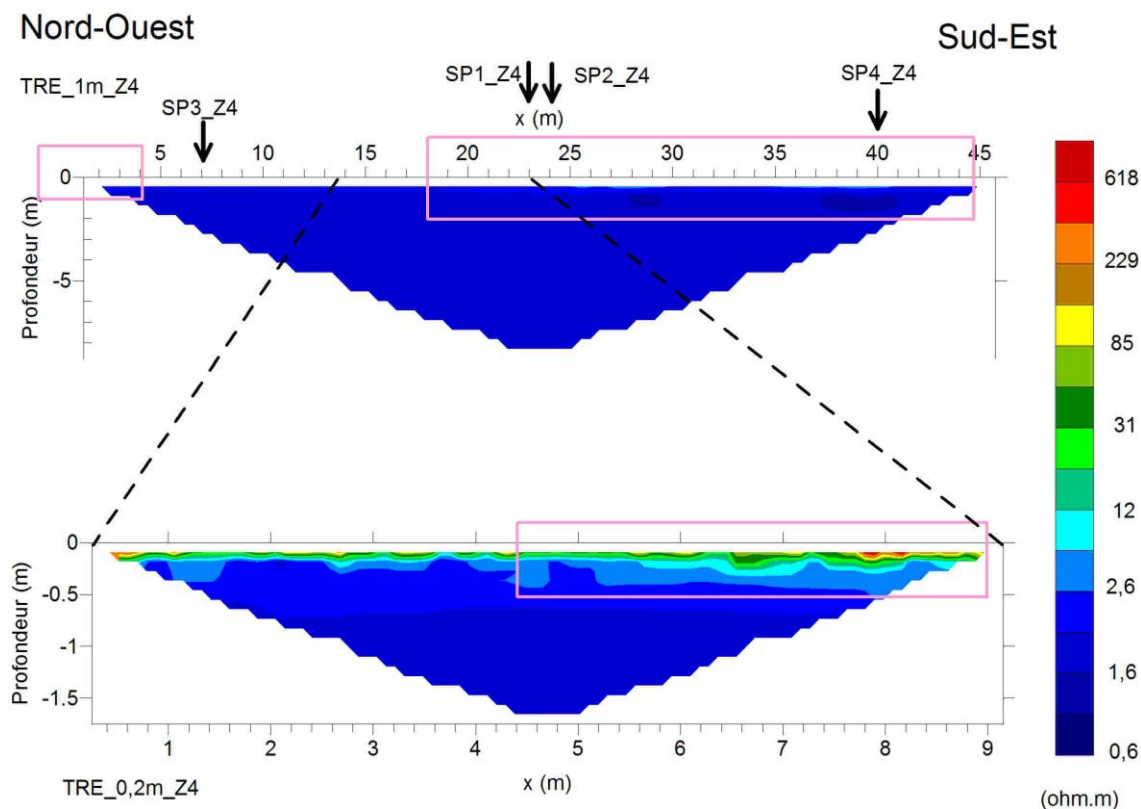


Figure 15 : Représentation synthétique des deux tomographies de résistivité électrique  $TRE_{1m\_Z4}$  (distance inter-électrodes de 1m) et  $TRE_{0,2m\_Z4}$  (distance inter-électrodes de 0,2m) avec la même échelle de résistivité (Zone 4 avec grands mottureaux). Les zones encadrées en rose indiquent la présence de gros mottureaux en surface. Les positions des sondages pénétrométriques sont aussi données.

La Figure 14a montre grossièrement un bicouche constitué de deux formations conductrices (résistivité maximum de 11 ohm.m). La formation de surface (couleurs chaudes), la plus hétérogène, d'épaisseur inférieure à 1m, est plus résistante que la formation sous-jacente (couleurs froides). Il est intéressant de noter que les zones de gros mottureaux observées en surface correspondent aux zones de plus fortes résistivités dans la formation de surface. Cette observation est cohérente avec les résultats du profilage électrique acquis dans la même zone 4 qui montrait des résistivités apparentes plus faibles dans les *Baisses* que dans les zones à gros mottureaux (Figure 13). Cette différence pourrait être expliquée par deux situations : (a) les sols des gros mottureaux seraient plus désaturés (i.e., moins remplis d'eau) que les sols sans mottureaux et/ou (b) les sols des gros mottureaux seraient moins salés que les sols sans mottureaux.

Comparativement à la Figure 14a, la Figure 14b s'intéresse à des formations plus superficielles suivant un niveau de résolution plus élevé. La Figure 14b montre un tricouche (superposition de trois couches). La formation de surface d'environ 0.3-0.4 m de profondeur est associée à des valeurs élevées de résistivité pouvant atteindre plusieurs centaines d'ohm.m (couleurs chaudes). Elle correspond à un sol insaturé (ou dit désaturé) i.e., dont la porosité est occupée partiellement par de l'air et de l'eau. Comme dans la Figure 14a, les zones de gros mottureaux présentent globalement des résistivités plus élevées. Sous cette première formation désaturée, une deuxième couche de profondeur 0.6-0.7 m (voir flèches rouges sur la Figure 14b) présente des valeurs de résistivité plus faibles comprises entre 2.6 et 7.1 ohm.m. Cette couche et la précédente correspondent à la couche la plus superficielle de la Figure 14a. Enfin, la troisième couche, la plus profonde, présente des valeurs résistivités beaucoup plus faibles (inférieurs à 2.6 ohm.m).

La comparaison des deux TRE permet alors de proposer une organisation verticale du sous-sol de la zone 4 en trois couches :

- de 0 à 0.4 m environ, une couche de sol (bri) insaturé.
- de 0,4 à 0.6-0.7 m environ, une couche de bri de transition.
- de 0.6-0.7 à plus de 8m, une couche de bri saturé plus salé (ou plus riche en minéraux argileux) que la couche de bri sus-jacente.

### 3.2.2 Profils de résistance de pointe

Les pénétrogrammes issus des quatre sondages pénétrométriques réalisés sur la zone 4 (voir positions relatives sur la Figure 16) présentent les caractéristiques suivantes :

- de 0 à 30-40 cm, la résistance de pointe varie fortement d'un sondage à l'autre. La couche traversée correspond à la « croûte » sèche à la surface du sol.
- de 30-40 cm à 60-90 cm (suivant les sondages), la résistance de pointe varie peu avec la profondeur. Elle présente des valeurs comprises entre 2 et 4 MPa qui correspondent à une argile ferme à raide suivant la classification proposée par Langton (1999). On note que la limite inférieure (mur) de cette couche coïncide avec l'interface du « bri » saturé mise en évidence dans la précédente TRE\_0,2m\_Z4 (Figure 14b et 15).
- de 60-90 cm à 1,50/1.70 m, la résistance de pointe diminue avec la profondeur pour atteindre un minimum compris entre 0.2 et 0.9 MPa. Cette gamme de valeurs correspond à une argile très molle suivant la classification de Langton (1999). A la profondeur d'environ 1.20m, la résistance diminue en deçà de la valeur caractéristique de 1 MPa définissant la limite argile molle/argile très molle (Langton, 1999).
- de 1,50/1.70 m à 3m, la résistance de pointe se stabilise grossièrement à des valeurs légèrement inférieures à 1 MPa.

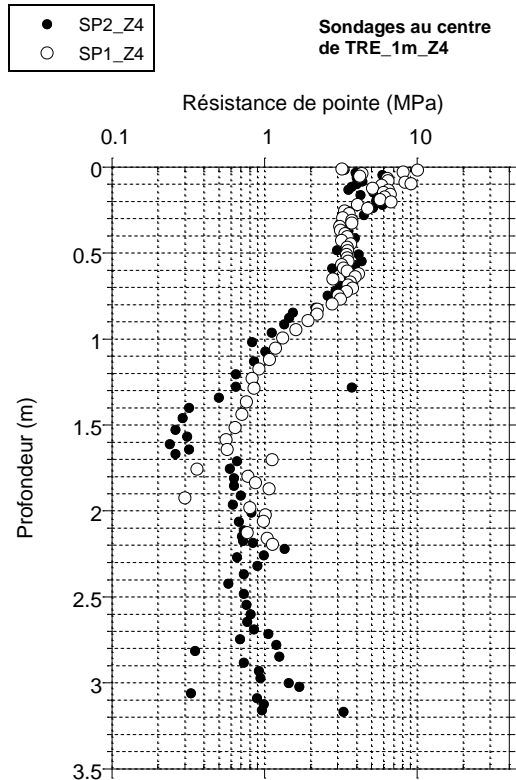


Figure 16a : Pénétrogrammes des sondages réalisés au centre de la TRE\_1m\_Z4 (positions indiquées en Figure 15).

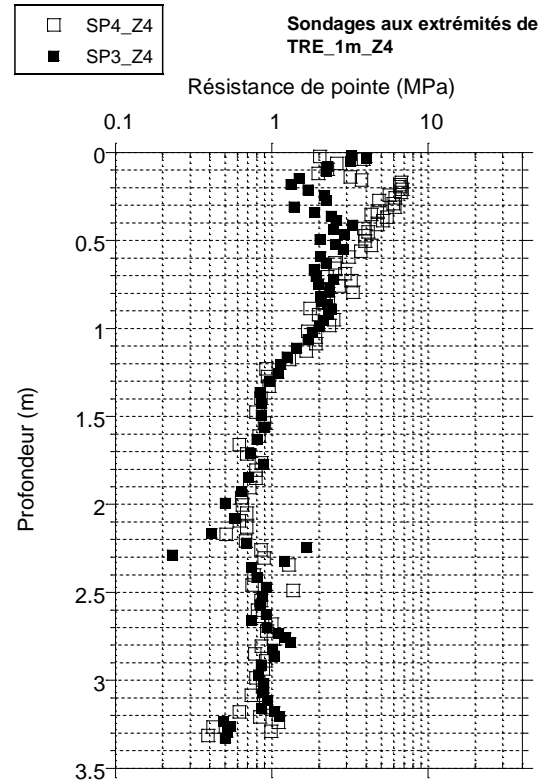


Figure 16b : Pénétrogrammes des sondages réalisés aux extrémités de la TRE\_1m\_Z4 (positions indiquées en Figure 15).

### 3.2.3 Profil de teneur en eau massique

Trois profils de teneur en eau ont été réalisés en  $x=7\text{m}$  (en bas d'un mottureau),  $x=23\text{m}$  (en bas d'un mottureau) et  $x=40\text{m}$  (en haut d'un mottureau) (abscisse référencée selon la TRE\_1m\_Z4 ; Figures 14a et 15).

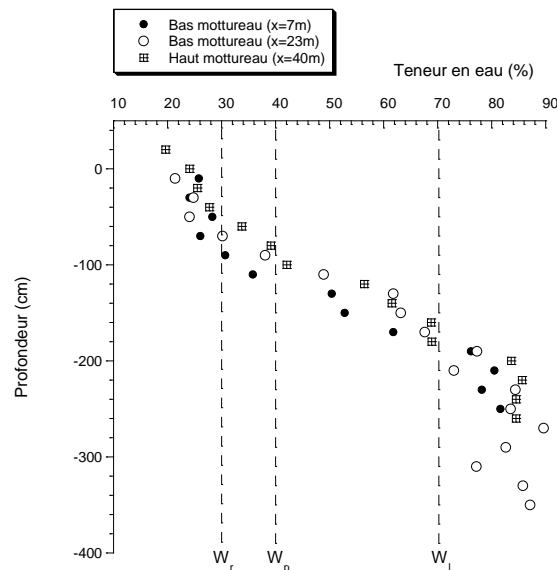


Figure 17 : Profil de teneur des sols de la zone 4.

$W_r$  : limite de retrait ;  $W_p$  : limite de plasticité ;  $w_l$  : limite de liquidité.

La couche de surface possède une teneur en eau comprise entre 19,6% (haut mottureau en  $x=0\text{m}$ ) et 25,8% (bas mottureau en  $x=23\text{m}$ ). La teneur en eau augmente progressivement avec la profondeur pour atteindre des valeurs élevées : 81,6% (bas mottureau en  $x=7\text{m}$ ), 87,1% (bas mottureau en  $x=23\text{m}$ ) et 86,6% (haut mottureau en  $x=40\text{m}$ ). Ces valeurs sont supérieures à la limite de liquidité de 70% estimée sur le site. Cette évolution permet de constater que le bri devient plastique à partir de 100-120 cm pour évoluer vers un état liquide à partir d'environ 180cm. A partir de 180cm, le sol apparait alors dans un état liquide sur une épaisseur importante de 170cm. Contrairement à la zone 2, la teneur en eau reste à des valeurs élevées sans diminuer avec la profondeur jusqu'à 350 cm.

### 3.2.4 Profils de CE 1/5

La couche de surface possède une CE comprise entre 247  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (haut mottureau en  $x=40\text{m}$ ) et 637  $\mu\text{S}/\text{cm}$  (bas mottureau en  $x=7\text{m}$ ). Elle augmente progressivement entre 600 et 700  $\mu\text{S}/\text{cm}$  de 0,3 à 0,5 m de profondeur et ensuite à environ 900-1100  $\mu\text{S}/\text{cm}$  jusqu'à 1,10 m (Figure 18). Ensuite elle augmente brusquement jusqu'à environ 2800  $\mu\text{S}/\text{cm}$  jusqu'à 1,70 m. Entre 1,70 m et 3,50 m les valeurs fluctuent entre 3500 et 5130  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

Dans la zone 4 avec des gros mottureaux les concentrations équivalentes en NaCl sont comprises entre 3,98 et 23,06  $\text{g L}^{-1}$  pour la majorité des points (Figure 18b). Pour le point échantillonné en haut de mottureau à la position  $x = 40\text{ m}$  les teneurs en NaCl sont d'environ 32  $\text{g L}^{-1}$  à 80 et 200 cm de profondeur. La croûte de surface présente les concentrations en NaCl les plus faibles. Les hauts de mottureaux présentent des concentrations plus faibles que les bas de mottureaux mais à partir de 50 cm de profondeur cette tendance s'inverse et les 'racines' des mottureaux apparaissent plus salées que les zones entre les mottureaux jusqu'à une profondeur de -140 cm (Figure 33C). Ceci avait déjà été observé lors de l'étude de 2021 (Caner et Cosenza, 2022). Pour des profondeurs supérieures à 140 cm les valeurs sont dispersées mais avec une tendance globale d'augmentation des concentrations jusqu'à des valeurs comprises entre 21 et 23  $\text{g L}^{-1}$  entre 310 et 350 cm de profondeur.



Les mesures des sels solubles indiquent que le sodium est minoritaire en surface et qu'il est le cation majoritaire à 1,20 m de profondeur et que la concentration en sels soluble augmente également en profondeur (Annexe 1). L'eau superficielle de cette zone est de l'eau douce mais à partir de 60 cm celle-ci évolue vers de l'eau saumâtre.

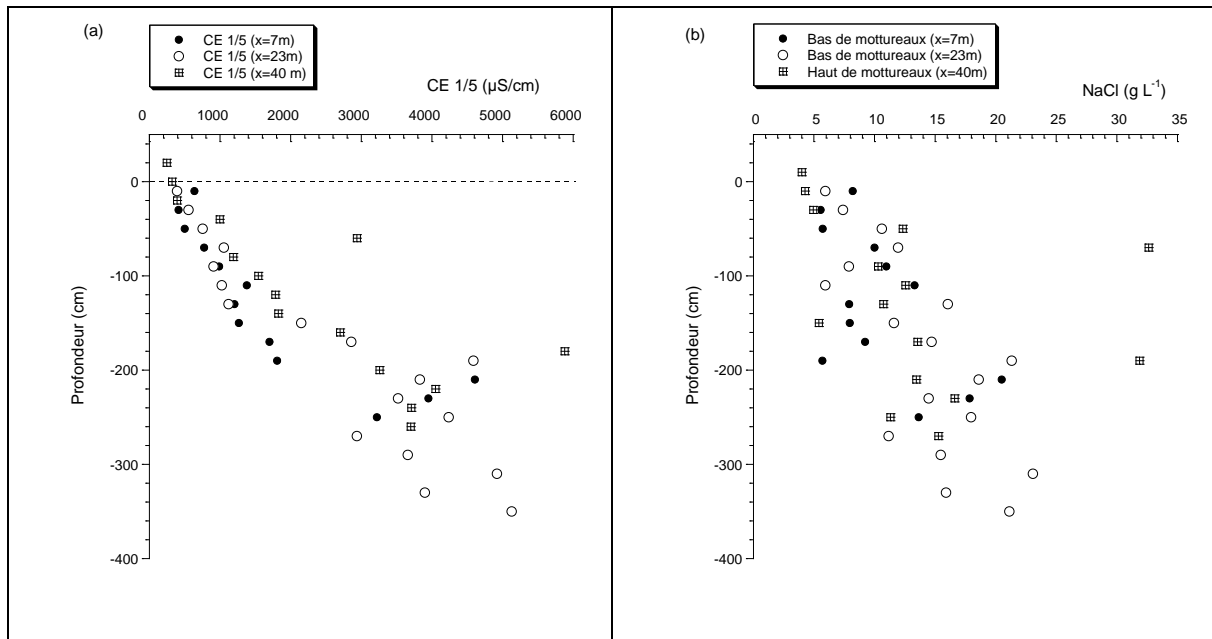


Figure 18 : Profil de CE au 1/5 (a) et concentration équivalente en NaCl (b) des sols de la zone 4

### 3.2.5 Synthèse

La comparaison des TRE, des sondages pénétrométriques et des profils de teneur en eau permet alors de proposer une organisation verticale du sous-sol de la zone 4 en trois couches :

- de 0 à 0.4 m environ, une couche de sol désaturé dans laquelle les valeurs de résistance de pointe sont les plus élevées. Cette couche correspond à la « croûte » sèche à la surface du sol.
- de 0,4 à 0.6-0.7 m environ, une couche de bri possédant les caractéristiques mécaniques d'une argile ferme à raide (état solide suivant les limites d'Atterberg). Elle apparaît être une couche de transition entre la formation sus-jacente partiellement désaturée et raide et la couche sous-jacente riche en argile très molle.
- de 0.6-0.7 à plus de 8m, une couche de « bri » saturé probablement plus salé que la couche de bri sus-jacente, présentant principalement les caractéristiques mécaniques d'une argile molle à très molle. La transition argile molle/argile très molle se situe à la profondeur de 1,2m et correspond à la transition état solide/état plastique suivant les limites d'Atterberg

## 3.3 Zone 3 : zone à petits mottureaux

On rappelle que la zone 3 se situe dans une *Baisse*, au Nord du marais (Figure 1). Elle comprend notamment la *Baisse* de l'Achenal. Les mottureaux situés dans le fond de ce chenal sont petits et mesurent entre 12 et 20 cm de hauteur (Caner et Cosenza, 2021).

### 3.3.1 Tomographies de résistivité électrique

Deux TRE ont été acquises dans la zone 3.

La TRE référencée TRE\_1m\_Z3 correspond à un dispositif de 48 électrodes distantes de 1m suivant une configuration Wenner-Schlumberger. Ce dispositif a été installé suivant une direction Nord-Sud perpendiculairement à l'axe du chenal. Le dispositif comprenait du Nord au Sud :

- une zone de mottureaux de taille moyenne (entre 20 et 30 cm de hauteur) en périphérie du chenal (Figure 16a) ;
- une zone du chenal sans mottureaux (Figure 19b) ;
- une zone de petits mottureaux au centre du chenal (Figure 19b) ;
- une zone du chenal sans mottureaux d'extension plus réduite.

La TRE référencée TRE\_0,2m\_Z3 correspond à un dispositif de 48 électrodes distantes de 0.2 m suivant une configuration Wenner-Schlumberger. Ce dispositif a été installé dans le chenal suivant une direction Nord-Sud perpendiculairement à l'axe de ce dernier. Le dispositif comprenait du Nord au Sud (Figure 19c) :

- une zone du chenal sans mottureaux ;
- une zone de petits mottureaux au centre du chenal.

On rappelle que les deux TRE ont été acquises sur une même ligne.



Figure 19a : Extrait du grand dispositif d'acquisition de la TRE\_1m\_Z3 (extrémité Nord dans la zone de mottureaux en périphérie du chenal).



Figure 19b : Extrait du grand dispositif d'acquisition de la TRE\_1m\_Z3. Au premier plan : zone sans mottureaux dans le chenal. A l'arrière-plan (trait rouge) : zone de petits mottureaux dans le chenal.



Figure 19c : Petit dispositif d'acquisition de la TRE\_0,2m\_Z3 (distance inter-électrodes de 20 cm). Au premier plan : zone sans mottureaux dans le chenal. Au second plan (trait rouge) : zone de petits mottureaux dans le chenal.

La TRE\_1m\_Z3 montre depuis la surface jusqu'à 9 m de profondeur les caractéristiques suivantes (Figure 20a et Figure 21) :

- La couche de surface dans les deux zones à mottureaux d'épaisseur estimée à 0.5m présente des valeurs de résistivité significativement plus élevées que dans les sols affleurant des deux zones sans mottureaux (intervalle  $x \in [14-26]$  m et pour  $x > 41$  m). Cette différence s'explique par l'effet d'une perte en eau (dessiccation) plus marqué dans les sols à mottureaux que dans les sols affleurant sans mottureaux.
- De la profondeur de 0.5m à 3m environ, on retrouve globalement sur toute la section (sauf autour de la zone en  $x=24$ m) une formation conductrice (couleurs froides) de résistivité inférieure à 6 ohm.m. Cette formation correspond au bri saturé qui ne présente pas de différence significative de résistivité entre les zones à mottureaux et les zones sans mottureaux.
- De 3m à 9m environ, une couche plus résistante (couleurs chaudes) et relativement homogène présentant des résistivités plus élevées, supérieures à 20 ohm.m, que celles du bri saturé sus-jacent. Cette formation pourrait coïncider à une formation argileuse riche en éléments grossiers (graviers calcaires) ou une formation calcaire altérée.
- La section indique également une anomalie résistante en  $x=24$  m (flèche jaune sur la figure) dont l'origine n'a pas été identifiée (ancien remblai, curage du chenal ?).

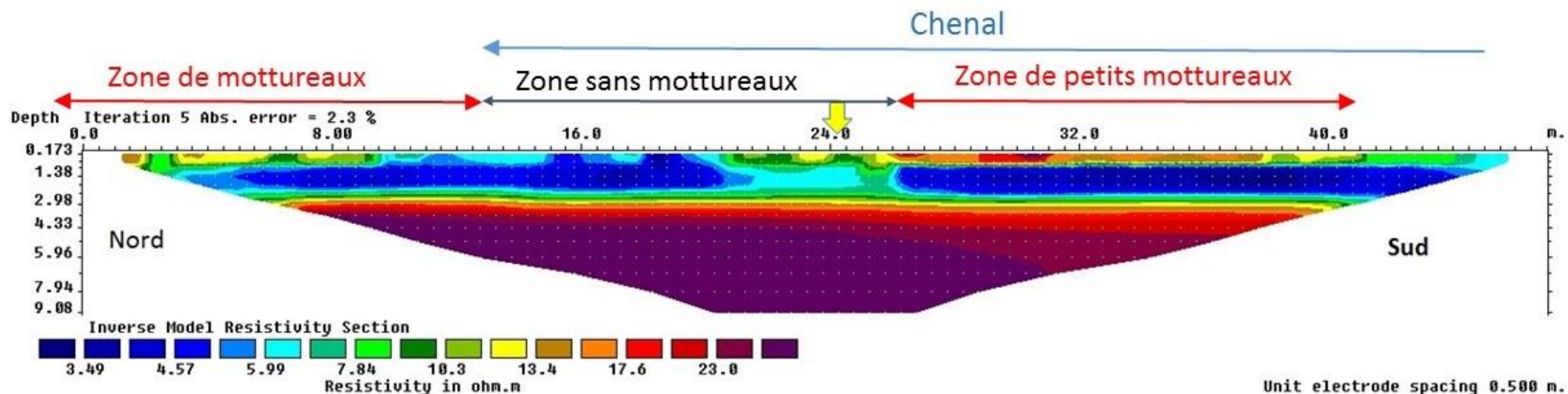


Figure 20a : Tomographie de la résistivité électrique (TRE\_1m\_Z3) acquise dans la zone 3 (zone du chenal avec de petits mottureaux) avec un dispositif Wenner-Schlumberger de 48 électrodes et une distance inter-électrodes de 1m. Les positions des zones à mottureaux sont indiquées. La flèche jaune verticale à  $x=24m$  montre une anomalie résistante d'origine inconnue.

L' « electrode spacing » de 0.5 m indiquée sur la figure correspond à la taille des cellules utilisées pour l'inversion (option « use model refinement » du logiciel Res2DInv).

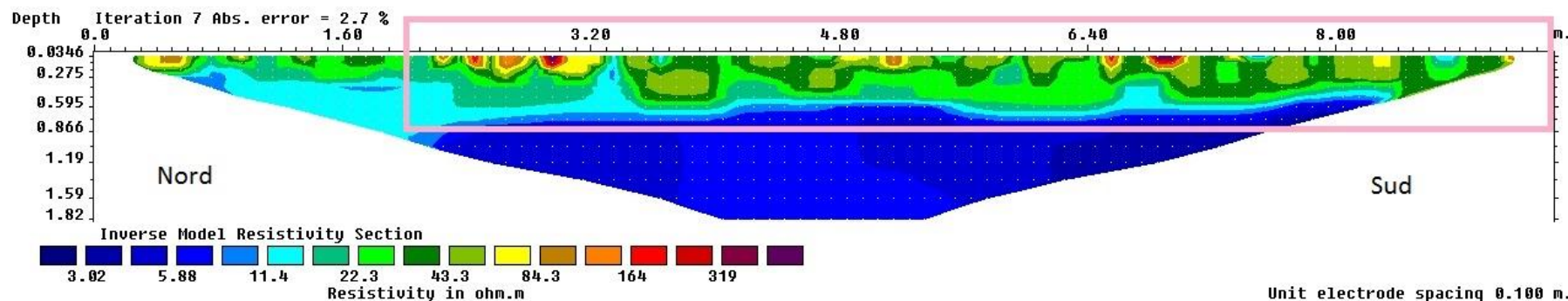


Figure 20b : Tomographie de la résistivité électrique (TRE\_0,2m\_Z3) acquise dans la zone 3 (zone du chenal avec de petits mottureaux) avec un dispositif Wenner-Schlumberger de 48 électrodes et une distance inter-électrodes de 0,2m. La zone encadrée en rose indique la présence de petits mottureaux en surface dans le chenal.

L' « electrode spacing » de 0.1 m indiqué sur la figure correspond à la taille des cellules utilisées pour l'inversion (option « use model refinement » du logiciel Res2DInv).



La TRE\_0,2m\_Z3 montre depuis la surface jusqu'à 1,8 m de profondeur les caractéristiques suivantes (Figure 20b et Figure 21) :

- Dans la zone à petits mottureaux, on retrouve la couche de surface d'épaisseur 0,7-0,8m correspondant à un sol argileux probablement désaturé.
- Dans la partie Nord ( $x < 2m$ ) de la section, l'anomalie résistante observée sur TRE\_1m\_Z3 est confirmée.
- La couche sous-jacente à des profondeurs supérieures à 0,7m correspondant au bri saturé est également retrouvée.

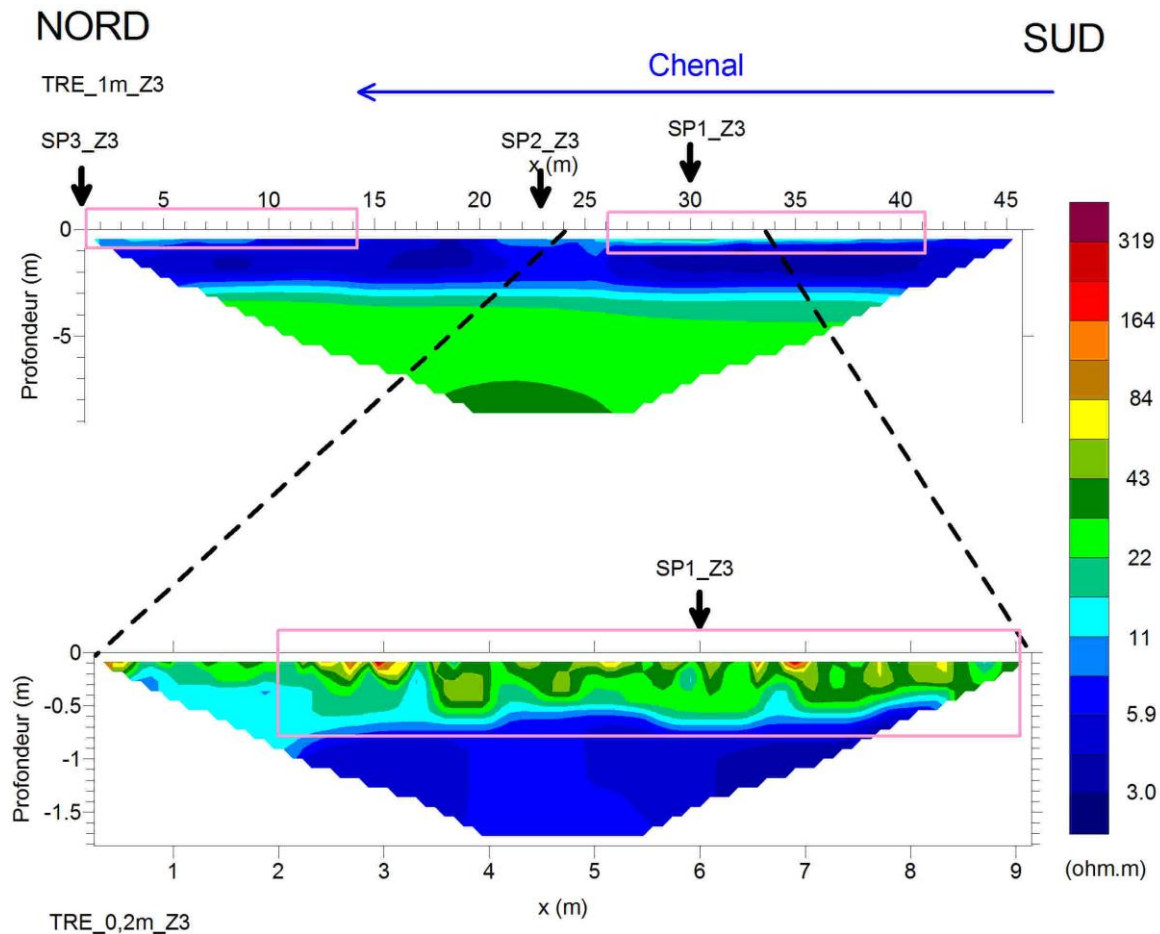


Figure 21 : Représentation synthétique des deux tomographies de résistivité électrique TRE\_1m\_Z3 (distance inter-électrodes de 1m) et TRE\_0,2m\_Z3 (distance inter-électrodes de 0,2m) avec la même échelle de résistivité (Zone 3 dans l'Achenal avec petits mottureaux). Les zones encadrées en rose indiquent la présence de mottureaux en surface. Les positions des sondages pénétrométriques sont aussi données.

### 3.3.2 Profils de résistance de pointe

Trois sondages pénétrométriques référencées SP3\_Z3, SP2\_Z3 et SP1\_Z3 (Figure 22) ont été réalisés respectivement en  $x=0m$  (sous la zone de mottureaux de taille moyenne en périphérie du chenal),  $x=23m$  (dans la zone sans mottureaux du chenal) et  $x=30m$  (dans la zone sous les petits mottureaux du chenal) (abscisse référencée sur TRE\_1m\_Z3).

Les pénétrogrammes issus des trois sondages présentent les caractéristiques suivantes :

- de 0 à 30-40 cm environ, la résistance de pointe varie fortement d'un sondage à l'autre. La couche traversée correspond à la « croûte » sèche à la surface du sol.
- de 30-40 cm à 80 cm environ, la résistance de pointe varie peu avec la profondeur. Elle présente des valeurs comprises entre 2 et 10 MPa qui correspondent à une argile ferme à raide suivant la classification proposée par Langton (1999). On note que la limite inférieure (mur) de cette couche coïncide avec une interface dans le bri mise en évidence dans la TRE\_0,2m\_Z3 (Figure 20b et 21).
- de 80 cm à 240 cm, la résistance de pointe diminue avec la profondeur pour atteindre un minimum compris entre 0,4 et 0,5 MPa. Cette dernière gamme de résistance correspond à une argile très molle suivant la classification de Langton (1999). On note que dans cette partie du pénétrogramme, le sondage SP2\_Z3 réalisé dans la partie du chenal sans mottureaux (Figure 17) présente des valeurs de résistance de pointe supérieures à 1 MPa sur une épaisseur de 50 cm (voir flèche rose sur la Figure 18) c'est-à-dire une épaisseur d'argile très molle plus faible que SP1\_Z3 et SP3\_Z3. A contrario, le sondage SP3\_Z3 réalisé sous les plus gros mottureaux de la zone montre une épaisseur d'argile très molle la plus importante.
- de 240 à 300 cm, la résistance de pointe augmente pour atteindre un pic de 4 MPa entre 260 et 280 cm de profondeur. Ce pic correspond à l'interface identifiée à la profondeur d'environ 3m dans TRE\_1m\_Z3 (Figures 20a et 21).

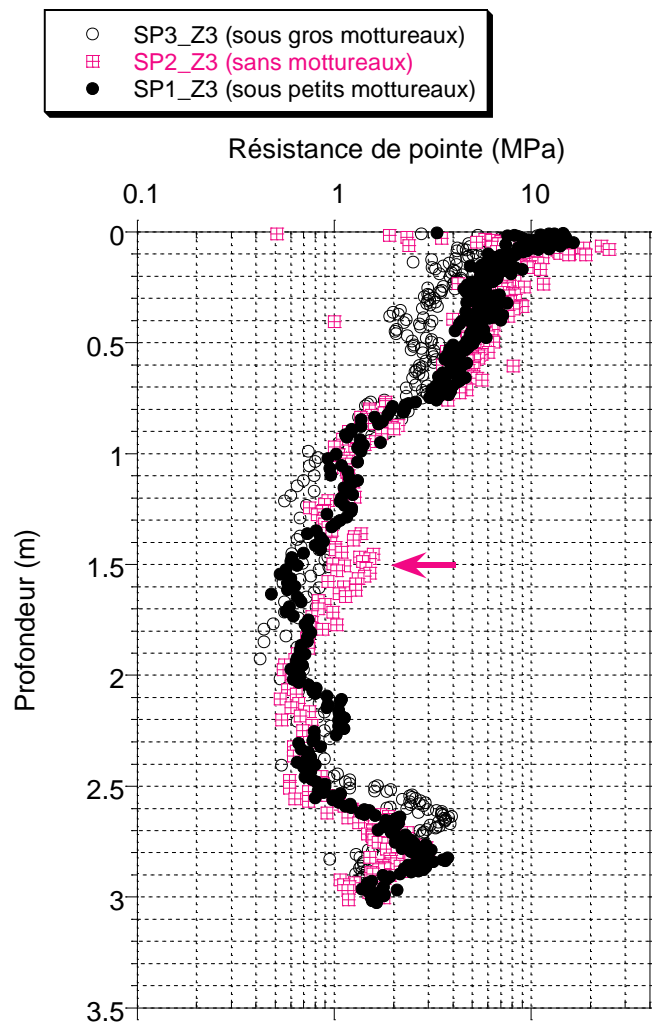


Figure 22 : Pénétrogrammes des sondages réalisés dans la zone 3 (positions indiquées en Figure 21). La flèche rose indique une zone de résistance de pointe plus élevée (supérieure à 1 MPa) du pénétrogramme SP2\_Z3 (sans mottureaux) qui n'existe pas dans les autres pénétrogrammes.

### 3.3.3 Profil de teneur en eau massique

Deux profils de teneur en eau ont été réalisés en  $x=0m$  en bas et en haut d'un mottureau moyen (Figure 23a). Deux autres profils ont été effectués en  $x=23m$  et  $x=30m$  en bas d'un petit mottureau (Figure 23b) (abscisse référencée selon la TRE\_1m\_Z3 ; Figures 20a et 21).

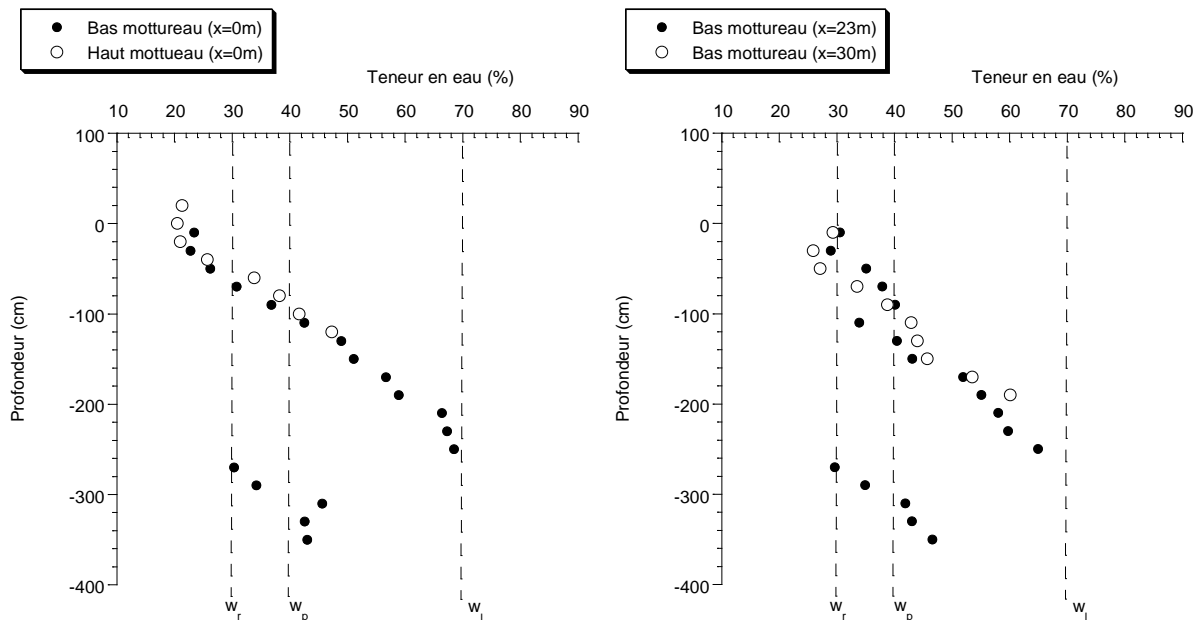


Figure 23a : Profils de teneur des sols de la zone 3 en  $x=0m$ .  $W_r$  : limite de retrait ;  $W_p$  : limite de plasticité ;  $w_l$  : limite de liquidité.

Figure 23b : Profils de teneur des sols de la zone 3 en  $x=23$  et  $30m$ .  $W_r$  : limite de retrait ;  $W_p$  : limite de plasticité ;  $w_l$  : limite de liquidité.

La couche de surface possède une teneur en eau comprise entre 21,3% (haut moyen mottureau en  $x=0m$ ) et 30,5% (bas petit mottureau en  $x=23m$ ). Elle augmente progressivement avec la profondeur pour atteindre des maxima vers 250 cm pour les deux profils les plus longs (maxima compris entre 81,6 et 87,1%). Cette interface à environ 250 cm a été aussi identifiée par TRE\_1m-Z3 et les sondages pénétrométriques.

Toutefois, contrairement aux zones 2 et 4, les valeurs de teneur en eau mesurées sont en deçà à la limite de liquidité de 70% estimée sur le site. A partir de 100-120 cm, profondeur caractéristique que l'on retrouve dans les zones précédentes 2 et 4, le bri demeure plastique. Dans cette zone le bri est plus hétérogène. Nous avons observé deux niveaux organiques noirs respectivement à 140-160 cm et 260-280 cm de profondeur et 350 cm pour la position  $x=0$ . Ces niveaux noirs doivent certainement correspondre à des paléosols à ces profondeurs. Celui à 140-160 cm ne se traduit pas sur des variations de teneur en eau, ce qui n'est pas le cas pour l'horizon à 260-280 cm. Ce dernier est plus compact (probablement moins poreux). Ensuite la teneur en eau augmente progressivement. Dans cette zone les remplissages sont plus hétérogènes certainement à cause des variations du niveau d'eau dans le chenal.

### 3.3.4 Profils de CE 1/5

Les profils de CE 1/5 ont été réalisés aux mêmes positions que les mesures de teneur en eau et présentés Figure 24. La couche de surface possède une CE comprise entre 346  $\mu S/cm$  (bas mottureau en  $x=0m$ ) et 503  $\mu S/cm$  (bas mottureau en  $x=23m$ ). Les valeurs sont hétérogènes pour les sondages à  $x=0m$  jusqu'à une profondeur de 2m pour le bas de mottureau (de 296 à 430  $\mu S/cm$ ) et 1,20 m pour le haut de mottureau (243 à 406  $\mu S/cm$ ). A partir de 2m de profondeur les valeurs augmentent mais restent hétérogènes. Les niveaux brun-noirs de paléosols présentent des CE plus faibles que les niveaux supérieurs et inférieurs (328  $\mu S/cm$  à 170 cm profondeur, 428  $\mu S/cm$  à 270 cm de profondeur, 237  $\mu S/cm$  à 350 cm de profondeur).

Pour la position  $x=23\text{m}$  les valeurs sont comprises entre 503 et 627  $\mu\text{S}/\text{cm}$  jusqu'à une profondeur de 50 cm, ensuite elles augmentent jusqu'à 1000-1200  $\mu\text{S}/\text{cm}$  pour les profondeurs comprises entre 50 et 130 cm. Les valeurs diminuent entre 130 à 190 cm (873  $\mu\text{S}/\text{cm}$  à -190 cm), augmentent à 2210  $\mu\text{S}/\text{cm}$  à -230 cm puis diminuent à nouveau à des valeurs comprises entre 460 et 762  $\mu\text{S}/\text{cm}$  entre 270 et 350 cm de profondeur.

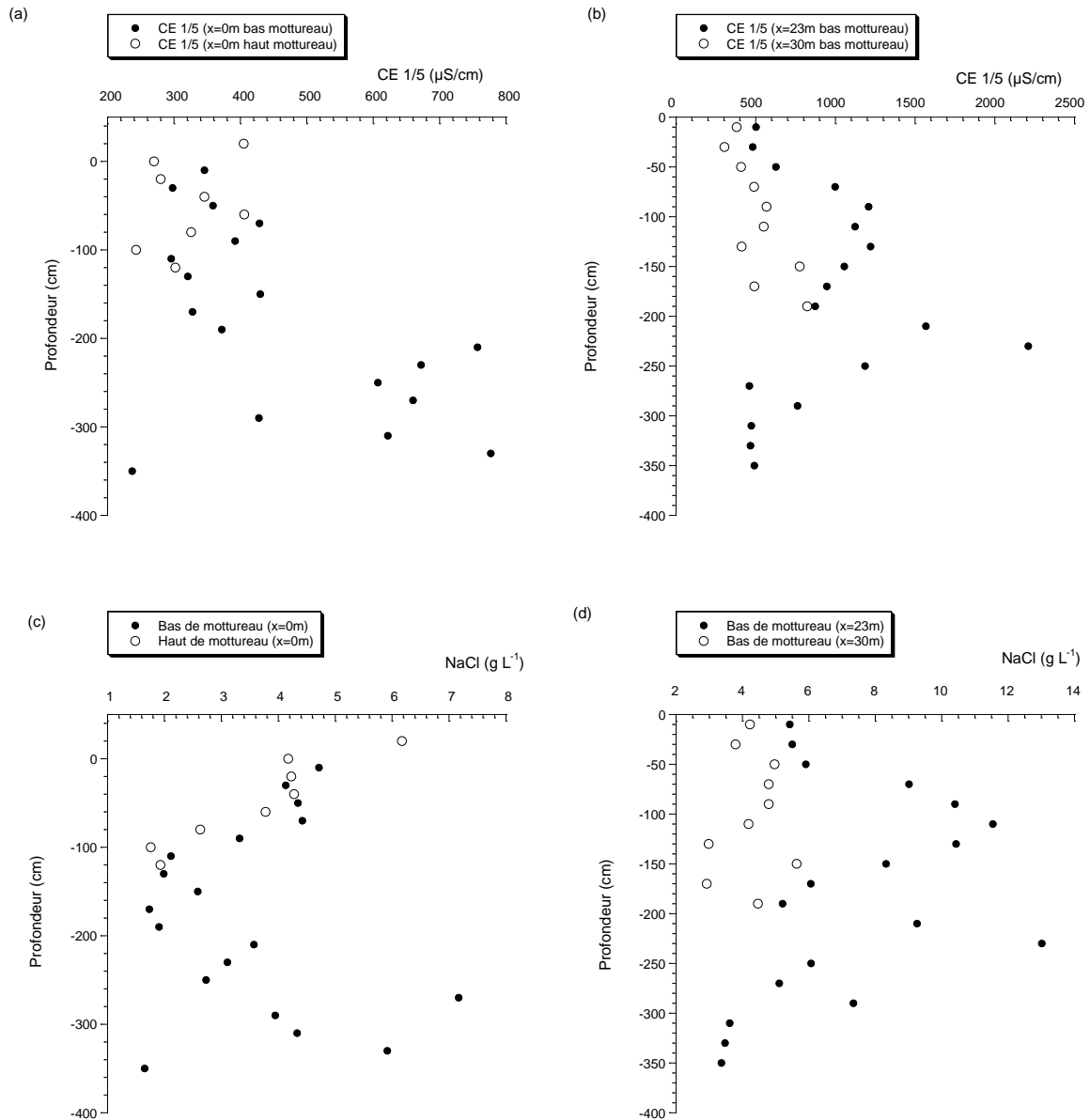


Figure 24 : profil de CE au 1/5(a, b) et salinité équivalent (c, d) des sols de la zone 3

Pour les points de prélèvements à  $x=0\text{m}$  et  $x=30\text{m}$  de la zone 3 les concentrations équivalentes en NaCl sont comprises entre 4 et 6  $\text{g L}^{-1}$  jusqu'à une profondeur de 1 m et elles diminuent jusqu'à environ 2-3  $\text{g L}^{-1}$  jusqu'à 2 m de profondeur et ensuite sont distribuées de façon hétérogène jusqu'à 3,50 m de profondeur (Figure 24 c, d). Les niveaux de paléosol (-160 cm et -250 cm) sont marqués par une augmentation de la concentration équivalente en NaCl. Ceci peut être lié au fait qu'elles sont plus compactes et avec une teneur en eau plus. Le profil échantillonné à  $x = 23\text{m}$  présente une augmentation de la concentration en NaCl entre 50 cm et 110 cm de profondeur (11,54  $\text{g L}^{-1}$ ), elle diminue ensuite jusqu'à 1,90 m de profondeur (5,21  $\text{g L}^{-1}$ ) réaugmente à 230 cm de profondeur (13,02  $\text{g L}^{-1}$ ) et diminue



ensuite jusqu'à 3,50 m de profondeur. Ce point d'échantillonnage en zone intermédiaire de la pente de la baisse pourrait correspondre aux zones mésohygrophiles plus salées décrites sur les pentes des baisses. La détermination des sels solubles indique que les cations majoritaires sont  $Mg^{2+}$ ,  $K^+$  et  $Na^+$  dans la zone à mottureaux (Annexe 1). La concentration en sels solubles est multipliée par 4 entre la surface et 1,20 m de profondeur. La proportion de Na tend à diminuer à 1,20 m. Dans cette zone également l'eau présente est de l'eau douce. Dans la zone de référence située mi-pente les concentrations en sels solubles sont plus importantes et la proportion de sodium est plus importante (37-58 % des sels solubles).

### 3.4 Zone 5 : zone à mottureaux en boule

La zone 5 se situant l'ouest du Communal possède des mottureaux mesurant entre 15 et 35 cm de haut, en forme de « boules » (Caner et Cosenza, 2021) (Figure 1).

#### 3.4.1 Profilage électrique à large maille

Un profil électrique orienté Nord-Ouest/Sud-Est, de longueur 370 m et d'un pas égal à 10 m a été réalisé à proximité de la zone 5 (Figures 1 et 25). On rappelle que la profondeur d'investigation de la méthode i.e., l'épaisseur de couche de sols concernés est de l'ordre de 40 cm. Chaque pas a fait l'objet d'au moins deux mesures distantes de quelques décimètres afin d'estimer la variabilité dans l'espace de la résistivité apparente. Les mesures ont été réalisées en évitant de placer une électrode sur un sommet d'un mottureau afin d'éviter toute correction topographique.

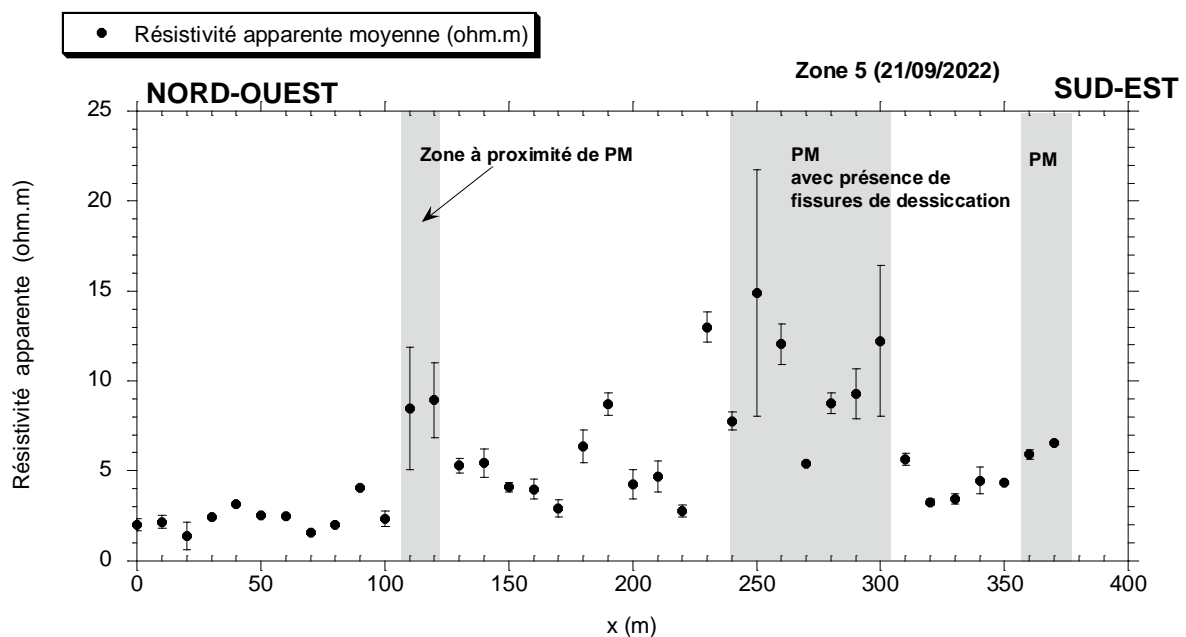


Figure 25 : Profil électrique de longueur égale à 370 m et de pas de 10m acquis à proximité de la zone 5. PM (zone gris clair) : présence de petits mottureaux (typiquement inférieurs à 20 cm)

La Figure 25 permet de formuler les commentaires suivants :

- Au regard de l'objectif initial visé par la réalisation de ce profilage, on observe une légère augmentation générale de la résistivité électrique apparente du Nord-Ouest vers le Sud-Est. Cette tendance générale pourrait être attribuée à un gradient Nord-Ouest/Sud-Est de salinité du sous-sol (si on considère l'argilosité du sous-sol étant sensiblement la même à l'échelle de la zone investiguée).

- Les fortes variabilités spatiales de la résistivité électrique sont principalement associées à des zones où de grandes fissures de dessiccation ont été observées en surface.
- La mesure de la résistivité apparente dans la configuration utilisée dans l'étude semble permettre de discriminer les zones sans mottureaux des zones à petits mottureaux. Les zones sans mottureaux montrent généralement des valeurs de résistivité plus basses que celles mesurées dans les zones à petits mottureaux.

### 3.4.2 Tomographies de résistivité électrique

Les TRE acquises dans la zone 5 (Figure 1) sont données sur les Figures 26a et 26b. La Figure 26a et la Figure 26b correspondent respectivement à la TRE acquise avec une distance inter-électrode de 1m et à la TRE avec une distance inter-électrode de 0,2m. On rappelle que les deux TRE ont été obtenues avec un dispositif de 48 électrodes disposées sur la même ligne. Les positions relatives des deux TRE sont indiquées sur la Figure synthétique 27 avec la même échelle de résistivité.

La TRE\_1m\_Z5 montre depuis la surface jusqu'à 9 m de profondeur les caractéristiques suivantes (Figures 26a et 27) :

- La couche de surface d'environ un mètre d'épaisseur présente les valeurs de résistivité les plus élevées de la section. Toutefois on note une nouvelle fois que la zone de surface sans mottureaux (intervalle  $x \in [0-13]$  m) présente des résistivités plus faibles que celles mesurées sur les zones à mottureaux ( $x > 13$ m). Cette différence s'explique par l'effet d'une perte en eau (dessiccation) plus marqué dans les sols à mottureaux que dans les sols affleurant sans mottureaux.
- De la profondeur d'un mètre à 4m environ, on retrouve globalement sur toute la section une formation conductrice (couleurs froides) de résistivité inférieure à 3 ohm.m. Cette formation correspond au bri saturé qui présente des variations latérales complexes de résistivité.
- De 4m à 9m environ, une couche plus conductrice et plus homogène montre des résistivités de l'ordre de 1 ohm.m. Cette formation correspond au bri saturé, plus salé que le bri sus-jacent.

La TRE\_0.2m\_Z5 montre depuis la surface jusqu'à 1.8 m de profondeur les caractéristiques suivantes (Figures 26b et 27) :

- Une couche de surface de 0.3 m d'épaisseur environ montre les valeurs de résistivité les plus élevées de la section (résistivité supérieure à 25 ohm.m). Cette couche correspond à la « croûte » sèche à la surface du sol.
- De 0.3 à 1.0m environ, une formation de transition qui montre des variations latérales de résistivité. Ses valeurs de résistivité apparaissent plus faibles sous les petits mottureaux que sous la zone de mottureaux en boule. On note que la limite inférieure (mur) de cette couche coïncide avec l'interface dans le bri mise en évidence dans la TRE\_1m\_Z5 (Figure 26a et 27).
- A partir de 1.0m, on devine une formation plus conductrice (résistivité inférieure à 2 ohm.m) et plus homogène.

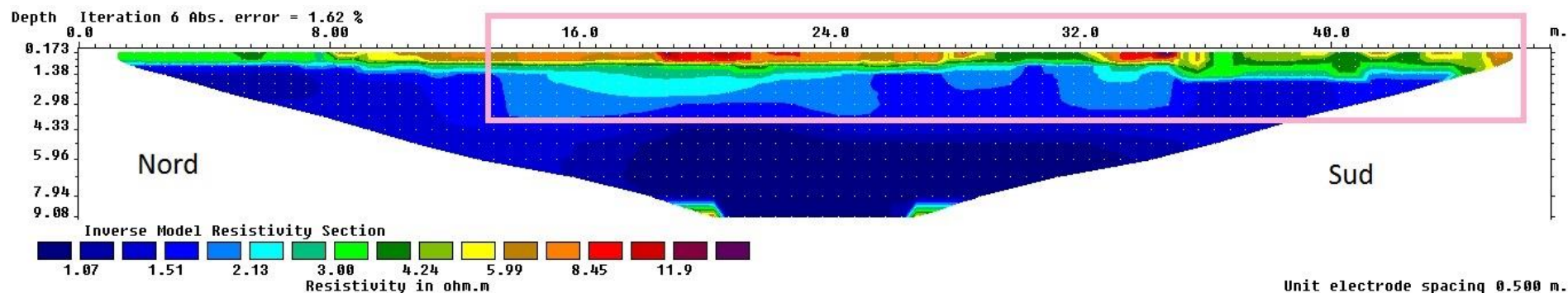


Figure 26a : Tomographie de la résistivité électrique (TRE\_1m\_Z5) acquise dans la zone 5 avec un dispositif Wenner-Schlumberger de 48 électrodes et une distance inter-électrodes de 1m. La zone encadrée en rose indique en surface la présence de mottureaux (petits mottureaux et mottureaux en boule). L' « electrode spacing » de 0.5 m indiquée sur la figure correspond à la taille des cellules utilisées pour l'inversion (option « use model refinement » du logiciel Res2DInv).

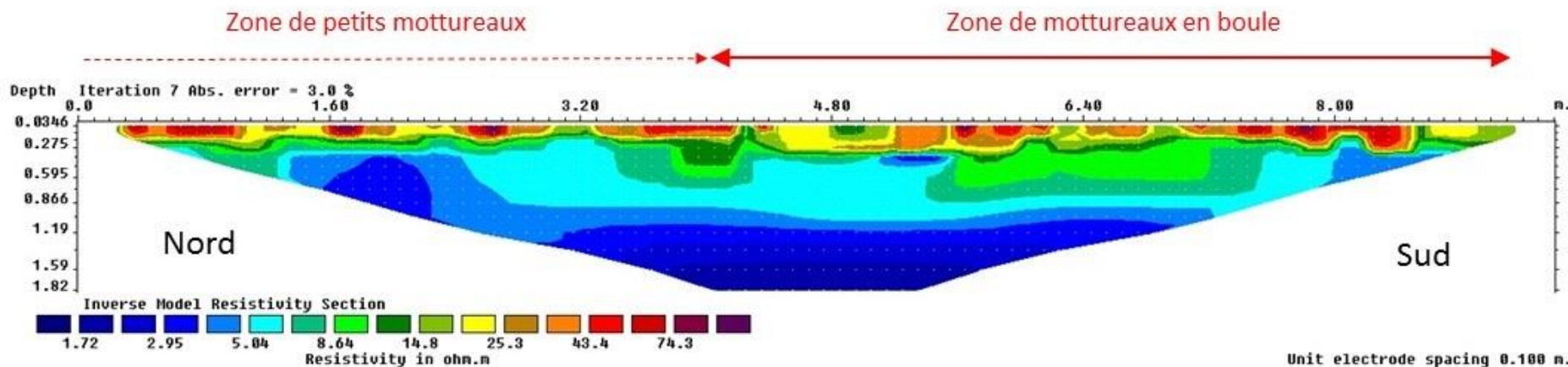


Figure 26b : Tomographie de la résistivité électrique (TRE\_0,2m\_Z5) acquise dans la zone 2 (sans mottureaux) avec un dispositif Wenner-Schlumberger de 48 électrodes et une distance inter-électrodes de 0,2m. On indique la zone à petits mottureaux de la zone à mottureaux en boule. L' « electrode spacing » de 0.1 m indiquée sur la figure correspond à la taille des cellules utilisées pour l'inversion (option « use model refinement » du logiciel Res2DInv).

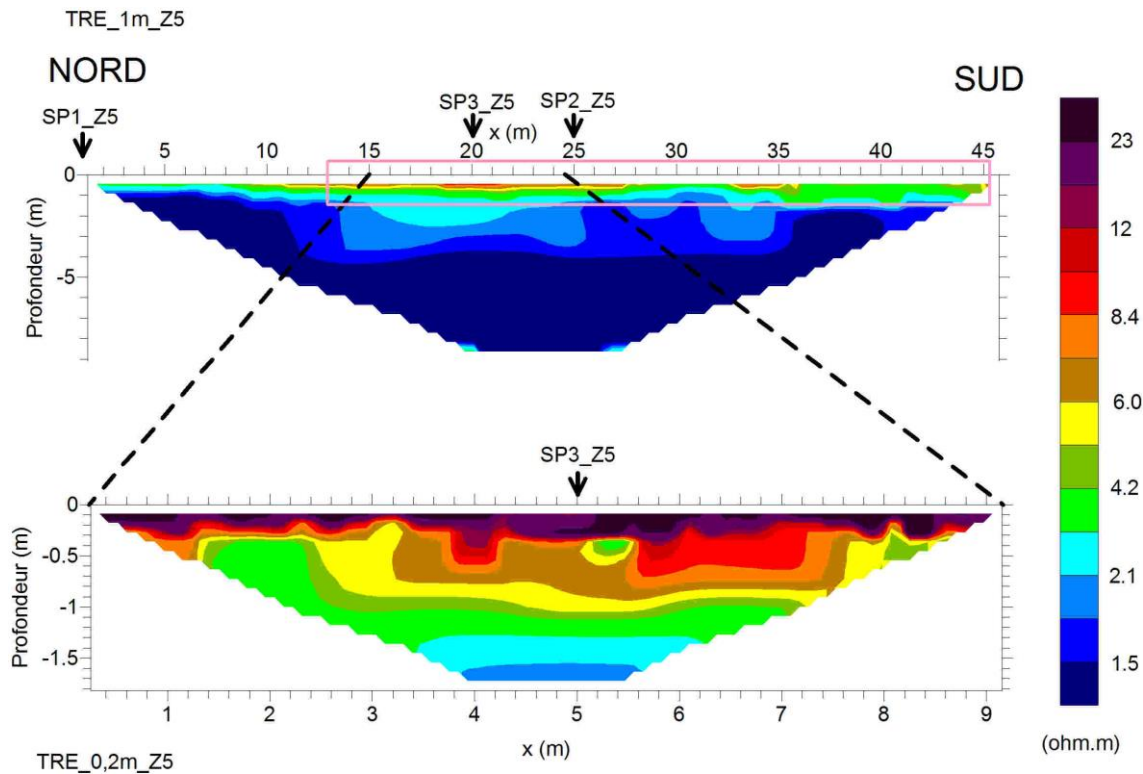


Figure 27 : Représentation synthétique des deux tomographies de résistivité électrique  $TRE_{1m\_Z5}$  (distance inter-électrodes de 1m) et  $TRE_{0,2m\_Z5}$  (distance inter-électrodes de 0,2m) avec la même échelle de résistivité.

La zone encadrée en rose indique en surface la présence de mottureaux (petits mottureaux et mottureaux en boule). Les positions des sondages pénétrométriques sont aussi indiquées.

### 3.4.3 Profils de résistance de pointe

Trois sondages pénétrométriques référencées  $SP1_{Z5}$ ,  $SP2_{Z5}$  et  $SP3_{Z3}$  ont été réalisés respectivement en  $x=0m$  (zone sans mottureaux),  $x=25m$  et  $x=20m$  (zone de mottureaux en boule) (abscisse référencée sur  $TRE_{1m\_Z5}$ ) (Figure 28).

Les pénétrogrammes issus des trois sondages sont donnés sur la Figure 28. En premier lieu, on remarque la dissemblance entre les deux pénétrogrammes  $SP2_{Z5}$  et  $SP3_{Z3}$  obtenus à cinq mètres de distance dans une zone de mottureau en boule. Cette forte variabilité spatiale de la résistance de pointe est cohérente avec la forte variabilité spatiale de la résistivité interprétée des TRE (Figures 26b et 27).

On retrouve l'organisation verticale mise en évidence dans les autres zones :

- de 0 à 50 cm environ, la résistance de pointe varie fortement d'un sondage à l'autre. La couche traversée correspond à la « croûte » sèche à la surface du sol.
- de 50 cm à 80 cm environ, la résistance de pointe varie peu avec la profondeur. Elle présente des valeurs comprises entre 1 et 4 MPa qui correspondent à une argile molle à raide suivant la classification proposée par Langton (1999).
- de 80 cm à 140-180 cm (suivant les sondages), la résistance de pointe diminue avec la profondeur pour atteindre un minimum compris entre 0.2 et 0.5 MPa. Cette dernière gamme de résistance correspond à une argile très molle suivant la classification de Langton (1999).
- de 140-180 à 300 cm, la résistance de pointe augmente lentement avec la profondeur sans montrer de pic significatif.

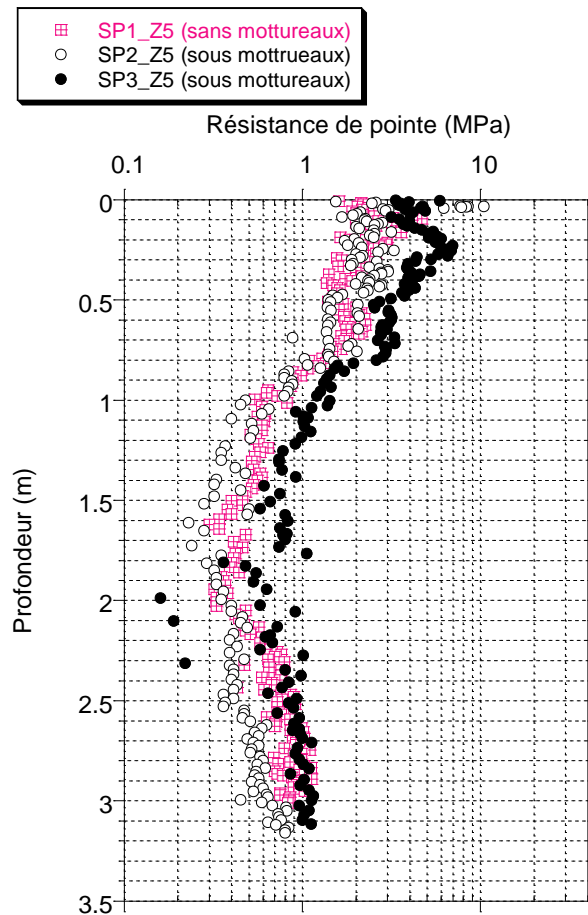


Figure 28 : Pénétragrammes des sondages réalisés dans la zone 3 (positions indiquées en Figure 26).

#### 3.4.4 Profils de teneur en eau massique

Trois profils de teneur en eau ont été réalisés en  $x=0\text{m}$  en bas et en haut d'un mottureau en boule et en  $x=23\text{ m}$  en bas d'un autre mottureau en boule (Figure 29) (abscisse référencée selon la TRE\_1m\_Z5 ; Figures 26a et 27).

La couche de surface possède une teneur en eau comprise entre 17.3% (haut mottureau  $x=23\text{m}$ ) et 38.0% (bas mottureau  $x=23\text{m}$ ). Elle augmente progressivement avec la profondeur pour atteindre des valeurs élevées : 70% (bas mottureau en  $x=0\text{m}$ ) et 75.5% (bas mottureau en  $x=23\text{m}$ ). Ces valeurs sont supérieures ou égales à la limite de liquidité de 70% estimée sur le site. Cette évolution permet de constater que le bri devient plastique à partir de 100 cm environ pour évoluer vers un état liquide à partir d'environ 270cm. A partir de 270cm, le sol apparaît alors dans un état liquide sur une épaisseur significative de 80cm. Contrairement à la zone 2, la teneur en eau reste à ces valeurs élevées sans diminuer avec la profondeur jusqu'à 350cm.

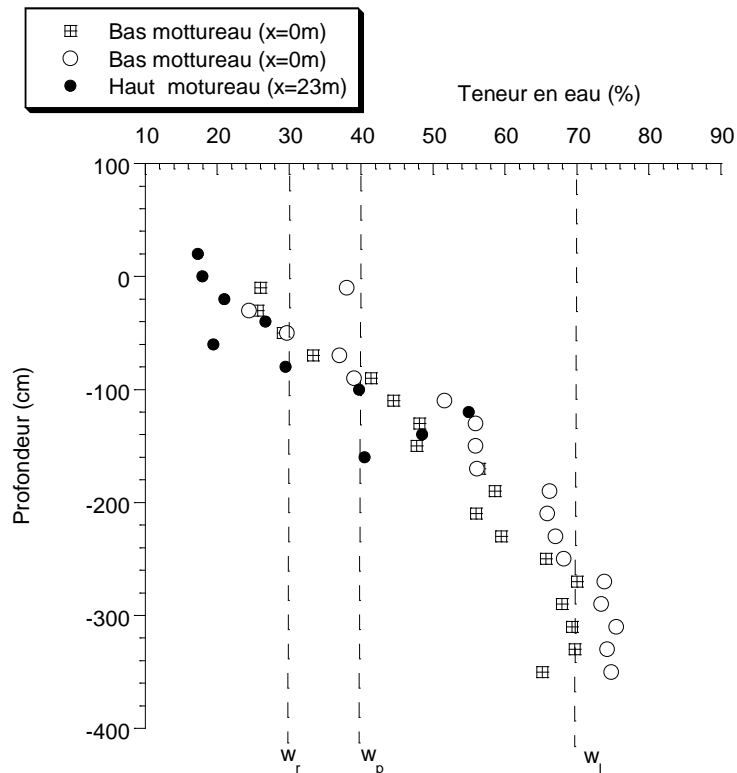


Figure 29 : Profils de teneur des sols de la zone 5 en  $x=0m$  et  $x=23m$  suivant TRE\_1m\_Z5.  
 $w_r$ : limite de retrait ;  $w_p$ : limite de plasticité ;  $w_l$ : limite de liquidité.

#### 3.4.4 Profils de CE 1/5

Les profils de CE 1/5 ont été réalisés aux mêmes positions que les mesures de teneur en eau et présentés Figure 30. Pour les deux zones de mesure ( $x=0m$ ,  $x=23m$ ) la couche de surface des zones sans mottureau possède une CE comprise entre 616  $\mu S/cm$  ( $x=0m$ ) et 701  $\mu S/cm$  ( $x=23m$ ). La surface du mottureau possède une CE plus faible comprise entre 361 et 431  $\mu S/cm$ . Pour le point situé à  $x=0m$  la CE1/5 augmente progressivement avec la profondeur et atteint des valeurs élevées (3700  $\mu S/cm$ ) entre 330 et 350 cm de profondeur. Pour la zone à  $x=23 m$  les valeurs augmentent moins rapidement et atteignent 2350  $\mu S/cm$  à 350 cm. Les tendances sont similaires pour les sondages en haut et en bas des mottureaux.

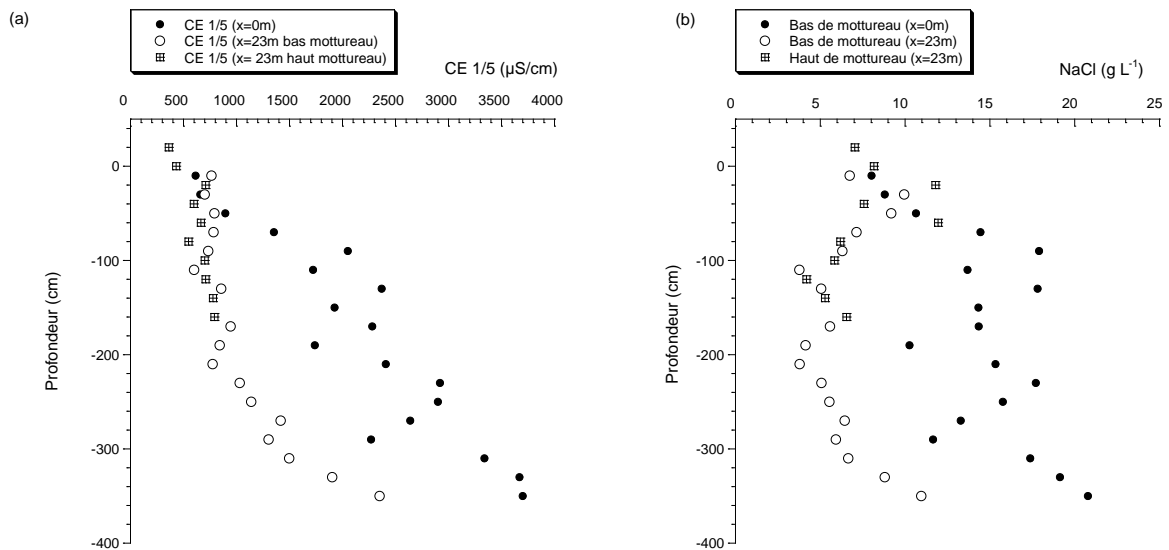


Figure 30 : Profils de CE 1/5 (a) et salinité équivalente (b) des sols de la zone 5 en  $x=0m$  et  $x=23m$ .

Pour la zone 5 deux situations contrastées sont observées. Pour le point de prélèvement situé à  $x = 23m$  les concentrations équivalentes en NaCl sont comprises entre 3,79 et 11,95  $g L^{-1}$ . La surface des bas de mottureaux et les hauts de mottureaux présentent des concentrations similaires mais à -20 et -60 cm les 'racines' des mottureaux ont des concentrations en NaCl plus élevées que les zones entre les mottureaux. Ensuite les deux situations présentent une tendance similaire avec l'augmentation de la profondeur jusqu'à 1,60 m. Pour le bas de mottureau la concentration en NaCl réaugmente à partir de 3 m de profondeur de 5,92 à 10,95  $g L^{-1}$ .

Le point d'échantillonnage à  $x = 0 m$  présentent des valeurs similaires aux autres points jusqu'à une profondeur de 50 cm (8,02 à 10,64  $g L^{-1}$ ) mais ensuite les concentrations augmentent rapidement avec la profondeur (10,26 à 17,72  $g L^{-1}$ ) entre 50 cm et 3m et pour des profondeurs supérieures à 3 les valeurs augmentent entre 17,38 et 20,78  $g L^{-1}$ . Pour la zone 5 les cations majoritaires sont le sodium (78%) et le magnésium (21 %) et la proportion de magnésium augmente à 1,20 m (Annexe 1).

### III. DISCUSSION ET CONCLUSION

L'étude menée sur le Marais Communal du Poiré-sur-Velluire à l'été 2022 a permis d'approfondir nos connaissances sur trois aspects :

- i. l'organisation verticale des sols en place ;
- ii. l'existence de gradients de salinité à l'échelle du Communal ;
- iii. les éléments constitutifs du mécanisme de formation des mottureaux.

#### 3.1 Sur l'organisation verticale des sols

Suivant ce premier item, un regard croisé sur les données acquises de nature très diverse (résistivité électrique, résistance de pointe et teneur en eau) aboutit à identifier schématiquement trois unités d'épaisseur variable suivant les zones (Figures 31 et 32). 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 surface insaturée se compose elle-même verticalement de deux sous-unités : (a) une couche de sol (30-40 cm d'épaisseur) se présentant cet été sous la forme d'une « croute » sèche très résistante mécaniquement (résistance de pointe supérieure typiquement à 10MPa) et électriquement (résistance électrique de plusieurs dizaines d'ohm.m) et (b) d'une zone de bri correspondant à une zone de battement de nappe superficielle (mise en évidence dans la campagne de 2021, voir Caner et Cosenza, 2021). Cette deuxième sous-unité qui s'étend en profondeur jusqu'à 60 voire 90 cm, est identifiée d'un point de vue mécanique à une argile ferme à raide suivant la classification proposée par Langton (1999) (i.e., résistance de pointe supérieure à 2 MPa).

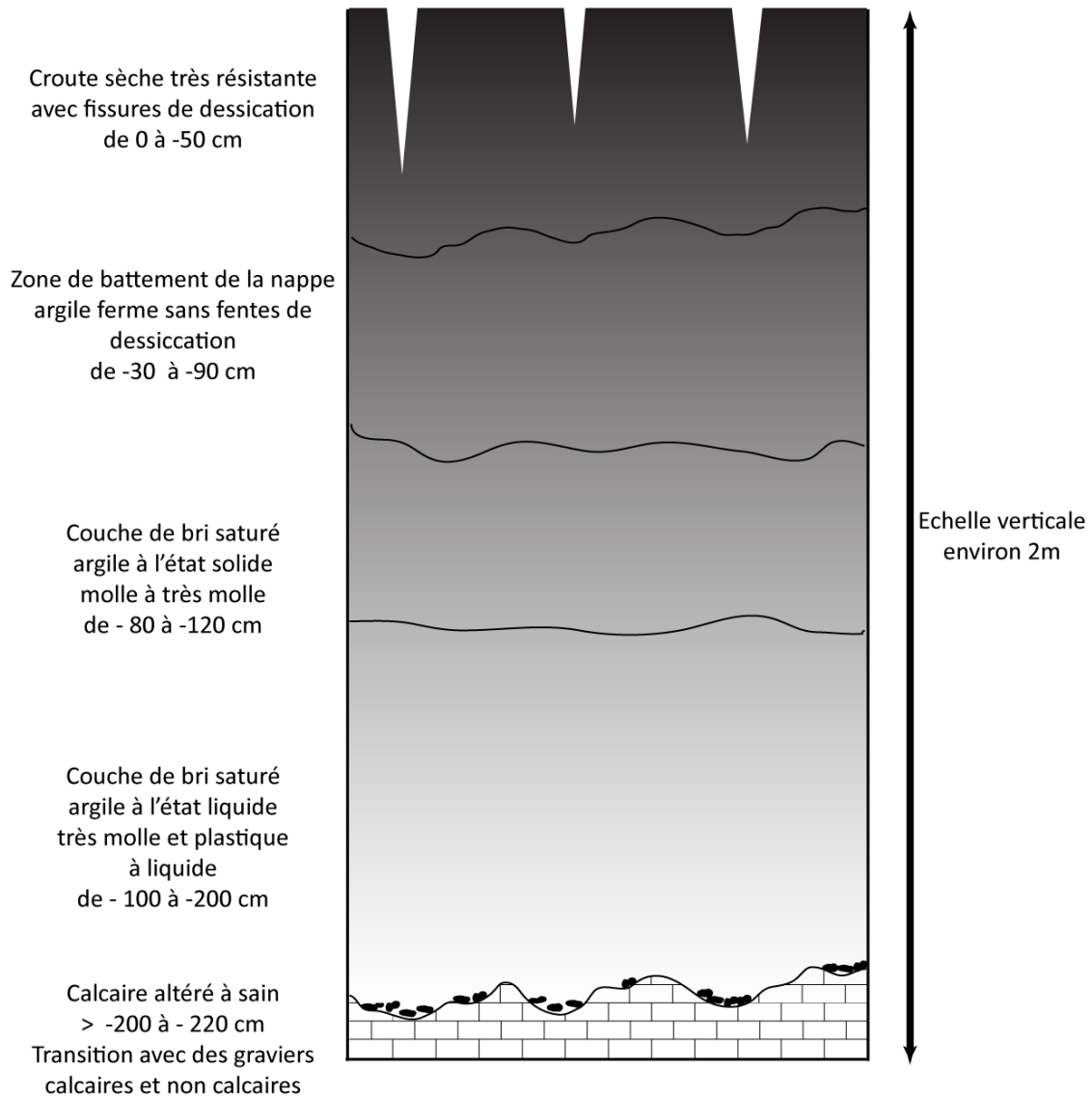
Comme le montrent les résultats des mesures électriques, cette première unité de bri insaturé montre des valeurs de résistivité électrique plus élevées dans les zones en présence de gros mottureaux (ou de mottureaux en boule) que dans les zones de *Baisse*, sans mottureaux. Cette différence peut s'expliquer par l'effet d'une perte en eau (dessiccation) plus marquée dans les zones à mottureaux. Les fissures de dessiccation très nombreuses dans les zones à mottureaux contribueraient à accentuer cet effet de dessiccation.

La couche de bri saturé, deuxième unité reconnue sur le site, se compose verticalement aussi de deux sous-unités : (a) une couche de transition qui s'étend en profondeur jusqu'à environ 100-120 cm suivant les zones d'étude puis (b) une couche d'argile très molle, plastique (au sens des limites d'Atterberg) riche en argile liquide d'épaisseur très variable.

Bien qu'elle présente les caractéristiques mécaniques d'une argile molle à très molle, la couche de transition est dans un état solide au sens des limites d'Atterberg. A environ 100-120 cm de profondeur correspondant à l'interface état solide/état plastique, le bri devient une argile très molle et plastique possédant des lits plus ou moins épais d'argile liquide (liquide toujours au sens des limites d'Atterberg). Elle se montre plus salée que la couche de transition sus-jacente. Suivant les données pénétrométriques et les Tomographie de Résistivité Electrique, cette couche d'argile très molle et plastique présente des épaisseurs pluri-métriques dans les zones à gros mottureaux (zone 4) et mottureaux en boule (zone 5) et seulement pluri-décimétriques dans la zone de référence sans mottureaux (zone 2).

Enfin, la troisième unité mise en évidence sur le Communal est une formation calcaire : roche calcaire altérée ou sable/gravier riche en éléments calcaires. Cette unité a été identifiée dans la zone 2 de référence (sans mottureaux) à 2m de profondeur et dans la zone 3 de la *Baisse* de l'Achenal entre 2.6 et 3m de profondeur. Cette unité pourrait être associée aux formations Jurassiques calcaires du Bajocien (J2) et du Bathonien (J3) présentes au Nord du Communal comme l'atteste la carte géologique au 1/50000 de Marans.





*Figure 31 : Représentation schématique du profil de sol de la zone 2 sans mottureaux.  
Les niveaux de gris traduisent le passage progressif d'un état solide et fissuré (gris foncé), à un état  
plastique d'argile molle (gris clair) à un état d'argile liquide (gris très clair).*

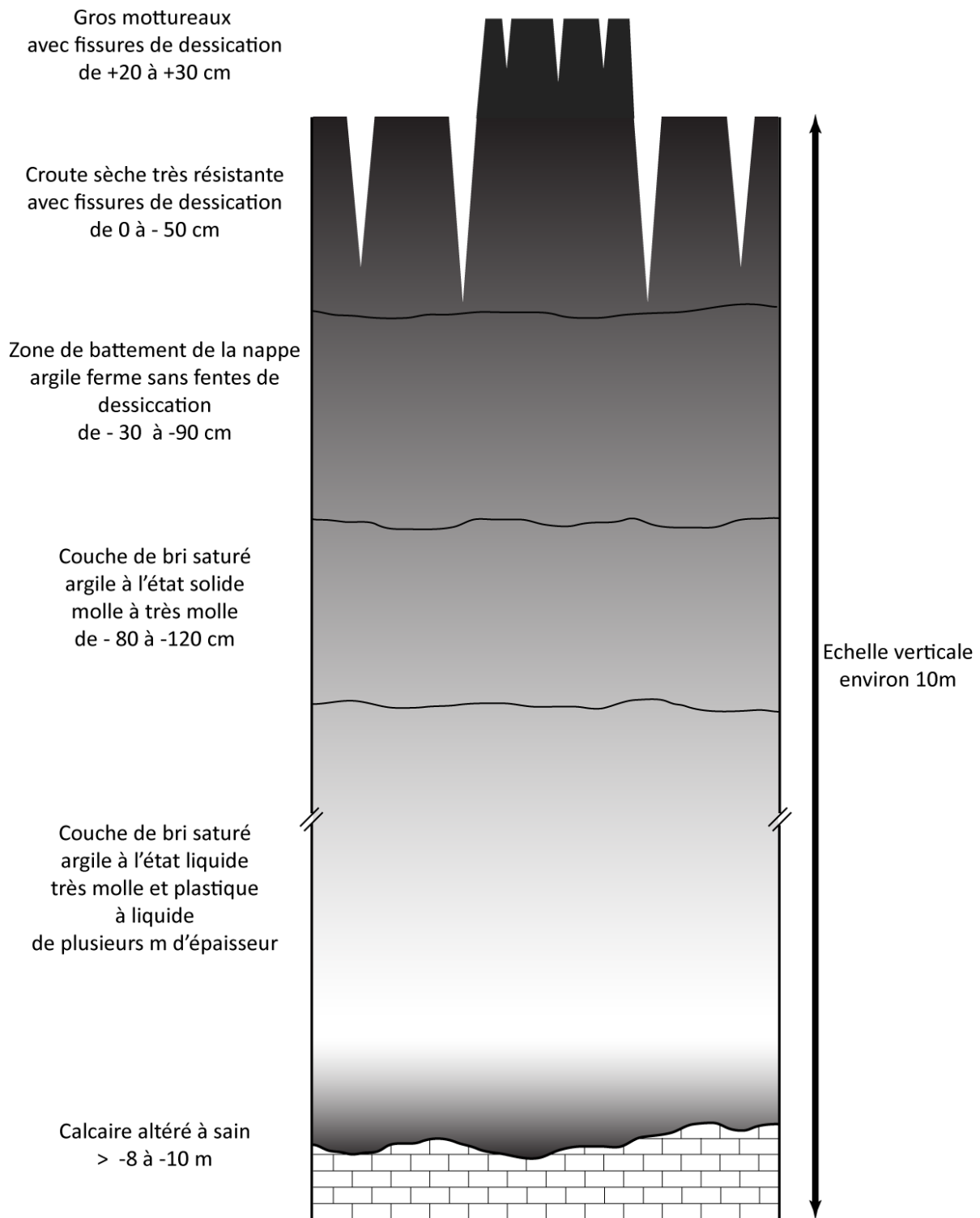


Figure 32 : Représentation schématique du profil des sols de la zone 1 et 4 avec de gros mottureaux. Les niveaux de gris traduisent le passage progressif d'un état solide et fissuré (gris foncé), à un état plastique d'argile molle (gris clair) à un état d'argile liquide (gris très clair).

### **3.2 Sur l'existence de gradients de salinité à l'échelle du Communal**

Les prospections géo-électriques n'ont pas mis en évidence de gradients horizontaux de salinité à l'échelle du Communal ni à l'échelle des zones d'étude riches en gros mottureaux (zones 1 et 4). Suivant cette dernière observation, il apparaît que la genèse des gros mottureaux ne soit pas contrôlée par des gradients horizontaux de salinité à l'échelle de la zone d'étude.

Toutefois, ces prospections ont clairement mis en lumière un gradient Nord-Sud de salinité dans la zone 2 sans mottureaux (si on considère que l'argilosité du sous-sol est sensiblement identique à l'échelle de cette zone). Ce gradient pourrait correspondre à une alimentation en eau douce du site depuis les plateaux calcaires situés au Nord du marais (formations du Callovien inférieur et du Bathonien).

Les mesures des concentrations équivalentes en NaCl et les sels solubles (Annexe 2) indiquent que dans la zone 2 de référence sans mottureau l'eau est faiblement concentrée, contient majoritairement Ca, Mg, K et peu de sodium et confirment l'hypothèse d'une alimentation par l'eau de pluie et/ou l'eau provenant des plateaux calcaires environnants. Dans la zone 3 les concentrations sont plus élevées et avec un contraste en fonction de la position par rapport à la baisse avec une zone plus salée à mi-pente. Cette zone est également marquée par la superposition de matériaux (sols) provenant soit de variations du niveau d'eau dans la baisse ou le dépôt de matériau issu du curage de la baisse. Cette baisse peut également être une zone d'arrivée d'eau douce dans le communal et de sortie d'eau saumâtre après dissolution des sels induisant une diminution de la salinité de surface.

Les zones 4 et 5 présentent un contraste avec la surface des mottureaux dessalée et la profondeur avec de l'eau saumâtre. L'eau circulant entre les mottureaux induit une dissolution du sel présent dans le mottureaux et son évacuation avec les eaux de drainage/ruissellement alors que le bri saturé de subsurface reste salé. La zone 5 présente une forte proportion de sodium et de magnésium sur l'ensemble du profil.

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

Bien que ce travail n'ait pu élucider le mécanisme de formation des mottureaux, il aura permis de mettre en avant deux éléments qui nous semblent importants dans la genèse de ces objets géomorphologiques si particuliers :

1. Les fissures de dessiccation.
2. La couche d'argile très molle et plastique dans le bri saturé.

Concernant le premier élément, les différences significatives de résistivité électrique entre les zones de gros mottureaux et les zones sans mottureaux (zones 3, 4 et 5) nous semblent être attribuables aux effets des fissures de dessiccation nombreuses à proximité des mottureaux. Ces fissures pouvant atteindre plusieurs décimètres contribuent à amplifier la dessiccation du sol et donc à diminuer la teneur en eau, vecteur principal du courant électrique. Ceci conforte l'importance suggérée du gonflement osmotique mettant en scène les fissures de dessiccation (voir projet CNRS MITI/Auto-moteaux et Caner & Cosenza, 2021).

Concernant le deuxième élément, la couche d'argile très molle et plastique dans le bri saturé présente dans toutes les zones d'études montre deux caractéristiques qui diffèrent entre les zones à mottureaux et les zones sans mottureaux. D'une part, elle possède des lits ou bancs d'argile dite liquide d'épaisseur plus importante dans les deux zones à mottureaux de grande taille (zone 4 à gros mottureaux et zone 5 à mottureaux en boule) comme l'attestent les profils de teneur en eau. D'autre part, une analyse statistique simple résumée dans les tableaux 2a et 2b montre que l'épaisseur de cette d'argile très molle (définie ici comme un matériau présentant des résistances de pointe inférieures à 1 MPa) est significativement plus importante dans les zones à mottureaux.

Sondages pénétrométriques		Moyenne de l'épaisseur de la couche montrant une résistance de pointe < 1 MPa (cm)	Ecart-type de l'épaisseur de la couche montrant une résistance de pointe < 1 MPa (cm)
<b>Zone sans mottureaux</b>	SP1_Z2, SP2_Z2, SP3_Z2, SP4_Z2, SP3_Z4, SP2_Z3, SP1_Z5	101	57
<b>Zone avec mottureaux</b>	SP2_Z4, SP4_Z4, SP1_Z3, SP3_Z3, SP2_Z5, SP3_Z5	164	44

Tableau 2a. Analyse statistique simple des sondages pénétrométriques. Estimation de l'épaisseur de l'argile très molle, plastique (i.e., résistance de pointe inférieure à 1 MPa) sur la profondeur totale des pénétrogrammes (i.e., 3 m).

Sondages pénétrométriques		Moyenne de l'épaisseur de la couche montrant une résistance de pointe < 1 MPa (cm)	Ecart-type de l'épaisseur de la couche montrant une résistance de pointe < 1 MPa (cm)
<b>Zone de référence sans mottureaux (Belle, zone 2)</b>	SP1_Z2, SP2_Z2, SP3_Z2, SP4_Z2	66	17
<b>Zone avec gros mottureaux (zone 4) et mottureaux en boule (zone 5)</b>	SP2_Z4, SP4_Z4, SP2_Z5, SP3_Z5	182	41

Tableau 2b. Analyse statistique simple des sondages pénétrométriques en ne considérant que les zones très différenciées (zones 2, 4 et 5 en excluant donc la zone 3). Estimation de l'épaisseur de l'argile très molle, plastique (i.e., résistance de pointe inférieure à 1 MPa) sur la profondeur totale du pénétrogramme (i.e., 3 m).

Ce deuxième élément suggère alors qu'un mécanisme d'instabilité hydrodynamique qui reste à déterminer (micro-diapirisme ou gradient vertical ascendant de densité ? voir par exemple Figures 33a et 33b Chargement mécanique vertical différentiel ?) aurait également un rôle significatif dans la formation des mottureaux. Il n'exclut pas l'impact d'un gonflement osmotique associé aux fissures de dessiccation mais pourrait même être couplé à ce dernier.



Figure 33a : Schéma de principe du micro-diapirisme. Par analogie avec le diapirisme observé à une plus grande échelle, ce phénomène provoquerait la remontée de sols très légers à travers un sol déformable plus dense.

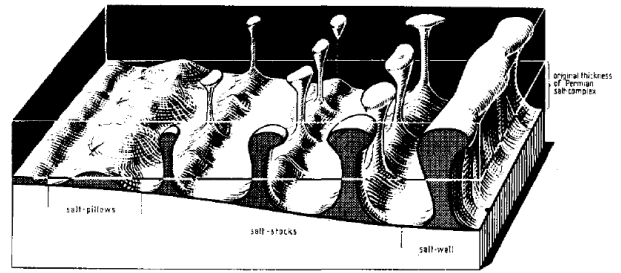
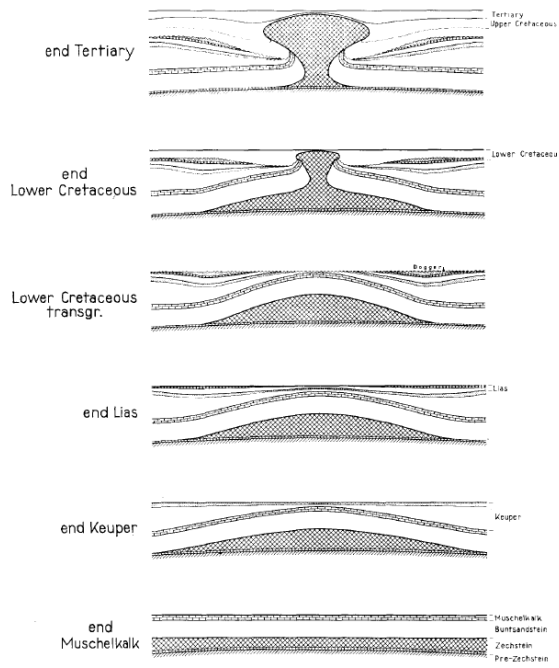


Figure 33b: Haut: exemple de structures diapiriques appelées dômes de sel de dimension plurikilométrique.

A gauche: exemple de mécanisme de mise en place d'un dôme de sel (d'après Trusheim, F. 1960. Mechanism of salt migration in northern Germany. AAPG Bulletin, 44(9), 1519-1540).

## BIBLIOGRAPHIE

- Aminot A., Kérouel R. 2004. Hydrologie des écosystèmes marins. Paramètres et analyses. QUAE. 335 p.
- 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.
- Florsch, N., & Muhlach, F. (2018). Géophysique appliquée pour tous 1: Méthodes électriques (Vol. 1). ISTE Group.
- Fouassier, L. 2021. Auto-organisation des mottureaux, Rapport de stage de L3 de Sciences de La Terre, Université de Poitiers sous la direction de G. Rousseaux, A. Beaudoin et F. Hubert, Mai-Juillet 2021.
- 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.
- Keller, G. V., & Frischknecht, F. C. (1966). *Electrical methods in geophysical prospecting*. Intl Series Monogra Electromag Waves. Pergamon Press.
- Langton, D. D. (1999). The Panda lightweight penetrometer for soil investigation and monitoring material compaction. *Ground Engineering*, Sept, 33-37.
- Montoroi, J.P., 1997. Conductivité électrique de la solution du sol et d'extraits aqueux de sol - Application à un sol sulfaté acide salé de Basse-Casamance (Sénégal). *Etude et Gestion des Sols.*, 4: 279-298.
- 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.
- 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

Concentrations en sels solubles d'échantillons représentatifs de la campagne 2021 (en meq/L)

Echantillon	Ca <sup>2+</sup> (méq/L)	Mg <sup>2+</sup> (méq/L)	Na <sup>+</sup> (méq/L)	K <sup>+</sup> (méq/L)	Somme sels solubles (méq/L)
Z1 GM1 - 20	18,15	9,97	4,34	5,47	37,93
Z1 GM1 - 60	22,68	40,70	8,84	11,19	83,41
Z1 GM1 - 120	16,74	51,64	10,54	12,57	91,50
Z2 R - 20	5,93	12,08	2,28	6,52	26,80
Z2 R - 60	25,03	38,01	2,64	5,29	70,97
Z2 R - 120	2,46	12,50	3,71	8,01	26,67
Z3 PM2 -20	0,92	9,36	7,37	9,74	27,40
Z3 PM2 -60	12,68	17,68	12,37	9,60	52,33
Z3 PM2 -120	12,22	51,34	19,92	14,78	98,26
Z3 R - 20	2,70	13,60	33,73	8,51	58,55
Z3 R - 60	28,69	84,50	79,03	18,66	210,87
Z3 R - 120	7,62	82,65	113,39	24,96	228,61
Z4 GM1 - 20	1,66	8,89	4,37	13,01	27,93
Z4 GM1 - 60	0,68	13,69	22,02	8,37	44,75
Z4 GM1 - 120	31,45	52,20	55,09	15,00	153,74
Z5 B1 - 20	0,18	5,46	20,37	0,18	26,19
Z5 B1 - 60	0,00	13,05	51,86	8,08	72,98
Z5 B1 - 120	9,34	62,39	98,20	13,66	183,59



ANNEXE 2

Paramètres mesurés sur les échantillons prélevés en 2022.

Identification	P (cm)	W (%)	CE <sub>1/5</sub> ( $\mu\text{S.cm}^{-1}$ )	CE fluide ( $\mu\text{S.cm}^{-1}$ )	NaCl eq. (Mg.L <sup>-1</sup> )
Zone 2 référence	-10	20.3			
X= 1m	-30	23.3			
	-50	23.5			
	-70	31.3			
	-90	41.5			
	-110	65.6			
Zone 2 référence	-10	16.6	229	6881	4476.0
X= 23m	-30	16.6	210	6321	4087.2
	-50	18.1	300	8297	5470.8
	-70	23.3	397	8521	5629.9
	-90	29.7	340	5723	3675.6
	-110	36.7	433	5897	3795.2
	-130	51.7	436	4219	2655.9
	-150	63.8	440	3450	2145.2
	-170	71.8	445	3099	1914.7
	-190	53.8	432	4012	2517.7
	-210	39.9	1119	14029	9639.8
	-230	27.8	970	17427	12197.6
Zone 3	-10	23.4	346	7390	4716.8
X = 0m	-30	22.8	298	6532	4132.8
Bas mottureau	-50	26.2	359	6843	4343.3
	-70	30.8	429	6959	4422.4
	-90	36.8	392	5323	3320.9
	-110	42.5	296	3479	2112.5
	-130	48.9	321	3280	1985.0
	-150	51.1	430	4209	2586.2
	-170	56.7	328	2890	1735.9
	-190	58.9	372	3156	1905.3
	-210	66.4	757	5703	3574.6
	-230	67.3	672	4996	3104.1
	-250	68.5	607	4431	2731.3
	-270	30.3	660	10907	7168.3
	-290	34.2	428	6259	3948.1
	-310	45.6	622	6823	4330.3
-330	42.6	777	9125	5915.3	
-350	43.0	237	2758	1652.5	
Zone 3	20	21.3	405	9492	6171.6
X = 0m	0	20.5	270	6594	4174.8
haut mottureau	-20	21.0	280	6674	4228.9
30 cm	-40	25.7	346	6744	4276.2
	-60	33.8	406	6002	3775.3
	-80	38.2	326	4271	2627.0
	-100	41.6	243	2923	1757.2
	-120	47.3	302	3190	1927.5

Zone 3	-10	30.5	503	8238	5429.1
X = 23 m	-30	28.9	482	8345	5504.9
Bas mottureau	-50	35.1	627	8921	5914.6
	-70	37.9	999	13193	9019.4
	-90	40.1	1208	15053	10404.5
	-110	33.9	1124	16561	11540.5
	-130	40.4	1220	15097	10437.2
	-150	43.1	1056	12249	8323.4
	-170	51.9	946	9122	6057.9
	-190	55.1	873	7927	5209.2
	-210	58.0	1567	13515	9258.1
	-230	59.7	2210	18502	13019.0
	-250	64.9	1186	9134	6066.4
	-270	29.6	460	7781	5106.5
	-290	34.9	762	10905	7342.4
	-310	41.9	472	5638	3617.1
	-330	43.0	467	5432	3476.7
	-350	46.6	492	5280	3372.3
Zone 3	-10	29.3	380	6492	4226.2
X = 23 m	-30	25.9	304	5861	3788.6
Bas mottureau	-50	27.1	409	7544	4964.2
	-70	33.5	490	7303	4794.6
	-90	38.8	567	7304	4795.2
	-110	42.9	551	6428	4182.1
	-130	44.0	412	4684	2982.9
	-150	45.7	776	8495	5639.1
	-170	53.5	492	4595	2922.8
	-190	60.1	823	6843	4471.2
Zone 4	-10	25.8	637	12352	8198.6
X = 7 m	-30	24.1	414	8602	5551.9
Bas mottureau	-50	28.3	501	8838	5715.4
	-70	26.1	775	14829	9991.9
	-90	30.7	990	16141	10953.9
	-110	35.8	1380	19279	13289.3
	-130	50.4	1204	11944	7906.3
	-150	52.8	1268	11997	7943.9
	-170	61.8	1700	13748	9204.9
	-190	76.2	1342	8804	5691.6
	-210	80.5	4610	28621	20478.6
	-230	78.2	3950	25245	17841.7
	-250	81.6	3220	19739	13635.2
Zone 4	-10	21.4	392	9162	5941.1
X = 23 m	-30	24.8	556	11209	7382.6
Bas mottureau	-50	24.1	754	15658	10598.7
	-70	30.2	1055	17477	11942.5
	-90	38.1	909	11914	7884.5
	-110	48.9	897	9171	5947.0
	-130	61.8	2830	22908	16041.4
	-150	63.2	2150	17021	11604.3
	-170	67.6	2860	21151	14701.8

-190	77.3	4590	29700	21329.6
-210	73.0	3830	26228	18605.3
-230	84.4	3520	20850	14474.1
-250	83.5	4240	25386	17951.1
-270	89.6	2940	16415	11156.3
-290	82.6	3660	22153	15464.3
-310	77.2	4920	31884	23064.9
-330	85.8	3900	22731	15905.9
-350	87.1	5130	29434	21119.7

Zone 4	0	19.6	247	6308	3981.0
X = 40 m	-20	24.1	324	6723	4261.9
Haut mottureau	-40	25.5	392	7692	4923.4
30 cm	-60	27.7	996	18001	12333.1
	-80	33.7	2940	43578	32628.8
	-100	39.1	1190	15224	10280.2
	-120	42.1	1541	18302	12557.5
	-140	56.4	1785	15816	10715.1
	-160	61.5	1030	8375	5394.4
	-180	68.8	2700	19627	13550.3
	-200	68.9	5880	42675	31874.3
	-220	83.6	3260	19491	13448.6
	-240	85.6	4050	23657	16615.9
	-260	84.5	2810	16620	11307.4
	-280	84.5	3700	21883	15259.1

Zone 5	-10	26.0	616	11834	8019.2
X = 0 m	-30	25.6	660	12891	8796.5
Bas mottureau	-50	29.1	895	15369	10641.8
	-70	33.3	1354	20355	14446.1
	-90	41.4	2050	24760	17895.8
	-110	44.5	1722	19360	13677.5
	-130	48.1	2370	24654	17812.4
	-150	47.7	1927	20200	14325.6
	-170	56.4	2280	20226	14345.8
	-190	58.6	1740	14856	10257.0
	-210	56.0	2410	21503	15337.4
	-230	59.5	2920	24536	17718.8
	-250	65.7	2900	22056	15769.0
	-270	70.0	2640	18857	13291.1
	-290	67.9	2270	16707	11651.2
	-310	69.3	3340	24109	17381.4
	-330	69.7	3670	26315	19132.4
	-350	65.2	3700	28367	20777.4

Zone 5	-10	38.0	763	10029	6741.4
X = 23 m	-30	24.4	701	14384	9952.5
Bas mottureau	-50	29.7	793	13369	9194.3
	-70	37.0	783	10581	7142.0
	-90	39.0	735	9424	6304.7
	-110	51.6	602	5829	3766.8
	-130	55.9	856	7658	5044.6

-150	55.9				
-170	56.1	944	8419	5585.0	
-190	66.2	842	6357	4132.2	
-210	65.9	774	5868	3793.7	
-230	67.0	1032	7698	5072.7	
-250	68.2	1140	8353	5537.9	
-270	73.8	1418	9604	6434.0	
-290	73.4	1305	8885	5917.6	
-310	75.5	1496	9902	6649.1	
-330	74.2	1905	12841	8802.4	
-350	74.8	2350	15714	10954.4	
<hr/>					
Zone 5	20	17.3	361	10464	7039.5
X = 23 m	0	17.9	431	12006	8165.6
Haut mottureau	-20	21.0	708	16842	11782.0
30 cm	-40	26.7	597	11187	7565.2
	-60	19.5	664	17068	11954.3
	-80	29.5	548	9288	6191.4
	-100	39.7	699	8803	5844.7
	-120	54.9	710	6462	4195.5
	-140	48.5	777	8011	5281.4
	-160	40.5	792	9784	6547.7
<hr/>					