



**Caractérisation et Evolution temporelle des structures des sols argileux à
tourbeux des 11 sites témoins utilisés pour le suivi de la biodiversité du
Marais Poitevin.**

Rapport Final

P. Dudoignon, L. Caner, R.T. Radimy, C. Boissard

Laboratoires d'appuis :

UMR 7285 IC2MP / HydrASA, ENSI Poitiers , Université de Poitiers

Rapport final / mars 2016

sommaire

Objectifs préliminaires	4
I. Introduction	5
<i>1.1. Généralités et problématiques</i>	5
<i>1.2. Bilan des acquis concernant le fonctionnement hydrodynamique du bri</i>	6
<i>1.3. Fonctionnement hydromécanique du bri</i>	8
<i>1.4. Remontées capillaires</i>	10
2. Matériel et méthodes	13
<i>2.1. Matériel : situation des parcelles et des profils</i>	13
<i>2.2 Démarche générale et Méthodes</i>	14
2.2.1 Démarche générale	14
2.2.2 Méthodes	15
3. Résultats	22
<i>3.1. Campagne initiale</i>	22
3.1.1 Minéralogie	22
Marais récent de Longeville	22
Les Marais mouillés de Luçon, Nallier-Monzeuil et Communal du, Poiré	24
Les Marais desséchés de Rouchères et Boissière	26
<i>Conclusion minéralogique</i>	28
3.1.2. Caractérisation structure et hydraulique du bri	29
1 - Marais desséché Bas de Longeville	29
2 - Marais mouillé de Luçon	33
3 - Marais desséché Les Rouchères	37
4 - Marais mouillé de Nalliers-Mouzeuil	41
5 - Marais desséché de Boissière	45
6 - Marais mouillé de Communal du Poiré	48
7 - Marais mouillé Saint-Arnault/ Vieille Autise (Sainte Catherine)	52
8 - Marais mouillé Le Mazeau	56
9 - Marais mouillé Marais Sauvage (St Hillaire La Pallud)	59
10 - Marais mouillé Le Passage - La Ronde	62
11 - Marais mouillé Cuvette de Nuailé	66
3.1.3. Conclusion sur la structure des 11 sites : relation profils de tomographie électrique / structure du bri et salinité de nappe / profondeur du substratum calcaire	67
<i>3.2. Les évolutions des profils de teneur en eau, salinité et Réserve Utile</i>	72
<i>3.2.1 Valeurs de RU initiale, profils de RU initiale et profils de RU_{ETP} et RU résiduelle</i>	72
3.2.1.a : RU initiale et RU _{ETP} (extrait thèse Radimy, 2015)	72
3.2.1.b : RU résiduelle (extrait thèse Radimy, 2015)	74
<i>3.3 Evolution des profils de teneur en eau - salinité - RU</i>	75
3.3.1 Longeville : 21 / 04 / 2015 - 13 / 10 / 2015 - 19-01-2016	75
3.3.2 Luçon : 21 / 04 / 2015 - 13 / 10 / 2015 - 19/01/2016	79
3.3.3 Rouchères : 28 / 04 / 2015 - 13 / 10 / 2015 - 19/01/2016	82
3.3.4 Nalliers : 21 / 04 / 2015 - 13 / 10 / 2015	85
3.3.5 Boissière : 28 / 04 / 2015 - 13 / 10 / 2015	88
3.3.6 Poiré : 28 / 04 / 2015 - 13 / 10 / 2015	91
3.3.7 Sainte Christine: 29 / 05 / 2015 - 21 / 07 / 2015- 1 / 10 / 2015	94

3.3.8 <i>Le Mazeau: 29 / 05 / 2015 - 1 / 10 / 2015</i>	97
3.3.9 <i>Le Marais Sauvage, St Hillaire la Pallud: 29 / 05 / 2015 - 21 / 07 / 2015 - 1 / 10 / 2015</i>	99
3.3.10 <i>La Ronde : 29 / 05 / 2015 - 21 / 07 / 2015- 1 / 10 / 2015</i>	101
3.3.11 <i>Nuaillé: 21 / 07 / 2015 - 1 / 10 / 2015</i>	103
4. Conclusion générale	105
Références bibliographiques	108

ANNEXE 1 : Localisations - "**Épaisseur de bri - toit du Dogger**".

ANNEXE 2 : Localisation - **photographies des sites et stations**

ANNEXE 3 : **Description des profils**

Objectifs préliminaires

Les objectifs de l'étude ont été décrits dans la proposition d'étude présentée en mars 2015. Ils comprennent :

- 1 - la caractérisation pédologique des territoires
- 2 - leurs caractérisations structurales et hydrologiques
- 3 - le suivi des évolutions des profils de RU résiduelle pour les différents sites en relation avec les couvertures végétales
- 4 - l'approche des cinétiques d'évolution face à des *scenarii*, de gestion d'eau et/ou de pratiques culturales.

Techniquement, ils s'appuient sur les 11 secteurs déjà identifiés par l'EPMP (Figure 1).

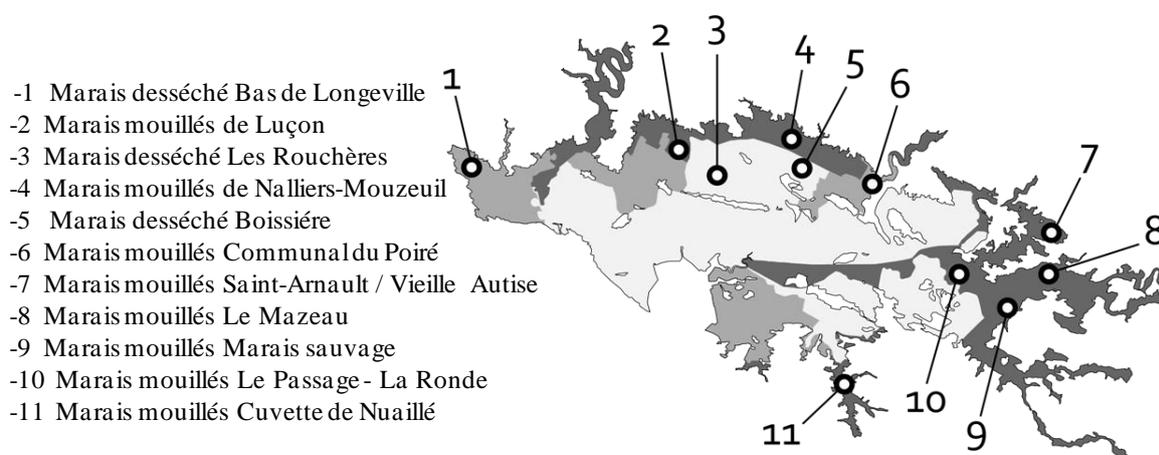


Figure 1 : La localisation des 11 secteurs permet de couvrir l'ensemble des fonctionnements territoriaux de bordure du marais Poitevin

La méthodologie comprend :

- la caractérisation pédologique des territoires à partir des sondages à la tarière
- leur reconnaissance par tomographie électrique*
- l'acquisition des profils de teneur en eau et de $CE_{1/5}$ *
- l'acquisition des profils hydromécaniques* par essais au pénétromètre dynamique PANDA
- le calcul des profils de RU résiduelle et des profils de salinité pour les différentes saisons*.

Il avait également été noté l'intérêt d'encadrer la saison sèche estivale par des acquisitions au printemps et à l'automne ou en hiver. Cela permettrait une première approche des cinétiques d'évolution face à des *scenarii*, de gestion d'eau et/ou de pratiques culturales.

Les investigations s'appuient sur la méthodologie développée dans l'équipe HydrASA-ENSIP de l'IC2MP, soit, sur le couplage structure - propriétés hydromécanique et profils de salinité. Elles ont été menées en trois temps successifs:

- Une investigation par tomographie électrique, couplée à des des profils de teneur en eau, de $CE_{1/5}$ complétés par les calculs de salinité et des profils pénétrométriques. La première investigation comprend également la caractérisation minéralogique des différents profils.
- Un suivi des évolutions des profils de teneur en eau, de $CE_{1/5}$ et de salinité
- le calcul des profils de Reserve Utile Résiduels des sols pour les différentes parcelles aux différentes dates d'investigation.

La conclusion et la discussion finale résume les différents états du bri et des salinités de nappes qui y sont associées site par sites. Le récapitulatif des épaisseurs de bri et de la profondeur du toit des calcaires est présenté en fin de chapitre 3.1.2 "Caractérisation structure et hydraulique initiale". La description des profils de teneur en eau face aux états solides, plastiques et liquides du bri permet d'expliquer le comportement hydrique de ces sols. Les évolutions des profils sont traduites en termes de compétition entre évapotranspiration et remontées capillaires. Cette compétition est directement gouvernée par la différence d'altitude entre nappe et surface, soit par la microtopographie. Elle se traduit également par les profils concaves de RU cumulée qui peuvent être associés à des caractéristiques hygrophile - meso-hygrophile à mésophile face aux différentes couvertures végétales.

I Introduction

I.1. Généralités et problématiques

Les marais côtiers sont considérés comme des « zones humides » qui ont été progressivement gagnées sur les sédiments fluvio-marins par poldérisations successives depuis le Moyen Age et qui ont conduit à la séparation entre marais mouillés et marais desséchés. Les sédiments sont nommés bri et peuvent être décrits comme bri ancien ou bri récent. La différence s'appuie sur leur localisation au sein du bassin constitué par le Marais poitevin: bri ancien sur les zones "périphériques situées derrière les cordons d'îles et bri récent sur les zones de polder.

Ce sont des écosystèmes riches et productifs biologiquement qui suscitent l'intérêt scientifique dans les domaines de l'écologie, l'environnement, l'agriculture et l'économie. Ces écosystèmes peuvent assurer le maintien et l'amélioration de la qualité de l'eau (rôle de filtre épurateur), la régulation des régimes hydrologiques (rôle d'éponge), l'accueil d'une faune et d'une flore remarquables (fonction d'alimentation, de reproduction et de refuge), la régulation des microclimats et la protection des sols. D'après Paticat (2007), la détermination et le classement des zones humides se basent sur l'hydrologie, la végétation et l'hydromorphie du sol. Les critères de reconnaissance et de délimitation des zones humides qui en découlent sont essentiellement les fluctuations des niveaux d'eau, la qualité des sols et la végétation des lieux.

A ces écosystèmes se sont superposés successivement des activités agricoles, prairies pour l'élevage et la culture de céréales. Particulièrement en expansion depuis les années 1960, ces activités ont conduit à des transformations des milieux par des modifications des techniques de drainages et par amplification des intrants dans les sols et les nappes. Ces dernières années la politique d'utilisation de ces territoires est plus raisonnée par rapport au milieu naturel et s'oriente vers une agriculture éco-responsable.

Dans cette orientation "éco-responsable" le premier objectif est de comprendre le fonctionnement des sols particulièrement riches en argiles qui se sont développés sur des sédiments initialement saturés en eau salée. Du point de vue régime hydrique, les mots clés sont niveau d'eau, salinité des eaux et transferts eau douce - eau salée, cycle saisonnier dessiccation - humidification et, en réponse, les cycles retrait-gonflement du matériau argileux. Du point de vue croissance végétale, ce sont profils de teneur en eau, de salinité, de structure et réserve utile des sols et transferts sol - plante - atmosphère.

L'étude de ces environnements doit nécessairement être pluridisciplinaire et capable de décrire et si possible modéliser les transferts à plusieurs échelles :

- celle de la microstructure des sols et des matrices argileuses via le comportement hydromécanique du matériau argileux jusqu'au niveau de l'interface racine-sol

- de l'échelle du profil hydrique à celle de la parcelle, il s'agit de suivre dans le temps les évolutions de structure jusqu'à un mètre de profondeur environ et les conséquences sur les relations profils hydriques - croissance des végétaux

- de l'échelle de la parcelle à celle du bassin d'alimentation face à la gestion hydrique des territoires et des transferts eau douce - eau salée.

Les disciplines mises en jeu sont respectivement:

- l'analyse texturale, minéralogique et pétrographique des sols (matrices argileuses),
- la caractérisation géotechnique des matériaux argileux essentiellement pour les relations entre microstructure et comportements hydromécaniques à l'échelle macroscopique et pour la caractérisation et/ou modélisation des propriétés de retrait - gonflement,
- le suivi hydrologique avec l'aspect pédologique, mesures tensiométriques éventuelles et de réserve utile RU,
- le suivi agro-biologique de la croissance des cultures,

A ceci peut se rajouter la recherche des propriétés thermo-hydriques des sols argileux pour la modélisation des évolutions de profils thermiques à mettre en relation avec l'activité microbologique dans le sol et les rendements de culture.

1.2. bilan des acquis concernant le fonctionnement hydrodynamique du bri

Les études précédentes, issues de l'Université de Poitiers, concernant les évolutions de structure des sols formés sur le bri du Marais Poitevin et du Marais de Rochefort ont été focalisées sur les évolutions verticales de structure de l'échelle de la parcelle à celle des bassins (Bernard, 2006; Gallier, 2011). Elles ont mis en évidence les profils hydriques types caractérisés par l'augmentation de la teneur en eau avec la profondeur. Elles ont également montré les gradients de salinité des eaux de la nappe du Bri et le rôle des entrées d'eau douces issues des coteaux calcaires (Figure 2).

L'homogénéité minéralogique et texturale du Bri a permis une modélisation du phénomène de retrait gonflement en parallèle des profils verticaux de structure des sols. Elle a permis également la mise en équation des relations structure - propriétés hydriques de la matrice argileuse constituant ces sols (Figure 3). Un des objectifs de ce travail est de vérifier le comportement hydromécanique et les évolutions verticales de structure du bri sur les 11 zones précédemment définies.

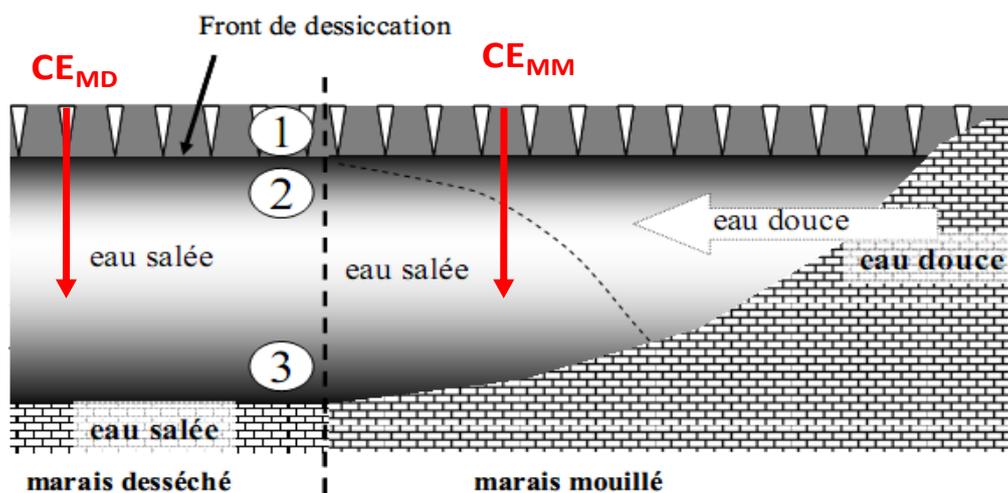


Figure 2 : Représentation schématique du fonctionnement hydrique des zones de marais (marais Poitevin et/ou marais de Rochefort, d'après Bernard, 2006). A proximité du coteau calcaire le gradient de salinité est gouverné par le mélange eau douce "sur" eau salée. En marais desséché le gradient de salinité n'est gouverné que par le niveau de nappe et l'épaisseur lixiviée par les eaux de pluies en

surface. Les gradients de salinité sont mesurés via la conductivité au 1/5 ($CE_{1/5}$). (1) : sol à l'état solide fracturé, (2) : sol à l'état plastique à liquide, (3) : Bri consolidé en profondeur sous le poids des terres.

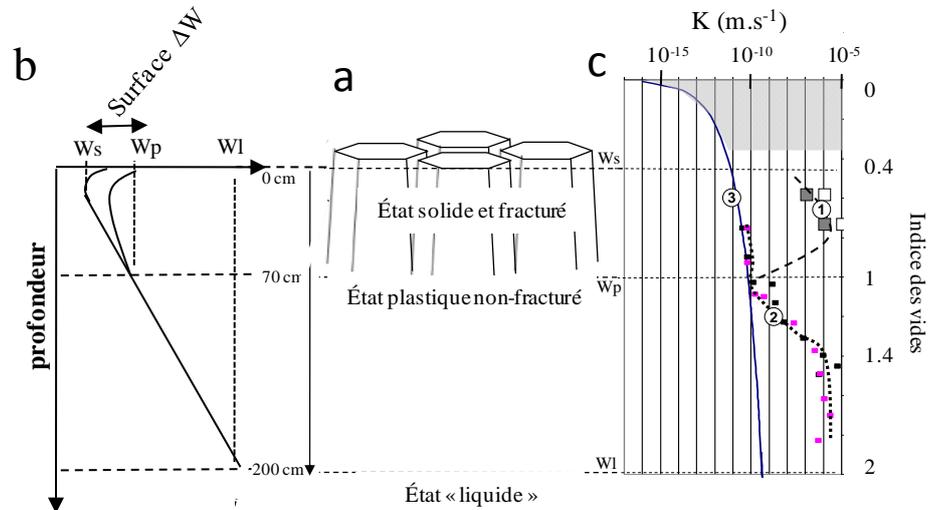


Figure 3 : Représentation schématique des évolutions de structure et conductivité hydraulique du bri. a - le retrait de surface induit des fractures jusqu'à la limite de plasticité (W_p), b - les évolutions des profils hydriques au cours des saisons s'observent essentiellement dans la zone d'état solide de surface, c - Les conductivité hydrauliques (K) de la matrice argileuse sont extrêmement faibles ($10^{-10} \text{ m.s}^{-1}$) à l'état solide. Carrés gris et blancs = infiltromètre Porcher.

Un objectif final est d'atteindre les Réserves Utiles (RU) disponibles pour la végétation dans ces sols argileux, et surtout leurs évolutions au cours des saisons. Les réserves utiles sont couramment calculées à partir de la structure du sol via la différence entre la capacité au champ et le point de flétrissement. La principale difficulté de ces territoires de marais côtiers, face aux calculs ou modélisations des Réserves Utiles disponibles pour les plantes, est l'évolution verticale de structure de ces sols qui résultent de leurs profils hydriques particuliers. Dans ces territoires où la nappe est proche de la surface, les profils hydriques et les profils de RU associés vont être gouvernés par la compétition entre les remontées capillaires et la descente du front de dessiccation et par les évolutions verticales de microstructure de matrice argileuse. La deuxième particularité de ces territoires est la superposition d'un stress salin au stress hydrique. Le phénomène est contrôlé par la saturation initiale des sédiments par l'eau de mer et par l'historique de dessèchement de surface et de poldérisation (Figure 4). L'équipe a récemment formulé une méthode de modélisation des profils de RU résiduelles particulièrement adaptée aux prairies (Radimy, 2015).

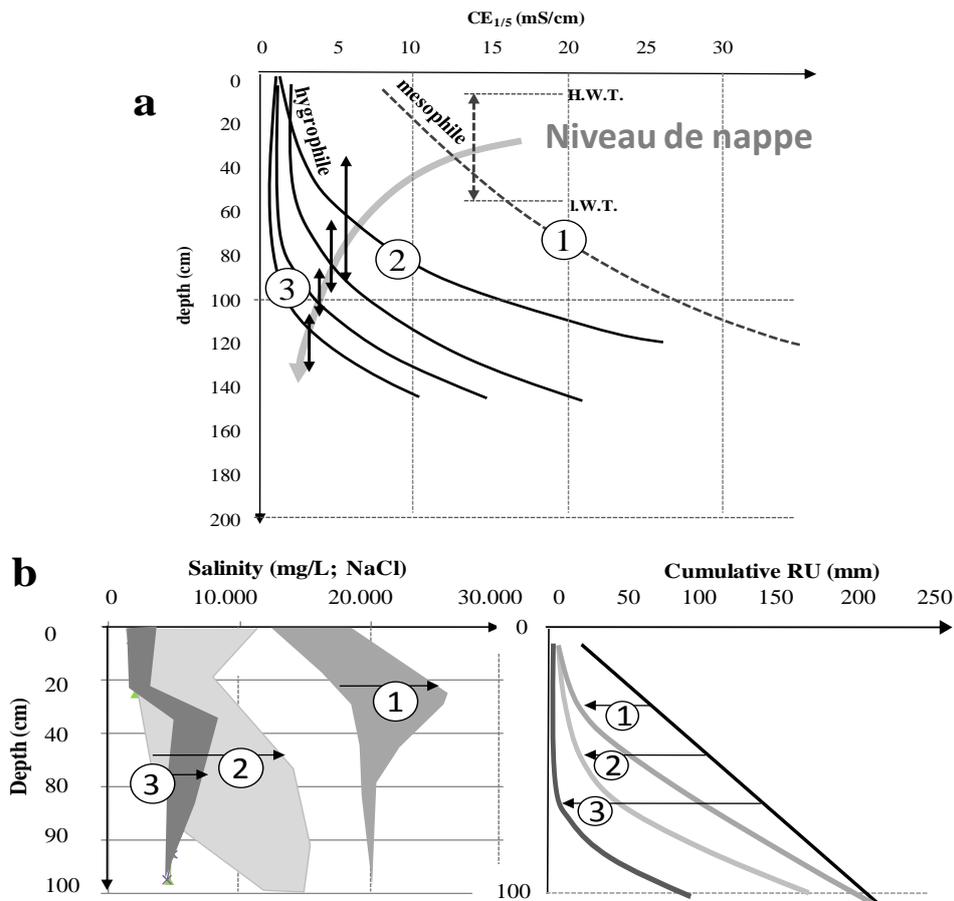


Figure 4 : Exemple d'évolution des profils de $CE_{1/5}$, de salinité en NaCl équivalent et des profils de RU résiduelles (Cumulative RU) en prairie non drainée (1), parcelle drainée proche du coteau (2) et parcelle drainée sans alimentation périphérique en eau douce (Radimy et al., 2013; 2014). a- les doubles flèches verticales indiquent le battement de nappe.

Conformément aux souhaits de l'EPMP, le présent travail est concentré sur le suivi de parcelles en prairie (non drainée). Les acquisitions de données y sont principalement focalisées sur les évolutions des profils hydriques, structuraux et de salinité.

1.3. fonctionnement hydromécanique du bri

A l'échelle macroscopique, les propriétés hydromécaniques des matrices argileuses et /ou des sols sont gouvernées par l'arrangement des particules argileuses entre elles, face contre face, bord – face ou bord – bord. Au sein d'une matrice argileuse la géométrie plus ou moins évolutive des micropores inter particules, notamment tailles et angles dièdres entre faces de particules et la déformabilité des particules, sont intimement liées aux évolutions de pressions de succions (Tableau 1; Tessier, 1984; Tessier et Pedro, 1984; Dudoignon et al., 2001, 2004; Gallier et al., 2012). Les capacités d'adsorption d'eau au sein de la microporosité ainsi que la flexibilité des particules vont ainsi gouverner les propriétés de retrait – gonflement de la matrice argileuse et à leurs propriétés hydromécaniques (Figure 5).

pF	Pressions (bars)	D _{max} pores (μm)
1	0.01	150
2	0.1	15
3	1	1.5
4	10	0.15
4.2	15.5	0.095
4.67	46.4	0.032
5	100	0.015
5.48	305	0.005
5.7	500	0.003
6	1000	0.0015

Tableau 1 : Correspondance entre pression de succion appliquée et taille maximum des pores impliqués (Tessier, 1984).

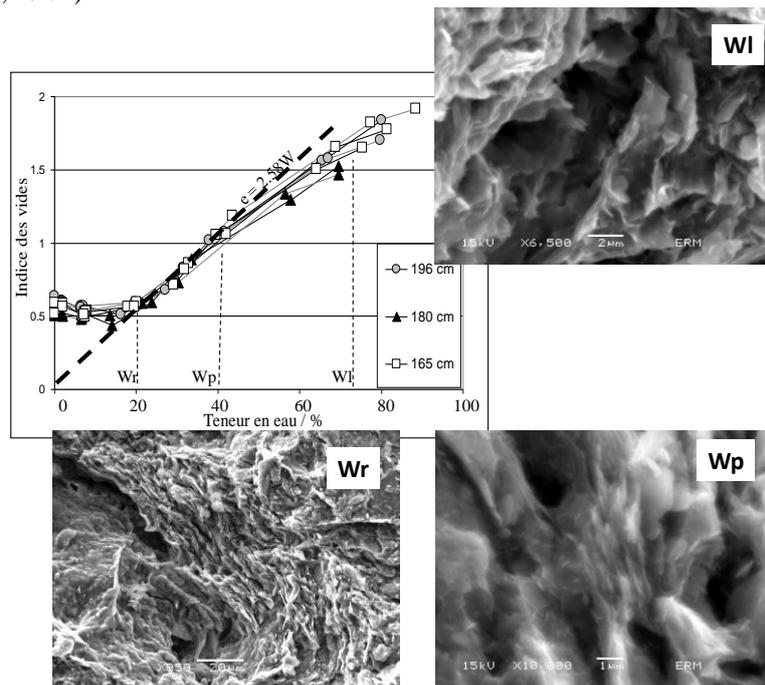


Figure 5 : Représentation des évolutions de microstructure de matrice argileuse du Bri (St Laurent de la Prée) le long de la courbe de retrait entre les états à la limite de liquidité (Wl), limite de plasticité (Wp) et limite de retrait (Wr). Les photos en microscopie électronique à balayage ont été obtenues après lyophilisation des échantillons humides intacts (Bernard, 2006).

Les évolutions volumiques de la matrice argileuse sont généralement représentées par une courbe de retrait : soit, la variation de volume en fonction de la teneur en eau. Une représentation indice des vides en fonction de la teneur en eau permet de normaliser les courbes pour des échantillons de volumes initiaux différents (Figure 5).

En fait, si le fonctionnement hydromécanique du sol est gouverné par ses évolutions de microstructure, il suit néanmoins deux règles (Figure 6):

- le phénomène de retrait n'est pas forcément réversible. La conséquence est que le tassement observé dans les parcelles n'est également pas forcément réversible,
- les effets de la dessiccation (retrait) et du tassement du à une pression (piétinement, engins) sur la matrice argileuse suivent les mêmes chemins d'état que la dessiccation.

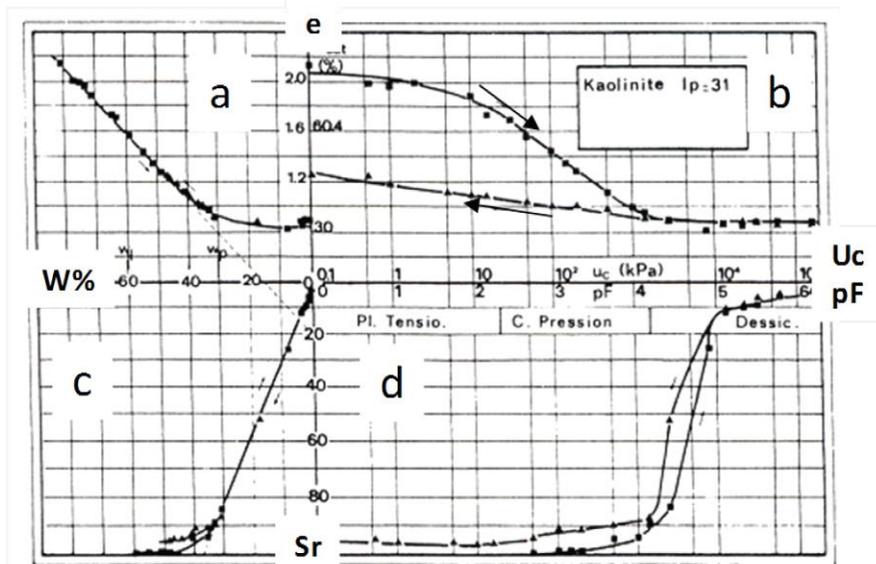


Figure 6 : Diagramme croisé e-W-Sat-pF représentant les évolutions de microstructure d'une matrice kaolinitique lors d'un cycle de drainage-humidification et de consolidation. e = indice des vides, W% = teneur en eau, Sr = indice de saturation, Wsat teneur en eau lors de l'essai oedométrique, Uc pression de consolidation oedométrique, pF = pression de succion (Biarez et al., 1987).

1.4. Remontées capillaires

Dans ces territoires de marais, qui résultent de la conquête des sédiments fluvio-marin, les niveaux de nappes résultent soit d'une "simple dessiccation par "poldérisation" et rabattement progressif de la nappe du bri, soit du même phénomène accéléré et accentué par le drainage. Dans les deux cas, les faibles profondeurs de nappe ajoutées à la texture très fine des sédiments suggèrent des remontées capillaires potentielles jusqu'à la surface, que ce soit en parcelle drainées ou non drainées (Schmidhalter et Oertli, 1989; Terzaghi et Peck; 1967; Giesel et al, 1972; Hansbo, 1975). Les remontées capillaires sont dues à l'existence de tensions superficielles aux interfaces entre l'eau et la phase argileuse. Elles sont gouvernées par la microstructure du matériau et par les niveaux de nappes. Elles définissent deux zones superposées: le niveau situé directement au contact de la nappe qui est saturé par les remontées capillaires des eaux et un niveau supérieur, atteint par les remontées capillaires mais non saturé. Les hauteurs de remontées capillaires que l'on peut associer aux trois structures clés du bri, limite de retrait, limite de plasticité et limite de liquidité, ont été calculées à partir des équations de Terzaghi et Peck (1967) (**Tableau 2**; Radimy, 2015). Les ordres de grandeurs de la remontée capillaire et même uniquement de la zone saturée sont supérieurs au mètre, cohérents avec les données généralement admises pour les sols argileux à limoneux (Schmidhalter et Oertli, 1989; Hansbo, 1975). De fait la recharge hydrique dans les parcelles en prairie étudiées peut être assurée uniquement par ses remontées capillaires qui sont également associées à la salinité de la nappe (**Figure 7**). L'éventualité d'une zone non saturée superficielle ne peut être due qu'à la compétition entre la descente du front de dessiccation et le front de remontée capillaire. Il faut souligner que si les hauteurs de remontées capillaires s'accroissent avec la diminution de taille du réseau poral, parallèlement les vitesses de remontées sont plus faibles.

e	Hauteur fringe capillaire		
	Zone saturée	Zone non saturée	Cumul à W constant
0,5 (e_{Wr})	10	4	14
1,0 (e_{Wp})	5	2	7
1,5 (e_{Wl})	3,3	1,3	4,6

Tableau 2 : Hauteur de remontés capillaires (minimales) en mètres, calculées à partir de l'équation empirique de Terzaghi et Peck (1967) pour les indices des vides correspondants aux microstructures des états limite de liquidité (Wl), limite de plasticité (Wp) et limite de retrait (Wr).

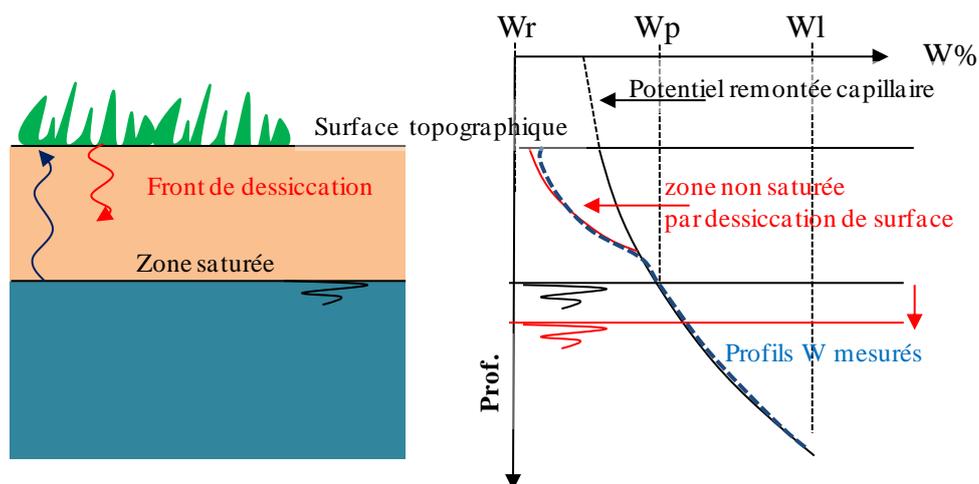


Figure 7 : Représentation schématique de l'évolution des profils de teneur en eau prévisibles dans les marais à partir d'un profil de sol initialement saturé par les remontées capillaires issues de la nappe proche de la surface. Dans ces territoires à nappe de surface les hauteurs potentielles de remontées capillaires dépassent nettement la surface (Radimy, 2015).

Détermination de la teneur en eau qui constitue la limite entre la zone saturée et la zone non saturée.

Cette limite peut être interprétée comme le point d'entrée d'air qui est généralement proche de la limite de retrait du matériau. Pour le bri la limite de retrait a été déterminée à $W_r = 20\%$. La teneur en eau limite entre saturation et non saturation a été obtenue par superposition de la courbe de retrait (à saturation $Sat=100\%$) sur la courbe de compaction (Proctor; **Figure 8**). La valeur de la teneur en eau caractéristique de la limite entre saturation et non saturation correspond au point de séparation des deux courbes soit $W = 27\%$.

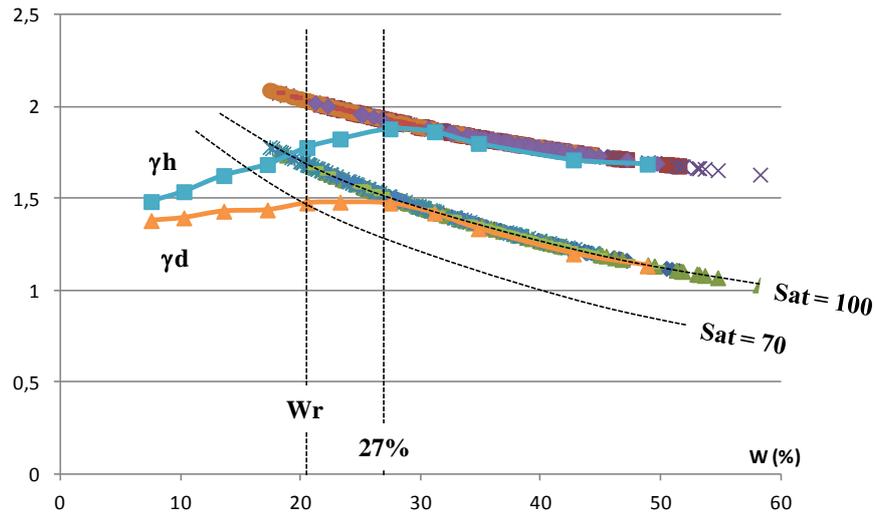


Figure 8: Superposition des profils de teneur en eau (W) et de densités, calculés à partir de la courbe de retrait, et des courbes Proctor. γ_h = densité humide, γ_d = densité sèche, W_r = limite de retrait. (Radimy et al., 2015).

En résumé, les faibles profondeurs de nappe ajoutées à la texture très fine des sédiments permettent des remontées capillaires potentielles jusqu'à la surface (Tableau 2 et Figure 7; rapport intermédiaire 1). Deux zones superposées peuvent être néanmoins observées: la zone saturée localisée directement au contact de la nappe et une zone supérieure, atteinte par les remontées capillaires mais non saturée. En considérant la limite entre la zone saturée et la zone non saturée de surface établie à $W=27\%$, la zone non saturée n'est observée en prairie de St Laurent de la Prée qu'en surface lorsque la nappe descend en dessous de 70cm de profondeur. La frange capillaire saturée est voisine de 60cm d'épaisseur ou plus (Figure 9).

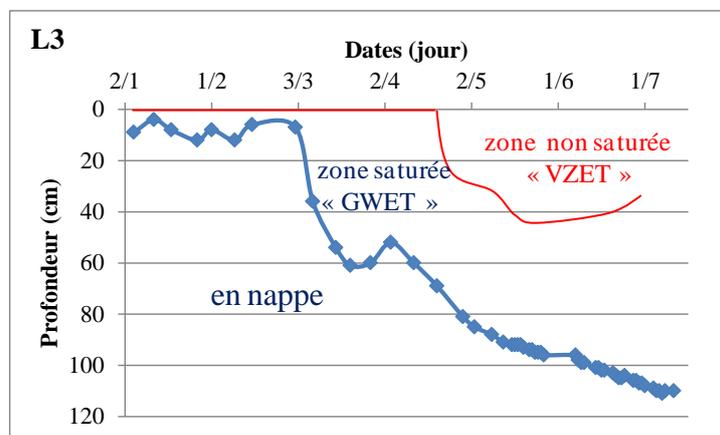


Figure 9: Relation entre la profondeur de nappe (niveaux piézométriques mesurés) et la limite estimée entre la zone saturée et la zone non saturée (rouge). GWET = Ground water evapotranspiration, VZET = vadoze zone evapo-transpiration.

2 Matériel et méthodes

2.1. Matériel : situation des parcelles et des profils

Les onze sites ont été sélectionnés par l'Etablissement Public du Marais Poitevin par rapport à des questions de pédodiversité et de qualité de prairie dans des parcelles utilisées pour l'élevage bovin et/ou équin. Les onze sites sont localisés en périphérie du Marais Poitevin. Ils concernent des territoires en marais mouillé et en marais desséché (marais anciens et marais récents) (Figure 1). Quatre à douze profils d'étude ont déjà été choisis et suivis du point de vue flore sur les différentes parcelles. Pour cette étude, plus orientée structure des sols, un seul de ces profils a été sélectionné par parcelle (Tableau 3).

Localisation parcelle	N° station (profil)	nomenclature	localisation GPS début de profil		localisation GPS vérifiée	
			latitude Ydeb	Longitude Xdeb	latitude Ydeb	Longitude Xdeb
1 - Marais desséché Bas de Longeville	01VP02	Longeville 1 Longeville 2 Longeville 3	46.408689	1.462308		
2 - Marais mouillé de Luçon	02VP01	Luçon 1 Luçon 2 Luçon 3	46.418453	1.174234		
3 - marais desséché Les Rouchères	03VP05	Rouchères 1 Rouchères 2 Rouchères 3	46.408715	1.147890	46.40940 46.40947 46.40930	1.14679 1.14705 1.14717
4 - Marais mouillé de Nalliers-Mouzeuil	04VP04	Nalliers 1 Nalliers 2 Nalliers 3 Nalliers 4	46.432607	1.023845		
5-Marais desséché Boissière	05VP04	Boissière 1 Boissière 2 Boissière 3	46.420670	0.997683	46.42018 46.42081 46.42070	0.99692 0.99685 0.99735
6 - Marais mouillé Commune du Poiré	06VP03	Poiré 1 Poiré 2 Poiré 3	46.412370	0.937804	46.41300 46.41276 46.41268	0.93722 0.93680 0.93652
7 - Marais mouillé Saint-Arnault / Vieille Autise	07VP02	Ste Christine 1 Ste Christine 2 Ste Christine 3	46.364532	0.680725	46.36523 46.36515 46.36493	0.68036 0.68033 0.68010
8 - Marais mouillé Le Mazeau	08VP01	Le Mazeau 1 Le Mazeau 2 Le Mazeau 3	46.326205	0.647205	46.32642 46.32642 46.32661	0.64667 0.64652 0.64623
9 - Marais mouillés Marais sauvage	09VP02	St Hillaire 1 St Hillaire 2 St Hillaire 3	46.283438	0.714935	46.28366	0.71471
10 - Marais mouillé Le Passage - La Ronde	10VP02	La Ronde 1 La Ronde 2 La Ronde 3	46.304576	0.781154	46.30483 46.30499	0.78056 0.78056
11 - Marais mouillé Cuvette de Nuaille	11VP03	Nuaille	46.209977	0.933229		

Tableau 3 : Choix des sites profils étudiés sur les différentes parcelles.

Du point de vue relations entre profils hydriques et profils de salinité, la transition se fait par les profils de $CE_{1/5}$ et par la loi de Montoroi (Montoroi, 1997; Gallier, 2011). Les profils de $CE_{1/5}$ s'avèrent généralement relativement stables à travers les saisons (Gallier, 2011). Ils sont essentiellement gouvernés par l'historique de la gestion hydrique et de l'évolution du niveau de nappe (Gallier et al., 2012; Radimy, 2013). Autrement dit, ils sont gouvernés par la hauteur de sol lixivié à partir de la surface, par les eaux de pluie. Pour les toits de nappe relativement horizontaux, ce sont les microreliefs et la salinité de nappe qui vont être les facteurs dominants dans les mécanismes.

Les profils de RU disponibles pour les prairies vont dépendre de la concurrence entre ETP et les remontées capillaires. De nombreux paramètres interviennent, la microstructure des sols pour les transferts hydriques verticaux à l'échelle d'un profil, la microtopographie à l'échelle de la parcelle, et les transferts eau douce - eau salée via les alimentations horizontales en eau douce à l'échelle du bassin. Les RU peuvent être calculées en chaque site à partir de l'ETP à condition de disposer d'enregistrements météorologiques in situ. Dans le cas contraire les RU peuvent être calculées en se basant sur les textures et la structure des sols (Mathieu et Pieltain, 1998). Finalement une modélisation des profils de RU des eaux résiduelles facilement utilisable par la végétation peut être proposée pour ces prairies (Radimy, 2015).

Les dates d'intervention sur les 11 sites se sont échelonnées d'avril 2015 à Janvier 2016 (Tableau 4)

site	dates						
Longeville	21/04/15					13/10/15	19/01/16
Luçon	21/04/15					13/10/15	19/01/16
Nalliers	21/04/15					13/10/15	19/01/16
Rouchères		28/04/15				13/10/15	19/01/16
Boissière		28/04/15				13/10/15	19/01/16
Poiré		28/04/15				13/10/15	19/01/16
Le Mazeau			29/05/15		1/10/15		18/01/16
La Ronde			29/05/15	21/07/15	1/10/15		18/01/16
St Hillaire			29/05/15	21/07/15	1/10/15		18/01/16
St Christine			29/05/15	21/07/15	1/10/15		18/01/16
Nuaille				21/07/15	1/10/15		18/01/16

Tableau 4 : Récapitulatif des dates d'intervention sur les 11 sites.

2.2. Démarche générale et Méthodes

2.2.1 Démarche générale

Les investigations in situ ont été réparties de manière à :

- 1 - caractériser les différents sites du point de vue structure et minéralogie du bri
- 2 - Suivre les évolutions structurales et hydriques des profils choisis
- 3 - de calculer les évolutions des profils de RU et de salinité au cours de la saison.

L'ensemble des résultats est confronté aux acquis déjà obtenus sur le marais poitevin et sur le site expérimental de l'INRA de St Laurent de la prée. La minéralogie du bri des différents sites est comparée à celle déjà obtenue précédemment dans le Marais de Rochefort avec l'objectif de montrer l'homogénéité minéralogique sur l'ensemble des marais. Les comportements hydromécaniques sont comparés et discutés par rapport à la courbe de retrait du bri et à sa courbe de compaction.

Les investigations in situ, profils de teneur en eau, tomographie électrique et pénétromètre permettent de caractériser la structure des sites du point de vue hydrique et structure mais également de localiser les niveaux tourbeux superposés ou interfacés dans le bri argileux. Les sections en tomographie électrique permettent également de localiser la profondeur du toit calcaire.

Dans un deuxième temps, les évolutions des profils hydriques et des salinités associées sont étudiées de manière à proposer un modèle numérique de calcul des profils de RU et salinité.

2.2.2. Méthodes

Investigations in situ

Les prélèvements sont effectués par sondages tarière à main. Les profondeurs d'investigations sont limitées à 1,00 - 1,20 m. Les sondages sont pratiquement entièrement récupérés de manière à mesurer les teneurs en eau et les $CE_{1/5}$ tous les dix centimètres.

Les profils pénétrométriques ont été effectués à l'aide d'un pénétromètre dynamique portable de type PANDA (Pénétromètre Automatique Numérique Dynamique Assisté par ordinateur). Les profils de résistance à la pointe Qd ont également été mesurés jusqu'à 1,00 - 1,20 m de profondeur. L'appareil facilement utilisable et transportable possède une gamme de mesure de 0,1 à 40 Mpa. Le principe est basé sur l'enfoncement en profondeur d'une pointe (fixe ou perdue) qui est mise au bout d'un jeu de tiges. Le battage correspond à une masse frappante (M) sur le train de tige. L'unité centrale de l'appareil enregistre la vitesse (V) de la masse de battage, l'énergie et l'enfoncement correspondants. L'appareil calcule la résistance à la pointe (Qd en MPa) pour chaque choc via la formule des Hollandais et enregistre la valeur de Qd et la profondeur correspondante (Cassan, 1988; Zhou, 1997 cité par Bernard (2006) et Gallier (2011)):

$$Qd = \frac{M \cdot V^2}{2 \cdot A \cdot d} * \frac{1}{1 + \frac{P}{M}}$$

avec Qd la résistance à la pointe (MPa), P la masse battue (pointe et tiges) (kg), V la vitesse d'impact ($cm \cdot s^{-1}$), M la masse frappante (kg), A la section de la pointe (cm^2) et d l'enfoncement (cm).

Lors des mesures, on a utilisé une pointe conique perdue en acier de 4 cm^2 de section pour limiter les forces de frottements entre le train de tige de section 2 cm^2 et le sol argileux.

Les prospections géophysiques ont été effectuées par tomographie électrique. A l'échelle macroscopique, la résistivité électrique dépend essentiellement de la microstructure (et/ou structure) du matériau, de sa porosité, de l'indice de saturation et de la résistivité (ou salinité) du fluide d'imprégnation du matériau (Archie, 1942; Chapellier, 2001; Michot, 2003; Samouelian et al., 2004, 2005):

$$\rho_s = \alpha * \rho_w * \phi^{-m} * Sat^{-n}$$

avec, ρ_s la résistivité du matériau, α le facteur de formation dépendant de la nature du milieu, ρ_w la résistivité du fluide d'imbibition, ϕ la porosité, m le facteur de cimentation, Sat l'indice de saturation et n un facteur dépendant de la nature du milieu.

La méthode avait été largement employée précédemment sur ces territoires et couplée à des investigations par salinomètre qui ont permis d'y étalonner la loi d'Archie (Bernard-Ubertosi et al., 2009; Gallier et al., 2012). L'étalonnage de cette formule, pour le bri, selon Bernard *et al.*, 2006 est la suivante :

$$\rho_s = 1.01 * \rho_w * \phi^{-2.73} Sat$$

Ces valeurs, calées pour le bri, permettent de recalculer les profils de résistivité en domaine saturé ($Sat=1$) et de reconstituer les profils de dessiccation (Dudoignon et al., 2009; Gallier, 2011 ; Gallier et al., 2012). Dans les matériaux argileux deux types de conductivité rentrent en concurrence : la conductivité électrolytique et les conductivités de surface. Pour la première, la circulation du courant est due à la présence des ions en solution dans l'eau interstitielle. C'est la loi d'Archie qui s'applique. Pour la seconde la conductivité est associée aux charges qui existent à la surface des minéraux

argileux. Pour cela, Waxman et Smits (1968) ont montré que la CEC (capacité d'échange cationique) joue un rôle important dans la conductivité surfacique. Néanmoins dans ces sols saturés par des fluides à forte salinité, la conductivité surfacique est « effacée » par la conductivité hydraulique qui est largement dominante (Gallier, 2011). La loi d'Archie précédemment étalonnée reste appropriée sur l'ensemble de nos territoires des marais de l'Ouest.

Les dispositifs utilisés pour ce travail sont de type Wenner et sont composés de 24 électrodes espacées tous les 2 mètres. Le résistivimètre utilisé est un Syscal R1+ avec un switch pour programmer et gérer les injections de courant jusqu'à 72 électrodes pour un espace maximum de 5 m entre électrodes. Les séquences sont d'abord créées puis téléchargées dans l'appareil SYSCAL via le logiciel ELECTRE II qui va permettre de choisir le type de dispositif et sa configuration. Quand les mesures sont finies, les données sont récupérées et téléchargées via un ordinateur équipé d'un logiciel PROSYS afin de changer les formats des acquisitions. Ces derniers sont ensuite traités et inversés par un logiciel RES2DINV qui au final permet de visualiser les panneaux de résistivité. Les résultats sont présentés par le model sous forme de trois sections superposées :

- la section de mesures brutes
- une section reconstruite par calcul inverse
- et une section brute recalculée à partir de la seconde.

Seules les sections reconstruites sont présentées dans le rapport. Les dispositifs (24 électrodes tous les 2 m) utilisés montrent des sections de résistivités jusqu'à 9,50 m de profondeur mais qui ne prennent le sol en compte qu'à partir de 40 cm de profondeur (Figure 10).

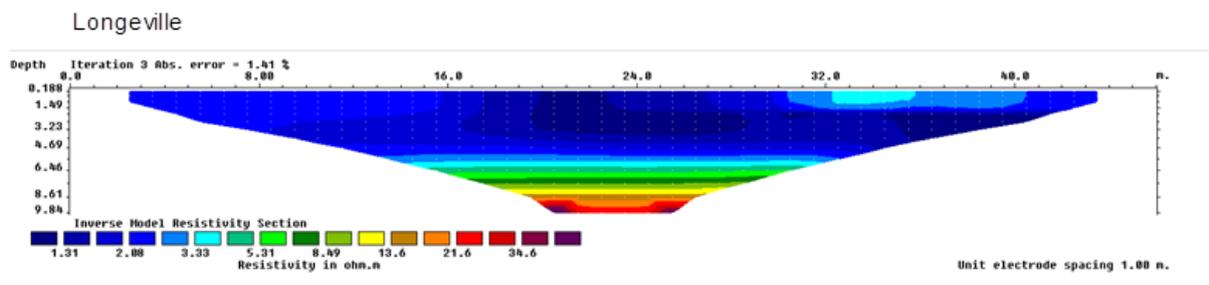


Figure 10: Exemple de profil obtenu en tomographie électrique (Longeville). Profondeur apparente d'investigation 9-10m. Domaine de résistivité 1 - 40 Ω .m.

Malgré les reconstructions mathématiques les sections proposées restent toujours en **résistivités et profondeurs apparentes**. Néanmoins les sections de résistivités obtenues en tomographie doivent traduire (Figure 11):

1. les évolutions verticales de structure du bri qui sont contrôlées par:
 - l'aprofondissement du front de dessiccation à partir de la surface
 - la consoildation en profondeur du matériau argileux sous le poids des terre.
2. les évolution de salinité des eaux entre les sites et/ou en verticale (profondeur) par superposition de nappe d'eau douce ou peu salée de surface sur la nappe salée de profondeur héritée de la nappe fossile.
3. la profondeur du toit calcaire.

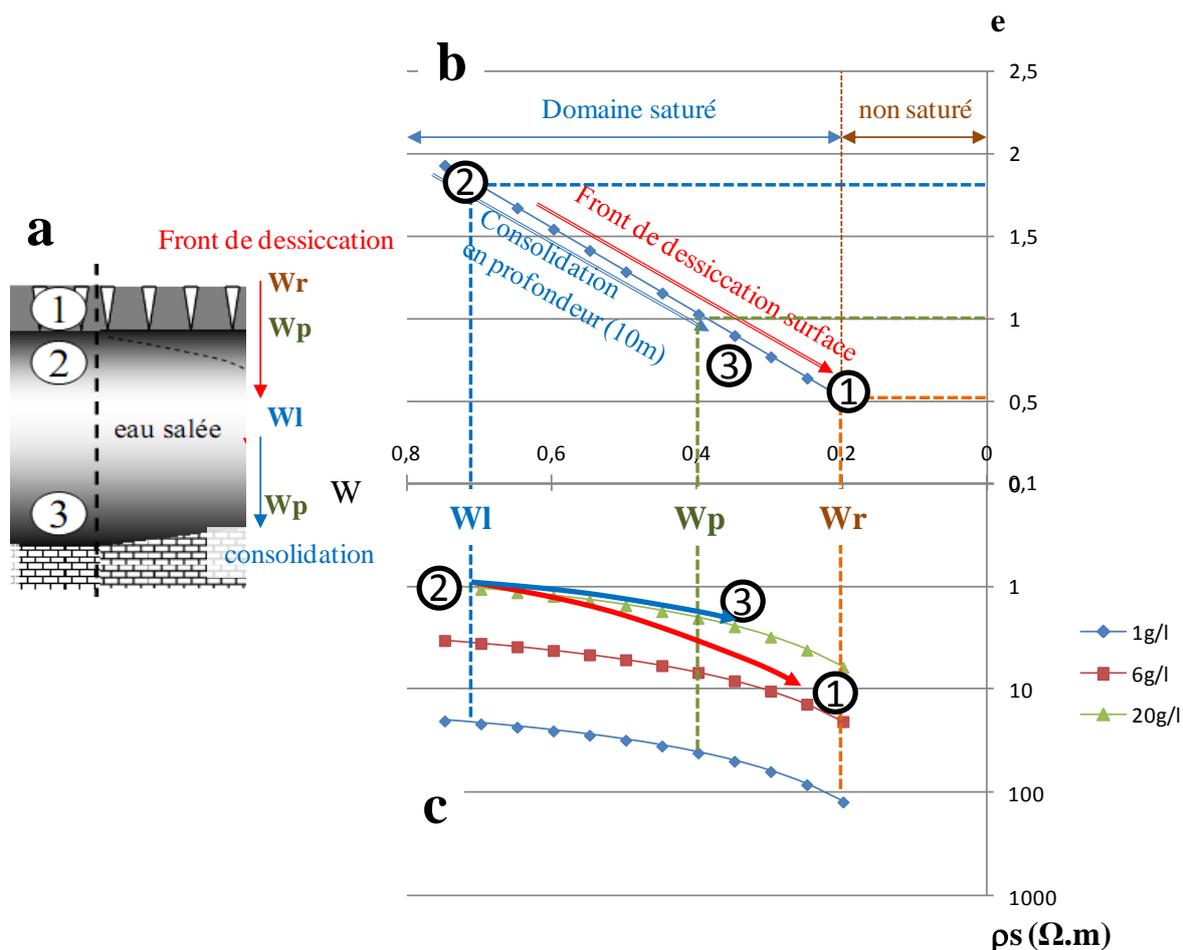


Figure 11 : Représentation des relations microstructure du bri / résistivité calculée via la loi d'Archi. a - structuration verticale, b - profil hydrique et courbe de retrait, c - profils de résistivités calculés pour des salinités de l'eau de 1, 6 et 20 g/l. A porosité équivalente la résistivité est contrôlée par la salinité de nappe du bri. 2 = état plastique à liquide du bri, 1 = front de dessiccation, état solide du bri, 3 = consolidation en profondeur, état liquide à plastique ou solide

Finalement, cette représentation permet de suivre l'évolution de structure du sol et de salinité de nappe de la surface vers la profondeur. Les sections de tomographies permettent de distinguer les différences de salinité de nappe quand c'est le cas. La limite entre la nappe superficielle et la nappe de "profondeur" est localisée autour du niveau de la limite de plasticité du matériau argileux (et de sa faible perméabilité). La nappe sous-jacente intègre le bri de son état plastique à son état liquide. En profondeur, le bri st progressivement consolidé également jusqu'à sa limite de plasticité qui marque globalement son contact avec le substratum calcaire (Figure 12).

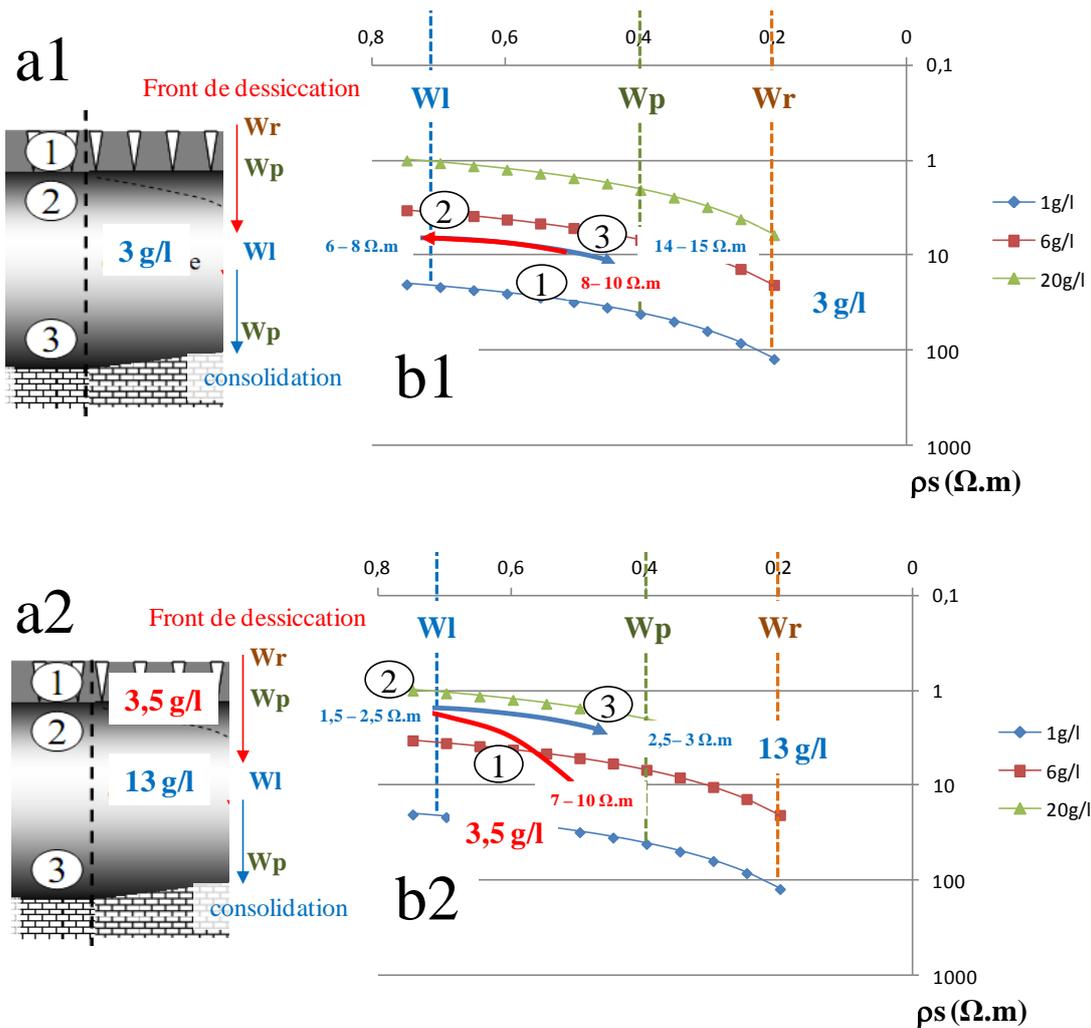


Figure 12 : Exemple de relation profil de résistivité électrique, structure de sol et salinité de nappes.

a1, b1 une seule nappe de salinité 3g/l. b1 flèche rouge = profil de dessiccation à partir de la surface le long de la courbe de résistivité calculée pour 3g/l (8-10 Ωm à 6-8 Ωm), flèche bleue = profil de consolidation en profondeur le long de la même courbe de résistivité à 3g/l (6-8 Ωm à 14-15 Ωm).

a2, b2 deux nappes superposées de salinité 3,5 g/l en surface et 13g/l en profondeur. flèche rouge dessiccation à partir de la surface, de la nappe superficielle à 3,5 g/l (7-10 Ωm) vers la nappe à salinité supérieure (13g/l) en profondeur (1,5-2,5 Ωm), flèche bleue = profil de consolidation en profondeur le long de la courbe de résistivité à 13g/l (1,5-2,5 Ωm à 2,5 - 3 Ωm).

Investigations en laboratoires

Les teneurs en eau sont obtenues par séchage à 105°C (24h). Les paramètres calculables sont:

- la teneur en eau pondérale correspondant à la masse d'eau (Mw) divisée par la masse sèche (Md) de l'échantillon:

$$W \% = M_w / M_d * 100$$

- la teneur en eau volumique (Θ) correspondant au volume d'eau (Vw) divisé par le volume total du sol (Vt):

$$\Theta \% = V_w / V_t * 100$$

- l'indice des vides qui se définit comme le rapport entre le volume des vides (V_v) sur le volume des solides (V_s) de l'échantillon:

$$e = \frac{V_v}{V_s}$$

- la porosité, définie comme le rapport du volume des vides (V_v) sur le volume total (V_t) de l'échantillon. Elle peut être écrite sous la forme :

$$n = \frac{V_v}{V_t}$$

La relation entre W et Θ est la suivante :

$$\Theta = (\rho_d / \rho_w) * W$$

Il existe également une relation réciproque entre indice de vide « e » et la porosité « n »:

$$n = \frac{e}{1+e}$$

$$e = \frac{n}{1-n}$$

La densité moyenne des grains solides a été mesurée au pycnomètre, elle est égale à 2.58 pour les bri. Les relations teneur en eau / indice des vides ont été établies via la courbe de retrait du bri (Bernard, 2006; Gallier, 2011).

L'indice de saturation (Sat) défini comme le rapport du volume de l'eau sur le volume des vides:

$$\text{Sat \%} = \frac{V_w}{V_v} * 100$$

avec, V_w le volume de l'eau et V_v le volume des vides de l'échantillon.

Les limites de liquidité, plasticité et retrait sont respectivement (**Tableau 5**):

	Limite de retrait	Limite de plasticité	Limite de liquidité
Teneur en eau W (%)	20	40	70
Indice des vides e	0,5	1,0	1,8
Porosité n (%)	33	50	64
Perméabilité K (m/s)	10^{-11}	10^{-10}	5.10^{-5}

Tableau 5: Récapitulatif des caractéristiques hydro-structurale du bri (matrice argileuse).

Les conductivités électriques au 1/5 des sols ($CE_{1/5}$) sont mesurées sur des suspensions au 1/5^{ème}, soit 10g de sol sec dans 50g d'eau distillée (Pons, 1997; Pons et Gerbaud, 2005 ; Gallier, 2011). Elles ont été effectuées systématiquement sur tous les échantillons de sol (prélevés pour les profils de teneur en eau, soit tous les dix centimètres). Les mesures sont effectuées à 20°C à l'aide d'un conductimètre « CONSORT K810 ».

La salinité des eaux d'imbibition des sols ont été calculées en deux temps :

1 - le calcul de la conductivité électrique du fluide contenue dans le sol via la formule de Montoroi (Montoroi, 1997; Gallier, 2011).

$$CE_f = (CE_{1/5} * 5) / W$$

avec, CE_f la conductivité électrique du fluide in situ ; $CE_{1/5}$ la conductivité électrique mesurée de l'extrait 1/5^è exprimé en $\mu\text{S/cm}$; W la teneur en eau pondérale de l'échantillon *in situ*.

2 - la transformation des profils de CE_f en salinité en équivalent NaCl:

$$\text{Salinité} = 0.63 * CE_f$$

avec, CE_f la conductivité électrique du fluide "in situ" ; 0.63 le facteur multiplicatif finalement obtenu à partir d'abaques Conductivité-Température-Résistivité.

Ces salinités calculées à partir des $CE_{1/5}$ ont été utilisées pour les interprétations des sections de tomographie électrique. Elles caractérisent la formation de surface traversée par les lignes de courant, jusqu'à 1,20 m de profondeur. Les profondeurs totales d'investigation en tomographie électrique atteignent environ 9 - 10 m de profondeur.

Identification minéralogique par diffraction de RX

Les diffractogrammes de RX ont été obtenus sur des préparations en poudres désorientées sur la fraction $< 20\mu\text{m}$ et sur préparations orientées de la fraction $< 2\mu\text{m}$. Les premières permettent d'identifier l'ensemble des minéraux présents (minéraux argileux, quartz, feldspath, calcite). Les préparations orientées sont dédiées à l'identification des assemblages des minéraux argileux présents dans les échantillons. Elles sont obtenues par "sédimentation" de la fraction $< 2\mu\text{m}$ sur lames de verre. Les diffractogrammes sont obtenus sur les préparations orientées après les traitements habituels (Brindley et Brown, 1980; **Figure 13**):

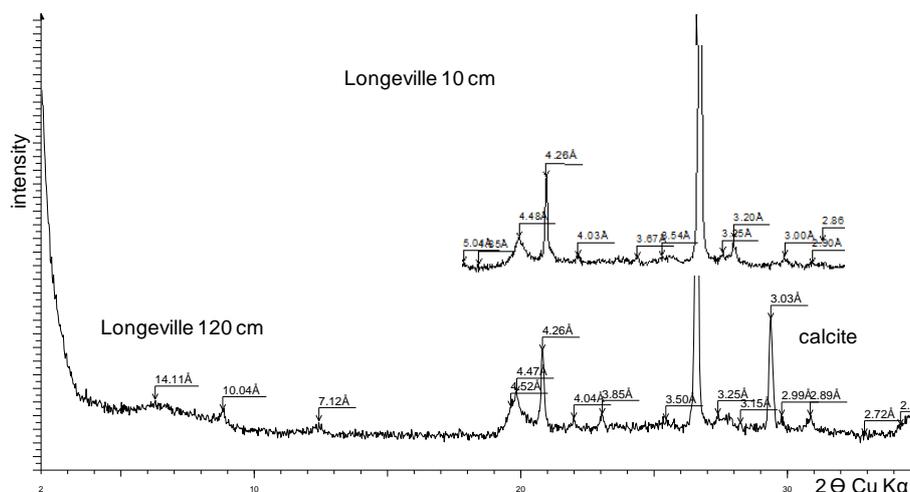
- séchée à l'air libre
- saturation éthylène glycol
- chauffage 350°C
- chauffage 550°C .

Ces territoires des marais côtiers ont été progressivement gagnés sur les sédiments fluviomarins par dessiccation et compaction progressive.

Deux effets minéralogiques sont généralement décrits:

- une illitisation du sédiment en surface. Il s'agit d'une évolution progressive des assemblages des minéraux argileux de type smectite vers des minéraux de type illite. Les transformations ont été très lentes et ont conduit à des assemblages d'inter-stratifiés illite-smectite à pourcentage de smectite décroissant avec le temps dans la partie superficielle des sols.
- une "carbonatation" en profondeur, résultante de la lixiviation de surface.

En conséquence les diffractions de RX ont été effectuées sur les échantillons prélevés à 10, 70 et 120 cm de profondeur.



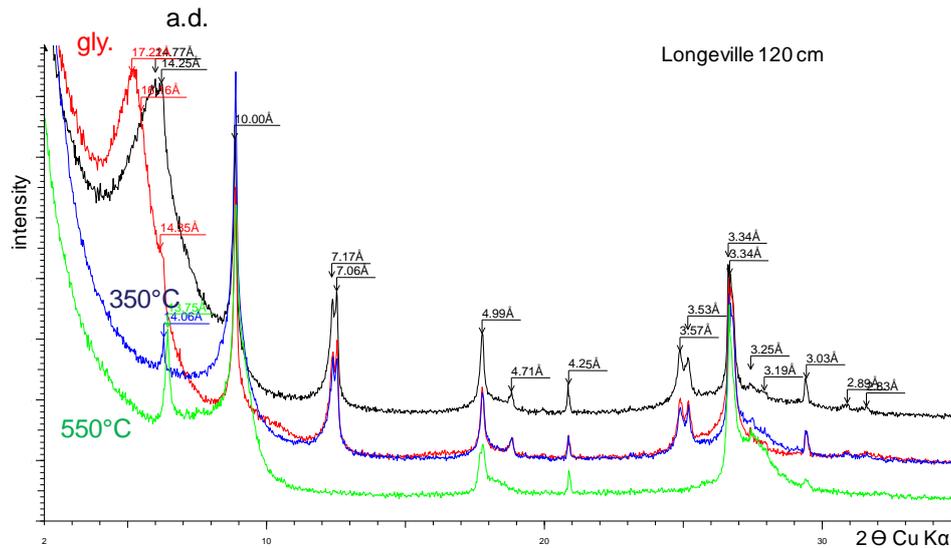


Figure 13 : Exemple de Diffractogrammes de RX d'échantillons prélevés à 10 et 120 cm de profondeur (Longeville)

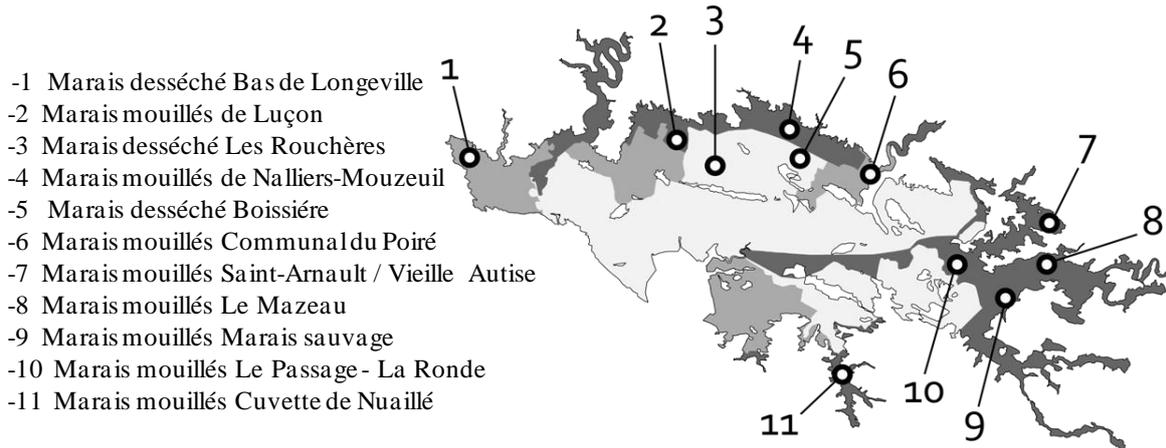
- diffractogramme de poudre désorientée. La différence majeure est l'apparition ou l'augmentation d'intensité du pic de la calcite (3,03 Å) en profondeur
- préparations orientées naturelle (a.d.), glycolée (Gly), chauffées 350 et 550°C. La phase argileuse (smectitique) est caractérisée par le décalage du pic (001) de sa position a.d. (voisine de 14Å) vers les petits angles après saturation glycol (gly., voisine de 17Å).

III - Résultats

Les résultats sont présentés en trois étapes :

- la minéralogie des bris à partir des diffractions de RX
- l'investigation initiale, structure et hydraulique, qui permet de reconnaître la structure d'ensemble de chaque site, profils de teneur en eau, conductivité électrique $CE_{1/5}$, salinité sur le premier mètre et les sections de tomographie électrique jusqu'à 9-10 m de profondeur.
- les évolutions dans le temps des profils W, $CE_{1/5}$ et salinité dans le premier mètre sous la surface.

Pour chaque étape, l'ensemble des résultats des investigations in situ et en laboratoire est présenté site par site en suivant leur numérotation :



III - 1 Campagnes initiales

3.1.I Minéralogie

La minéralogie, du fait de son homogénéité, est présentée pour l'ensemble des sites.

Marais récent de Longeville

Les diffractogrammes sur poudres permettent d'identifier l'ensemble des principaux minéraux constituant le bri, des petits angles vers les grands angles (Figure 14) :

- smectitique (14,10 Å)
- illite (10 Å, 5 Å et 3,33 Å)
- kaolinite (7 Å et 3,56 Å)
- Felspaths (4,04 Å, 3,20 Å)
- quartz (4,26 Å et 3,34 Å)
- calcite (3,03 Å).

La seule différence significative entre surface et 1,20 cm de profondeur est la quantité de calcite plus importante en profondeur.

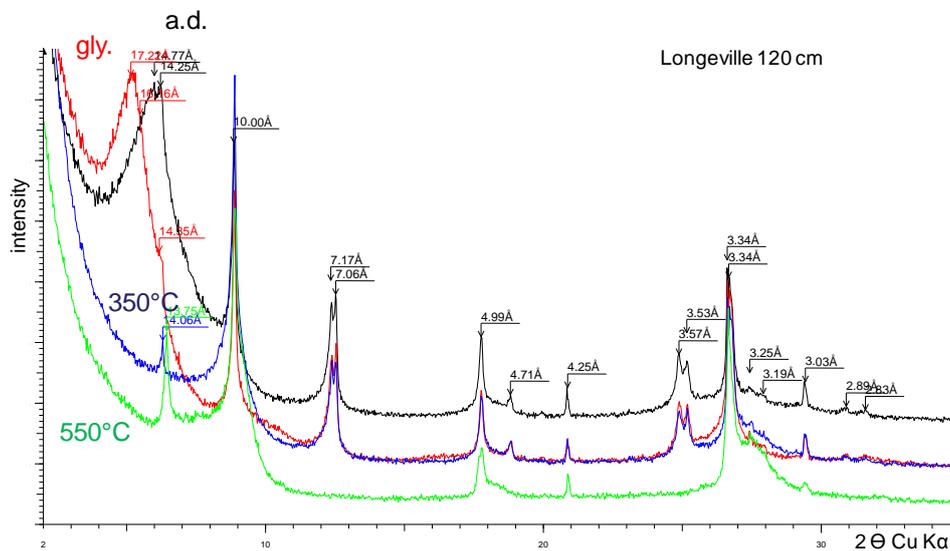
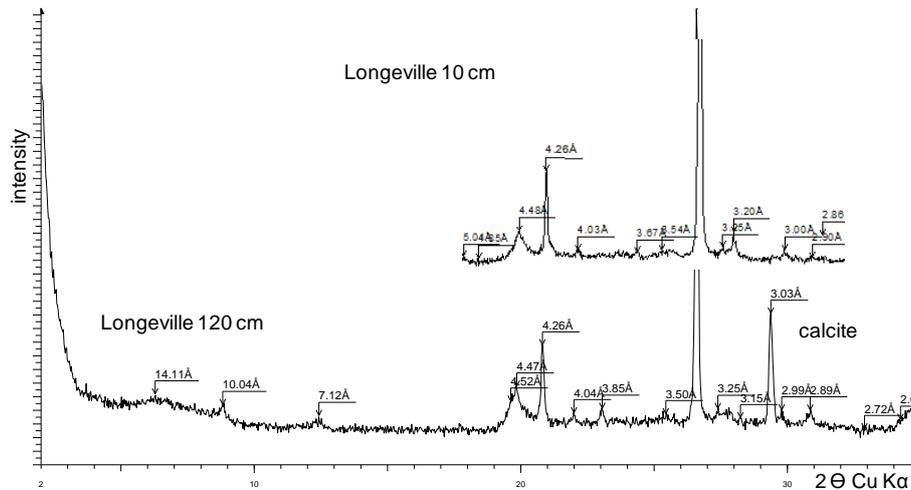
Les diffractogrammes sur préparations orientées permettent d'identifier précisément les différents phyllosilicates constituant le bri, des petits angles vers les grands angles :

- smectite ou interstratifié irrégulier illite/smectite (I/S) à smectite dominante 14,70 Å séché à l'air, ad; 17,20 Å glycolé, gly; 10 Å après chauffage à 350 et à 550°C
- chlorite 14,25 - 14,35, 7,0 et 4,71 Å (séché à l'air; glycolé; et après chauffage à 350 et 550°C)
- illite 10 Å, 4,99 Å et 3,33 Å (séché à l'air; glycolé; et après chauffage 350 et 550°C)
- kaolinite 7,17 Å (séché à l'air; glycolé; et après chauffage 350°C) et qui disparaît après chauffage à 550°C.

A 10 cm de profondeur l'assemblage de phyllosilicate est similaire :

- smectite ou interstratifié irrégulier illite/smectite (I/S) à smectite dominante; 14,70 Å séché à l'air; 17,20 Å glycolé; 10 Å après chauffage 350 et 550°C
- chlorite; 14,25 - 14,35 Å, 7,06 et 4,71 Å (séché à l'air, ad; glycolé, gly; et après chauffage 350 et 550°C)
- illite; 10 Å, 4,99 Å et 3,33 Å (séché à l'air, ad; glycolé, gly; et après chauffage 350 et 550°C)
- kaolinite; 7,15 Å et 3,57 Å (séché à l'air, ad; glycolé, gly; et après chauffage 350°C et qui disparaît après chauffage à 550°C).

Une différence apparaît entre 120 et 10 cm de profondeur au niveau de la quantité de smectite qui apparaît très discrètement en surface. Cette évolution est cohérente avec le phénomène d'illitisation de surface déjà décrit (Righi et al. 1995).



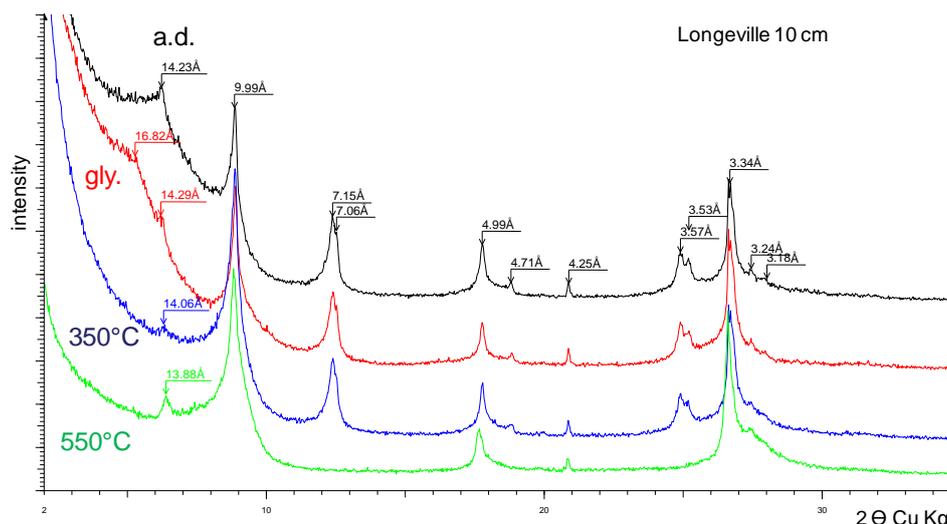


Figure 14 : Diffractogrammes de RX d'échantillons de Longeville 10 et 120 cm de profondeur
 - poudre désorientée
 - préparation orientées naturelle (a.d.), glycolée (Gly), chauffées 350 et 550°C.

Les Marais mouillés de Luçon, Nalliers-Mouzeuil et Communal du Poiré

A Luçon, les diffractogrammes de poudres sont similaires à ceux des autres sites (**Figure 15**):

- smectite, illite, kaolinite, feldspath, quartz et calcite.

Sur les diffractogrammes de lames orientées, on retrouve également:

- smectite (15 - 14,20 Å ad; 16,90 Å gly; 10 Å après chauffage 350 et 550°C)

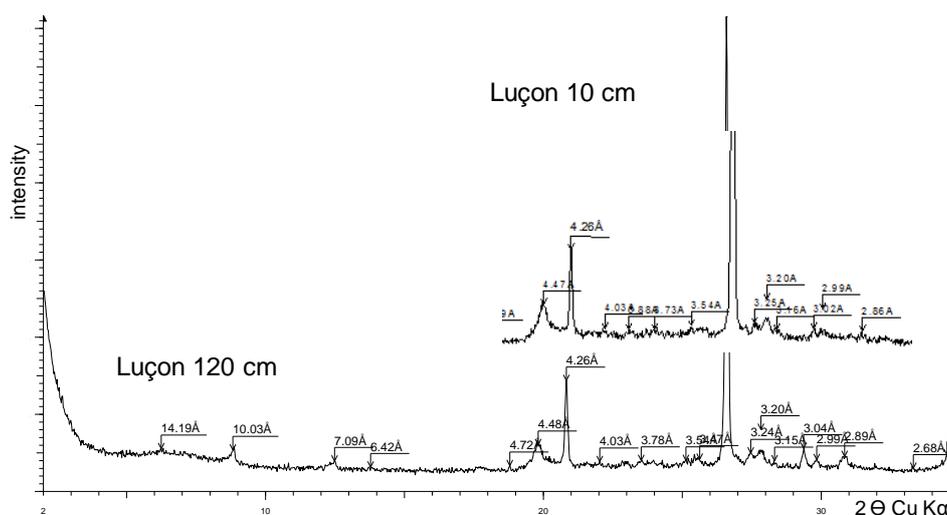
- chorite (14,25 - 14,35 Å ad, gly et après chauffage 350 et 550°C)

- illite (10 Å ad, gly; et après chauffage 350 et 550°C)

- kaolinite (7,06 Å ad, gly; et après chauffage 350 et effacé à 550°C).

La quantité de smectite apparaît également plus faible à 10 cm de profondeur qu'à 120 cm. Elle est également plus faible qu'à Longeville.

La calcite est très peu abondante.



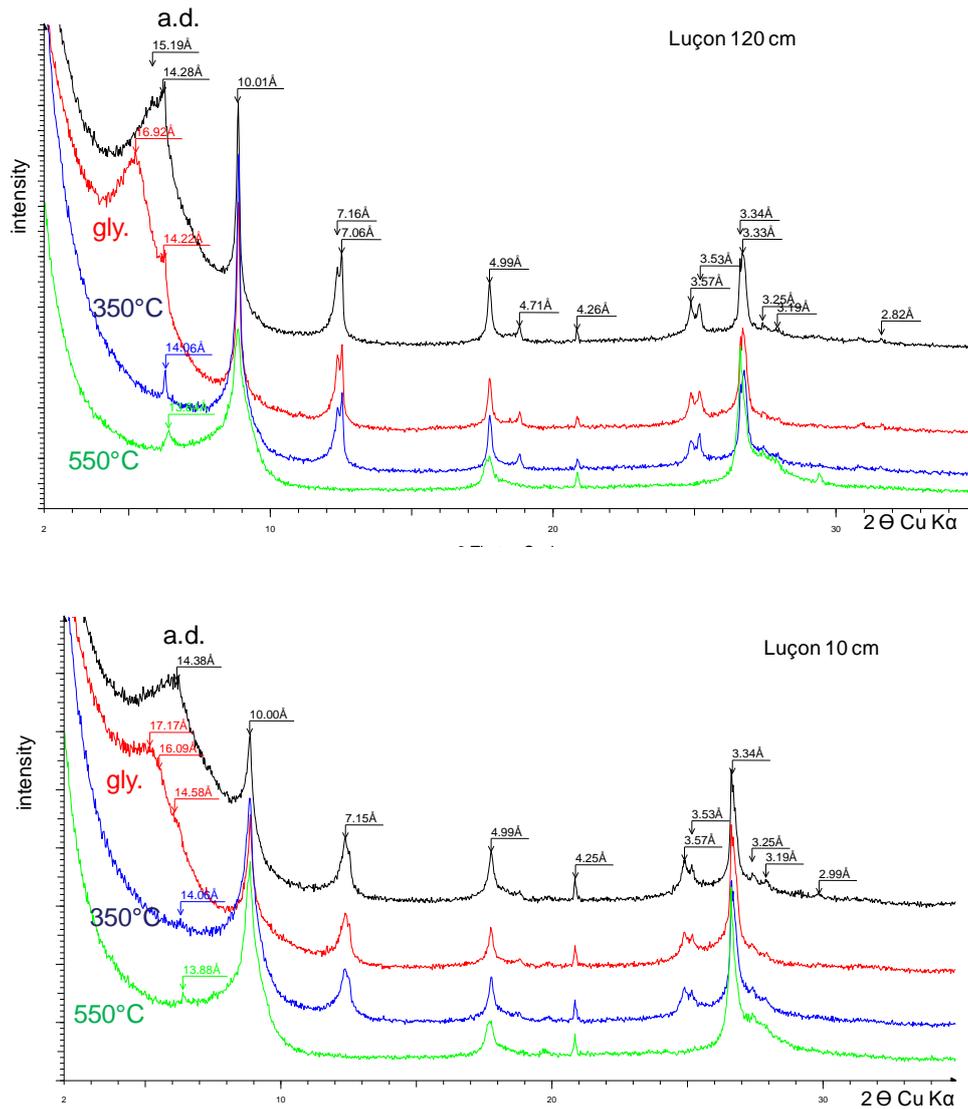


Figure 15 : Diffractogrammes de RX d'échantillons de Luçon.

A Nalliers les assemblages minéralogiques sont toujours les mêmes (Figure 16). La quantité de smectite est encore plus importante en profondeur qu'en surface. La calcite n'est présente qu'en profondeur.

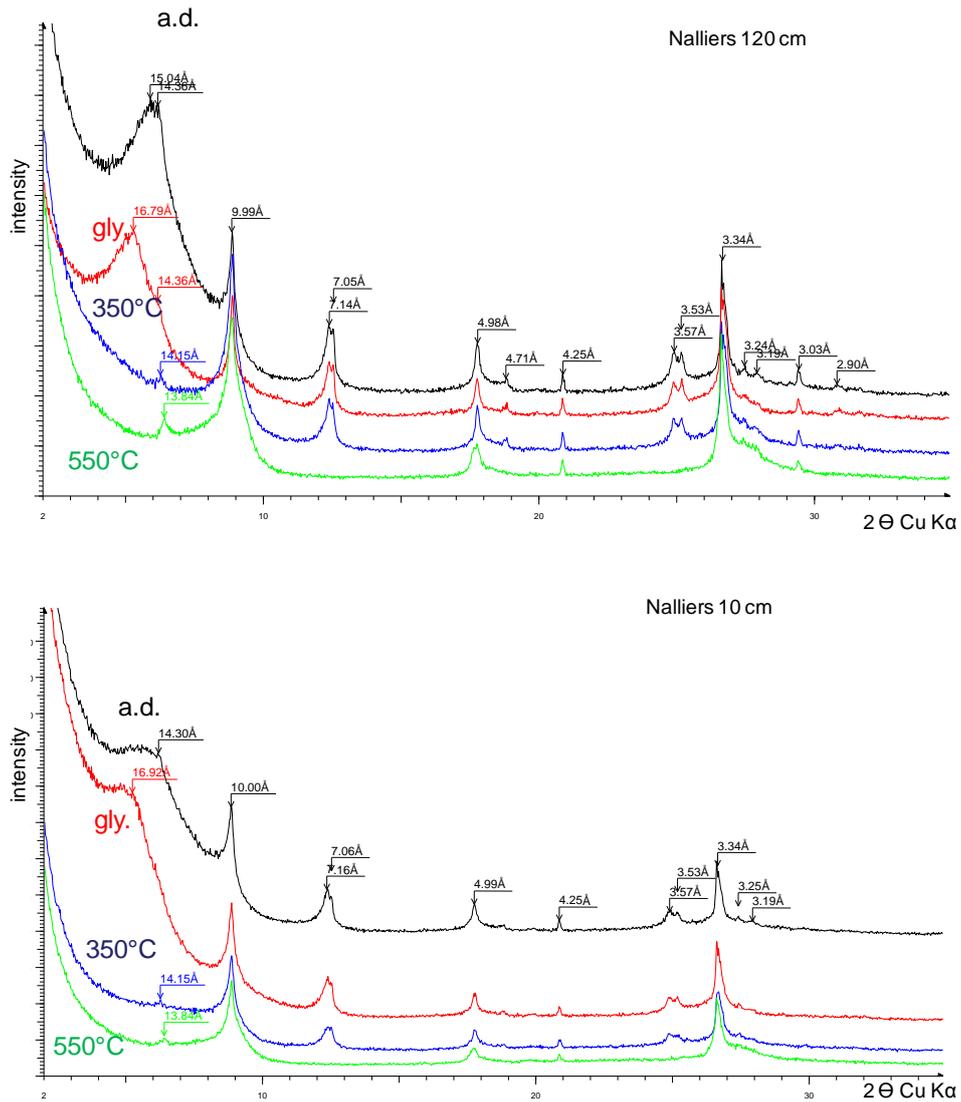


Figure 16 : Diffractogrammes de RX d'échantillons de Nalliers

Les Marais desséchés les Rouchères et Boissière

Les assemblages minéralogiques sont identiques à ceux de Longeville et de Luçon (Figure 17). Par contre, si la smectite est abondante à 120 cm de profondeur, elle reste présente en surface. La calcite n'apparaît qu'à 120 cm et est relativement abondante sur le diagramme de poudre.

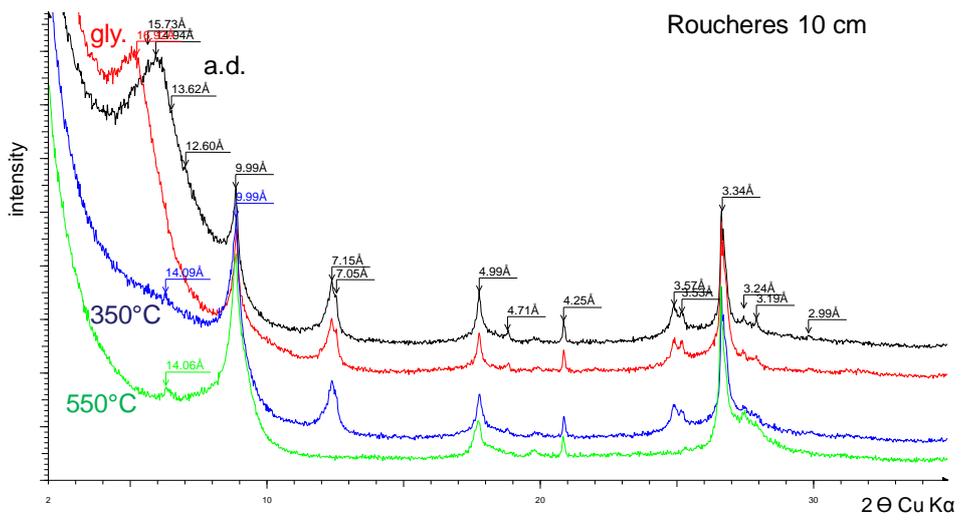
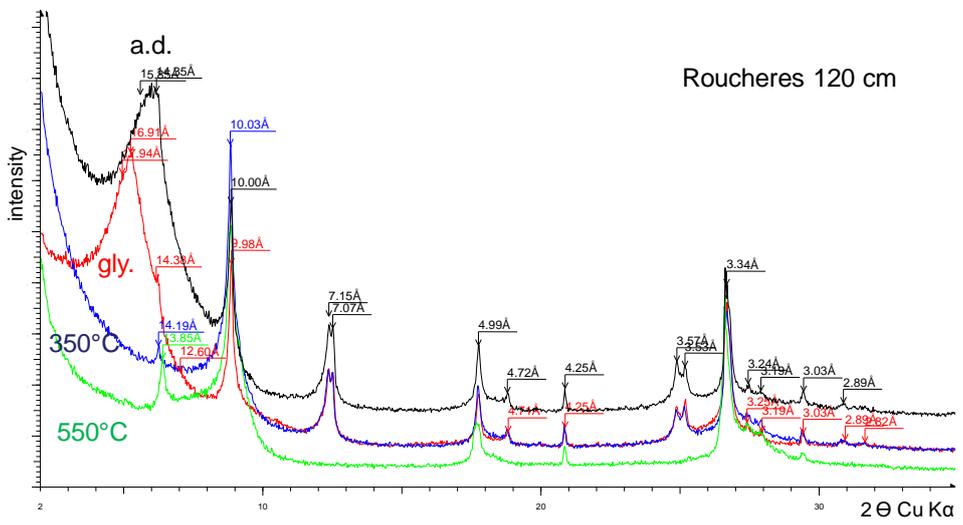
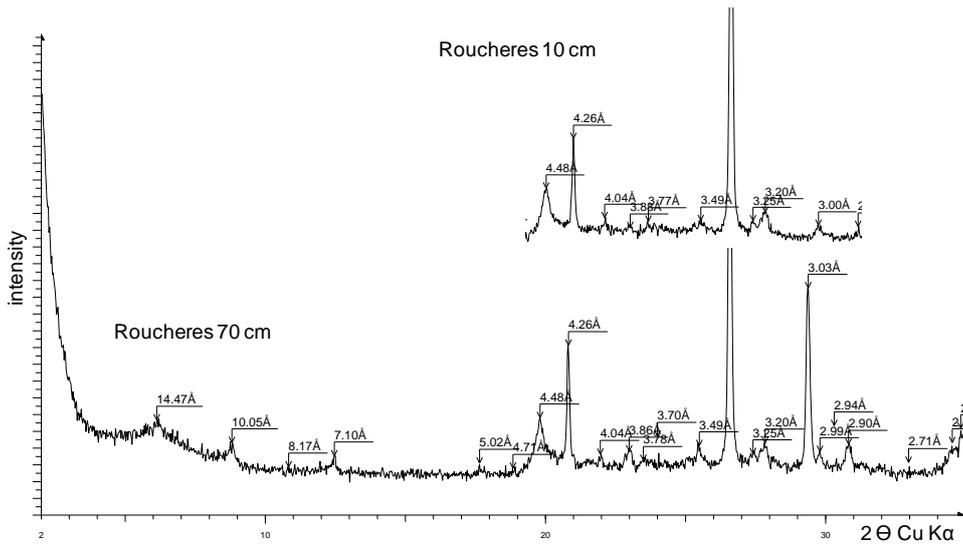


Figure 17 : Diffractogrammes de RX d'échantillons de Rouchères.

Conclusion minéralogique

Les stades successifs de pédogénèse ont été engendrés par l'assèchement superficiel des sédiments d'origine fluvio-marine associé en général à la poldérisation. Les premiers stades de pédogénèse sont l'oxydation due à l'exondation du matériau, la décarbonatation et la désalinisation dues à la lixiviation des horizons superficiels par les eaux de pluie.

Les sols de bri ancien, contenus dans la ceinture des îles, côté coteaux calcaires, sont généralement saturés par des eaux plus douces. Ils sont généralement hydromorphes et présentent des gleys. Ces sols restent néanmoins relativement salés. Les processus pédogénétiques continuent par une infiltration possible de matière organique en profondeur via les fentes de dessiccation, la lixiviation du calcium en surface conduit à la formation de carbonate de calcium en profondeur, à la limite du front de décarbonatation. En profondeur des figures verticales avec leurs faces de glissement apparaissent (Jamagne, 2011).

Du point de vue minéralogie des phyllosilicates, les assemblages identifiés sont toujours les mêmes, par ordre d'abondance:

- illite
- kaolinite
- interstratifiés irréguliers illite / smectite (I/S) à smectite dominante
- smectite
- chlorite.

Les différences principales apparaissent au niveau de la quantité de smectite et ou d'interstratifiés à fort % de smectite. La smectite pure ou les interstratifiés essentiellement smectitiques sont plus abondants en profondeur. Cette évolution "smectite vers illite" de la profondeur vers la surface a été interprétée comme une transformation des feuillets smectitiques vers des feuillets illitiques. Cette évolution, décrite par Righi (1995) s'accroît avec l'âge du sol et de la poldérisation.

Sur les diffractogrammes de poudres, on retrouve toujours les mêmes minéraux primaires détritiques (Quartz, feldspath). Les différences entre diffractogrammes se font essentiellement sur la présence de calcite en profondeur, réflexion dominante à 3,04 Å.

3.1.2 - Caractérisation structure et hydraulique initiale

1 - Marais desséché Bas de Longeville

Les profils de W, $CE_{1/5}$, salinité et Qd ont été mesurés sur les placettes L1, L2 et L3, ils sont classiques des zones marais. Les placettes sont localisées sur le site 01VP02. L1 est situé en partie haute, le plus proche de l'entrée de parcelle, L3 en partie la plus basse inondée en février (ANNEXE 2).



Figure 18 : Localisation du site 01VP02 à Longeville (ANNEXE 2)

Les teneurs en eau augmentent de la surface vers la profondeur. En surface elles sont proches de 27% soit la limite entre l'état saturé et l'état non saturé. Pour des teneurs en eau maximales mesurées à 100 cm de profondeur qui sont comprises entre 58 et 65 %, la limite de plasticité ($W=40\%$) est atteinte à 90, 70 et 40 cm de profondeur en L1, L2 et L3 respectivement. Cette évolution est cohérente avec la différence de niveau topographique de L1 à L3. Elle est également cohérente avec le flux ascendant par capillarité issu de la nappe peu profonde du bri. En L3 la forte teneur en eau de surface (60% à 10cm) doit être associée à la compacité de la matrice argileuse et à sa très faible perméabilité entre 20 et 40 cm qui rend difficile l'infiltration des eaux de surface (Figure 19).

En L1 et L3, les $CE_{1/5}$ et les salinités augmentent avec la profondeur pour atteindre rapidement plus de 10g/l. En L1 la partie superficielle (0 - 80 cm) présente une très faible $CE_{1/5}$ qui est cohérente avec la lixiviation de surface par les eaux de pluie. En L3 l'effet de la lixiviation est nettement plus limité, les $CE_{1/5}$ restent plus fortes tout le long du profil. En L2, les $CE_{1/5}$ et les salinités apparaissent particulièrement élevées en surface. Elles montrent en fait une décroissance de la surface vers la profondeur pour y atteindre le fond continu voisin de 10g/l.

Les profils de pH se situent autour de 8 - 9 sauf près de la surface où les valeurs diminuent vers 7 ou moins.

Les profils de Qd sont cohérents avec les augmentations de résistance mécanique en surface avec les plus faibles teneurs en eau du matériau argileux à l'état solide (Figure 20).

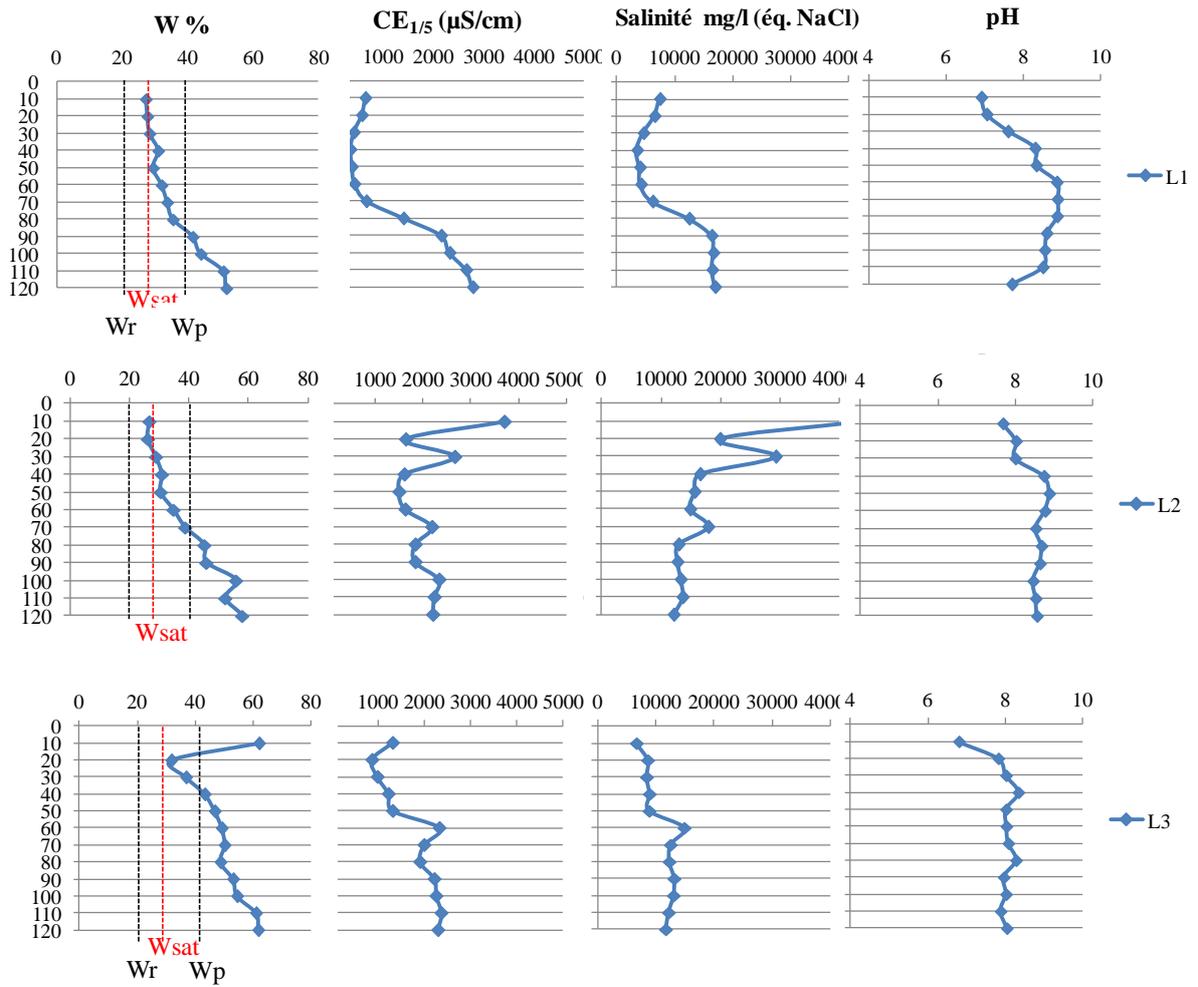


Figure 19 : Profil de W%, $CE_{1/5}$ ($\mu S/m$) et salinité en équivalent NaCl (mg/l) calculée sur le marais de Longeville (21/04/2015).

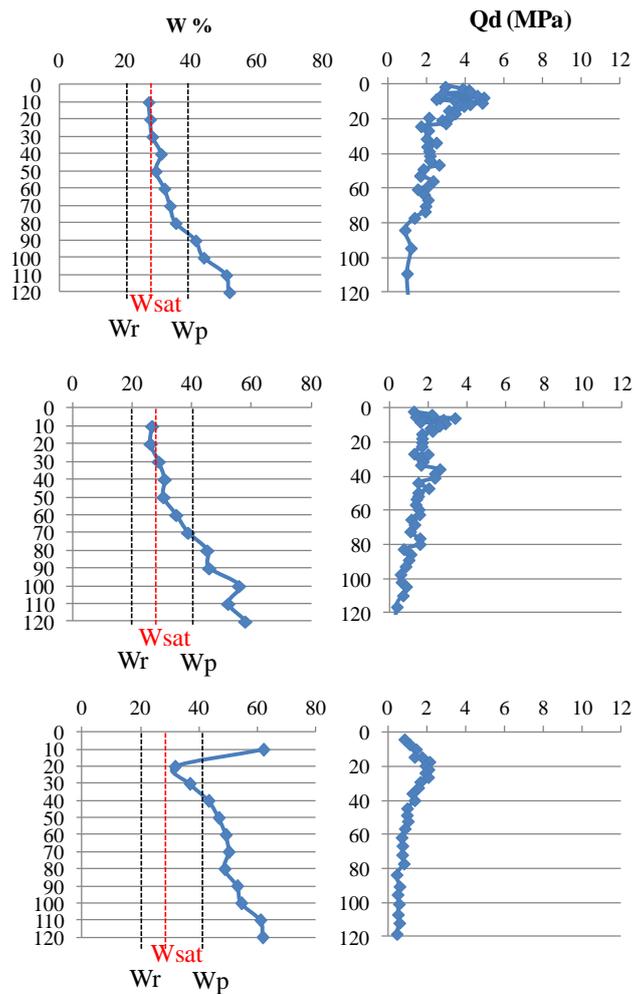


Figure 20: Profil de W%, et Qd sur le marais de Longeville (21/04/2015)..



Figure 21 : Photographie du log de sol carotté à Longeville (ANNEXE 3)

Les profils observés présentent un horizon brun de quelques cm d'épaisseur en surface (Figure 21). A partir de 10-15 cm de profondeur on observe des horizons gris clair (bri), avec quelques traits rédoxiques (tâches de rouille). A partir de 70-80 cm, l'horizon est très plastique et devient gris/bleu à partir de 90-100 cm de profondeur.

La section de résistivité s'étend sur une gamme de résistivité comprise entre 1 et 40 Ω .m. Elle présente la structure d'un bicouche (Figure 22):

- (1) de la surface (0,40 cm) à 6,5 m de profondeur, des résistivités les plus faibles $< 4 \Omega.m$, caractéristiques d'un bri à l'état plastique-à-liquide saturé, apparemment sans couche de surface fortement desséchée. La salinité de l'eau est voisine de 17g/l.

- (2) de 6,5 à 10 m de profondeur des résistivités qui augmentent rapidement pour atteindre $40 \Omega.m$ à 9 m de profondeur. Ces fortes valeurs à la base du profil "caractérisent" l'interface avec le substratum calcaire.

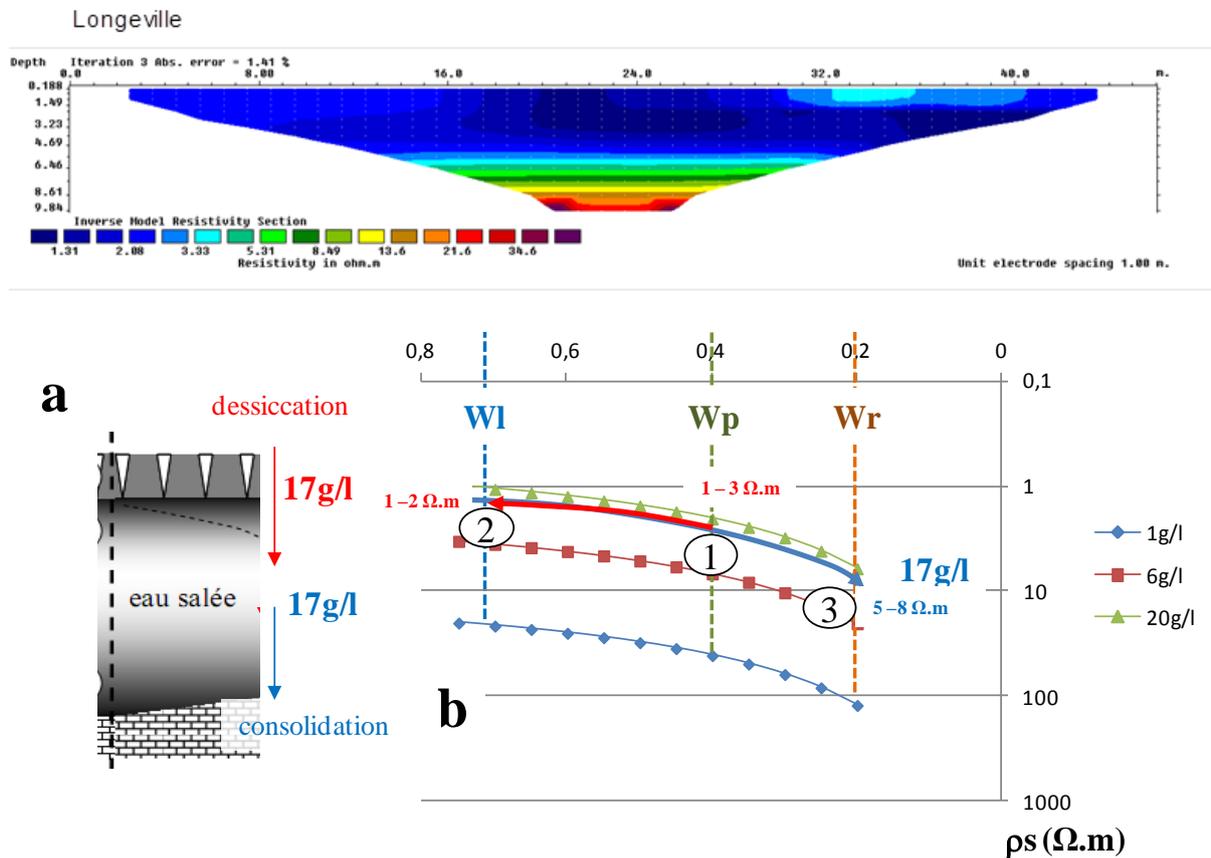


Figure 22 : Section de résistivité reconstruite sur le site de Longeville (station 01VP02); Echelle de résistivité 1 - $40 \Omega.m$ (21/04/2015).

Les variations latérales de résistivités de "surface" correspondent à des évolutions des couples teneur en eau (W) - salinité :

- faibles W - faibles salinités en L1 (microtopographie plus élevée)
- faibles W mais fortes salinités dans la partie médiane en L2 (microtopographie plus basse)
- fortes W et faibles salinités en L3.

2 - Marais mouillés de Luçon

Les trois profils étudiés sont localisés sur le site 02VP02 au lieu dit Les Fontenelles (ANNEXE 2).



Figure 23 : Localisation du site 02VP02 à Luçon (ANNEXE 2)

En Luçon1 les profils de W , de $CE_{1/5}$ et de salinité sont classiques : augmentation des trois avec la profondeur. En Luçon 2 et Luçon 3, les profils de $W\%$ sont presque verticaux autour de $W=40\%$, avec une légère augmentation de W en surface due aux difficultés d'infiltration à travers le matériau argileux à sa limite de plasticité. Les valeurs de $CE_{1/5}$ et de salinité associées augmentent également en profondeur au voisinage de 10g/l (Figure 24).

Le profil de W , en M1, atteint la limite de non-saturation en surface ($W=27\%$). La dessiccation et la consolidation de surface se traduisent par de fortes résistances Q_d ($>10\text{Mpa}$) au même horizon (Figure 38). A partir de 20cm de profondeur, les résistances diminuent au voisinage de 2Mpa pour des teneurs en eau entre 30 et 40% , soit encore pour le bri à l'état solide. En M2 et M3 les profils de W sont pratiquement constants, ils sont associés à des valeurs de Q_d voisines de $1,5\text{Mpa}$, excepté le "pic" de surface (Figure 25).

En profondeur les valeurs de pH se situent autour de $8 - 9$. A partir de 50cm de profondeur jusqu'à la surface elles diminuent progressivement jusqu'à 6 .

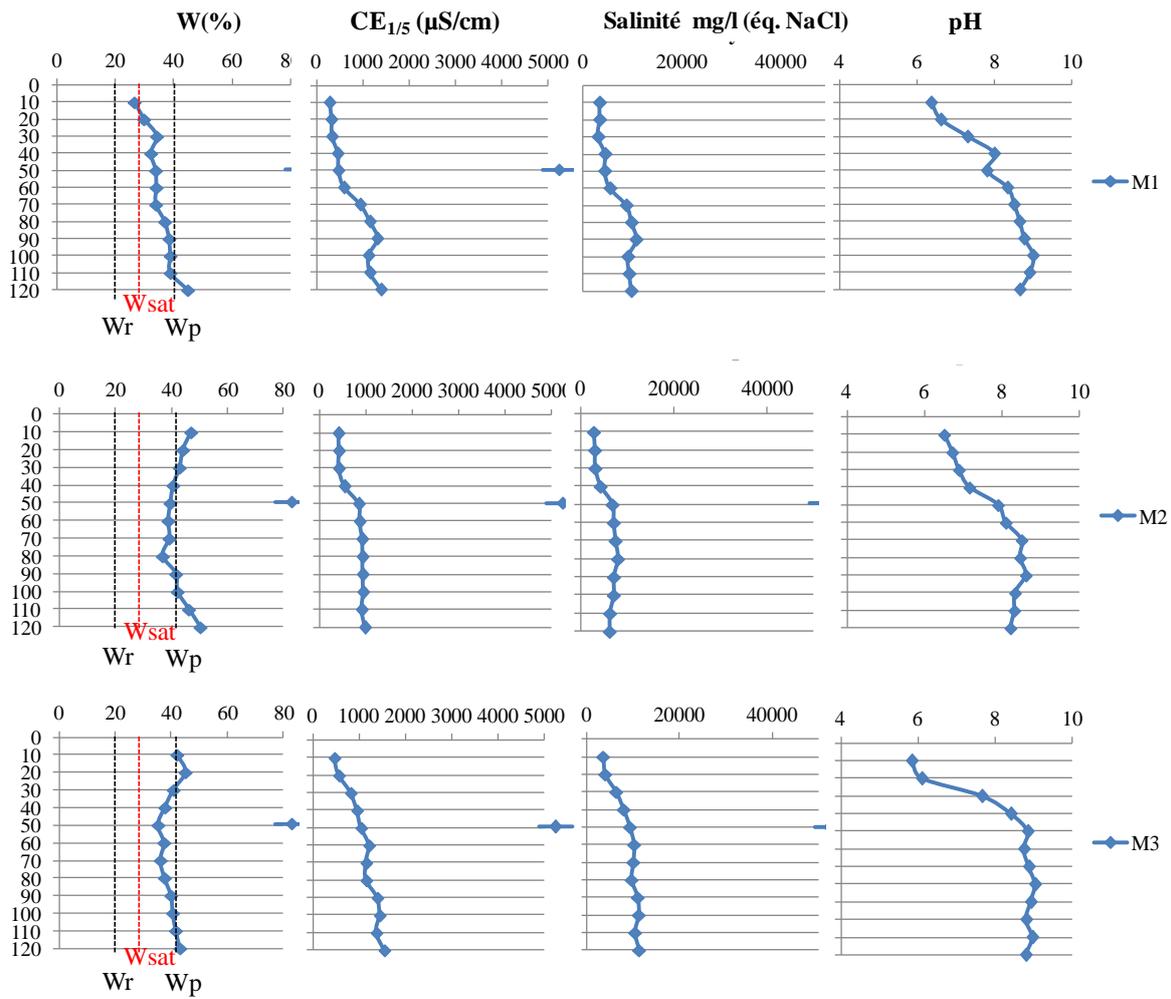


Figure 24 : Profils de W%, $CE_{1/5}$ ($\mu S/m$) et salinité en équivalent NaCl (mg/l) calculée sur le marais de Luçon (21/04/2015).

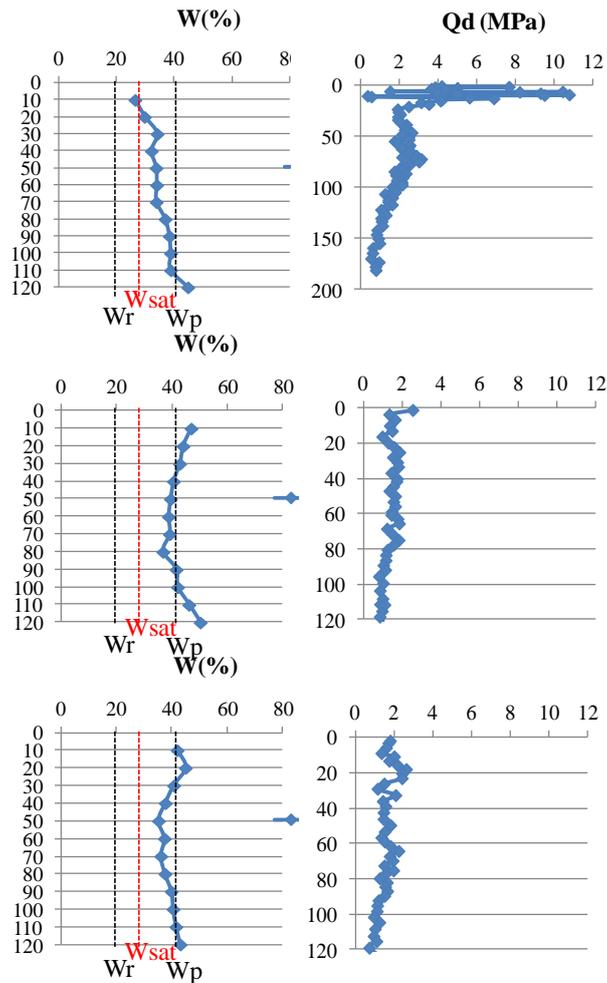


Figure 25: Profil de W%, et Qd sur le marais de Luçon (21/04/2015).



Figure 26: Profil de sol observé à Luçon (ANNEXE 3)

Les profils observés sont similaires à ceux de Longeville et présentent un horizon brun de quelques cm d'épaisseur. A partir de 10-15 cm de profondeur on observe des horizons gris clair (bri), avec quelques traits rédoxiques (tâches de rouille). A partir de 70-80 cm, l'horizon est très plastique, et quelques plages de couleur gris-bleuté sont visibles (Figure 26).

La section de résistivité du site de Luçon, s'étend sur une faible gamme de résistivité (1 - 5 $\Omega.m$). Néanmoins elle est caractéristique d'un tricouche (Figure 27):

- (1) 0,40 - 2 m, relatives fortes résistivités (3 - 5 $\Omega.m$) caractéristiques du sol affecté par la dessiccation en surface, avec une salinité d'eau voisine de 10g/l
- (2) 2 - 8,5 m, les résistivités y sont les plus faibles < 2 $\Omega.m$, elles caractérisent le bri à l'état plastique-à-liquide saturé, avec une salinité voisine de 17g/l
- (3), les valeurs élevées sous 8,5 m de profondeur caractérisent l'interface bri - substratum calcaire.

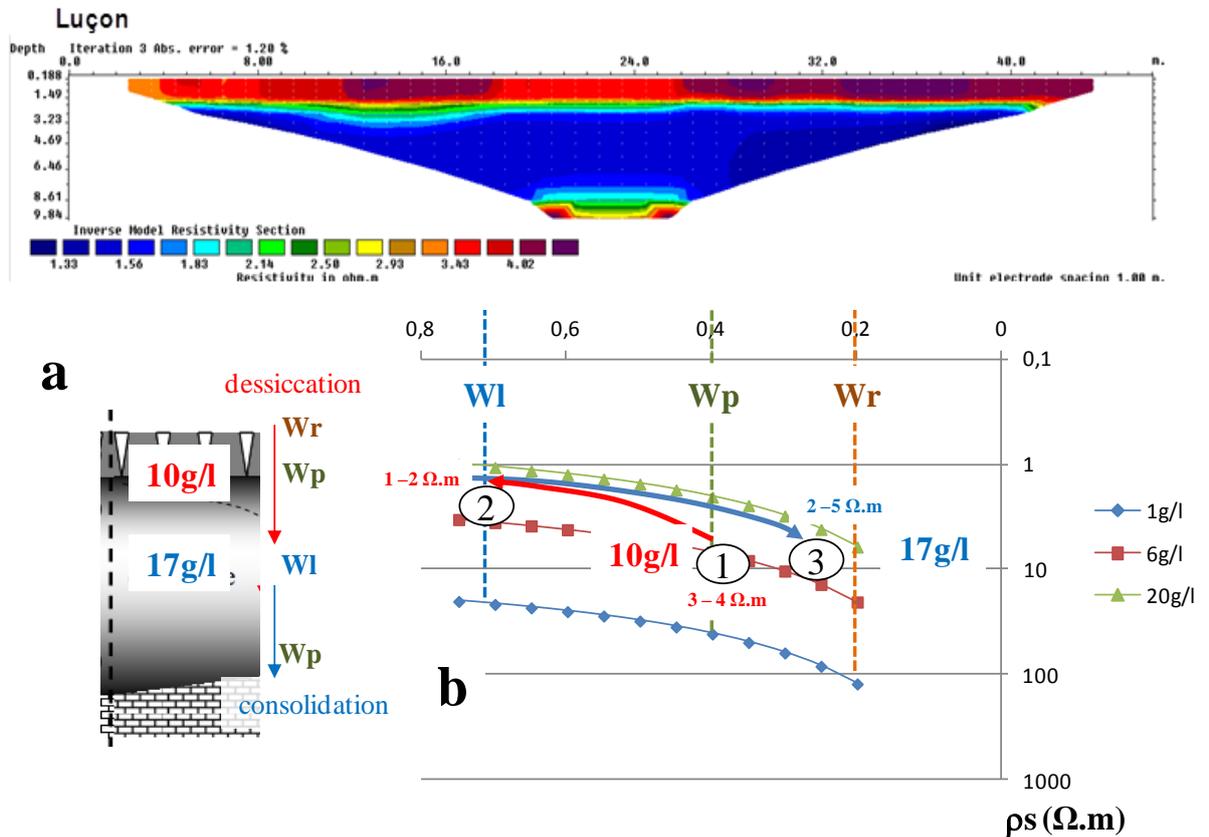


Figure 27 : Section de résistivité reconstruite sur le site de Luçon (station 02VP01); Echelle de résistivité 1 - 5 $\Omega.m$.

3 - Marais desséché Les Rouchères

Les profils R1, R2 et R3 localisés sur le site 03VP05 à Champagné sur le lieu dit les Rouchères.



Figure 28 : Localisation du site 03VP05 aux Rouchères (ANNEXE 2)

Les profils montrent des différences relativement significatives (Figure 29):

- en R1, dessiccation à la limite de saturation ($W=27\%$) à 20 - 30 cm de profondeur, limite de plasticité à 80 cm ($W=40\%$) puis augmentation jusqu'à $W=55\%$. Les salinités et $CE_{1/5}$ plus faibles en surface marquent l'effet de lixiviation par les eaux de pluie.

- en R2, la teneur en eau est de 60% à 10cm puis diminue avec la profondeur, elle est inférieure à 40% entre 20 et 60cm. A partir de 60cm, les teneurs en eau augmentent jusqu'à la limite de liquidité ($Wl = 70\%$) à 1,20 m.

- en R3, les teneurs en eau sont très élevées en surface ($> 100\%$ entre 0 et 20 cm). Ces fortes teneurs en eau, sont généralement associées aux niveaux tourbeux. Les salinités correspondantes sont plus faibles, caractéristiques d'eaux douces ou saumâtres. Sous 20 cm les teneurs en eau diminuent vers la limite de saturation jusqu'à 70 cm, suivant un comportement typique du bri argileux.

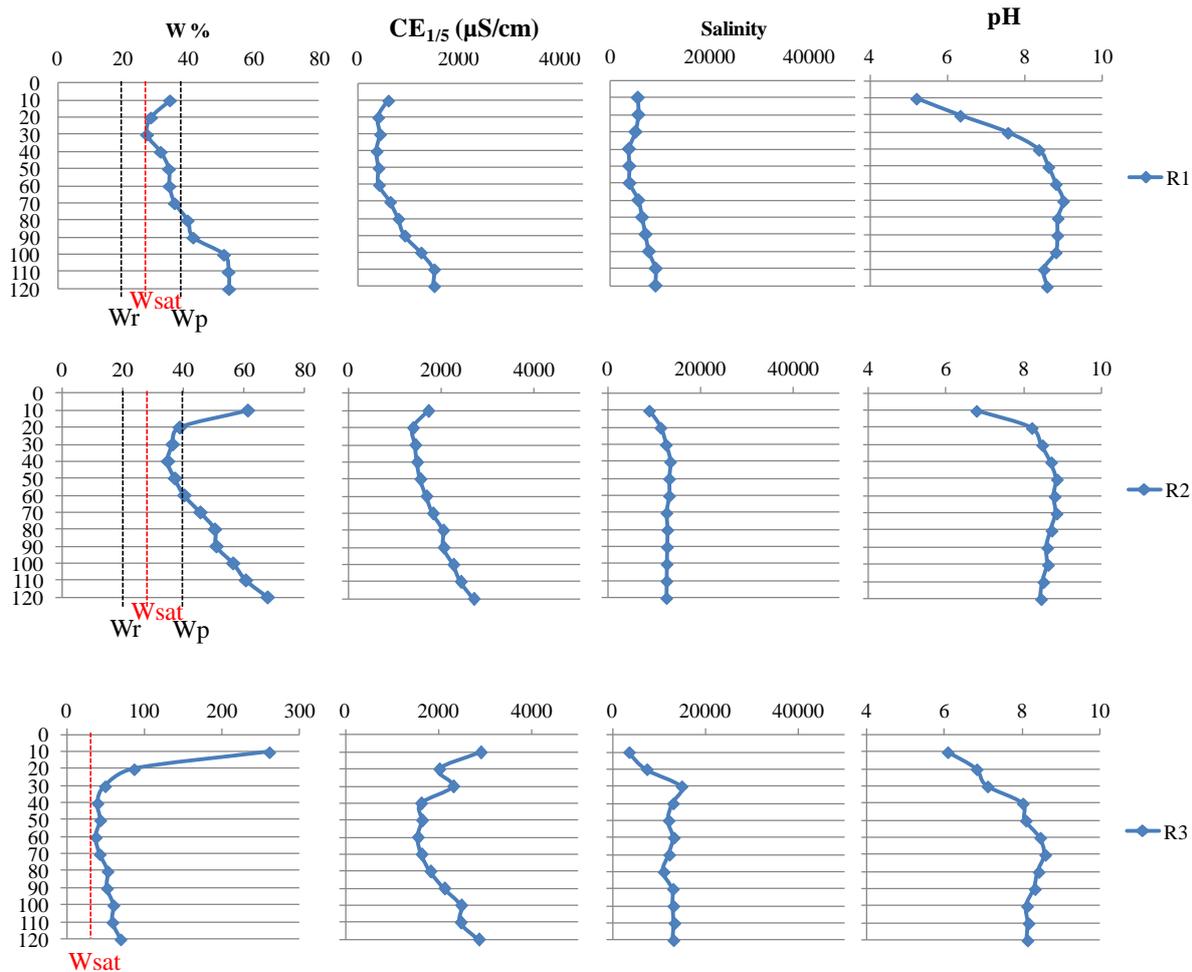


Figure 29 : Profils de W%, CE_{1/5} (μS/m) et salinité en équivalent NaCl (mg/l) calculée sur le marais de Rouchères (28/04/2015).

Dans l'ensemble, les diminutions des résistances au pénétromètre en fonction de la profondeur sont cohérentes avec les augmentations de teneur en eau en profondeur. Les résistances les plus fortes correspondent au profil R1, le plus affecté par la dessiccation de surface et/ou un flux ascendant de remontées capillaires plus faible (Figure 30).

En profondeur les valeurs de pH se situent autour de 8 - 9. Elles diminuent vers la surface : - en R1, partir de 50cm de profondeur jusqu'à la surface, la valeur minimale est égale à 5 en surface. Elles diminuent progressivement jusqu'à 6,

- en R2 la diminution de pH n'intéresse que les 20 cm de surface, le pH minimum est 6,5

- en R3 la diminution commence à partir de 40cm, jusqu'à 6 en surface.

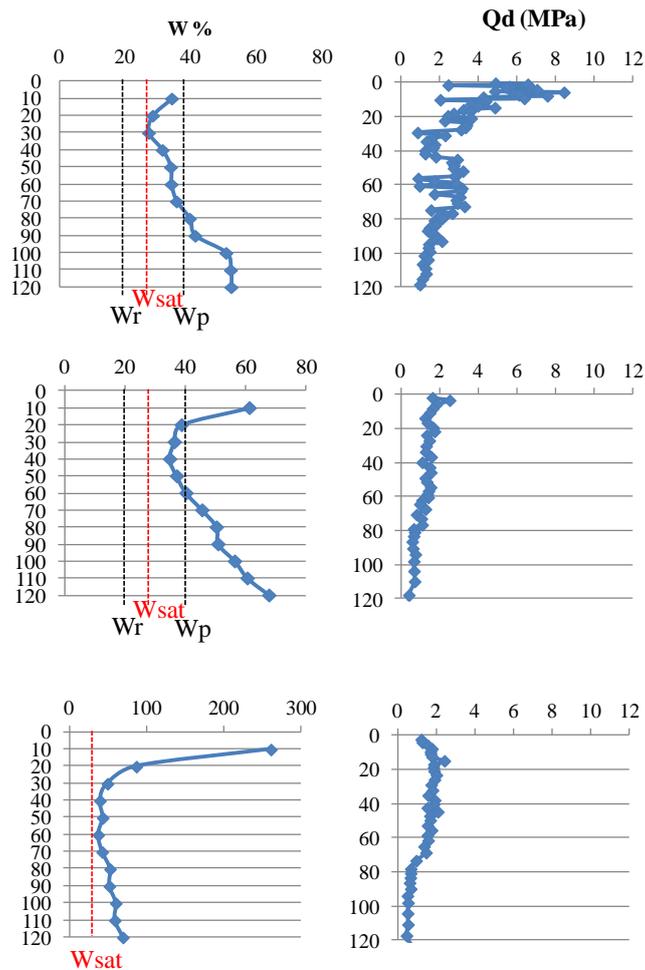


Figure 30: profil de W%, et Qd sur le marais de Rouchères (28/04/2015).



Figure 31 : profil de sol observé à Rouchères (ANNEXE 3)

Les profils observés présentent un horizon brun riche en matière organique de 15 à 20 cm d'épaisseur avec de nombreuses racines (Figure 31). A partir de 20 cm de profondeur on observe des horizons gris argileux assez compacts, correspondant au bri, avec plus ou moins de traits rédoxiques (tâches de rouille et zones décolorées, Figure 32) dont la teneur maximale se situe vers 50 cm. En profondeur, l'horizon est très plastique, et devient gris/bleu à partir de 90-100 cm de profondeur.



Figure 32 : Illustration des tâches de rouille et des zones décolorées à 60 cm de profondeur.

Comme sur le site de Luçon, la section de résistivité, s'étend sur une faible gamme de résistivité (1 - 5 $\Omega.m$) et est caractéristique d'une structure tricouche (Figure 33):

- (1) 0,40 - 2 m, résistivités relativement fortes (1,5 - 2,5 $\Omega.m$) caractéristiques du sol affecté par la dessiccation en surface, eau de surface de salinité voisine de 13g/l
- (2) 2 - 8,5 m, les résistivités y sont les plus faibles < 1,5 $\Omega.m$, elles caractérisent le bri à l'état plastique-à-liquide saturé, eau de salinité voisine de 20g/l
- (3), les valeurs les plus élevées, sous 8,5 m de profondeur, qui caractérisent l'interface bri - substratum calcaire.

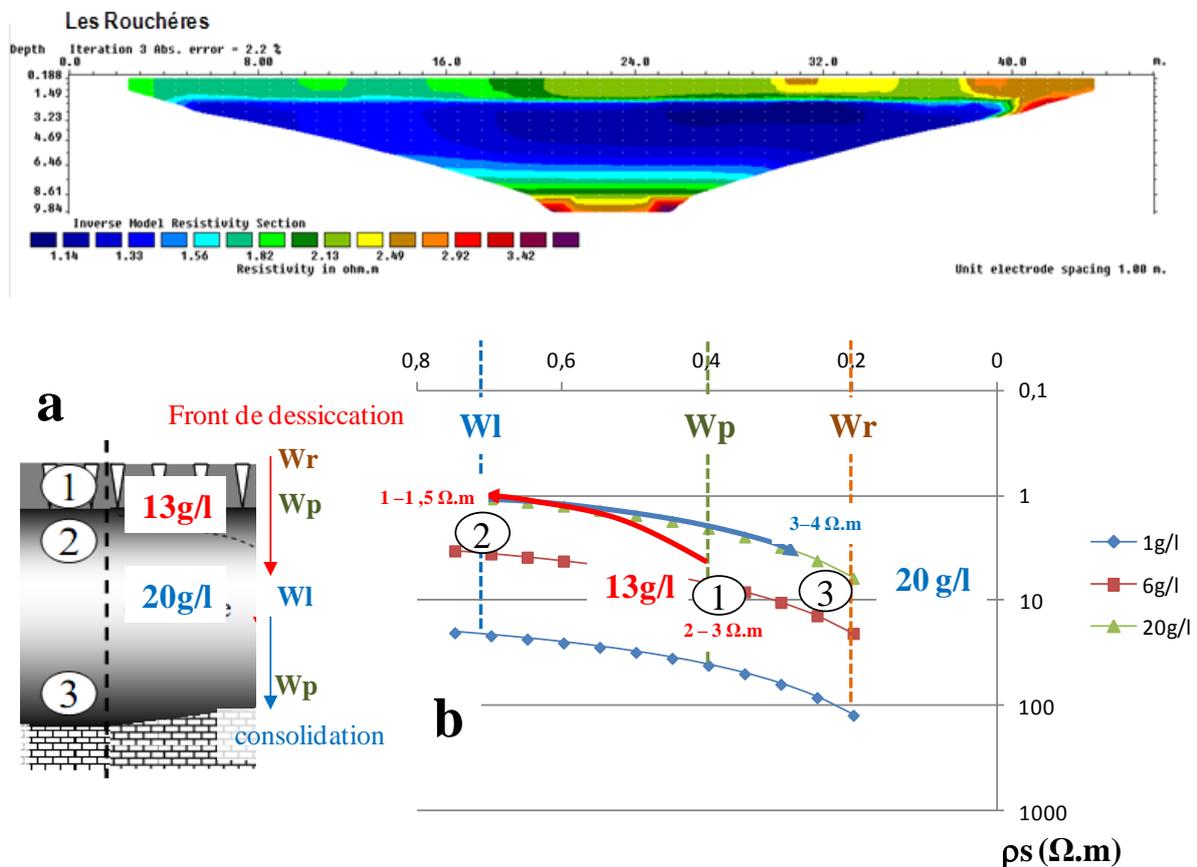


Figure 33: Section de résistivité reconstruite sur le site de Les Rouchères (station 03VP05); Echelle de résistivité 1 - 5 $\Omega.m$ (28/05/2015).

4 - Marais mouillés de Nalliers-Mouzeuil



Figure 34 : Localisation du site 04VP04 à Nalliers (ANNEXE 2) - Lieu dit le Marais Communal de Nalliers.

Les profils de teneurs en eau sont classiques avec:

- les parties intermédiaires de profil à l'état solide (W% entre 27 et 40%),
- les teneurs en eau de surface élevées en N1, N2 et N3 sont dues au niveau sous-jacent très peu perméable. Les teneurs en eau de 150% en N1 traduisent l'aspect tourbeux du matériau. Par contre en N4 le profil est voisin de la limite de plasticité (W=40%) jusqu'à la surface. De manière générale, les $CE_{1/5}$ et les salinités augmentent de la surface vers la profondeur (**Figure 35**).

Quelques anomalies de fortes salinités apparaissent en surface (20 cm) en N1 et autour de 60 - 80 cm en N3 et N4.

Les profils de résistances au pénétromètre sont classiques : diminution progressive de résistance de la surface vers la profondeur. En N2 les résistances Q_d augmentent légèrement avec la profondeur dans la partie 30 -80 cm qui reste à la limite de plasticité (**Figure 36**).

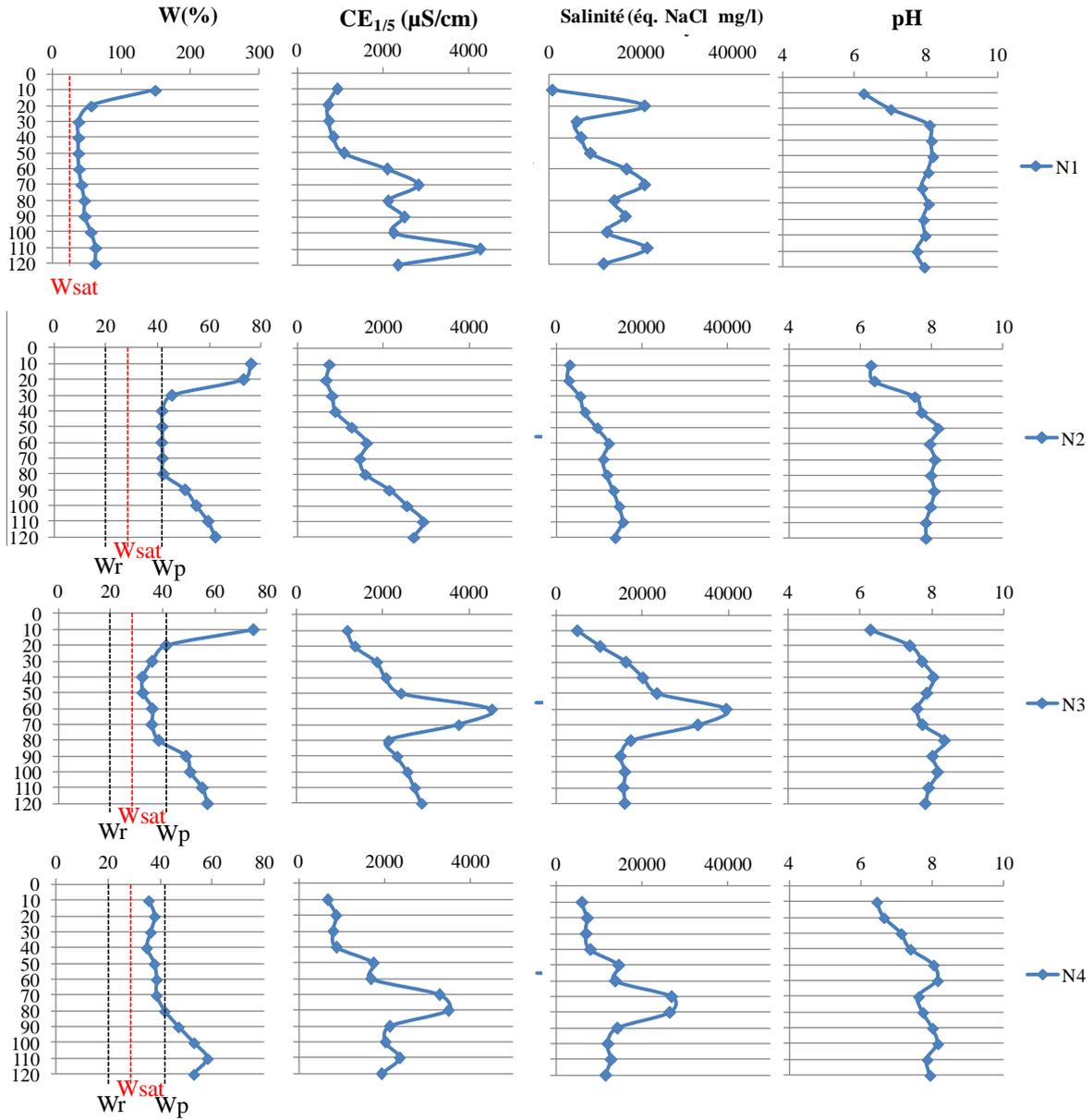


Figure 35 : Profils de W%, CE_{1/5} (μS/m) et salinité en équivalent NaCl (mg/l) calculée sur le marais de Nalliers (21/04/2015).

Les diminutions de pH en surface commencent entre 30 et 50cm de profondeur pour diminuer progressivement jusqu'à 6.

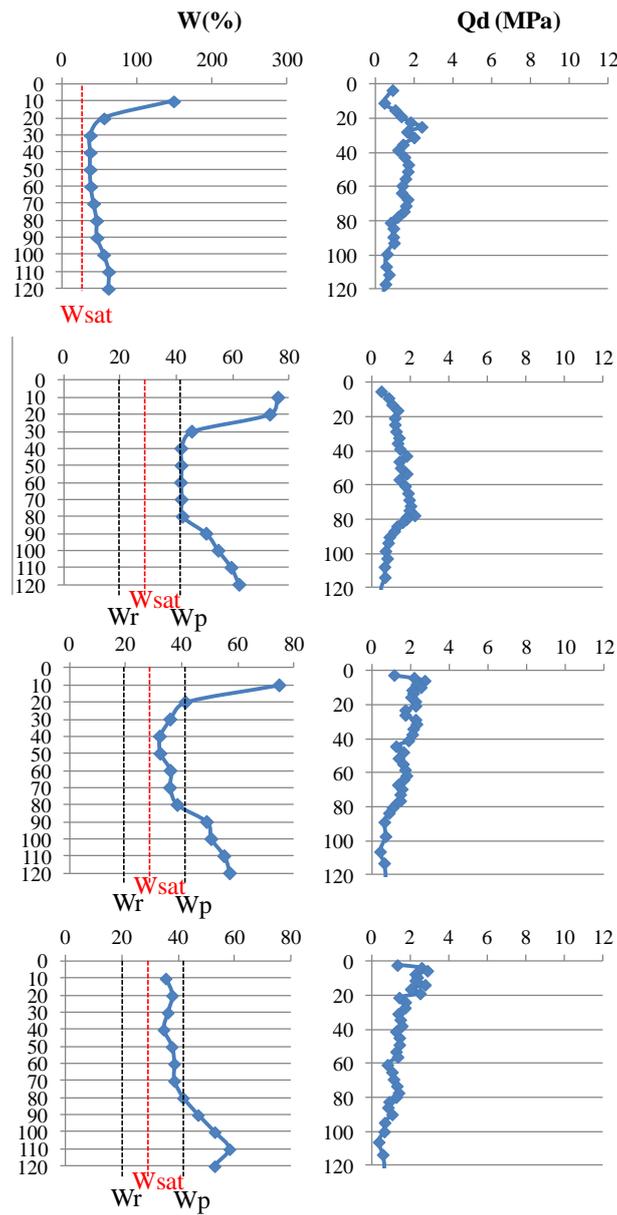


Figure 36 : Profil de W%, et Qd sur le marais de Nalliers (21/04/2015).



Figure 37 : Profil de sol observé à Nalliers (ANNEXE 3)

Les profils observés présentent un horizon brun foncé riche en matière organique d'une dizaine de cm d'épaisseur et un horizon brun clair de 10 à 20 cm (Figure 37). A partir de 15-20 cm de profondeur on observe des horizons gris argileux, correspondant au bri, avec plus ou moins de traits rédoxiques (tâches de rouille) et des coquilles. Quelques concrétions noires ferro-manganiques peuvent être

observées. En profondeur, l'horizon est très plastique, avec beaucoup de tâches de rouille et devient gris/bleu à partir de 90 cm de profondeur.

A Nalliers, la section de résistivité est similaire à celles de Luçon et Les Rouchères (gamme de résistivités 1 - 5 $\Omega.m$) et structure tricouche (Figure 38):

- (1) 0,40 - 2 m, résistivités relativement fortes (1,5 - 5 $\Omega.m$) caractéristiques du sol affecté par la dessiccation en surface
- (2) 2 - 9 m, les résistivités y sont les plus faibles < 2 $\Omega.m$, elles caractérisent le bri à l'état plastique-à-liquide saturé,
- (3), les valeurs plus élevées, sous 9 m de profondeur caractérisent l'interface bri - substratum calcaire.

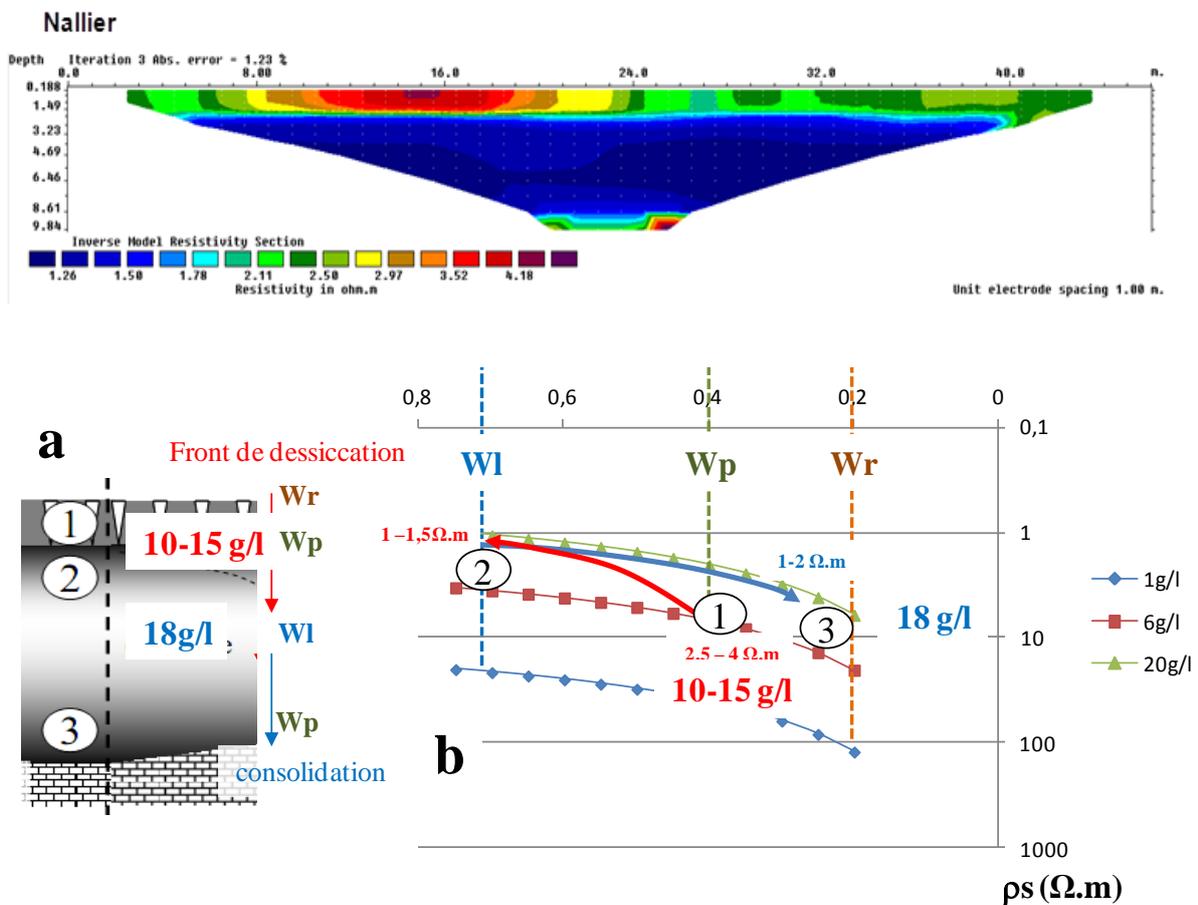


Figure 38 : Section de résistivité reconstruite sur le site de Nalliers (station 04VP04); Echelle de résistivité 1 - 5 $\Omega.m$.

5 - Marais desséché de Boissière



Figure 39 : Localisation du site 05VP04 à Boissière - lieu dit La Petite Roussière (ANNEXE 2)

Les trois profils B1, B2 et B3 de W% sont similaires (**Figure 40**) :

- augmentation de W vers la surface (0 - 30 cm)
- partie intermédiaire (30 - 70 cm) proche de $W_p=40\%$
- augmentation de W avec la profondeur sous 70 cm.

Les profils de $CE_{1/5}$ sont inverses des autres sites : diminution de $CE_{1/5}$ avec la profondeur qui tendent à traduire une salinité constante et des $CE_{1/5}$ essentiellement conditionnées par l'état hydrique. De fait les salinités sont constantes ou diminuent légèrement avec la profondeur en B2 et B3. En B1 le profil de salinité est symétrique du profil de W. La salinité diminue franchement de la surface vers la profondeur. Le phénomène peut traduire une arrivée d'eau douce à cette profondeur.

Les valeurs de pH se situent autour de 8 sauf en surface (10 - 20 cm) où elles diminuent à 7.

Les résistances Qd diminuent légèrement de la surface vers la profondeur sans anomalies particulières (**Figure 41**).

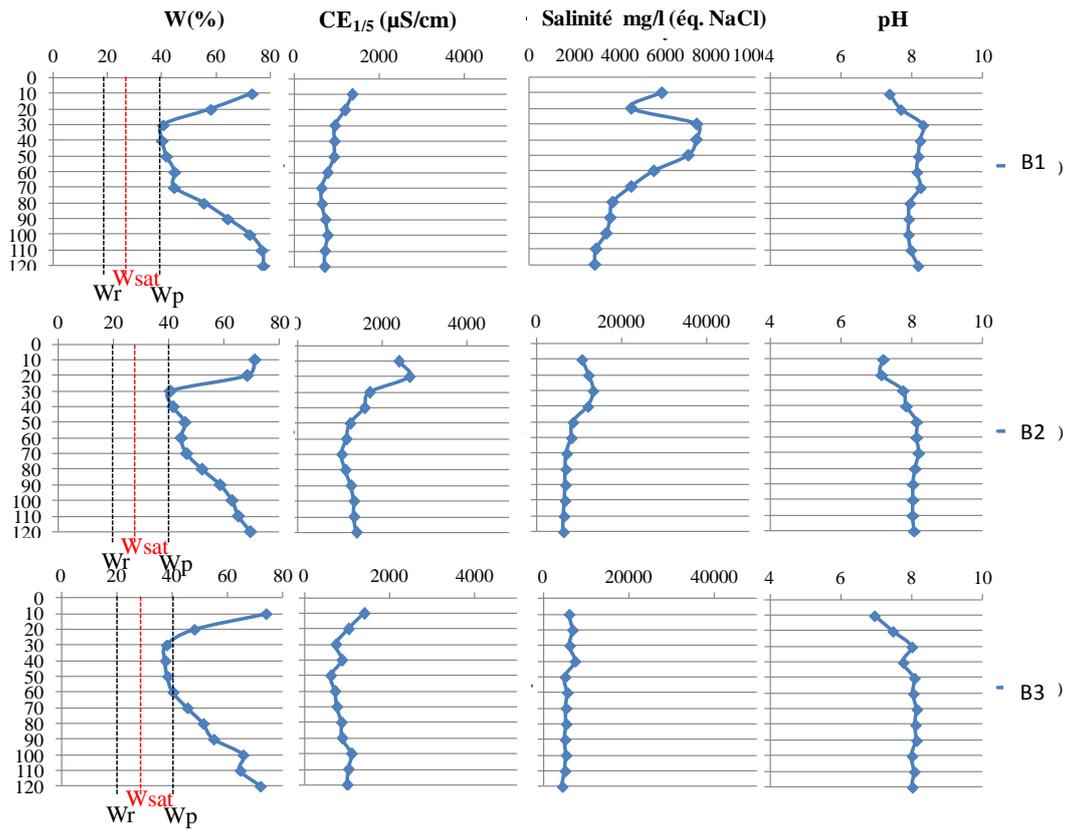


Figure 40: Profils de W%, $CE_{1/5}$ ($\mu S/m$) et salinité en équivalent NaCl (mg/l) calculée sur le marais de Boissière (28/04/2015).

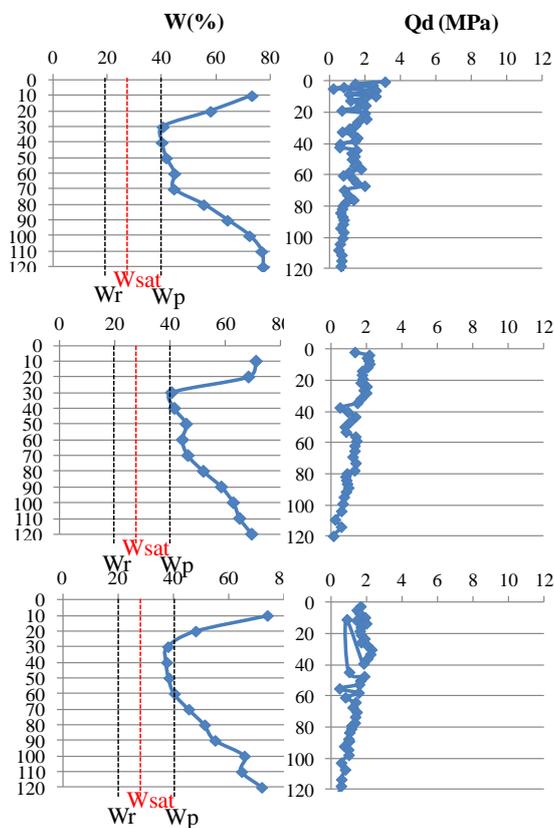


Figure 41 : Profil de W%, et Q_d sur le marais de Boissière (28/04/2015).



Figure 42 : Profil de sol observé à Boissière.

Les profils observés présentent un horizon brun contenant de la matière organique de 15 à 20 cm d'épaisseur (Figure 42). A partir de 15-20 cm de profondeur on observe des horizons gris argileux, correspondant au bri, avec quelques tâches de rouille. En profondeur, l'horizon est très plastique, et devient gris clair à partir de 90 cm de profondeur.

En tomographie électrique, pour la même gamme de résistivité (1 - 5 $\Omega.m$) une structure tricouche est encore mise en évidence (Figure 43):

- (1) 0,40 - 2,5 m, résistivités relativement fortes (2 - 5 $\Omega.m$) caractéristiques du sol affecté par la dessiccation en surface (nappe de surface de salinité voisine de 9 g/l)
- (2) 2,5 - 8,5 m, les résistivités y sont les plus faibles < 2 $\Omega.m$, elles caractérisent le bri à l'état plastique-à-liquide saturé, salinité de nappe voisine de 18 g/l
- (3), les valeurs plus élevées, sous 8,5 m de profondeur, caractérisent l'interface bri - substratum calcaire.

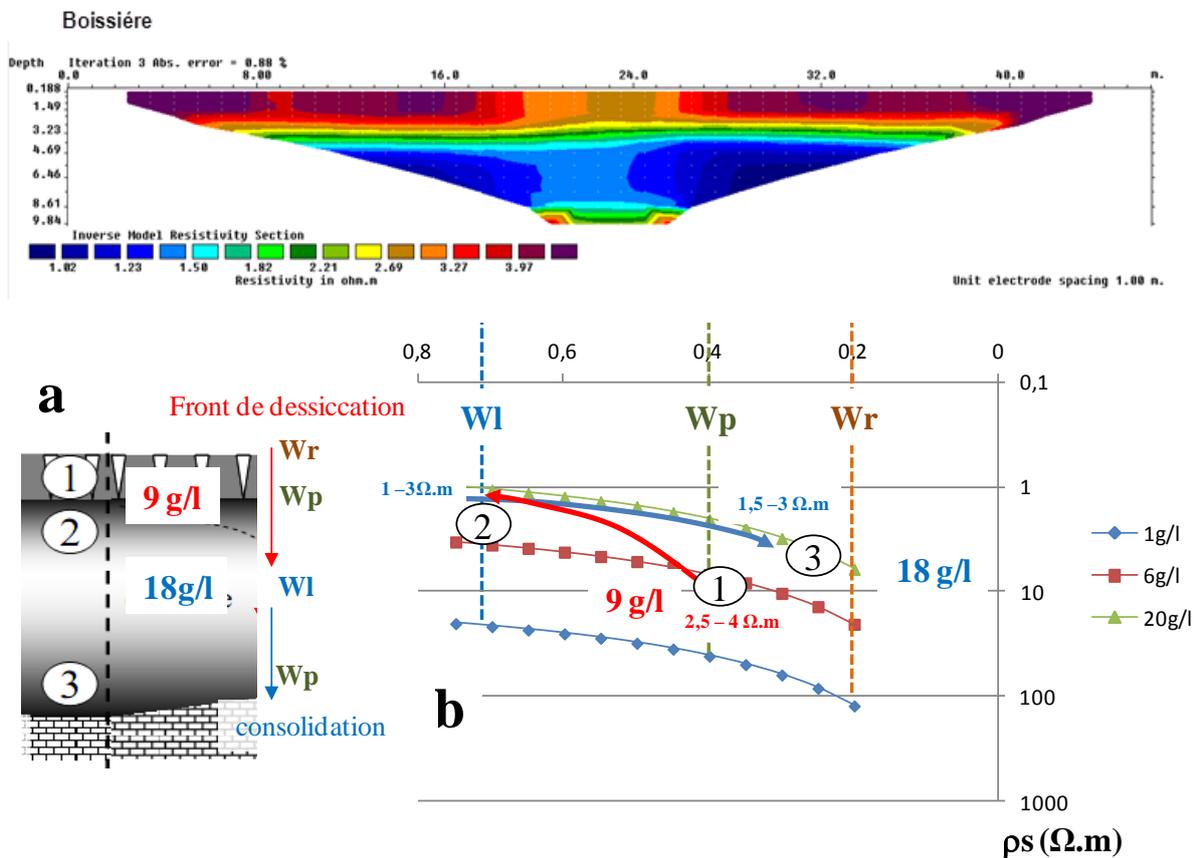


Figure 43: Section de résistivité reconstruite sur le site de Boissière (station 05VP04); Echelle de résistivité 1 - 5 $\Omega.m$ (28/04/2015).

6 - Marais mouillés Communal du Poiré



Figure 44: Localisation du site 06VP03 - lieu dit le Marais Communal du Poiré (ANNEXE 2)

Le Marais communal du Poiré se caractérise par la structure de surface du sol en "mottes". Ces microreliefs en "mottes" ou "boules" peuvent atteindre 30 cm de hauteur. Elles ont un diamètre d'une cinquantaine de cm. Disposées côte à côte elles recouvrent toute la partie ouest de la parcelle. La description de ces formations de mottes ou motturaux a été faite par Verger dès 1960 (Verger, 1960; 1994). Cette formation des mottes est liée aux propriétés de retrait/gonflement du bri, avec un fonctionnement macrostructural similaire à celui des vertisols :

- ouvertures de fractures de retrait en période sèche,
- comblement partiel des fractures ouvertes par des particules et petites mottes de sol,
- rehydratation et gonflement général du bri au retour de la saison humide hivernale, avec

blocage de la structure (du gonflement) au niveau des fractures colmatées et accumulation du gonflement en partie centrale des prismes.

Le cycle de compaction au droit des fractures de retrait puis le gonflement en partie interne des prismes, saison après saison, conduit à la formation des "mottes".

Les trois profils de W pour P1, P2 et P3 sont classiques avec de fortes teneurs en eau de surface, un niveau intermédiaire voisin de Wp et une augmentation de W en profondeur. Les profils de $CE_{1/5}$ sont pratiquement verticaux (constants) mais avec une moyenne qui décroît de P1 vers P3. Les profils de salinité suivent la même tendance (Figure 45). Les valeurs de pH se situent autour de 8 pour les profondeurs comprises entre 50 cm à 1,20cm. Au dessus de 50cm, elles diminuent vers la surface jusqu'à 6.

Les profils de Qd sont classiques avec diminution des valeurs avec la profondeur (Figure 46).

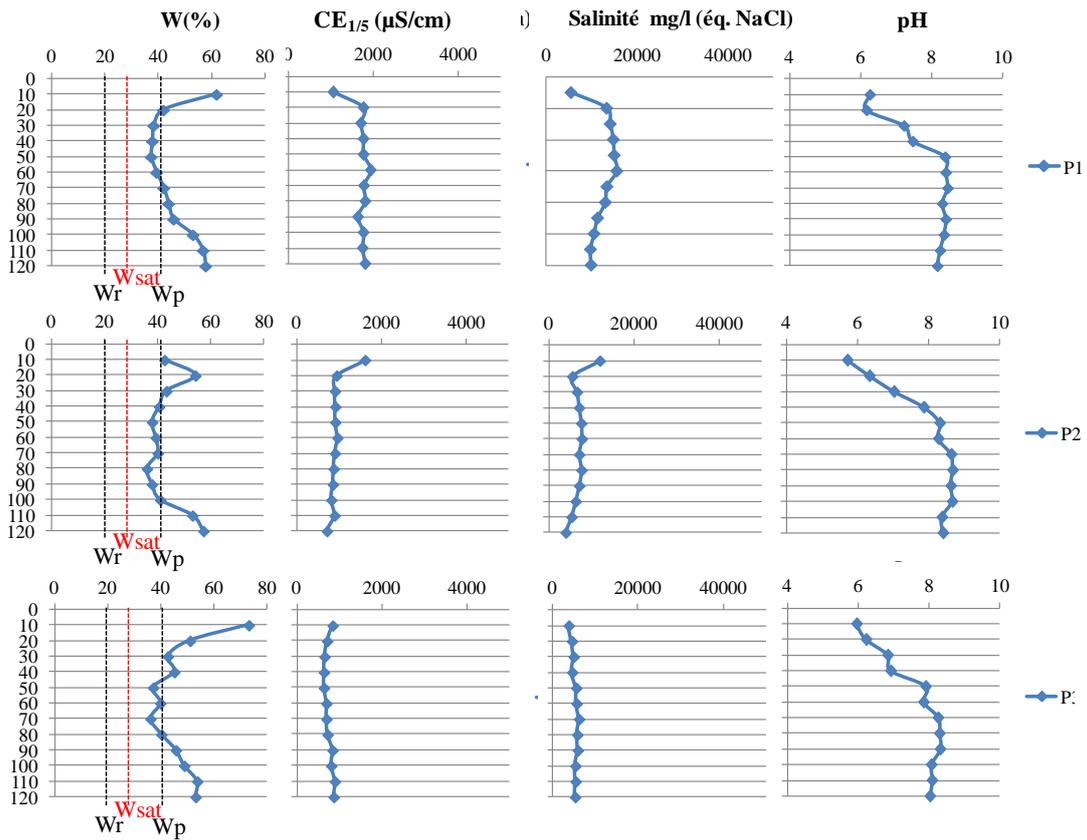


Figure 45 : Profils de W%, $CE_{1/5}$ ($\mu\text{S}/\text{m}$) et salinité en équivalent NaCl (mg/l) calculée sur le marais du Poiré (28/04/2015).

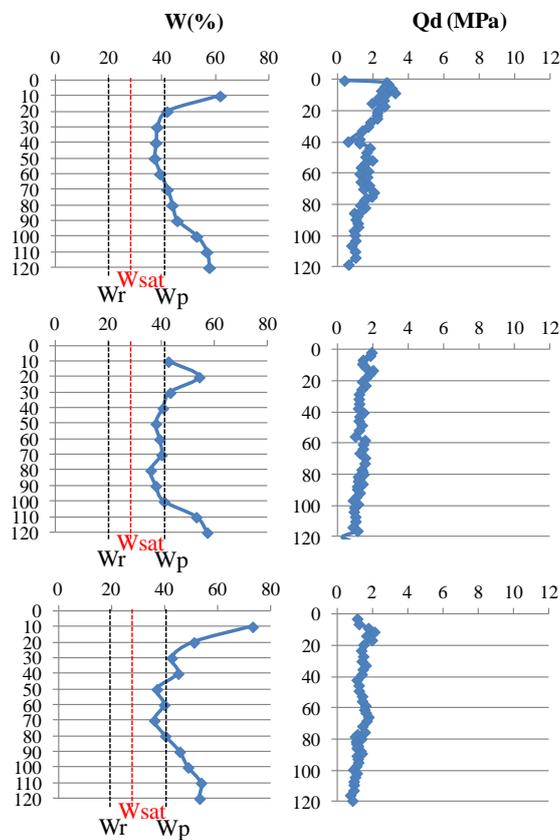


Figure 46 : Profil de W%, et Qd sur le marais de Poiré (28/04/2015).



Figure 47 : Profil de sol observé dans le marais de Poiré (ANNEXE 3)

Les profils observés présentent un horizon brun contenant de la matière organique de 10 à 20 cm d'épaisseur (**Figure 47**). De 15-20 cm à 30-35 cm de profondeur on observe des horizons gris foncé argileux avec une avec quelques tâches de rouille peu marquées et des zones décolorées (**Figure 48**). A partir de 35-40 cm de profondeur on observe un horizon gris à gris clair et qui devient gris-bleuté à partir de 90-100 cm de profondeur. A la période du prélèvement le site du poiré comportait de nombreux 'trous' liés au piétinement par les animaux sur un sol plastique et peu portant.



Figure 48 : Tâches de rouille peu marquées et zones décolorées (gris bleu) à 50-60 cm de profondeur.

Pour une gamme de résistivité similaire (1 - 5 Ω .m) la structure tricouche est encore mise en évidence sur la partie haute du profil (**Figure 49**):

- (1) 0,40 - 2 m, résistivités relativement fortes ($> 3 \Omega$.m) caractéristiques du sol affecté par la dessiccation en surface, salinité de nappe voisine de 7g/l
- (2) 2 - 7 m, les résistivités y sont les plus faibles 1-2 Ω .m, elles caractérisent le bri à l'état plastique-à-liquide saturé, salinité de nappe voisine de 13g/l
- (3), les valeurs plus élevées, sous 8 m de profondeur, caractérisent l'interface bri - substratum calcaire.

Dans la partie basse du profil, la structure est de type bicouche :

- le bri à l'état plastique-à-liquide saturé semble remonter jusqu'à la surface (0,40cm) avec des résistivités qui décroissent latéralement vers cette zone "humide".

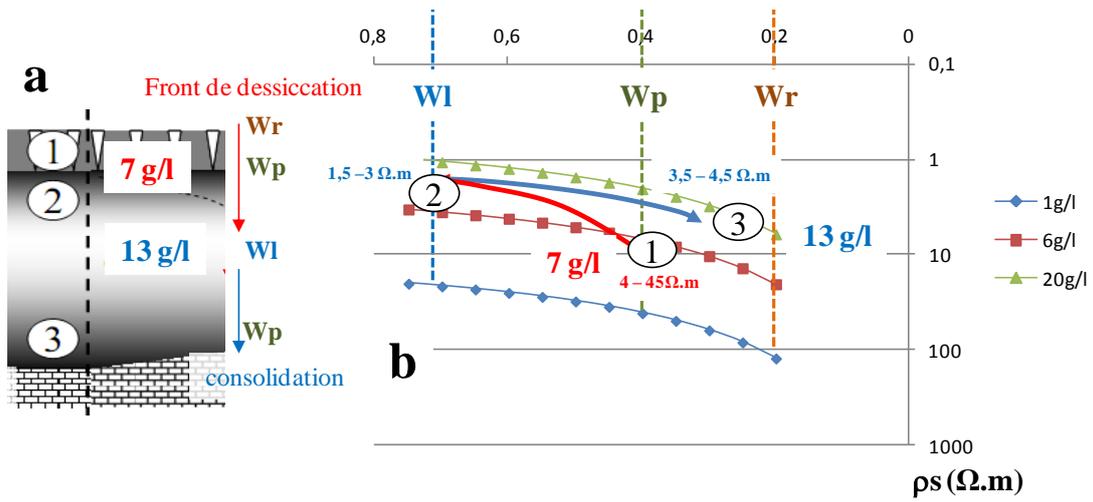
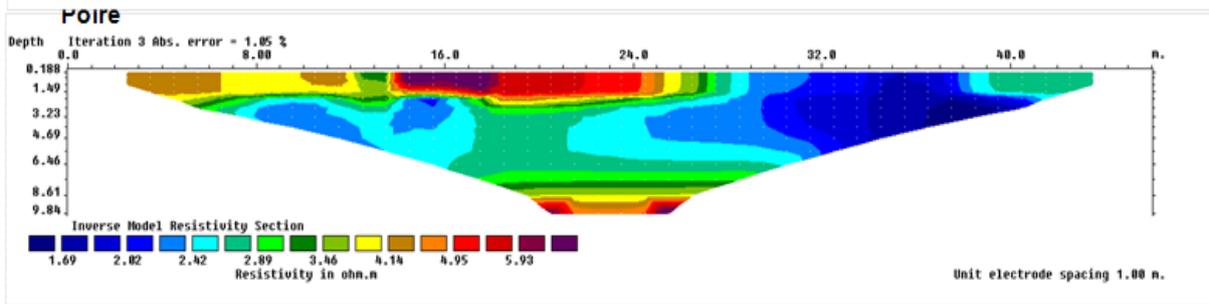


Figure 49 : Section de résistivité reconstruite sur le site du Poiré (station 06VP03); Echelle de résistivité 1 - 8 $\Omega.m$ (28/04/2015).

7 - Marais mouillés Saint-Arnault / Vieille Autise (Sainte Christine)

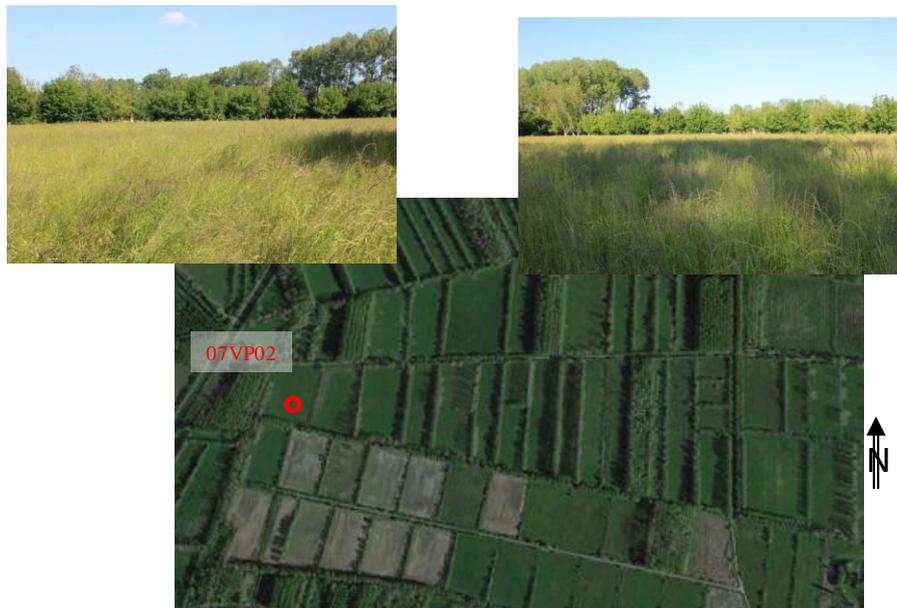


Figure 50 : Localisation du site 07VP02 à Sainte Christine (ANNEXE 2)

Les profils de W sont encore classiques mais avec une "anomalie" de fortes teneurs en W% autour de 40cm en SC1 et proche de la surface en SC2 et SC3. Ces anomalies qui peuvent traduisent une caractéristique tourbeuse, surtout en SC2 avec $W = 140\%$ (**Figure 51**).

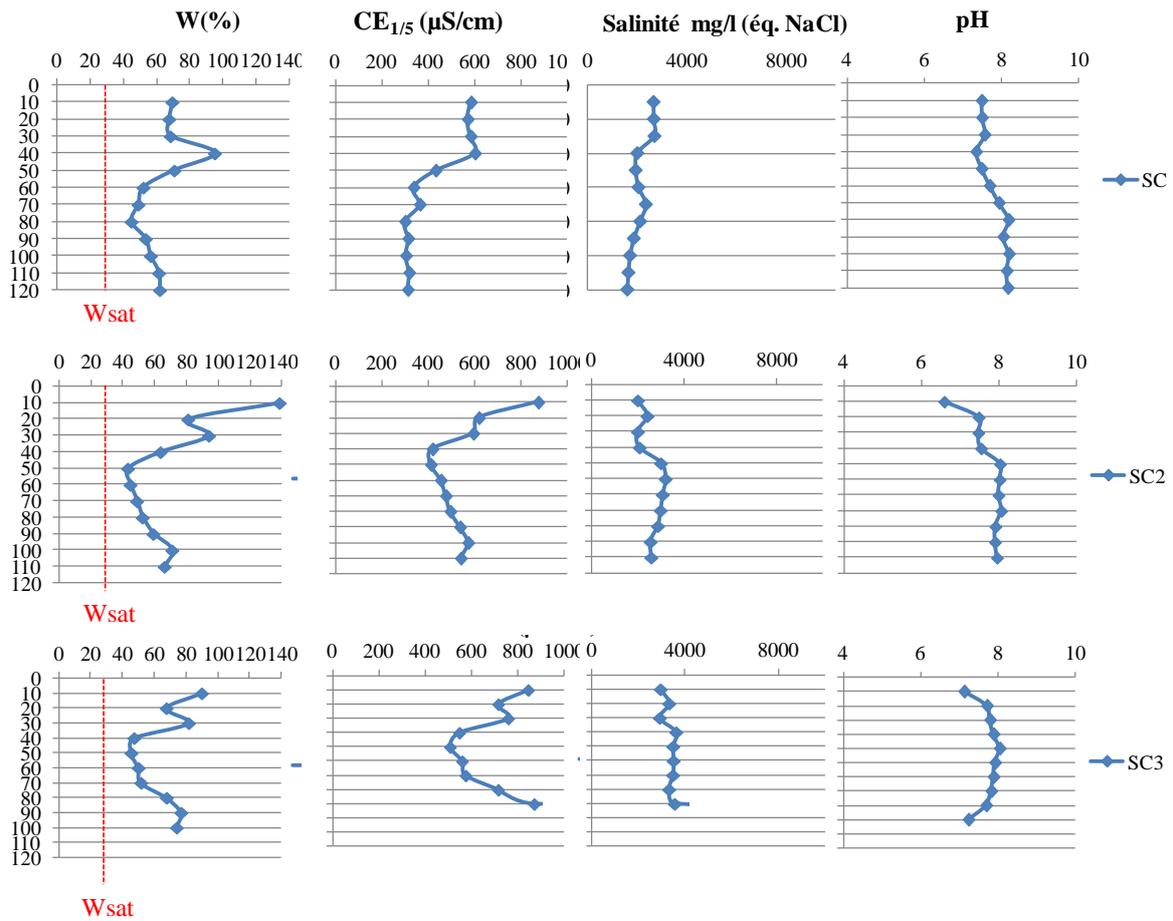


Figure 51: Profils de W%, $CE_{1/5}$ ($\mu\text{S}/\text{m}$) et salinité en équivalent NaCl (mg/l) calculée sur le marais de Sainte Christine (29/05/2015)

En SC1 les valeurs de pH sont légèrement inférieures ou égales à 8 tout le long du profil. Elles sont similaires en SC2 et SC3 excepté les valeurs mesurées à 10 cm qui sont voisines de 7.

Les profils de Qd montrent des pics de résistances à 20 cm de profondeur qui traduisent, malgré les teneurs en eau élevées, un aspect relativement consolidé du matériau, plus en accord avec le bri argileux qu'avec un milieu tourbeux (Figure 52).

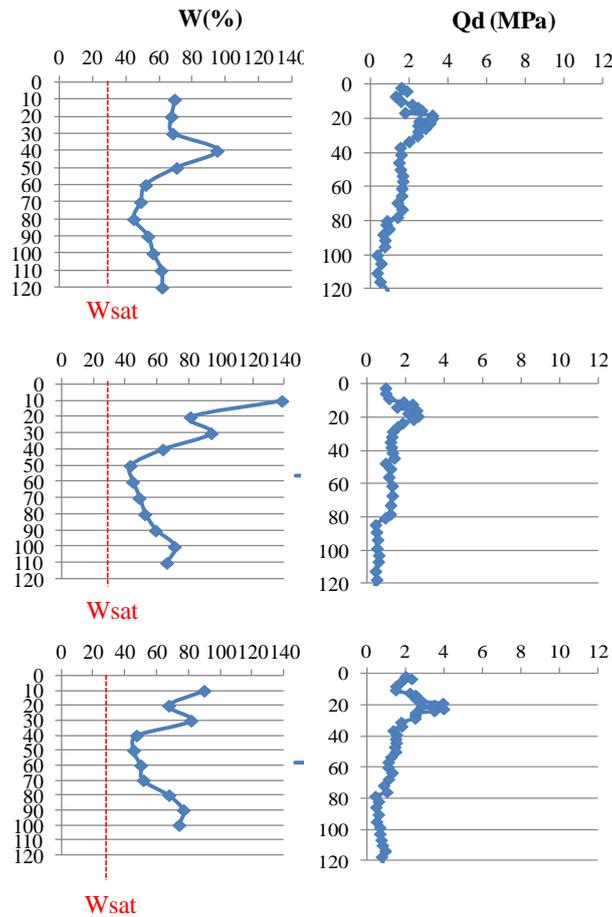


Figure 52 : Profil de W%, et Qd sur le marais de St Christine (29/05/2015)



Figure 53 : Profil de sol à Sainte Christine (ANNEXE 3).

Dans la parcelle de Sainte Christine un horizon tourbeux est observé dès la surface et présente une épaisseur pouvant atteindre 50 cm (Figure 53). Cet horizon tourbeux a une teneur en eau très importante.

A partir de 50 cm de profondeur on observe un horizon de bri (gris argileux) qui présente des traits rédoxyques sous formes de tâches de rouille, de zones décolorées et de zones de couleur bleu très marquées (Figure 54). La teneur en eau de ce profil est importante sur l'ensemble du sondage.



Figure 54 : Tâches de rouille, zones décolorées, zones de couleur bleues à 50-60 cm de profondeur. Ces traits rédoxyques traduisent une hydromorphie très importante de ce sol.

La section de résistivité représente une structure bicouche (Figure 55):

- de 0;40 à 3,50 m, une partie superficielle à faibles résistivités < 8-9 $\Omega.m$ avec une évolution horizontale de la zone basse (5 - 7 $\Omega.m$) à la zone haute (8 - 10 $\Omega.m$) correspondant au bri qui constitue la formation de surface. Les variations de résistivités sont directement liées à son état d'hydratation (couple teneur en eau - microstructure pour une salinité de nappe équivalente voisine de 3g/l)

- en dessous de 3,50 m de profondeur avec des résistivités de plus en plus fortes vers la profondeur (20 $\Omega.m$) qui traduisent le contact avec le substratum calcaire.

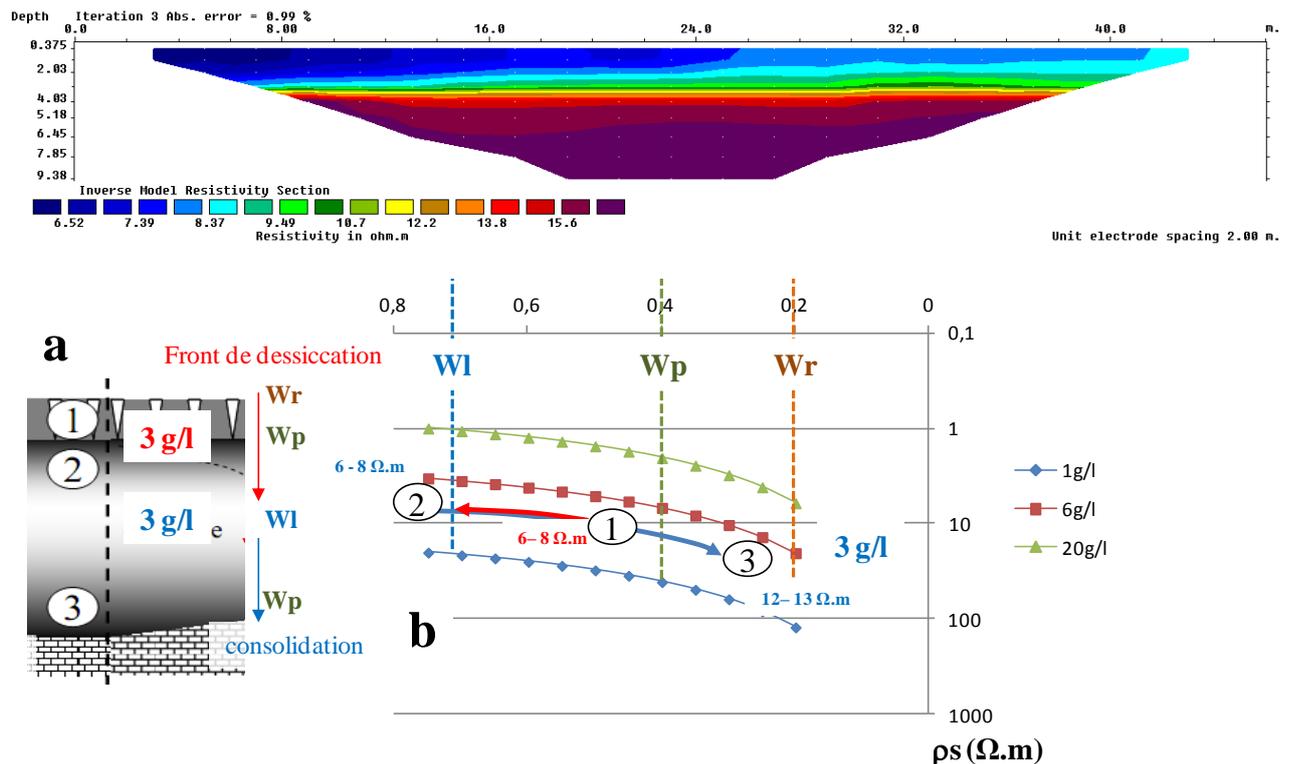


Figure 55 : Section de résistivité reconstruite sur le site de Sainte Christine (station 07VP02); Echelle de résistivité 4 - 20 $\Omega.m$ (20/05/2015..

8 - Marais mouillés Le Mazeau

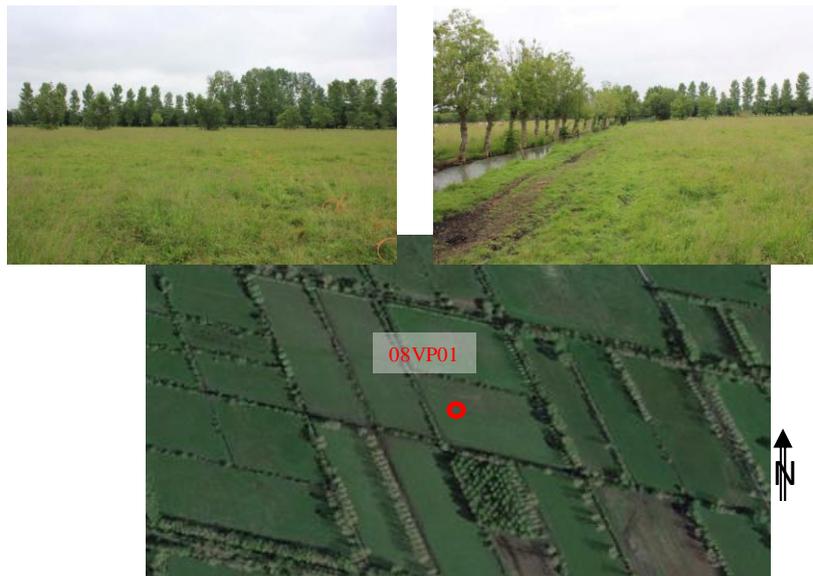


Figure 56 : Localisation du site 08VP01 au Mazeau (ANNEXE 2)

Les trois profils de W% sont très particuliers. Ils sont caractérisés par des teneurs en eau très élevées : un peu plus de 100% en surface et jusqu'à des maximums supérieurs à 400% vers 80cm de profondeur (Figure 57).

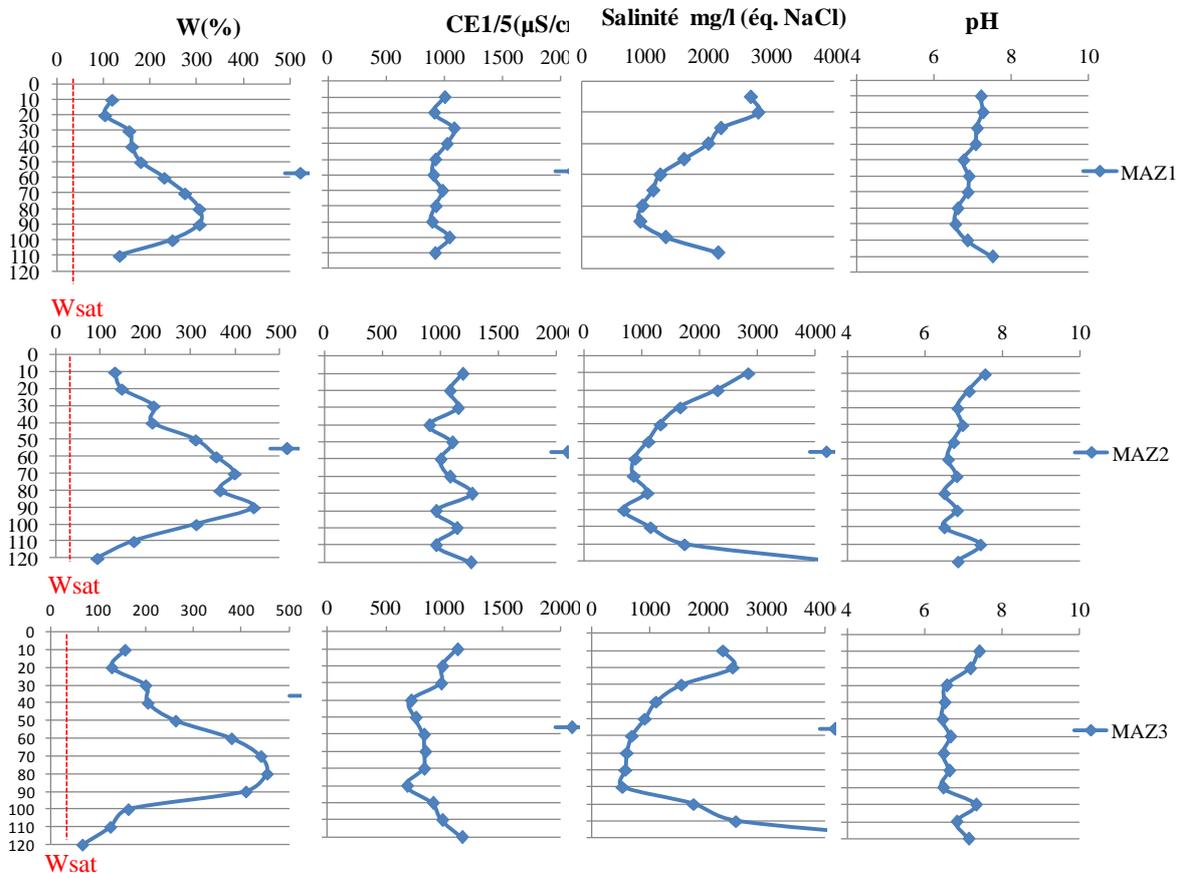


Figure 57: Profils de W%, $CE_{1/5}$ ($\mu\text{S}/\text{m}$) et salinité en équivalent NaCl (mg/l) calculée sur le marais de Le Mazeau (29/05/2015)

Des valeurs de W supérieures à 100% indiquent que la masse d'eau contenue dans un échantillon est supérieure à la masse de solide. Ces valeurs sont caractéristiques de niveaux tourbeux. Les valeurs de W diminuent vers 1,20 m de profondeur et traduisent un passage progressif vers le bri argileux. Simultanément les valeurs de $CE_{1/5}$ restent quasiment constantes. De fait les salinités calculées sont très faibles, caractéristiques d'eau douce. Parallèlement les valeurs de pH sont voisines de 7 en surface. Elles décroissent en profondeur jusqu'à 6 (dans les niveaux tourbeux).

Les profils de Q_d montrent une faible consolidation de surface puis des résistances qui deviennent particulièrement faibles au niveau des profondeurs qui présentent les fortes teneurs en eau (Figure 58). Ces évolutions sont cohérentes avec l'aspect tourbeux du matériau.

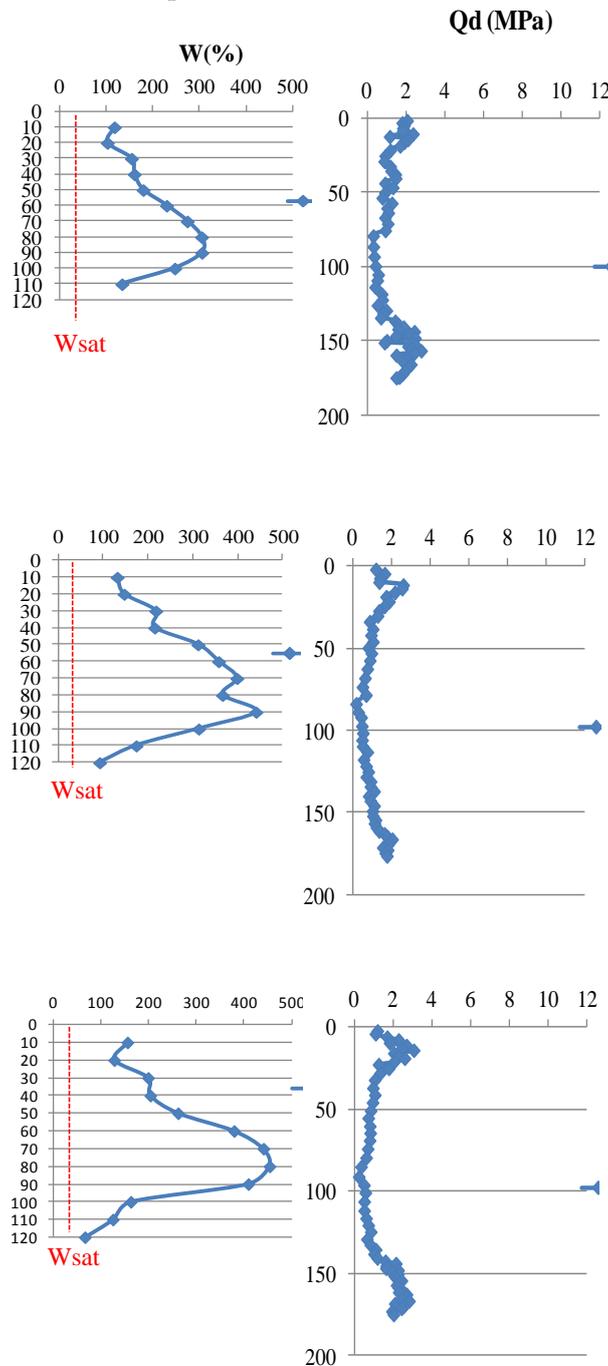


Figure 58 : Profil de $W\%$, et Q_d sur le marais de Le Mazeau (29/05/2015).



Figure 59 : Profil de sol au Mazeau (ANNEXE 3)

Les sols du site du Mazeau sont très particuliers et différents des autres. Ce profil présente un horizon brun d'environ 10 cm d'épaisseur. Ensuite, un horizon tourbeux est observé jusqu'à 80-90 cm (Figure 59). Cet horizon tourbeux est légèrement consolidé en surface et a une teneur en eau très importante et est très plastique à partir de 25-30 cm. A partir de 90-100 cm un horizon gris foncé argileux est observé, il correspond à la transition entre la tourbe et le bri. Dans ces sols tourbeux il est difficile de mettre en évidence les tâches de rouille du fait de leur couleur noire.

La section de résistivité montre la structure tricouche caractéristique du marais avec (Figure 60):

- (1) des fortes résistivités $> 10 \Omega.m$ en surface, jusqu'à 2 m de profondeur en accord avec une très faible salinité de nappe voisine de 1g/l
- (2) un niveau intermédiaire (2 - 5 m) avec les plus faibles résistivités qui peuvent descendre à moins de $5 \Omega.m$ correspondant à une salinité de nappe légèrement plus élevée voisine de 4g/l
- (3) le niveau de base avec les résistivités les plus fortes qui peuvent atteindre $20 \Omega.m$.

Ces trois niveaux sont généralement interprétés comme (1) le bri affecté par la dessiccation de surface à l'état solide, (2) le bri à l'état plastique à liquide en nappe et (3) le bri consolidé en profondeur et/ou le substratum calcaire.

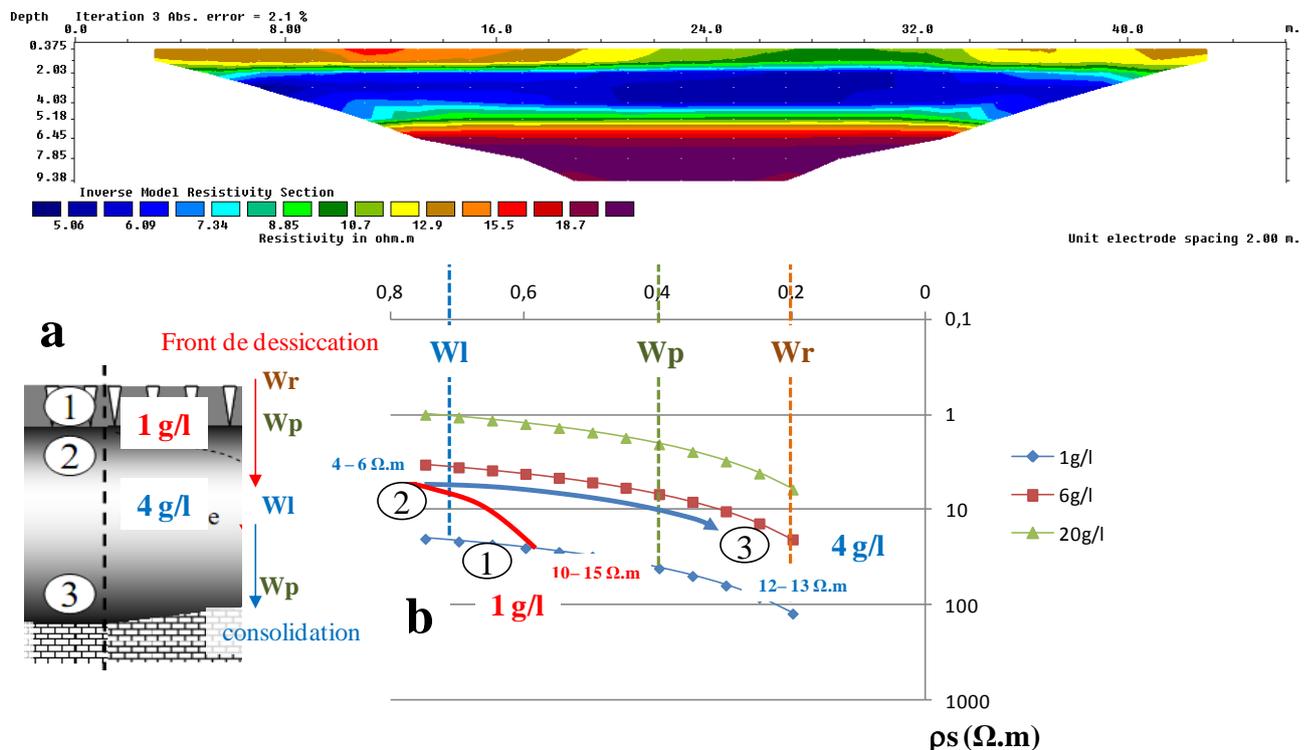


Figure 60 : Section de résistivité reconstruite sur le site du Mazeau (station 08VP01) ; Echelle de résistivité 4 - 20 $\Omega.m$ (29/05/2015).

9 - Marais mouillés Marais sauvage (St Hillaire la Pallud)



Figure 61 : Localisation du site 09VP02 à St Hillaire la pallud (ANNEXE 2)

Les trois sites montrent des profils de W classiques avec dessiccation de surface (jusqu'à 30 - 40 cm de profondeur), puis augmentation progressive de W (Figure 62).

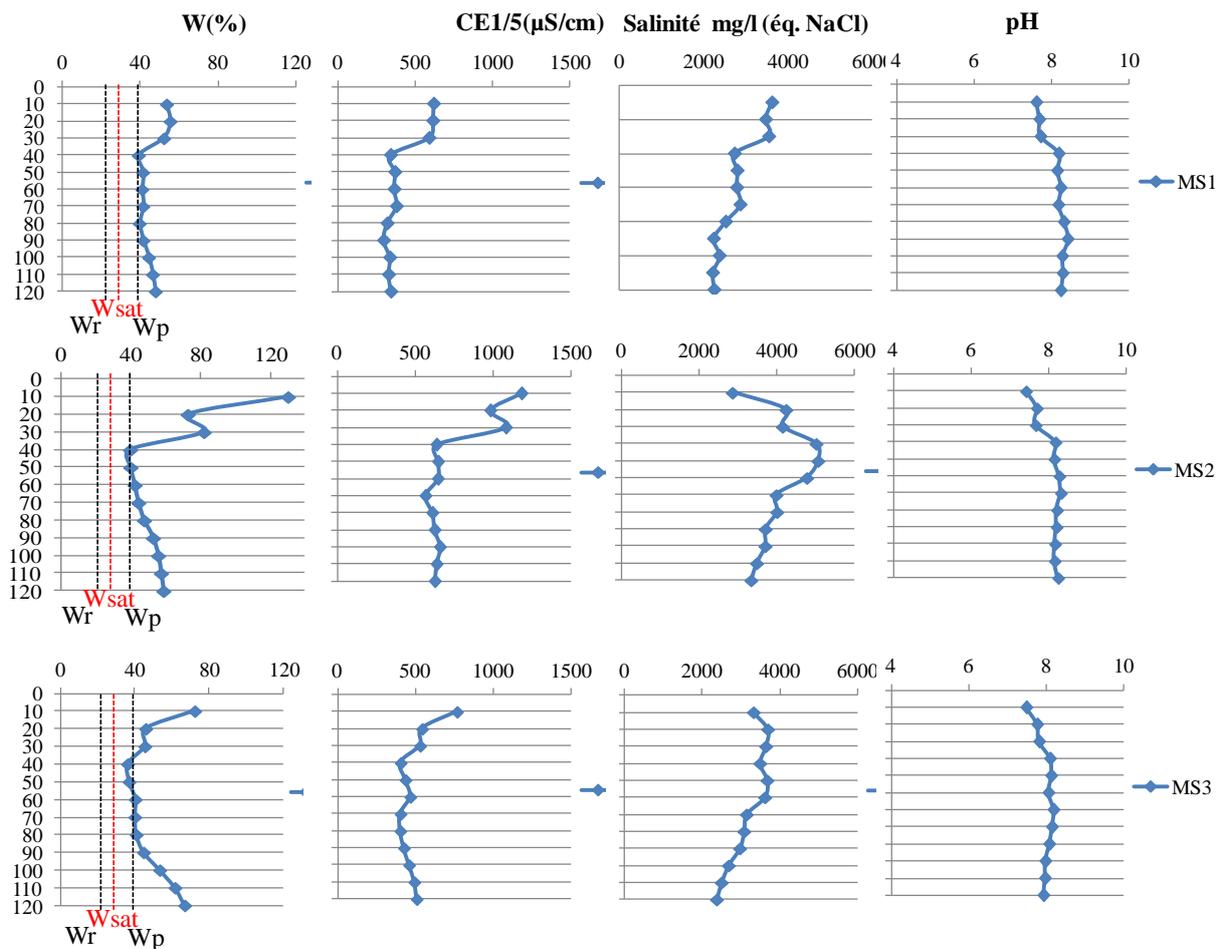


Figure 62: Profils de W%, $CE_{1/5}$ ($\mu\text{S}/\text{m}$) et salinité en équivalent NaCl (mg/l) calculée sur le marais de Le Marais sauvage (St Hillaire la Pallud le 29/05/2015).

Les salinités augmentent avec la profondeur. Le pic de fortes teneurs en eau de MS2 est associé à une diminution de salinité (lixiviation et stockage eau de pluie en surface) (Figure 62).

Les profils de pH sont pratiquement constants (pH = 8) le long des trois profils. Les valeurs de surface sont néanmoins légèrement plus faibles (pH=7,5).

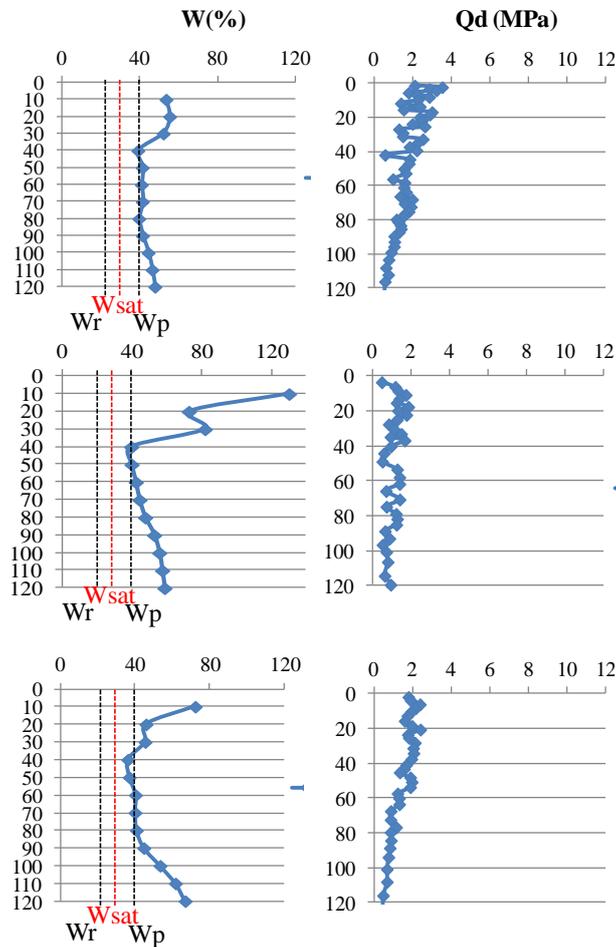


Figure 63 : Profil de W%, et Qd sur le marais de St Hillaire la Pallud (29/05/2015)



Figure 64 : Profil de sol à St Hillaire la Pallud (ANNEXE 3)

Les profils observés présentent un horizon brun foncé organique 20 à 30 cm d'épaisseur. Ensuite on observe un horizon gris foncé avec des tâches de rouille. A partir de 40 cm on observe le bri dont la couleur grise s'éclairci avec la profondeur (Figure 64). Les tâches de rouille sont abondantes jusqu'à 60-70 cm de profondeur (Figure 65).



Figure 65 : Tâches de rouille, zones décolorées et zones bleutées à 50-60 cm de profondeur.

Dans l'ensemble, les résistivités sont plus faibles (Echelle 1-10 $\Omega.m$). Trois niveaux de résistivités sont identifiés (Figure 66):

- (1) 0,40 - 2,50 m avec des résistivités relativement élevées $> 3 \Omega.m$, salinité de nappe voisine de 2-3 g/l
- (2) 2,50 - 8 m de profondeur, avec des résistivités descendant jusqu'à $1 \Omega.m$, salinité de nappe voisine de 15 g/l
- (3) sous 8 m, avec les plus fortes résistivités ($>10 \Omega.m$) caractéristiques de l'interface avec le substratum calcaire.

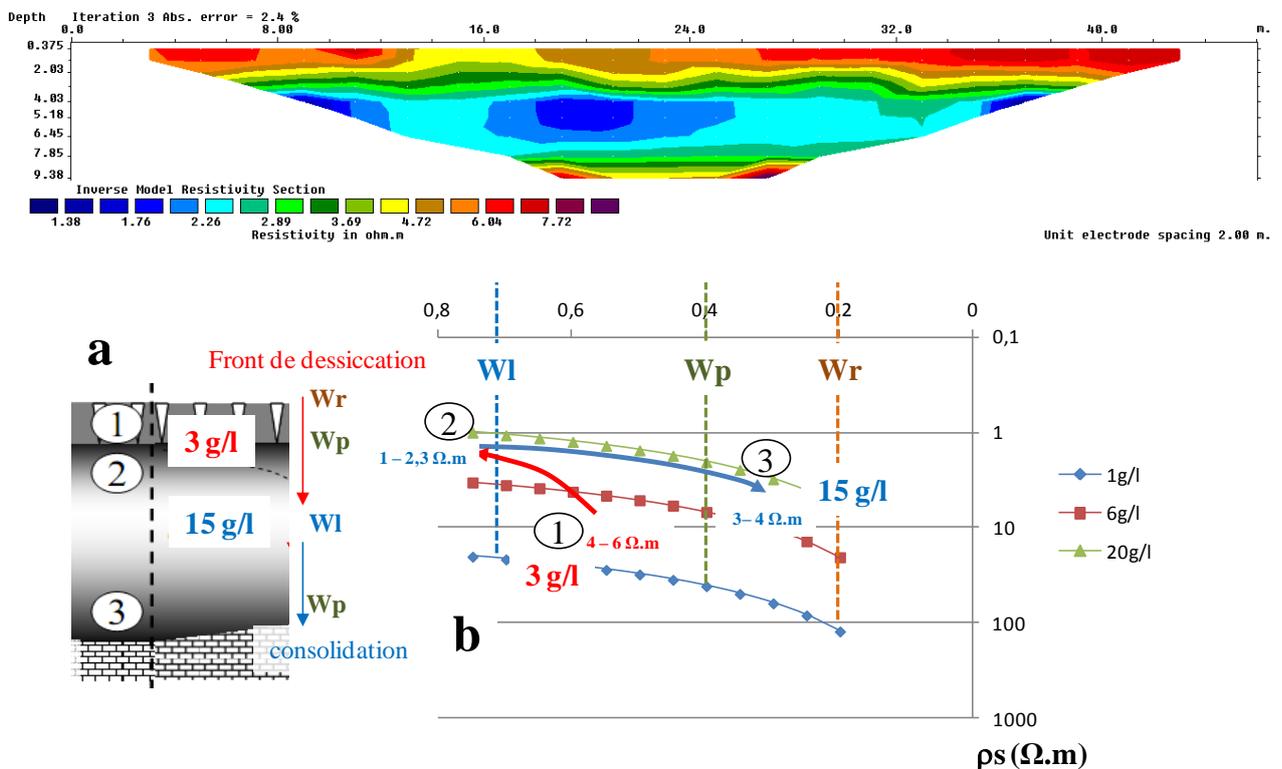


Figure 66: Section de résistivité reconstruite sur le site de St Hillaire (station 09VP02); Echelle de résistivité 1 - 10 $\Omega.m$ (29/05/2015).

10 - Marais mouillés Le passage - La Ronde



Figure 67 : Localisation du site 10VP02 à La Ronde (ANNEXE 2)

Les trois profils de $W\%$ sont relativement homogènes autour de 40% sans pics de dessiccation flagrants en surface (Figure 68). Les profils de $CE_{1/5}$ montrent une décroissance inhabituelle des conductivités de la surface vers la profondeur, de fait, les salinités suivent la même tendance: diminution avec la profondeur, contrairement aux profils habituels qui traduisent les remontées capillaires issues d'une nappe salée (Figure 68). Les valeurs de pH centrées sur 8 n'évoluent que très peu le long des profils. Les profils de Qd sont classiques avec les petits pics de consolidation en surface (Figure 69).

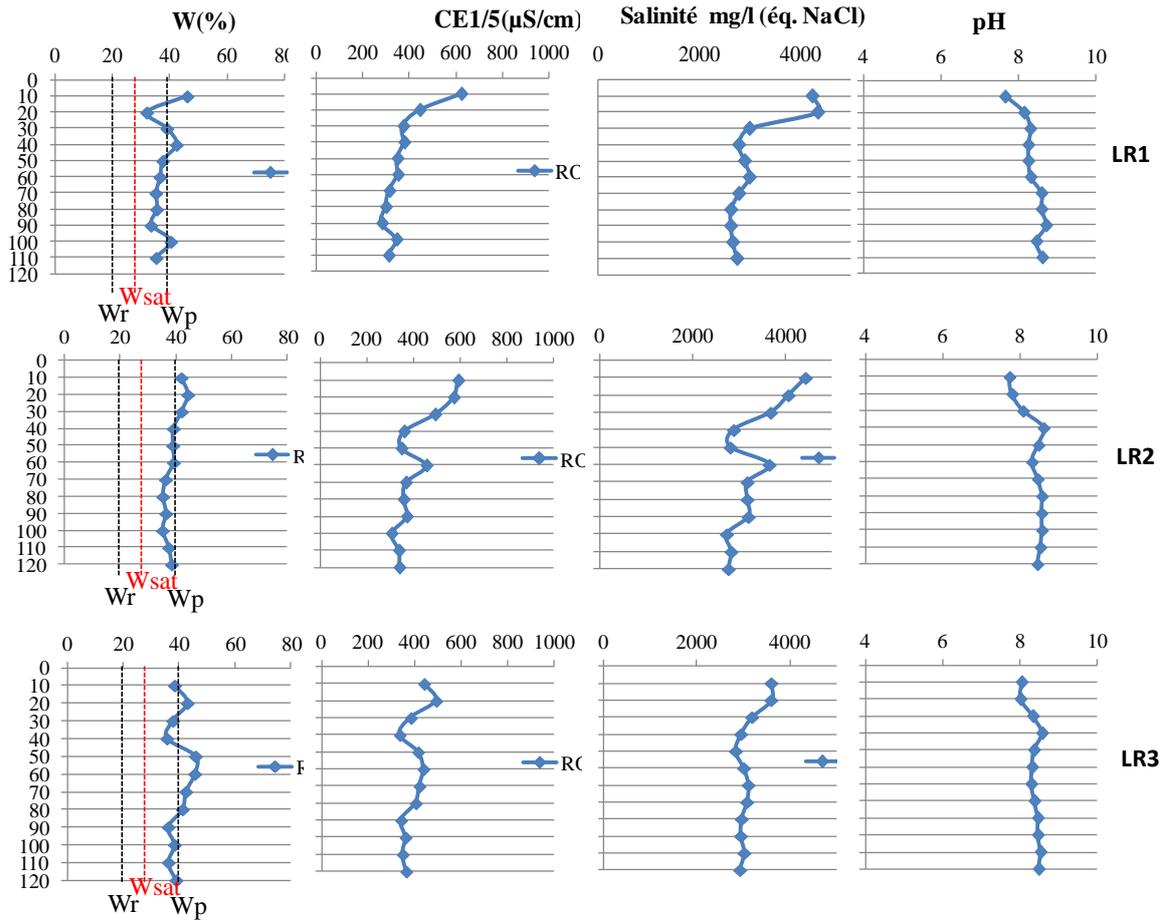


Figure 68: Profils de W%, CE_{1/5} (µS/m) et salinité en équivalent NaCl (mg/l) calculée sur le marais de La Ronde (20/05/2015).

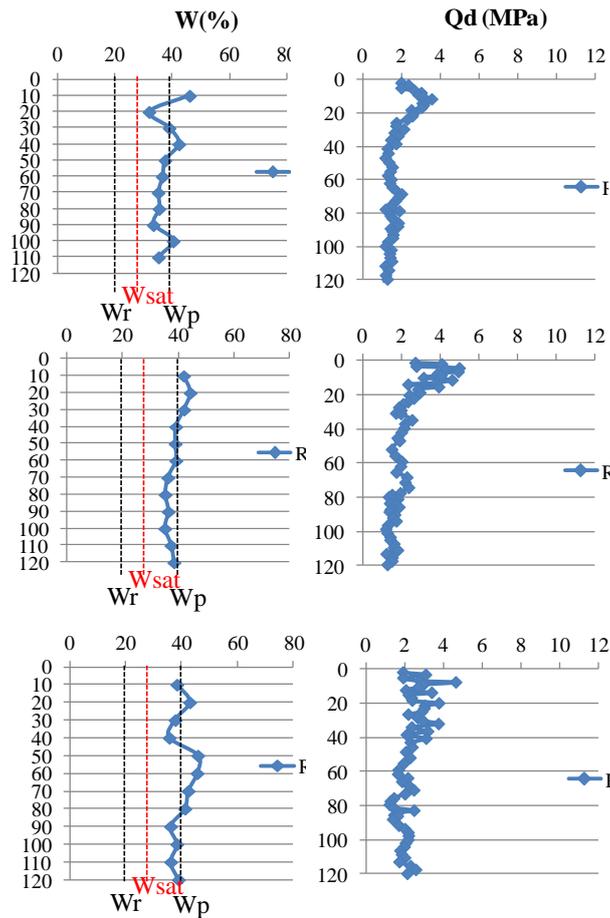


Figure 69 : Profil de W%, et Qd sur le marais de La Ronde (20/05/2015).



Figure 70 : Profil de sol du marais de La Ronde (ANNEXE 3)

Les profils du site de la Ronde observés présentent un horizon brun foncé organique 20 à 30 cm d'épaisseur. Ensuite, de 30 à 45 cm on observe un horizon gris très foncé avec des tâches de rouille. A partir de 45-50 cm on observe le bri dont la couleur grise avec de nombreuses tâches de rouille jusqu'à 80-90 cm de profondeur (Figure 70). Le profil de la Ronde était celui qui présentait la plus faible plasticité (teneur en eau) au moment du prélèvement.

L'échelle de résistivité est "basse" (1 - 10 Ω .m). La section est caractéristique d'un bicouche (Figure 71):

- (1) en se rapprochant de la surface, de 4 m à 0,40 m, les résistivités de plus en plus élevées, jusqu'à 10 Ω .m. En surface ce sont des résistivités de bri en partie desséché avec une salinité de nappe voisine de 3,5 g/l

- (2) la partie sous-jacente (4 - 9,50 m) est caractérisée par les résistivités les plus faibles 3 - 1 $\Omega.m$. Ce sont des résistivités habituellement correspondant au bri à l'état plastique à liquide saturé dans une nappe de salinité voisine de 13g/l.

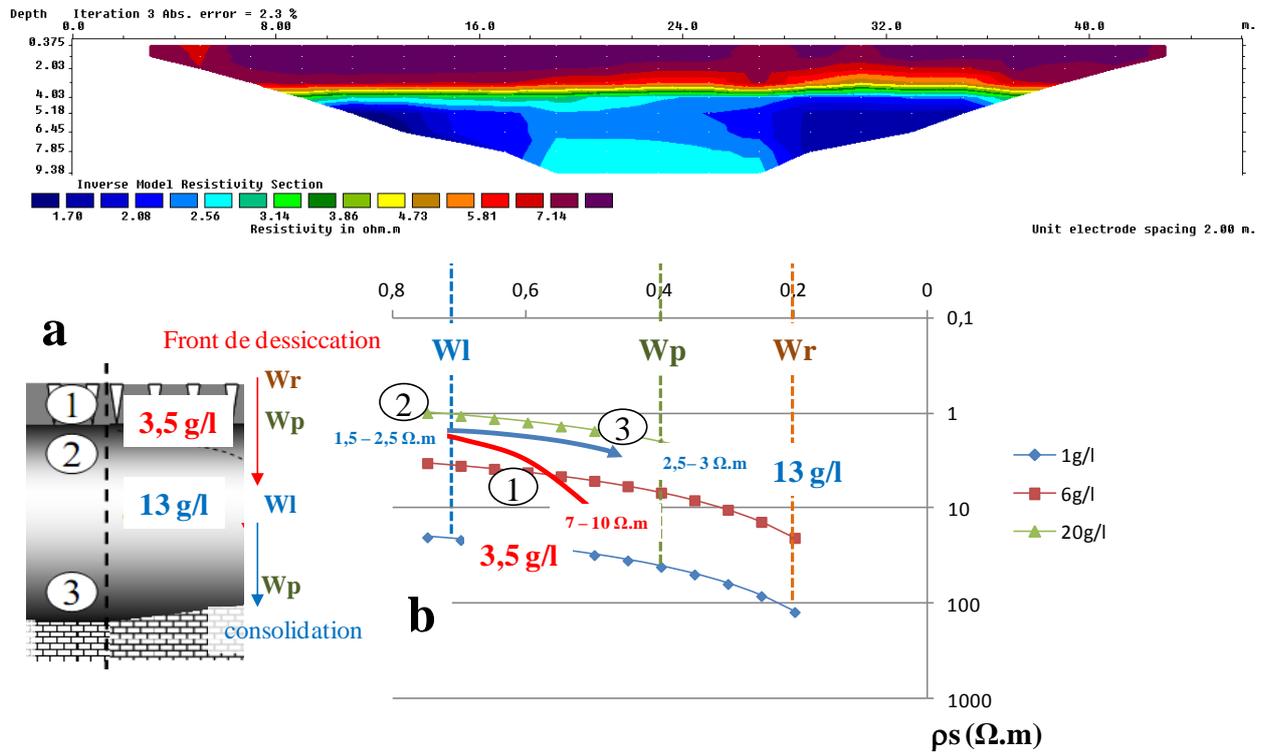


Figure 71 : Section de résistivité reconstruite sur le site de La Ronde (station 10VP02); Echelle de résistivité 1 - 10 $\Omega.m$ (20/05/2015).

11 - Marais mouillés Cuvette de Nuailé (Figure 72 manquante)



Figure 72 : Localisation du site 11VP03 dans la cuvette de Nuailé (ANNEXE 2)

En partie haute Nuailé 1 et Nuailé 2 les profils d'octobre sont les plus secs, ils sont respectivement "adossés" à la limite de plasticité et à la limite de saturation. Les profils de juillet sont plus humides, en partie superficielle, témoins du "stockage" d'eau en surface et à 1 m de profondeur en Nuailé 1, témoins d'arrivées d'eau douce (Figure 73).

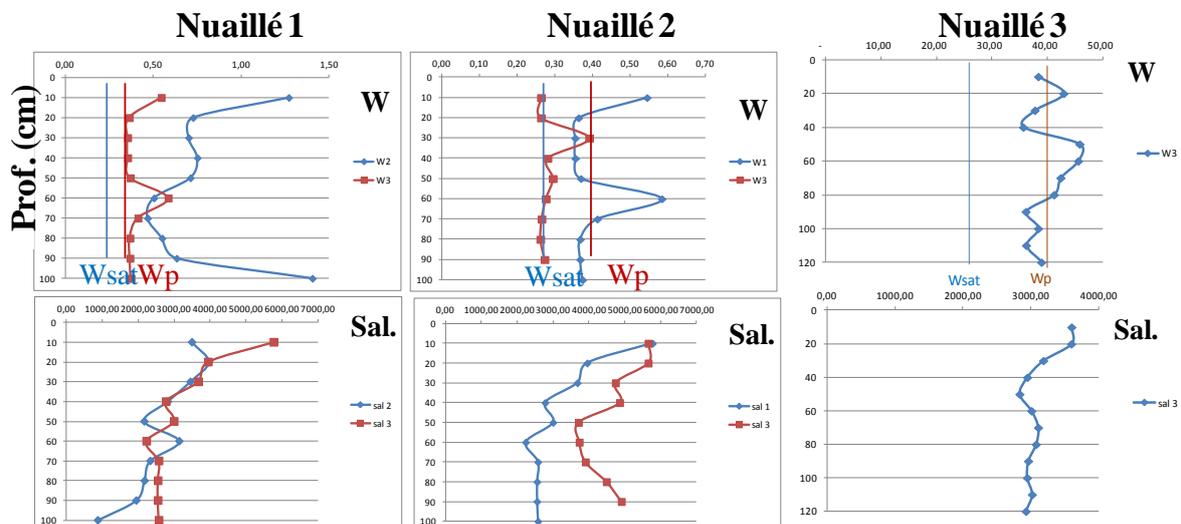


Figure 73: Comparaisons des profils (Nuailé 1, 2 et 3) de W et salinité de juillet (1) et octobre (2).

La cuvette de Nuailé présente une structure deux couches (Figure 74):

- (1) de 0,40 à 5 m de profondeur, les résistivités sont les plus faibles < 10 Ω .m, elles correspondent aux différents états du bri dans une nappe de salinité voisine de 3g/l.
- (2) une augmentation rapide des résistivités sous 5 m de profondeur jusqu'à 100 Ω .m caractéristique du substratum calcaire.

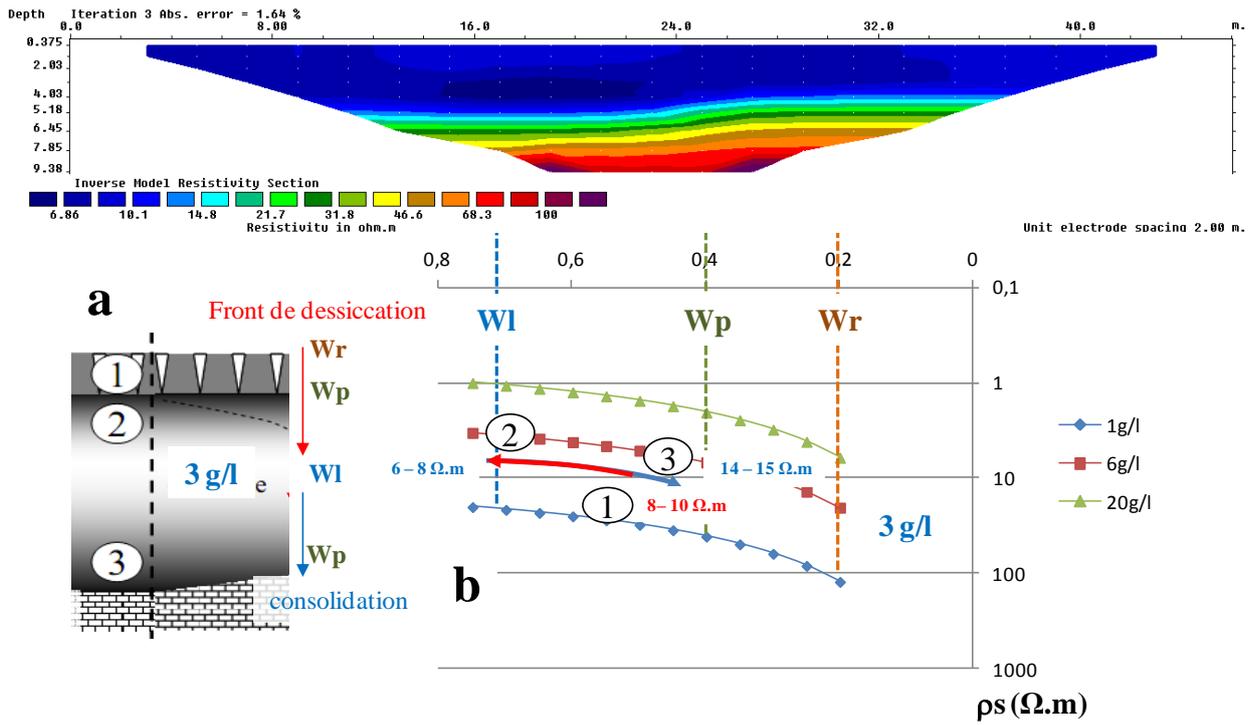


Figure 74: Section de résistivité reconstruite sur le site de Nuaille (station 10VP03); Echelle de résistivité 1 - 100 Ω.m (21/07/2015).

3.1.3. Conclusion sur les structure des 11 sites : relation profils de tomographie électrique / structure du bri et salinité de nappe / profondeur du substratum calcaire

Les dispositifs utilisés ont tous été constitués de 24 électrodes espacées tous les 2m. Les profondeurs des sections "reconstruites" descendent jusqu'à 9,50 m de profondeur mais ne représentent pas les 40 cm de surface. Les valeurs de résistivités sont essentiellement contrôlées par la porosité, l'indice de saturation et la salinité de l'eau.

Les structures mises en évidence sont généralement tricouches. Elles représentent toujours la superposition (Figure 75):

- (1) du bri à l'état solide à plastique en surface sur
- (2) du bri à l'état plastique à liquide et, en position intermédiaire sur
- (3) du bri éventuellement consolidé en profondeur et le contact avec le substratum calcaire.

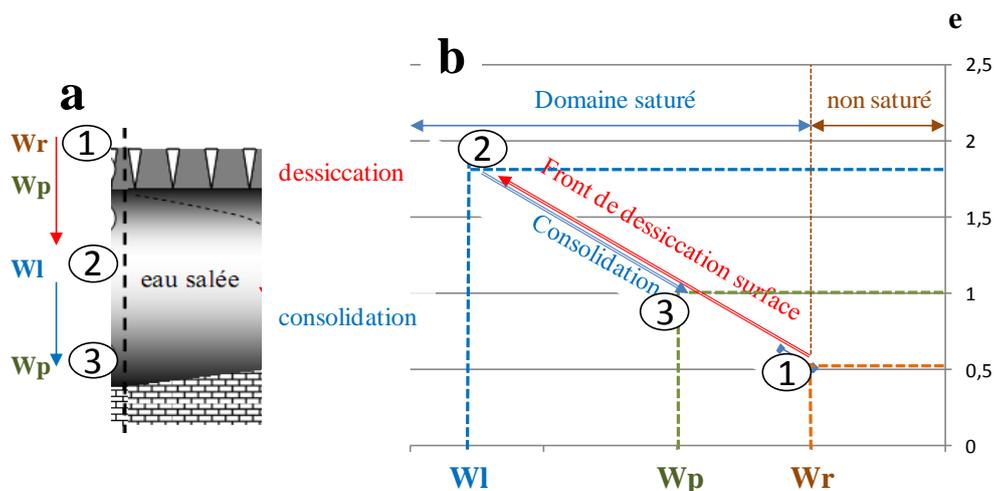


Figure 75: Structure tricouche type du bri sur le marais. L'effet de structure se traduit par 1 = Etat solide saturé à non saturé de surface, forte résistivité, 2 = état plastique à liquide saturé, diminution des résistivités, 3 = consolidation en profondeur, état liquide à plastique saturé, augmentation de la résistivité jusqu'au contact avec le substratum (de forte résistivité).

Dans les marais mouillés de Luçon, de Nalliers et du Poiré, les structures sont typiquement des tricouches généralement observés dans le marais :

- résistivités relativement fortes en surface (voisines ou $< 3 \Omega.m$) jusqu'à 1, 5 - 2 m de profondeur. Les évolutions latérales correspondent encore aux évolutions des couples teneur en eau - salinité. Les diminutions de résistivités correspondent aux teneurs en eau plus fortes et salinités plus faibles. Elles sont caractéristiques de salinités inférieures à 10 g/l à Luçon pour des microstructures "fermées" de l'état solide du bri entre W_r et W_p . A Nalliers et au Poiré, les évolutions latérales sont dues à de fortes salinités mesurées à partir de 50 cm de profondeur en N3 et N4.

Dans le marais desséché de Rouchères et de Boissière, les structures sont encore de type tricouche. La profondeur de l'horizon de surface à fortes résistivités (soit faibles salinités) est plus importante, cet horizon descend à 4 m à Boissière.

A Sainte Christine, pour une structure tricouche, les résistivités de surface particulièrement "élevées", 5 à 7 $\Omega.m$, correspondent à des salinités particulièrement faibles ($< 4 \text{ g/l}$).

Au Mazeau, la structure tricouche est toujours évidente. Les résistivités mesurées sont les plus élevées, $> 8 \Omega.m$ en surface et $> 5 \Omega.m$ dans la couche intermédiaire. Cette structure à fortes résistivités est en

accord avec les horizons tourbeux rencontrés: ceux ci sont caractérisés par de très fortes teneurs en eau et de très faibles salinités d'eau.

A St Hillaire la Pallud, la structure tricouche montre un horizon de surface, de résistivités 3 - 6 $\Omega.m$, qui descend jusqu'à 3 - 4m de profondeur. Ces fortes résistivités correspondent encore à de faibles salinités.

A La Ronde, la structure bicouche montre un "horizon" de surface de forte résistivité ($> 5 \Omega.m$) qui descend jusqu'à 4m de profondeur. Pour des structures qui restent voisines de W_p , ces fortes résistivités sont également à attribuer aux faibles salinités des eaux, voisines de 2g/l.

A l'effet de structure s'ajoute les évolutions de salinité des eaux. Quatre types de sections de résistivité sont mis en évidence :

- une seule nappe salée de la surface vers la profondeur, type marais mouillé récent de Longeville et marais mouillé de Nalliers....(Figure 76)

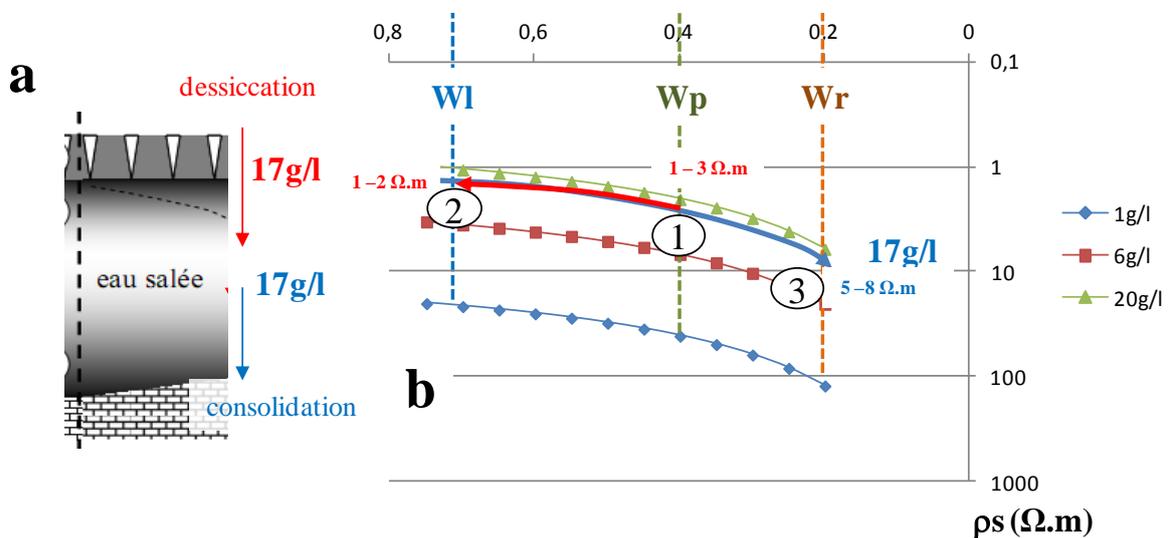


Figure 76: Structure tricouche avec une seule salinité (élevée) de nappe, exemple de Longeville

- deux nappes distinctes, nappe très salée en profondeur, et moyennement salée en surface, type marais mouillé de Luçon, marais desséché des Rouchères, marais desséché de Boissière,....(Figure 77)

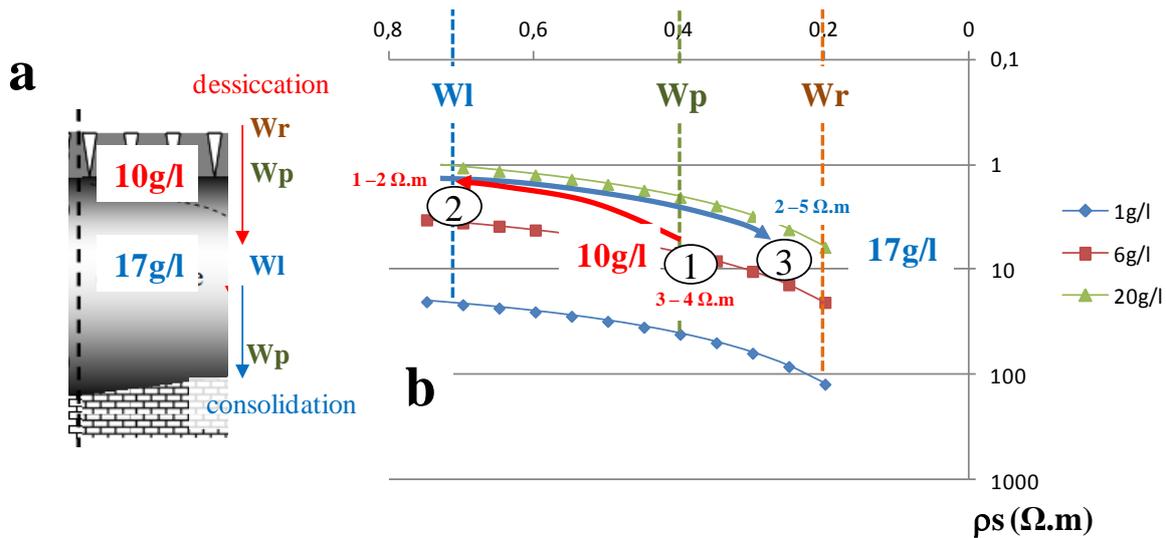


Figure 77: Structure tricouche avec deux nappes, salinité moyenne en surface et forte salinité en profondeur. exemple Luçon, Rouchères, Boissière, Nalliers.

- deux nappes distinctes, nappe moyennement salée en profondeur, et peu salée en surface, type marais mouillé du Poiré et de St Hillaire la Pallud, (Figure 78)

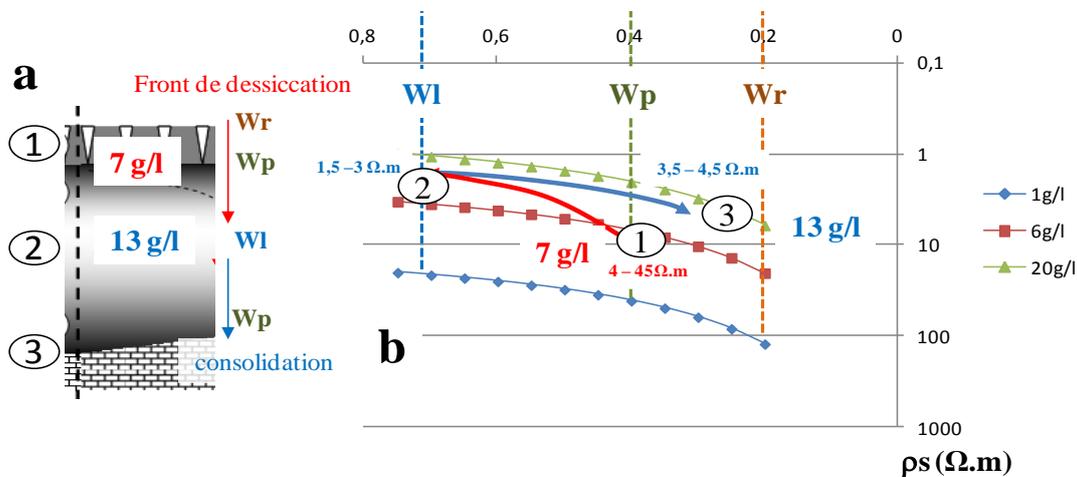


Figure 78 : Structure tricouche avec deux nappes, salinité moyenne en surface et forte salinité en profondeur. Exemple marais mouillé du Poiré, St Hillaire la Pallud et La Ronde.

- une seule nappe de très faible salinité, type marais mouillé de St Christine, Nuailé et le Mazeau malgré la très faible salinité voisine de 1g/l dans les tourbes (Figure 79).

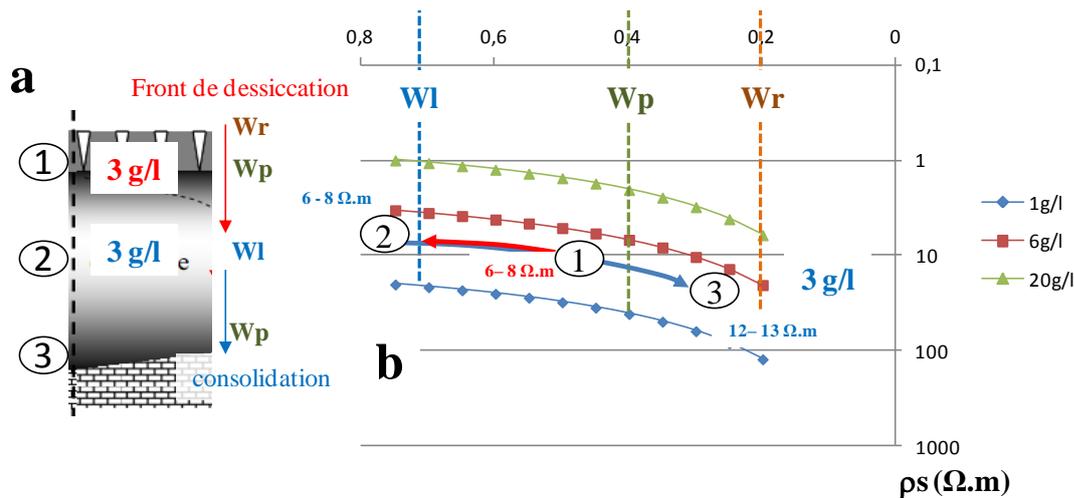


Figure 79: Configuration une seule nappe d'eau douce, type St Christine, Nuailé et le Mazeau.

L'interface substratum calcaire / bri marque le contact avec la couche de base des structures identifiées en tomographie. La consolidation du bri en profondeur, pour des épaisseurs voisines ou inférieures à 10 m, ne doit pas dépasser la limite de plasticité. La conséquence est une résistivité du "fond" du bri voisine de 1 - 2 $\Omega.m$ pour une salinité de nappe entre 13 et 20g/l, et < 10 $\Omega.m$ pour une salinité de nappe voisine de 3 g/l de salinité. En conséquent, sur toutes les sections de tomographie électrique les augmentations brutales de résistivité observées en "fond " de section marquent l'interface bri-calcaire.

Dans ces conditions les caractéristiques de ces structures tricouches, classiques des marais côtiers peuvent être résumées pour les 11 sites explorés en prenant en compte la salinité des nappes (Tableau 6).

Site	n°	localisation	marais	Nappe surface	Nappe inférieure	Substratum calcaire
Longeville	1	Nord (85)	Desséché	17 g/l	17 g/l	6 - 9 m
Luçon	2	Nord (85)	Mouillé	10 g/l	17 g/l	8 - 9 m
Rouchères	3	Nord (85)	Desséché	13 g/l	20 g/l	8 - 9 m
Nalliers	4	Nord (85)	Mouillé	17 g/l	18 g/l	9 -10 m
Boissière	5	Nord (85)	Desséché	9 g/l	20 g/l	8 - 9 m
Poiré	6	Nord (85)	Mouillé	7 g/l	13 g/l	7 - 8 m
St Christine	7	Est (86)	Mouillé	3 g/l	3 g/l	2 - 3 m
Le Mazeau	8	Est (86)	Mouillé	1 g/l (tourbes)	4 g/l	5 m
St Hillaire	9	Est (86)	Mouillé	3 g/l	15 g/l	7 - 8 m
La Ronde	10	Est (86)	Mouillé	3,5 g/l	13 g/l	> 10 m
Nuailé	11	Sud (17)	Mouillé	3 g/l	3 g/l	4,5 - 5,5 m

Tableau 6: Récapitulatif des salinités de nappes du bri et profondeurs apparentes du substratum calcaire.

L'ensemble de ces profondeurs d'interfaces bri / substratum calcaire sont cohérentes avec celles issues de la BSS (site Infoterre du BRGM). Les comparaisons des résultats géophysique et données BSS sont présentées dans l'annexe "Épaisseur de bri - toit du Dogger" (ANNEXE 1).

Les 11 sites peuvent ainsi être répertoriés en fonction de la salinité de nappe superficielle (Figure 80).

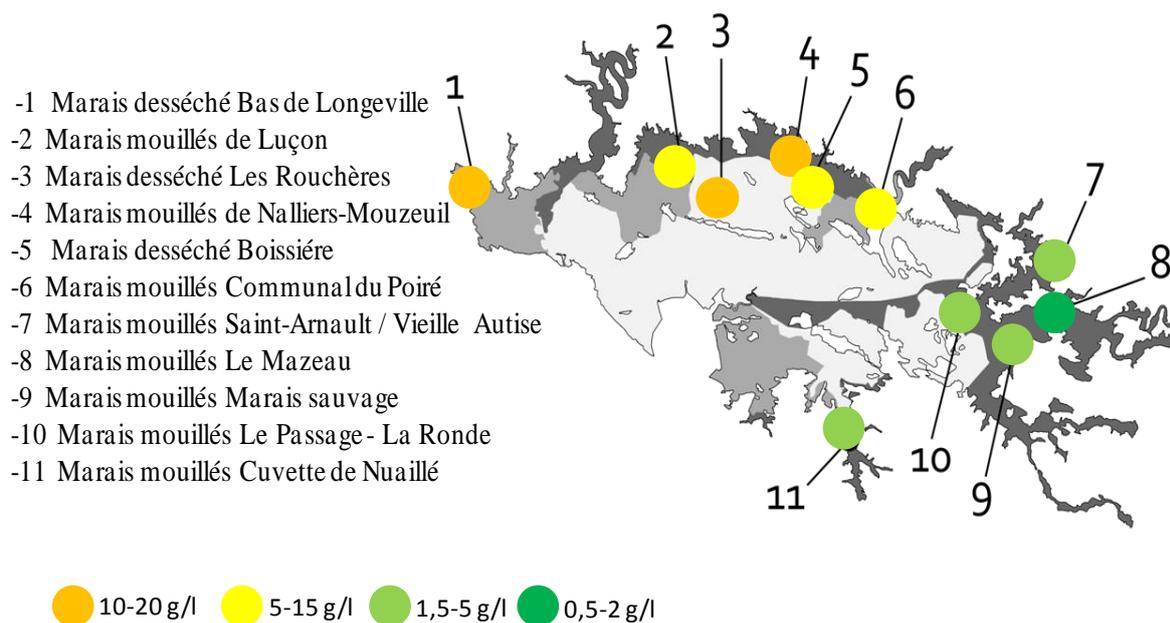


Figure 80: Caractérisation des 11 sites à partir de la salinité de la nappe superficielle du bri, 10-20g/l milieu mésophile, 5-15g/l milieu méso-hygrophile, 1,5 - 5g/l milieu méso-hygrophile, 0,5 - 2g/l milieu hygrophile.

3.2. Les évolutions des profils de teneur en eau, salinité et RU résiduelles.

3.2.1 Valeurs de RU initiale, profils de RU initiale et profils de RU_{ETP} et RU résiduelle

3.2.1.a : RU initiale et RU_{ETP} (extrait thèse Radimy, 2015)

La RU peut être extrapolée à partir des caractéristiques texturales du sol, essentiellement le ratio entre le pourcentage d'argile et le pourcentage de limon. L'extrapolation qui suit est basée sur les profils d'analyses texturales de bri effectués sur le site de St Laurent de la Prée (Bernard, 2006; Gallier, 2011). Si la texture du bri est relativement homogène et cohérente avec celle de St Laurent de la Prée sur ces territoires, à l'échelle des profils verticaux étudiés deux niveaux ont été différenciés:

- l'horizon de surface appauvri en argile (5 - 12.5% de fraction < 2 μm et 75 - 90% de fraction 2 - 80μm). Celui ci est limité à 30cm de profondeur.

- les niveaux "profonds", sous 30 cm de profondeur, plus riches en argile (40 - 60% de fraction < 2 μm) et plus pauvres en limons (30-50% de fraction 2 - 80μm).

L'ensemble de ces textures se regroupent dans deux domaines dans le triangle de représentation texture/RU (Bruand et al., 1996; Mathieu et Lozet, 2011; **Figure 81**):

- le domaine argile de surface caractérisé par une RU voisine de 1.85 mm,
- et en profondeur, à cheval sur les deux domaines, limoneux avec une RU voisine de 1,80 mm/m et limono-argileux avec une RU voisine de 200 mm/m.

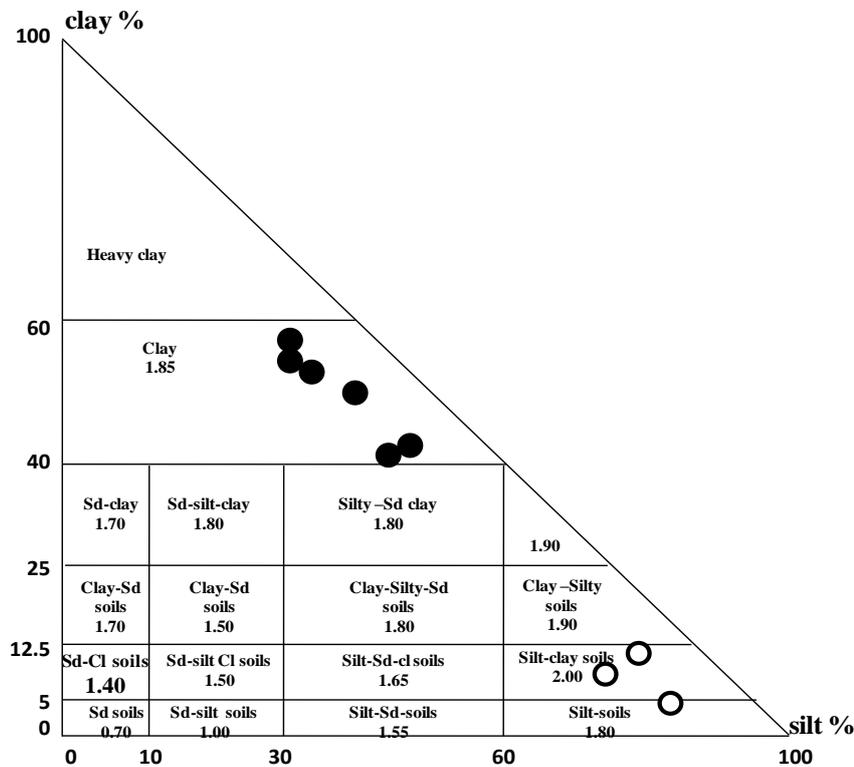


Figure 81 : Relation texture / RU pour les profils texturaux du bri de St Laurent de La prée (Radimy et al., 2013; Radimy, 2015).

La deuxième méthode courante de calcul la RU est basée sur la différence entre le point de flétrissement (Wfl) et la capacité au champ (Wcc):

$$RU = h * \gamma_{ap} (Wcc - Wfl) * 10$$

avec h l'épaisseur de la couche en m, γ_{ap} la densité apparente, Wcc la teneur en eau de capacité au champ et Wfl la teneur en eau du point de flétrissement.

Le point de flétrissement est usuellement considéré comme équivalent à un pF de 4,2 (15 000 hPa en pression de succion) soit à approximativement équivalent à la limite de retrait W_r pour nos sols argileux. La teneur en eau équivalente au point de flétrissement (W_{fl}) est également liée à la texture du sol et se situe entre 29 et 32% pour les sols argileux à limoneux (Baize et Jabiol, 1995). D'autre part, W_{cc} et W_{fl} peuvent également être estimées à partir de la texture du sol de la manière suivante (Rawles et Brakensiek, 1982):

$$W_{cc} = 257,6 - (2 * \text{sable } \%) + (3,6 * \text{argile } \%) + (29,6 * \text{MO} \%)$$

et

$$W_{fl} = 26 + (5 * \text{argile } \%) + (15,8 * \text{MO} \%)$$

avec MO% le pourcentage de matière organique.

Pour les compositions du bri les valeurs ainsi calculées sont:

- W_{cc} de 40 % soit équivalente à la limite de plasticité W_p
- W_{fl} de 20 % soit équivalente à la limite de retrait W_r .

Finalement ce calcul nous donne une RU initiale égale à 200 mm/m en accord avec sa détermination via le triangle structural (Figure 81). Cette RU est nommée $RU_{200\text{mm/m}}$ dans la suite du texte.

Le calcul de la RU en fonction de la météorologie (ETP) est basé sur la RU initiale calée uniquement sur la texture du sol. C'est un calcul pas à pas (date par date) qui prend en compte le bilan ETP à chaque date et qui traduit l'évolution du potentiel du sol le long de la saison. Les paramètres pris en compte sont (Tableau 7) :

- la RU initiale (200 mm)
- K_c le coefficient de culture de la plante qui correspond à un coefficient de consommation en eau (sans unité), $K_c = 1$ en prairie.
- ETP ou l'ETM, l'évapotranspiration affectée du K_c
- RR la pluviométrie (mm)

Le calcul donne la RU initiale, RU_{ETP} (mm) pour une prairie ou RU_{ETM} (mm) pour une culture à K_c variable (Tableau 7).

Date	RUref (mm)	parcelle en prairie (L3)				parcelle cultivée (A7)			
		K_c	ETP (mm)	RR (mm)	RU_{ETP} (mm)	K_c	ETM (mm)	RR (mm)	RU_{ETM} (mm)
11/06/2013	200	1	3.3	0	195.3	0.3	0.95	0	199
15/07/2013	200	1	6.6	0	70.5	0.8	5.28	0	108.5
19/07/2013	200	1	5.4	0	45.9	0.8	4.32	0	88.8
22/07/2013	200	1	5.7	8	36.1	1	5.7	8	80.12
26/07/2013	200	1	4.5	5.5	61.9	1	4.5	5.5	106
29/07/2013	200	1	4.2	4	79.4	1	4.2	4	123.5
02/08/2013	200	1	5.3	0	58.6	1	5.3	0	103
05/08/2013	200	1	3.7	4.5	49.8	1	3.7	4.5	93.82
09/08/2013	200	1	3.5	0.5	37.5	1	3.5	0.5	81.52
23/08/2013	200	1	4	0	0	1	4	0	11.32
26/08/2013	200	1	3	0	5.4	1	3	0	12.02
30/08/2013	200	1	4.4	0	0	0.9	3.8	0	0
02/09/2013	200	1	4.4	0	0	0.9	3.96	0	0

Tableau 7: Exemple d'évolution de RU_{ETP} pour la prairie et RU_{ETM} pour une culture de maïs sur le site INRA pour la saison 2013. Le coefficient de K_c reste constant à 1 par définition pour la prairie; il évolue entre 0,3 et 1 en fonction du cycle de croissance pour le maïs.

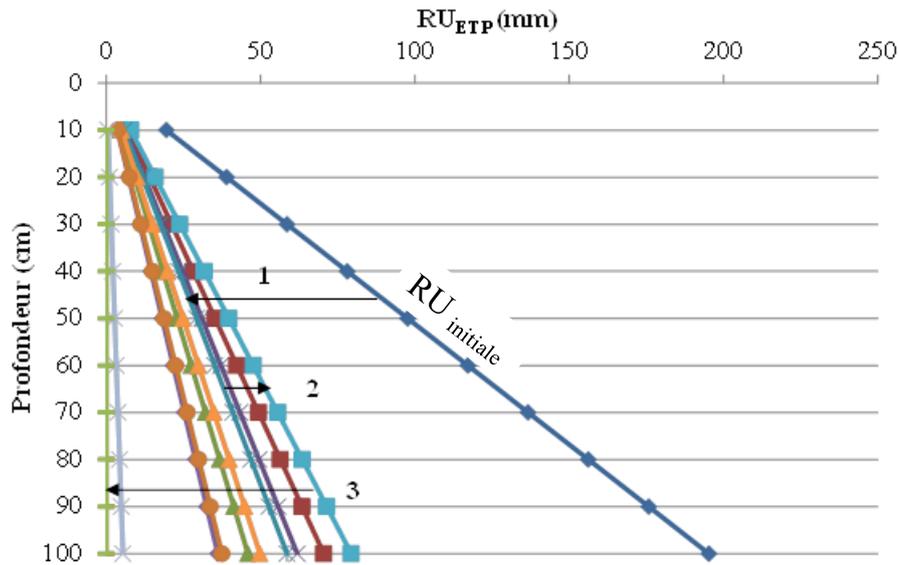


Figure 82 : Représentation des profils de RU_{ETP} en prairie (site expérimental INRA de St Laurent de la Prée) entre le 11/06/2013 et le 02/09/2013. Les flèches horizontales montrent les sens d'évolutions pendant (1) une première période de dessiccation, (2) une période d'humidification et (3) une deuxième période de dessiccation. Le profil de RU initial atteint les 200 mm à 1m de profondeur.

Tous ces profils sont linéaires définis par une pente qui est la valeur de RU en mm/m (Figure 82).

3.2.1.b : RU résiduelle (extrait thèse Radimy, 2015)

L'objectif est de palier au manque d'information des simples profils linéaires de RU, RU_{ETP} et RU_{ETM} par rapport aux évolutions verticales des caractéristiques hydriques du sol au cours du cycle de croissance - sénescence des plantes. Les profils de teneurs en eau mesurés sont en effet le résultat des compétitions entre l'ETP et les remontées capillaires. La construction de profils de RU résiduelles à partir de ces profils de teneur en eau semble réaliste pour montrer l'évolution verticale des profils de quantité d'eau disponible au cours de la saison. L'objectif est de représenter la progression des fronts de dessiccation dus à l'évaporation face aux éventuelles remontées capillaires.

Le calcul est basé sur l'équation :

$$RU = h * \gamma_{ap} (W_{cc} - W_{fl}) * 10.$$

En remplaçant la capacité au champ (W_{cc}) par la teneur en eau résiduelle (W_j) à la date considérée, l'équation devient :

$$RU_{res} = h * \gamma_{ap} (W_j - W_{fl}) * 10$$

avec W_j la teneur en eau mesurée le jour j.

Les profils de teneur en eau sont acquis tous les 10 cm de profondeur. Les profils de RU_{res} sont donc calculés par couche de 10 cm correspondant aux profondeurs successives de mesure de W . En considérant le point de flétrissement équivalent à la limite de retrait W_r , l'équation devient par couche:

$$RU_{res} = 10 * \gamma_{ap} (W_j - W_r) * 10.$$

Le profil est finalement reconstruit par sommation successive, à partir de la surface jusqu'à la profondeur équivalente à n couches, des RU_{res} calculées pour chaque couche (i) de 10cm de la surface:

$$RU_{res} (n/D) = \sum_1^n h \gamma_{ap} (W_{i/D} - W_r) 10$$

avec n le nombre de couches de 10 cm (profondeur), γ_{ap} la densité apparente, h la profondeur, $W_{i,j}$ la teneur en eau mesurée à la profondeur i le jour j, W_r la limite de retrait.

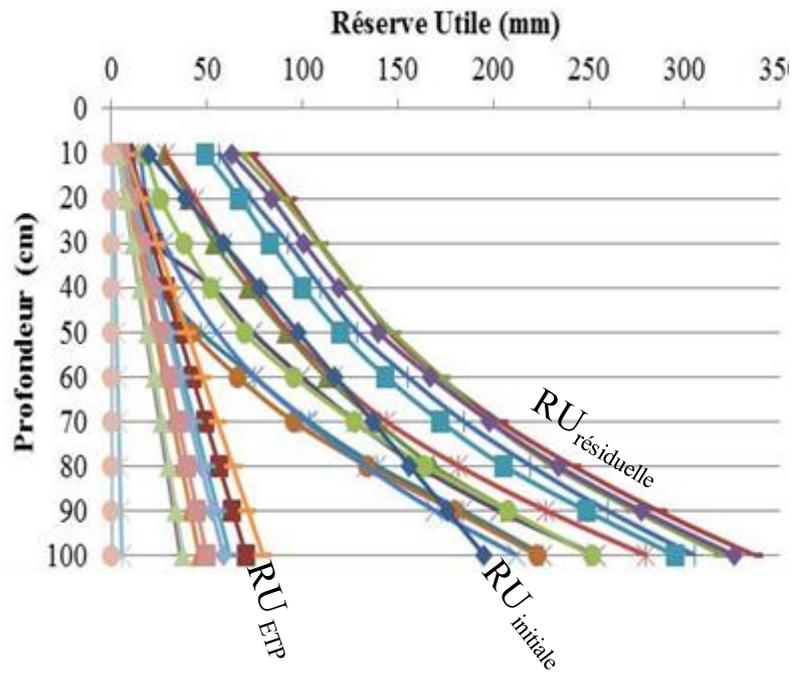


Figure 83 : Superposition des profils $RU_{initiale}$, RU_{ETP} et $RU_{résiduelle}$ du sol calculés du 11/06/2013 au 02/09/2013 dans la parcelle en prairie INRA St Laurent de la Prée.

Les profils de $RU_{résiduelle}$ calculés à partir des profils de teneurs en eau réels, traduisent les influences météorologiques (finalement de l'ETP), la remontée capillaire et l'enracinement de la plante par leurs translations horizontales et leurs formes (**Figure 83**).

3.3 Evolution des profils de teneur en eau - salinité - RU sur les 11 sites étudiés

3.3.1 Longeville : 21 / 04 / 2015 - 13 / 10 / 2015 - 19-01-2016

- Profils de teneurs en eau W%

Les 3 profils Longeville 1 (partie haute), Longeville 2 (partie basse) et Longeville 3 fonctionnent de manière similaire:

- stockage des eaux de pluies en surface 0 - 20 cm (octobre et janvier). En avril le sol est à sa limite de saturation. Il passe de l'état saturé solide à saturé plastique lorsque le stockage d'eau de surface augmente les W% à plus de 40%.

- 20 - 70 cm, niveau à l'état solide saturé très peu perméable ($27\% < W < 40\%$) en Longeville 1 et 2, les teneurs en eau y varient très peu.

- à partir de 70 cm de profondeur (Longeville 1) les teneurs en eau augmentent plus franchement vers l'état saturé plastique ($W > 40\%$). L'augmentation franche de W% en octobre doit être associée aux remontées capillaires plus importantes (remontée de nappe ?).

Si les trois profils montrent la même structure "imperméable" à 20 cm, ils montrent une évolution de Longeville 1 vers Longeville 2 et 3 qui se traduit par une remontée progressive de W_p (70-90; 60; 30 cm) et augmentation des teneurs en eau en profondeur. Cette évolution est associée à la baisse du niveau topographique et vraisemblablement à une remontée de nappe vers la surface topographique. Ce rapprochement de la surface vers la nappe accentue l'intensité des remontées capillaires (Figure 84).

- $CE_{1/5}$ et salinités de nappe

En Longeville 1 les profils de $CE_{1/5}$ évoluent peu avec les saisons. Les faibles W% et augmentations de $CE_{1/5}$ autour de 70 cm se traduisent par des augmentations de salinité sous 60 cm de profondeur. Les profils sont caractéristiques des profils généralement observés dans les marais: augmentation progressive de salinité avec la profondeur associée aux remontées capillaires issues d'une nappe salée. En Longeville 1 les salinités évoluent de 4-6 g/l de la surface jusqu'à 60 cm puis augmentent progressivement avec la profondeur: 10 g/l à 70 cm et 12-19g/l à 1m.

En Longeville 2, les deux profils de $CE_{1/5}$ mesurés en avril et octobre ne traduisent pas cette augmentation de salinité avec la profondeur mais sont nettement décalés entre les deux saisons, malgré des W% voisines. En Longeville 2, les salinités présentent un pic jusqu'à 12-15 g/l (octobre) et 15 - 25 g/l (avril) autour de 10-20 cm. A partir de 40 cm, les salinités décroissent légèrement avec la profondeur 9-7 g/l en octobre et 15-12 g/l en avril. Les fortes variations de surface sont à attribuer aux fortes variations de teneurs en eau stockée (entre W_{sat} et 170%).

En Longeville 3, les salinités sont voisines de 8-10 g/l jusqu'à 50 cm, elles augmentent ensuite autour de 15 g/L.

- Comparaison avec la géophysique

A l'échelle d'investigation en tomographie électrique, la structure retenue peut être :

- une couche superficielle 0 - 70 cm de salinité 5 - 10 g/l directement influencée par le stockage d'eau superficielle
- la partie sous-jacente directement associée à la salinité de nappe voisine de 17-19g/l.

- Profils de RU

Pour comparer les réserves utiles des sols, constitués de bri, par rapport à leur réserve initiale de 200 mm/m il faut se référer à W_p . En considérant le point de flétrissement égal à la limite de retrait $W=20\%$, les 200 mm/m correspondent à la différence $W_p - W_r$ (40%-20%). Les profils de teneur en eau montrent des niveaux de RU < 200mm/m jusqu'à 70 cm en Longeville 1, 50 cm en Longeville 2 et 30cm en Longeville 3. C'est ce qui correspond vraisemblablement à un niveau topographique plus bas pour ce site. Tous les profils de RU résiduelle sont concaves, témoins de l'effet de remontées capillaires. Leurs translations horizontales au delà de la droite RU=200mm/m est due au stockage d'eau en surface.

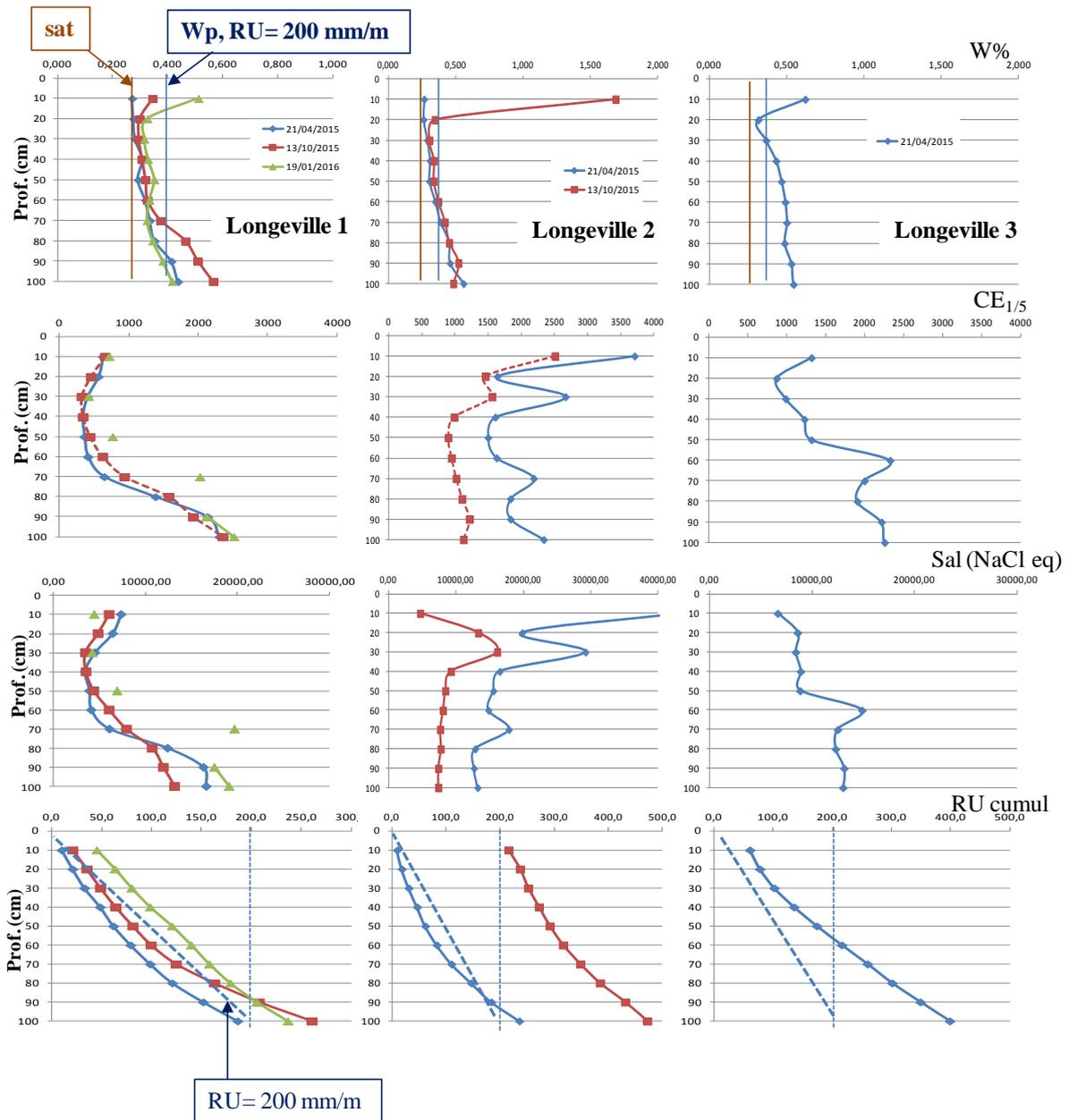


Figure 84 : Comparaisons des profils (Longeville 1 et Longeville 2) de W, salinité et RU résiduelle entre avril et octobre (21/04/2015 - 13/10/2015- 19/01/2016).

En conclusion:

Dans la partie haute, **Longeville 1**, trois niveaux caractéristiques:

	Profondeur (cm)	Etat W%	Salinité (g/l éq. NaCl)	RU (mm/10cm)	Mécanisme Hydro:W%	Mécanisme salinité
surface	0-20	Solide à liquide Wr ↔ Wl	4 - 6	0↔>20 (noyé)	Stockage eau superficiel	Faible en augmentation par ETP
intermédiaire	20 -70	Solide Wsat↔Wp ⁽¹⁾	4 - 5	7↔20	Très faibles transferts, perméabilités trop faibles	Très faible impact
profondeur	70 - 100	Plastique > Wp ⁽²⁾	8 ↔ 20	20↔>20	Remontées capillaires Issues de nappe salée	Augmentation par remontée capillaire
nappe	>1m	Bri plastique à liquide	17 - 19g/l			

Dans la partie basse, **Longeville 2**, trois niveaux caractéristiques:

	Profondeur (cm)	Etat W%	Salinité (g/l éq. NaCl)	RU (mm/10cm)	Mécanisme Hydro:W%	Mécanisme salinité
surface	0-20	Solide à liquide Wr ↔ Wl	5 ↔ 30!	0↔>20 (noyé)	Stockage eau superficiel	augmentation par ETP
intermédiaire	20 -40	Solide Wsat↔Wp ⁽¹⁾	10 ↔ 27	10 ↔ 20	faibles transferts, faibles perméabilités	ETP + Remontées capillaires
profondeur	40 - 100	Plastique > Wp ⁽²⁾	8 ↔ 15	>20	Remontées capillaires Issues de nappe salée	Remontées capillaires
nappe	>1m	Bri plastique à liquide	17 - 19g/l			

3.3.2 Luçon : 21 / 04 / 2015 - 13 / 10 / 2015 - 19/01/2016

- Profils de teneurs en eau W%

Les évolutions des profils de W, salinité et RU sont similaires aux mêmes dates à Luçon (**Figure 85**):

- stockage des eaux de pluies en surface 0 - 30 cm (octobre et janvier). En Luçon 1 et 2, le sol est à sa limite de saturation (état solide) jusqu'à 60-70 cm de profondeur. Il passe à l'état saturé plastique à partir de 80 cm - 100 cm de profondeur.

Les trois profils montrent la même structure "imperméable" d'état solide, à partir de 30 cm. Il n'y a pas d'évolution importante de Luçon 1 vers Luçon 3.

- $CE_{1/5}$ et salinités de nappe

En Luçon 1 et Luçon 2 les profils de $CE_{1/5}$ montrent l'augmentation des valeurs de la surface vers la profondeur. Cela se traduit directement sur l'augmentation des salinités avec la profondeur. En Luçon 2, point bas, le stockage d'eau en surface d'octobre, contribue à garder ces salinités de surface autour de 3- 5 g/l. L'augmentation progressive de salinité vers la profondeur (7-10 g/l à 1 m) est associée aux remontées capillaires issues de nappe salée en profondeur.

- Comparaison avec la géophysique

A Luçon, les salinités évoluent de 4-5 g/l de la surface jusqu'à 60-70 cm puis augmentent progressivement avec la profondeur: 8-10g/l à partir de 70 - 80 cm en Luçon 1 et 2 et à partir de 40-50 cm en Luçon 3.

La structure retenue peut être :

- une couche superficielle 0 - 50 cm de salinité 3-5 g/l directement influencée par le stockage d'eau superficielle
- la partie sous-jacente directement associée à la salinité de nappe voisine de 10g/l jusqu'à approximativement 2 m
- une nappe "profonde" plus salée voisine de 17g/l.

- Profils de RU

Les profils de teneur en eau montrent des niveaux de $RU < 200\text{mm/m}$ jusqu'à 100 cm en Luçon 1 et 2, et jusqu'à 70 cm en Luçon 2. La différence peut correspondre à "l'affaissement" du niveau topographique en Luçon 2.

Les profils de RU résiduelle sont toujours concaves, témoins de l'effet de remontées capillaires, et leurs translations horizontales au delà de la droite $RU=200\text{mm/m}$ est due au stockage d'eau en surface.

Luçon 1 (partie haute) montre deux profils de RU résiduelles voisines de la $RU_{200\text{ mm}}$ du bri. En partie basse du profil Luçon 2, la quantité d'eau est nettement supérieure à la $RU_{200\text{mm}}$. Le décalage par rapport à la $RU_{200\text{mm}}$ est largement accentué par le stockage d'eau en surface en octobre. Le phénomène est encore identique à celui de Longeville 2.

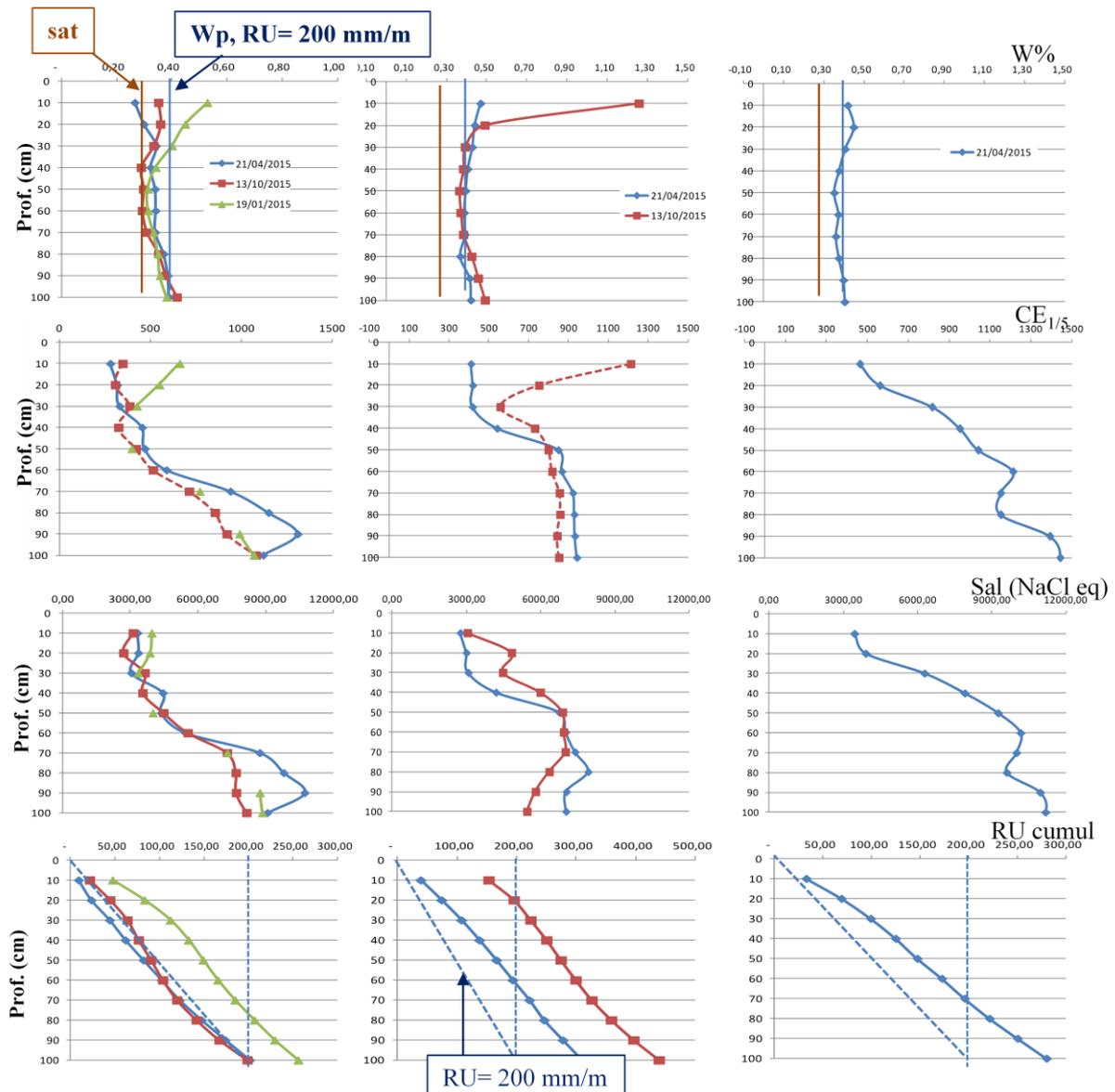


Figure 85 : Comparisons des profils (Luçon 1, Luçon 2 et Luçon 3) de W, salinité et RU résiduelle entre avril et octobre 2015 et janvier 2016 (21/04/2015, 13/10/2015, 19/01/2016)..

En conclusion:

Dans la partie haute, **Luçon 1**, trois niveaux caractéristiques:

	Profondeur (cm)	Etat W%	Salinité (g/l éq. NaCl)	RU (mm/10cm)	Mécanisme Hydro:W%	Mécanisme salinité
surface	0-20	Solide à plastique $W_r \leftrightarrow > W_p$	2 - 4	$0 \leftrightarrow > 20$	Stockage eau superficiel	Très faibles variations
intermédiaire	40 -70	Solide saturé $W_{sat} \leftrightarrow W_p^{(1)}$	3 - 7	$7 \leftrightarrow 20$	Très faibles transferts, perméabilités trop faibles	faible augmentation par remontée capillaire
profondeur	70 - 100	Solide à Plastique $W_{sat} \leftrightarrow > W_p^{(2)}$	$7 \leftrightarrow 11$	$7 \leftrightarrow > 20$	Remontées capillaires via nappe salée	Augmentation par remontée capillaire
nappe	>1m	Bri plastique à liquide	10 g/l			

Dans la partie basse, **Luçon 2**, trois niveaux caractéristiques:

	Profondeur (cm)	Etat W%	Salinité (g/l éq. NaCl)	RU (mm/10cm)	Mécanisme Hydro:W%	Mécanisme salinité
surface	0-20	plastique à liquide $W_p \leftrightarrow > W_l$	3	$20 \leftrightarrow > 20$ (noyé)	Stockage eau superficiel	Faible augmentation par ETP
intermédiaire	20 - 70	Limite plasticité $W_p^{(1)}$	$4 \leftrightarrow 7$	20	faibles transferts, faibles perméabilités	ETP + Remontées capillaires
profondeur	70 - 100	Plastique $> W_p^{(2)}$	$7 \leftrightarrow 4$	20 - 30	Remontées capillaires Issues de nappe salée	Faibles salinités par remontées capillaires
nappe	>1m	Bri plastique à liquide	17 - 19g/l			

3.3.3 Rouchères : 28 / 04 / 2015 - 13 / 10 / 2015 - 19/01/2016

- Profils de teneurs en eau W%

Les trois sites Rouchères 1, 2 et 3 présentent des profils de W qui montrent (Figure 86):

- le stockage des eaux de pluies en surface 0 - 30 cm Ce stockage de surface augmente de Rouchères 1 (Point haut) à Bouchère 3 (point bas) : 35% ed W% en 1, 60% en 2 et 260% en 3 (tourbe)

- la diminution des teneurs en eau vers 30-40 cm de profondeur. En Rouchères 2 et 3, ces teneurs en eau viennent affleurer la limite de plasticité (40%) le sol reste donc saturé plastique. En Rouchères 1 La diminution de W% passe sous la limite de saturation (27%) en avril. Le sol passe donc de l'état non saturé solide à saturé solide dans la partie 20-50 cm.

- l'augmentation des teneurs en eau en profondeur par remontées capillaires (et/ou niveau de nappe).

- CE_{1/5} et salinités de nappe

En Rouchères les profils de CE_{1/5} sont cohérents, mis à part des "artéfacts" de surface, les valeurs augmentent avec la profondeur à partir de 40cm. En Rouchères 2, les plus faibles teneurs en eau d'avril provoquent classiquement une augmentation des CE_{1/5}. Par contre en Rouchères 1, les mesures effectuées en octobre montrent des valeurs supérieures à celles d'avril sur l'ensemble du profil (pas d'explication).

Les salinités associées sont calculées en tenant compte des teneurs en eau. Pour les trois profils Rouchères 1, 2 et 3, les salinités de surfaces évoluent entre 3 et 9 g/l suivant les saisons et les teneurs en eau. A 1 m de profondeur elles évoluent entre 7 et 16 g/l. L'effet cumulé de lixiviation par les eaux de pluie et de remontée capillaire est particulièrement bien montré par les profils de janvier : augmentation progressive de 3 à 16 g/l avec la profondeur.

- Comparaison avec la géophysique

Sous les 50cm de surface où les salinités peuvent descendre à 3 g/l, deux niveaux sont identifiés. Ils correspondent à des salinités voisines de 13 g/l environ proche de la surface et voisines de 20 g/l en profondeur.

La structure du bri retenue peut être :

- une couche superficielle 0 - 50 cm de salinité 3-5 g/l directement influencée par le stockage d'eau superficielle
- la partie sous-jacente directement associée à la salinité de nappe voisine de 13-16g/l jusqu'à approximativement 2 m
- une nappe "profonde" plus salée voisine de 20g/l.

- Profils de RU

Les profils de teneur en eau montrent des niveaux de RU < 200mm/m jusqu'à 50 - 80 cm en Rouchères et à la limite de RU 200 mm/m ou supérieur tout le long des profils de Rouchères 2 et 3 (état plastique saturé). La différence peut correspondre à la position haute de Rouchères 1. Les profils de RU résiduelle sont toujours concave. L'effet de remontées capillaires est particulièrement bien marqué, et leurs translations horizontales au delà de la droite RU=200mm/m est due au stockage d'eau en surface.

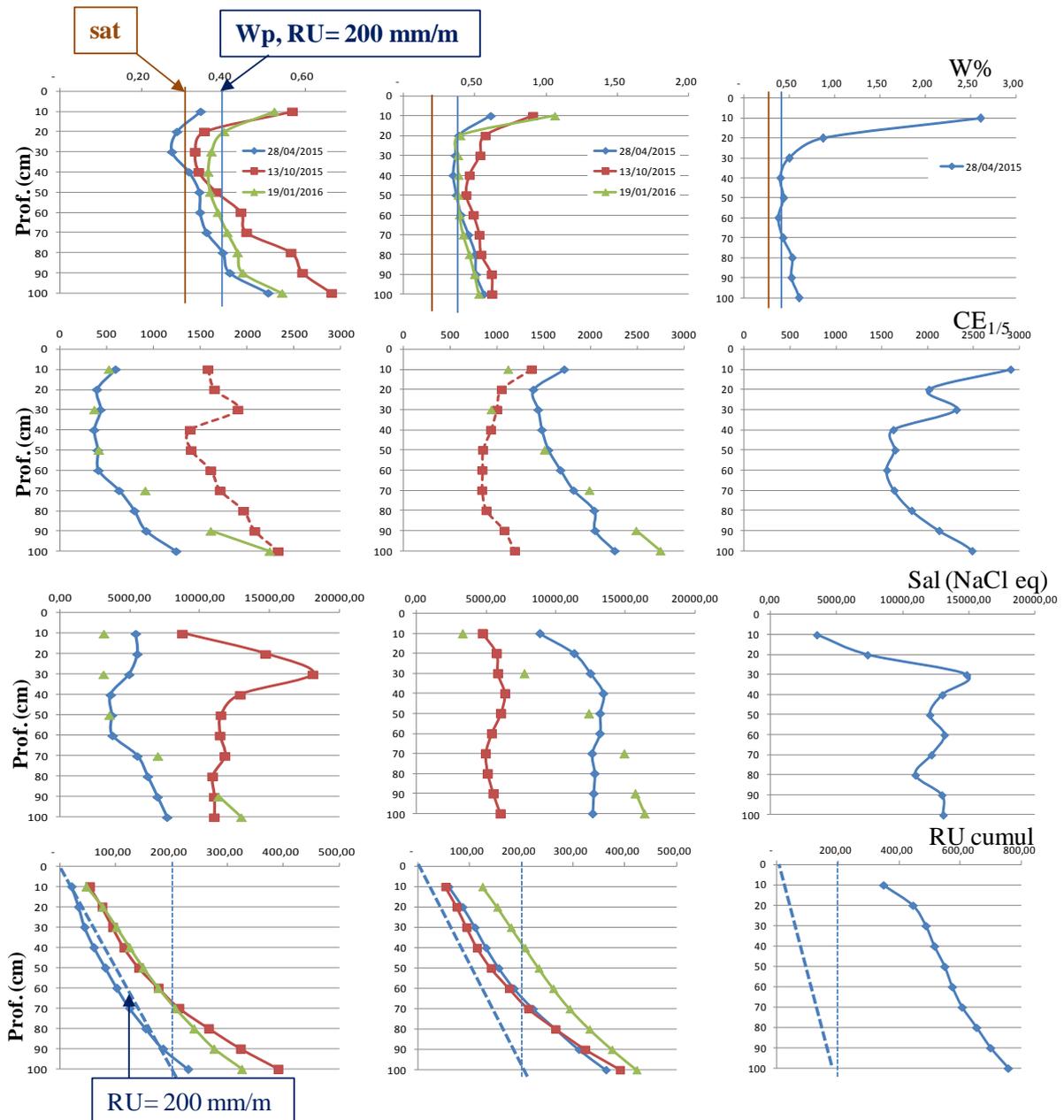


Figure 86 : Comparaisons des profils (Rouchères 1, 2 et 3) de W, salinité et RU résiduelle en avril et octobre 2015 et janvier 2016 (28/04/2015, 13/10/2015, 19/01/2016).

En conclusion:

Dans la partie haute, **Rouchères 1**, trois niveaux caractéristiques:

	Profondeur (cm)	Etat W%	Salinité (g/l éq. NaCl)	RU (mm/10cm)	Mécanisme Hydro:W%	Mécanisme salinité
surface	0-20	Solide à plastique $W_r \leftrightarrow > W_p$	3 - 7	$5 \leftrightarrow > 20$	Stockage eau superficiel	Augmentation via ETP
intermédiaire	20 -50	Solide saturé $W_{sat} \leftrightarrow W_p^{(1)}$	3 - 18	$7 \leftrightarrow 20$	faibles transferts, faibles perméabilités	forte augmentation par ETP
profondeur	50 - 100	Solide à Plastique $W_{sat} \leftrightarrow > W_p^{(2)}$	$4 \leftrightarrow 12$	$10 \leftrightarrow > 20$	Remontées capillaires via nappe salée	Augmentation par remontée capillaire
nappe	>1m	Bri plastique à liquide	13 g/l			

Dans la partie basse, **Rouchères 2**, trois niveaux caractéristiques:

	Profondeur (cm)	Etat W%	Salinité (g/l éq. NaCl)	RU (mm/10cm)	Mécanisme Hydro:W%	Mécanisme salinité
surface	0-20	plastique à liquide $W_p \leftrightarrow > W_l$	3 - 8	>20 (noyé)	Stockage eau superficiel	Faible augmentation par remontée capillaire
intermédiaire	20 - 50	plastique $\geq W_p^{(1)}$	$5 \leftrightarrow 13$	≥ 20	faibles transferts, faibles perméabilités	Augmentation par Remontées capillaires
profondeur	50 - 100	Plastique à liquide $> W_p^{(2)}$	$5 \leftrightarrow 17$	≥ 20	Remontées capillaires Issues de nappe salée	Augmentation salinités par remontées capillaires
nappe	>1m	Bri plastique à liquide	13 - 20g/l			

3.3.4 Nalliers : 21 / 04 / 2015 - 13 / 10 / 2015

- Profils de teneurs en eau W%

Les trois profils Nalliers 1, 2 et 3 sont classiques (Figure 87):

- stockage des eaux de pluies en surface 0 - 20 cm
- état saturé solide ($27\% < W < 40\%$) jusqu'à 70 - 80 cm.
- augmentation progressives des teneurs en eau en profondeur.

- $CE_{1/5}$ et salinités de nappe

Les $CE_{1/5}$ mesurées augmentent progressivement de la surface vers la profondeur (1000 à 3000 $\mu\text{S}/\text{cm}$) mais avec des "pics" localisés autour de 60-70cm, très nets (+ 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$) en Nalliers 1 et Nalliers 3 et beaucoup plus discret en Nalliers 2.

Les profils de salinités sont dictés par les valeurs de $CE_{1/5}$:

- 3-7 g/l en surface à 10-16 g/l à 1m de profondeur
- anomalies à 20 -30 g/l vers 6 - 70 cm.

- Comparaison avec la géophysique

Sous les 50cm de surface où les salinités peuvent descendre à 3 g/l, deux niveaux sont repérés: supérieur à 13 g/l environ et en profondeur 20 g/l environ.

La structure du bri retenue peut être :

- une désalinisation progressive de la surface à 2 m de profondeur jusqu'à la surface, avec une salinité d'eau évoluant entre 15 et 10 g/l jusqu'aux 3-7g/l de surface
- la partie sous-jacente directement associée à la salinité de nappe voisine de 18 g/l.

- Profils de RU

Les profils de teneur en eau montrent des niveaux de $RU < 200\text{mm}/\text{m}$ jusqu'à 80 cm (état plastique saturé). La différence peut correspondre à la position haute de Rouchères 1. Les profils de RU résiduelle sont toujours concaves avec le décalage de la ligne $RU=200\text{ mm}/\text{m}$ due au stockage d'eau en surface.

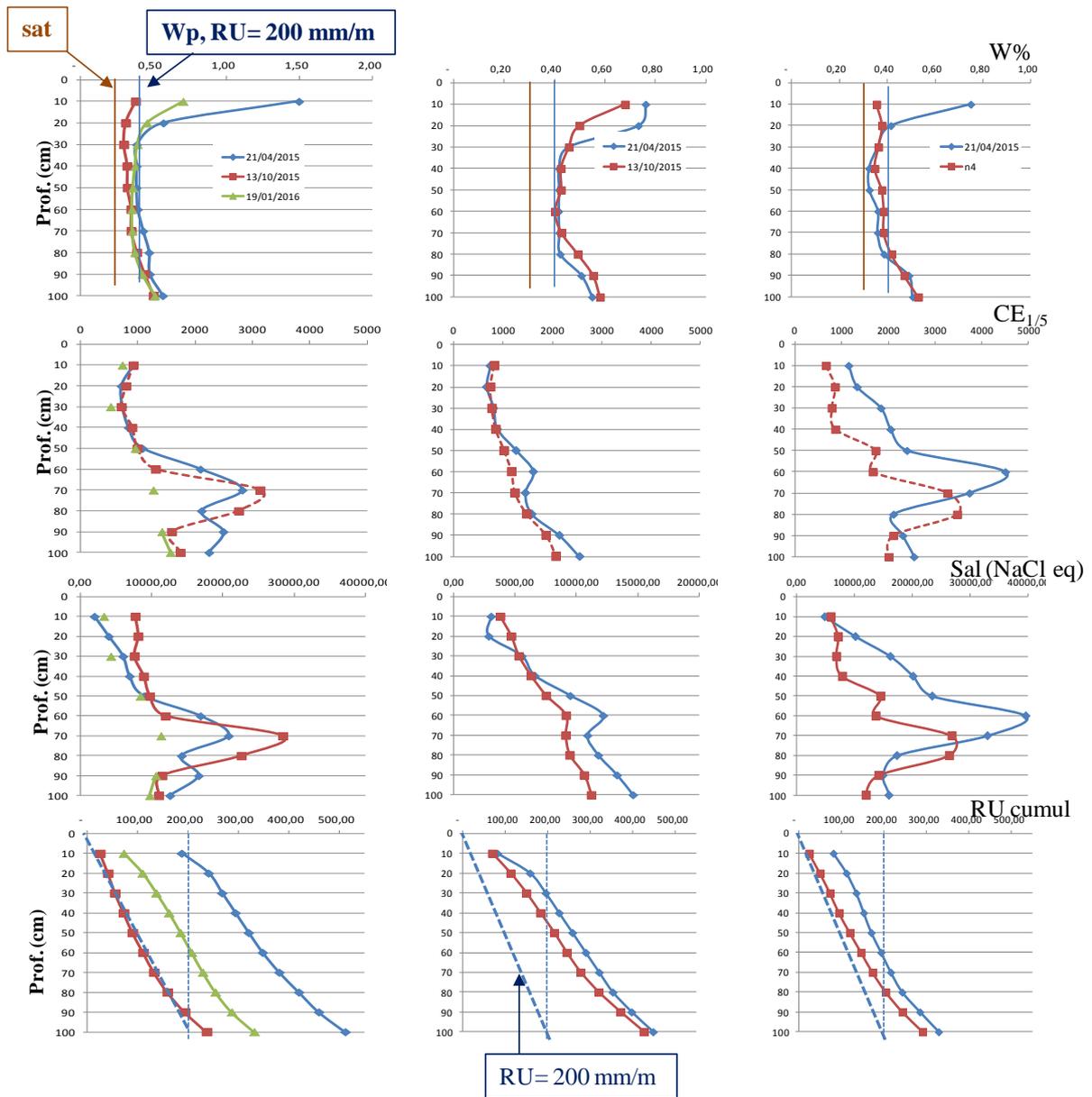


Figure 87 : Comparaisons des profils (Nalliers 1, 2 et 3) de W, salinité et RU résiduelle en avril et octobre 2015 et janvier 2016 (21/04/2015, 13/10/2015, 19/01/2016).

En conclusion:

Dans la partie haute, **Nalliers 1**, trois niveaux caractéristiques:

	Profondeur (cm)	Etat W%	Salinité (g/l éq. NaCl)	RU (mm/10cm)	Mécanisme Hydro:W%	Mécanisme salinité
surface	0-30	Solide à liquide $W_r \leftrightarrow > W_l$ (noyé)	2 - 7	$10 \leftrightarrow > 20$ (noyé)	Stockage eau superficiel	Très faible augmentation via ETP
intermédiaire	30 -60	Solide saturé $W_{sat} \leftrightarrow W_p^{(1)}$	3 - 18	$10 \leftrightarrow 20$	faibles transferts, faibles perméabilités	augmentation par remontée capillaire
profondeur	60 - 100	Solide à Plastique $\geq W_p^{(2)}$	Pic à 70-80cm 15-28	≥ 20	Remontées capillaires via nappe salée	Augmentation par remontée capillaire
nappe	>1m	Bri plastique à liquide	10-15 g/l			

Dans la partie basse, **Nalliers 2**, trois niveaux caractéristiques:

	Profondeur (cm)	Etat W%	Salinité (g/l éq. NaCl)	RU (mm/10cm)	Mécanisme Hydro:W%	Mécanisme salinité
surface	0-30	plastique à liquide $> W_p$	3 - 4	> 20	Stockage eau superficiel	Faible augmentation par remontée capillaire
intermédiaire	30 - 70	plastique $\geq W_p^{(1)}$	$5 \leftrightarrow 12$	≥ 20	faibles transferts, faibles perméabilités	Augmentation par Remontées capillaires
profondeur	70 - 100	Plastique à liquide $> W_p^{(2)}$	$7 \leftrightarrow 14$	≥ 20	Remontées capillaires Issues de nappe salée	Augmentation salinités par remontées capillaires
nappe	>1m	Bri plastique à liquide	10 - 15g/l			

3.3.5 Boissière : 28 / 04 / 2015 - 13 / 10 / 2015

- Profils de teneurs en eau W%

Les profils de teneur en eau sont toujours convexes, typiques (Figure 88):

- du stockage d'eau en surface
- de la partie intermédiaire de "faibles" teneurs en eau (structure saturée - solide)
- de l'augmentation des teneurs en eau en profondeur (structure saturée - plastique).

- $CE_{1/5}$ et salinités de nappe

Les profils d'avril et octobre montrent inhabituellement des décroissances de $CE_{1/5}$ de la surface vers la profondeur. A l'inverse le profil de janvier montre une courbe classique d'augmentation de $CE_{1/5}$ avec la profondeur.

Cela se traduit sur les profils de salinité par:

- des profils de même forme en avril et octobre, avec des "pics" de salinités supérieures (4 - 13 g/l) entre 0 et 60 cm de profondeur et une stabilisation des salinités vers 2-6 g/l à 1 m. Le profil de Boissière 3 est pratiquement stable autour de 6 g/l.

- à l'inverse le profil de janvier évolue de 4 g/l en surface à 16-19 g/l à 90-100 cm de profondeur.

- Comparaison avec la géophysique

Les sections en tomographie ne représentent le sous sol qu'à partir de 50cm sous la surface. Dans ces conditions les pics de salinité de surface ne sont pas directement représentés. Deux niveaux apparaissent dans le bri en tomographie électrique:

- la partie supérieure dans un milieu saturé en eau de salinité voisine de 9 g/l
- la partie profonde du bri saturé par des eaux de salinité voisine de 20 g/l.

La transition s'effectue autour de 3 m de profondeur. On a donc une lixiviation de surface qui affecte le sol initialement saturé par les eaux de nappe salées.

- Profils de RU

Seuls, les profils de teneur en eau d'octobre montrent des niveaux de RU < 200mm/m; jusqu'à 70 cm en Boissière 1 et 50-60 cm en Boissière 2 et 3. En Boissière 1, les profils de RU cumulée de janvier et avril sont localisés sur les profils de RU 200 mm/m jusqu'à 50-60 cm de profondeur. Sous 60 cm leur concavité s'accroît du fait des remontées capillaires. Les fortes valeurs de teneur en eau de surface décalent les autres profils.

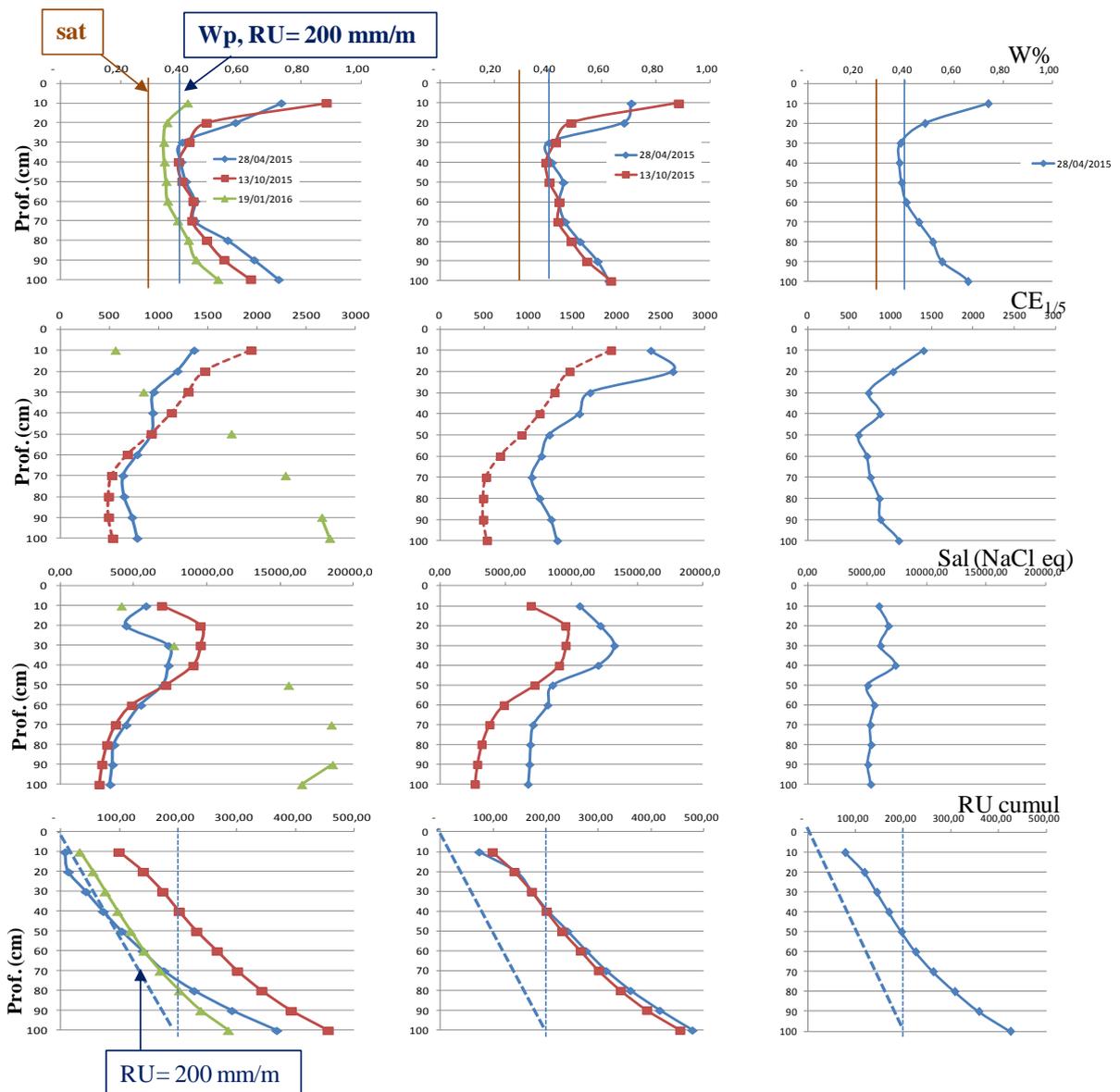


Figure 88 : Comparaisons des profils (Boissière 1 et Boissière 2) de W, salinité et RU résiduelle entre avril et octobre (28/04/2015, 13/10/2015, 19/01/2016).

En conclusion:

Dans la partie haute, **Boissière 1**, trois niveaux caractéristiques:

	Profondeur (cm)	Etat W%	Salinité (g/l éq. NaCl)	RU (mm/10cm)	Mécanisme Hydro:W%	Mécanisme salinité
surface	0-30	Solide à liquide $W_r \leftrightarrow >W_l$ (noyé)	4 -10	$10 \leftrightarrow >20$ (noyé)	Stockage eau superficiel	Très faible augmentation via ETP
intermédiaire	30 -70	Solide saturé $W_{sat} \leftrightarrow W_p^{(1)}$	3 - 10	$10 \leftrightarrow 30$	faibles transferts, faibles perméabilités	augmentation par ETP et remontée capillaire
profondeur	70 - 100	Plastique $\geq W_p^{(2)}$	3-4	≥ 20	Remontées capillaires via nappe salée	Augmentation par remontée capillaire en période sèche
nappe	>1m	Bri plastique à liquide	9-18 g/l			

Dans la partie basse, **Boissière 2**, trois niveaux caractéristiques:

	Profondeur (cm)	Etat W%	Salinité (g/l éq. NaCl)	RU (mm/10cm)	Mécanisme Hydro:W%	Mécanisme salinité
surface	0-30	plastique à liquide $>W_p$	7 - 13 Pic à 30 cm	>20 (noyé)	Stockage eau superficiel	augmentation par ETP
intermédiaire	30 - 70	plastique $\geq W_p^{(1)}$	$3 \leftrightarrow 13$	≥ 20	faibles transferts, faibles perméabilités	Augmentation par ETP (+ Remontées capillaires)
profondeur	70 - 100	Plastique à liquide $> W_p^{(2)}$	$2 \leftrightarrow 7$	≥ 20	Remontées capillaires Issues de nappe salée	variations par remontées capillaires
nappe	>1m	Bri plastique à liquide	9			

3.3.6 Poiré : 28 / 04 / 2015 - 13 / 10 / 2015

- Profils de teneurs en eau W%

Les profils de W ont toujours des formes convexes (Figure 89):

- stockage d'eau en surface
- partie intermédiaire de "faibles" teneurs en eau (structure saturée - solide)
- augmentation des teneurs en eau en profondeur (structure saturée - plastique).

- $CE_{1/5}$ et salinités de nappe

Les profils d'octobre et janvier sont voisins, pratiquement constants de la surface à 1m de profondeur. Par contre, les profils d'avril montrent des $CE_{1/5}$ plus élevées qui ne peuvent pas être associées à de faibles teneurs en eau. En conséquence les profils de salinité d'octobre et janvier s'alignent sur des valeurs comprises entre 4 et 6 g/l sur toute la profondeur d'investigation. En avril les salinités augmentent à 13 - 14 g/l en Poiré 1 et 12-8 g/l en Poiré 2.

- Comparaison avec la géophysique

La section de tomographie électrique a été effectuée en avril 2015. Sous la couche superficielle (50-70 cm), la structure verticale du bri peut être interprétée comme :

- la partie supérieure dans un milieu saturé en eau de salinité voisine de 7 g/l avec des teneurs en eau voisines de W_p . La partie aux plus fortes résistivités de surface (Poiré 1) est caractérisée à cette période par les plus faibles teneurs en eau.

- la partie sous-jacente du bri, à l'état plastique à liquide, saturée par des eaux de salinité voisine de 13 g/l.

La transition s'effectue autour de 2 m de profondeur.

- Profils de RU

Les profils de teneur en eau montrent des niveaux de RU < 200mm/m jusqu'à 80 cm (état plastique saturé). En octobre les profils de RU cumulée sont localisés sur les profils de RU 200 mm/m. Les stockages d'eau de surface les décalent légèrement en janvier et avril. Les profils d'octobre sont effectivement les plus secs.

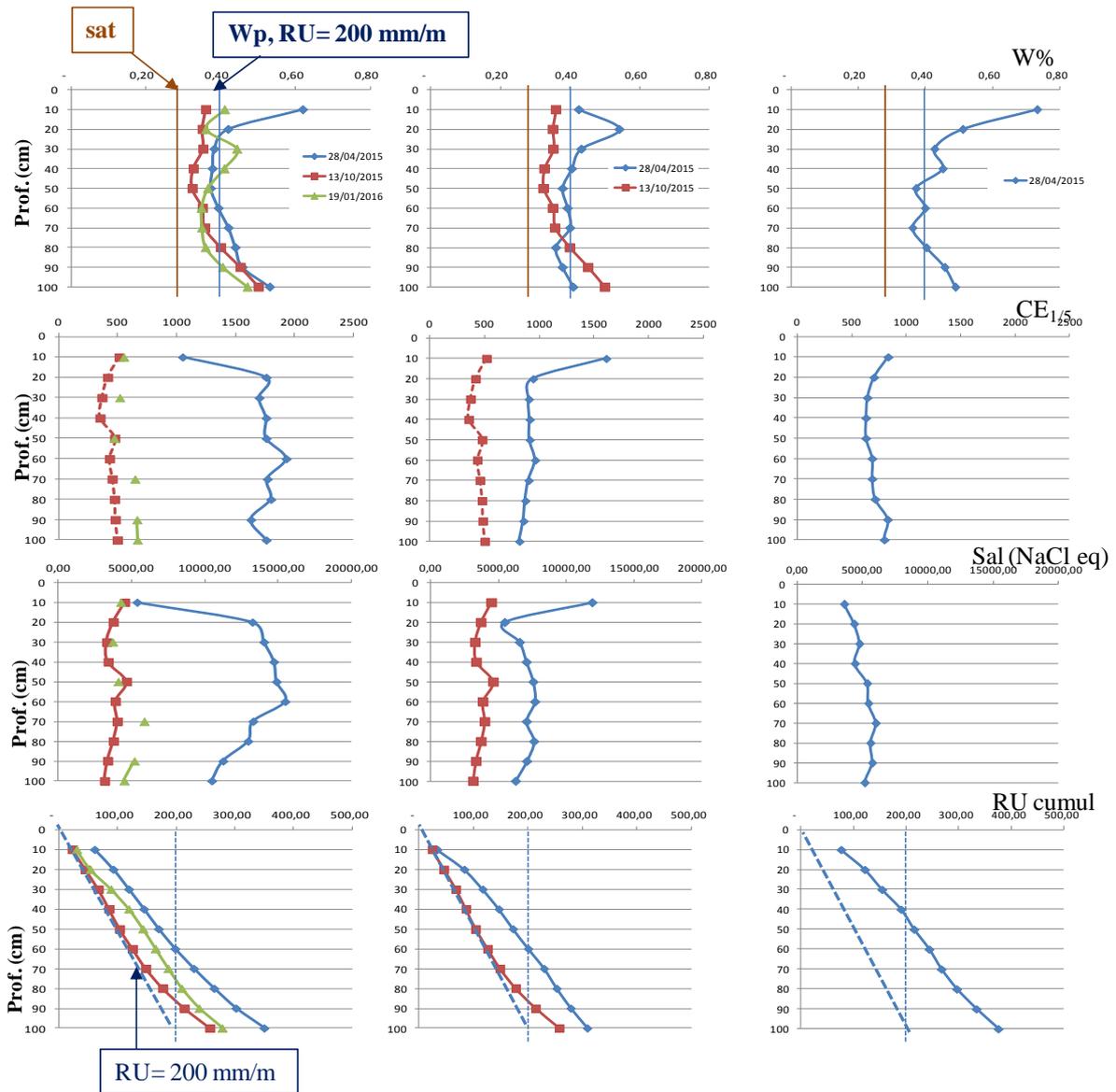


Figure 89 : Comparaison des profils (Poiré 1 et Poiré 2) de W, salinité et RU résiduelle entre avril et octobre (28/04/2015, 13/10/2015, 19/01/2016).

En conclusion:

Dans la partie haute, **Poirée 1**, trois niveaux caractéristiques:

	Profondeur (cm)	Etat W%	Salinité (g/l éq. NaCl)	RU (mm/10cm)	Mécanisme Hydro:W%	Mécanisme salinité
surface	0-20	Solide à plastique $W_{sat} \leftrightarrow >W_p$	5 - 14	$10 \leftrightarrow >20$	Stockage eau superficiel	augmentation via remontée capillaire
intermédiaire	20 -70	Solide à plastique saturé $W_{sat} \leftrightarrow W_p^{(1)}$	4 - 16	$10 \leftrightarrow >20$	faibles transferts, faibles perméabilités	augmentation par ETP (et remontée capillaire)
profondeur	70 - 100	Plastique $\geq W_p^{(2)}$	4 - 16	≥ 20	Remontées capillaires via nappe salée	variations par remontée capillaire en période sèche
nappe	>1m	Bri plastique à liquide	7-13 g/l			

Dans la partie basse, **Poirée 2**, trois niveaux caractéristiques:

	Profondeur (cm)	Etat W%	Salinité (g/l éq. NaCl)	RU (mm/10cm)	Mécanisme Hydro:W%	Mécanisme salinité
surface	0-30	Solide à plastique $W_{sat} > W_p$	5 - 13 Pic surface	10 - >20	Faible stockage eau superficiel	augmentation par ETP
intermédiaire	30 - 80	solide $W_{sat} \leftrightarrow W_p$	3 \leftrightarrow 7	10 - 20	faibles transferts, faibles perméabilités	Variations remontées capillaires)
profondeur	70 - 100	solide à plastique $\geq W_p^{(2)}$	2 \leftrightarrow 7	≥ 20	Remontées capillaires Issues de nappe relativement peu salée	variations par remontées capillaires
nappe	>1m	Bri plastique à liquide	7			

3.3.7 Sainte Christine: 29 / 05 / 2015 - 21 / 07 / 2015- 1 / 10 / 2015

- Profils de teneurs en eau W%

Sur les trois profils celui de St Christine 2 se distingue par sa partie superficielle tourbeuse avec de très fortes teneurs en eau de mai et juillet (150% à 300%; **Figure 90**). Quelles que soient les dates de mesures, les profils de St Christine 1 sont toujours largement saturés et au dessus de la limite de plasticité ($W > 40\%$). En St Christine 1 les profils de mai et juillet montrent l'aspect convexe habituel : stockage d'eau de surface, état le plus sec entre 30 et 80 cm de profondeur et effet de remontée capillaire en profondeur. En octobre la dessiccation est franche en surface avec des teneurs en eau qui augmentent avec la profondeur.

- $CE_{1/5}$ et salinités de nappe

Les profils de mai et de janvier sont voisins, pratiquement constants de la surface à 1m de profondeur. Par contre les profils d'octobre montrent des $CE_{1/5}$ plus élevées associées à la diminution des teneurs en eau. Ils traduisent l'effet de l'évapotranspiration.

- Comparaison avec la géophysique

Sous la couche superficielle (50-70 cm), la structure verticale du bri peut être interprétée comme un seul niveau saturé par une eau de salinité voisine de 3 g/l.

Le toit du substratum calcaire apparaît voisin de 3,5 - 4 m.

- Profils de RU

Les profils de teneur en eau montrent des niveaux de RU pratiquement toujours $> 200\text{mm/m}$ (état plastique saturé). Les profils de RU cumulée sont décalés des profils de RU 200 mm/m à cause des teneurs en eau de surface élevées et/ou de leurs accroissement en profondeur. Seul le profil d'octobre en St Christine 2 est superposé au profil de RU 200 m/m .

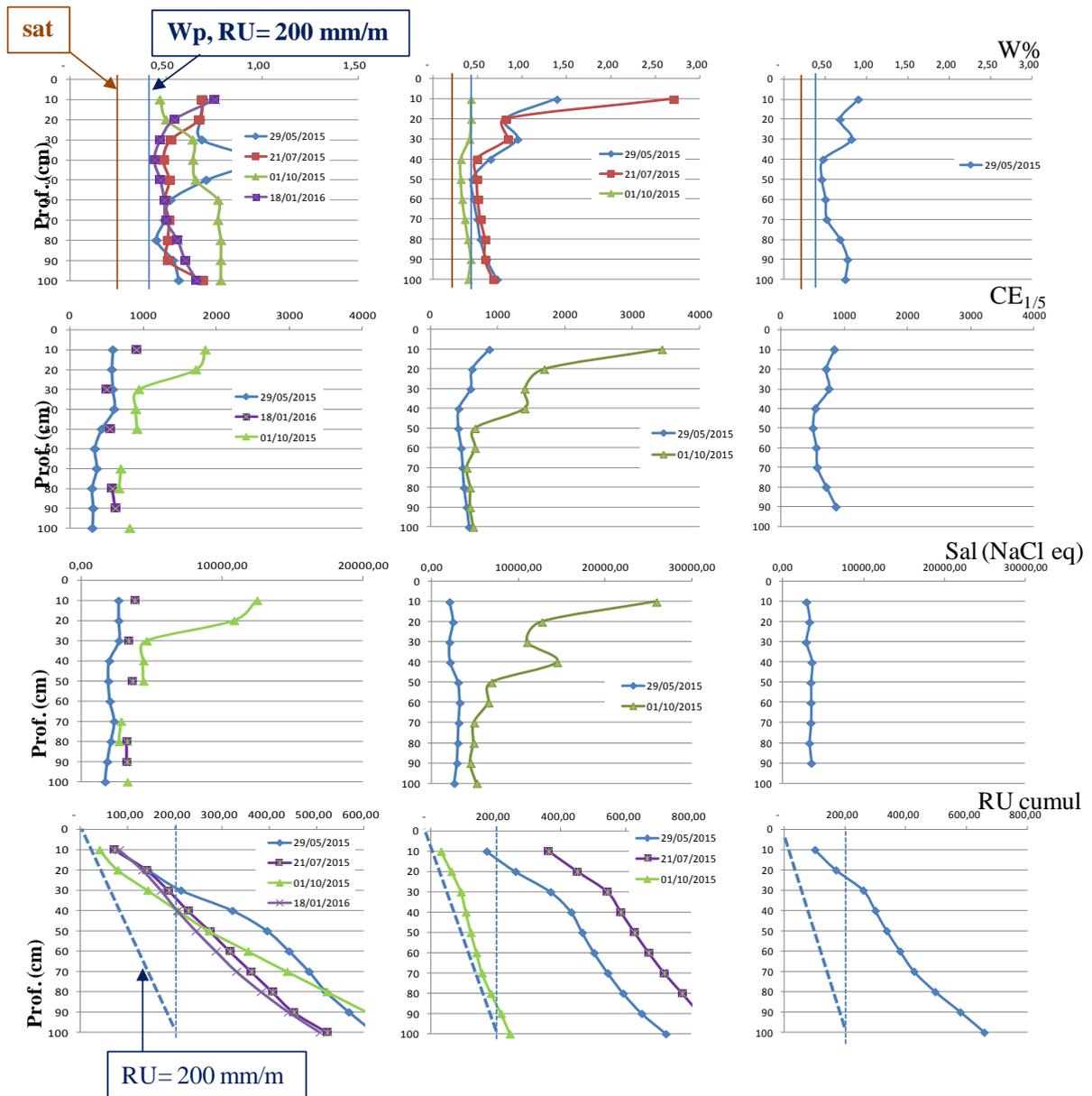


Figure 90 : Comparaison des profils (St Christine 1 et St Christine 2) de W, salinité et RU résiduelle de mai, juillet et octobre (29/05/2015, 21/07/2015, 01/10/2015, 18/01/2016).

En conclusion:

Dans la partie haute, **St Christine 1**, trois niveaux caractéristiques:

	Profondeur (cm)	Etat W%	Salinité (g/l éq. NaCl)	RU (mm/10cm)	Mécanisme Hydro:W%	Mécanisme salinité
surface	0-30	plastique à liquide $W_{sat} \leftrightarrow >W_p$	3 - 12	>20	Stockage eau superficiel	augmentation via ETP
intermédiaire	30 -60	plastique $\geq W_p^{(1)}$	2 - 5	>20	Transferts mesurables	augmentation par ETP (et remontée capillaire)
profondeur	60 - 100	Plastique $\geq W_p^{(2)}$	2 - 4	≥ 20	Remontées capillaires via nappe peu salée	Faibles variations
nappe	>1m	Bri plastique à liquide	3 g/l			

Dans la partie basse, **St Christine 2**, deux niveaux caractéristiques:

	Profondeur (cm)	Etat W%	Salinité (g/l éq. NaCl)	RU (mm/10cm)	Mécanisme Hydro:W%	Mécanisme salinité
surface	0-50	plastique $\geq W_p$	2 - 25 Pic surface	>20 à noyé	Fort stockage eau superficiel	augmentation par ETP
profondeur	50 - 100	Solide à plastique $W_{sat} \leftrightarrow >W_p$	3 \leftrightarrow 7	10 - >20	Remontées capillaires Issues de nappe peu salée	Faibles variations par remontées capillaires
nappe	>1m	Bri plastique à liquide	3			

3.3.8 Le Mazeau: 29 / 05 / 2015 - 1 / 10 / 2015

- Profils de teneurs en eau W%

Tous les profils de teneurs en eau de surface sont similaires avec des valeurs largement > 100% (Figure 91). Elles augmentent jusqu'à 400 % entre 50 et 80 cm pour les trois sites. Ce sont des profils typiques de sols tourbeux. Les teneurs en eau qui diminuent en profondeur, à partir de 1 m, peuvent traduire des niveaux plus argileux (bri).

- CE_{1/5} et salinités de nappe

Conformément aux relations habituelles W%/salinité, ces dernières sont inversement proportionnelles aux teneurs en eau. Elles évoluent entre 500 mg/l et 3 000 mg/l. Les évolutions des profils de salinité mesurées sont cohérentes avec les profils théoriques qui peuvent être calculés à partir du premier profil de CE_{1/5} par rapport aux évolutions de W%.

Les salinités sont faibles : 2-3 g/l en surface, 0,5 - 1,5 g/l à 60 cm et 1 - 3,3 à 1m.

- Comparaison avec la géophysique

Sous la couche superficielle (50-70 cm), la structure verticale du sol peut être interprétée comme un seul niveau tourbeux à argileux (en profondeur) saturé par une eau de salinité voisine de 1-2 g/l en partie supérieure et voisine de 4 g/l en profondeur. La limite ou transition entre les deux "nappes" doit être localisée vers 2 m de profondeur.

- Profils de RU

Les très fortes teneurs en eau décalent énormément les profils de RU résiduelle jusqu'à 4000 mm en profondeur. Ce sont des profils de tourbes noyées (Figure 91).

En conclusion:

Les deux profils du **Mazeau** sont très similaires, caractéristiques de milieu tourbeux avec des teneurs en eau très élevées, trois niveaux caractéristiques s'y différencient:

	Profondeur (cm)	Etat W%	Salinité (g/l éq. NaCl)	RU (mm/10cm)	Mécanisme Hydro:W%	Mécanisme salinité
surface	0-40	100 - 200%	1 -3	noyé	Tourbes à très fortes W%	augmentation via ETP
intermédiaire	40 -90	200-400%)	≤ 1	noyé	très fortes W% suivant niveau de nappe	Diminution par apport eau douce
profondeur	90 - 100	100 ↔ 400	1↔ 3 g/l	noyé	Variation de nappe eau douce	Faibles salinités
nappe	1 m	Tourbe ou bri riche en M.O.	1↔ 3 g/l			

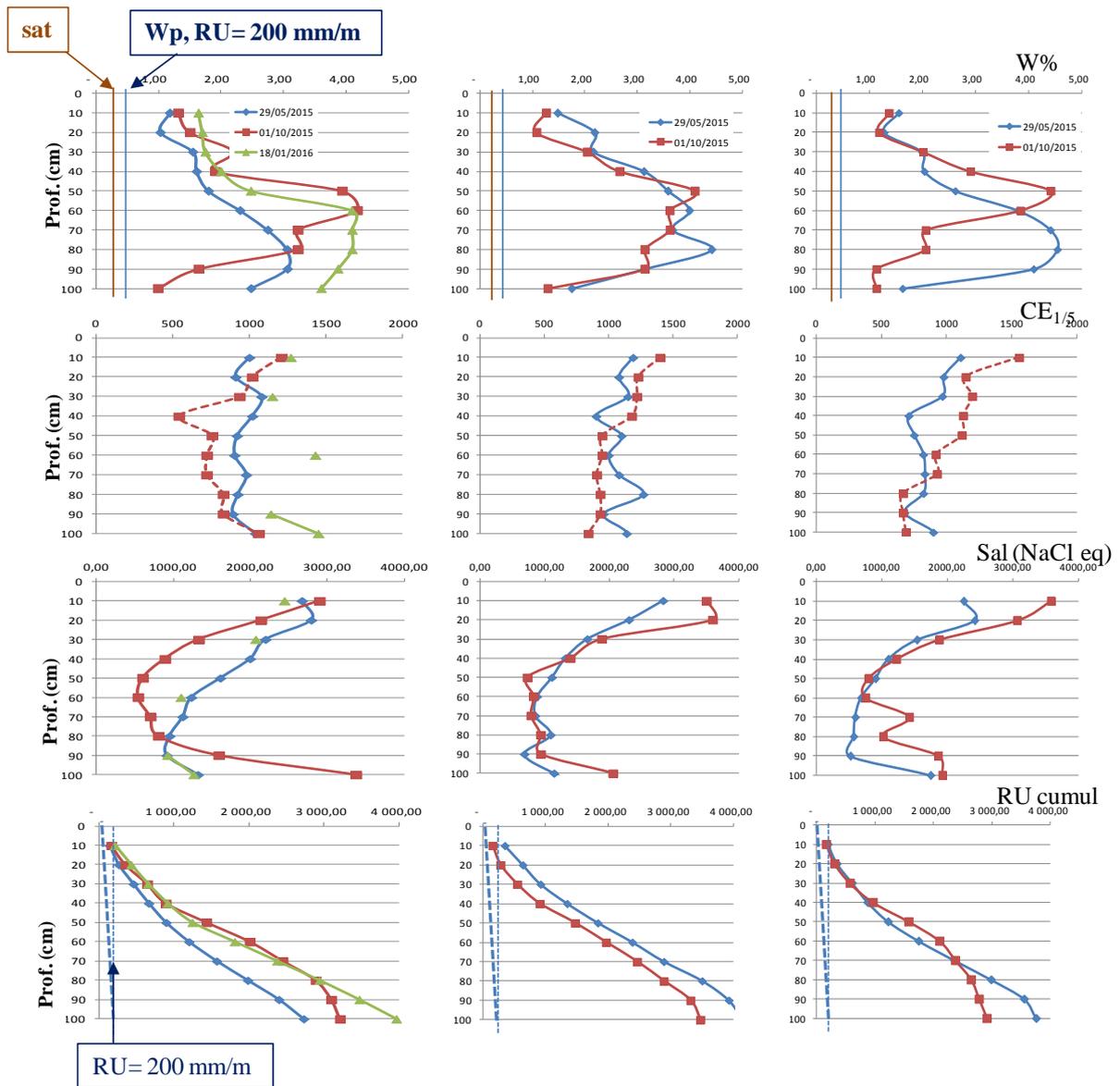


Figure 91: Comparaisons des profils (Le Mazeau 1 et Le Mazeau 2) de W, salinité et RU résiduelle de mai et octobre (29/05/2015, 01/10/2015, 18/01/2016).

3.3.9 Le Marais Sauvage, St Hillaire la Pallud: 29 / 05 / 2015 - 21 / 07 / 2015- 1 / 10 / 2015

- Profils de teneurs en eau W%

Tous les profils de teneurs en eau de surface présentent l'aspect convexe avec les fortes valeurs en surface (stockage), les valeurs les plus faibles à la limite de Wp autour de 30-60 cm, et l'augmentation progressive de W avec la profondeur, jusqu'à 50 - 70 % à 1m (Figure 92).

Le profil d'octobre est le plus sec. Il est presque tout le temps à l'état solide jusqu'à 1 m: non saturé entre 10 et 40 cm, puis saturé pour le reste du profil.

- CE_{1/5} et salinités de nappe

Elles s'accordent correctement avec les évolutions des teneurs en eau en St Hillaire 1 : les CE_{1/5} les plus élevées sont mesurées dans la zone non saturée.

En St Hillaire 2 et 3, les valeurs de CE_{1/5} sont plus fortes également en partie superficielle.

En St Hillaire 1, la dessiccation de surface d'octobre provoque un "pic" de salinité proche de la surface. Celle-ci évolue de 3 à 10-13 g/l entre 0 et 30 cm de profondeur. Par rapport aux profils de mai et janvier stabilisés vers 3g/l, ce pic observé proche de la surface est caractéristique de l'effet de l'effet d'évapotranspiration.

- Comparaison avec la géophysique

Sous la couche superficielle (50-70 cm), la section de tomographie électrique montre une structure verticale du bri en deux couches :

- une couche superficielle (état plastique à liquide) saturée par une eau de salinité voisine de 3g/l
- et une couche profonde (état liquide à plastique) saturée par une eau de salinité proche de 15g/l.

La transition entre les deux nappes de salinités différentes s'opère au voisinage de 2 m de profondeur.

- Profils de RU

Excepté le profil de St Hillaire 1 plus sec, les profils de RU résiduelle sont largement décalés du profil 200 mm/m à la fois par les stockages d'eau de surface et les remontées capillaires (Figure 92).

En conclusion:

A St Hillaire La Pallud 1, deux niveaux caractéristiques:

	Profondeur (cm)	Etat W%	Salinité (g/l éq. NaCl)	RU (mm/10cm)	Mécanisme Hydro: W%	Mécanisme salinité
surface	0-30	solide à liquide W _r ↔ >W _l	3 -13	0 ↔ >20	Stockage eau superficiel	augmentation via ETP
profondeur	30 -100	Solide à plastique saturé W _{sat} ↔ W _l	2 - 5	7 ↔ >20	Transferts mesurables	Stabilité sal. Via remontée de nappe faible sal.
nappe	>1m	Bri plastique à liquide	3 g/l			

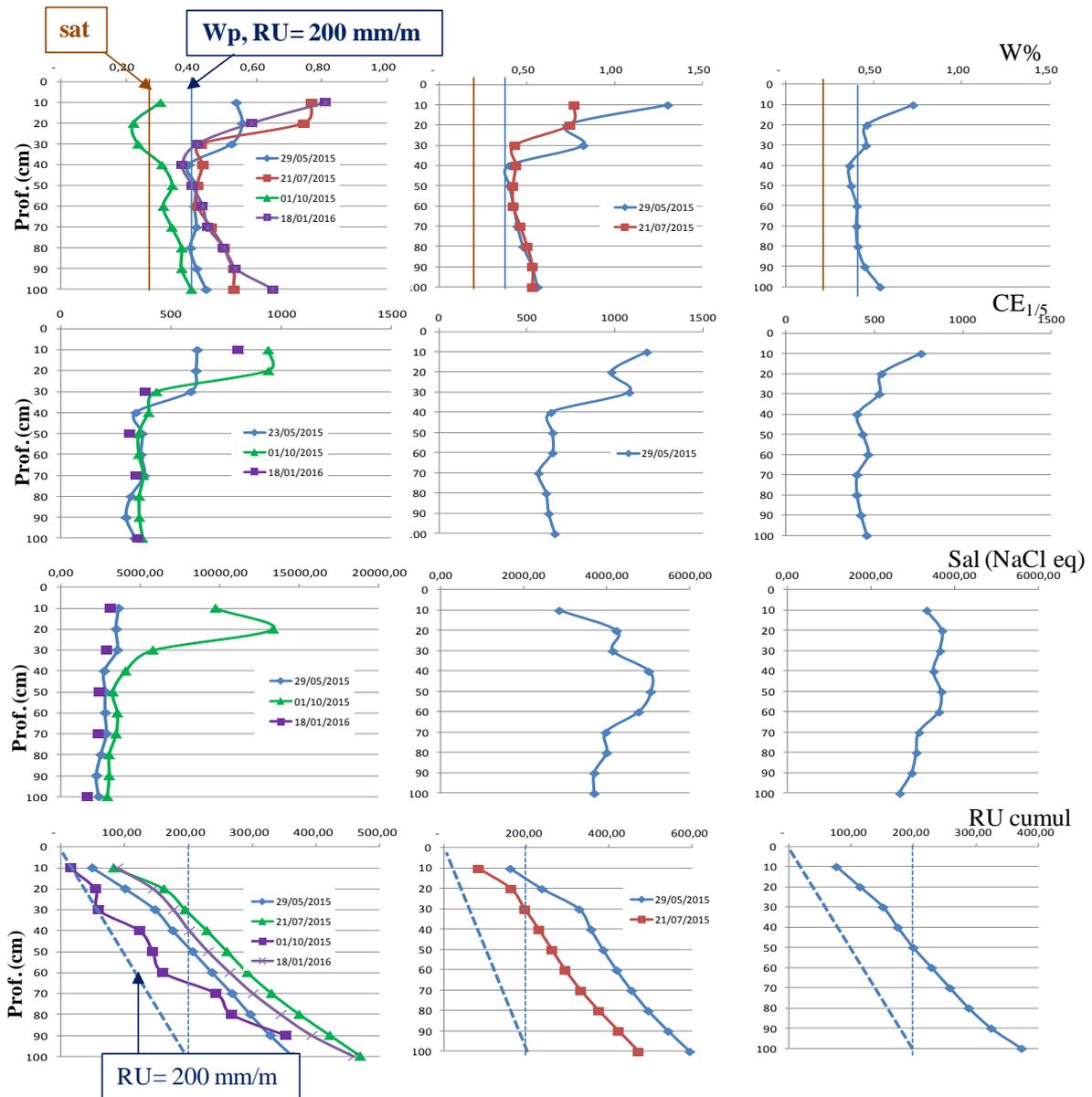


Figure 92: Comparaisons des profils (Marais Sauvage 1 et 2) de W, salinité et RU résiduelle de mai, juillet et octobre (20/05/2015, 21/07/2015, 01/10/2015, 18/01/2016).

3.3.10 La Ronde : 29 / 05 / 2015 - 21 / 07 / 2015- 1 / 10 / 2015

- Profils de teneurs en eau W%

Tous les profils de teneurs en eau oscillent autour de W_p , avec un stockage superficiel particulier au mois de janvier et un profil d'octobre particulièrement sec (comme à St Hillaire). L'aspect convexe des profils est peu marqué, témoin de remontées capillaires moins importantes (Figure 93). Les profils de mai, juillet et janvier se positionnent sur des structures à l'état solide saturées. Le profil d'octobre montre des teneurs en eau $< 27\%$ soit inférieures à la saturation. Ces dernières passent sous la limite de retrait ($W_r=20\%$) au dessus de 40 cm.

- $CE_{1/5}$ et salinités de nappe

Les profils de $CE_{1/5}$ s'accordent avec les profils de W: augmentation des $CE_{1/5}$ avec la diminution de W, avec néanmoins des augmentations de $CE_{1/5}$ en surface particulières ainsi qu'en profondeur pour le profil de janvier.

Les profils de salinités sont pratiquement verticaux autour de 3 - 4 g/l en mai. Les salinités augmentent légèrement en janvier en profondeur (5 g/l) et se décalent vers les valeurs plus élevées pour le profil "sec" d'octobre (13,5 g/l en surface à 7 g/l en profondeur).

- Comparaison avec la géophysique

La section de tomographie électrique ne montre que du bri de la surface à 9-10 m de profondeur. Néanmoins deux niveaux sont observés:

- le bri de l'état plastique à liquide en partie supérieure, saturé par des eaux de salinités voisines de 3-4 g/l
- le bri de l'état liquide à plastique en partie profondeur, saturé par des eaux de salinités voisines de 13 g/l. La transition entre les deux nappes apparaît vers 4 m de profondeur.

- Profils de RU

Les teneurs en eau voisines ou inférieures à W_p provoquent des valeurs de RU inférieures à 200 mm/m entre 30 et 100 cm de profondeur. Néanmoins les profils de RU cumulée sont décalés du profil 200 mm/m par la quantité d'eau stockée en surface.

Par contre pour le profil "sec" d'octobre La valeur de RU calculée est nulle de la surface à 40 cm de profondeur. Ces valeurs de RU nulles ou négatives provoquent l'oscillation du profil de RU cumulée autour du profil rectiligne 200 mm/m.

En conclusion:

A La Ronde, deux niveaux caractéristiques:

	Profondeur (cm)	Etat W%	Salinité (g/l éq. NaCl)	RU (mm/10cm)	Mécanisme Hydro: W%	Mécanisme salinité
surface	0-30	solide à plastique $W_r \leftrightarrow >W_l$	3 \leftrightarrow 12	0 \leftrightarrow >20	Stockage eau superficiel	augmentation via ETP
profondeur	30 -100	solide $< W_p^{(1)}$	3 - 10	7 \leftrightarrow 20	Transferts mesurables	augmentation par ETP (et remontée capillaire)
nappe	>1m	Bri plastique à liquide	3 g/l			

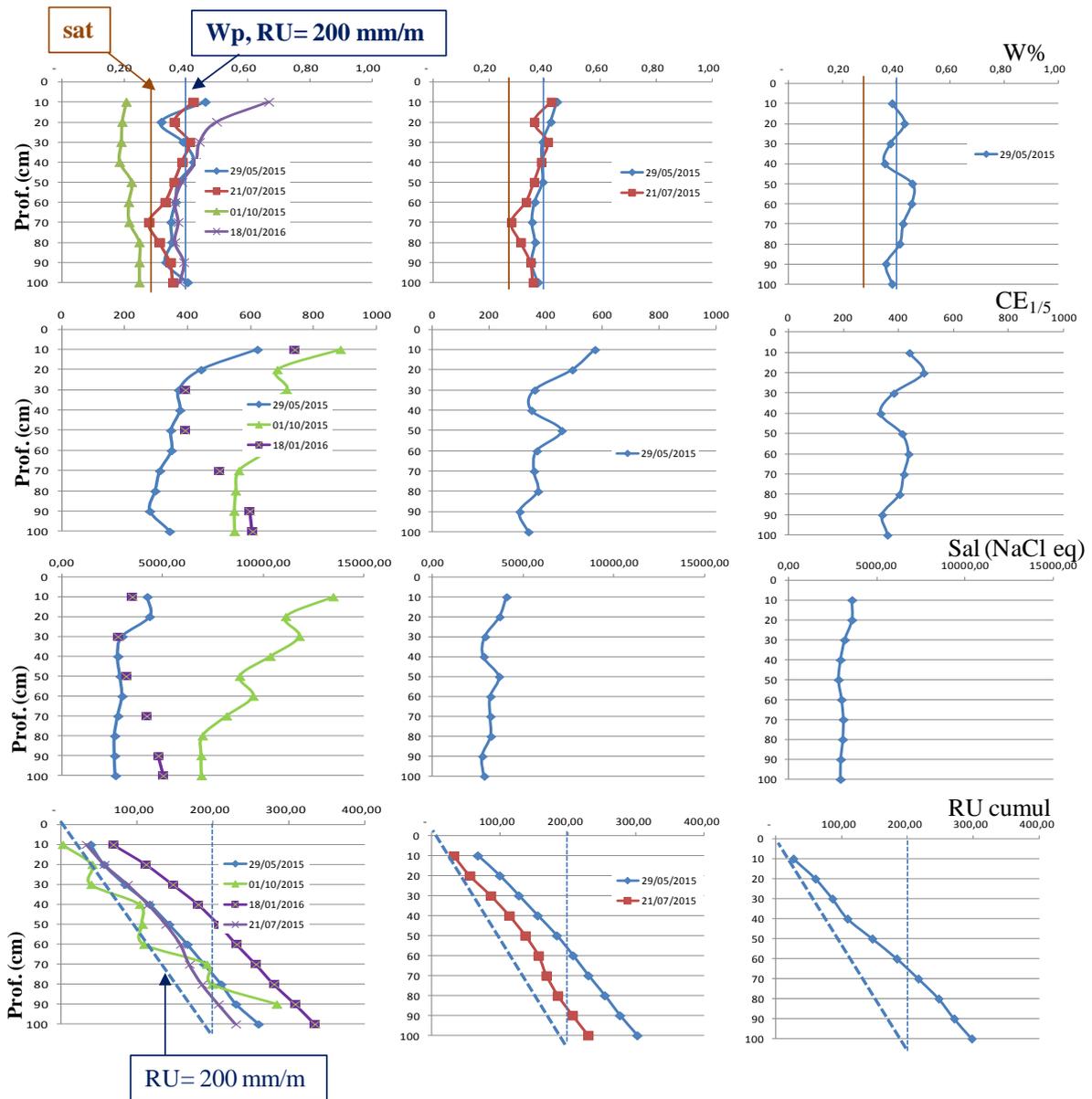


Figure 93: Comparaisons des profils (La Ronde 1 et 2) de W, salinité et RU résiduelle de mai, juillet et octobre (29/05/2015, 21/07/2015, 01/10/2015, 18/01/2016).

3.3.11 Nuaillé: 21 / 07 / 2015 - 1 / 10 / 2015

- Profils de teneurs en eau W%

En Nuaillé 1 les profils de W de juillet et janvier montrent des teneurs en eau élevées sur le mètre mesuré, supérieures à 50% (Figure 94). Le sol est à l'état plastique à liquide. En juillet et janvier, les profils montrent des valeurs extrêmes > 100% qui peuvent être attribuées à des niveaux de bri plus organique à tourbeux. En octobre, les profils sont plus secs, à la limite de la valeur de saturation. Les valeurs élevées (> 100%) de surface et à 1 m de profondeur peuvent encore caractériser des niveaux de bri organique à tourbeux.

- CE_{1/5} et salinités de nappe

Les profils de CE_{1/5} montrent une décroissance des valeurs de la surface vers la profondeur. Traduites en salinités:

- le profil le plus humide de janvier montre des salinités voisines de 2 - 4 mg/l tout le long du profil

- celui d'octobre montre l'augmentation de salinité vers la surface avec un pic voisin de 11 mg/l à 20 cm de profondeur et les valeurs minimales à 1m de profondeur (1-2 mg/l).

En Nuaillé 2, les faibles teneurs en eau localisent les salinités autour de 3-4 mg/l avec un pic à 5,4 g/l entre 20 et 30 cm de profondeur.

- Comparaison avec la géophysique

La section de tomographie électrique ne montre que du bri de la surface à 9-10 m de profondeur. En résistivité cette couche de bri semble "homogène" avec des résistivités situées entre 5 et 10 Ω.m.

Le bri peut être considéré baigné par une nappe de salinité homogène voisine de 3 g/l.

- Profils de RU

En octobre, les faibles valeurs de teneurs en eau de 20 à 90 cm de profondeur correspondent à de faibles valeurs de RU < 200 mm/m. Le profil de RU cumulée reste proche du profil RU 200 mm/m. Il n'en est décalé qu'à cause du fort stockage d'eau de surface.

En juillet et janvier les RU sont largement supérieures à 200 mm/m, Les profils de RU cumulée sont largement décalés du profil linéaire 200 mm/m.

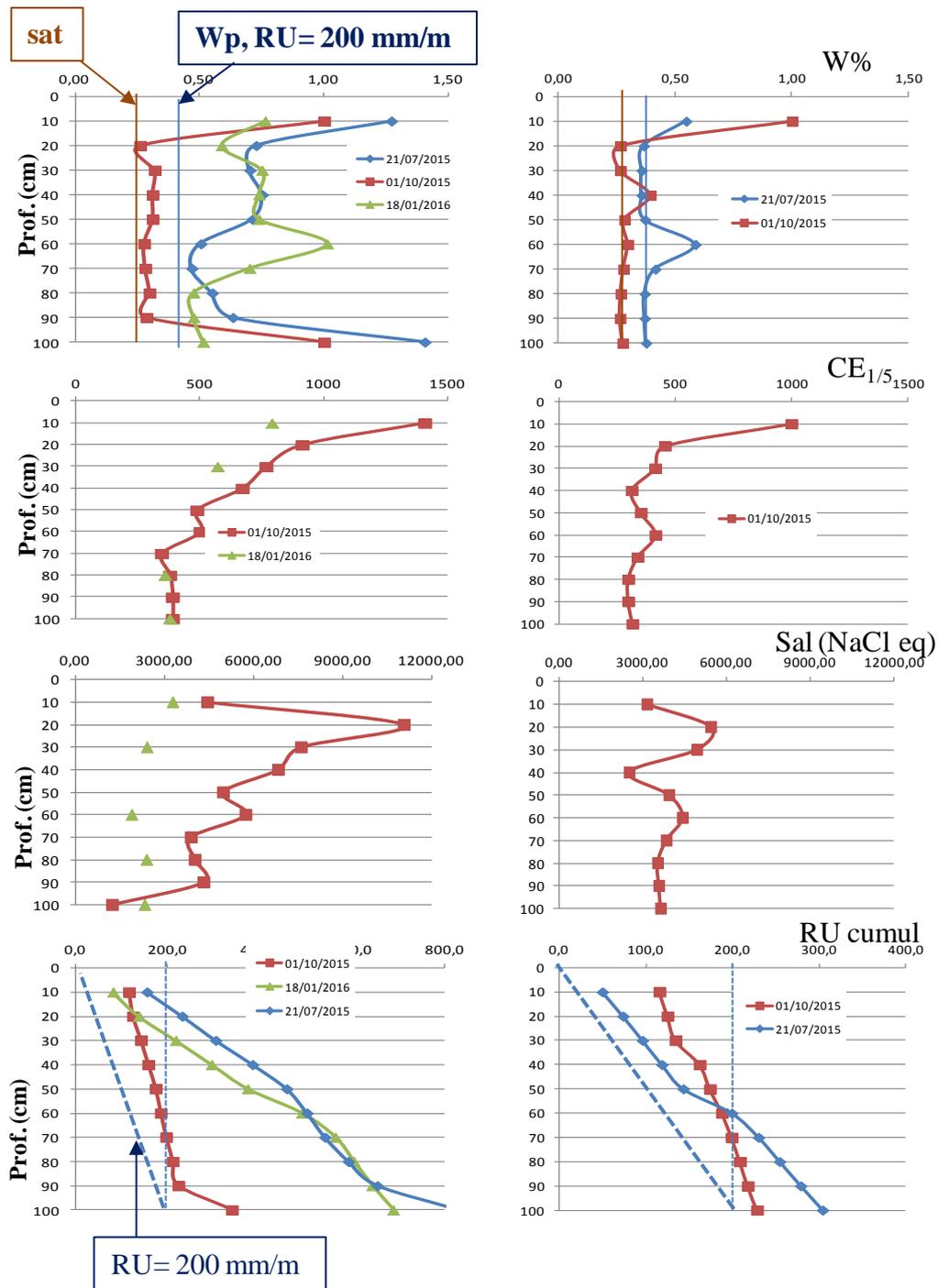


Figure 94: Comparisons des profils (Nuailé 1, 2 et 3) de W, salinité et RU résiduelle de juillet et octobre (21/07/2015, 01/10/2015, 18/01/2016).

En conclusion:

Dans la partie haute, **Nuillé 1**, trois niveaux caractéristiques:

	Profondeur (cm)	Etat W%	Salinité (g/l éq. NaCl)	RU (mm/10cm)	Mécanisme Hydro: W%	Mécanisme salinité
surface	0-20	plastique à liquide Wsat ↔ >Wp	3 - 11 Pic à 20 cm	7 ↔ >20	Stockage eau superficiel	augmentation via ETP
intermédiaire	30 -90	Solide à liquide Wsat ↔ >Wl	2 - 7 Diminution avec prof.	7 ↔ >20	Transferts mesurables	augmentation par ETP
profondeur	90 - 100	Plastique à liquide	1 -2	≥20	Entrée eau douce	Faibles variations
nappe	>1m	Bri plastique à liquide	3 g/l			

Dans la partie basse, **Nuillé 2**, deux niveaux caractéristiques:

	Profondeur (cm)	Etat W%	Salinité (g/l éq. NaCl)	RU (mm/10cm)	Mécanisme Hydro: W%	Mécanisme salinité
surface	0-20	plastique à liquide Wsat ↔ ≥Wl	3 - 5 Pic surface	7 ↔ >20 à noyé	Fort stockage eau superficiel	augmentation par ETP
profondeur	20 - 100	Solide Wsat ↔ Wp	3 ↔ 7	7 - 20	Remontées capillaires Issues de nappe peu salée	Augmentation par ETP
nappe	>1m	Bri plastique à liquide	3			

4 . Conclusion générale

A l'échelle des parcelles et de la reconnaissance en tomographie électrique, **la structure générale** est basée sur les dépôts de bri sur le substratum calcaire. De la surface jusqu'au substratum calcaire, les 11 sites présentent le même type de structure verticale associée au dessèchement du bri:

- partie superficielle à l'état solide, avec des teneurs en eau généralement comprises entre la limite de saturation ($W_{sat}=27\%$) et la limite de plasticité ($W_p=40\%$):

. le domaine non saturé n'est que rarement atteint (La Ronde, 01/10/2015).

> . St Christine présente toujours des profils à fortes teneurs en eau, à l'état plastique W_p .

. le site du Mazeau présente le profil particulier de tourbe sur une épaisseur d'environ 1m avec des teneurs en eau $> 100\%$.

- passage progressif de l'état solide à l'état plastique à liquide en s'approchant du niveau de nappe: l'augmentation des teneurs en eau est assurée par les remontées capillaires.

- consolidation progressive du bri en profondeur (passage de état liquide à l'état plastique) du fait du poids du matériau, jusqu'au contact avec les calcaires.

La particularité du bri à l'état plastique (teneur en eau voisine de 40%) est sa conductivité hydraulique extrêmement faible qui limite les transferts verticaux par écoulement. La conséquence est le stockage général des eaux de pluies en surface dans la zone superficielle 0 - 20 cm.

Par contre la faible porosité et la faible perméabilité du bri à l'état solide n'empêchent aucunement les remontées capillaires d'abord dans le domaine saturé (en profondeur) puis dans le domaine non saturé en surface. La dessiccation provoque la formation d'une porosité fine (plus petits diamètres de pores) qui induit des remontées lentes mais concernant une épaisseur de sol plus importante. Pour une porosité grossière, les remontées capillaires sont plus rapides mais concernent une épaisseur de sol moins importante. En fait excepté à La Ronde, les profils apparaissent pratiquement toujours saturés jusqu'à la surface.

A l'échelle des profils de tomographie électrique, le bri est saturé par des nappes de **salinités** élevées en partie nord du Marais Poitevin (Longeville, Luçon, Rouchères, Nalliers-Mouzeuil, Boissière et Communal du Poiré) et de salinités plus faibles en partie Est et Sud. Suivant la localisation des territoires sous le mètre supérieur de bri une ou deux nappes de salinité différentes peuvent être distinguées :

- Longeville et Nalliers, une seule nappe de forte salinité (17-18g/l)

- Luçon, Rouchères et Boissière deux nappes (9 - 13 g/l pour la nappe de surface, 17-20g/l en profondeur)

-Poiré, St Hillaire et La Ronde deux nappes de faibles à moyennes salinités (7 g/l pour la nappe de surface, 13 g/l en profondeur)

- St Christine, Le Mazeau, Nuaille "une seule" nappe de faible salinité (1 - 4 g/l).

En fait, la localisation des niveaux de nappes à proximité de la surface va gouverner à la fois les profils hydriques, de $CE_{1/5}$ et de salinité par:

- compétition entre l'éventuel lixiviation de surface par les eaux de pluies et les remontées capillaires d'eaux salées. Dans le cas des nappes fortement salées, les salinités augmentent de la

surface (20-30 cm) vers la profondeur jusqu'à atteindre un 'équilibre avec la nappe (Longeville, Luçon, Rouchères, Nalliers) . Dans le cas des nappes peu salées, C'est l'inverse qui se produit, diminution de salinité de la surface vers la nappe (Boissière, Poiré, St Christine, St Hillaire, La Ronde, Nuaillé).

- l'évapotranspiration (EVT) en période sèche peut concentrer les teneurs en sels à proximité de la surface. Cela se traduit par des pics de salinité observés en partie supérieure des profils (10 - 30 cm).

Les **horizons tourbeux** ont la particularité d'être très perméables et de stocker de grandes quantités d'eau douce (teneur en eau largement > 100%). C'est le cas du Mazeau où les teneurs en eau atteignent 400% avec les salinités les plus basses (1 g/l). De manière générale, les profils de sols débutent en surface par un horizon très organique à tourbeux qui suit le mat racinaire. Cet horizon de surface, est superposé au bri argileux à l'état plastique très peu perméable, et sert de niveau de stockage des eaux de pluies.

La **microtopographie** peut résulter des mécanismes successifs de dépôts et d'érosion qui ont sculpté la topographie générale et de tassement locaux provoqués par le passage d'engins et/ou du piétinement du bétail. Dans ces territoires à nappe superficielle qui dépasse rarement le mètre de profondeur une baisse du niveau topographique provoque les effets structuraux suivants:

- un trajet nappe - surface du sol plus court accélère les remontées capillaires
- une accroissement de la compétition entre le front de dessiccation descendant associé à l'ETP et le front ascendant de remontée capillaire
- une évolution structurale du bri avec une variation d'épaisseur de la couche à l'état solide (très peu perméable), notamment par compaction sous les chemins de passage du bétail.

Cela se traduit par (Figure 95):

- les zones partiellement submergées en période humide, noyées en surface en parties basses
- des sols saturés sur l'essentiel des territoires. La limite de saturation ne peut être conservée qu'en sommet des zones les plus élevées
- le décalage des profils de RU cumulée de la référence 200mm/m à cause des fortes teneurs en eau de surface. En fait les RU calculées par niveau (tous les dix centimètres) ne restent voisines des 200mm/m que dans la couche à l'état solide ($W_{sat} < W\% < W_p$)
- des profils de salinité généralement concaves avec deux couches de sol susceptibles d'avoir des "remontées" de salinité:
 - en profondeur par remontées capillaires
 - en partie supérieure par effet ETP.

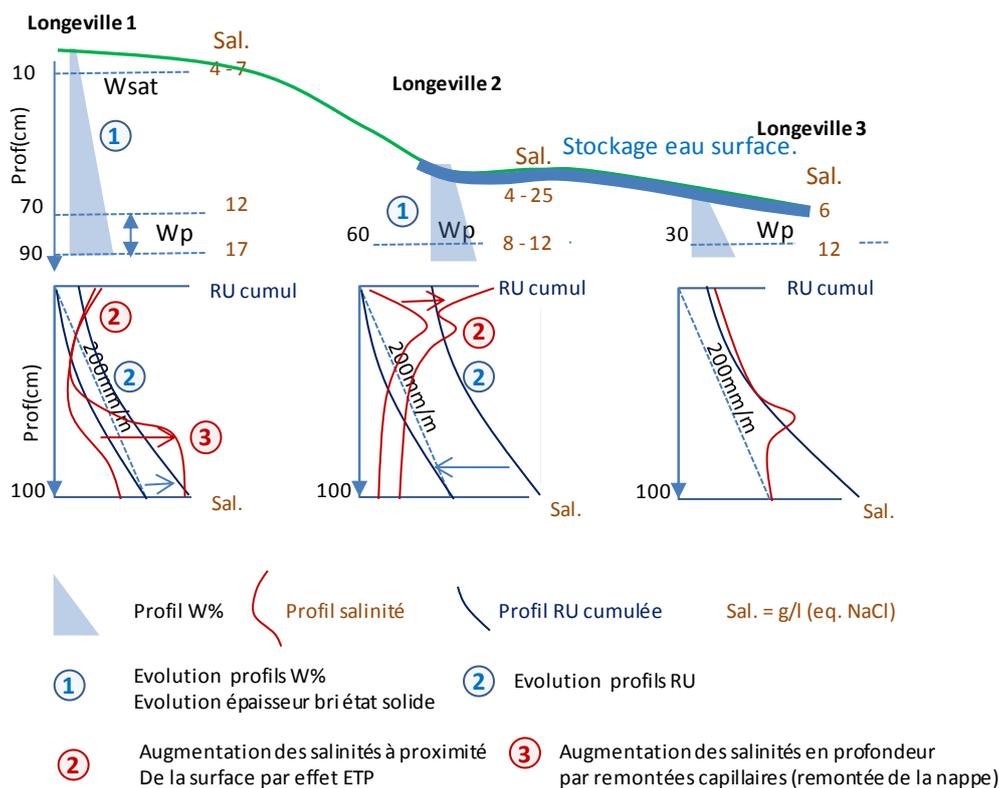


Figure 95: Représentation schématique du fonctionnement hydrique des marais en prairie localisés en périphérie du marais poitevin (exemple de Longeville).

Références bibliographiques

- Archie, G., 1942. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. American Institute of Mining and Metallurgical Engineers, 154: 1-8.
- 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-Ubertosi, M., Dudoignon, P. et 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(1): 46-54.
- Biarez, J., Fleureau, J.-M., Zerhounil, M.-I. et Soepandji, B.S., 1987. Variations de volume des sols argileux lors de cycle de drainage - humidification. Revue Française de Géotechnique, 41: 63-71.
- Brindley, G.W., Brown, G., 1980 Crystal structures of clay minerals and their X-ray identification.

Mineralogical Society. 495 p.

- Cassan, M., 1988. Les essais in situ en mécanique des sols - réalisation et interprétation. Eyrolles, pp. 146-151.
- Chapellier, D., 2001. Prospection électrique de surface - Université de Lausanne.
- Ducloux, J., 1989. Notice explicative de la carte pédologique de France à 1/100000ème - Fontenay le Conte - 169p.
- Ducloux, J. et Nijs, R., 1972. Contribution à l'étude géologique et géomorphologique du Marais Poitevin. Bulletin de la Société Belge de Géologie, Paléontologie et Hydrogéologie, 81(3-4): 227-249.
- Dudoignon, P., Pantet, A., Carrara, L. et Velde, B., 2001. Macro-micro measurement of particle arrangement in sheared kaolinitic matrices. Geotechnique, 51(6): 493-499.
- Dudoignon, P. Gélard, D. et Sammartino, S., 2004. Cam-clay and hydraulic conductivity diagram relations in consolidated and sheared clay-matrices, 39 (3): 267-269
- Dudoignon, P., M. Bernard-Ubertosi, et J.M. Hillaireau. 2009. Grasslands and coastal marshes management: role of soil structure. In grasslands, Ecology, management and restore. Nova Science Publishers (NY) Hans G. Schröder Ed.
- Dupuis, J., 1968. Etude générale des sols, Etude pédologique du Marais Poitevin, pp. 206.
- Dupuis, J., 1969. Le climat et l'économie de l'eau dans les sols de marais mouillé, Etude pédologique du Marais poitevin, pp. 144.
- Gallier, J. 2011. Characterization of structural evolution process and salinity of coastal marsh soil by in situ mechanical measurements and geo-electrical investigations (In French). PhD thesis, University of Poitiers, 218 p.
- Gallier, J., P. Dudoignon, et J.M. Hillaireau. 2012. Microstructure – Hydromechanical Property Relationship in Clay Dominant Soils. In An Introduction to the study of mineralogy INTECH open access publisher, Cumbur Aydinalp ed.: 51-72.
- Giesel W., Renger M., et Strebel O., 1972. Berechnung des kapillaren Aufstiegs aus dem Grundwasser in den Wurzelraum unter stationären Bedingungen. Z. Pflanzenernähr Bokenk. 132 (1), 17-30 in Schmidhater et Oertli, 1989
- Hansbo S., 1975. Consolidation of clay with special reference to the use of geodrains. Geotechnical

report from Terrafigo

Jamagne M., 2011 Grand paysages pédologiques de France, Synthèses, Quae ed., 535 pages

Michot, D., 2003. Intérêt de la géophysique de subsurface et de la télédétection multispectrale pour la cartographie des sols et le suivi de leur fonctionnement hydrique à l'échelle intra-parcellaire. Thèse de doctorat. Université de Paris VI, 349 pp.

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.

Paticat F., 2007. Flux et usages de l'eau de mer dans les marais salés endigués charentais : Cas du marais salé endigué de l'île de Ré. Thèse doctorat, Université de Nantes, 387 pages

Pons, Y., 1997. Comportements physiques et aptitudes à la mise en culture des sols de Marais de l'Ouest., Institut National Agronomique Paris, 130 pp.

Pons, Y. et Gerbaud, A., 2005. Classification agronomique des sols de marais à partir de la relation entre sodicité et stabilité structurale. Application au cas des marais de l'Ouest. *Etude et Gestion des Sols.*, 12(3): 229-244.

Radimy, R.T., P. Dudoignon, J.M. Hillaireau, et E. Deboute. 2013. Polder Effects on Sediment-to-Soil Conversion: Water Table, Residual Available Water Capacity, and Salt Stress Interdependence. *The Scientific World Journal*, Volume 2013, Article ID 451710, 20p. <http://dx.doi.org/10.1155/2013/451710>.

Radimy, R.T., P. Dudoignon, J.M. Hillaireau, et L. Caner. 2014. Evapotranspiration—Soil Structure relationship in West Marshes of France. *Journal of Water Resource and Protection*, 6: 821-840. <http://dx.doi.org/10.4236/jwarp.2014.69078>

Radimy, 2015 Cinétique d'évolution structurale des sols argileux : relation stress hydrique - stress salin; Application à la biodiversité et rendement de culture. Thèse Univ. Poitiers 2015, 350 P.

Righi D., Velde B., et Meunier A., 1995 Clay stability in clay-dominated soil systems. *Clay Minerals*, 30 (1) : 45-54

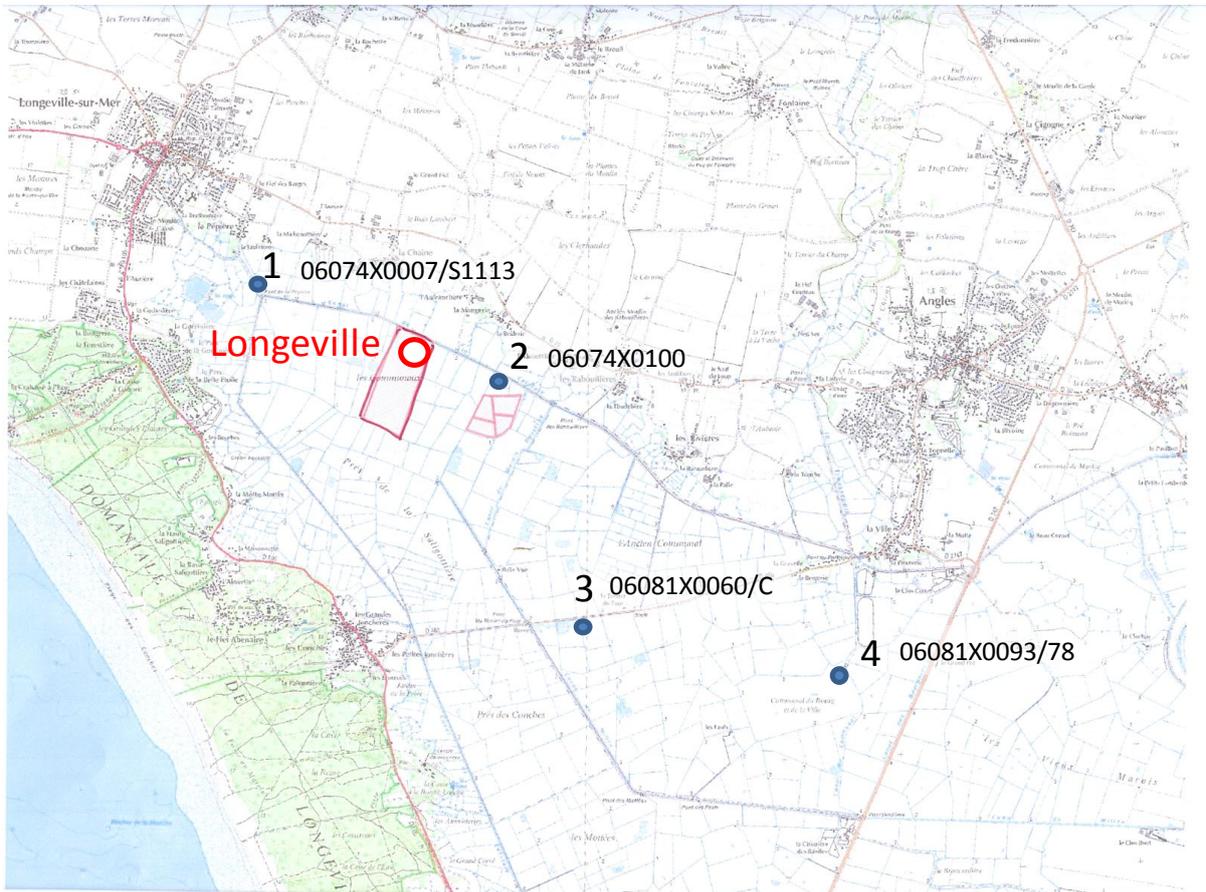
Samouélian, A., Richard, G., Cousin, I., Guérin, R., Bruand, A. et Tabbagh, A. 2004. Three-dimensional crack monitoring by electrical resistivity measurement. *European Journal of Soil Science*, 55(4): 751-762.

Samouélian, A., Cousin, I., Tabbagh, A., Bruand, A. et Richard, G., 2005. Electrical resistivity survey

- in soil science: A review. *Soil and Tillage Research*, 83(2): 173-193.
- Schmidhalter U., et Oertli J.J. 1989. Remontée capillaire de l'eau souterraine. *Revue suisse Agri.* 21 (6) 337-342.
- Terzaghi K., et Peck R.B. 1967 *Soil Mechanics in Engineering Practice*, Second Edition. John Wiley & Sons, New York, 729 p.
- Tessier, D., 1984. Etude expérimentale de l'organisation des matériaux argileux. Hydratation, gonflement et structuration au cours de la dessiccation et de la réhumectation. Thèse de doctorat. Université de Paris VII, 361 pp.
- Tessier, D. et Pedro, G., 1984. L'organisation et le comportement des sols., Association Française d'Etude des Sols, pp. 223-234.
- Veger F., 1960: Observations sur les sols du Marais poitevin occidental. *Bulletin de l'Association de géographes français*. Vol. 37. N° 290, pp. 87-96
- Verger F., 1994: Un microrelief provoqué par l'alternance dessiccation/humidification : les gilgais. *sécheresse*, vol.5, n°3, p. 211-217.
- Waxman, M.H. and Smits, L.J.M., 1968. Electrical conductivities in oil-bearing shaly sands. *Journal of the Society of Petroleum Engineering*, 8: 107-102.
- Zhou, S., 1997. Caractérisation des sols de surface à l'aide du pénétromètre dynamique léger à énergie variable type "PANDA". Thèse de doctorat. Université Blaise Pascal, Clermont Ferrand.

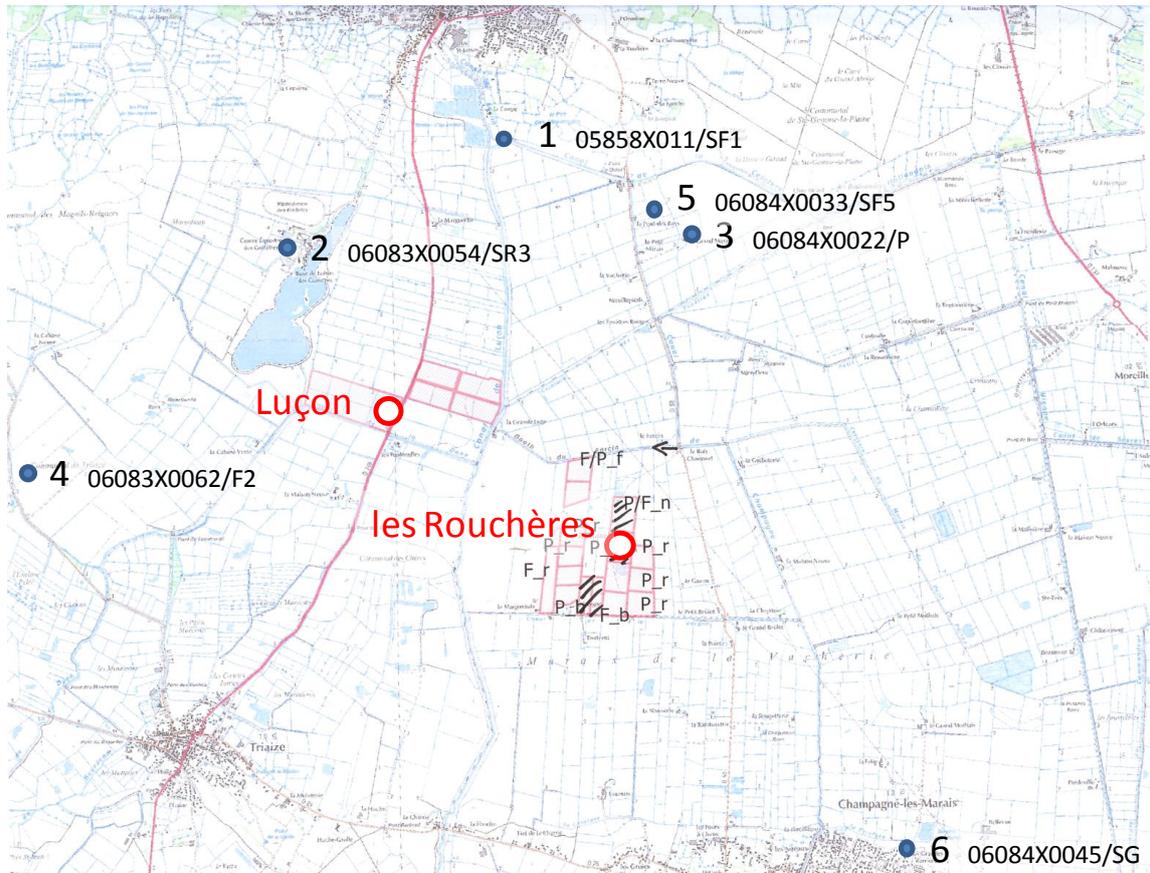
ANNEXE 1: Localisations - "Épaisseur de bri - toit du Dogger".

Longeville (station 01)



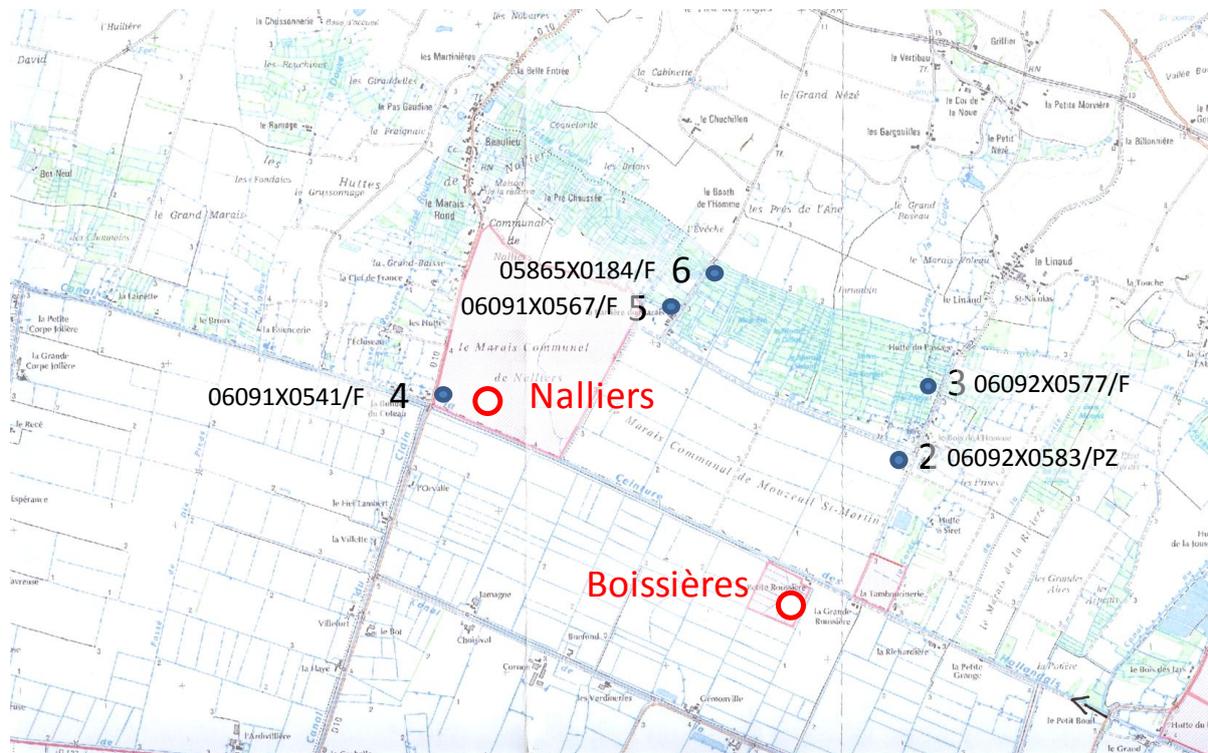
	Longeville	BSS 1	BSS 2	BSS 3	BSS 4
	géophysique	Forage	Forage	Forage	Forage
Interface Bri/ Dogger	≈ 6-9 m	4 m	3,5 m	>3 m	13-15 m

Luçon (station 02) – Bouchères (station 03)



	Luçon géophysique	Rouchères géophysique	BSS 1 Forage	BSS 2 Forage	BSS 3 Forage	BSS 4 Forage	BSS 5 Forage	BSS 6 Forage
Interface Bri/Dogger	≈ 8,5 m	≈ 8,5 m	8 m	8,5 m	6 m	16 m	1,5 m	6 m

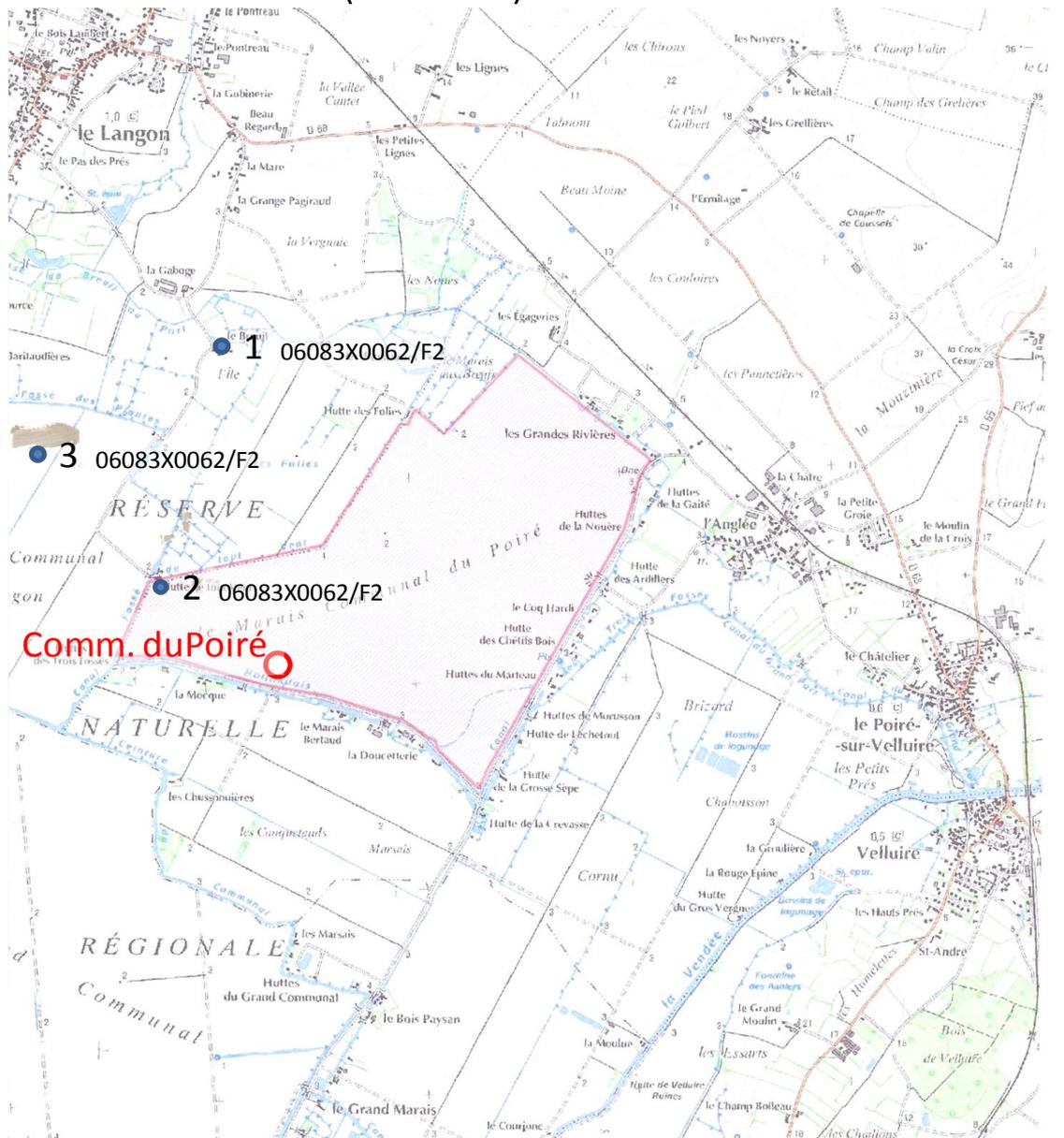
Nalliers - Mouzeuil (station 04)- Boissières (station 05)



Nalliers **Boissières** **BSS 2** **BSS 3** **BSS 4** **BSS 5** **BSS 6**
 géophysique géophysique Forage Forage Forage Forage Forage

Interface Bri/Dogger ≈ 9 m ≈ 8,5 - 9 m 6 m 10 m 12 m 9 m 6,5 m

Communal du Poiré (station 06)



**Comm. Du
Poiré
géophysique**

**BSS 1
Forage**

**BSS 2
Forage**

**BSS 3
Forage**

**Interface
Bri/
Dogger**

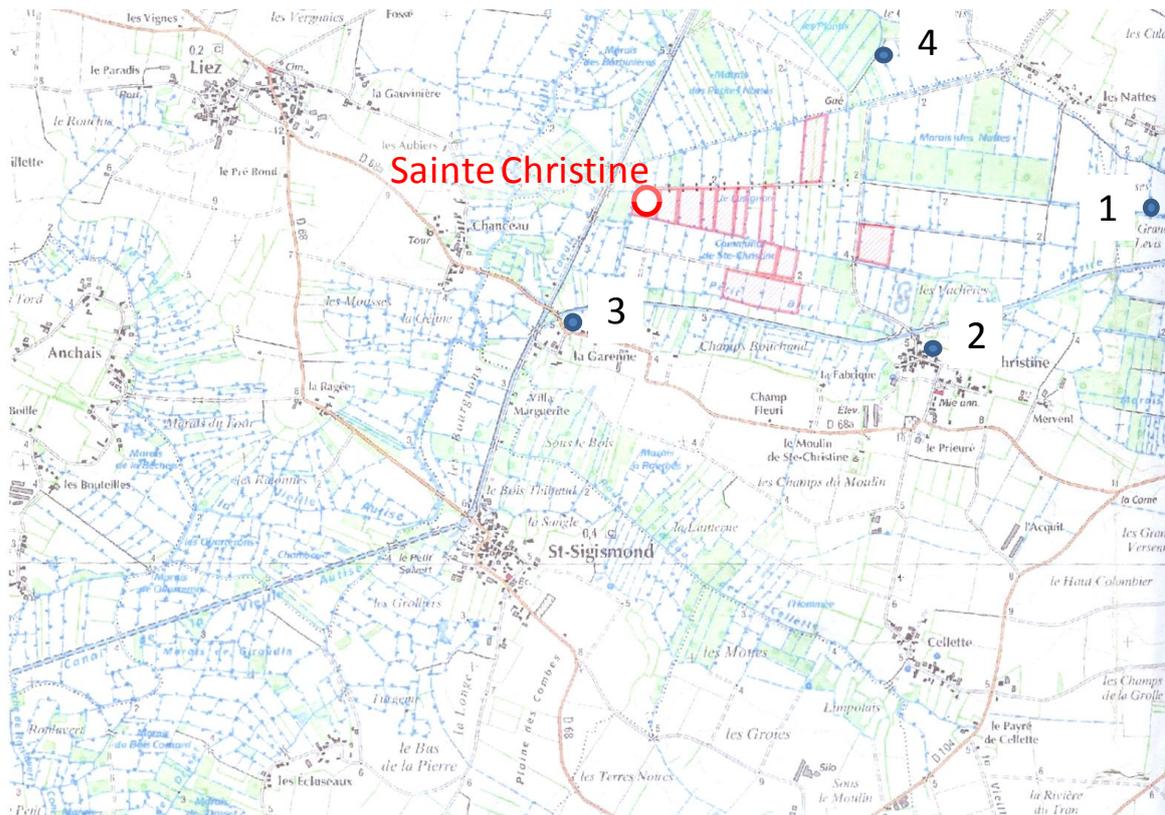
≈ 8 m

**0 m
Calcaire
en
surface**

12 m

8,5 m

Sainte Christine (station 07)



Sainte Christine
géophysique

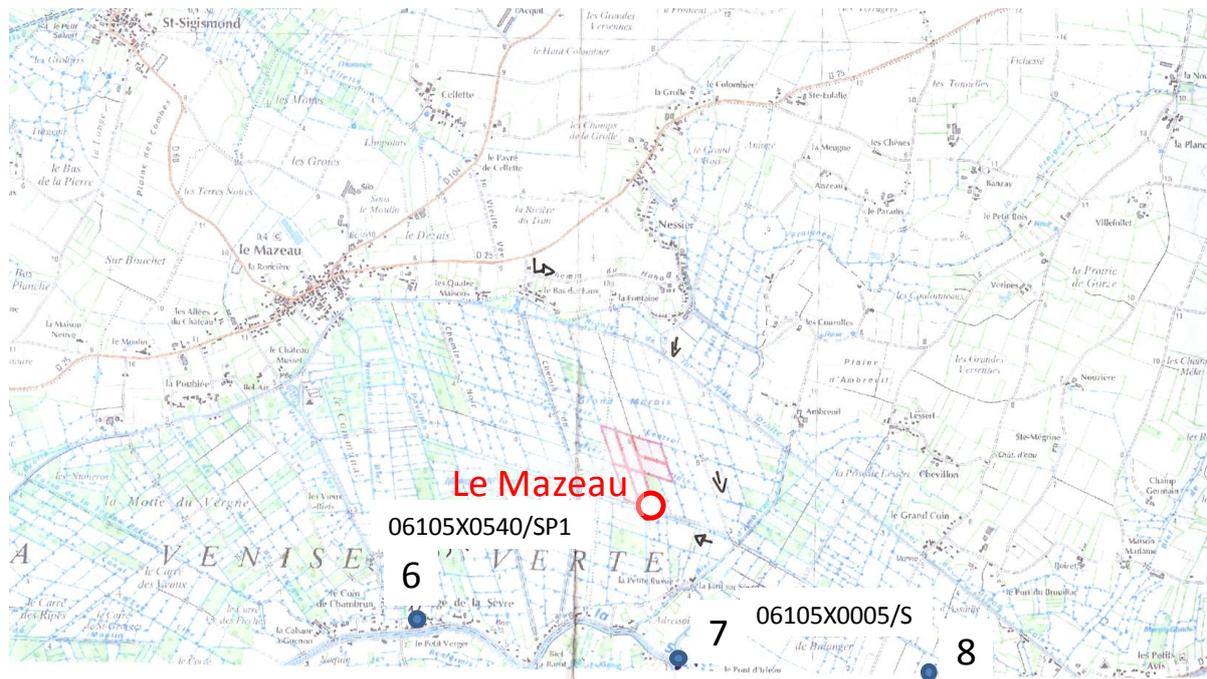
BSS1, 2, 3 et 4
uniquement puits

Interface
Bri/ Dogger

≈ 2-3 m

Non mesuré

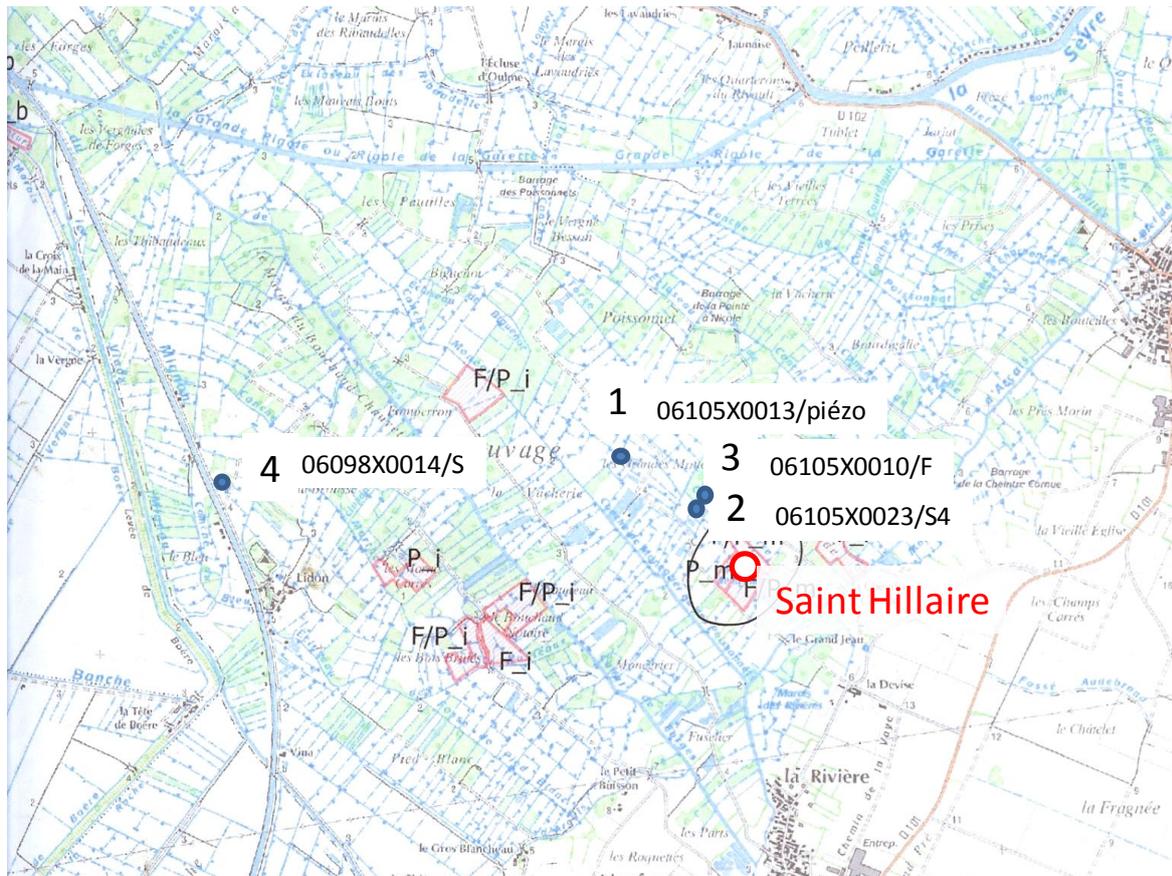
Le Mazeau (station 08)



Le Mazeau	BSS 6	BSS 7	BSS 8
géophysique	Forage	Forage	Forage

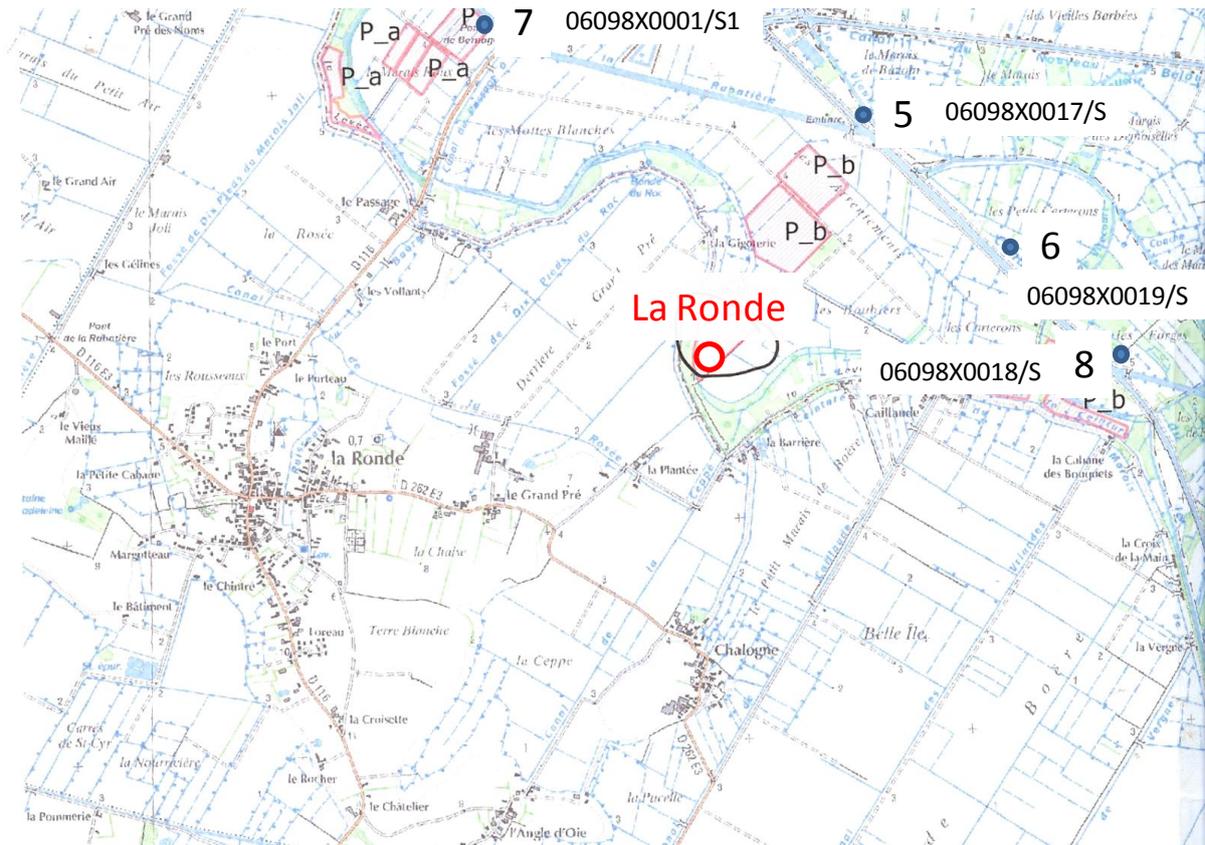
Interface	≈ 5 m	12 m	2,5 m	9 m de
Bri/	tourbe/bri		bri/tourbe	tourbe
Dogger				

Saint Hillaire (station 09)



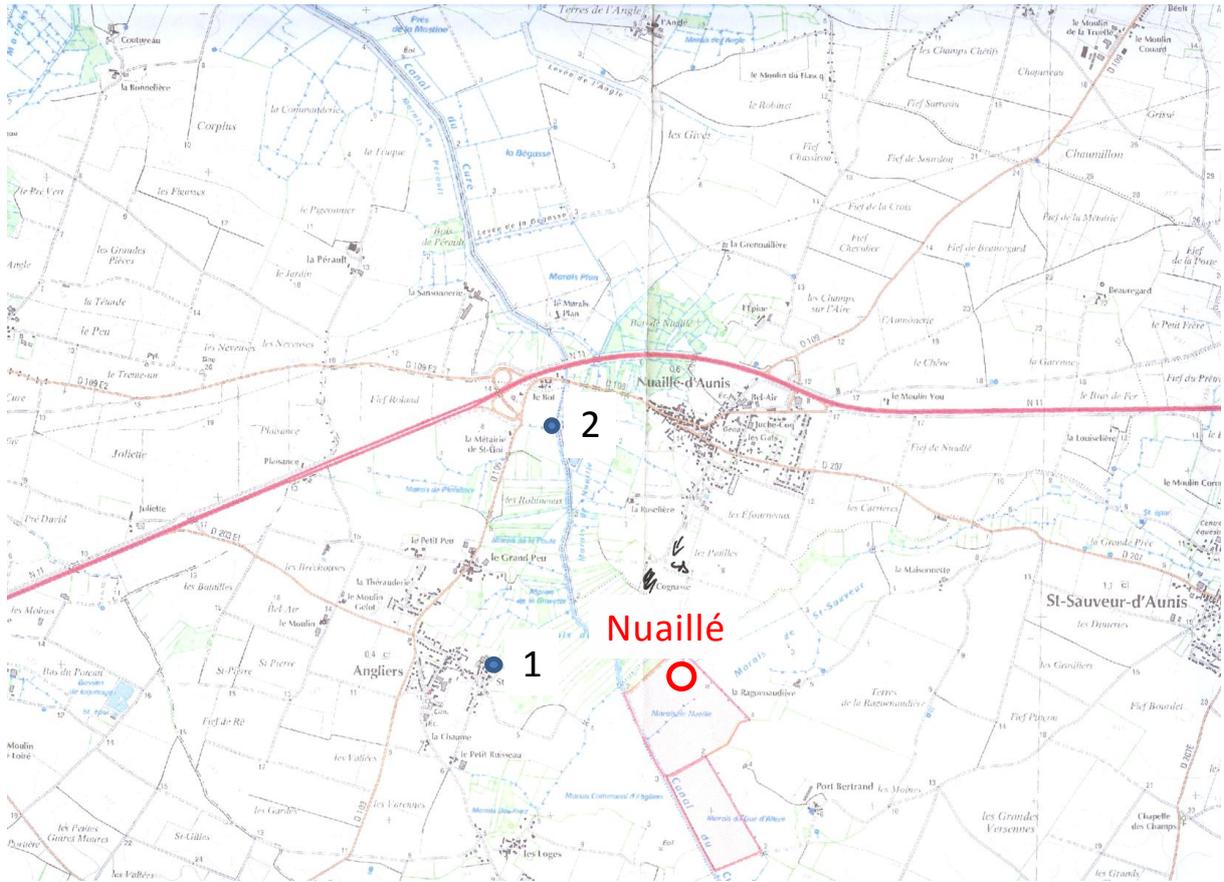
	Saint Hillaire géophysique	BSS 1 Forage	BSS 2 Forage	BSS 3 Forage	BSS 4 Forage
Interface Bri/Dogger	≈ 7-8 m	9 m	6 m bri/tourbe	11 m de tourbe	12,5 m bri+ tourbe

La Ronde (station 10)



	La Ronde géophysique	BSS 5 Forage	BSS 6 Forage	BSS 7 Forage	BSS 8 Forage
Interface Bri/Dogger	> 10m	9 m	>11 m	17 m sur sable	>14 m

Nuallié (station 11)



	La Ronde géophysique	BSS 1 Forage	BSS 2 Forage
Interface Bri/Dogger	≈ 5 m	0 m calcaire dés surface	0 m calcaire dés surface

ANNEXE 2 : Localisation - photographies des sites et stations.

Longeville (Station 01)



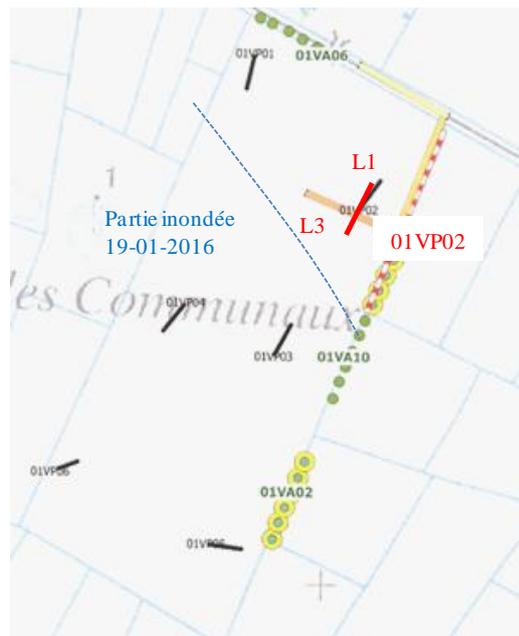
21-04-2015



Limite zone inondée 19-01-2016



Limite zone inondée
19-01-2016
(baisse de niveau d'eau)



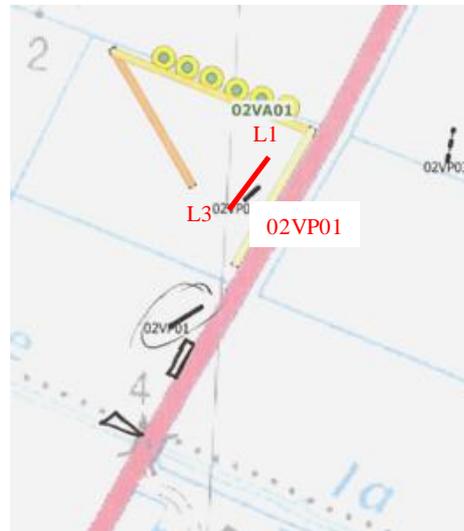
Luçon (Station 02)



21-04-2015



19-01-2015



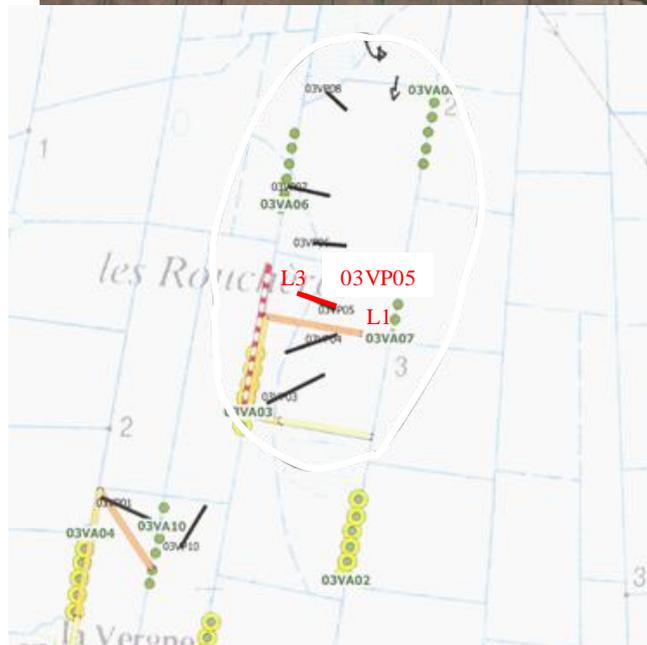
Rouchères (station 03)



28-04-2015



19-01-2015



Nalliers - Mouzeuil (station 04)



21-04-2015



19-01-2016



Boissière (station 05)



28-04-2015



19-01-2016



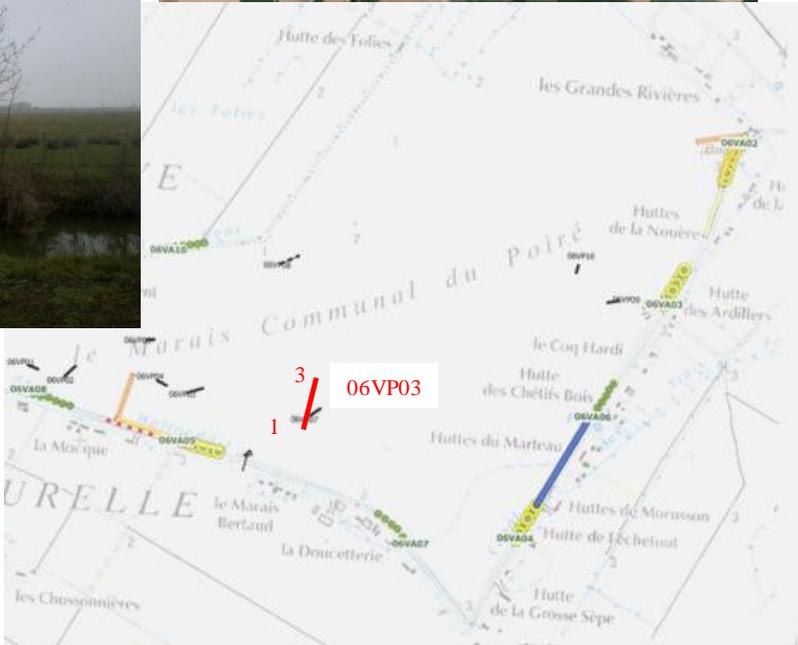
Communal du Poiré (station 06)



28-04-2015



19-01-2016



Sainte Christine (station 07)



29-05-2015



18-01-2016



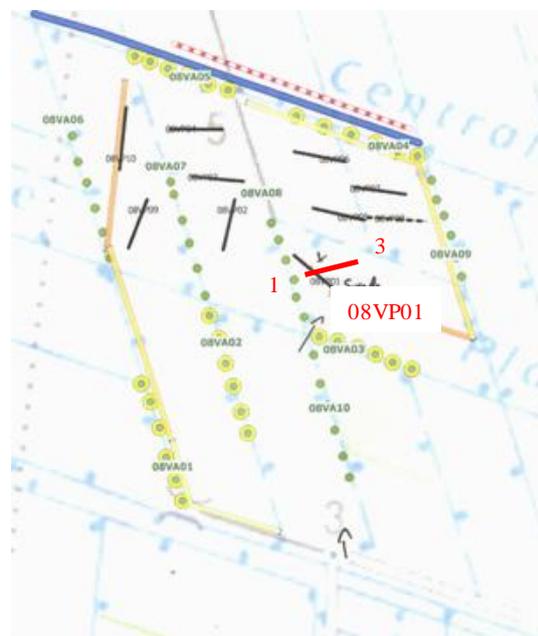
le Mazeau (station 08)



29-05-2015



18-01-2016



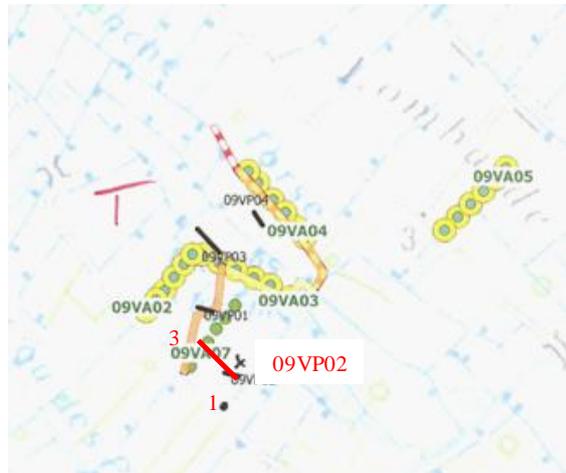
St Hillaire la Pallud (station 09)



29-05-2015



18-01-2016



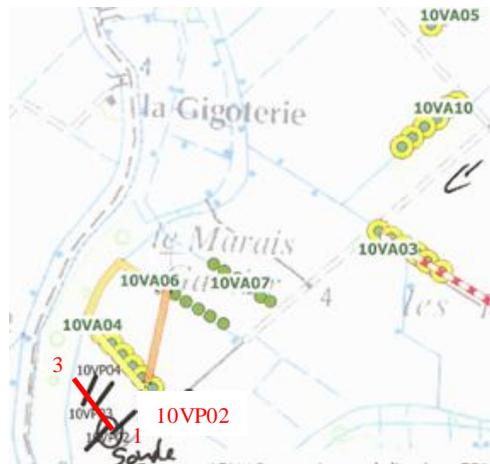
La Ronde (Station 10)



29-05-2015



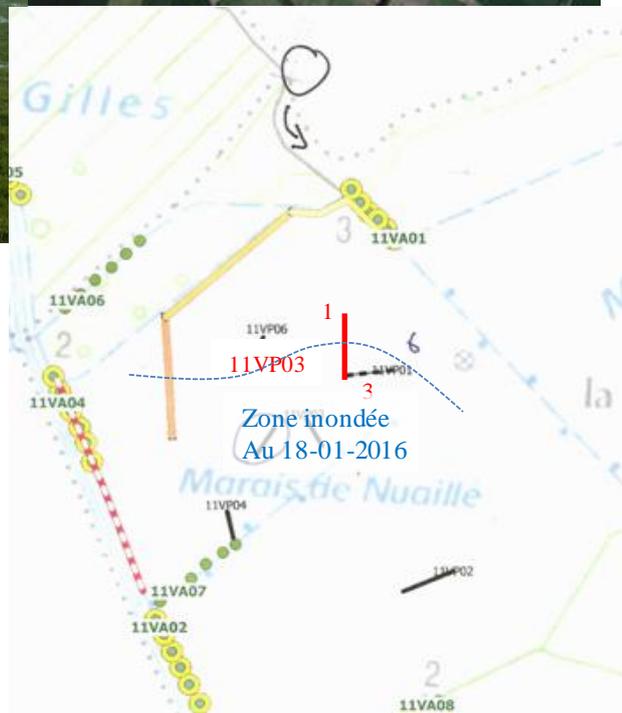
18-01-2016



Nuaillé d'Aunis (station 11)



18-01-2016



ANNEXE 3: Description des profils.

1- Site de Longeville



Echantillon	profondeur (cm)	Nom de la couleur	Présence de tâches de rouille
Longeville	0-10	Gris très foncé à noir	rares
	10-20	Brun-gris foncé	rares
	20-30	Brun à brun foncé	Modérée
	30-40	Brun à brun foncé	Modérée
	40-50	Brun à brun foncé	Très nombreuses
	50-60	Brun-gris foncé	Très nombreuses
	60-70	Brun-gris foncé	Absence à rares
	70-80	Brun-gris foncé	Absence à rares
	80-90	Brun-gris foncé	Modérée
	90-100	Gris olive clair	Modérée
	100-110	Gris olive clair	Absence
	110-120	Gris olive clair	Absence

Les sols de ce site présentent les caractéristiques de sols de zone humide, au sens de la police de l'eau, du fait de la présence de tâches de rouille à une profondeur inférieure à 25 cm.

2- Site de Luçon



Echantillon	profondeur (cm)	Nom de la couleur	Présence de tâches de rouille
Luçon	0-10	Noir	Absence
	10-20	Gris très foncé	Absence
	20-30	Gris très foncé	Quelques-unes
	30-40	Gris très foncé	Quelques-unes
	40-50	Gris très foncé	Quelques-unes
	50-60	Brun olive clair	Modérée
	60-70	Brun olive clair	Nombreuses
	70-80	Brun olive clair	Nombreuses
	80-90	Brun olive clair	Absence
	90-100	Gris olive	Absence
	100-110	Gris olive	Absence
	110-120	Gris olive	Absence

Les sols de ce site présentent les caractéristiques de sols de zone humide, au sens de la police de l'eau, du fait de la présence de tâches de rouille à une profondeur inférieure à 25 cm.

2- Site des Rouchères



Echantillon	profondeur (cm)	Nom de la couleur	Présence de tâches de rouille
Les Rouchères	0-10	Noir	Absence
	10-20	Brun foncé	Absence
	20-30	Gris très foncé	Absence
	30-40	Gris très foncé	Quelques-unes
	40-50	Gris foncé	Modérées
	50-60	Gris foncé	Nombreuses
	60-70	Gris olive	Nombreuses
	70-80	Gris olive	Modérées
	80-90	Gris olive	Absence
	90-100	Gris	Absence
	100-110	Gris	Absence
	110-120	Gris	Absence

Les sols de ce site présentent les caractéristiques de sols de zone humide, au sens de la police de l'eau, du fait de la présence de tâches de rouille à une profondeur inférieure à 25 cm. Un des sols présente des tâches de rouille entre 25 et 30 cm de profondeur (transition).

4- Site de Nalliers



Echantillon	profondeur (cm)	Nom de la couleur	Présence de tâches de rouille
Nalliers	0-10	Noir	Quelques-unes
	10-20	Gris très foncé	Quelques-unes
	20-30	Gris très foncé	Modérée
	30-40	Brun gris foncé	Modérée
	40-50	Gris	Nombreuses
	50-60	Gris	Nombreuses
	60-70	Gris	Rares
	70-80	Gris olive clair	Rares
	80-90	Gris olive clair	Quelques-unes
	90-100	Gris olive	Quelques-unes
	100-110	Gris olive	Absence
110-120	Gris olive	Absence	

Les sols de ce site présentent les caractéristiques de sols de zone humide, au sens de la police de l'eau, du fait de la présence de tâches de rouille à une profondeur inférieure à 25 cm.

5- Site de Boissière



Echantillon	profondeur (cm)	Nom de la couleur	Présence de tâches de rouille
Boissière	0-10	Gris très foncé	Absence
	10-20	Gris très foncé	Absence
	20-30	Gris foncé	Quelques-unes
	30-40	Gris foncé	Modérée
	40-50	Gris	Nombreuses
	50-60	Gris	Nombreuses
	60-70	Gris	Nombreuses
	70-80	Gris	Nombreuses
	80-90	Gris olive	Nombreuses
	90-100	Gris olive	Nombreuses
	100-110	Gris olive	Quelques-unes
	110-120	Gris	Quelques-unes

Les sols de ce site présentent les caractéristiques d'hydromorphie mais à une profondeur supérieure à celle de la définition de sols de zone humide, au sens de la police de l'eau. Ces sols présentent cependant des horizons réduits en profondeurs et peuvent être définis comme sols de zone humide ou sols de transition. Ceci est à lier au fait que ce site se situe en marais desséché.

6- Site du Poiré



Echantillon	profondeur (cm)	Nom de la couleur	Présence de tâches de rouille
Le Poiré	0-10	Noir	Absence
	10-20	Gris très foncé	Absence
	20-30	Gris très foncé	Quelques-unes
	30-40	Gris très foncé	Quelques-unes
	40-50	Gris foncé	Nombreuses
	50-60	Gris olive	Nombreuses
	60-70	Gris olive	Nombreuses
	70-80	Gris olive	Modérée
	80-90	Gris olive	Quelques-unes
	90-100	Gris	Quelques-unes
	100-110	Gris	Quelques-unes
	110-120	Gris	Absence

Les sols de ce site présentent les caractéristiques de sols de zone humide, au sens de la police de l'eau, du fait de la présence de tâches de rouille à une profondeur inférieure à 25 cm. Les sols de ce site présentent des tâches de rouille à une profondeur très importante ce qui implique un battement de nappe important.

7- Site de Saint-Arnault / Vieille Autise (Sainte Christine)



Echantillon	profondeur (cm)	Nom de la couleur	Présence de tâches de rouille
Sainte Christine	0-10	Noir	Tourbeux
	10-20	Noir	Tourbeux
	20-30	Noir	Tourbeux
	30-40	Noir	Tourbeux
	40-50	Noir	Tourbeux
	50-60	Gris foncé	Nombreuses
	60-70	Gris foncé	Nombreuses
	70-80	Gris foncé	Modérée
	80-90	Gris	Quelques-unes
	90-100	Gris	Absence
	100-110	Gris olive	Absence
	110-120	Gris olive	Absence

Les sols de ce site présentent les caractéristiques de sols de zone humide, au sens de la police de l'eau, du fait de la présence de tourbe sur une profondeur de 50 cm et de tâches de rouille plus en profondeur.

8- Site du Mazeau



Echantillon	profondeur (cm)	Nom de la couleur	Présence de tâches de rouille
Le Mazeau	0-10	Noir	Tourbeux
	10-20	Noir	Tourbeux
	20-30	Noir	Tourbeux
	30-40	Noir	Tourbeux
	40-50	Noir	Tourbeux
	50-60	Noir	Tourbeux
	60-70	Noir	Tourbeux
	70-80	Noir	Tourbeux
	80-90	Noir	Tourbeux
	90-100	Noir	Tourbeux
	100-110	Gris foncé	Absence
	110-120	Gris foncé	Absence

Les sols de ce site présentent les caractéristiques de sols de zone humide, au sens de la police de l'eau, du fait de la présence de tourbe sur une profondeur de quasiment un mètre.

9- Site du Marais Sauvage



Echantillon	profondeur (cm)	Nom de la couleur	Présence de tâches de rouille
Le Marais Sauvage	0-10	Noir	Rares
	10-20	Brun foncé à noir	Quelques-unes
	20-30	Brun foncé à noir	Quelques-unes
	30-40	Brun foncé à noir	Quelques-unes
	40-50	Gris foncé	Nombreuses
	50-60	Gris olive	Nombreuses
	60-70	Gris olive	Nombreuses
	70-80	Gris olive	Nombreuses
	80-90	Gris	Quelques-unes
	90-100	Gris	Absence
	100-110	Gris	Absence
	110-120	Gris	Absence

Les sols de ce site présentent les caractéristiques de sols de zone humide, au sens de la police de l'eau, du fait de la présence de tâches de rouille à une profondeur inférieure à 25 cm.

10- Site de la Ronde



Echantillon	profondeur (cm)	Nom de la couleur	Présence de tâches de rouille
La Ronde	0-10	Noir	Absentes
	10-20	Brun foncé à noir	Absentes
	20-30	Brun foncé à noir	Absentes
	30-40	Brun foncé à noir	Rares
	40-50	Gris très foncé	Rares
	50-60	Gris foncé	Modérées
	60-70	Gris foncé	Nombreuses
	70-80	Gris	Nombreuses
	80-90	Gris	Quelques-unes
	90-100	Gris	Quelques-unes
	100-110	Gris	Quelques-unes
110-120	Gris	Absence	

Les sols de ce site présentent les caractéristiques d'hydromorphie mais à une profondeur supérieure (30 cm) à celle de la définition de sols de zone humide, au sens de la police de l'eau. Ces sols présentent cependant des horizons réduits en profondeurs et peuvent être définis comme sols de zone humide ou sols de transition.

11- Site de Nuailé

Echantillon	profondeur (cm)	Nom de la couleur	Présence de tâches de rouille
Nuailé	0-10	Noir	Absentes
	10-20	Gris très foncé à noir	Absentes
	20-30	Brun-gris foncé	Quelques-unes
	30-40	Brun à brun foncé	Modérée
	40-50	Gris foncé	Modérée
	50-60	Gris foncé	Nombreuses
	60-70	Gris	Nombreuses
	70-80	Gris	Quelques-unes
	80-90	Gris	Absence à rares
	90-100	Gris	Absence
	100-110	Gris olive clair	Absence
	110-120	Gris olive clair	Absence