RAPPORT D'ETUDE

Etude de la structure des sols des mottureaux de la Réserve Naturelle régionale du Marais communal du Poiré-sur-Velluire

-

2020-259

Responsables scientifiques du projet : CANER Laurent – COSENZA Philippe
Participation au projet :
PAVAGEAU Clémence : Master 1 Hydrogéologie et Transferts de l'Université de Poitiers
CHOUETTE Maxime : Licence 3 de Sciences de la Terre de l'Université de Poitiers

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

Avec le concours financier de :

Table des matières

1. INTRODUCTION ET PROBLEMATIQUE 4
1.1 Contexte général 4
1.2 Hypothèses de formation des mottureaux 7
1.3 Objectif de l'étude 10
2. MATERIELS ET METHODES 11
2.1 Localisation des sites d'étude 11
2.2 Prospections de terrain 12
2.2.1 Sondages à la tarière 12
2.2.2 Mesure de la résistance de pointe 13
2.2.3 Mesure de résistivité électrique 13
2.2 Analyses de laboratoire 14
2.2.1 Mesure de la teneur en eau massique 14
2.2.2 Mesure du pHeau 14
2.2.2 Mesure de la conductivité électrique de l'extrait au 1/5 14
2.2.3 Analyse granulométrique et texturale 14
2.2.4 Analyse minéralogique par diffraction des rayons X 15
3. RESULATS 17
3.1 Zone 2 : zone de référence sans mottureaux 17
3.1.1 Description des sols 18
3.1.2 Profils de teneur en eau 19
3.1.3 Profils de résistante de pointe 19
3.1.3 Profils de conductivité électrique de l'extrait au 1/5 et de pH 20
3.1.4 Mesures de résistivité de surface 21
3.1.5 Granulométrie et minéralogie 21
3.2 Zones 1 et 4 : zone à gros mottureaux 23
3.2.1 Description des sols 25
3.2.2 Profils de teneur en eau 27
3.2.3 Profils de résistante de pointe 28
3.2.4 Profils de conductivité électrique de l'extrait au 1/5 et de pH 29
3.2.5 Mesures de résistivité électrique de surface 30
3.2.5 Granulométrie et minéralogie 30
3.3 Zone 3 : zone à petits mottureaux 32
3.3.1 Description des sols 33
3.3.2 Profils de teneur en eau 34
3.3.3 Profils de résistante de pointe 35
3.3.3 Profils de conductivité électrique de l'extrait au 1/5 et de pH 36
3.3.4 Mesures de résistivité électrique de surface 37
3.3.5 Granulométrie et minéralogie 37
3.4 Zone 5 : zone à mottureaux en boules 39
3.4.1 Description des sols 40
3.4.2 Profils de teneur en eau 41
3.4.3 Profils de résistante de pointe 42
3.4.4 Profils de conductivité électrique de l'extrait au 1/5 et de pH 43
3.3.4 Mesures de résistivité électrique de surface 44
3.4.5 Granulométrie et minéralogie 44
4. DISCUSSION 46
4.1 Description des sols 46
4.2 Relations teneur en eau – résistante de pointe 47
4.3 Relations $CE_{1/5}$ – conductivité électrique du fluide – concentration équivalente en NaCl 49
4.4 Discussion générale – pistes de recherche 51
BIBLIOGRAPHIE 54
ANNEXE 1 55
ANNEXE 2 59

Liste des figures

Figure 1 : Hauteur des mottureaux sur le communal du Poiré-sur-Velluire 5
Figure 2 : Carte de répartition mondiale des mottureaux 6
Figure 3 : Hypothèse de formation des mottureaux selon Verger (1964) 7
Figure 4 : Classification des mécanismes de formation des microreliefs de type « gilgais » 9
Figure 5 : Localisation des sites de prélèvement sur la carte litho 3D 11
Figure 6 : Pluviométrie et dates de prélèvements 12
Figure 7 : Schéma de mesure des profondeurs 13
Figure 8 : Zone de prélèvement 2 sans mottureaux. A : photo terrain, B : photo drone 17
Figure 9 : Teneur en eau des sols de la zone 2 19
Figure 10 : Résistance de pointe des sols de la zone 2 20
Figure 11 : $CE_{1/5}$ des sols de la zone 2 20
Figure 12 : Diffractogrammes de l'échantillon de surface de la zone de référence 22
Figure 13 : Photos des mottureaux de la zone 1 (haut) et de la zone 4 (bas) 23
Figure 14 : Vue aérienne des mottureaux de la zone 1 (A- haut) et de la zone 4 (B- bas) 24
Figure 15 : Teneur en eau des sols des zones 1 et 4 28
Figure 16 : Résistance de pointe sols des zones 1 et 4 28
Figure 17 : $CE_{1/5}$ des sols de la zone 1 29
Figure 18 : Diffractogrammes des échantillons de surface des zones 1 et 4 31
Figure 19 : Photos des points de prélèvements dans la zone 3 au niveau de la baisse de l'achenal. 32
Figure 20 : Vue aérienne des points de prélèvements dans la zone 3. 33
Figure 21 : Teneur en eau des sols de la zone 3 35
Figure 22 : Résistance de pointe des sols de la zone 3 36
Figure 23 : $CE_{1/5}$ sols de la zone 3 37
Figure 24 : Diffractogrammes des échantillons de surface de la zone 3 38
Figure 25 : Photos de mottureaux en boules de la zone 5 39
Figure 26 : Vue aérienne des mottureaux en boules de la zone 5 40
Figure 27 : Teneur en eau des sols de la zone 5 42
Figure 28 : Résistance de pointe des sols de la zone 5 43
Figure 29 : $CE_{1/5}$ des sols de la zone 5 43
Figure 30 : Diffractogrammes des échantillons de surface la zone 5 45
Figure 31 : Diagramme de texture des sols 46
Figure 32 : Diagramme résistance de pointe (Qd) et teneur en eau (W) 47
Figure 33 : Porosité des références et des mottureaux des différentes zones 48
Figure 34 : Salinité équivalente des sols de la zone 2 50
Figure 35 : Salinité équivalente des sols des zones 1(A) et 4 (B). 50
Figure 36 : Salinité équivalente des sols des zones 3 (A) et 5 (B). 51
Figure 37 : Schéma de synthèse des résultats obtenus 52

Liste des tableaux

Tableau 1 : Description des sols de la zone 2 18
Tableau 2 : Résistivité électrique apparente de surface des sols de la zone 2 21
Tableau 3 : Description des profils des hauts de mottureaux des zones 1 et 4 25
Tableau 4 : Description des profils des bas de mottureaux des zones 1 et 4 26
Tableau 5 : Description des profils des références des zones 1 et 4 27
Tableau 6 : Résistivité électrique apparente de surface des sols des zones 1 et 4 30
Tableau 7 : Description des profils de la zone 3 34
Tableau 8 : Description du profil de référence de la zone 3 34
Tableau 9 : Résistivité électrique de surface de la zone 3 37
Tableau 10 : Description du profil de référence de la zone 5 41
Tableau 11 : Description du profil de référence de la zone 5 41
Tableau 12 : Résistivité de surface des sols de la zone 5 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 utilisé pour le pâturage collectif de troupeaux plurispécifiques (bovins, équins et oies). Il est en prairie naturelle humide depuis sa création aux environs du XII^{è} siècle. 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^2 à quelques m^2 pour les plus gros (Figure 1). 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). Ces buttes ou mottureaux ont été décrites par Verger (1960, 1964) et assimilées aux « gilgais » qui est le terme consacré en géographie physique et en sciences du sol (Figure 2) pour définir la microtopographie de la surface des sols argileux présentant des alternances d'élévations et de dépressions.

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.

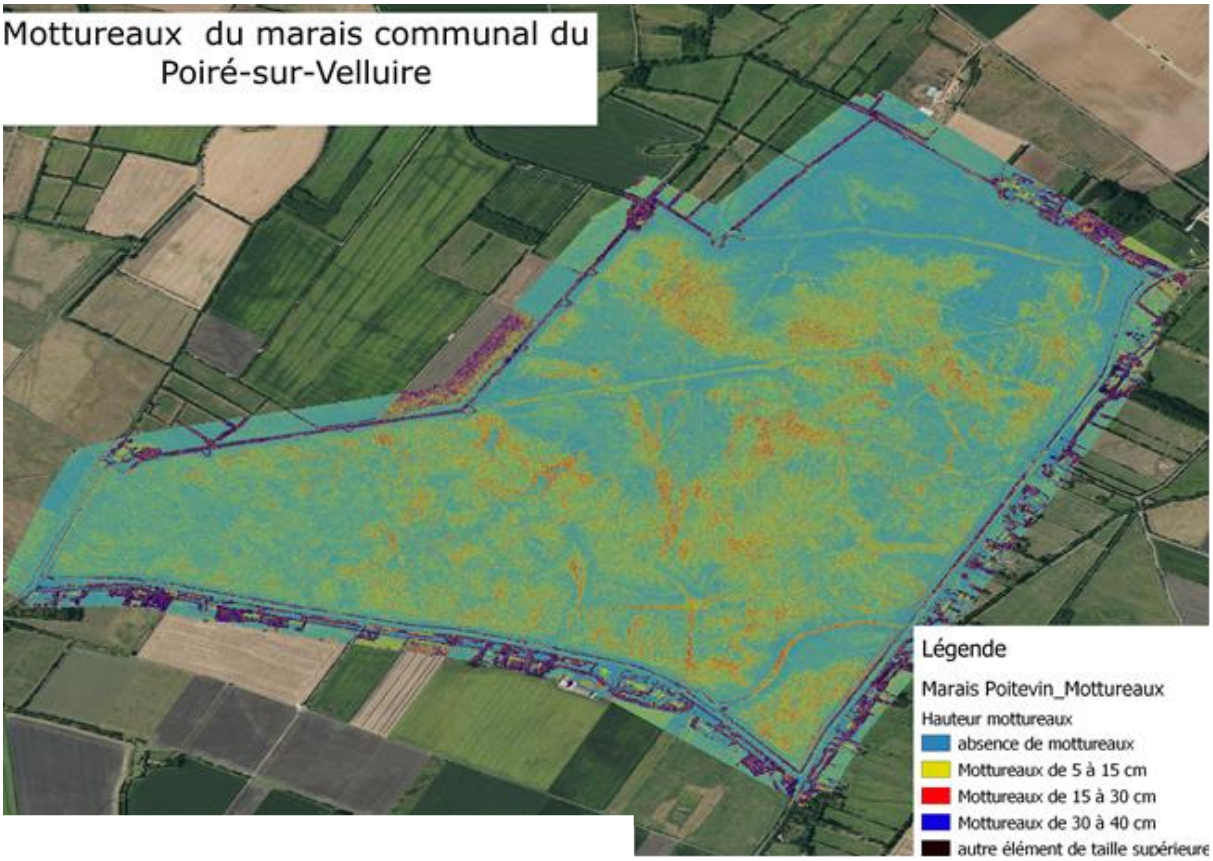


Figure 1 : Hauteur des mottureaux sur le communal du Poiré-sur-Velluire

Source : Parc naturel Régional du Marais Poitevin ; Prise vue et traitement d'image : Drone aquitaine

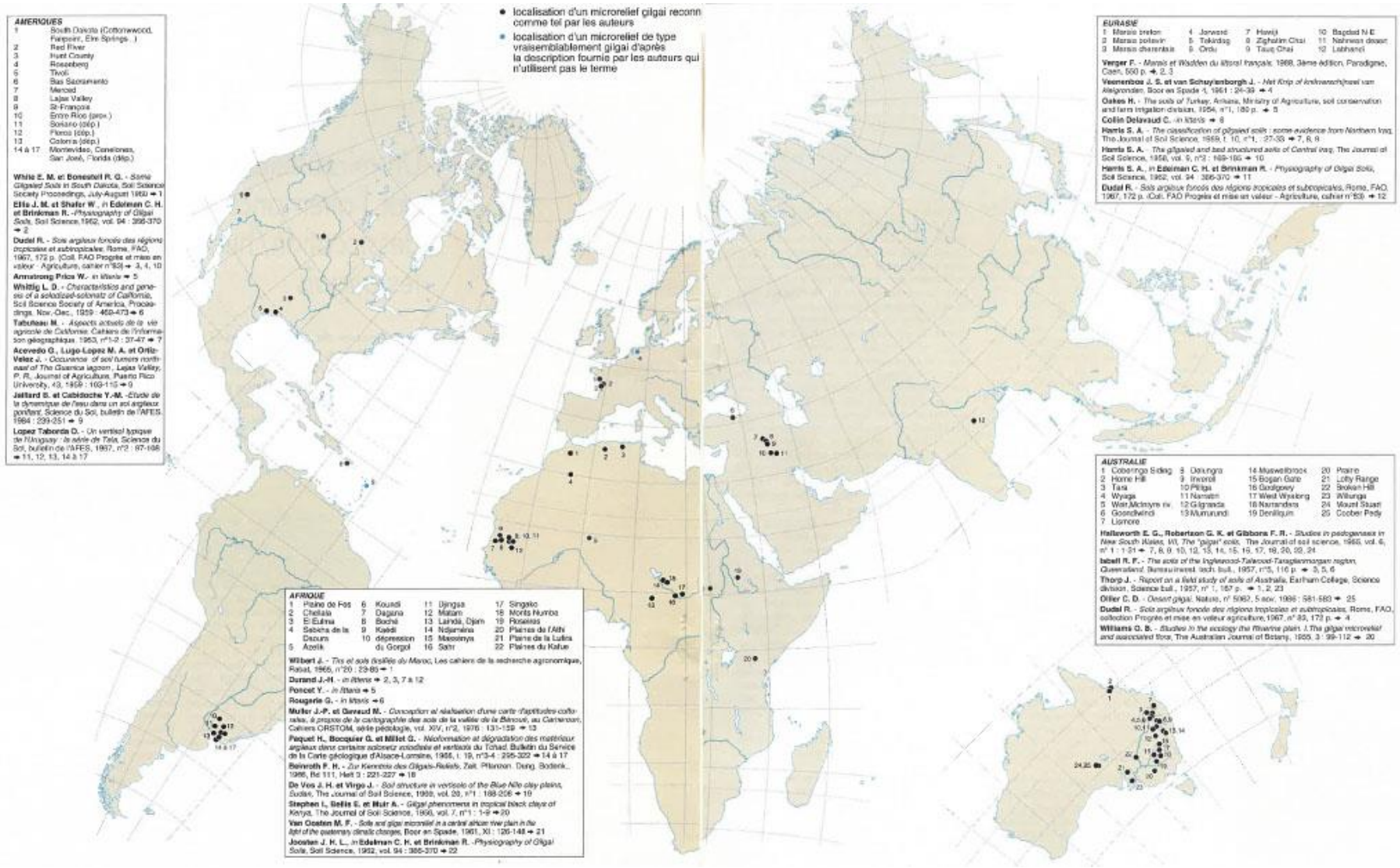


Figure 2 : Carte de répartition mondiale des mottureaux
(source : Verger, 1994).

En France les « mottureaux » sont principalement localisés dans les marais Atlantiques et notamment le Marais Poitevin (Figure 2). Verger (1960, 1994) a établi une carte de répartition des différentes formes de buttes apparentées aux « mottureaux » ou aux « gilgais ». La formation de ces microreliefs a été peu étudiée du fait de leur faible répartition géographique. Dans les zones du Marais Poitevin en prairie fauchées en fermage (ou en cultures) ces buttes sont régulièrement aplanies au rouleau pour faciliter l'accès avec les tracteurs (fauche et récolte du foin).

1.2 Hypothèses de formation des mottureaux

La formation de ces mottes est encore mal connue mais c'est la théorie de Verger (1964) qui semble être la plus mentionnée dans le Marais Poitevin pour la formation des mottureaux.
La dessiccation des sols argileux du fait de la rétraction du matériau en période estivale induit la formation de fentes de retrait pluri centimétriques. La dessiccation entraine aussi une fragmentation des agrégats et une partie de ces fragments « tomberaient » au fond des fissures. En hiver lorsque le sol se réhydrate ces matériaux argileux « gonfleraient » et exerceraient des pressions latérales qui conduiraient au soulèvement de certains blocs (Figure 3).

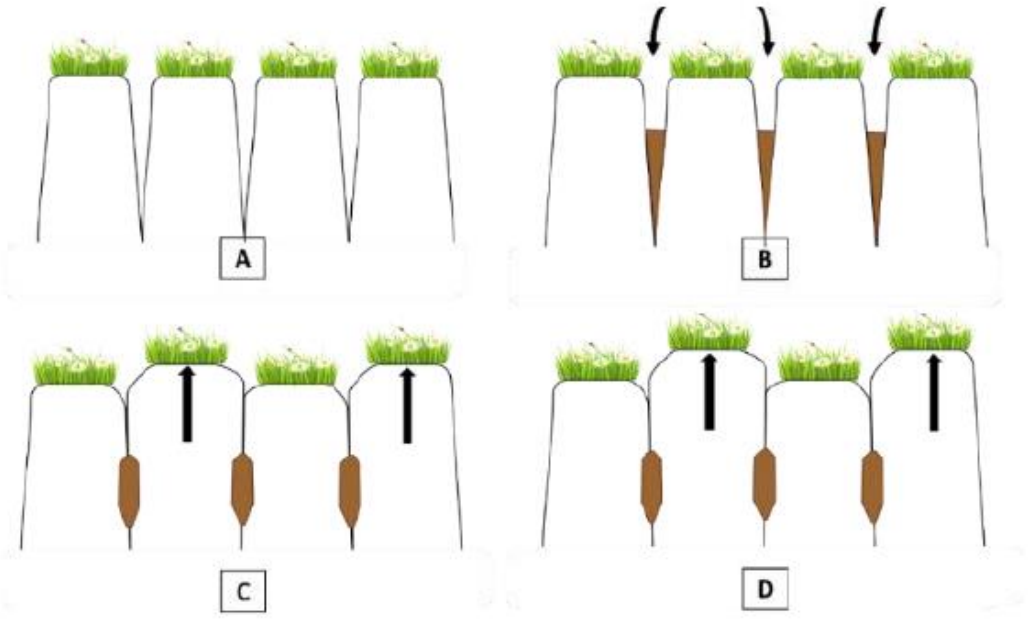


Figure 3 : Hypothèse de formation des mottureaux selon Verger (1964)

A: fentes de dessiccation verticales formées en été ; B : le sol sec désagrégé tombe dans ces fissures verticales ; C : le sol se réhydrate ce qui provoque la fermeture des fissures et l'hydratation du matériau argileux piégé dans la fissure ; D : le gonflement de ces matériaux induit une pression latérale qui provoque la remontée de certaines colonnes (Verger 1964 ; Des Touches, 2017).

Dans la littérature la formation des « gilgais » est reliée à deux types de facteurs : des facteurs intrinsèques au sol et des facteurs extrinsèques de nature hydro-climatiques (Verger, 1964 ; Knight, 1980 ; Khitrov, 2016). Les facteurs intrinsèques correspondent aux propriétés du sol et à sa sensibilité

au phénomène du retrait-gonflement. Ces propriétés sont : la texture (teneur en fraction argileuse), minéralogie des argiles qui présente en majorité des minéraux gonflants de type smectite (mais pas systématiquement selon Verger, 1964), les cations échangeables des minéraux argileux, la structure du sol (*i.e.* l'organisation spatiale du système poral et de la phase solide du sol), la plasticité du sol, sa conductivité hydraulique, sa densité et sa granulométrie.

Les facteurs extrinsèques sont : (a) l'humidité des sols et plus précisément la variabilité spatio-temporelle de la teneur en eau (alternance de cycles d'humectation et de dessiccation) ; et dans une moindre mesure (b) la végétation à travers l'influence des arbres et des grosses racines pouvant être des chemins de drainage privilégiés.

La teneur en fraction argileuse, la présence de minéraux expansible et des alternances de cycles de dessiccation-humectation apparaissent comme les facteurs majeurs de la formation de ces microreliefs de « gilgais » ou buttes argileuse (mottureaux).

Dans le contexte des sols de marais localisés généralement à proximité du littoral la littérature parcourue ne fait pas directement apparaitre la salinité des sols comme un paramètre fondamental impliqué dans la genèse des « gilgais ». Sur la base des articles de Knight (1980) et de Khitrov (2016), les mécanismes physiques de formation des mottureaux peuvent se classer schématiquement en 5 catégories (Figure 4) :

1. Les processus de soulèvement entre fissures (ou fentes) de dessiccation.
2. Les processus de soulèvement sur fissure de dessiccation.
3. Un processus de contraction sur fissure de dessiccation.
4. Les processus de soulèvement dû à un chargement (généralement) mécanique.
5. Les processus d'ondulations consécutives à un écoulement sur pente.

Les mécanismes de formation sont dus à des variations de volume de sol associées aux alternances périodiques d'états physiques : gonflement par hydratation et retrait par dessiccation.

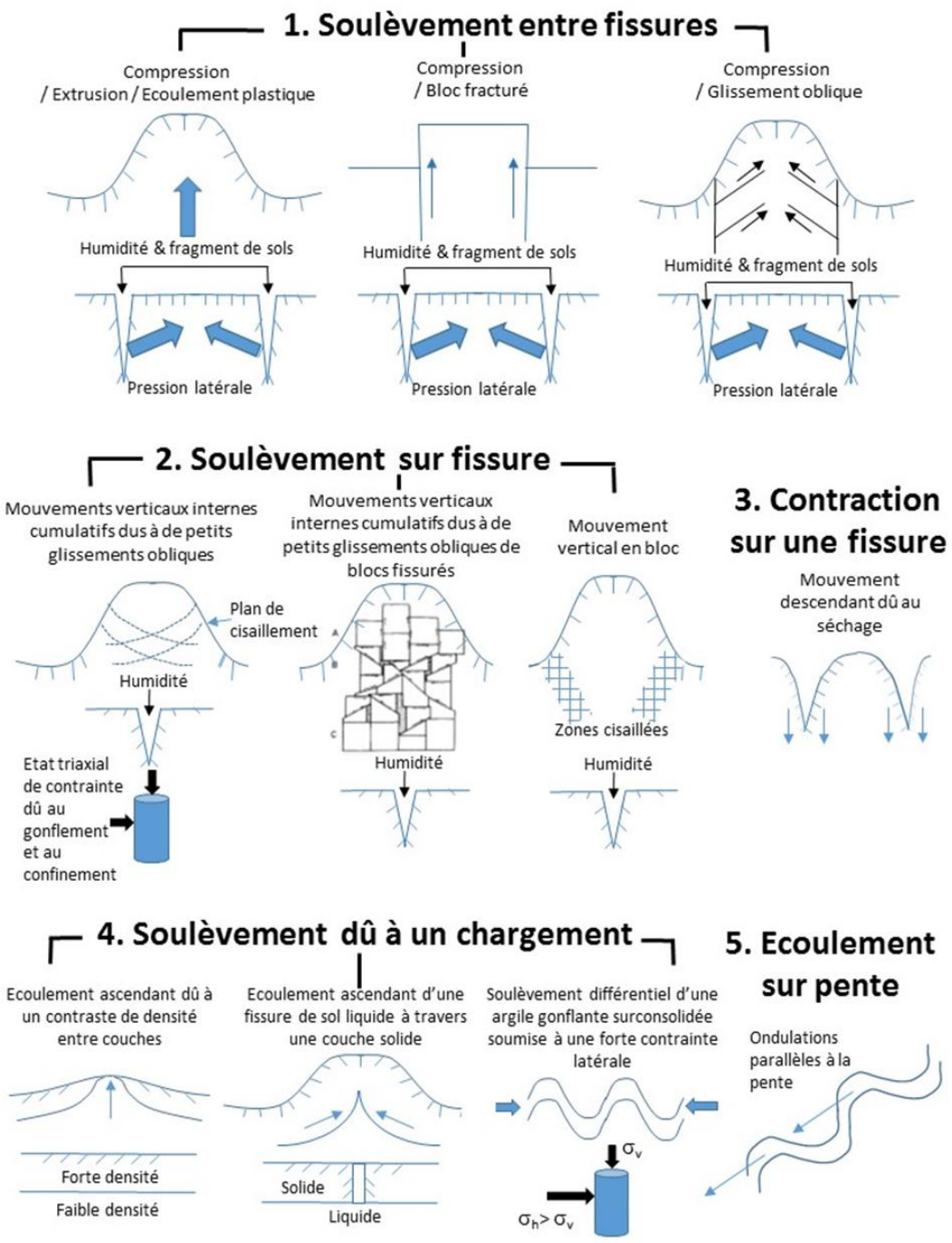


Figure 4 : Classification des mécanismes de formation des microreliefs de type « gilgais » (source : Knight, 1980, modifié)

La catégorie 1 de la Figure 4 correspond à l'hypothèse de Verger (1964) avec un soulèvement provoqué par des pressions latérales générées par une venue d'eau et/ou de fragments de sols dans les fissures.

1.3 Objectif de l'étude

Le Plan de gestion de la réserve a été rédigé en concertation avec les différents acteurs (Commune, Parc naturel régional, éleveurs, associations de préservation du communal, association pour la protection de l'environnement, syndicat de gestion de l'eau, etc…). Les mottureaux sont un sujets complexe causant des difficultés aux éleveurs du communal lorsqu'un animal est blessé par exemple, mais les mottureaux sont également des formations rares et très peu connues ni dans leurs caractéristiques, ni dans leur plus-value environnementale. Dans la gestion courante d'une prairie du Marais poitevin pourvu de mottureaux, l'habitude est d'aplanir la prairie pour faciliter son exploitation. Dans le cadre de la Réserve les acteurs se sont accorder sur la réalisation d'une étude permettant de comprendre le mécanisme de formation des mottureaux, l'influence de la gestion hydraulique et pastorale sur ces derniers et enfin de réaliser des zones testes afin de mieux gérer et connaitre les mottureaux dans l'avenir. Pour cela une étude sera menée pendant 5 ans. Ces premières analyses réalisées en 2021 marque le démarrage de cette étude. En parallèle de cette étude une cartographie par photogrammétrie a été réalisée à l'aide d'un drone.

Les objectifs de l'étude décrite dans la proposition sont de mieux caractériser les différents types de mottureaux présents sur le site du Poiré-sur-Velluire dans le but de comprendre le mécanisme de formations et dans un premier temps de proposer des hypothèses.
Pour la première année d'étude l'objectif est de disposer :

- de descriptions pédologiques des mottureaux
- de caractérisations physico-chimiques et minéralogiques
- de caractérisations mécaniques

Ces investigations s'appuient sur les travaux réalisés par le laboratoire HydrASA (aujourd'hui équipe de l'institut poitevin IC2MP) sur la caractérisation des propriétés hydromécaniques des sols des Marais Atlantiques du Marais Poitevin et du Marais de Rochefort (Bernard, 2006, Bernard et al., 2006, 2007 ; Bernard-Ubertosi et al., 2009 ; Gallier, 2011, Dudoignon et al., 2016).

2. MATERIELS ET METHODES

L'étude du sol du Marais Communal du Poiré-sur-Velluire a comporté une phase de terrain et une phase d'étude des propriétés physiques et chimiques du sol en laboratoire.

2.1 Localisation des sites d'étude

Afin d'étudier les différents types de mottureaux présents sur le site d'étude, six zones ont été sélectionnées après une première visite de terrain le 11 mai 2021 en présence de Delphine Decoene du Parc naturel régional du Marais Poitevin. Ces zones sont localisées sur la figure 5 qui représente la topographie du Communal du Poiré-sur-Velluire avec les zones les plus hautes du marais (Belles) indiquées par la couleur orange et les zones les plus basses (Baisses) en jaune, notamment la baisse de l'achenal, ancienne voie d'eau s'étant comblée sur laquelle est implantée la zone 3. La grande Belle au Nord héberge la zone de références. Les zones 1, 4 et 5 sont situées sur des zones d'altitude intermédiaires.

- La zone 1 située dans une zone de topographie intermédiaire du communal présente des gros mottureaux (GM) 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.
- La zone 3 située dans une grande Baisse, le chenal des Hollandais, présente des petits mottureaux (PM) d'environ 20 cm de haut.
- La zone 4 située au Sud du marais présentant des gros mottureaux (GM) 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 (B) d'environ 40cm de haut.

Pour les zones 1, 3, 4 et 5 des profils de référence de teneur en eau, de pénétrométrie, de résistivité électrique ont été réalisées en dehors des positions des mottureaux de la zone considérée.

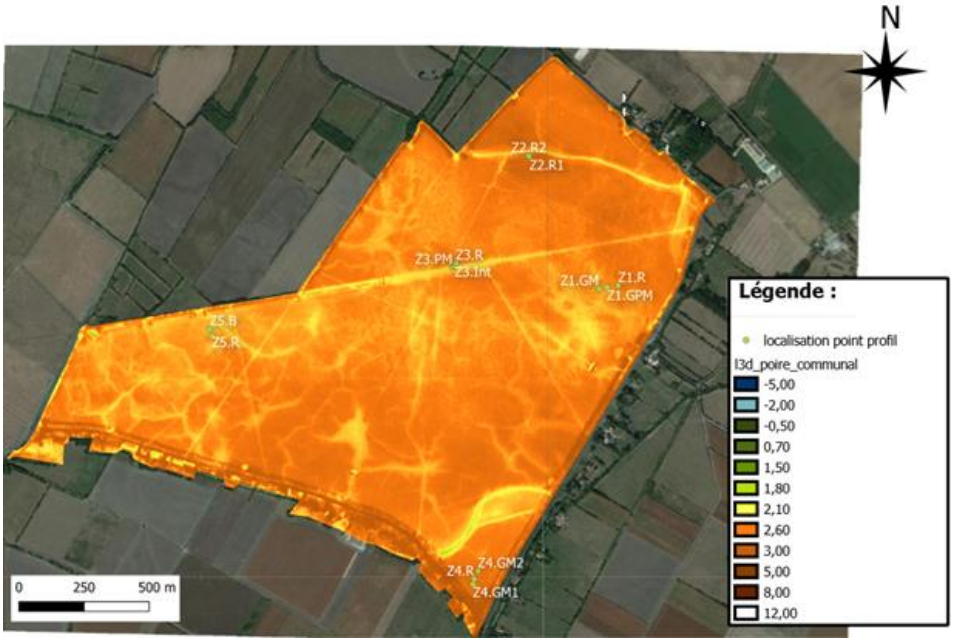


Figure 5 : Localisation des sites de prélèvement sur la carte litho 3D (source : EPMP, 2012)

2.2 Prospections de terrain

Les déplacements sur le terrain ont eu lieu aux dates suivantes :
Visite du terrain et choix des sites : 11 mai 2021
Prélèvements zones 1, 2 et 3 : 20 mai 2021
Prélèvements zones 4 et 5 : 26 mai
Prélèvements et pénétrométrie zones 1, 2 et 3 : 8 juin 2021
Prélèvements et pénétrométrie zones 4 et 5 : 24 juin 2021

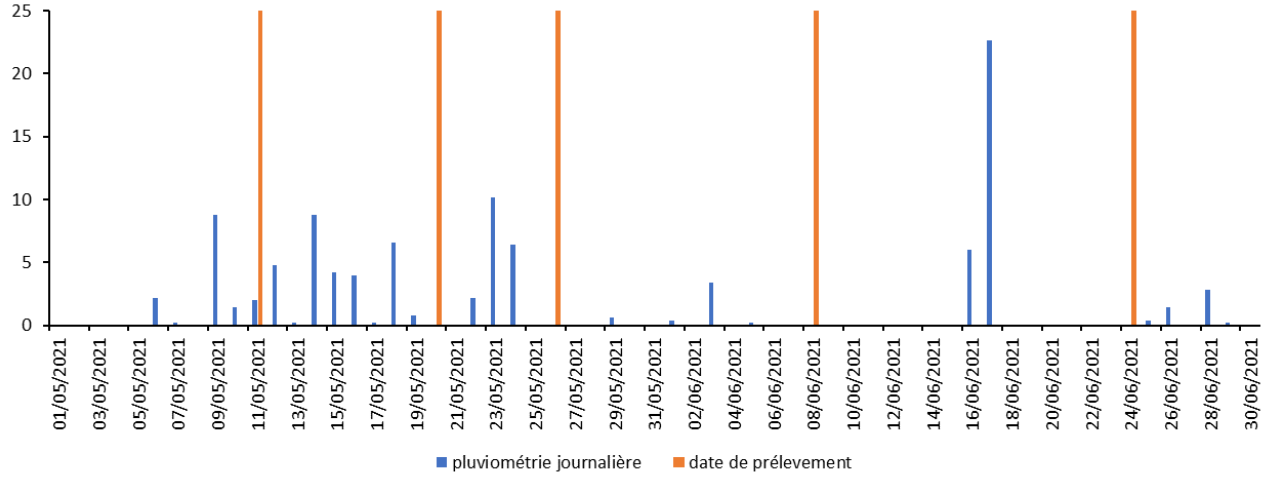


Figure 6 : Pluviométrie et dates de prélèvements
(source : infoclimat.fr)

La figure 6 illustre la pluviométrie journalière à la station météorologique de Fontenay le Comte pour les mois de mai et juin 2021 (source : infoclimat.fr, cumul journalier 6h à 6h(J+1)). La figure 6 illustre que des précipitations de 5 à 10 mm ont eu lieu avant les prélèvements sur les zones 1 à 3 et de 5 à 10 mm pour les prélèvements des zones 4 et 5. Une pluviométrie de 22.6 mm a été enregistrée une semaine (17/06/2021) avant les mesures de résistivité et de pénétrométrie sur les sites 4 et 5 (24/06/2021).

2.2.1 Sondages à la tarière

Pour les cinq zones deux à sept sondages du sol ont été réalisés à l'aide d'une tarière manuelle de 1,20m de profondeur et 7 cm de diamètre. Un profil de sol a été réalisé en haut du Mottureau, en bas du Mottureau et sur une zone plane servant de référence à proximité des mottureaux.
La description comprend :
- la couleur du sol en fonction de la profondeur en se basant sur la charte Munsell.
- la texture (estimée au toucher).
- la profondeur de la limite de plasticité (estimée au toucher).
- les traces d'hydromorphie qui se manifestent par la présence de tâches de rouille, dont l'intensité est notée (peu de tâches : +, tâches récurrentes : ++, forte densité de tâches : +++), et de plages décolorées. La présence de tâches de rouille indique la zone de battement de la nappe superficielle.
- la présence de fragments de roche calcaire et leur origine (rare : +, fréquent : ++, chargé : +++).
- la présence de calcite par effervescence à l'acide chlorhydrique dilué au 1/10^{è}. L'intensité de l'effervescence est notée (faible effervescence : +, moyenne : ++, forte : +++).

L’absence de notation indique l’absence de ces critères.
Pour chaque profil, 6 échantillons ont été prélevés tous les 20cm de la surface à 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 (Figure 7). Les mottureaux au-dessus de ce niveau de référence sont comptés en positif et les bas de mottureaux sont comptés en négatif à partir de cette référence. Sur les figures de la partie résultats la surface du sol au niveau des bas de mottureaux est représentée par une ligne horizontale brun clair.

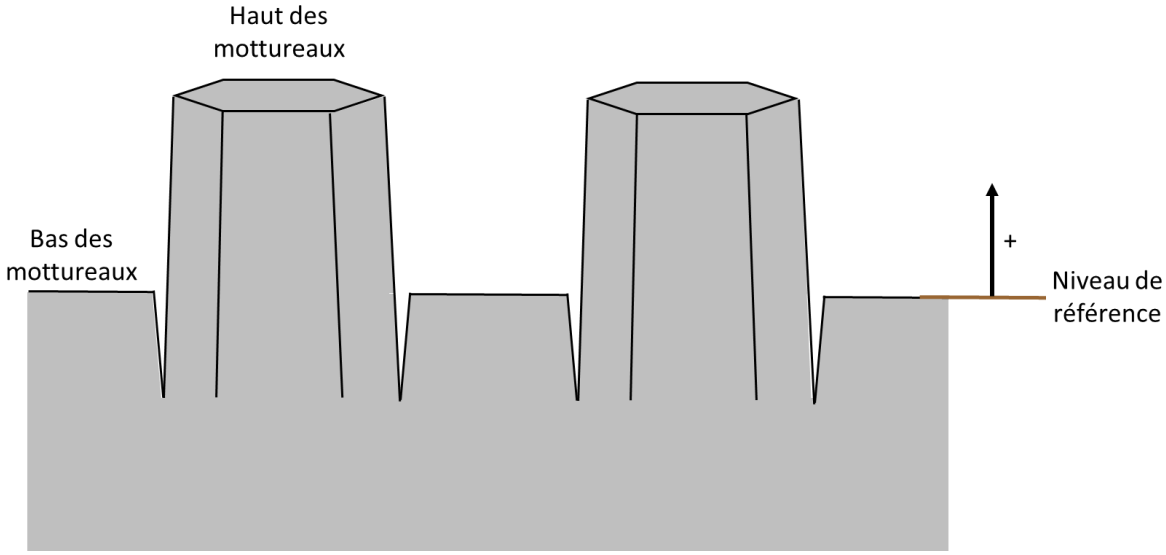


Figure 7 : Schéma de mesure des profondeurs

2.2.2 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). L’appareil est relié à un câble pour mesurer la profondeur de sondage et à une tige surmontée d’un capteur qui convertit la force de frappe en résistance de pointe (MPa) (Cassan, 1988; Zhou, 1997). Après traitement par ordinateur des profils de résistance de pointe (Qd en MPa) en fonction de la profondeur sont obtenus. L'appareil permet des mesures comprises 0,1 à 40 MPa. Les mesures ont été réalisées jusqu'à environ 1,50 m de profondeur avec une pointe perdue conique (angle 30°) en acier de 4 cm^2 de section pour limiter les forces de frottements entre le train de tige de section 1 cm^2 et le sol argileux.

2.2.3 Mesure de résistivité électrique

Les mesures de résistivité sur le terrain ont été réalisées avec un résistivivimètre Chauvin Arnoux CA 6460 et 4 électrodes en inox placées avec un écartement de 20 cm permettant de sonder environ les dix premiers centimètres du sol. Un courant d’intensité connue est injecté dans le sol par 2 électrodes, et la tension entre les deux autres électrodes, dites de réception, est mesurée pour obtenir une résistance électrique qui est ensuite convertie en résistivité apparente. On parle de résistivité apparente car cette dernière correspond à une mesure de résistivité d’un composite solide-eau-air d’une dizaine de centimètres d’épaisseur (et non pas à un matériau pur i.e., monophasique). 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.
Pour chacune des 5 zones, trois mesures de résistivité électrique ont été réalisées respectivement sur le sommet d'un mottureau et en zone basse du même mottureau, dans la mesure du possible.

2.2 Analyses de laboratoire

Les échantillons prélevés tous les 20 cm sont conservés à 4°C après le prélèvement puis désagrégés. Une partie de ces échantillons est utilisée pour la mesure de la teneur en eau et une autre partie est séchée à température ambiante. Après séchage (environ 1 semaine) les échantillons sont désagrégés (non broyés) dans un mortier en agate mécanique.

2.2.1 Mesure de la teneur en eau massique

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

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

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

2.2.2 Mesure du pHeau

Une masse de 10g de sol désagrégé est pesée et mise en contact avec 25 mL d'eau osmosée pendant 30 mn avec une agitation régulière. Le pH est mesuré à l'aide d'une sonde multi-paramètres 3630 IDS - WTW®.

2.2.2 Mesure de la conductivité électrique de l'extrait au 1/5

Les mesures de la conductivité électrique de l'extrait au 1/5 ($CE_{1/5}$) 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.

2.2.3 Analyse granulométrique et texturale

L'analyse granulométrique est réalisée après une étape de destruction de la matière organique et de dispersion chimique. L'analyse est réalisée sur 10g de sol séché à l'air dont l'humidité résiduelle est également déterminée. La destruction de la matière organique est réalisée au moyen d'eau oxygénée (H_2O_2) 5 % à 40 °C. L'eau oxygénée a été renouvelée jusqu'à la disparition de la réaction (effervescence) pendant une semaine. A la suite de cette opération les échantillons ont été saturés avec du chlorure de sodium (NaCl) 2 mol L^{-1} pour remplacer la totalité des cations présents par du Na^+ qui permet la dispersion des particules. Deux contacts avec 100 ml de NaCl 2mol L^{-1} pendant 16 heures sous agitation ont été réalisés. A la suite de cette étape les sables de taille > 50 µm ont été séparés par tamisage humide à 50 µm, lavés et séchés pour pesage.

L'excès de NaCl de la suspension < 50 µm a été éliminé par dialyse avec de l'eau osmosée jusqu'à disparition du chlorure de sodium (5-6 jours de dialyse). Cette fraction < 50 µm saturée Na en suspension dans l'eau osmosée a été ensuite transvasée en allonges de sédimentation. La fraction argileuse (< 2 µm) a été obtenue par siphonnage (20 cm) après 16h de sédimentation à 20 °C. Cette étape a été renouvelée jusqu'à ce que le surnageant soit limpide soit 8 à 10 siphonnages. La fraction limons fins (2-20 µm) a été obtenue par siphonnage (20 cm) après 9mn36sec de sédimentation à 20 °C. Lette étape a été renouvelée jusqu'à ce que le surnageant soit limpide soit 6 siphonnages. Les limons grossiers (20-50 µm) correspondent à la fraction qui sédimente dans les allonges de sédimentation. Les différentes fractions ont été séchées en étuve à 65 °C et pesées.
La granulométrie avec 4 fractions est obtenue : Sables : 50-2000 µm, Limons grossiers : 20-50 µm
Limons fins : 2-20 µm, Argiles : <2 µm
Les pourcentages sont utilisés pour déterminer la texture avec le digramme textural de l'AFES.
La granulométrie a été réalisée sur 18 échantillons :
Zone 1 : GM1 0-20 ; GM1 40-60 ; GM1 100-120
Zone 2 : R2 0-20 ; R2 40-60 ; R2 100-120
Zone 3 : R 0-20 ; R 40-60 ; R 100-120
Zone 3 : PM2 0-20 ; PM2 40-60 ; PM2 100-120
Zone 4 : GM1 0-20 ; GM1 40-60 ; GM1 100-120
Zone 5 : B1 0-20 ; B1 40-60 ; B1 100-120

2.2.4 Analyse minéralogique par diffraction des rayons X

L'analyse minéralogique a été réalisée sur les échantillons utilisés pour l'analyse granulométrique. L'identification minéralogique de la fraction < 2 µm est réalisée par diffraction des rayons X. Une partie de la fraction argileuse obtenue par la méthode précédente est mise en contact avec du chlorure de calcium ($CaCl_2$) 0,5 mol L^{-1} pendant plusieurs heures avec agitation pour saturer les argiles en cation Ca^{2+}. Trois étapes de saturation ont été réalisées avec centrifugation et remplacement de la solution de $CaCl_2$ à chaque cycle. A la fin de la saturation l'excès de $CaCl_2$ a été éliminé avec un lavage à l'eau osmosée par centrifugation (3 à 5 fois) jusqu'à l'absence de chlorures (testée au nitrate d'argent). La saturation calcium des argiles est nécessaire pour une mesure correcte des espacements inter réticulaires des minéraux argileux, notamment les minéraux argileux expansibles sensibles à l'humidité relative.
L'identification des minéraux argileux est effectuée par diffraction des rayons X après la préparation de lames orientées. Les fractions argileuses saturées Ca sont ultrasonnées pour assurer une bonne dispersion et 1 ml de cette suspension est déposé sur une lame de verre (25 x 25 mm). Les lames orientées sont séchées à la température ambiante et seront identifiées Ca-AD. Les lames orientées saturées Ca sont également solvatées à l'éthylène glycol pour mettre en évidence la présence de minéraux argileux expansible. La solvatation est réalisée au dans un dessiccateur, contenant de d'éthylène glycol, sous vide et à 50 °C. L'éthylène glycol solvate l'espace interfoliaire des minéraux argileux expansibles. Les échantillons saturés Ca et solvatés seront identifiés Ca-EG. La diffraction des rayons X est réalisée sur un diffractomètre Bruker D8 Advance fonctionnant avec une anticathode au cuivre (λ = 1,5418 Å), à une tension de 40 Kv et une intensité de 40 mA. Le détecteur est de type Lynxeye dont l'énergie est fixée sur la raie Kα du cuivre. Les diffractogrammes de lames orientées ont pour but d'identifier les minéraux argileux en renforçant leurs réflexions basales (*00l*) du fait de la

sédimentation sur ces faces durant le séchage des lames orientées. La diffraction est réalisée de la position 2theta = 2,5° à la position 2 thêta = 35°. Les diffractogrammes sont présentés avec la position (°2theta) en abscisse et l'intensité en ordonnée.
La distance inter-réticulaire est obtenue en appliquant la loi de Bragg :

$$d\ (\text{Å}) = \lambda / 2\sin(\theta)$$

Avant identification des minéraux argileux les diffractogrammes ont été recalés sur la position du quartz. Les minéraux ont été identifiés en fonction de la position des pics de diffraction (Brindley et Brown, 1980).

3.RESULATS

3.1 Zone 2 : zone de référence sans mottureaux

La zone 2 située au nord du Communal en position haute comprend peu de mottereaux. Elle est choisie comme référence (Figure 8). Deux points de prélèvements (Référence 1 : Z2R1 et référence 2 : Z2R2) ont été réalisés à 17m de distance.

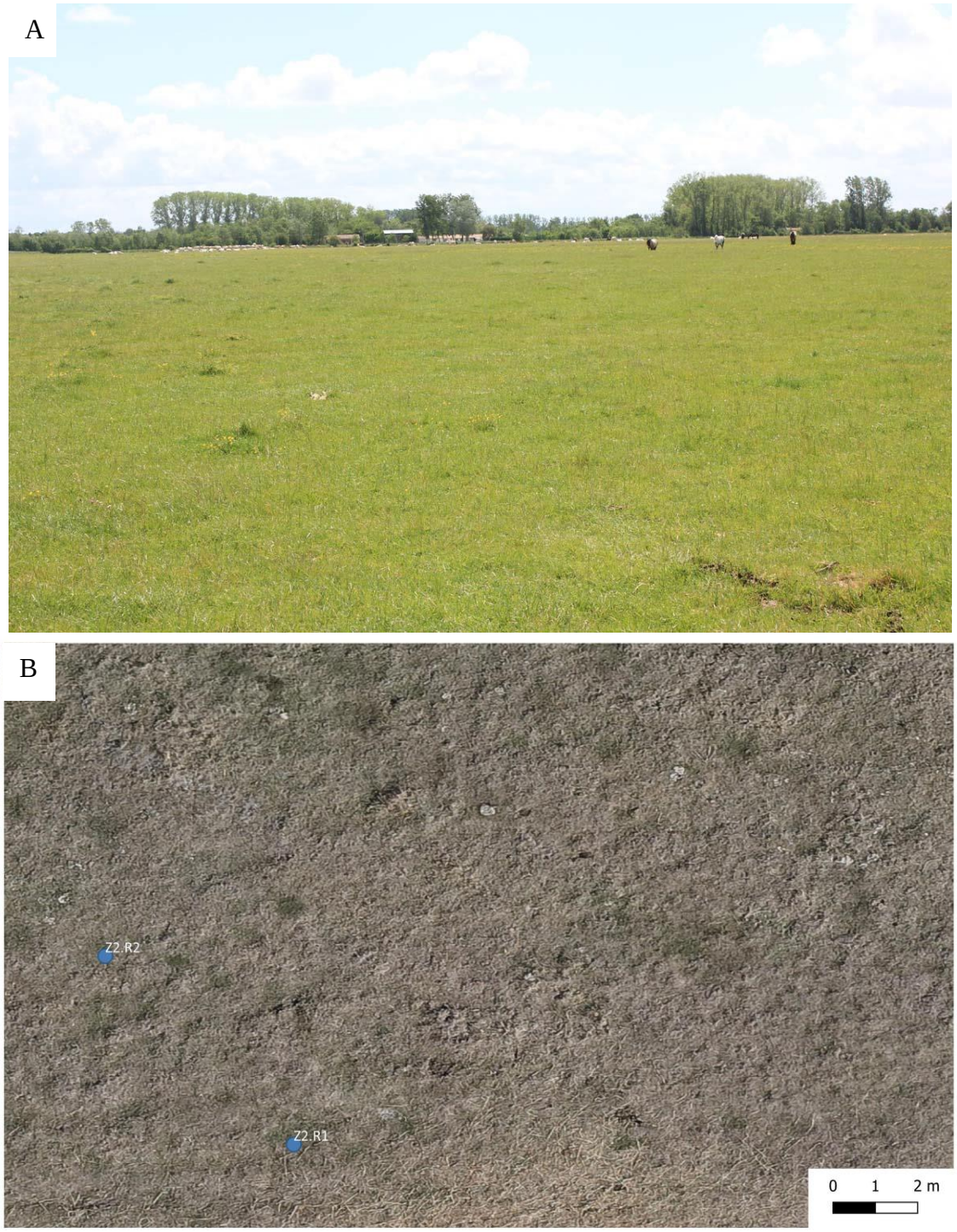


Figure 8 : Zone de prélèvement 2 sans mottureaux. A : photo terrain, B : photo drone (Source : PNR Marais Poitevin ; Drône aquitaine)

3.1.1 Description des sols

Les deux profils de sol des références 1 et 2 (Tableau 1) présentent une succession des horizons semblable mais avec quelques différences dans la profondeur d'arrivée des éléments. Les deux profils observés sur ce site de référence présentent un horizon brun à gris très foncé riche en matière organique d'environ 20 cm d'épaisseur, ensuite, des horizons gris foncé jusqu'à 70 cm et gris entre 70 cm et 120 cm de texture argileux, correspondant au bri. Les horizons présentent des traits rédoxiques (tâches de rouille) dont l'intensité augmente avec la profondeur. Quelques concrétions noires ferro-manganiques peuvent être observées. Des fragments de coquilles sont aussi présents. En profondeur, le sol devient très plastique.

Tableau 1 : Description des sols de la zone 2

<table>
<tr><th>Profondeur</th><th>Z2 R1</th><th>Z2 R2</th><th>Photo Z2 R1</th></tr>
<tr><td>0-20cm</td><td colspan="2">Gris très foncé (2.5Y 3/1)
Texture argileuse</td><td rowspan="7"> </td></tr>
<tr><td>20-40cm</td><td colspan="2">Gris foncé (2.5Y 4/1)
Calcaire : effervescence ++;
fragments : +
Texture argileuse</td></tr>
<tr><td>40-70cm</td><td colspan="2">Brun grisâtre foncé (2.5Y 4/2)
Fragments calcaires : effervescence ++
Tâches de rouille ++
Texture argileuse</td></tr>
<tr><td rowspan="2">70-90cm</td><td>Gris (2.5Y 5/1)
tâches de rouille :
+</td><td>Brun grisâtre foncé (2.5Y 4/2)
Tâches de rouille : ++
effervescence :
++</td></tr>
<tr><td colspan="2">Limite plastique à 80cm
Texture argileuse</td></tr>
<tr><td>100-120cm</td><td colspan="2">Gris (2.5Y 5/1)
Texture argileuse</td></tr>
<tr><td></td><td></td><td>Tâches de rouille : ++
effervescent : +
Nappe</td></tr>
</table>

3.1.2 Profils de teneur en eau

La couche de surface a une teneur en eau de 32 %, celle-ci diminue à environ 25% pour les profondeurs 20-40 cm et 40-60 cm et augmente ensuite vers la profondeur (Figure 9). La teneur en eau plus élevée en surface des deux profils est due une précipitation de 6,6 mm deux jours avant la campagne de terrain (20/05/2021). A partir de 80 cm de profondeur les teneurs en eau sont comprises entre la limite de plasticité (W=40%) et la limite de liquidité (70%) ce qui est cohérent avec la description du profil de sol.

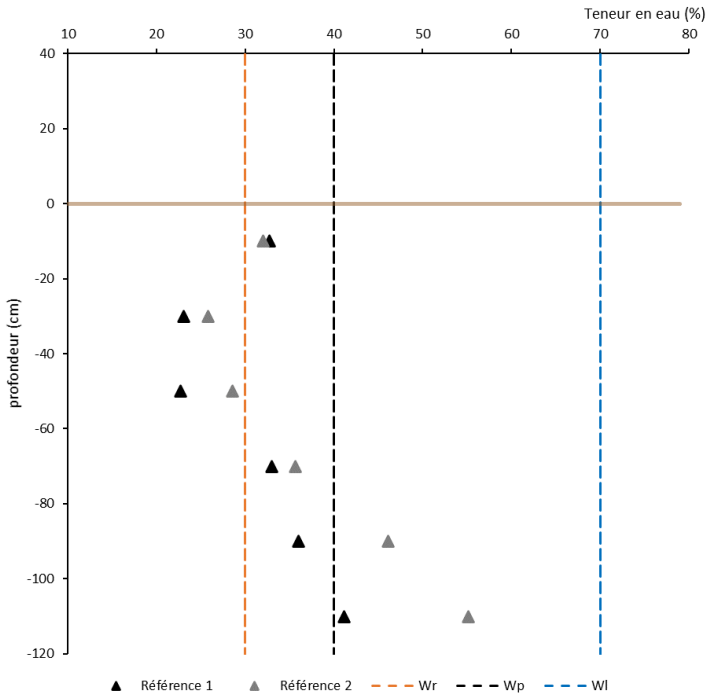


Figure 9 : Teneur en eau des sols de la zone 2
Rappel : la surface du sol au niveau des bas de mottureaux est représentée par une ligne horizontale brun clair. Wr : limite de retrait; Wp : limite de plasticité ; Wl : limite de liquidité

3.1.3 Profils de résistante de pointe

Le profil de résistance de pointe (Qd) présente des valeurs comprises entre 6 et 15 MPa pour les 10 premiers cm et celle-ci diminue progressivement avec la profondeur et atteint des valeurs d'environ 2MPa à 80 cm et inférieures 1 MPa à partir de 1m de profondeur (Figure 10).
La résistance de pointe plus élevée en surface traduit une consolidation de la surface du sol attribuée aux cycles de dessiccation et humectation. Les résistances de pointe < 1 MPa en profondeur correspondent à un comportement d'argiles très molles.
Le profil R1 présente une augmentation de la résistance de pointe à 60 cm dont l'origine n'est pas clairement identifiée. Cette augmentation de résistance non observée sur le profil R2 pourrait être associée à une hétérogénéité locale (accumulation de concrétions ou d'éléments grossiers de calcaires).

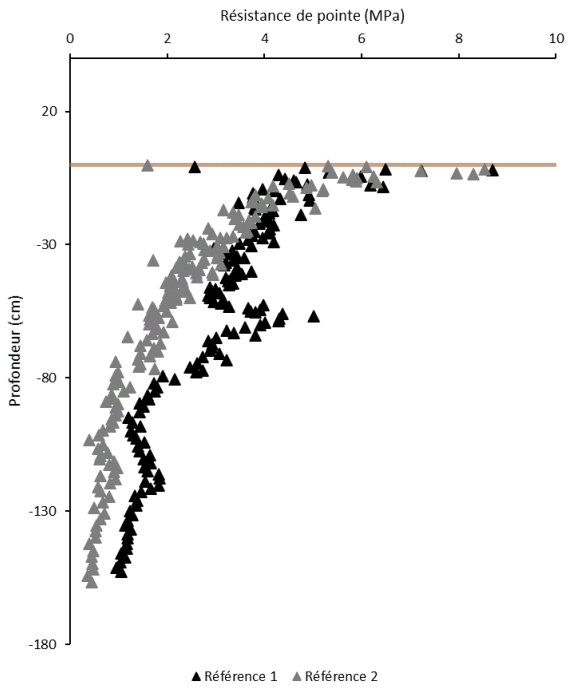


Figure 10 : Résistance de pointe des sols de la zone 2

3.1.3 Profils de conductivité électrique de l'extrait au 1/5 et de pH

La conductivité électrique au 1/5ème des sols de cette zone est comprise entre 150 et 200 µS.cm^{-1} pour le profil R1 et entre 200 et 250 µS.cm^{-1} pour le profil R2. La $CE_{1/5}$ est relativement constante avec la profondeur (Figure 11). Ces valeurs indiquent une concentration en sels solubles faible pour cette zone.

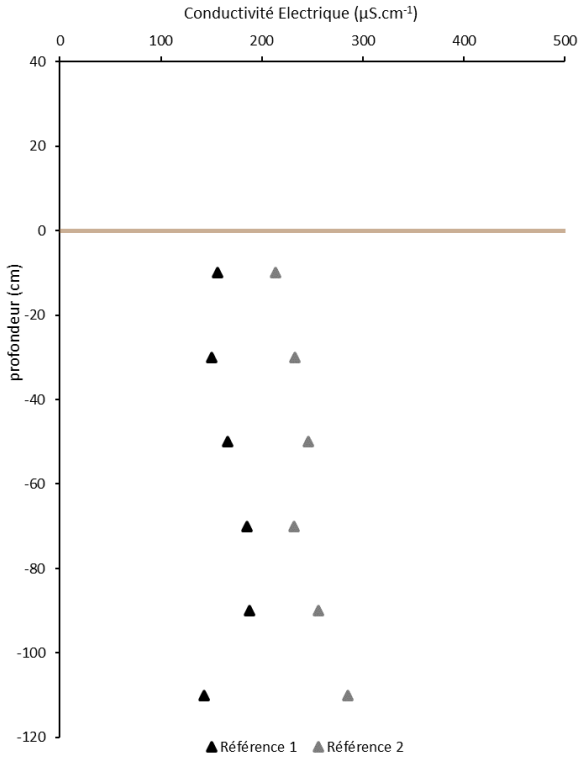


Figure 11 : $CE_{1/5}$ des sols de la zone 2

Les valeurs de pH sont comprises entre 7.5 et 7.8 pour le premier niveau et entre 8 et 8.2 entre 20 cm et 1.20 m. Ces valeurs élevées peuvent être reliées à la présence de fragments de coquilles et d'éléments grossiers calcaires observés lors de la description du sol.

3.1.4 Mesures de résistivité de surface

Les résistivités de surface sont comprises entre 30 et 50 Ω.m pour le profil 1 et d'environ 20 Ω.m pour le profil 2 (Tableau 2). Ces valeurs de résistivité indiquent un milieu plutôt conducteur électriquement.

Tableau 2 : Résistivité électrique apparente de surface des sols de la zone 2

Référence 1	Référence 2
Résistivité (Ω.m)	Résistivité (Ω.m)
33,93	21,22
55,29	17,37
45,24	26,39

3.1.5 Granulométrie et minéralogie

La granulométrie des trois horizons (0-20 cm ; 40-60 cm ; 100-120 cm) est homogène avec une teneur en fraction argileuse comprise entre 64 et 75 %, une teneur en limons entre 23 et 35 % et une teneur en sable entre 0,6 et 1,6% (Annexe 2). Le niveau intermédiaire 40-60 cm a la teneur en argile la plus élevée. La texture des trois niveaux est argile lourde ce qui est cohérent avec la description des sondages et la bibliographie (Dupuis et al., 1968, 1969 Ducloux, et Dupuis, 1977).
L'échantillon de surface contient les minéraux suivants : kaolinite, illite, chlorite, quartz, smectite, interstratifiés illite/smectite (Figure 12). La minéralogie des deux autres profondeurs est similaire (Annexe 2)
La proportion de minéraux expansibles, illite/smectite et smectite est importante dans ces échantillons. La chlorite est présente en faible proportion. Le quartz est également présente en faible quantité ce qui est courant dans la fraction argileuse. Les échantillons présentent également des traces de feldspaths et de calcite.

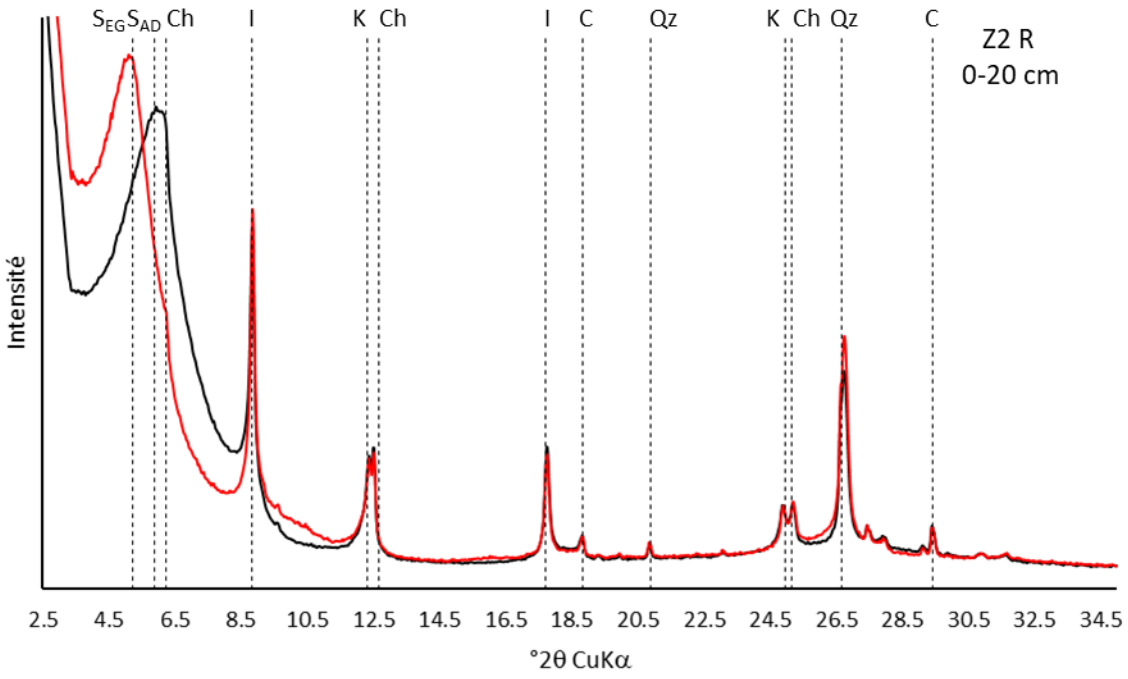


Figure 12 : Diffractogrammes de l'échantillon de surface de la zone de référence
(K : kaolinite, I : Illite, Ch : Chlorite ; S_{AD} et S_{EG} : smectite, Qz : Quartz)

3.2 Zones 1 et 4 : zone à gros mottureaux

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 (Figures 13 et 14). Les hauts de mottureaux sont généralement plats avec des rebords abrupts. Les pentes abruptes de ces mottureaux peuvent être dues aux piétinements des animaux qui créent une érosion des contours.

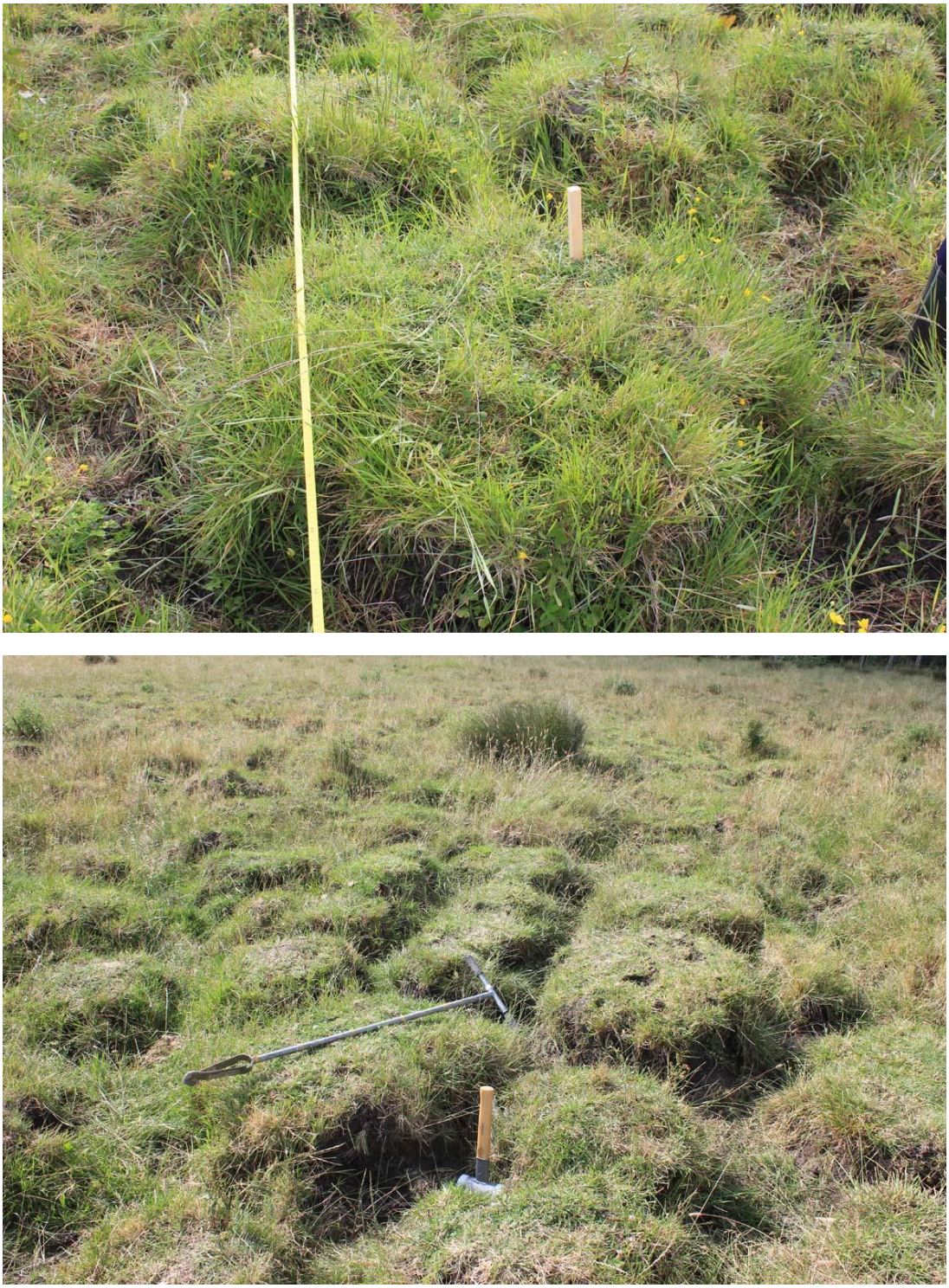


Figure 13 : Photos des mottureaux de la zone 1 (haut) et de la zone 4 (bas)

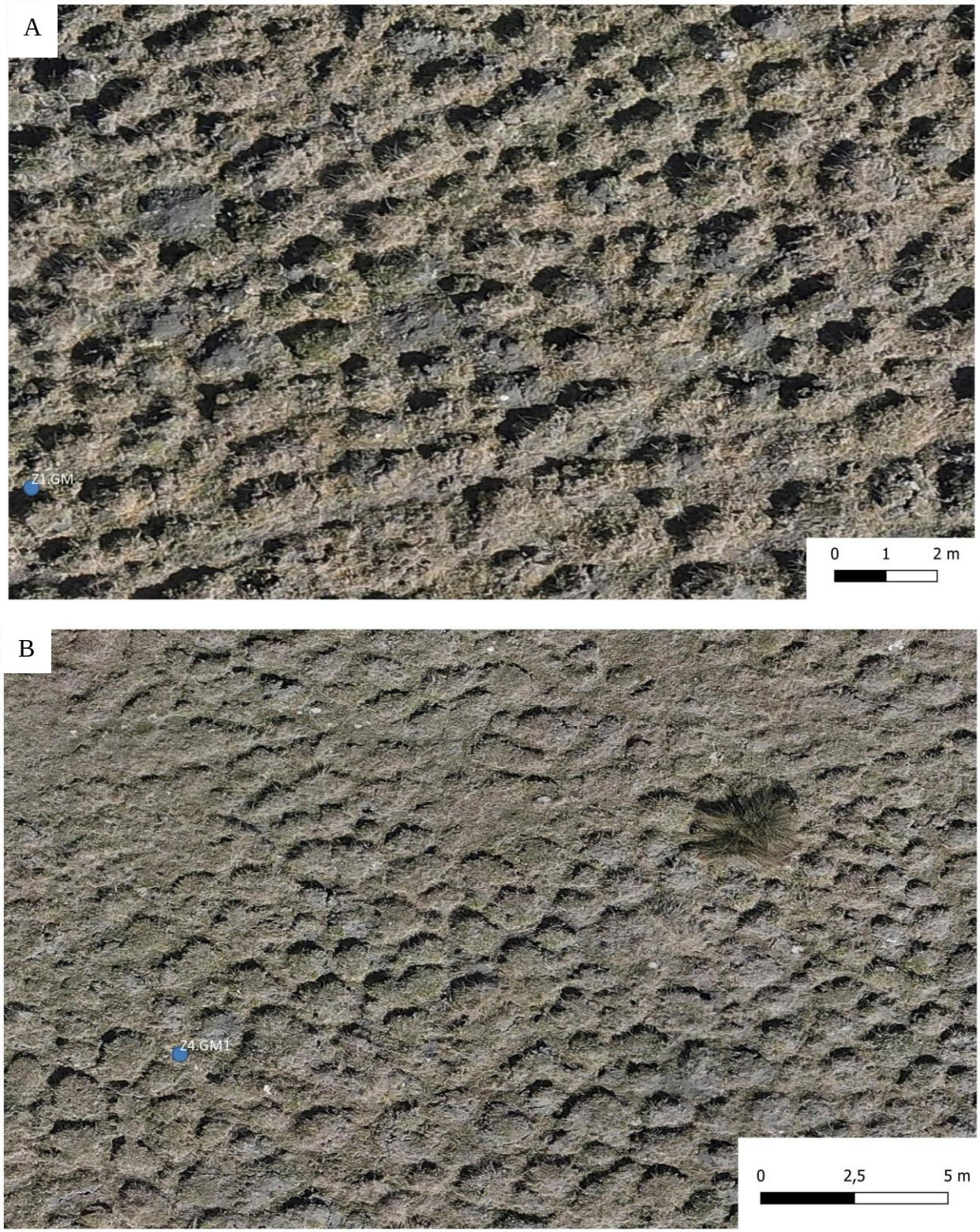


Figure 14 : Vue aérienne des mottureaux de la zone 1 (A- haut) et de la zone 4 (B- bas) (Source : PNR Marais Poitevin ; Drone Aquitaine)

3.2.1 Description des sols

A - Hauts de mottureaux

Les profils pédologiques des gros mottureaux de la zone 1 et de la zone 4 réalisés à la tarière manuelle (Tableau 3) présentent une forte similitude. La surface est constituée d'un horizon riche en matière organique noir de 20 à 25 cm. Les sondages présentent des tâches de rouille abondantes à partir de 70 à 80 cm et une effervescence à l'acide (présence de calcite) à 80 cm de profondeur. Le sol est très plastique à partir de 80 cm.

Tableau 3 : Description des profils des hauts de mottureaux des zones 1 et 4

Profondeur	Haut mottureaux – Zone 1		Haut mottureaux – Zone 4	
0-25 cm	Gris très foncé (2.5Y 3/1) MO : ++ Texture argileuse		Gris très foncé (2.5Y 3/1) MO : ++ Texture argileuse	
25-35 cm				
35-50 cm				
50-70 cm	Gris foncé (2.5Y 4/1) Texture argileuse		Gris foncé (2.5Y 4/1) Texture argileuse Effervescence : + fragments Calcaires tâches rouilles : +	
70-80 cm	Gris (2.5Y 5/1) Tâches de rouille : +++ Effervescence : + Fragments calcaires 80 cm limite plastique Texture argileuse			
80-100 cm	Gris brunâtre clair (2.5Y 6/2) Texture argileuse		Limite plastique Gris (2.5Y 5/1) Tâches de rouille : +++ Effervescence : + fragments Calcaires	
100-120cm			Gris brunâtre clair (2.5Y 6/2)	

B - Bas de mottureaux

Les bas de mottureaux sont généralement plus humides en surface que les hauts de mottureaux et parfois de l'eau stagne dans les parties plus basses ou dans les trous laissés par les pieds des vaches. Les profils de sol des bas de gros mottureaux de la zone 1 et de la zone 4 (Tableau 4) sont semblables

et la limite de liquidité est atteinte au bas du sondage (110-120 cm) rendant la récolte des échantillons difficile. Après la fin du sondage le fond du trou de tarière se remplit d'eau.

Tableau 4 : Description des profils des bas de mottureaux des zones 1 et 4

Profondeur	Bas de mottureaux – Zone 1		Bas de mottureaux – zone 4	
0-25 cm	Gris très foncé (2.5Y 3/1) texture argileuse		Gris très foncé (2.5Y 3/1) texture argileuse	
25-35 cm	Gris foncé (2.5Y 4/1) Tâches de rouille :			
35-50 cm	Gris (2.5Y 5/1) Tâches de rouille : +++ limite plastique		Brun grisâtre foncé (2.5Y 4/2) Tâches de rouille : +++	
50-70 cm	Gris (2.5Y 6/1) Tâches de rouille : +++			
70-80 cm			Limite plastique Brun grisâtre (2.5Y 5/2) Tâches de rouille : ++	
80-100 cm	Gris brunâtre clair (2.5Y 6/2) 100 = limite liquidité nappe		(Gley 1 5/1) Bleuté Limite liquidité	
100-120cm				

B – Références locales des zones 1 et 4

Les profils pédologiques des références des zones 1 et 4 (Tableau 5) sont semblables des sols des hauts et bas de mottureaux. Ces sols présentent également des tâches de rouille. Les couleurs de sols et la présence de fragments de coquilles et d'éléments grossiers calcaire varie entre les profils. Le profil de la zone de référence 4 située à proximité des mottureaux ne présente pas d'effervescence à l'acide (absence de calcite).

Tableau 5 : Description des profils des références des zones 1 et 4

Profondeur	Référence – Zone 1		Référence – zone 4	
0-25 cm	Gris très foncé (2.5Y 3/1		Noir (2.5Y 2.5/1)	
25-35 cm			Brun grisâtre foncé (2.5Y 4/2) Tâches de rouille : +	
35-50 cm	Gris très foncé (2.5Y 3/1) Tâches de rouille : ++ (à partir de 45cm) Effervescence : ++ (calcaire)			
50-70 cm			Couleur brun grisâtre (2.5Y 5/2) Tâches de rouille : +++	
70-80 cm				
80-100 cm	Limite plastique (80cm) Brun grisâtre foncé (2.5Y 4/2) Tâches de rouille : ++ racines (0-90cm)		Brun grisâtre foncé (2.5Y 4/2) non homogène	
100-120cm				

3.2.2 Profils de teneur en eau

Les profils de teneur en eau des mottureaux des deux zones (Figure 15) présentent des tendances similaires avec une différence d'environ 5 % entre les deux sites.

La teneur en eau est supérieure en surface (30-35%) qu'à une profondeur de 20 à 60 cm (25-30%) du fait de la pluviométrie les jours précédant l'échantillonnage. La teneur en eau augmente progressivement de 60 cm à 1.20 m et atteint 40 à 45% pour les hauts de mottureaux et 50-58 % pour les bas de mottureaux. A partir de 80 cm de profondeur la teneur en eau se situe entre la limite de plasticité et la limite de liquidité. Les hauts de mottureaux ont une teneur en eau inférieure à la limite de retrait, ce qui peut expliquer la présence de nombreuses fissures dans les mottureaux et de fentes de dessication entre les mottureaux.

Les échantillons prélevés dans les parties basses des gros mottureaux présentent des teneurs en eau plus importantes que ceux prélevés sur les hauts de gros mottureaux à profondeur égale. La référence locale de cette zone présente des profils de teneur en eau plus proche des hauts de gros mottureaux malgré une teneur en eau plus faible pour les 40 premiers centimètres en zone 1 (Figure 15).

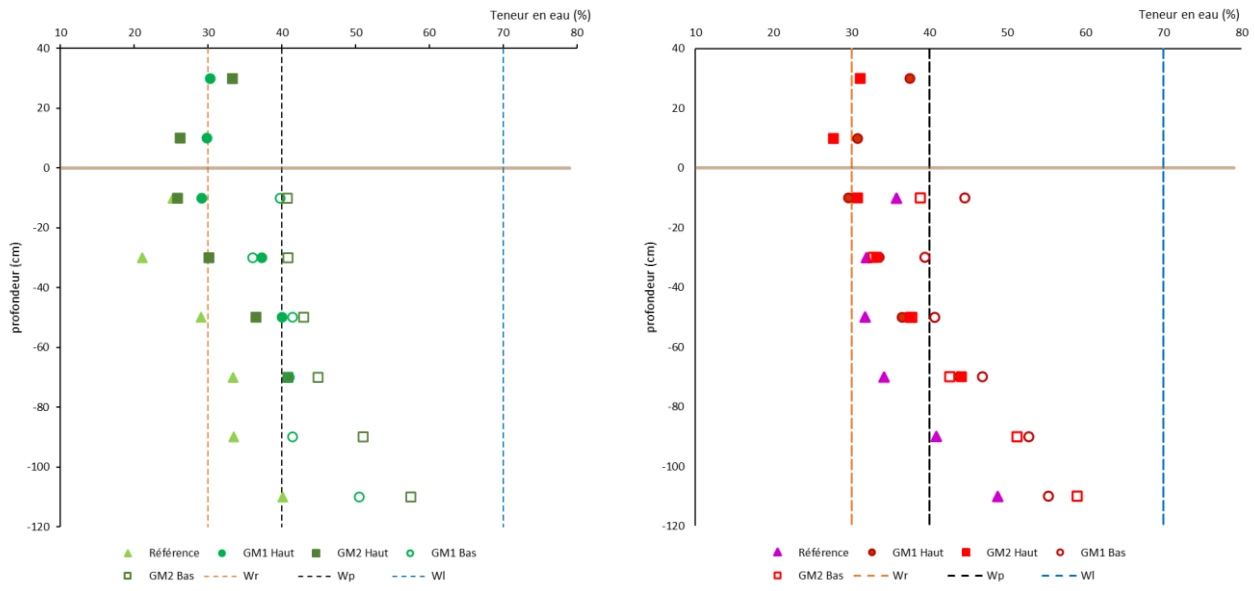


Figure 15 : Teneur en eau des sols des zones 1 et 4

3.2.3 Profils de résistante de pointe

Les hauts de mottureaux des zones 1 et 4 (Figure 16) présentent une résistance de pointe comprise entre 5 et 10 MPa jusqu'à une profondeur d'environ 40 cm et la résistance diminue ensuite avec la profondeur pour atteindre des valeurs comprises entre 1 et 2 MPa à partir de 1 m de profondeur. Les profils de résistance de pointe des bas de mottureaux et des références sont similaires avec des valeurs comprises entre 2 et 4 MPa jusqu'à 80 cm de profondeur. A partir de 80 cm de profondeur les profils des références, des hauts et des bas de mottureaux sont identiques et indiquent une argile très molle.

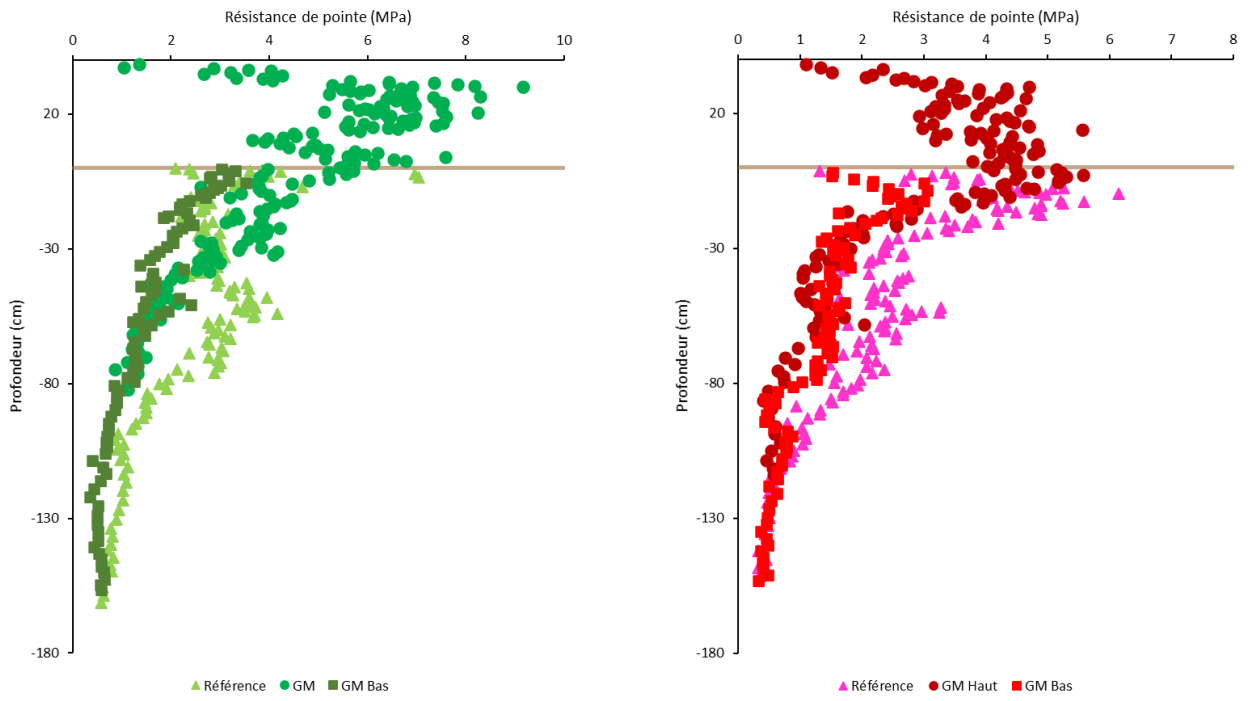


Figure 16 : Résistance de pointe sols des zones 1 et 4

La résistance de pointe plus élevée des hauts de mottureaux indique une consolidation (compacité) plus importante que les bas de mottureaux et les références. A partir de 40-50 cm de profondeur les hauts de mottureaux présentent des valeurs de résistante de pointe similaire à ceux des bas de mottureaux. Cette profondeur correspond approximativement à la hauteur du mottureau. Les profils se rejoignent lorsque la teneur en eau est comprise entre la limite de plasticité et la limite de liquidité.

3.2.4 Profils de conductivité électrique de l'extrait au 1/5 et de pH

La présente des valeurs différentes pour la zone 1 et la zone 4 (Figure 17).
La zone 1 présente des valeurs de conductivité électrique de l'extrait au 1/5ème comprises entre 0 et 400 µS.cm^{-1}. Celles de la zone 4 varient entre 0 et 2500 µS.cm^{-1}. Ces valeurs indiquent un milieu avec des concentrations en sels solubles plus importantes pour la zone 4. Les valeurs de $CE_{1/5}$ des hauts et des bas de mottureaux à profondeur égale sont proches (les écarts varient entre 5 et 50 µS.cm^{-1}). La $CE_{1/5}$ de la référence de la zone 1 est supérieure de 50 à 100 µS.cm^{-1} de celle des mottureaux.

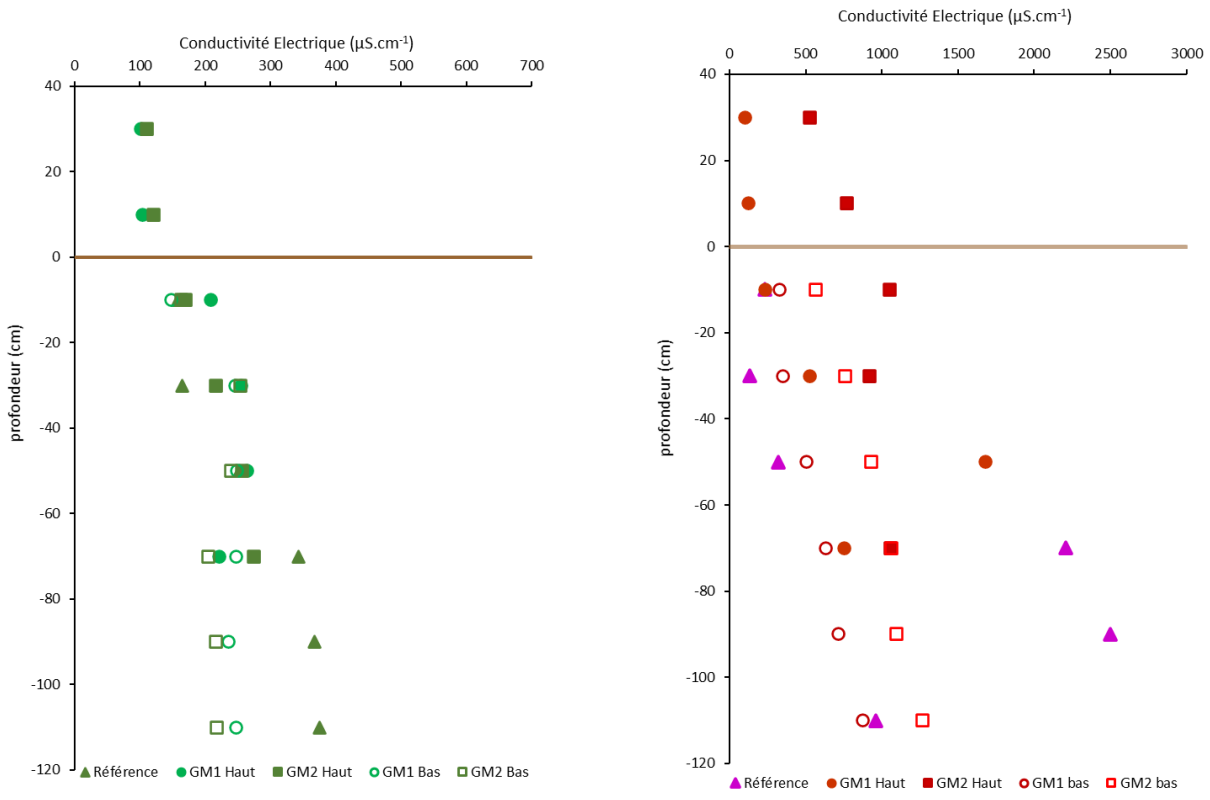


Figure 17 : $CE_{1/5}$ des sols de la zone 1

Les valeurs de pH de surface sont comprises entre 6.5 et 7.25 ce qui est proche de la neutralité. Les pH augmentent avec la profondeur et atteignent des pH très alcalins (7.5-8.5) à partir de 40 à 60 cm de profondeur (Annexe 1). Les hauts de mottureaux présentent des pH neutres en surface en deviennent alcalins à partir de 30 cm de profondeur mais qui ne dépassent pas 8.5 (limite des pH très alcalins). Les bas de mottureaux sont alcalins dès la surface mais présentent des pH inférieurs à ceux des hauts des mottureaux à profondeur égale.

3.2.5 Mesures de résistivité électrique de surface

La résistivité moyenne de surface de hauts de mottureaux de la zone 1 est supérieure (33.75 Ω.m) à celle des bas de mottureaux (21.66 Ω.m), ce qui implique une conductivité électrique plus faible des surfaces de mottureaux (Tableau 6). La référence possède une résistivité moyenne proche de celles des hauts mottureaux (34.6 Ω.m) indiquant des propriétés du sol proches entre les hauts de mottureaux et la référence. Les bas de mottureaux moins résistif (7.5 à 9 Ω.m) sont plus conducteurs que les autres profils. Cette différence est à relier à des teneurs en eau et/ou de sels dissouts plus importantes.

Tableau 6 : Résistivité électrique apparente de surface des sols des zones 1 et 4

Zone 1			Zone 4		
Haut mottureau	Bas mottureau	Référence locale	Haut mottureau	Bas mottureau	Référence locale
Résistivité (Ω.m)	Résistivité (Ω.m)	Résistivité (Ω.m)	Résistivité (Ω.m)	Résistivité (Ω.m)	Résistivité (Ω.m)
27,90	21,36	28,53	16,94	7,56	23,50
38,83	17,86	41,34	17,54	7,21	29,66
34,56	25,76	33,93	19,65	9,49	30,91

3.2.5 Granulométrie et minéralogie

La granulométrie a été réalisée sur trois horizons (0-20 cm ; 40-60 cm ; 100-120 cm) des mottureaux des zones 1 et 4.

La répartition des trois fractions est homogène pour les 6 échantillons avec une teneur en fraction argileuse comprise entre 55 et 69 %, une teneur en limons entre 29 et 42 % et une teneur en sable entre 0.5 et 2,25 % (Annexe 1). Les deux niveaux profonds 100-120 cm présentent la teneur en argile la plus faible (55-58%) et la teneur en limons la plus élevée (41-42%). Le niveau 100-120 cm du mottureau de la zone 1 a la teneur en sable la plus élevée (2,25 %). La texture des 6 échantillons est argile lourde ce qui est cohérent avec la description des sondages et la bibliographie (Dupuis et al., 1968, 1969 ; Ducloux et Dupuis, 1977).

Les échantillons de surface des zones 1 et 4 présentent une minéralogie similaire avec la présence de kaolinite, illite, chlorite, quartz, smectite, interstratifiés illite/smectite (Figure 18). La minéralogie est similaire en profondeur (Annexe 2).

La proportion de minéraux expansibles, illite/smectite et smectite est très importante dans ces échantillons. La chlorite est présente à l'état de traces dans la zone 1 et en très faible proportion dans la zone 4. Le quartz est également présente en faible quantité ce qui est courant dans la fraction argileuse. Les échantillons présentent également des traces de feldspaths et des traces de calcite (Figure 18).

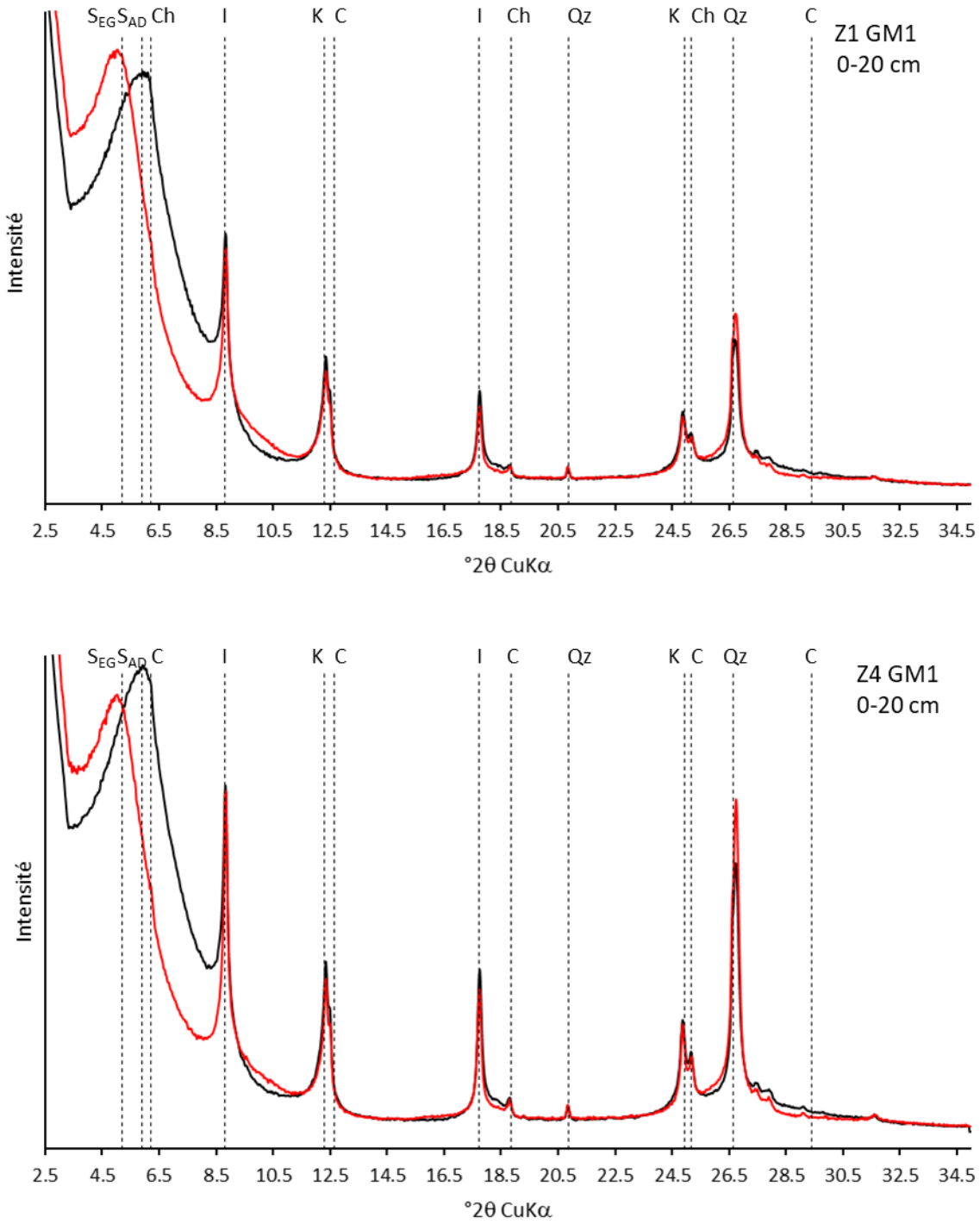


Figure 18 : Diffractogrammes des échantillons de surface des zones 1 et 4
(K : kaolinite, I : Illite, Ch : Chlorite ; S_{AD} et S_{EG} : smectite, Qz : Quartz)

3.3 Zone 3 : zone à petits mottureaux

La zone 3 se situe dans une Baisse, au Nord du marais (Figures 19 et 20). Elle est constituée d'un transect de 6 mesures qui traverse 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.

Figure 19 : Photos des points de prélèvements dans la zone 3 au niveau de la baisse de l'achenal.

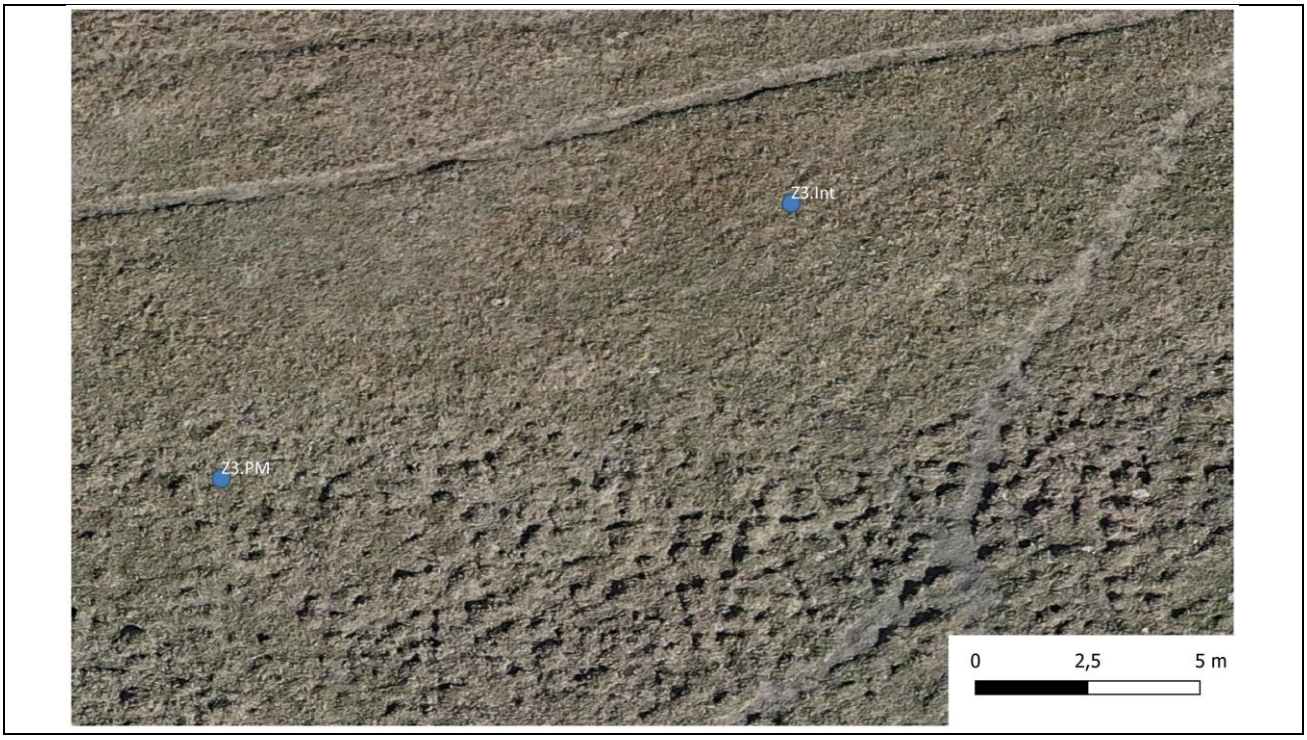


Figure 20 : Vue aérienne des points de prélèvements dans la zone 3.
(Source : PNR Marais Poitevin ; Drone Aquitaine)

3.3.1 Description des sols

Les profils décrits sur cette zone pour les hauts et les bas de mottureaux (Tableau 7) sont similaires et présentent lit sableux avec des coquilles à 80 - 90cm de profondeur et des tâches de rouille à des profondeurs similaires. Le profil décrit pour la référence de la zone 3 présente des couleurs similaires aux autres profils et l'apparition de tâches de rouille à 40cm (Tableau 8). Le sol devient plastique plus proche de la surface (40 cm) et liquide à 110 cm.

Tableau 7 : Description des profils de la zone 3

Profondeur	Haut de petit mottureau		Bas de petit mottureau	
0-20 cm	Brun grisâtre très foncé (2.5Y 3/2)		Gris très foncé (2.5Y 3/1)	
20-40 cm				
40-60 cm	Gris foncé (2.5Y 4/1) Tâches de rouille : +		Gris foncé (2.5Y 4/1) Tâches de rouille : +	
60-80 cm				
80-90 cm	Niveau sableux, coquilles à 80 cm Gris brunâtre clair (2.5Y 6/2)		Niveau sableux, coquilles à 90 cm Gris brunâtre clair (2.5Y 6/2)	
90-100 cm	Niveau plastique Brun grisâtre (2.5Y 5/2) Tâches de rouille : ++		Niveau plastique Brun grisâtre (2.5Y 5/2) Tâches de rouille : ++ Nappe	
100-120cm				

Tableau 8 : Description du profil de référence de la zone 3

Profondeur	Référence locale
0-20cm	Gris très foncé (2.5Y 3/1)
20-40cm	
40-60cm	Limite plastique. Brun grisâtre foncé (2.5Y 4/2) Tâches de rouille : +
60-80cm	
80/90cm	80 cm. Niveau sableux, coquilles Gris brunâtre clair (2.5Y 6/2)
90-100cm	Brun grisâtre (2.5Y 5/2). Tâches de rouille : +++ Nappe / limite liquide

3.3.2 Profils de teneur en eau

Les profils de teneur des sols de la zone 3 sont similaires avec une tendance à l'augmentation de la teneur en eau avec la profondeur (Figure 20). La surface des bas de mottureaux présente une teneur en eau plus élevée (47 %) que les autres échantillons (32%). Ensuite les profils de teneur en eau sont proches (Figure 21). Lors de la description pédologique de l'eau pouvait être présente en surface dans les zones les plus basses du chenal des Hollandais. La référence située sur le côté du chenal a une

teneur en eau plus importante que les hauts et bas de mottureaux. La zone intermédiaire est proche de la référence mais la teneur en eau est plus faible.

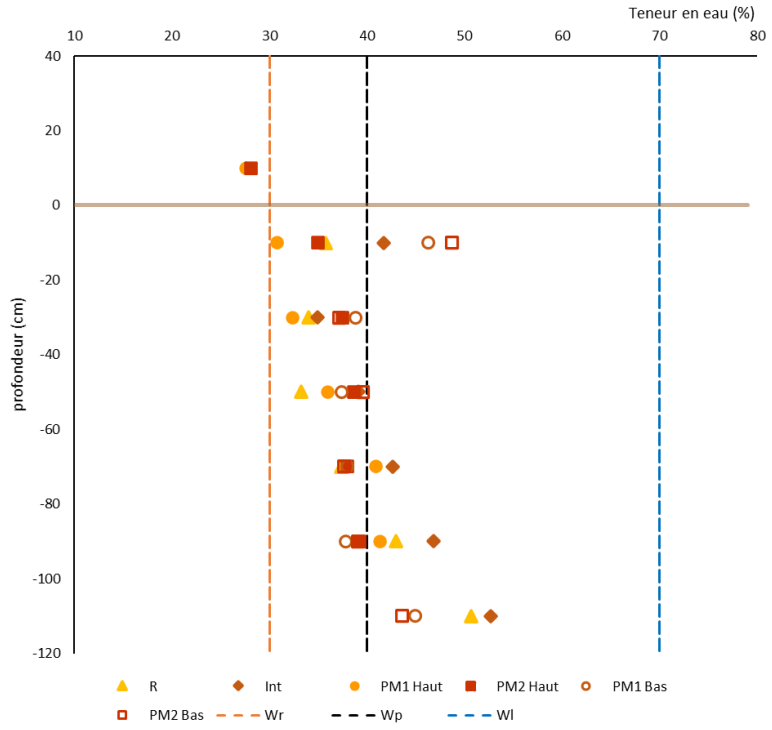


Figure 21 : Teneur en eau des sols de la zone 3

3.3.3 Profils de résistante de pointe

Les résistances de pointe des sols de la zone 3 présentent des valeurs comprises entre 2 et 10 MPa de 0 à 10 cm ; entre 2 et 4 MPa pour les hauts de mottureaux et la référence et 1 et 4 MPa pour les bas de mottureaux entre 10 et 60 cm de profondeur (Figure 22). Les mottureaux et la référence présentent une augmentation des valeurs à environ 60 cm de profondeur. Les valeurs se stabilisent (0.95 à 1.8 MPa) et deviennent homogènes pour les différents sols à partir de 80 cm de profondeur et indiquent la présence d'argiles très molle (< 1 MPa) et d'argiles molle à ferme (entre 1 et 2 MPa).
La résistance de pointe faible en profondeur peut être reliée à la teneur en eau qui augmente en profondeur.
Le profil en zone intermédiaire présente une résistance de pointe de surface (0-10 cm) comprise entre 4 et 11 MPa (Figure 22) qui indique une compacité plus importante que pour les mottureaux et la référence. La zone intermédiaire est décrite dans la bibliographie comme plus compacte du fait du passage important des animaux (Decoene comm. pers.).

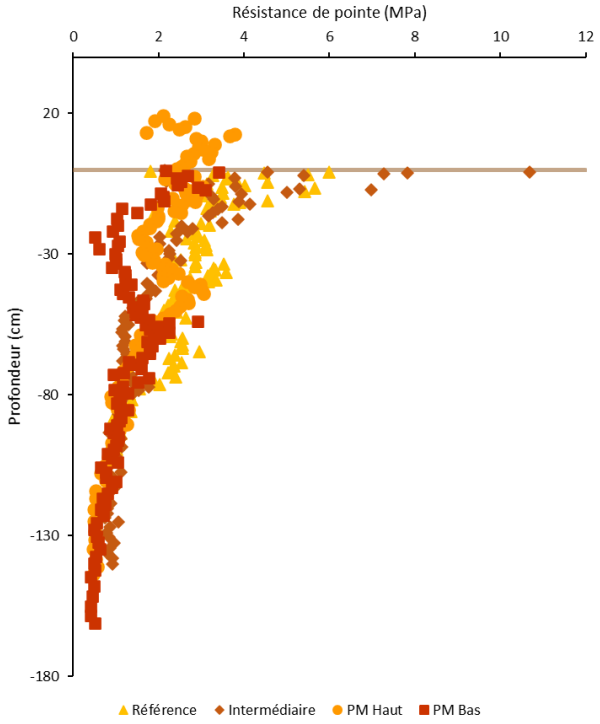


Figure 22 : Résistance de pointe des sols de la zone 3

3.3.3 Profils de conductivité électrique de l'extrait au 1/5 et de pH

La conductivité électrique de l'extrait au 1/5ème des mottureaux de la zone 3 est comprise entre 80 et 450 µS.cm^{-1}. La $CE_{1/5}$ des bas de mottureaux est plus faible que celle des hauts (différence de 150 à 300 µS.cm^{-1}) jusqu'à 40 cm de profondeur (Figure 23). La référence et la zone intermédiaire présentent des valeurs de $CE_{1/5}$ plus élevées comprises entre 300 et 2700 µS.cm^{-1} qui augmentent rapidement entre 50 et 70 cm de profondeur. Cette augmentation abrupte indique la présence de plus fortes concentrations en sels solubles dans ces deux profils.

Les valeurs de pH des 20 premiers sont comprises entre 6.5 et 7.25 (Annexe 1). Les pH augmentent à partir de 30 cm et deviennent très alcalins (7.5-8.5) à partir de 40 à 60 cm de profondeur. Le profil de la référence et de la zone intermédiaire présentent des pH moins alcalins avec des valeurs comprises entre 6.7 et 7 en surface et 8.09 en profondeur. Les bas de mottureaux ont des pH moins alcalins que les hauts de mottureaux avec des valeurs de pH comprises entre 6.6 et 8.4.

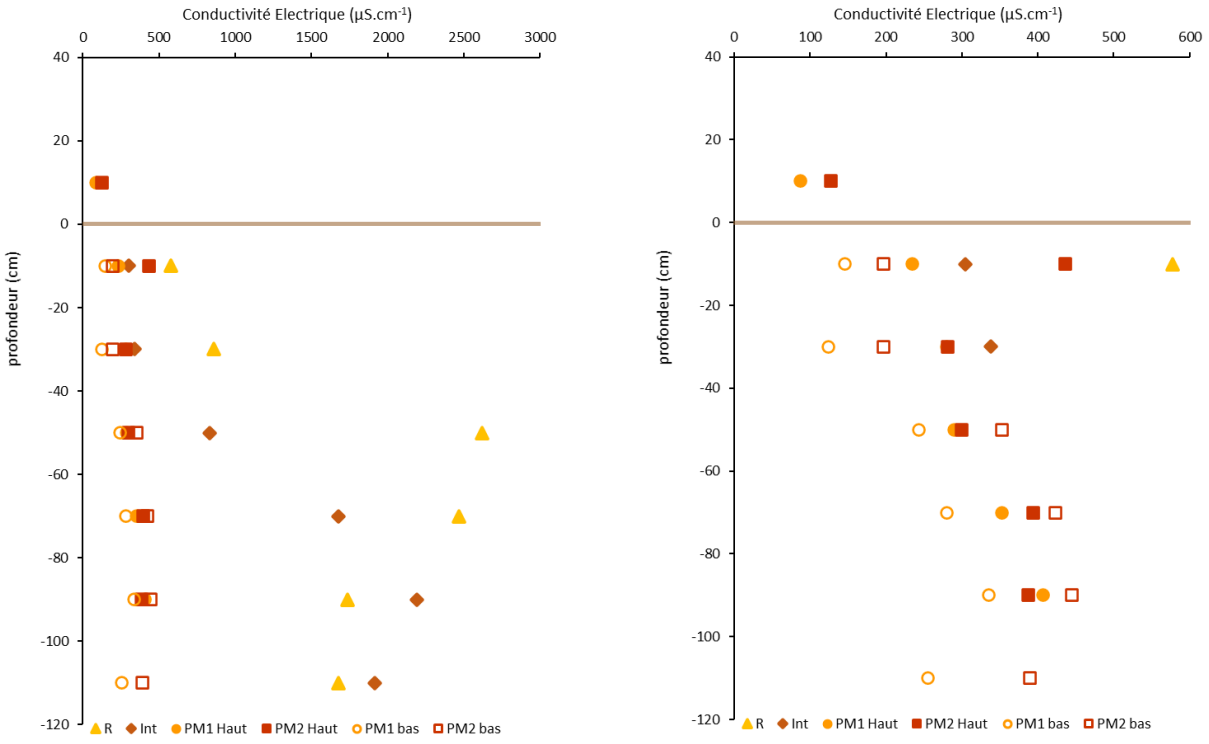


Figure 23 : $CE_{1/5}$ sols de la zone 3

3.3.4 Mesures de résistivité électrique de surface

Il n'a pas été possible d'effectuer des mesures sur les hauts de mottureaux compte tenu de leur faible surface.

La résistivité moyenne de surface de bas de mottureaux de la zone 3 est inférieure (10.70 Ω.m en moyenne) à celle de la référence locale (19.62 Ω.m en moyenne) et de la zone intermédiaire (11.93 Ω.m en moyenne) ce qui implique une conductivité électrique plus forte des bas de mottureaux (Tableau 9). Les bas de mottureaux moins résistifs sont donc plus conducteurs que les autres profils à mettre en relation avec des teneurs en eau et/ou de sels dissouts plus importantes.

Tableau 9 : Résistivité électrique de surface de la zone 3

Bas de mottureau	Zone intermédiaire	Référence locale
Résistivité (Ω.m)	Résistivité (Ω.m)	Résistivité (Ω.m)
10,46	14,58	24,00
8,95	9,80	11,50
12,70	11,42	23,37

3.3.5 Granulométrie et minéralogie

La granulométrie a été réalisée sur la zone de référence et sur un mottureau pour les 0-20 cm ; 40-60 cm ; 100-120 cm de la zone 3 (Annexe 1). La teneur en fraction argileuse est comprise entre 54 et 66 %, celle des limons varie entre 34 et 44 % et les sables constituent de 0,45 à 2,2 % de la masse du sol. La granulométrie est similaire pour la référence et le mottureau. La zone 3 est celle qui a la plus faible

proportion de fraction argileuse du marais. Une proportion d'argile plus faible pourrait être un facteur expliquant la taille plus réduite des mottureaux. La texture des 6 échantillons est argile lourde ce qui est cohérent avec la description des sondages et la bibliographie (Dupuis et al., 1968, 1969).
Les échantillons de surface de la zone de référence et du mottureau présentent une minéralogie similaire avec la présence de kaolinite, illite, chlorite, quartz, smectite, interstratifiés illite/smectite (Figure 24). La minéralogie est similaire en profondeur (Annexe 2). La proportion de minéraux expansibles, illite/smectite et smectite est importante dans ces échantillons. La chlorite et le quartz sont présents en faible proportion et des feldspaths sont présents à l'état de traces de feldspaths. La calcite est présente à l'état de traces sauf dans l'échantillon de la profondeur 40-60 cm du mottureau (Figure 24).

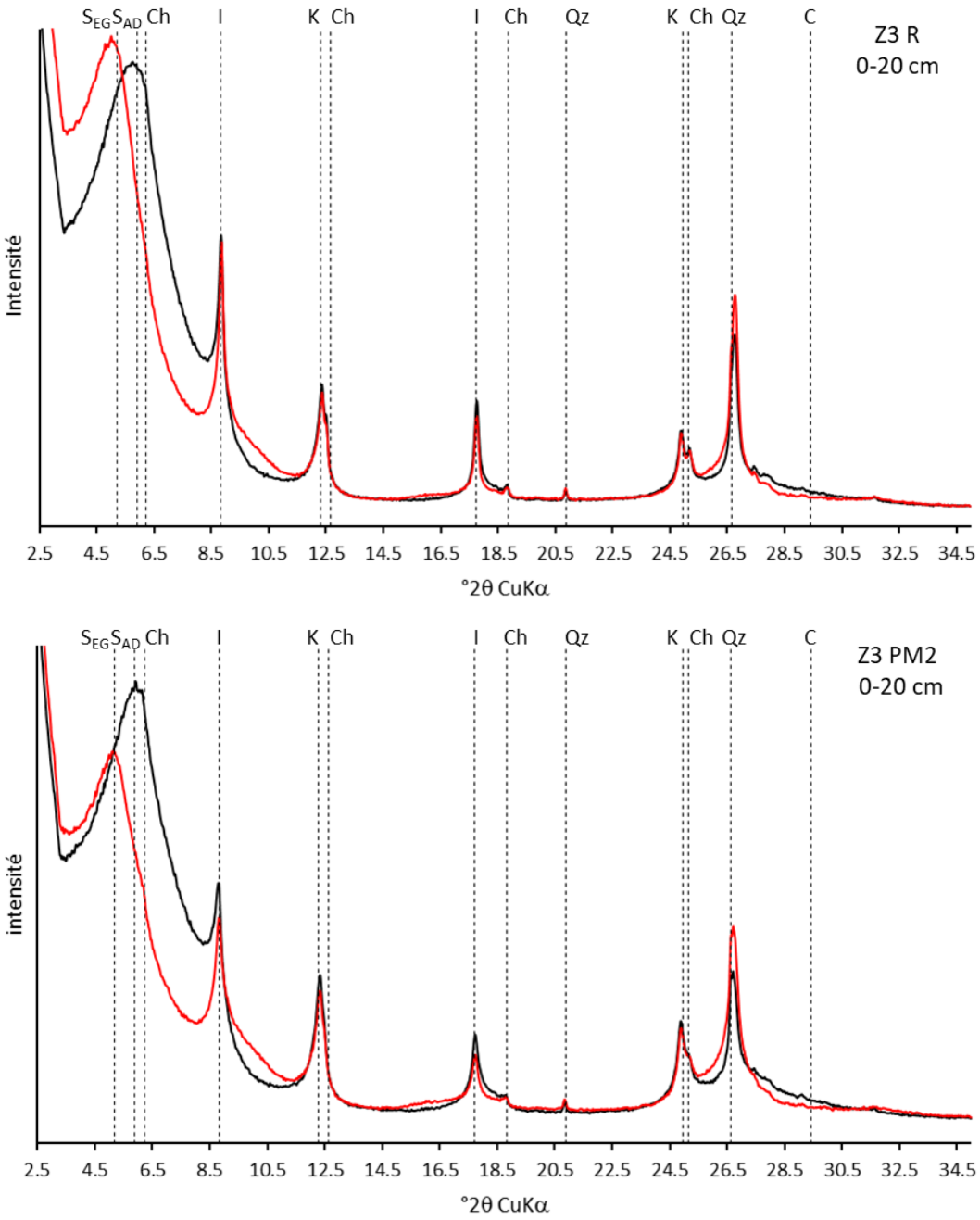


Figure 24 : Diffractogrammes des échantillons de surface de la zone 3
(K : kaolinite, I : Illite, Ch : Chlorite ; S_{AD} et S_{EG} : smectite, Qz : Quartz)

3.4 Zone 5 : zone à mottureaux en boules

La zone 5 se situe l'ouest du Communal (Figures 25 et 26) dans une zone de végétation haute et dense. Les mottureaux mesurent entre 15 et 35 cm de haut et ont une forme « en boules ».

Figure 25 : Photos de mottureaux en boules de la zone 5

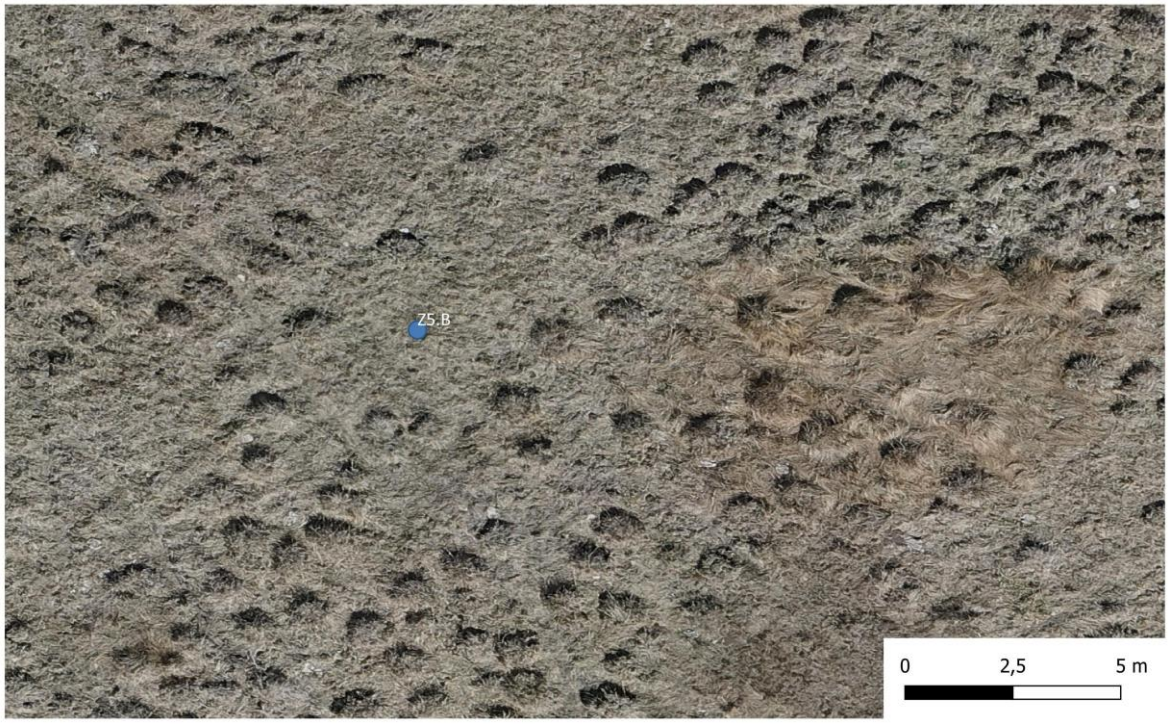


Figure 26 : Vue aérienne des mottureaux en boules de la zone 5
(Source : PNR Marais Poitevin ; Drone Aquitaine)

3.4.1 Description des sols

Les profils réalisés sur le haut et le bas des mottureaux sont similaires. La surface est constituée d'un horizon riche en matière organique noir d'environ 15-20 cm (Tableau 10). Les sondages présentent des tâches de rouille abondantes à partir de 30 à 50 cm et une effervescence à l'acide (présence de calcite) à 80 cm de profondeur. Le sol est très plastique à partir de 70-80 cm (Tableau 10). Les sols de la référence locale sont également très proches (Tableau 11).

Tableau 10 : Description du profil de référence de la zone 5

Profondeur	Hauts des mottureaux en boules		Bas des mottureaux en boules	
0-20 cm	Brun grisâtre très foncé (2.5Y 3/2)		Brun olive foncé (2.5Y 3/3)	
20-30 cm	Noir (2.5Y 2.5/1)		Brun grisâtre foncé (2.5Y 4/2) Tâches de rouille : +	
30-50 cm				
50-60 cm	Gris foncé (2.5Y 4/1) Tâches rouille +			
60-80 cm			Niveau plastique Brun grisâtre (2.5Y 5/2) Tâches de rouille : ++ Nappe	
80-100 cm	80cm Niveau plastique Brun grisâtre (2.5Y 5/2) Tâches de rouille : ++ Effervescence : + fragment			
100-120cm	Niveau plastique Brun grisâtre (2.5Y 5/2) Tâches de rouille : ++			

Tableau 11 : Description du profil de référence de la zone 5

Profondeur	Référence	
0-15 cm	Brun très foncé (7.5Y 2.5/2)	
15-30 cm	Noir (2.5Y 2.5/1)	
30-60 cm	Brun grisâtre foncé (2.5Y 4/2) Tâches de rouille : ++ Fragments calcaires	
50-60 cm		
60-80 cm	Brun grisâtre foncé (2.5Y 4/2) Limite plastique Tâches de rouille : +++	
80-100 cm	Gris brunâtre clair (2.5Y 6/2) Tâches de rouille : +++ Nappe / limite liquide	
100-120cm		

3.4.2 Profils de teneur en eau

La teneur en eau de la couche 0-20 cm varie de 28 à 37 % selon les sols, elle est comprise entre 21.5 et 28 % entre 20 et 50 cm et augmente régulièrement avec la profondeur pour atteindre 50 à 65 % en bas du profil (Figure 27). Le niveau de surface est plus humide du fait de précipitation les jours

précédant l'échantillonnage. Les sondages réalisés en bas des mottureaux présentent une teneur en eau plus importante que ceux réalisés sur les hauts (écarts de 5 à 15%). Le profil de références présente un profil de teneur en eau similaire à celui des bas de mottureaux.

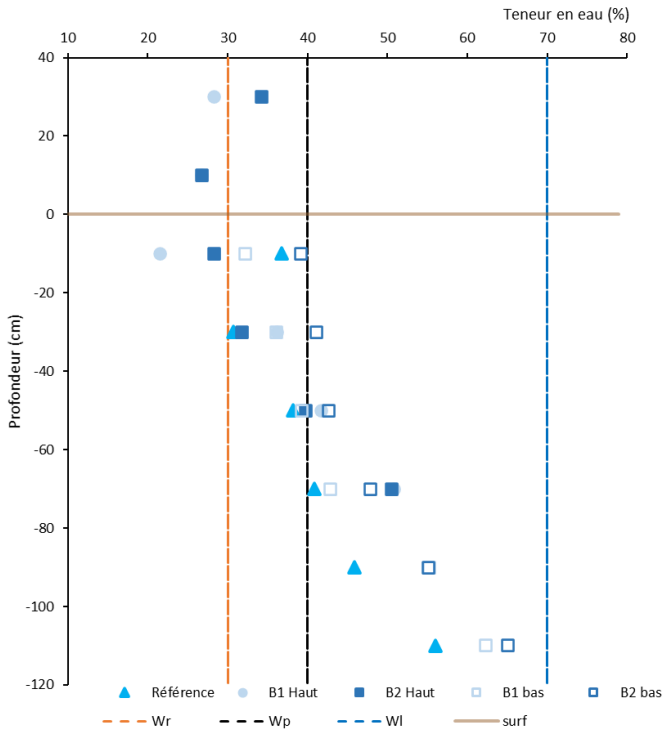


Figure 27 : Teneur en eau des sols de la zone 5

3.4.3 Profils de résistante de pointe

Les résistances de pointe des sols de la zone 5 diminuent globalement avec la profondeur. La référence et le haut de mottureaux présentent des valeurs de résistance qui augmentent à 4 MPa à environ 60-70 cm de profondeur (Figure 28).

Les bas de mottureaux présentent des valeurs de résistance de pointe comprises entre 1.6 à 2.55 MPa en surface et de 0.35 MPa en profondeur qui plus faible que celles des hauts de mottureaux (Figure 28). Ces valeurs correspondent à un sol à argile molle à ferme en surface et à des argiles très molle en profondeur. Les hauts de mottureaux présentent un profil de résistance de pointe similaire à celui de la référence (Figure 28).

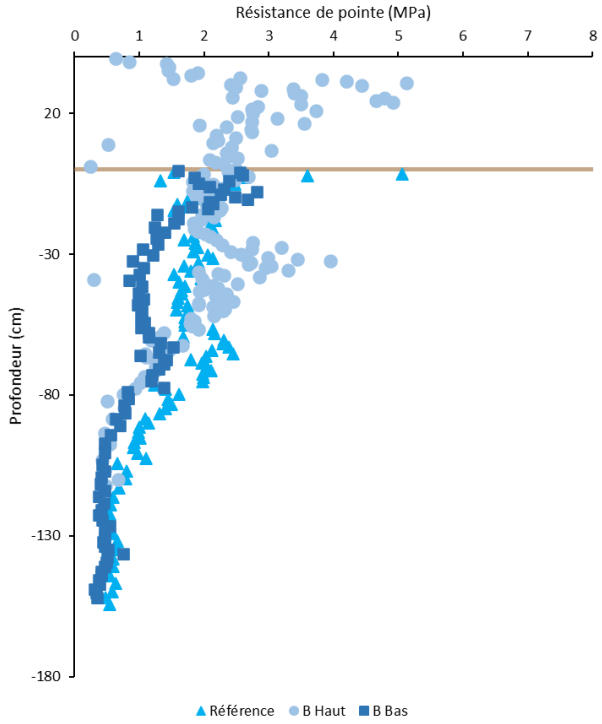


Figure 28 : Résistance de pointe des sols de la zone 5

3.4.4 Profils de conductivité électrique de l'extrait au 1/5 et de pH

Les conductivités électriques au 1/5ème mesurées sur les échantillons de la zone 5 varient de 150 à 4500 µS.cm^{-1} et présentent les valeurs les plus élevées du marais communal (Figure 29).

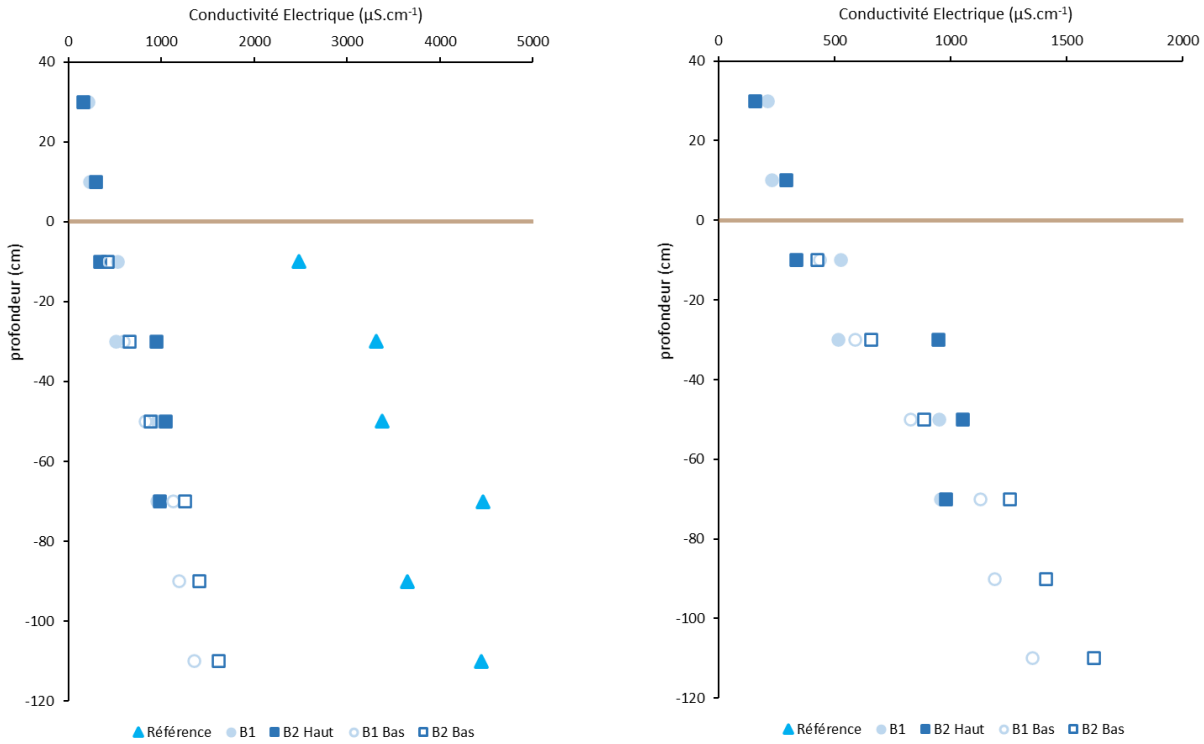


Figure 29 : $CE_{1/5}$ des sols de la zone 5

La conductivité électrique augmente avec la profondeur pour les trois zones de prélèvement. Les échantillons des hauts et bas de mottureaux présentent des profils de $CE_{1/5}$ similaires qui augmentant régulièrement de 150 µS.cm^{-1} à 1620 µS.cm^{-1} en profondeur (Figure 28).
La référence choisie présente des valeurs de CE très supérieures à celle des mottureaux qui varient de 2480 µS.cm^{-1} en surface à 4450 µS.cm^{-1} à 120 cm de profondeur, soit environ des valeurs trois fois plus élevées que celles des autres zones. Cette zone présente de plus fortes concentrations en sels solubles que les autres zones, notamment pour le profil de référence (Figure 28).
Les pH des sols de la zone 5 sont proches de la neutralité de 0 à 20 cm et les valeurs augmentent très rapidement à 8 – 8,5 à partir de 20 à 40 cm selon les sondages. Les bas de mottureaux présentent des valeurs de pH supérieures à celles des hauts de mottureaux (Annexe 1).

3.3.4 Mesures de résistivité électrique de surface

La zone 5 présente de forts contrastes de résistivité apparente moyenne en fonction des structures étudiées. Les hauts de mottureaux ont une résistivité apparente moyenne de 38,8 Ω.m alors que celle des bas de mottureaux est de 8,4 Ω.m) (Tableau 12). La zone de référence présente une résistivité apparente très faible (2,0 Ω.m). Ces résultats sont cohérents avec les mesures de $CE_{1/5}$ du fait de la relation inverse entre la conductivité et la résistivité (une forte résistivité électrique correspond à une faible conductivité). Ces résultats indiquent également une forte hétérogénéité spatiale (échelle métrique à décamétrique) de la teneur en sels solubles dans la zone 5.

Tableau 12 : Résistivité de surface des sols de la zone 5

Haut de mottureau	Bas de mottureau	Référence locale
Résistivité (Ω.m)	Résistivité (Ω.m)	Résistivité (Ω.m)
37,57	8,75	1,91
32,80	8,95	2,29
46,12	7,58	1,94

3.4.5 Granulométrie et minéralogie

La granulométrie des trois échantillons (0-20 cm ; 40-60 cm ; 100-120 cm) est homogène. Les sols de la zone 5 sont ceux qui ont la fraction argileuse la plus élevée du communal avec des teneurs comprises entre 74 et 79 % (Annexe 1). La teneur en limons varie entre 20 et 25 % et la teneur en sable est faible de 0,3 et 0,86%. La texture des trois niveaux est argile lourde ce qui est cohérent avec la description des sondages et la bibliographie (Dupuis et al., 1968, 1969, Ducloux et Dupuis, 1977).
L'échantillon de surface est composé de : kaolinite, illite, chlorite, quartz, smectite, interstratifiés illite/smectite (Figure 30). Les échantillons de profondeurs contiennent les mêmes minéraux (Annexe 2). La proportion de minéraux expansibles, illite/smectite et smectite est importante dans ces échantillons. La chlorite est présente en très faible proportion. L'illite est présente en plus forte proportion dans l'échantillon 0-20 cm. Le quartz est également présente en faible quantité ce qui est courant dans la fraction argileuse. Les échantillons présentent également des traces de feldspaths et de calcite.

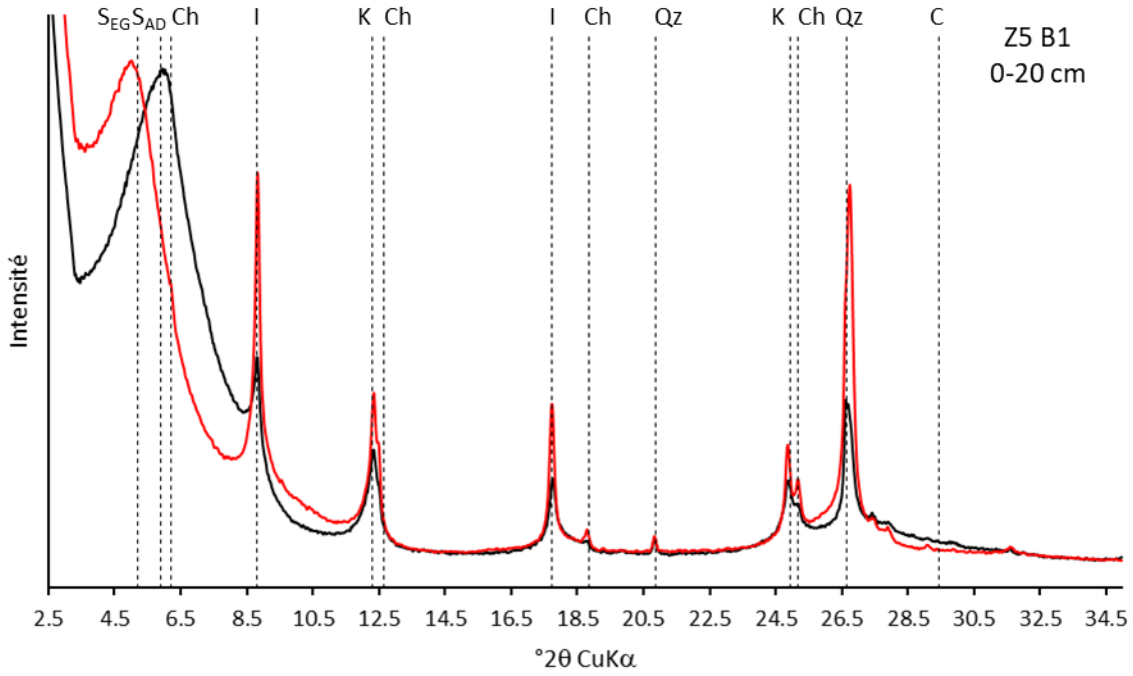


Figure 30 : Diffractogrammes des échantillons de surface la zone 5
(K : kaolinite, I : Illite, C : Chlorite ; S_{AD} et S_{EG} : smectite, Qz : Quartz)

4. DISCUSSION

4.1 Description des sols

Les sondages réalisés dans les différentes zones sont similaires avec une couche superficielle brun à noir du liée à la décomposition et l'incorporation de la matière organique. La couleur devient grise à partir de 20 à 40 cm et des tâches de rouille sont présentes entre 40 cm et 80 cm indiquant un battement de la nappe superficielle. A partir de 80-100 cm de profondeur le sol est gris sans tâches de rouille avec quelques zones de couleur bleutée indiquant la présence permanente de la nappe superficielle. La texture est argileuse à argileuse lourde sans variations importantes le long du profil comme décrit dans la littérature (Dupuis et al., 1968, 1969, Ducloux et Dupuis, 1977). Des passages plus sableux sont rencontrés dans quelques sondages liés à l'hétérogénéité de la sédimentation. Le sol devient plastique à partir de 80 cm de profondeur du fait de la forte teneur en eau et la présence d'une nappe superficielle. Certains profils présentent des éléments grossiers de calcaire et des fragments de coquille observés lors de la description des sondages et responsables de l'effervescence à l'acide chlorhydrique.

La texture des échantillons est argileuse lourde et relativement homogène sur le communal du Poiré-sur-Velluire (Figure 31). la fraction argileuse + limons fins (soit < 20 µm) représente de 80 à 95 % de la fraction minérale du sol. La zone 5 a une proportion de fraction argileuse plus élevée que les autres zones. Cette relative homogénéité est liée aux conditions de sédimentation lors de la formation du marais. La présence de lits plus sableux et/ou les variations de proportions de limons et d'argiles traduisent des variations de conditions de dépôts de sédiments fluvio-marins.

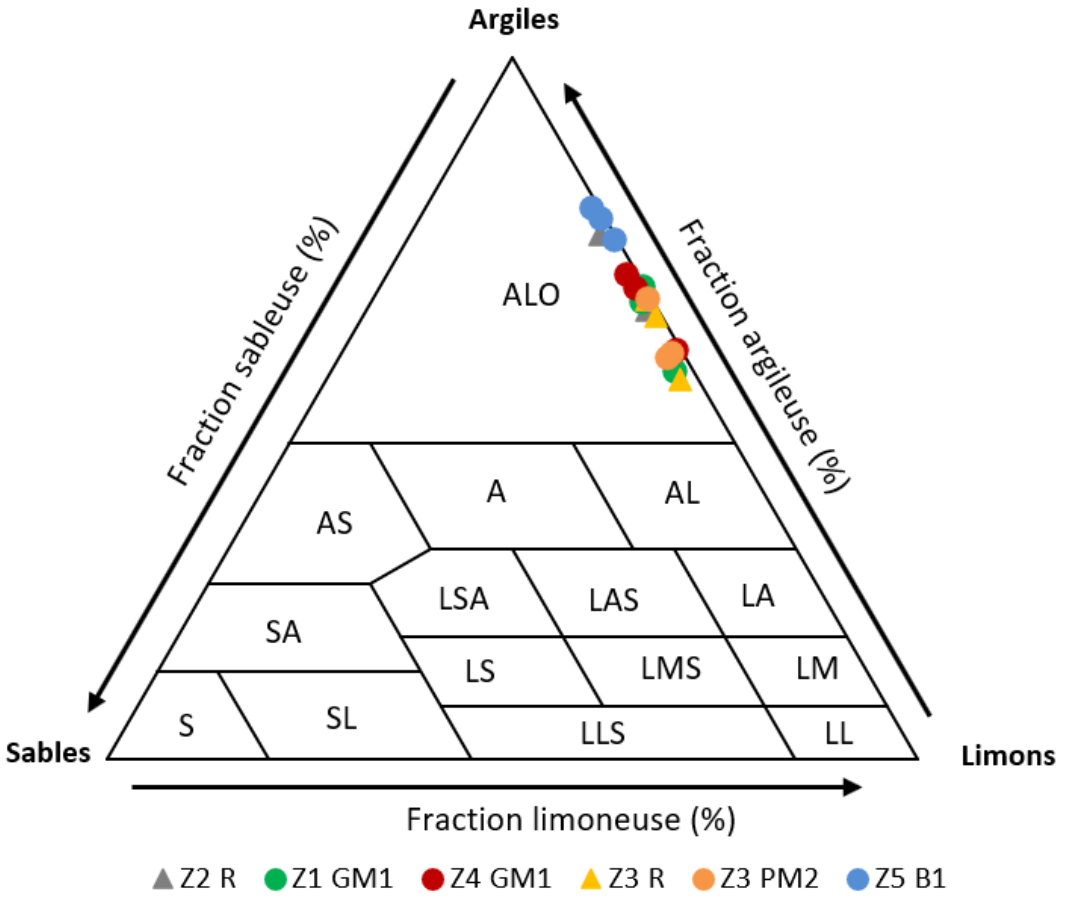


Figure 31 : Diagramme de texture des sols

4.2 Relations teneur en eau – résistante de pointe

Les résistances de pointe peuvent être mises en relation avec les teneurs en eau des échantillons (Figure 32). La résistance de pointe diminue lorsque la teneur en eau augmente pour l'ensemble des sondages effectués sur le communal.

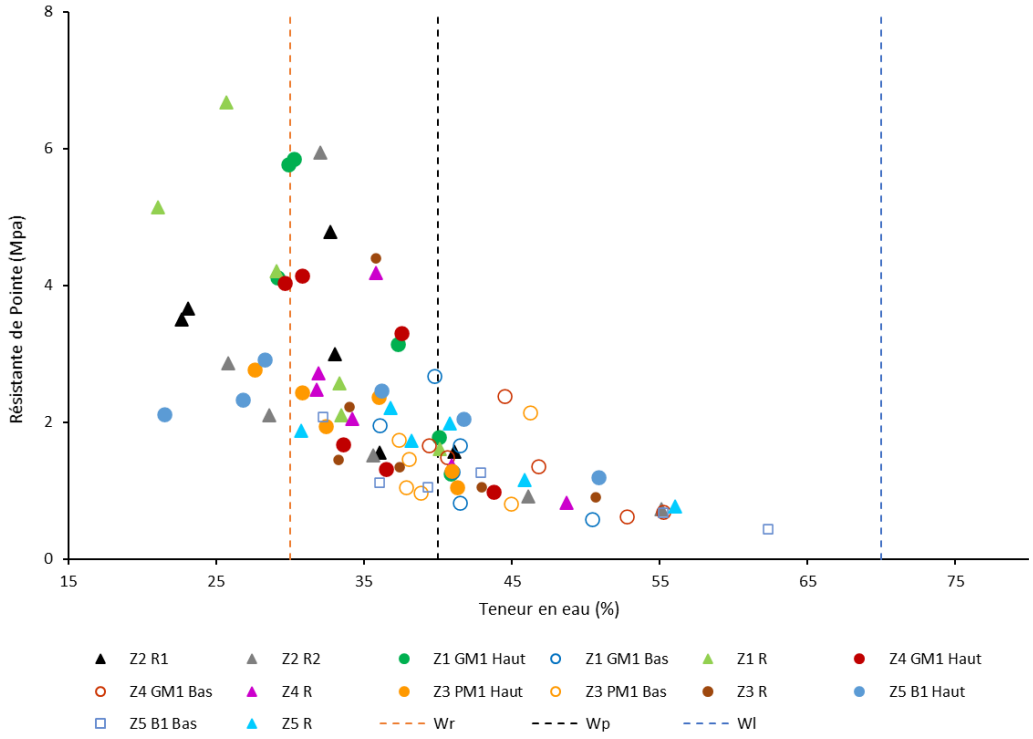


Figure 32 : Diagramme résistance de pointe (Qd) et teneur en eau (W)

La zone 5 présente la plus faible résistance de pointe qui est à relier avec une teneur en eau proche de la limite de liquidité et un pourcentage de fraction argileuse le plus élevé du marais. A l'inverse le sondage de la référence de la zone 1 à gros mottureaux a la résistance de pointe la plus élevée et la teneur en eau la plus faible (Figure 32). Cette représentation graphique illustre aussi que les hauts de mottureaux et les références de chaque zone ont des teneurs en eau plus faible que la limite de retrait et des résistances de pointe en moyenne plus élevées. Les échantillons de surface des bas de mottureaux des différentes zones présentent des teneurs en eau comprises entre la limite de retrait (Wr) et ceux de profondeur entre la limite de plasticité (Wp) et la limite de liquidité (Wl) (Figure 32). Cette figure démontre la relation entre la résistante de pointe et la teneur en eau et l'influence des limites de retrait et de plasticité sur le comportement mécanique des sols. La formation des fentes de retrait nécessite une dessiccation importante du matériau (plus sec que Wr) ce qui est observée dans les mottureaux. Ce comportement mécanique du 'bri' avait été décrit par Bernard (2006) et Gallier (2011) sur les sols du marais de Rochefort dont la composition granulométrique et minéralogique (Righi, et al., 1995 ; Dudoignon et al., 2016) est proche de celle du marais du Poiré-sur-Velluire.

A partir de la teneur en eau et de la résistance de pointe il est possible de calculer une valeur de porosité des sols (Bernard, 2006 ; Bernard *et al*. 2007, Gallier, 2011) en considérant que les équations établies pour le marais de Rochefort sont valides pour le site étudié. Compte tenu de la similitude des matériaux argileux constituant ces deux marais l'hypothèse est justifiée.
Dans le marais de Rochefort Bernard (2006) et Gallier (2011) ont établi la relation suivante entre la résistance de Pointe (Qd), la teneur en eau (W) et l'indice d'eau (e) et donc la porosité totale :

$$\text{Log Qd} = 2.34 - 5.2\times\left(\frac{e}{1+e}\right) + W\times\left(0.74+0.34\times\left(\frac{e}{1+e}\right)\right)$$

$$\text{or : } \left(\frac{e}{1+e}\right) = \Phi = \text{porosité}$$

$$\text{Log Qd} = 2.34 - 5.2\times\Phi + 0.74\times W + 0.34\times W\times\Phi$$

$$\text{donc : } \Phi = \frac{\text{Log Qd} - 2.34 - 0.74\times W}{-5.2 + 0.34\times W}$$

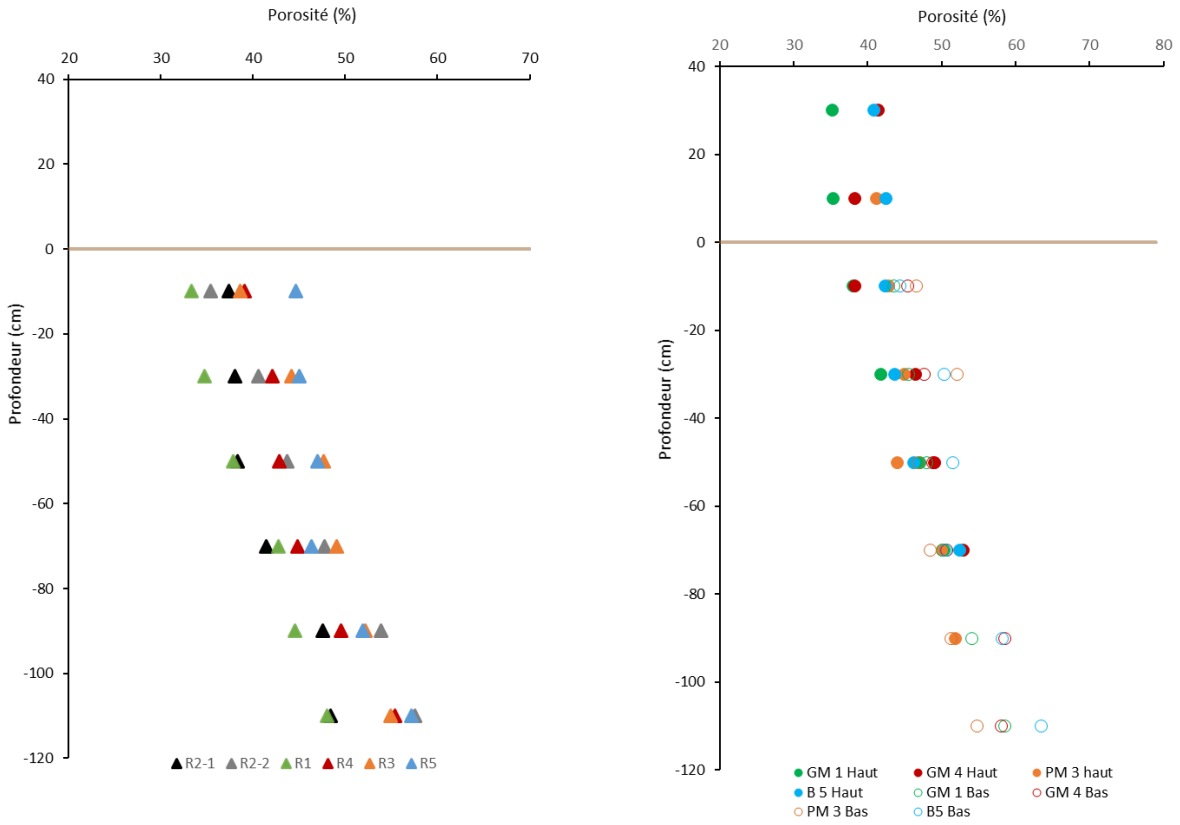


Figure 33 : Porosité des références et des mottureaux des différentes zones

La figure 33 montre que la porosité des sols de référence augmente de la surface de la profondeur de façon similaire pour les différentes zones. Le site 5 est celui qui présente la plus forte porosité quel que soit le niveau considéré. Ce résultat est cohérent avec une teneur en eau et en fraction argileuse plus élevée que pour les autres sites. La référence du site 1 est celle qui présente la plus faible porosité ce qui est également cohérent avec les mesures de teneur en eau (Figure 33).
La figure 33 montre que la porosité des hauts et des bas de mottureaux augmente avec la profondeur comme pour la référence. Les mottureaux, situés au-dessus de la référence topographique, présentent une porosité qui est plus faible que celle des bas de mottureaux qui est cohérente avec la résistance de pointe plus élevée et une teneur en eau plus faible. Ce calcul de porosité ne prend pas en compte la porosité liée aux fentes de dessiccation dans le mottureaux mais à la porosité de la matrice argileuse.

4.3 Relations $CE_{1/5}$ – conductivité électrique du fluide – concentration équivalente en NaCl

La conductivité électrique de l'extrait au 1/5 peut être convertie en conductivité électrique du fluide à l'aide de la formule suivante (Montoroi, 1997) :

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

Avec :
CE_{fluide} : conductivité électrique du fluide [µS cm^{-1}]
$CE_{1/5}$: conductivité électrique de l'extrait au 1/5 [µS cm^{-1}]
W : teneur en eau de l'échantillon [%]

La conductivité électrique du fluide peut ensuite être convertie en concentration équivalente en NaCl, c'est-à-dire la concentration en NaCl qui aurait la même conductivité électrique, en connaissant la température de mesure de la $CE_{1/5}$ (Aminot et Kérouel, 2004).
La conductivité électrique de l'extrait au 1/5 dépend de la teneur en eau de l'échantillon et de la concentration en sels dissouts.

Les concentrations équivalentes en NaCl sont comprises entre 665 et 36168 mg /L^{-1} et varient de façon importante entre les zones d'échantillonnage (Figure 33). Les concentrations pour les zones 1 et 2 varient dans la même gamme de 830 à 4600 mg/L^{-1} (excepté un échantillon de bas de mottureau à 12200 mg.L^{-1}). Les concentrations obtenues pour les zones 3, 4 et 5 sont plus hétérogènes et sont varient entre 800 et 36168 mg /L^{-1}.
Pour l'ensemble des zones étudiées les concentrations équivalentes en NaCl des références sont plus élevées que celle des mottureaux (Figure 34). Les bas de mottureaux présentent des concentrations en NaCl plus faibles que celle des hauts de de mottureaux à profondeur équivalente (Figures 34 à 36). Ces valeurs indiquent soit une accumulation préférentielle de sel dans les 'racines' des mottureaux (zones profondes situées en dessous la surface des bas de mottureaux) soit une lixiviation des sels dans les bas de mottureaux liée à une circulation préférentielle de l'eau entre les mottureaux.

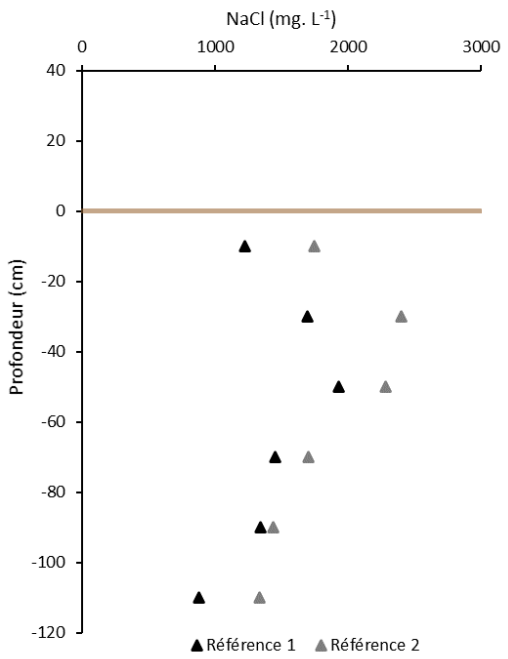


Figure 34 : Salinité équivalente des sols de la zone 2

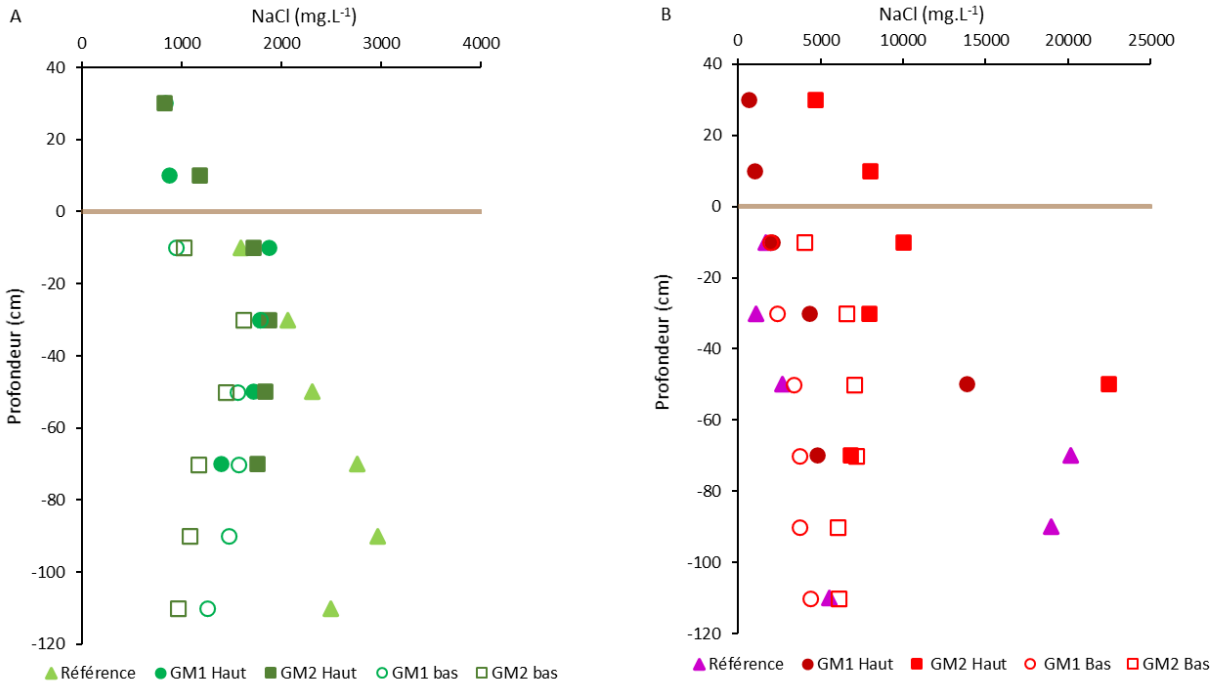


Figure 35 : Salinité équivalente des sols des zones 1(A) et 4 (B).

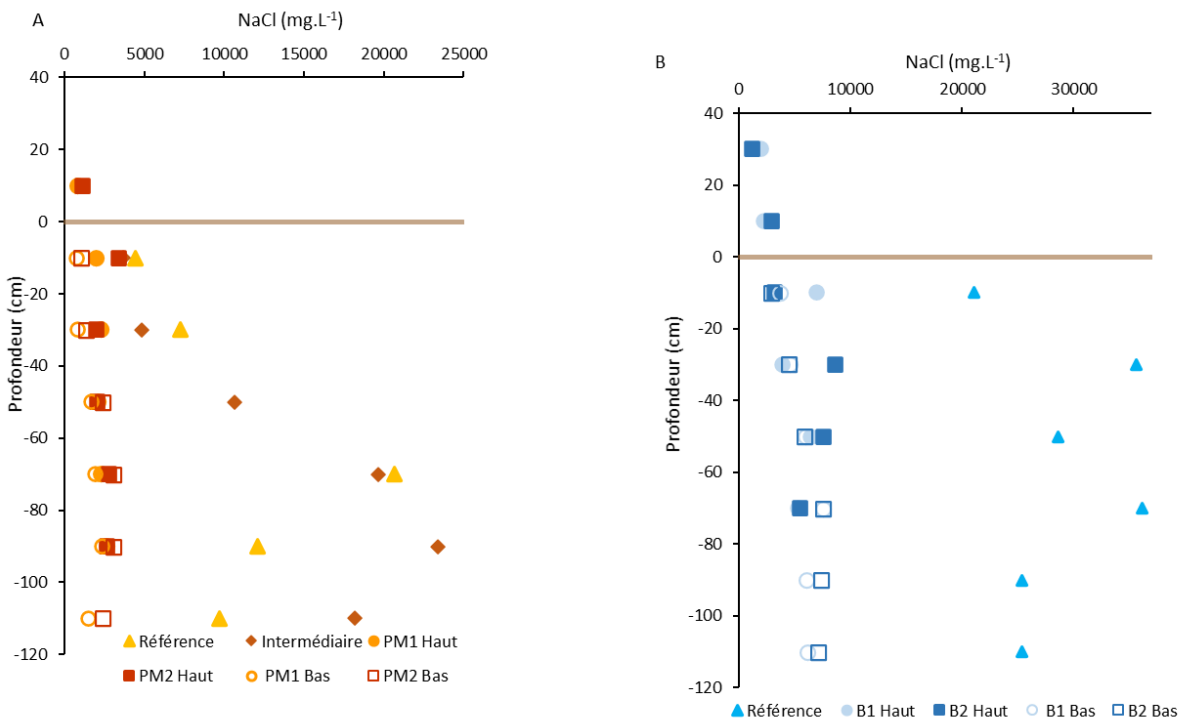


Figure 36 : Salinité équivalente des sols des zones 3 (A) et 5 (B).

Les résultats montrent que les sols du marais du communal du Poiré-sur-Velluire contiennent des concentrations importantes de sels solubles (NaCl) et que la salinité est très hétérogène au sein du marais (Figures 34-36). Une salinité de 36000 mg.L^{-1} correspond à la salinité de l'eau de mer et indique la présence de fluides marins « fossiles » présents depuis le dépôt des formations sédimentaires qui constituent le « bri ».

Les valeurs de conductivité électrique du fluide et les concentrations équivalentes en NaCl mettent en évidence un gradient horizontal de concentration en sels solubles entre les 'racines' des mottureaux (zones profondes situées en dessous la surface des bas de mottureaux) et les zones basses entre les mottureaux. Les racines des mottureaux présentent des concentrations en sels solubles plus importantes que les sols environnants.

4.4 Discussion générale – pistes de recherche

Les résultats obtenus sur les quatre zones de mottureaux et la zone de référence révèlent une relative homogénéité texturale des sols riches en fraction argileuse et une texture argile lourde. Le profil de la zone 5 avec des mottureaux en boule est caractérisé par une teneur en argile plus élevée. Les sols présentent également une homogénéité de composition minéralogique dominée par des argiles expansibles du groupe de smectites et interstratifiés illite/smectite. Les sols contiennent également de l'illite de la kaolinite et de la chlorite. La fraction argileuse de certains profils (site de référence en position haute) contient de la calcite. La calcite peut être présente en concentration plus importante dans les fractions de limons de ces sols.

Ces 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 hétérogénéité 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 pro parte par des pressions latérales de gonflement. Ce gonflement des argiles serait lié à des gradients de salinité entre le cœur des mottureaux et les zones basses (Figure 37). Le schéma proposé sur la figure 36 est une hypothèse de l'origine des mottureaux qui doit être confirmée, car la possibilité d'une pression liée à un gonflement des argiles en présence de solutions salines de différentes concentrations (eau douce vs. eau salée) n'a pas été démontrée ni quantifiée. En outre, 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.

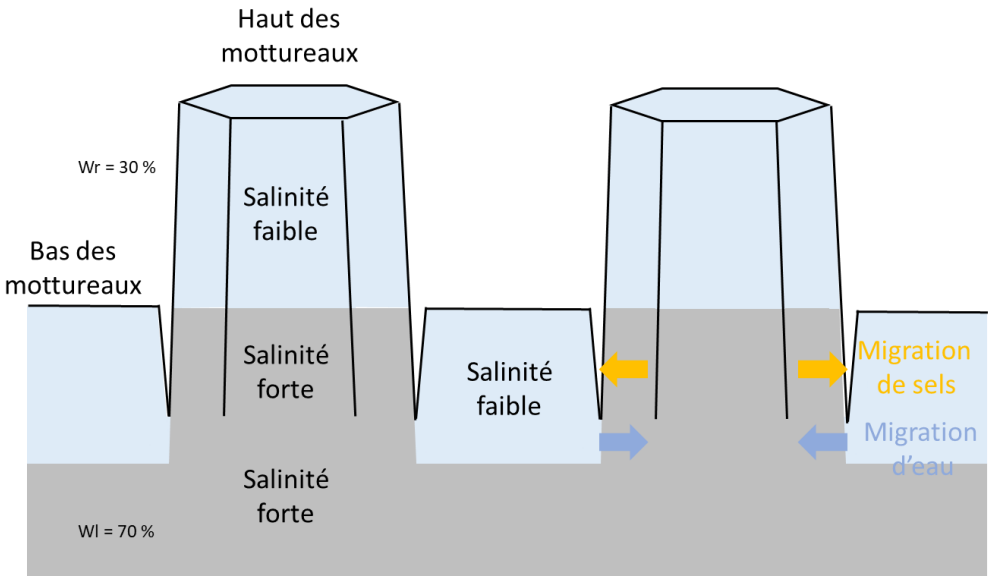


Figure 37 : Schéma de synthèse des résultats obtenus

Afin de préciser le rôle de la salinité ou des gradients de salinité dans la formation des mottureaux nous proposons de poursuivre cette étude par une cartographie de la salinité des sols par des mesures de $CE_{1/5}$ répétés sur des zones choisies du marais et/ou en employant la mesure de résistivité électrique apparente du sol en développant la méthode utilisée dans cette étude pour l'adapter aux petits

mottureaux et la rendre mobile. Une quantification de la calcite présente dans les échantillons serait également à réaliser car le calcium libéré par la dissolution de la calcite à l'effet inverse du sodium en stabilisant la structure et limitant le gonflement. Les études préliminaires ont montré que les sols de la zone de référence 2 (sans mottureaux) présentait une forte effervescence sur le terrain lié à la présence de calcite du fait d'une épaisseur moindre du bri dans cette partie du communal.

Nous proposons également de réaliser des mesures sur un essai d'aplanissement envisagé sur le communal par le PNR et les éleveurs pour connaitre la vitesse de réapparition des mottureaux. Des mesures de géophysique de tomographie de résistivité électrique pourraient être réalisée sur un transect couvrant une zone non aplatie (considérée comme référence) et une zone aplatie au rouleau. Les mesures seraient à réaliser selon la procédure suivante :

- avant l'aplanissement (T0) sur la zone de référence, hors mottureaux car il est impossible de faire de la tomographie électrique sur les mottureaux,
- après l'aplanissement de gros mottureaux (T1) : tomographie électrique sur la zone aplatie et sur la zone de référence mitoyenne pour mettre en évidence l'effet de l'aplanissement.
- suivi bimestriel ou trimestriel (TN+1) en tomographie de résistivité électrique sur les mêmes zones avec relevé topographique sur les profils pour mettre en évidence l'évolution du relief et connaitre la position en altitude des électrodes. Un suivi photographique sera aussi réalisé pour mettre en évidence l'apparition ou la disparition de fissures de dessiccation.

Les mesures de tomographie de résistivité électrique seront complétées par des mesures de teneur en eau à différentes profondeurs et éventuellement de résistance de pointe au pénétromètre.

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., Chevallier, C. and Pons, Y., 2006. Shrinkage and subsidence in a marsh soil: Measurements and preliminary model. Soil Science Society of America Journal, 70(6): 1834-1842.

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.

Bernard-Ubertosi, M., Dudoignon, P. and Pons, Y., 2009. Characterization of structural profiles in clay- rich marsh soils by cone resistance and resistivity measurements. Soil Science Society of America Journal, 73, 46-54.

Ducloux, J. et Dupuis, J. 1977. Carte du Marais Poitevin. AFES.

Dudoignon P., Caner L., Radimy R.T., Boissard C., 2016. Caractérisation et évolution temporelle des structures des sols argileux à tourbeux des 11 sites témoins utilisés pour le suivi de la biodiversité du Marais Poitevin. Rapport Final, 144p.

Dupuis J., Nijs R., Salin R., Fournier B., 1968. Etude pédologique du Marais Poitevin, Tome 1 Etude générale des sols. 208p.

Dupuis J., Nijs R., Salin R., Fournier B., 1969. Etude pédologique du Marais Poitevin, Tome 2 Le climat et l'économie de l'eau dans les sols des marais mouillés, Problèmes d'aménagement Agricole. 244p.

EPMP, 2012. Cartes litho3D du Marais Poitevin : http://www.epmp-marais-poitevin.fr/litto-3d/.

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.

Khitrov, N. B. 2016. The genesis of vertisols with gilgai microtopography: A review. Eurasian Soil Science, 49, 489-497.

Knight, M. J. (1980). Structural analysis and mechanical origins of gilgai at Boorook, Victoria, Australia. Geoderma, 23(4), 245-283.

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.

Righi, D., Velde, B. and Meunier, A., 1995. Clay stability in clay-dominated soil systems. Clay Minerals, 30, 45-54.

Verger F., 1960. Observations sur les sols du Marais poitevin occidental. In: Bulletin de l'Association de géographes français, N°290-291, 87-96.

Verger F., 1964. Mottureaux et Gilgais. Annales de Géographie, t. 73, n°398. pp. 413-430.

ANNEXE 1

Tableaux des résultats des différentes mesures

Identification	P (cm)	W (%)	pH	$CE_{1/5}$ µS.cm^{-1}	CE fluide µS.cm^{-1}	NaCl eq, Mg.L^{-1}	Φ (%)	A (%)	LF (%)	LG (%)	S (%)
Z1 - GM1 haut	30	30,26	6,67	101,00	1669,00	841,24	35,26	67,46	26,00	6,39	0,14
Z1 - GM1 haut	10	29,88	7,51	103,80	1737,14	877,25	35,31				
Z1 - GM1 haut	-10	29,12	8,27	208,00	3571,28	1874,64	38,05	65,41	27,95	5,24	1,41
Z1 - GM1 haut	-30	37,28	8,25	255,00	3420,36	1790,85	41,74				
Z1 - GM1 haut	-50	40,04	8,30	264,00	3296,99	1722,55	47,07				
Z1 - GM1 haut	-70	40,87	8,28	221,00	2703,54	1396,72	50,31	55,33	24,69	17,73	2,25
Z1 - GM1 bas	-10	39,77	7,35	147,80	1857,97	941,33	43,58				
Z1 - GM1 bas	-30	36,06	8,06	246,00	3411,38	1785,87	45,58				
Z1 - GM1 bas	-50	41,49	8,22	249,00	3000,86	1559,39	47,94				
Z1 - GM1 bas	-70	41,00	8,33	247,00	3012,43	1565,74	50,12				
Z1 - GM1 bas	-90	41,46	8,39	235,00	2834,37	1468,16	54,02				
Z1 - GM1 bas	-110	50,45	8,32	247,00	2448,03	1257,93	58,52				
Z1 - GM2 Haut	30	33,34	7,45	110,00	1649,88	831,15					
Z1 - GM2 Haut	10	26,18	7,84	121,30	2317,01	1187,13					
Z1 - GM2 Haut	-10	25,87	8,04	170,10	3288,20	1717,69					
Z1 - GM2 Haut	-30	30,13	8,33	216,00	3584,02	1881,73					
Z1 - GM2 Haut	-50	36,49	8,33	256,00	3507,89	1839,41					
Z1 - GM2 Haut	-70	40,80	8,31	274,00	3357,54	1756,05					
Z1 - GM2 bas	-10	40,75	7,46	162,90	1998,83	1016,37					
Z1 - GM2 bas	-30	40,83	7,91	254,00	3110,31	1619,56					
Z1 - GM2 bas	-50	42,97	8,29	239,00	2781,02	1439,00					
Z1 - GM2 bas	-70	44,92	8,23	205,00	2282,07	1168,30					
Z1 - GM2 bas	-90	50,97	8,34	216,00	2118,79	1080,55					
Z1 - GM2 bas	-110	57,47	8,34	217,00	1888,02	957,30					
Z1 - R	-10	25,20	7,78	157,60	3065,05	1594,66	33,37				
Z1 - R	-30	21,05	8,30	164,50	3907,74	2062,38	34,79				
Z1 - R	-50	29,05	8,59	252,00	4337,65	2304,04	37,84				
Z1 - R	-70	33,36	8,68	343,00	5140,38	2760,15	42,80				
Z1 - R	-90	33,48	8,79	368,00	5495,08	2963,55	44,55				
Z1 - R	-110	40,13	8,60	375,00	4672,09	2493,33	48,00				
Z1 - GPM	10	28,21	7,29	117,70	2086,24	1063,11					
Z1 - GPM	30	24,56	7,85	231,00	4702,82	2510,78					
Z1 - GPM	50	24,27	8,04	400,00	8240,54	4570,99					
Z1 - GPM	70	31,11	8,04	513,00	8244,53	4573,37					
Z1 - GPM	90	39,70	8,13	498,00	6271,96	3412,73					
Z1 - GPM	110	40,87	8,14	511,00	6251,56	3400,87					
Z1 - GPM bas	30	29,98	7,85	265,00	4419,42	2350,22					
Z1 - GPM bas	50	28,40	8,11	304,00	5351,34	2880,99					
Z1 - GPM bas	70	31,62	8,10	435,00	6877,89	3766,32					
Z1 - GPM bas	90	34,58	8,15	1422,00	20559,26	12280,13					
Z1 - GPM bas	110	38,50	8,20	434,00	5636,72	3045,08					
Z1 - GPM bas	130	48,09	8,16	558,00	5801,17	3139,94					

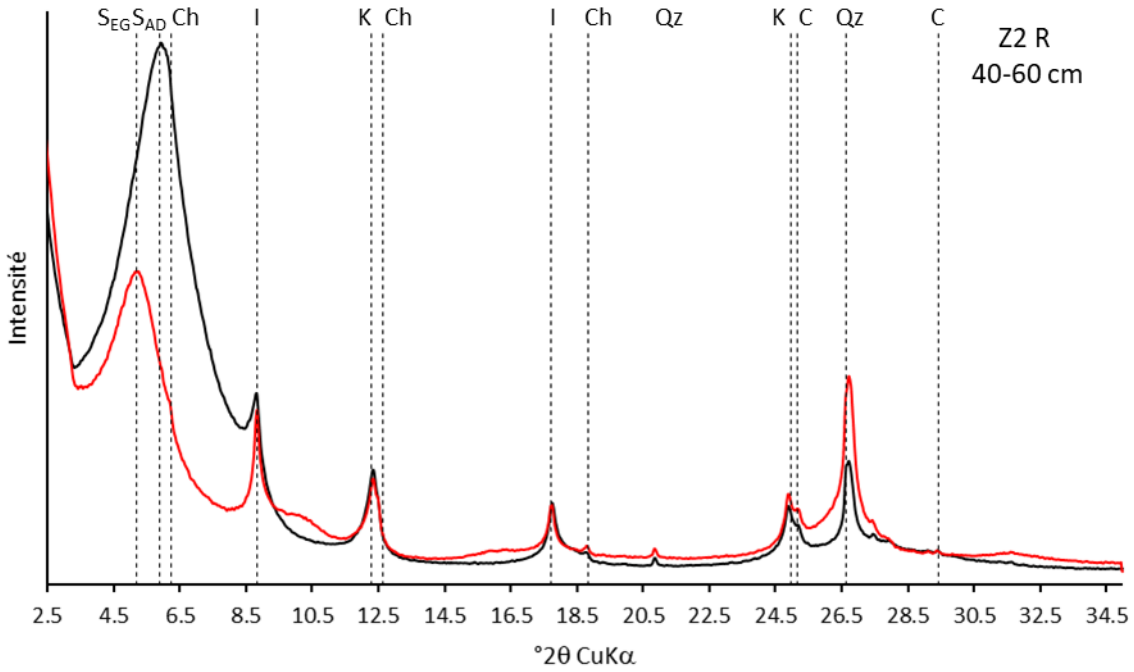
Identification	P (cm)	W (%)	pH	$CE_{1/5}$ µS.cm^{-1}	CE fluide µS.cm^{-1}	NaCl eq, Mg.L^{-1}	Φ (%)	A (%)	LF (%)	LG (%)	S (%)
Z2 - R1	-10	32,73	7,47	156,30	2387,77	1225,34	37,38				
Z2 - R1	-30	23,11	8,70	150,20	3249,79	1696,47	38,03				
Z2 - R1	-50	22,68	8,19	166,40	3668,60	1928,81	38,31				
Z2 - R1	-70	33,00	8,16	185,05	2803,84	1451,46	41,44				
Z2 - R1	-90	36,05	8,09	187,80	2605,06	1343,12	47,58				
Z2 - R1	-110	41,11	8,06	142,90	1737,94	877,67	48,38				
Z2 - R2	-10	32,05	7,84	214,00	3338,73	1745,64	35,42	67,40	24,28	7,69	0,63
Z2 - R2	-30	25,80	8,01	233,00	4515,30	2404,45	40,58				
Z2 - R2	-50	28,60	8,14	246,00	4300,52	2283,10	43,68	74,76	17,24	6,35	1,64
Z2 - R2	-70	35,62	8,17	232,00	3256,58	1700,22	47,72				
Z2 - R2	-90	46,13	8,10	256,00	2774,95	1435,68	53,89				
Z2 - R2	-110	55,11	8,02	285,00	2585,85	1332,68	57,54	64,03	28,12	6,54	1,31
Z3 - PM1	10	27,62	7,16	87,50	1584,08	796,49	41,17	57,30	17,13	23,24	2,33
Z3 - PM1	-10	30,82	7,63	235,00	3811,97	2008,82	42,80				
Z3 - PM1	-30	32,39	8,10	280,00	4322,19	2295,32	44,98	57,93	26,16	14,46	1,45
Z3 - PM1	-50	35,96	8,19	290,00	4032,03	2132,05	43,96				
Z3 - PM1	-70	40,93	8,33	353,00	4312,12	2289,64	50,07				
Z3 - PM1	-90	41,32	8,26	407,00	4925,35	2637,38	51,87	65,77	24,12	9,67	0,45
Z3 - PM1 bas	-10	46,26	7,27	145,30	1570,37	789,28	46,61				
Z3 - PM1 bas	-30	38,80	7,73	124,20	1600,40	805,08	52,10				
Z3 - PM1 bas	-50	37,37	8,05	243,00	3251,58	1697,46	46,83				
Z3 - PM1 bas	-70	38,00	8,26	280,00	3684,30	1937,56	48,46				
Z3 - PM1 bas	-90	37,85	8,29	335,00	4425,35	2353,57	51,28				
Z3 - PM1 bas	-110	44,92	8,34	255,00	2838,12	1470,21	54,78				
Z3 - PM2	10	28,09	7,25	127,60	2271,26	1162,47					
Z3 - PM2	-10	34,95	7,64	436,00	6237,22	3392,54					
Z3 - PM2	-30	37,51	8,11	281,00	3745,46	1971,67					
Z3 - PM2	-50	38,62	8,27	300,00	3884,13	2049,17					
Z3 - PM2	-70	38,03	8,32	394,00	5180,23	2782,94					
Z3 - PM2	-90	39,24	8,26	387,00	4930,78	2640,47					
Z3 - PM2 bas	-10	48,71	6,64	196,70	2019,25	1027,28					
Z3 - PM2 bas	-30	37,13	8,03	196,70	2648,66	1366,83					
Z3 - PM2 bas	-50	39,56	8,15	353,00	4461,20	2373,84					
Z3 - PM2 bas	-70	37,67	8,24	423,00	5614,68	3032,38					
Z3 - PM2 bas	-90	39,11	8,19	445,00	5689,47	3075,48					
Z3 - PM2 bas	-110	43,56	8,20	389,00	4465,11	2376,05					
Z3 - R	-10	35,78	6,70	577,00	8062,78	4465,32	38,64	65,62	24,25	9,55	0,58
Z3 - R	-30	33,99	7,56	862,00	12679,86	7269,03	44,15				
Z3 - R	-50	33,25	7,77	2620,00	39403,64	25100,17	47,62	54,05	25,16	18,67	2,13
Z3 - R	-70	37,39	7,89	2470,00	33032,06	20650,38	49,05				
Z3 - R	-90	42,94	8,09	1737,00	20225,91	12063,29	52,14				
Z3 - R	-110	50,69	8,00	1676,00	16533,04	9688,40	54,90	63,16	21,37	14,78	0,69
Z3 - Int	-10	41,67	7,00	304,00	3647,37	1916,99					
Z3 - Int	-30	34,91	7,84	338,00	4840,82	2589,23					
Z3 - Int	-50	39,08	7,92	832,00	10644,08	6018,52					
Z3 - Int	-70	42,61	7,88	1676,00	19668,05	11701,29					
Z3 - Int	-90	46,81	7,82	2190,00	23392,38	14138,47					
Z3 - Int	-110	52,69	7,85	1918,00	18201,07	10754,76					

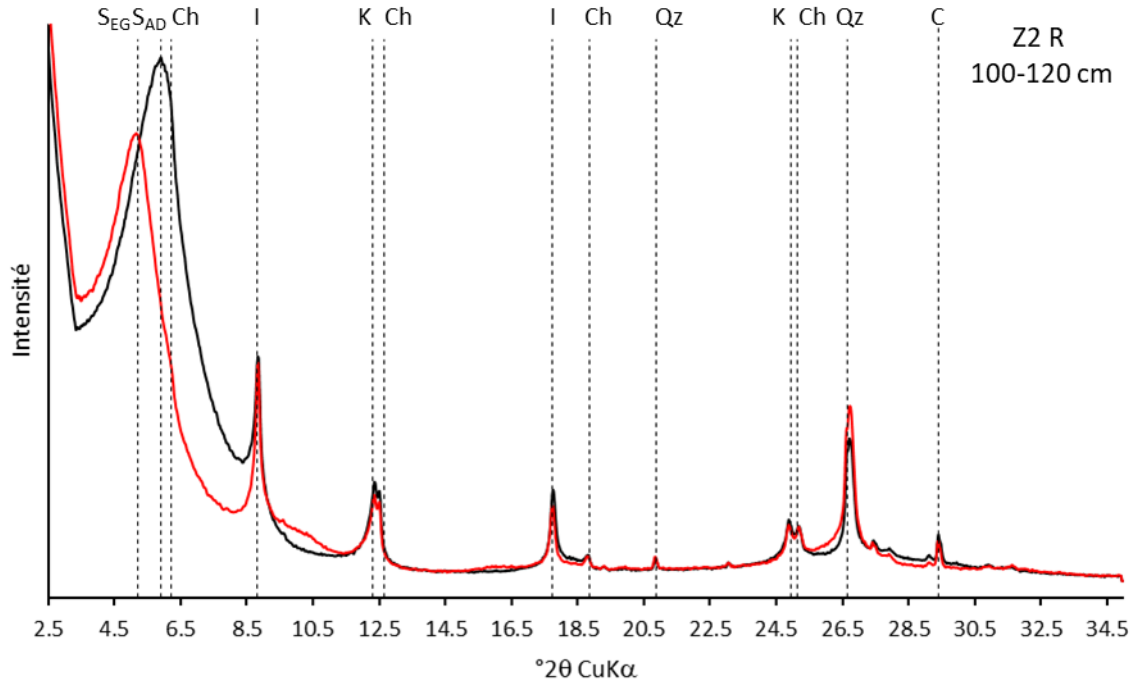
Identification	P (cm)	W (%)	pH	$CE_{1/5}$ µS.cm^{-1}	CE fluide µS.cm^{-1}	NaCl eq, Mg.L^{-1}	Φ (%)	A (%)	LF (%)	LG (%)	S (%)
Z4 - GM1 Haut	30	37,50	6,79	100,10	1334,56	665,91	41,38	67,36	26,62	4,89	1,13
Z4 - GM1 Haut	10	30,78	7,42	122,40	1988,26	1010,72	38,29				
Z4 - GM1 Haut	-10	29,63	8,01	233,00	3931,88	2075,90	38,30	69,19	26,11	3,41	1,29
Z4 - GM1 Haut	-30	33,60	8,15	526,00	7827,49	4325,76	46,45				
Z4 - GM1 Haut	-50	36,49	7,92	1681,00	23034,27	13902,09	49,04				
Z4 - GM1 Haut	-70	43,78	8,31	756,00	8634,05	4805,64	52,86	58,42	29,01	12,04	0,52
Z4 - GM1 - bas	-10	44,49	6,91	330,00	3708,82	1951,23	45,40				
Z4 - GM1 - bas	-30	39,40	7,79	352,00	4466,74	2376,98	47,60				
Z4 - GM1 - bas	-50	40,64	8,24	504,00	6201,24	3371,64	48,75				
Z4 - GM1 - bas	-70	46,79	8,25	634,00	6774,51	3705,80	50,70				
Z4 - GM1 - bas	-90	52,77	8,25	714,00	6765,82	3700,72	58,51				
Z4 - GM1 - bas	-110	55,25	8,25	873,00	7899,85	4368,64	58,11				
Z4 - GM2	30	31,12	6,57	526,00	8450,85	4696,28					
Z4 - GM2	10	27,72	7,56	768,00	13851,40	7997,73					
Z4 - GM2	-10	30,79	8,12	1053,00	17097,17	10047,83					
Z4 - GM2	-30	33,21	8,17	917,00	13804,95	7968,72					
Z4 - GM2	-50	37,46	7,92	2670,00	35635,68	22455,35					
Z4 - GM2	-70	44,13	8,30	1058,00	11986,86	6841,01					
Z4 - GM2 bas	-10	38,80	6,99	566,00	7293,90	4010,64					
Z4 - GM2 bas	-30	32,80	7,80	757,00	11539,76	6566,13					
Z4 - GM2 bas	-50	37,78	8,08	928,00	12282,42	7023,27					
Z4 - GM2 bas	-70	42,63	8,13	1062,00	12455,15	7129,99					
Z4 - GM2 bas	-90	51,25	8,20	1096,00	10692,34	6047,92					
Z4 - GM2 bas	-110	58,96	8,20	1269,00	10762,15	6090,47					
Z4 - R	-10	35,79	6,80	233,00	3254,91	1699,30	39,05				
Z4 - R	-30	31,95	7,55	134,10	2098,73	1069,80	42,08				
Z4 - R	-50	31,78	8,20	320,00	5034,90	2699,87	42,85				
Z4 - R	-70	34,19	7,83	2210,00	32323,83	20162,66	44,85				
Z4 - R	-90	40,91	7,89	2500,00	30556,60	18951,87	49,53				
Z4 - R	-110	48,72	8,34	962,00	9873,36	5550,74	55,35				

Identification	P (cm)	W (%)	pH	$CE_{1/5}$ µS.cm^{-1}	CE fluide µS.cm^{-1}	NaCl eq. mg.L^{-1}	Φ (%)	A (%)	LF (%)	LG (%)	S (%)
Z5 - B1 Haut	30	28,29	6,30	210,00	3712,02	1953,02	40,84	78,75	14,46	5,95	0,83
Z5 - B1 Haut	10	26,79	7,13	228,00	4255,95	2257,97	42,48				
Z5 - B1 Haut	-10	21,52	7,82	526,00	12223,96	6987,19	42,41	77,20	16,37	5,97	0,45
Z5 - B1 Haut	-30	36,19	8,29	516,00	7129,43	3913,90	43,64				
Z5 - B1 Haut	-50	41,72	8,38	951,00	11398,21	6479,31	46,22				
Z5 - B1 Haut	-70	50,88	8,36	956,00	9395,27	5262,23	52,47	74,28	20,81	4,59	0,32
Z5 - B1 bas	-10	32,22	6,76	437,00	6781,60	3709,95	44,40				
Z5 - B1 bas	-30	36,06	8,03	589,00	8167,63	4527,63	50,34				
Z5 - B1 bas	-50	39,31	8,32	826,00	10507,47	5935,37	51,49				
Z5 - B1 bas	-70	42,88	8,37	1128,00	13153,29	7562,74	50,60				
Z5 - B1 bas	-90	55,27	8,28	1189,00	10755,88	6086,65	58,21				
Z5 - B1 bas	-110	62,34	8,24	1354,00	10860,01	6150,16	63,46				
Z5 - B2 Haut	30	34,27	6,47	157,00	2290,47	1172,83					
Z5 - B2 Haut	10	26,76	7,42	291,00	5438,13	2930,82					
Z5 - B2 Haut	-10	28,36	8,17	336,00	5924,86	3211,44					
Z5 - B2 Haut	-30	31,77	8,30	947,00	14903,42	8657,35					
Z5 - B2 Haut	-50	39,81	8,29	1050,00	13188,12	7584,39					
Z5 - B2 Haut	-70	50,53	8,20	980,00	9696,77	5444,03					
Z5 - B2 bas	-10	39,14	6,64	425,00	5428,91	2925,52					
Z5 - B2 bas	-30	41,08	7,97	657,00	7997,00	4426,27					
Z5 - B2 bas	-50	42,68	8,27	884,00	10355,28	5842,86					
Z5 - B2 bas	-70	47,92	8,20	1254,00	13084,24	7519,84					
Z5 - B2 bas	-90	55,10	8,16	1409,00	12785,18	7334,27					
Z5 - B2 bas	-110	65,06	8,02	1617,00	12427,06	7112,62					
Z5 - R	-10	36,81	6,91	2480,00	33690,32	21104,95	44,67				
Z5 - R	-30	30,72	7,75	3310,00	53870,27	35598,59	45,03				
Z5 - R	-50	38,19	8,13	3380,00	44257,11	28562,32	47,02				
Z5 - R	-70	40,82	7,86	4460,00	54634,28	36167,86	46,33				
Z5 - R	-90	45,88	8,04	3650,00	39776,26	25363,79	51,87				
Z5 - R	-110	56,02	7,90	4450,00	39716,71	25321,63	57,22				

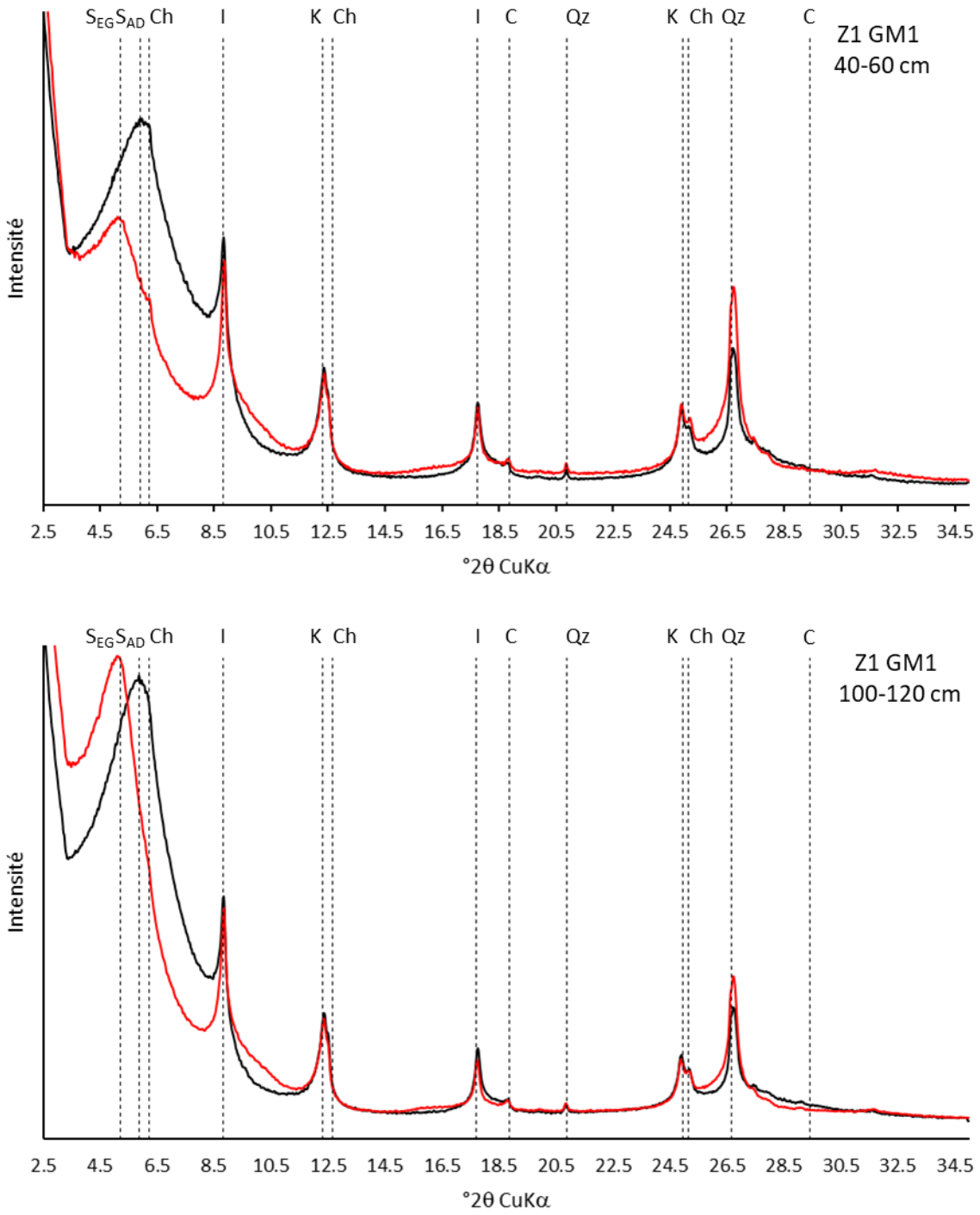
ANNEXE 2

Diffractogrammes des échantillons 40-60 cm et 100-120 cm des sols

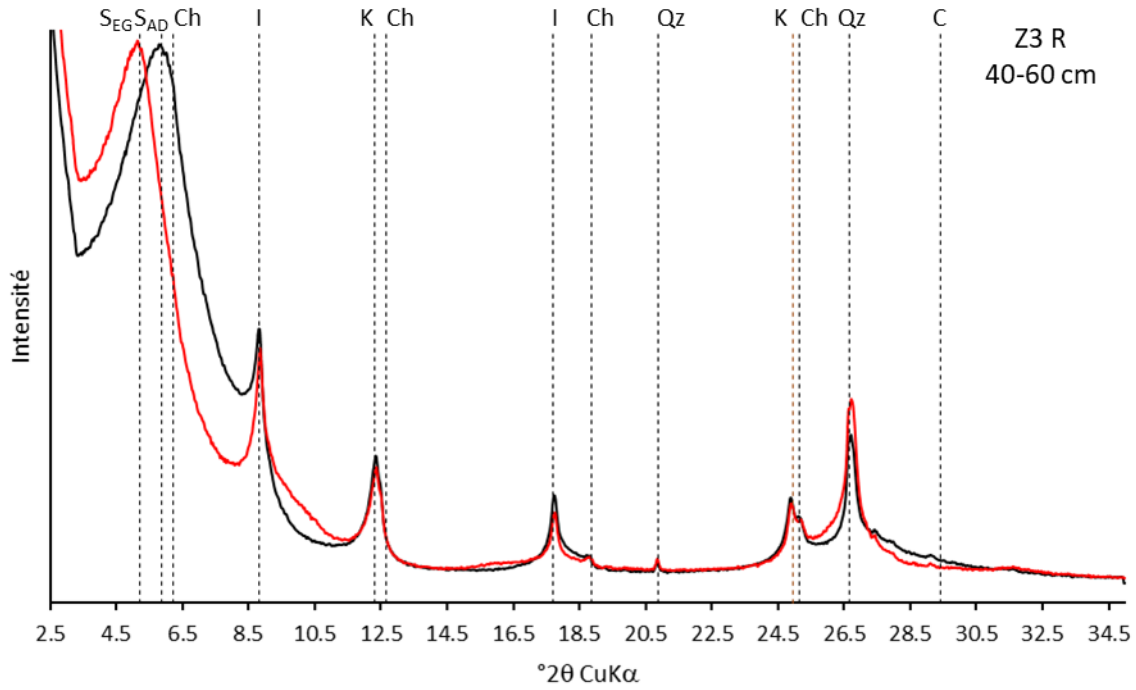


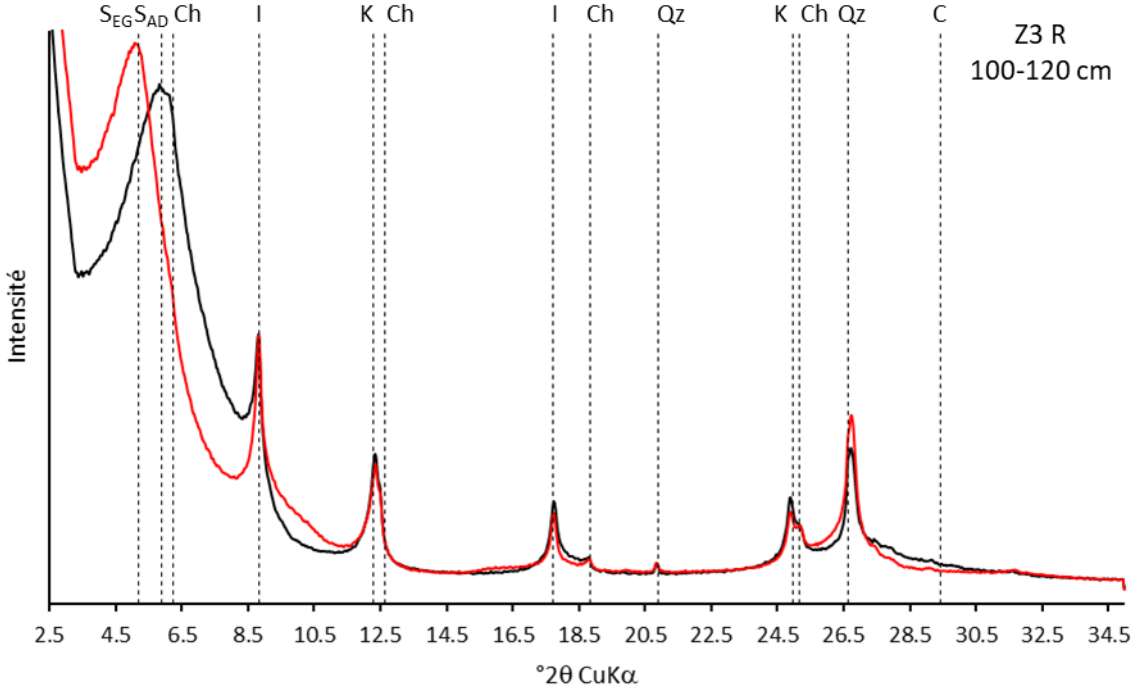


Diffractogrammes des échantillons 40-60 cm et 100-120 de la zone de référence
(K : kaolinite, I : Illite, Ch : Chlorite ; SAD et SEG : smectite, Qz : Quartz)

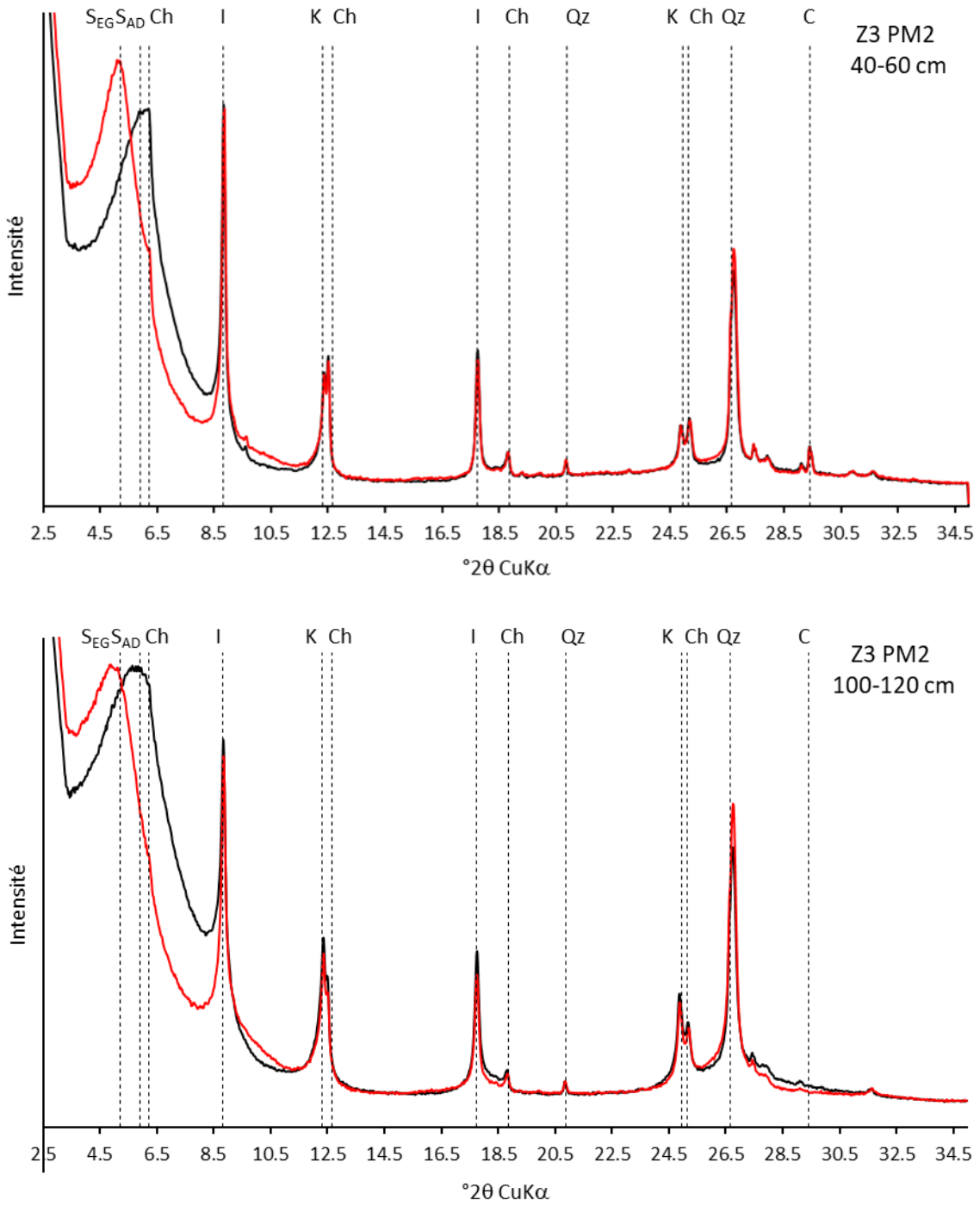


Diffractogrammes des échantillons 40-60 cm et 100-120 d'un gros mottureau de la zone 1
(K : kaolinite, I : Illite, Ch : Chlorite ; SAD et SEG : smectite, Qz : Quartz)

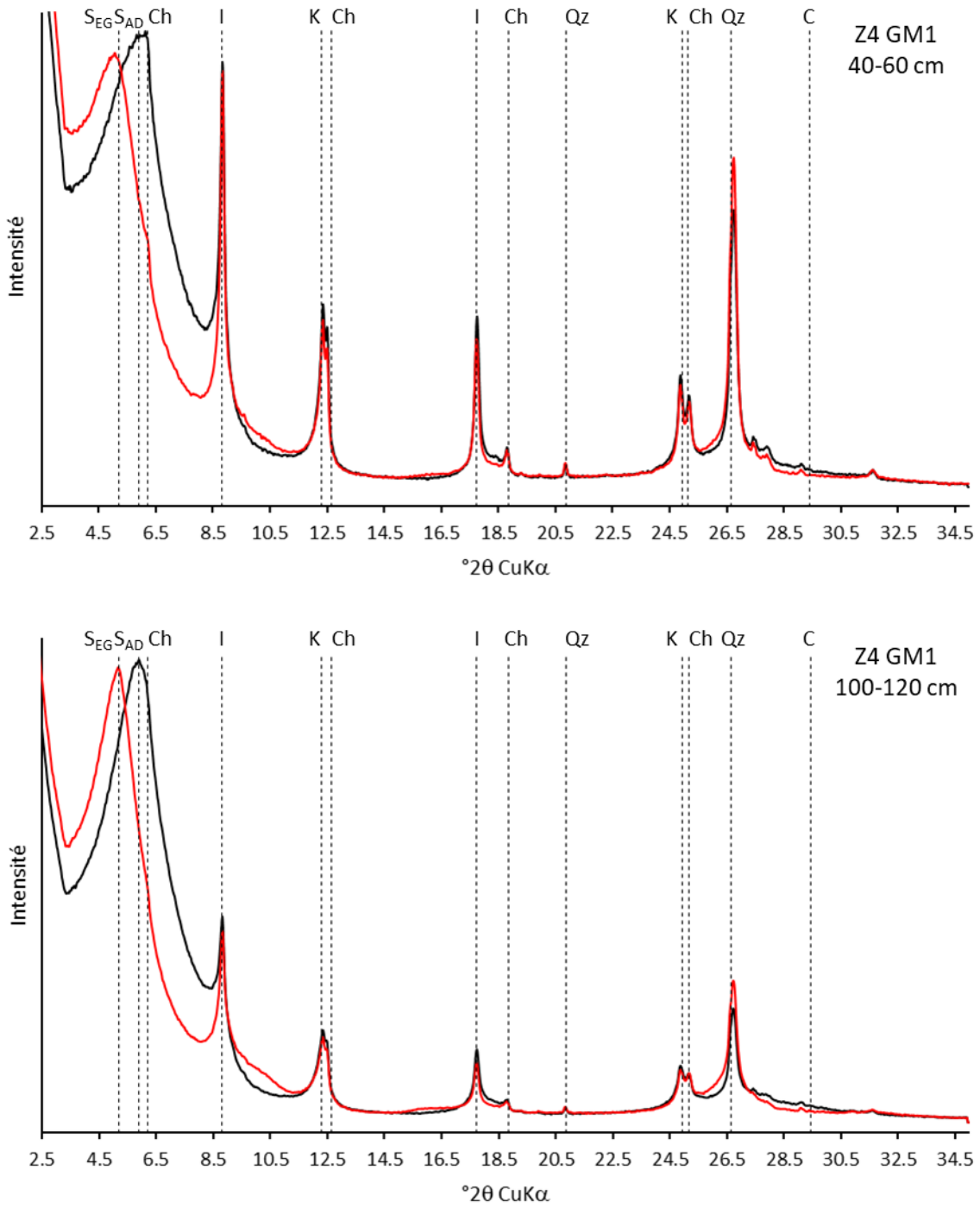




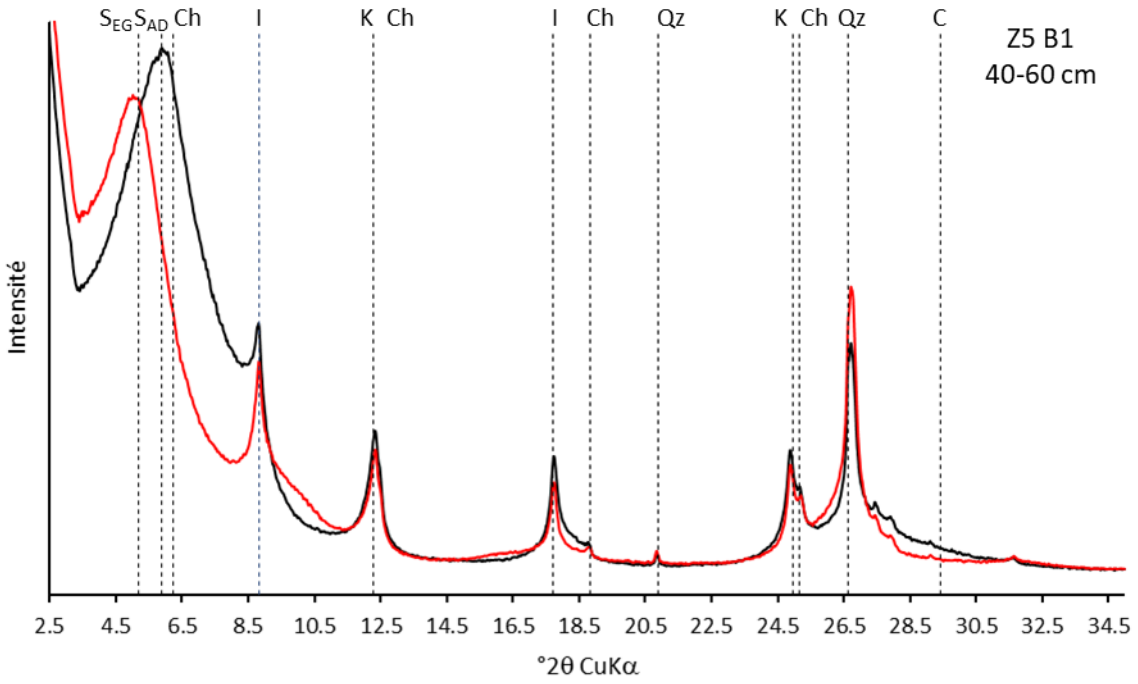
Diffractogrammes des échantillons 40-60 cm et 100-120 de la référence de la zone 3
(K : kaolinite, I : Illite, Ch : Chlorite ; S_{AD} et S_{EG} : smectite, Qz : Quartz)

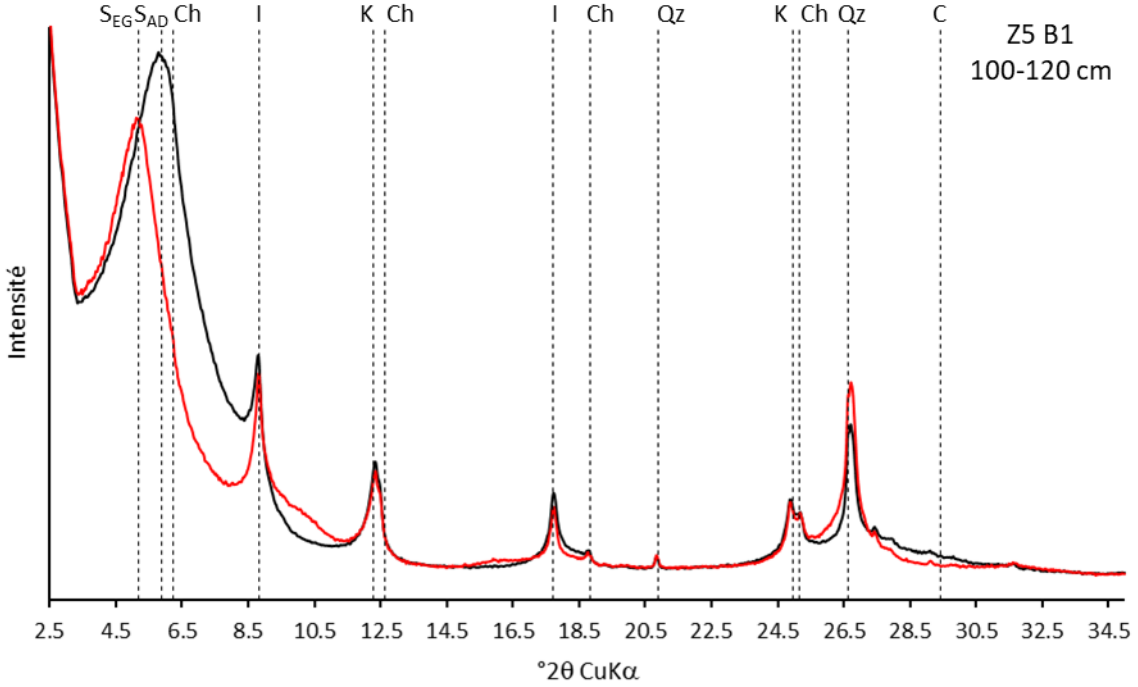


Diffractogrammes des échantillons 40-60 cm et 100-120 d'un petit mottureau de la zone 3 (K : kaolinite, I : Illite, Ch : Chlorite ; S_{AD} et S_{EG} : smectite, Qz : Quartz)



Diffractogrammes des échantillons 40-60 cm et 100-120 d'un gros mottureau de la zone 4 (K : kaolinite, I : Illite, Ch : Chlorite ; S_{AD} et S_{EG} : smectite, Qz : Quartz)





Diffractogrammes des échantillons 40-60 cm et 100-120 d'un mottureau en boule de la zone 5 (K : kaolinite, I : Illite, Ch : Chlorite ; S_{AD} et S_{EG} : smectite, Qz : Quartz)