

**Université Pierre et Marie Curie, École des Mines de Paris  
& École Nationale du Génie Rural des Eaux et des Forêts**

---

**Master 2 Sciences de l'Univers, Environnement, Ecologie  
Parcours Hydrologie-Hydrogéologie**

**Utilisation de la conductivité électrique pour l'analyse des  
propriétés hydrodynamiques des sols**

**MILIA Anisia**

**Maître de stage : Claude DOUSSAN**



**INRA PACA - UAPV  
EMMAH**



**Septembre 2011**



## Abstract

The use of electrical conductivity in the estimation of soil moisture started many years ago (Briggs, 1899). However, the complexity of interactions among all the soil parameters makes the hydro-electric characterization difficult. This is why it is important to well understand the interaction between the soil parameters and electrical parameters. This is the purpose of the present work, which seeks to link electrical conductivity ( $\rho$ ) the volumetric water content ( $\theta$ ) and the matrix potential ( $\psi$ ) of different soils. For this, we first develop three features laboratory measurements on samples taken from cylinders (measuring / injection electrodes on the outside of the cylinder, four-line electrodes on the surface, and two circular electrodes on the top and bottom of the cylinder), which are tested and found to be suitable (for the last two) or not (four electrodes sides) to the electrical measurements of soil samples. Finally, the two selected devices are used to characterize the evolution of the electrical conductivity  $\sigma$  as a function of soil matrix potential for seven soils. It seems that the device four-line electrodes give the best results. The experimental relations between electrical conductivity and water content were adjusted to different types of existing models. If the adjustments quality for the different models is more or less similar, the clay soils suggest a different evolution and not represented by these models.

Keywords: electrical conductivity; hydro-electric behavior; retention curve; experimental devices ; laboratory measurements ; modeling ; matrix potential ; water content.

## Remerciements

*Tout d'abord, un grand merci à Claude Doussan, qui m'a permis de faire mon stage avec lui et de tant apprendre...*

*... pour sa patience et sa détermination.*

*Merci à Kostas...*

*... qui m'a joyeusement intégré à ce stage !*

*Merci à toute l'équipe D'EMMAH... de l'INRA ! ...*

*... pour leur accueil, leur sympathie et leur soutien.*

*Une pensée particulière pour Arnaud...*

*... compagnon de route.*

*A Albert, Eric, Hugues, et toutes ces belles rencontres...*

*... pour leurs passions, leur maturité, leur goût de la vie et le plaisir du travail.*

*Enfin, merci à celles et ceux qui m'ont offert leur chaleur et leur amitié durant mon séjour à Avignon...*

*... pour tous ces bons moments partagés.*

*Anisia MILLIA.*

## Table des matières

Abstract .....	2
Remerciements .....	2
Table des matières .....	4
Tables des illustrations .....	5
Liste des symboles et abréviations .....	6
Introduction .....	7
I. Principes de base des propriétés électriques et hydriques des sols .....	8
I.1. Propriétés électriques des milieux poreux .....	8
I.1.1. Définitions générales .....	8
I.1.2. L'électricité dans le sol .....	8
I.1.3. Mesures de la résistivité électrique des sols .....	9
I.2. Facteurs d'influence des propriétés électriques des sols .....	11
I.2.1. Conductivité volumique .....	11
I.2.2. Conductivité surfacique .....	13
I.2.3. Modélisation du comportement électrique des sols .....	14
I.3 Propriétés hydriques des sols .....	17
I.3.1 Notion de potentiel hydrique .....	17
I.3.2 Propriétés hydrodynamiques des sols .....	18
II. Matériel et méthodes .....	19
II.1. Objectifs des dispositifs expérimentaux et des sols investigués .....	19
II.2. Mesures hydriques sur les sols .....	22
II.2.1. Rétention .....	22
II.2.2. Conductivité hydrique .....	22
II.3. Trois dispositifs de mesure de la résistivité à l'essai .....	23
II.3.1. Quatre électrodes régulièrement espacées sur un axe diamétral .....	23
II.3.2. Quatre électrodes de côté .....	24
II.3.3. Deux plaques circulaires .....	25
III. Résultats .....	26
III.1. Essais des trois protocoles sur un échantillon test .....	26
III.1.1. Quatre électrodes en ligne .....	26
III.1.2. Quatre électrodes de coté .....	30
III.1.3. Deux plaques .....	31
III.2. Mesure des propriétés électriques des sols échantillonnés .....	32
III.2.1. Courbes de rétention .....	32
III.2.2. Dispositif Wenner .....	35
III.2.3. Dispositif deux plaques .....	37
III.3. Ajustement des modèles .....	39
III.3.1. Waxman et Smits, 1968 .....	39
III.3.2. Rhoades et al., 1976 .....	41
III.3.3. Brovelli et al., 2011 .....	42
Conclusion et Perspectives .....	44
Bibliographie .....	45
Annexes .....	48

## Tables des illustrations

Figure 1 Distribution de courant dans un sol homogène.....	9
Figure 2 : Mesure à quatre électrodes de la résistivité électrique du sol.....	10
Figure 3 Modèle de double couche électrique .....	14
Figure 4 Schéma du dispositif Wenner, vue de dessus .....	23
Figure 5 Schéma du dispositif Wenner, vue de profil.....	23
Figure 6 Schéma du dispositif "4 électrodes de coté", vue de dessus .....	24
Figure 7 Schéma du dispositif "4 électrodes de coté", vue de profil.....	25
Figure 8 Schéma du dispositif "2 plaques", vue de profil .....	25
Figure 9 Evolution de la conductivité électrique en fonction du potentiel matriciel, pour l'échantillon test, par le dispositif <i>Wenner</i> .....	26
Figure 10 Mesures de la conductivité de l'échantillon test; essais avec gel et sans gel .....	27
Figure 11 Corrélation entre conductivité mesurée par le dispositif et conductivité mesurée par le conductivimètre, à 4213 Hz, 83,26 Hz et 3,91 Hz .....	28
Figure 12 Corrélation entre conductivité prévisionnelle et conductivité mesurée par le conductivimètre, à 4213 Hz, 83,26 Hz et 3,91 Hz; en intégrant la tension d'injection à la mesure électrique.....	29
Figure 13 Evolution de la conductance en fonction du potentiel matriciel, pour l'échantillon test, par le dispositif "4électrodes de coté" .....	30
Figure 14 Corrélation entre le dispositif Wenner et "4électrodes de coté" .....	31
Figure 15 Evolution de la conductivité en fonction du potentiel matriciel, pour l'échantillon test, par le dispositif "2 plaques" .....	31
Figure 16 Corrélation entre le dispositif Wenner et "2 plaques" .....	32
Figure 17 Courbe de rétention des sols étudiés.....	34
Figure 18 Evolution de la conductivité électrique des sols étudiés, par de dispositif Wenner	37
Figure 19 Evolution de la conductivité électrique en fonction du potentiel matriciel des sols étudiés, par de dispositif 2 plaques.....	39
Figure 20 Ajustement du modèle Waxman et Smits sur les 6 premières mesures électriques de <i>Bonpas</i> .....	40
Figure 21 Ajustement du modèle Waxman et Smits sur l'ensemble des mesures électriques de <i>Crau</i> .....	41
Figure 22 Ajustement du modèle de Rhoades et al., sur les 6 premières mesures électriques du <i>lysimètre</i> .....	42
Figure 23 Ajustement du modèle de Rhoades et al., sur l'ensemble des mesures électriques de <i>Velleron</i> .....	42
Figure 24 Paramètres du modèle Brovelli et al. (2011), ajustés pour les 7 sols étudiés .....	43
Figure 25 Ajustement du modèle de Brovelli et al., pour les 6 premières mesures électriques des Vignères .....	43
Figure 26 Ajustement du modèle de Brovelli et al., sur l'ensemble des mesures électriques de Tavel.....	44
Tableau 1 Granulométrie sans décarbonatation .....	21
Tableau 2 Granulométrie après décarbonatation.....	21
Tableau 3 Paramètres d'justement du modèle Van Genuchten pour chaque sol.....	35
Tableau 4 Paramètres du modèle Waxman et Smits (1968), ajustés pour les 7 sols étudiés ...	40
Tableau 5 Paramètres du modèle Rhoades et al. (1976), ajustés pour les 7 sols étudiés .....	42

## Liste des symboles et abréviations

A :	section
CEC :	Capacité d'Echange Cationique
cf. :	confère
E :	champs électrique
G :	conductance
$\varphi_G$ :	potentiel énergétique de gravité
I :	courant
J :	densité de courant
K :	coefficient géométrique
L :	longueur
m :	coefficient de cimentation
n :	exposant de saturation
$P_A$ :	pression atmosphérique
PVC :	Polychlorure de vinyle
r :	rayon
R :	résistance électrique
S :	surface
T :	température
U :	différence de potentiel
$\Phi$ :	porosité
$\theta$ :	teneur en eau volumique
$\theta_r$ :	teneur en eau résiduelle
$\theta_s$ :	teneur en eau à saturation
$\theta_{solide}$ :	fraction volumique de la phase solide
$\theta_{wc}$ :	fraction volumique de la phase liquide continue
$\theta_{ws}$ :	contenu en eau volumique des éléments solides-liquides
$\mu$ :	viscosité
$\rho$ :	résistivité
$\rho_a$ :	résistivité apparente
$\sigma$ :	conductivité électrique
$\sigma_a$ :	conductivité apparente
$\sigma_{conductivimètre}$ :	conductivité mesurée par un conductivimètre
$\sigma_{électrique}$ :	conductivité mesurée par le dispositif électrique
$\sigma_{prévisionnel}$ :	conductivité prévisionnelle
$\sigma_w$ :	conductivité volumique
$\sigma_{ws}$ :	conductivité des éléments solides-liquides
$\sigma_{wc}$ :	conductivité de la phase liquide continue
$\sigma_s$ :	conductivité surfacique
$\Omega$ :	ohm
$\Psi$ :	potentiel matriciel

## Introduction

La connaissance des propriétés hydriques des sols est primordiale dans de nombreux domaines : en agronomie (pour la conduite d'irrigation notamment), en environnement (dans l'étude des transferts de polluant par exemple), en aménagement du territoire (zones inondables) etc. C'est pourquoi depuis très longtemps nombre de travaux cherchent à collecter, quantifier, et modéliser ces propriétés. Parmi ces études, une majorité s'est orientée dans la caractérisation de l'état hydrique du sol, qui reflète à la fois la quantité d'eau contenu dans ce sol (teneur en eau  $\theta$ ) et la force rétention de l'eau par le sol (potentiel matriciel  $\psi$ ). La relation entre teneur en eau et potentiel matriciel (la courbe de rétention) est caractéristique de chaque sol. Cette courbe s'obtient de façon expérimentale généralement par des méthodes destructives de prélèvement. Non-intrusives et très corrélées à de nombreuses propriétés physico-chimiques du sol, les méthodes qui se basent sur la mesure de la résistivité électrique ( $\rho$ ) se développent de plus en plus, en particulier en imagerie du sol et sous-sol (tomographie de résistivité électrique) et pourrait être une alternative intéressantes dans l'estimation spatialisée des teneurs en eau et éventuellement du potentiel matriciel. Toutefois, il est indispensable de comprendre les relations qui lient ces trois paramètres :  $\rho$ ,  $\psi$  et  $\theta$ , ce qui compléterait les connaissances acquises au sujet des liens entre conductivité hydraulique et résistivité électrique et qui font intervenir le potentiel matriciel (Doussan et Ruy, 2009).

Les rapports ( $\theta$ ,  $\rho$ ) et ( $\theta$ ,  $\psi$ ) sont déjà bien appréhendés et sont à l'origine de nombreux travaux de modélisation. Cependant il n'existe que peu d'études qui regroupent les trois. La mesure de la résistivité est une méthode classique de géophysique, appliquée en géologie tout d'abord. Cette méthode été effectivement introduite aux études de sol ensuite, initialement pour caractériser la salinité de ceux-ci. Aujourd'hui, les méthodes fondées sur l'auscultation électrique sont toujours utilisées dans l'étude de la salinité, mais leur domaine d'application s'est étendu, en particulier grâce au développement de l'imagerie électrique, et la conductivité électrique en lien avec d'autres variables mesurées permet de remonter à d'autres propriétés du sol.

C'est dans ce contexte que l'unité mixte de recherche EMMAH<sup>1</sup> de l'INRA PACA<sup>2</sup> et UAPV<sup>3</sup> propose un stage, dont l'objectif est d'étudier les caractéristiques hydriques des sols via la mesure de la conductivité électrique. Un des objectifs de l'unité EMMAH est de comprendre la dynamique des agro-hydrosystèmes méditerranéens, par une approche systémique qui englobe à la fois le sol (et son occupation agricole, hydrologique, etc.), et le climat, en portant l'accent sur l'impact des processus de surface et leurs interactions avec les nappes. Afin de caractériser le comportement hydro-électrique des sols, le stage se propose dans un premier temps d'élaborer un ou plusieurs dispositif(s) électrique(s) adapté(s) à la mesure de la conductivité électrique d'échantillons de sols. Puis, grâce à ce(s) dispositif(s), de suivre l'évolution de la conductivité électrique en fonction du potentiel matriciel de sols variés, et tenter de mettre en relation  $\psi$ ,  $\theta$ , et  $\rho$  pour ces sols. Dans cette étude, la température, la quantité et la qualité des ions de la solution sont fixés en laboratoire, pour mieux mettre en

---

<sup>1</sup> Environnement Méditerranéen et Modélisation des Agro-Hydro systèmes.

<sup>2</sup> Institut National de la Recherche Agronomique, Provence-Alpes-Côte-D'azur et <sup>3</sup> Université d'Avignon et Pays de Vaucluse

évidence la relation ( $\sigma, \psi, \theta$ ). La teneur en eau est maîtrisée en modifiant le potentiel matriciel du sol. Ce dernier est manipulé efficacement grâce aux tables à succion et aux presses Richards. Pour traiter ce sujet, le présent document s'organise comme suit : il présente les principes de base des propriétés électriques et hydriques des sols; puis les différents dispositifs, matériels et méthodes utilisés lors des mesures en laboratoire et enfin les résultats de ces diverses expériences.

## I. Principes de base des propriétés électriques et hydriques des sols

### I.1. Propriétés électriques des milieux poreux

#### I.1.1. Définitions générales

La résistance (électrique) caractérise la capacité d'un milieu à s'opposer à un courant électrique qui le traverse et dépend de la forme du milieu et de la configuration d'injection du courant. La loi d'Ohm, pour un conducteur, exprime la résistance  $R$  (en Ohm -  $\Omega$ ) d'un milieu homogène par la proportionnalité entre courant injecté ( $I$ , Ampères  $A$ ) et différence de

potentiel ( $U$ , Volts  $V$ ) :

$$R = \frac{U}{I}$$

La résistivité électrique  $\rho$  ( $\Omega.m$ ) correspond à cette résistance corrigée des caractéristiques géométriques du milieu et de l'injection de courant. C'est une propriété intrinsèque du milieu.

La conductivité électrique  $\sigma$  (en Siemens par mètre,  $S.m^{-1}$ ) d'un sol est aussi utilisée pour le caractériser ; elle correspond à l'inverse de la résistivité électrique  $\rho$  (en ohm mètre,  $\Omega.m$ ), et

définit donc la capacité d'un milieu à laisser passer le courant :  $\sigma = \frac{1}{\rho}$

La densité de courant  $J$  est, par définition, le courant électrique  $I$  par unité de section  $A$  du

milieu:  $J = \frac{I}{A}$

Avec  $J$  en  $A.m^{-2}$ ,  $I$  en  $A$  et  $A$  en  $m^2$ .

#### I.1.2. L'électricité dans le sol

De façon générale, les méthodes électriques consistent à mesurer la résistivité d'un sol en y injectant un courant  $I$  connu et en relevant la différence de potentiel  $U$ . Ainsi, la variation des données électriques traduisent l'évolution d'une ou de plusieurs propriété(s) du milieu investigué.

Dans un sol supposé homogène le courant injecté à partir d'une électrode se propage uniformément dans toutes les directions depuis son point d'injection (cf. Figure 1).



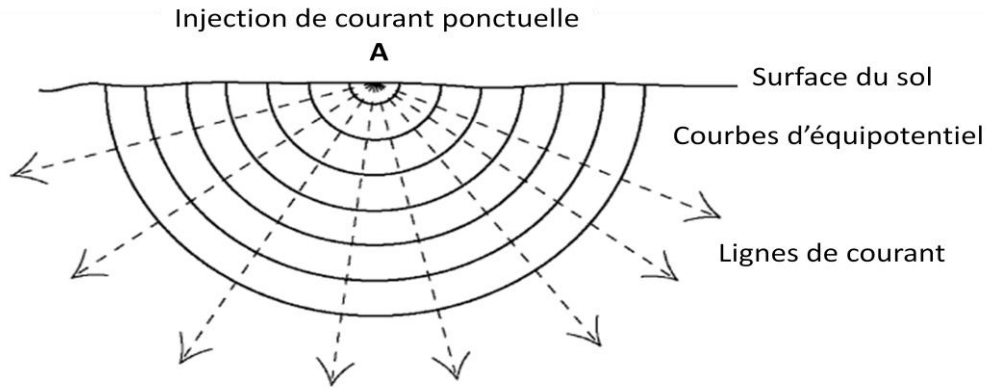


Figure 1 Distribution de courant dans un sol homogène

Dans ce cas, le courant se propage suivant une demi-sphère de rayon  $r$ , les courbes d'équipotentiel, dont la surface  $S$  se calcule comme suit :  $S = 2\pi r^2$

Avec  $S$  en  $m^2$ , et  $r$  en  $m$ .

D'après la loi d'Ohm locale, et dans le cas de mesures à basse fréquence, la densité de courant qui se propage dans un milieu homogène peut être définie comme suit :

$$\vec{J} = \sigma \vec{E} \quad \text{Ou} \quad \vec{J} = \frac{\vec{E}}{\rho}$$

Où  $\sigma$  ( $S.m^{-1}$ ) est la conductivité électrique du milieu,  $\rho$  ( $\Omega.m$ ) la résistivité électrique et  $\vec{E}$  le champ électrique auquel il est soumis (Samouëlian et al., 2005).

D'autre part, le champ électrique  $\vec{E}$  est lié à la différence de potentiel électrique, par:

$$U = -\int_s \vec{E}.dl$$

Où  $U$  est la différence de potentiel en  $V$ , et  $dl$  est l'élément spatial d'intégration le long de  $S$ , entre deux courbes d'équipotentiel.

Dans le cas d'une injection ponctuelle, avec propagation radiale, le potentiel est obtenu par l'intégration du champ électrique par rapport à  $r$ , soit pour une dimension :

$$U = -\int \frac{\rho I}{2\pi r^2}.dr \quad \text{Soit,} \quad U = \frac{\rho I}{2\pi r}$$

### I.1.3. Mesures de la résistivité électrique des sols

Dans la pratique, la résistivité électrique du sol est généralement mesurée grâce un dispositif à quatre électrodes. Quelque soit la configuration, deux électrodes sont destinées à l'injection de courant d'intensité connu, usuellement appelées  $A$  et  $B$  ; et les deux autres électrodes,  $M$  et  $N$ , servent à mesurer la différence de potentiel (cf. Figure 2). Les électrodes  $A$  et  $B$  imposent

un champ électrique ou courant dans le milieu, sous l'effet duquel les porteurs de charges déplacent dans le sol pour rétablir l'équilibre électrique. Ce mouvement de charges crée un courant électrique dans le milieu dont la différence de potentiel est mesurée par M et N.

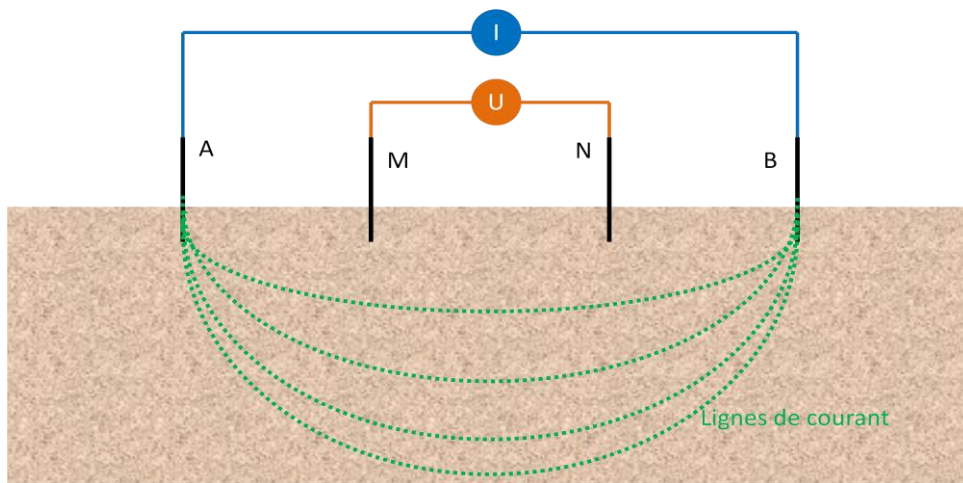


Figure 2 : Mesure à quatre électrodes de la résistivité électrique du sol

Si le milieu est homogène, la différence de potentiel  $U$  entre M et N peut alors être connue grâce à l'équation suivante :

$$U = \frac{\rho I}{2\pi} \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)$$

Où AM, BM, AN et BN correspondent aux distances entre électrodes et  $\rho_a$  résistivité apparente. En effet, la résistivité qui découle de ces mesures est appelée résistivité électrique apparente ( $\rho_a$ ) puisqu'elle est calculée comme si le sol était un milieu homogène (Schneider, 2010).

La résistivité obtenue :

$$\rho = \frac{U}{I} 2\pi \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)$$

Soit,  $\rho = KR$

Où  $R=U/I$  est la résistance mesurée,  $K$  est un coefficient géométrique dépendant de la configuration du dispositif de mesure et de la géométrie de la cellule lorsque la mesure est effectuée sur des échantillons. C'est au cours des années 1920 que Conrad et Marcel Schlumberger en France et Frank Wenner aux Etats-Unis, ont développé simultanément ces méthodes de mesures pour l'application à la géologie. Ces méthodes s'appliquent aussi bien à grande échelle (au champ) qu'à petite échelle (sur des échantillons en laboratoire). Issue de ces concepts, la tomographie de résistivité électrique (TRE) est une méthode de prospection non destructrice, permettant d'imager en deux ou trois dimensions les variations de résistivité du sous-sol. Cette méthode se base sur un système quadripôle (comme présenté Figure 2), dont les différentes combinaisons font varier la profondeur de prospection. L'inversion des combinaisons de mesures par un modèle inverse de transfert électrique permet de retrouver une distribution spatiale des résistivités réelles compatible avec la réalité.

Quand le sol ne contient pas/peu de métaux ou corps conducteurs (comme le graphite), ce sont les ions, présents dans l'eau du sol, qui sont les transporteurs de charges électriques en migrant lorsque le milieu est soumis à un champ électrique (les anions vers la cathode et les cations vers l'anode). Cette migration ionique est à l'origine du courant électrique de conduction qui se propage dans le sol. Pour éviter la polarisation des électrodes et mesurer la résistivité apparente du sol du sol lui-même et non pas du couple sol-électrode, le courant injecté doit être alternatif. Toutefois, pour rester dans le domaine d'application des formules (i.e. processus conductif cf. loi locale d'Ohm), la fréquence du courant ne doit pas être trop élevée. La résistivité des sols varie sous l'influence directe ou non de variables pédologiques (Besson, 2007).

## I.2. Facteurs d'influence des propriétés électriques des sols

Différents facteurs du milieu, pouvant interagir les uns avec les autres, sont à l'origine de la variation de la conductivité électrique du sol. Besson (2007) propose une classification de ces variables suivant la nature de la conductivité qu'elles influent : conductivité volumique ( $\sigma_w$ ) et conductivité surfacique ( $\sigma_s$ ). La conduction électrique des sols est principalement assurée par les ions ; ce type de conduction est dite « conduction électrolytique ». La conductivité volumique ( $\sigma_w$ ) provient du déplacement des ions dissous dans la solution du sol, à l'intérieur des pores, alors que la conductivité surfacique ( $\sigma_s$ ) est due à la migration des ions retenus à l'interface solide/liquide. La conductivité apparente est souvent considérée comme la somme de ces deux types de conductivité (chemins parallèles):  $\sigma_a = \sigma_w + \sigma_s$  (Rhoades et al. 1976).

### I.2.1. Conductivité volumique

Les charges électriques libres en solution soumises à un champ électrique migrent vers l'électrode de signe opposé : c'est l'électromigration. La viscosité  $\mu$  de la solution et le rayon de Stokes<sup>3</sup> des ions dissous s'opposent à ce mouvement. Ici, plusieurs facteurs influencent la conductivité volumique : les caractères qualitatifs et quantitatifs de la solution du sol (type d'ions et concentration de la solution), la teneur en eau du sol ; la température du sol ; la texture et structure du sol.

- La concentration ionique de la solution du sol

La composition quantitative de la solution, c'est-à-dire la concentration en différents ions, influe directement le caractère conducteur du milieu. En effet, l'accroissement de la concentration en sels dissous augmente la densité de charges présentes, et favorise donc la conductivité électrolytique de la solution. D'autre part, la nature des ions dissous dans la solution du sol impacte directement la conductivité de celui-ci. En effet, les ions n'ont pas tous la même réponse lorsqu'ils sont soumis à un champ électrique, et leur mobilité varie notamment en fonction de leur rayon de Stokes et de l'interaction entre les ions de charges opposées présents dans la solution.

---

<sup>3</sup> Paramètre caractérisant l'encombrement stérique d'une particule, ici les ions : rayon d'une particule sphérique qui aurait le même comportement hydrodynamique que l'ion considéré.

De nombreux travaux de recherche ont mis en évidence les relations entre salinité de la solution et conductivité électrique du sol (Rhoades et al., 1976 ; Shainberg et al., 1980 ; Hendrickx et al., 2002 ; etc.) : l'augmentation de la conductivité électrique de la solution ( $\sigma_w$ ) entraîne l'augmentation de la conductivité apparente du sol ( $\sigma_a$ ). La forte corrélation qui existe entre concentration en sel et résistivité électrique est devenue un outil de base dans les études au champ de la salinisation des sols.

Plus récemment, la concentration artificiellement élevée d'une eau qui s'infiltré dans un sol ou un aquifère constitue un marqueur électrique, repérable dans des mesures par tomographie électrique et permet d'arriver à des estimations de vitesses de transferts ou de propriétés de transferts hydriques des milieux (Kemna et al., 2002 ; Batlle-Aguilar et al., 2009).

- La teneur en eau

L'eau étant le solvant permettant la dissolution des ions porteurs de charges, elle constitue le milieu dans lequel se déplacent ces charges. Ainsi, au delà de sa composition ionique, la teneur en eau du sol ( $\theta$  en  $m^3.m^{-3}$ , volume d'eau par volume de sol), qui va définir la surface des pores remplis d'eau ainsi que la tortuosité et la connectivité de la phase liquide influe directement sur la conductivité électrique du sol. L'influence de la teneur en eau a également fait l'objet d'un certain nombre d'études tant au champ qu'en laboratoire (Rhoades et al., 1976 ; Fukue et al., 1999 ; Michot et al., 2000), plus à l'origine pour s'affranchir de son effet « parasite » sur la détermination de la salinité. Globalement, la conductivité du sol augmente avec son degré de saturation en eau (cf. I.2.3), mais avec des comportements assez variables, semble-t-il suivant les types de sol. Les études montrent que la conductivité électrique apparente évolue de façon différente suivant qu'il s'agisse de milieux *propres* (sables, graviers purs) ou de milieux constitués de matériaux conducteurs (métalliques, argileux, humiques) (Archie, 1942 ; Jackson, 1975, Rhoades et al., 1976). Suivant la constitution de ces derniers, la conductivité apparente est plus ou moins accrue (cf. I.2.2.).

- La température

La température influence la viscosité de la solution du sol : la diminution de la température augmente la viscosité, augmentant de fait les forces de frottement qui s'opposent à la migration des charges électriques. C'est donc la vitesse de migration, et le cas échéant, la mobilité des ions qui sont réduites par une baisse de température, et avec elles la conductivité électrique du milieu. En outre les températures plus élevées peuvent favoriser la dissociation des solutés, ce qui augmente la densité de charges en solution et la conductivité électrique (Muñoz et Berga, 2005).

Pour s'affranchir de l'impact de la température sur la conductivité électrique, plusieurs modèles de correction ont été développés. Ils permettent aux conductivités électriques mesurées à diverses températures d'être ajustées pour une température de référence, généralement 25°C (Besson, 2007).

$$\sigma_{Tref} = \sigma_T f(T)$$

Où  $\sigma_{T_{ref}}$  est la conductivité ajustée à la température de référence,  $\sigma_T$  est la conductivité mesurée à la température T et  $f(T)$  une fonction de conversion développée de façon empirique. Keller et Frischknecht ont développé en 1966 un modèle très utilisé en science du sol :

$$f_T = \frac{1}{1 + 0.025(T - T_{ref})}$$

- La texture et structure

La texture caractérise la distribution de taille des particules du sol, tandis que la structure du sol correspond à l'organisation spatiale de ces particules. La taille et l'agencement des particules va influencer directement la distribution des phases solides, liquides et gazeuses du sol. La porosité, la tortuosité ou encore la masse volumique, qui sont les paramètres faisant référence l'agencement des particules, influencent la mobilité des charges électriques. Archie avait déjà mis en évidence le lien qui lie structure et conductivité électrique en intégrant dans sa formule la porosité et un facteur de cimentation (coefficient empirique). A saturation une forte porosité assure un volume d'eau important. Toutefois, en non-saturé, les capillaires aux diamètres plus petits ralentissent le mouvement de l'eau et des charges électriques, et donc maintiendraient une certaine conductivité dans le milieu. Les sols dont la porosité a été réduite par compaction présentent une conductivité électrique plus élevée (Saarenketo, 1998 ; Journiaux et al., 2006). Grâce à la tomographie de résistivité électrique 3D, Samouelian et al. (2004) mettent en évidence la fissuration du sol, en localisant des zones très résistives (lors de la désaturation, les fissures se vident et deviennent donc isolantes) et Serger et al., (2009) analysent les mottes compactées sur des parcelles labourées, qui sont à l'inverse des zones plus conductrices sur le profil tomographique.

### I.2.2. Conductivité surfacique

En plus de l'électromigration des charges libres dissoutes dans la solution, les ions liés à la surface des particules solides du sol subissent aussi les forces résultant d'un champ électrique ; de leur déplacement résulte également la conduction d'un courant. Les substances minérales ou humiques des sols peuvent être chargées en surface et ainsi adsorber les ions compensateurs présents en solution pour tendre à l'électro neutralité. La nature et le nombre des ions adsorbés dépendent à la fois de la nature même du solide constitutif et de la composition ionique de la solution. Les contre-ions à plus forte concentration, plus petits ou encore de plus forte valence seront préférentiellement adsorbés. Le phénomène qui se produit à l'interface solide/liquide dans les pores d'un sol est représenté par le concept de double couche électrique (cf. Figure 3). Généralement chargés négativement en surface, les solides adsorbent les cations présents en solution. Les ions positifs se retrouvent fortement liés aux solides dans une première couche statique, la couche de Stern. La deuxième couche, couche de Gouy-Chapman, se trouve juste après la couche de Stern, dont la séparation est matérialisée par un plan de cisaillement. La composition ionique de cette couche (couche dite diffuse) résulte des forces d'adsorption du solide (qui s'appliquent au-delà de la première couche) et des forces de diffusion de la solution (« électrolytes libres »). Moins fortement liée, cette couche est le siège d'électromigration sous l'effet d'un champ électrique. Ce phénomène

est à l'origine de la conductivité surfacique ( $\sigma_s$ ) du milieu et interagit de fait sur la conductivité effective du sol. C'est pourquoi il été montré que  $\sigma_s$  dépend de la capacité d'échange cationique (CEC), elle-même liée à la teneur en argiles (qui ont une capacité d'adsorption très élevée). De nombreuses études ont justifié la non-linéarité entre  $\sigma_a$  et  $\sigma_w$  par l'importance de  $\sigma_s$  (Shainberg et al., 1980 ; Nadler et al., 1984 ; Nadler, 2005 ; Taylor et al., 2006).

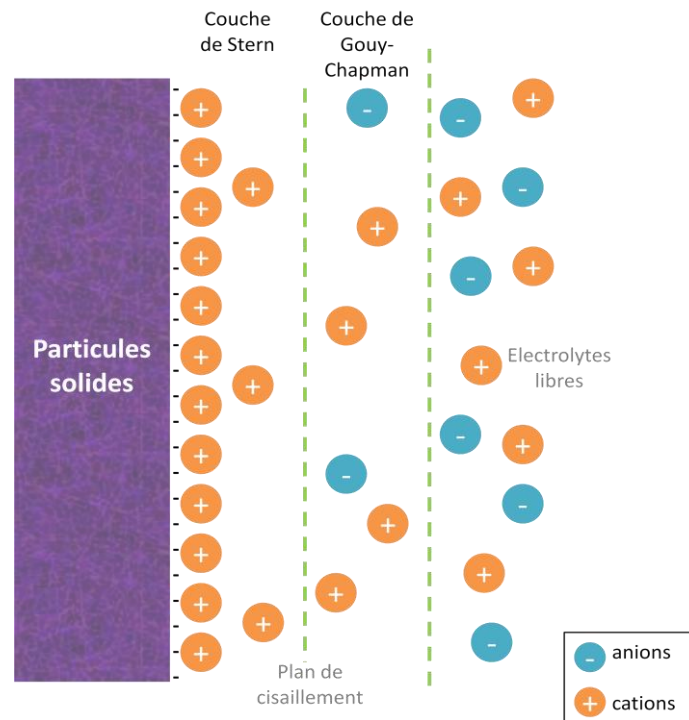


Figure 3 Modèle de double couche électrique

La forte interaction existant entre tous ces paramètres, la complexité des milieux poreux et des sols rend l'analyse théorique des signaux électriques dans ces milieux difficile. C'est la raison pour laquelle de nombreux modèles empiriques et semi-empiriques parfois très différents les uns des autres ont été établis en particulier en lien avec la saturation du milieu. Quelques unes de ces représentations théoriques sont décrites dans la section suivante.

### I.2.3. Modélisation du comportement électrique des sols

La conductivité électrique dans les milieux poreux a été le sujet de nombreux travaux de modélisation depuis près d'un siècle. En lien avec des applications géologiques/pétrolières, nombre de scientifiques ont étudiés les relations entre saturation et conductivité électrique. La complexité de ces modèles ne cesse de croître au fur et à mesure que sont intégrés de nouveaux processus et interactions. La multitude des résultats prouve la difficulté de modéliser ce comportement électrique (Besson, 2007).

En 1942, Archie est le premier à proposer une loi qui modélise le comportement électrique des milieux poreux saturés (des grès) et sans argile et matériaux conducteurs. Cette loi sera la base de tous les modèles qui suivront. Dès lors, il met en évidence l'influence de la

conductivité de la solution ( $\sigma_w$ ), de la porosité ( $\Phi$ ) et de la consolidation ( $m^4$ , exposant de cimentation, empirique et sans dimension) dans la prédiction de la conductivité électrique globale de ce milieu ( $\sigma_a$ ).

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_w} = \frac{1}{F} = \phi^m$$

Où  $F$  (sans dimension) est le facteur de formation défini comme le rapport entre conductivité électrique volumique et la conductivité électrique globale du milieu.

Cette « première loi d'Archie » a été généralisée pour des milieux partiellement saturés en incorporant la notion de degré de saturation. Cette deuxième loi intègre le taux de saturation  $S_w^5$  et l'exposant de saturation  $n^6$ , tous deux sans dimension.

$$\frac{\sigma_a}{\sigma_w} = \phi^m S_w^n = \frac{S_w^n}{F}$$

Bien que ces lois ne s'appliquent pas aux milieux présentant une conductivité surfacique, elles ont donné de bons résultats dans l'étude de milieux simples (Schwartz et Kimminau, 1987 ; Robert et Schwartz, 1996 ; Tabbagh et al., 2002).

Waxman et Smits (1968) ont tenté d'intégrer cette conductivité surfacique ( $\sigma_s$ ) en considérant la conductivité volumique ( $\sigma_w$ ), et la conductivité surfacique comme étant deux conducteurs disposés en parallèle par analogie aux circuits électriques ; la conductivité apparente du milieu ( $\sigma_a$ ) résulte de la somme de ces deux éléments :

$$\sigma_a = \frac{\sigma_w + \sigma_s}{F}$$

Cette formule, définie à l'origine pour des grès argileux (constitués de grains de quartz enrobés d'argiles), est complétée par l'influence de  $\sigma_w$  sur  $\sigma_s$  et de la saturation :

$$\sigma_a = \frac{S_w^n}{F} \left( \sigma_w + \frac{\sigma_s}{S_w} \right)$$

Rhoades et al., (1976) proposent un modèle s'apparentant à une fonction parabolique, dont la variable est la teneur en eau ( $m^3/m^3$ ), l'ordonnée à l'origine correspond à la conductivité surfacique (S/m) du milieu.

$$\sigma_a = (a\theta^2 + b\theta)\sigma_w + \sigma_s \quad \text{Ou} \quad \sigma_a = \sigma_w \theta T + \sigma_s$$

<sup>4</sup> Sa valeur augmente avec le degré de cimentation du milieu ; il correspond à la pente de la droite obtenue par régression logarithmique entre le facteur de formation et la porosité. Archie obtient des valeurs proches de 1,3 pour des sables non consolidés et des valeurs comprises entre 1,8 et 2,0 pour des sables consolidés (Schneider, 2010).

<sup>5</sup> Tel que  $S_w = \theta/\theta_{sat}$ .

<sup>6</sup> Généralement égal à 2.

La conductivité de la solution (S/m) est toujours reliée à la quantité d'eau présente dans le sol et  $a$  et  $b$  sont des constantes qui caractérisent la transmission  $T$  tel que  $T = a\theta + b$  ; cette transmission prend en compte la tortuosité des lignes de courant et la diminution de la mobilité des ions à la surface solide-liquide. Ainsi, ils réussissent grâce à un modèle assez simple, à modéliser convenablement la non-linéarité de la conductivité apparente.

En 1989, Rhoades et al. proposent un autre modèle plus complexe. En se basant sur les travaux de Sauer (1955), Rhoades et al. (1976) et Shainberg et al. (1980), ils imaginent un modèle à trois chemins électriques :

- via l'interface solide-liquide : le courant se déplace alternativement à travers les particules solides et liquides du milieu, qui sont alors considérées comme une succession de résistances électriques en série. La conductivité correspondante est notée  $\sigma_{ws}$ .
- via la phase liquide : le courant se déplace continuellement au travers de la solution du sol ; la conductivité correspondante est notée  $\sigma_{wc}$ .
- via la phase solide : le courant se déplace à la surface des particules solides correspondant à la conductivité surfacique  $\sigma_s$ .

$$\sigma_a = \frac{(\theta_{solide} + \theta_{ws})^2 \sigma_{ws} \sigma_{solide}}{\theta_{solide} \sigma_{ws} + \theta_{ws} \sigma_{solide}} + \theta_{wc} \sigma_{ws}$$

Où  $\theta = \theta_{ws} + \theta_{wc}$

Avec  $\theta$ , la teneur en eau volumique du milieu ;  $\theta_{solide}$  et  $\sigma_s$ , respectivement la fraction volumique et la conductivité électrique de la phase solide ;  $\theta_{ws}$  et  $\sigma_{ws}$  le contenu en eau volumique des éléments solides-liquides en série et leur conductivité électrique ;  $\theta_{wc}$  et  $\sigma_{wc}$  la fraction volumique de la phase liquide continue, et sa conductivité électrique respectivement.

Bien que ce modèle décrive de façon très fine le comportement électrique, ses paramètres restent très difficiles à déterminer. D'autre part, ce modèle est critiqué pour sa simplification des sols à un circuit électrique (Friedman, 1998), et sa non-conformité aux théories électromagnétiques des processus physiques microscopiques (Tabbagh et al., 2000).

Mualem et Friedman font l'hypothèse en 1991 que, pour un sol à une humidité définie, les lignes de flux d'eau sous l'effet d'un gradient hydraulique sont comparables aux lignes de courant électrique issues d'un gradient de potentiel électrique. Ils ont ainsi déterminé que le même facteur de tortuosité peut être utilisé pour les deux flux.

En s'inspirant de l'expression de la conductivité hydraulique définie par Mualem en 1976, ils définissent une relation pour des sols dont la conductivité de surface est négligeable face à la conductivité de la solution ( $\sigma_w > 6$  mS/cm, Shainberg et al., 1980, Nadler et Frenkel, 1984).



$$\frac{\sigma_a}{\sigma_w} = \frac{\theta^{n+2}}{\theta_s}$$

Où n est un coefficient d'ajustement à calibrer en laboratoires<sup>7</sup>.

Brovelli et Cassiani (2011) ont tenté de combiner conductivité et permittivité électrique des milieux poreux. Ainsi, par analogie aux travaux qu'ils avaient déjà réalisé sur la permittivité, et en reprenant des concepts communément utilisés en science du sol, ils établissent une formule de mélange pour prédire la conductivité électrique d'un échantillon de sol. Ils font intervenir la porosité  $\Phi$  du milieu, la conductivité surfacique  $\sigma_s$  et volumique  $\sigma_w$  (S/m).

$$\sigma_a = \left(\frac{3-\phi}{2}\phi^{m-1}\right)\sigma_{HSU} + \left(1 + \frac{\phi-3}{2}\phi^{m-1}\right)\sigma_{HSL}$$

$$\text{Avec } \sigma_{HSL} = \sigma_s + \frac{\phi}{(\sigma_w - \sigma_s)^{-1} + \frac{1-\phi}{3\sigma_s}}, \quad \sigma_{HSU} = \sigma_w + \frac{1-\phi}{(\sigma_s - \sigma_w)^{-1} + \frac{\phi}{3\sigma_w}} \text{ et } \sigma_w = \sigma_w S_w^n$$

Où HSU et HSL sont respectivement la borne supérieure et inférieure de Hashin et Shtrikman. Ces derniers ont travaillé sur l'homogénéisation de paramètres dans les milieux poreux (1963), et délimitent précisément la gamme de variation du paramètre en question, ici la conductivité électrique.  $S_w$ , le taux de saturation de l'échantillon, m le coefficient de cimentation et n l'exposant de saturation de la loi d'Archie.

Cette liste est loin d'être exhaustive et nombre de modèles ont été développés, notamment en se basant sur la théorie des milieux effectifs, qui assimile un milieu hétérogène (défini par des propriétés macroscopiques) à un milieu homogène équivalent.

### I.3 Propriétés hydriques des sols

#### I.3.1 Notion de potentiel hydrique

Le sol est un milieu poreux. Cette porosité est considérée comme un réseau de capillaires de différents diamètres, rempli d'eau à saturation, ou d'eau et d'air lorsque le sol n'est pas saturé. Le sol apparait alors comme un système à trois phases (solide, eau, air), dont la phase liquide est soumise à un ensemble de forces qui sont à l'origine de sa dynamique dans le milieu (forces de gravité, d'adsorption, de capillarité, etc. qui retiennent ou non l'eau dans le sol). Ainsi, le potentiel hydrique de ce sol est défini comme étant l'énergie nécessaire pour qu'une particule élémentaire d'eau passe de son état lié au sol à un état libre (Hillel, 1974 *L'eau et le sol ; principes et processus*): le potentiel est négatif s'il faut fournir de l'énergie pour extraire l'eau du sol, il sera positif dans le cas contraire. Le potentiel hydrique, noté par convention  $h$ , résulte de la somme de plusieurs potentiels. Le mouvement de l'eau dans le sol résulte d'une différence de potentiel, depuis un potentiel vers un potentiel énergétique moindre, dans le but de rétablir l'équilibre. Les différentes forces susnommées confèrent à l'eau un mouvement

<sup>7</sup> Prendre n = 0.5 si cette calibration est impossible (Mualem et Friedman

multidimensionnel dans le sol. Ce mouvement et forces mises en jeu dépendent de la structure et texture du sol. Par définition, le potentiel hydrique s'exprime en énergie par unité de masse ( $J.Kg^{-1}$ ), mais pour des raisons de commodité, il est le plus souvent exprimé en unité de pression (e.g. Bar, ou hauteur de colonne d'eau équivalente : m) en considérant que l'eau est incompressible et que sa masse volumique est constante (par rapport au potentiel hydrique). Les différents champs de forces s'exerçant sur l'eau dans le sol s'expriment par :

Le potentiel matriciel : dans un sol non saturé, l'eau est retenue par particules de sol sous l'effet des forces de capillarité et d'adsorption. Le potentiel matriciel (noté  $\psi$ ), est donc négatif et traduit alors l'intensité avec laquelle un sol non saturé retient l'eau. Dans ce potentiel interviennent d'une part les forces de capillarité dans les pores, liées à la tension superficielle de l'eau aux interfaces eau/solide/air et fonction des diamètres des pores et d'autre part les forces d'adsorption exercées par les surfaces solides sur l'eau (enveloppe d'hydratation).

Le potentiel de gravité ( $\phi_G$ ) provient des champs de pesanteur qui s'applique sur les molécules d'eau. En s'élevant par rapport à un plan de référence, une particule possède de l'énergie potentielle de gravité dont la valeur (si  $\phi$  est exprimée en Colonne d'eau équivalente) correspond à la cote altimétrique :  $\phi_G = z$  si elle se trouve au dessus du plan de référence ;  $\phi_G = -z$  si elle se trouve au dessous.

Généralement pour les sols, on ne considère que les deux potentiels précédents pour estimer le potentiel hydrique total. Toutefois d'autres potentiels peuvent intervenir dans la dynamique de la phase liquide, en fonction de la concentration de la solution, de la présence de barrières hémiperméables (comme des racines ou des couches d'argile – potentiel osmotique), de la disparition de la phase gazeuse (sol saturé), de la présence de champ électriques, etc.

Ainsi, dans le cas particulier d'un sol saturé par exemple, il n'y a plus de phase gazeuse, la phase liquide est continue et les forces de capillarité n'interviennent pas dans la masse liquide. Le potentiel matriciel n'intervient donc plus et est remplacé par un terme de pression hydrostatique qui devient prépondérant. Contrairement au potentiel matriciel, ce terme est positif.

### I.3.2 Propriétés hydrodynamiques des sols

L'hydrostatique et la dynamique de l'eau dans le sol font intervenir deux propriétés fondamentales : la courbe de rétention et la conductivité hydraulique

La courbe de rétention : Dans un sol non saturé, teneur en eau et potentiel matriciel varient simultanément, donnant lieu à une relation caractéristique qui permet de décrire la statique de l'eau dans le sol. Cette relation, appelée courbe de rétention, est représentée sous la forme d'une fonction qui exprime la relation entre teneur en eau ( $\theta$  en  $m^3.m^{-3}$ ) et potentiel matriciel ( $\psi$  en m). De façon générale, le potentiel matriciel diminue (il est négatif, et sa valeur absolue augmente donc) quand la teneur en eau décroît, représentant le fait que moins il y a d'eau dans le milieu, plus il est difficile de l'extraire. Comme ce sont les forces de capillarité et d'adsorption qui entrent en jeu ici, la texture et structure du sol (surface et type/taille des particules, géométrie et arrangement des pores) influent directement sur la forme de la courbe

de rétention. C'est pourquoi cette dernière est propre à chaque sol et est obtenue de façon expérimentale.

Cette propriété de rétention de l'eau des sols a fait l'objet de nombre d'études depuis les années 60. Initialement prévu à des fins agronomiques, l'état hydrique était estimé à des potentiels ponctuels (capacité au champ, point de flétrissement permanent) pour faire des calculs de stocks (le sol étant assimilé à un réservoir). Puis l'analyse de la rétention a évolué avec les progrès liés à la modélisation des transferts d'eau dans le sol, et elle est aujourd'hui modélisée en tous points. Il existe plusieurs relations plus ou moins empiriques décrivant la courbe de rétention, dont les paramètres sont en fonction du type de sol (la texture et la structure).

Le modèle de Van Genuchten (van Genuchten, 1980) est couramment utilisé:

$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = (1 + (\alpha\psi)^n)^{-m}$$

Avec  $\theta_s$ , la teneur en eau à saturation et  $\theta_r$ , la teneur en eau résiduelle (en  $\text{m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ ) ; n, (sans dimension) et  $\alpha$  (en  $\text{m}^{-1}$ ) sont des paramètres d'ajustement et  $m = 1 - 1/n$  ;  $1/\alpha$  est lié au point d'entrée d'air dans le sol tandis que m (ou n) est lié à la pente de la courbe de rétention.

La conductivité hydraulique : elle est analogue à celle de la loi de Darcy en milieu saturée, mais avec un comportement non linéaire en fonction de la teneur en eau ou du potentiel matriciel du milieu. En effet en fonction du degré de désaturation, les pores remplis d'eau actifs dans la conduction de l'eau vont avoir un diamètre plus ou moins important (les pores les plus gros se vidant les premiers) et la tortuosité de l'écoulement variant considérablement. Ces facteurs font que lorsque le milieu se désature la conductivité hydraulique chute rapidement avec la décroissance de la teneur en eau.

## II. Matériel et méthodes

### II.1. Objectifs des dispositifs expérimentaux et des sols investigués

Dans l'étude de l'état hydrique de différents types de sol par des mesures électriques, il convient d'utiliser une méthode adaptée aux milieux. Ce dispositif doit permettre de mesurer pour différents potentiels hydriques la résistivité électrique du milieu par injection d'un courant et mesure d'une différence de potentiel. L'objectif étant de mettre en évidence pour chaque sol l'évolution de la conductivité électrique avec l'intensification du potentiel matriciel. A chaque mesure électrique, le courant est injecté à trois fréquences différentes : 4213 Hz, 83,26 Hz et 3,91 Hz qui ne sont pas des multiples de 50 Hz, ainsi les manipulations ne sont pas perturbées par la fréquence du réseau électrique. Ces fréquences ont été choisies (i) car les fréquences de l'ordre du kHz sont généralement utilisées dans les mesures en 2 électrodes (effet négligeable de la polarisation), les fréquences de l'ordre de la centaine de Hz sont utilisées dans les appareils de mesure sur le terrain (sondage électrique) en pseudo-continu, et les fréquences de l'ordre du Hz nous donnent une référence en courant quasi-

continu. (ii) on pourra également estimer une influence éventuelle de la fréquence sur la résistivité mesurée en fonction des différents sols.

La gamme de sol étudiée se veut être la plus large possible ; de fait, ces derniers ont un comportement différent face à la dessiccation (effet « retrait-gonflement » des argiles, tassement des sables). Plusieurs dispositifs ont été développés, suivant le matériau étudié et la géométrie des échantillons. Il s'agit de s'assurer du contact permanent entre milieu étudié et électrodes, tout en préservant l'échantillon d'éventuelles perturbations. Dans le cas de matériaux meubles comme le sont les sols, et pour une analyse en 3D, trois dispositifs de mesure ont été proposés ici :

- 4 électrodes en ligne, régulièrement espacées, injectent le courant et mesurent la différence de potentiel à la surface de l'échantillon (cf. II.3.1.).
- 4 électrodes (mesure et injection) opposé deux à deux par rapport au centre du cylindre, entrent en contact sur l'épaisseur de la cellule (cf. II.3.2.).
- 2 plaques circulaires à chaque extrémité de la cellule injectent le courant et mesure la différence de potentiel (cf. II.3.3.).

L'étude cherche à caractériser des échantillons non remaniés, dans l'espoir d'analyser au mieux les caractéristiques *au champ* des sols investigués. Ainsi l'échantillonnage au champ s'efforce de perturber au minimum les prélèvements. Pour se faire, un cylindre de PVC de 10 cm de diamètre et 3 cm de hauteur est enfoncé le plus verticalement possible dans la subsurface du sol. L'échantillon de sol est arasé aux deux extrémités, puis il est conservé entre deux plaques qui le maintiennent jusqu'aux manipulations en laboratoire. Pour chaque sol, trois échantillons sont prélevés dans des cellules, en plus d'un petit volume de sol qui sera récolté pour analyse granulométrique.

Une fois au laboratoire, une toile de maille très fine est collée à l'une des extrémités de deux cellules de chaque sol, dans le but de retenir le milieu lors des manipulations. Puis ces cellules sont saturées avec une solution de  $\text{CaCl}_2$  de conductivité électrique connue ( $1700 \mu\text{S}/\text{cm}$ ). Naturellement, les ions calcium sont présents à une telle concentration dans la solution du sol. Le niveau de cette solution de saturation monte progressivement dans les bacs, jusqu'à ce que l'ensemble des cellules soient immergées ; le but étant d'amorcer une saturation ascendante et d'éviter ainsi de coincer de l'air dans les pores. Les cellules restent immergées plusieurs jours (environ une semaine) dans la solution de  $\text{CaCl}_2$ . Les échanges ioniques sol-solution modifient la concentration de la solution, c'est pourquoi la conductivité de cette eau de saturation est régulièrement mesurée (grâce à un conductivimètre WRW LF 320) et la solution changée jusqu'à ce qu'elle se stabilise autour des  $1700 \mu\text{S}/\text{cm}$  voulus. Une fois saturés, les échantillons sont soumis aux mesures électriques à saturation, et aux différents potentiels matriciels imposés. Toutes les manipulations sont réalisées à une température ambiante de  $23^\circ\text{C}$  en moyenne. Les troisièmes cellules sont maintenues entre leurs deux plaques et conservées au réfrigérateur pour une étude de la conductivité hydraulique des sols.

Comme annoncé plus haut, l'objectif du stage est de calibrer une méthode de mesure électrique sur des sols différents. Dans cette optique de diversification des milieux, sept sols

ont été prélevés, choisis pour leurs caractéristiques texturales et structurales variées. Parmi c'est sept sols, six proviennent de la région d'Avignon.

- Le terrain du lysimètre (Lysi), parcelle d'étude du domaine Saint-Paul de l'INRA PACA, est un sol argileux limoneux.
- Le sol de Bonpas (Bon), est un sol limoneux argilo-sableux.
- le sol des Vignères (Vign) est un sol argileux.
- Le sol de Tavel est sableux.
- La parcelle 1J du domaine du Merle, en Crau est un sol limoneux argilo-sableux.
- Le sol de Velleron est un sol calcaire limoneux argilo-sableux.

En plus de ces six sols régionaux, deux échantillons d'un sol argilo-sableux à limoneux argilo-sableux, provenant du Laos (Laos 1 et 2) s'ajoutent à la liste des sols étudiés.

La texture est détaillée pour chaque sol dans les tableaux suivant<sup>8</sup>.

	LYSI	BON	Laos 1	Laos 2	VIGN	TAV	CRAU	VEL
Date de prélèvement	27/04/11	02/05/11	15/02/06	15/02/06	03/05/11	04/05/11	05/05/11	06/05/11
Profondeur de prélèvement (cm)	5-8	5-9	17-24	17-24	5-9	13-19	3-5	11-15
g d'argiles/Kg de sol (< 2 µm)	388	234	248	268	539	34	240	258
g de limons/Kg de sol (2/50 µm)	520	343	250	244	363	40	264	444
g de sables/Kg de sol (50/2000 µm)	92	423	502	488	98	926	496	298
total	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000

Tableau 1 Granulométrie sans décarbonatation

	LYSI	BON	Laos 1	Laos 2	VIGN	TAV	CRAU	VEL
g d'argiles/Kg de sol (< 2 µm)	337	214	248	276	465	50	252	57
g de limons/Kg de sol (2/50 µm)	247	238	242	229	200	34	238	11
g de sables/Kg de sol (50/2000 µm)	49	318	508	494	68	742	508	6
g de calcaire/Kg de sol (CaCO <sub>3</sub> )	361	227	1,5	< 1	258	174	2,1	920
total	994	997	999,5	999	991	1000	1000,1	994
CEC Metson (cmol/Kg)	10,7	9,5	4,61	4,55	19,6	1,58	13,3	3,18

Tableau 2 Granulométrie après décarbonatation

<sup>8</sup> Cf. Annexe 1

## II.2. Mesures hydriques sur les sols

### II.2.1. Rétention

Pour imposer les potentiels matriciels choisis, et ainsi déterminer la courbe de rétention et mesurer les propriétés électriques des échantillons au degré de dessiccation voulu, deux dispositifs sont utilisés :

- les tables à succions, peuvent imposer des potentiels variant de 0 (saturation) à - 1 m. Les échantillons initialement saturés sont posés sur un lit de sable fin (de la silice) raccordé à une réserve d'eau dont le niveau est réglable. En abaissant cette réserve au dessous de la surface de la silice, on impose au milieu sableux (et par conséquent à tous les milieux qui se trouvent en contact au dessus) une différence de charge qui provoquera un flux d'eau de la charge supérieure (le lit de sable et les échantillons saturé) vers la charge moindre (le réservoir au dessous de la surface du sable) : le sable et les échantillons se désaturent. La hauteur entre la surface du lit de sable et le réservoir correspond au potentiel imposé. C'est pour quoi le susnommé réservoir est fixé à une règle verticale, permettant ainsi d'imposer précisément des potentiels. Les temps d'équilibre sont ici relativement courts, de l'ordre de 2 à 3 jours pour les potentiels proches de 1 m.
- Les presses de Richards, imposent de plus fortes succions (entre - 1 m et - 150 m). Les échantillons initialement saturés<sup>9</sup> sont disposés sur une plaque poreuse, elles même saturées en eau. Ces plaques sont installées dans des enceintes qui ferment hermétiquement et dans lesquelles de l'azote est injectée sous pression : la pression qui s'exerce sur la surface supérieure de l'échantillon, impose à l'eau la moins liée de se libérer, par la surface inférieure ; c'est la plaque poreuse qui récupère cette eau et l'évacue hors du dispositif. La pression appliquée est donc l'opposé du potentiel imposé à l'échantillon. Ici, les temps d'équilibre sont beaucoup plus longs et peuvent atteindre une dizaine de jours (voire plus).

Depuis la saturation, et à chaque potentiel matriciel imposé les échantillons sont pesés et la conductivité électrique est mesurée selon le(s) dispositif(s).

Par la suite le potentiel matriciel sera exprimé en valeur absolue, pour éviter les valeurs négatives (en particulier dans les graphes logarithmiques).

### II.2.2. Conductivité hydrique

La courbe de conductivité hydraulique traduit la capacité du sol à transmettre l'eau. A saturation, tous les pores sont remplis d'eau, et l'ensemble des capillaires devient le réseau d'écoulement de l'eau. Ce réseau n'étant pas discontinu (saturation), la conductivité hydraulique y est maximale et est appelée conductivité hydraulique à saturation ( $K_{sat}$ ). En se désaturant, les plus gros pores du sol se vident en premier, et l'eau s'écoule donc par des pores de plus en plus petits. Les forces de frottement augmentant, l'écoulement va devenir de plus en plus difficile. La conductivité hydraulique décroît donc fortement avec la teneur en eau (ou le potentiel matriciel).

---

<sup>9</sup> Du moins, présentant un potentiel matriciel moindre (en valeur absolue) que celui qui sera appliqué.

## II.3. Trois dispositifs de mesure de la résistivité à l'essai

### II.3.1. Quatre électrodes régulièrement espacées sur un axe diamétral

Basée sur la configuration Wenner, deux électrodes (A et B) injectent le courant aux extrémités pendant que les deux électrodes au centre (M et N) mesurent la tension (cf. Figure 4 et Figure 5). L'espacement inter-électrode est de 2 cm. Cet espacement a été évalué à partir de la simulation directe de transfert de courant avec le logiciel Res2Dmod (Locke, 2002) en recréant la géométrie du milieu.

Dans le travail de spécialisation des propriétés électriques, à chaque potentiel matriciel imposé plusieurs mesures sont réalisées suivant trois axes, représentés en pointillés sur le schéma ; et sur chaque axe, les trois fréquences d'injection.

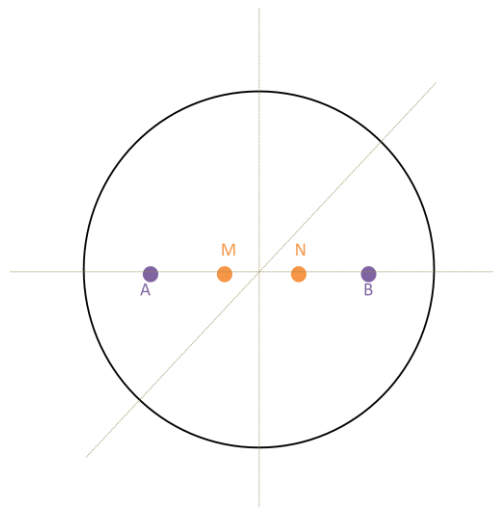


Figure 4 Schéma du dispositif Wenner, vue de dessus

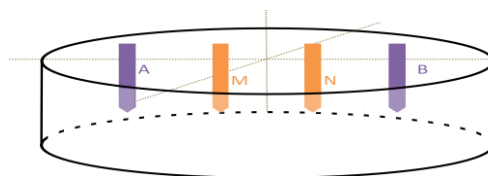


Figure 5 Schéma du dispositif Wenner, vue de profil

Un multimètre – Fluke, placé en série entre le générateur et l'électrode A mesure l'intensité du courant et un voltmètre HP relié aux électrodes M et N mesure la différence de potentiel. Ainsi à chaque mesure sont obtenus l'intensité  $I_i$  (en A) et la différence de tension  $V_i$  (en V). D'après la loi d'Ohm, la résistance  $R_i$  correspondant se calcule comme suit :

$$R_i = \frac{V_i}{I_i}$$

Pour s'affranchir de trop fortes perturbations par le bruit ambiant lors des mesures, il a été établi que l'intensité mesurée ne devait pas être inférieure à 0,1 mA et la différence de tension inférieure à 100 mV. Pour s'en assurer, la tension injectée aux électrodes A et B doit être

suffisante (de l'ordre du volt) voire plus si nécessaire, pour les sols les plus résistants. Pour des tensions d'injection comprises entre 0 et 5 Vpp (volt pic à pic) un pont RLC HIOKI injecte le courant. Pour des tensions supérieures à 5 Vpp un amplificateur maison et un générateur de signaux injectent le courant. Il est possible de choisir pour chaque appareil l'injection souhaitée.

Les diverses mesures de résistance obtenues permettent de calculer la résistance moyenne  $\overline{R}_i$  par fréquence. Puis les résistances moyennes permettent à leur tour de calculer la résistivité  $\rho$  (en  $\Omega.m$ ) de l'échantillon par fréquence. Le calcul de  $\rho$  dépend du système de mesure utilisé, ici Wenner.

$$\rho = \overline{R}_i 2\pi a$$

Où  $\overline{R}_i$  est la résistance moyenne du milieu par fréquence, en  $\Omega$ , et à l'espace inter électrode (en m). La conductivité  $\sigma$  (en S/m) de l'échantillon par fréquence est obtenue en inversant la résistivité précédemment calculée.

### II.3.2. Quatre électrodes de côté

Inspiré par le design de Rhoades et al. (1976), quatre électrodes, opposées deux à deux par rapport au centre du cylindre entrent en contact à mi-hauteur de l'échantillon. Ici, les axes AN et BM sont perpendiculaires (cf. Figure 6 et Figure 7). A l'instar du dispositif Wenner, les électrodes A et B injectent le courant, et les électrodes M et N mesurent la différence de potentiel. Une rotation de  $45^\circ$  du dispositif permet de réaliser quatre mesures différentes sur une même cellule, favorisant l'analyse tridimensionnelle de chaque échantillon, et à chaque position sont effectuées trois mesures : une par fréquence.

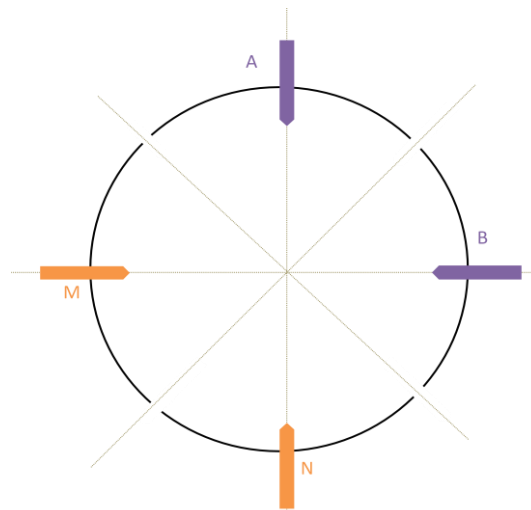


Figure 6 Schéma du dispositif "4 électrodes de côté", vue de dessus



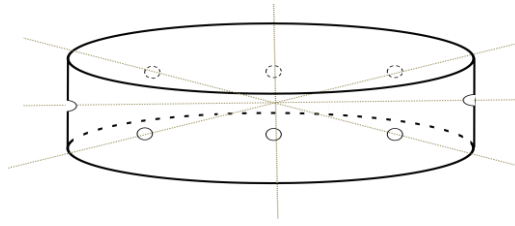


Figure 7 Schéma du dispositif "4 électrodes de coté", vue de profil

Par les mêmes procédés, ces mesures permettent de calculer la résistance moyenne par fréquence, dont l'inverse donne la conductance  $G$ .

$$G = \frac{1}{R}$$

Avec la conductance en S et R la résistance en  $\Omega$ .

Contrairement au dispositif Wenner, il n'existe pas pour cette méthode de formule analytique simple permettant de calculer la résistivité à partir de la résistance. Toutefois, à un facteur géométrique près (qu'il est possible d'évaluer de façon empirique en remplaçant le sol par l'eau de résistivité connue dans le cylindre), la résistance et la résistivité évolue de façon similaire. Cette proportionalité ne biaise donc pas l'analyse de la conductance, dont l'évolution en fonction du potentiel matriciel est corrélative à celle de la conductivité.

### II.3.3. Deux plaques circulaires

Ces deux plaques métalliques, circulaires, dont le diamètre correspond à celui de la cellule, constituent à la fois les électrodes d'injection de courant et de mesure de la tension ; l'une en contact avec la surface de l'extrémité supérieure de l'échantillon, l'autre avec la surface de l'extrémité inférieure, tel que le courant circule d'une plaque à l'autre en traversant tout le volume de sol. Ici, un seul appareil est utilisé : un pont RLC HIOKI, qui injecte un courant à tensions et fréquences connues aux bornes des électrodes, et mesure directement la résistance du milieu depuis ces mêmes électrodes.

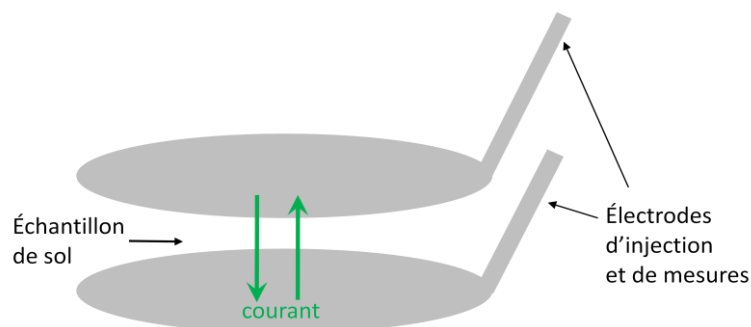


Figure 8 Schéma du dispositif "2 plaques", vue de profil

A chaque potentiel hydrique, trois mesures sont faites : une par fréquence. Pour assurer le contact entre le sol et les électrodes, un papier filtre saturé de solution  $\text{CaCl}_2$  à  $1700 \mu\text{S}/\text{cm}$  est placé entre l'électrode et la surface de l'échantillon.

Pour calculer la résistivité du milieu à partir des mesures de résistance, il suffit de la multiplier par le coefficient géométrique K approprié. Dans un dispositif à deux électrodes, K

vaut :

$$K = \frac{S}{L} \quad \text{Soit,} \quad \rho = \frac{S}{L} R$$

Avec K en m ; S, la surface en m<sup>2</sup> ; L, la longueur de l'échantillon, en m, et R la résistance en Ω.

### III. Résultats

#### III.1. Essais des trois protocoles sur un échantillon test

La résistivité électrique d'un échantillon test a été mesurée selon les trois dispositifs à plusieurs potentiels matriciels (à saturation, 60 cm, 10 m et 150 m) dans le but de déterminer le (s) dispositif (s) le (s) mieux adapté (s).

##### III.1.1. Quatre électrodes en ligne

La figure 9 met en relation l'évolution de la conductivité en fonction du potentiel matriciel pour cet échantillon test suivant le dispositif « type Wenner ».

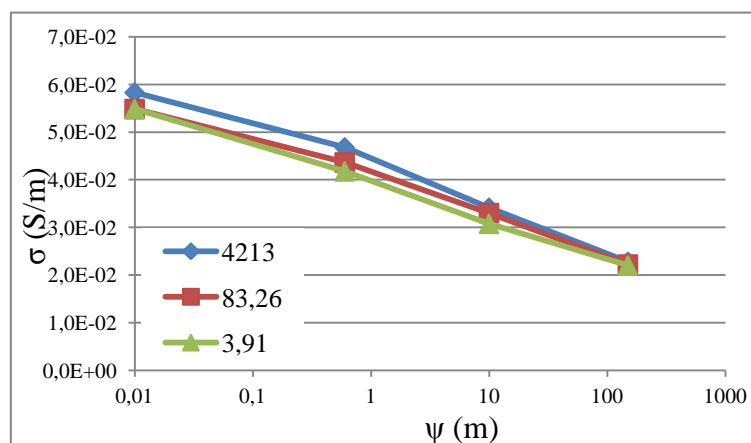


Figure 9 Evolution de la conductivité électrique en fonction du potentiel matriciel, pour l'échantillon test, par le dispositif *Wenner*

Tout d'abord, ces graphiques mettent en évidence le fait que, quelque soit la fréquence, la conductivité électrique du milieu décroît à mesure que le potentiel matriciel s'intensifie. Cette première conclusion concorde avec les théories énoncées plus haut puisque l'amplification du potentiel matriciel est directement liée au degré de dessiccation du sol, qui augmente lui aussi. Les études ont montré que la diminution de la teneur en eau d'un milieu réduit sa conductivité électrique (cf. § « teneur en eau »).

Le principal problème rencontré ici, et généralement constant en mesure électrique, est le problème de contact entre les électrodes et le sol, qui peut être à l'origine de la dispersion des mesures par la fréquence. En effet, les électrodes de 3 mm de diamètre dont l'extrémité est taillée en pointe ont tendance à perturber la surface du sol et réduisent le contact. D'autant que les sols sont sujets à la déformation avec la modification de leur teneur en eau (effet « retrait-gonflement » des argiles, tassement des sables) et plus le sol est sec, plus il conserve la

déformation. Toutefois, il est possible de s'affranchir de cette contrainte en utilisant un gel conducteur déposé à chaque extrémité qui assurera le contact entre l'électrode et le milieu.

Pour étudier l'impact du gel, des essais comparatifs, avec et sans, ont été réalisés sur deux échantillons de sol non remanié. Les graphiques suivants, qui présentent les résultats, prouvent qu'en favorisant le contact, le gel diminue la dispersion par la fréquence.

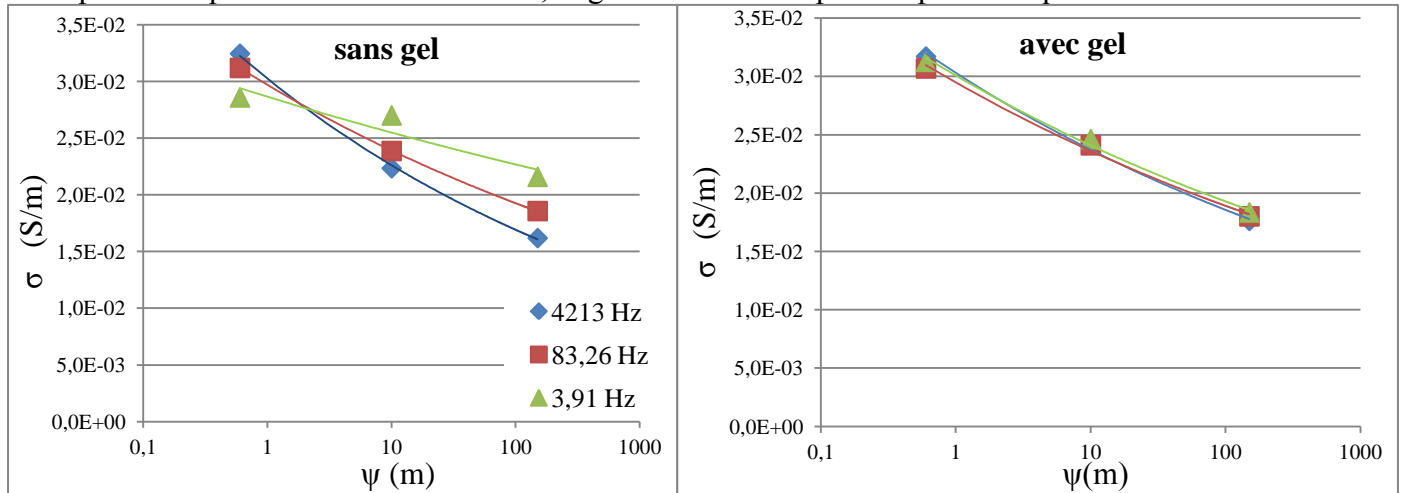


Figure 10 Mesures de la conductivité de l'échantillon test; essais avec gel et sans gel

Enfin, la fiabilité de ce dispositif a été testée expérimentalement. Il s'agit de comparer les conductivités électriques d'eaux à différentes concentrations<sup>10</sup> ioniques mesurées d'une part avec le conductivimètre, et d'autre part, avec le dispositif « quatre électrodes ». Les eaux dont la conductivité était préalablement mesurée par le conductivimètre, était versée dans une cellule de PVC (comme celle utilisée pour le sol mais bouchée hermétiquement par le bas), puis la conductivité était mesurée à nouveau par le dispositif type Wenner (les quatre électrodes entrant en contact avec l'eau).

Dans un premier temps, la corrélation entre les mesures par conductivimètre et par le dispositif est mise en évidence, sans prendre en compte l'impact de la tension d'injection. Les graphiques qui suivent montrent que pour chaque fréquence, il y a deux corrélations possibles, en fonction de la concentration de la solution : l'une pour les conductivités inférieures à 330  $\mu\text{S}/\text{cm}$  et l'autre pour les conductivités supérieures 330  $\mu\text{S}/\text{cm}$ .

<sup>10</sup> Allant de 10  $\mu\text{S}/\text{cm}$  à 10  $\text{mS}/\text{cm}$ .

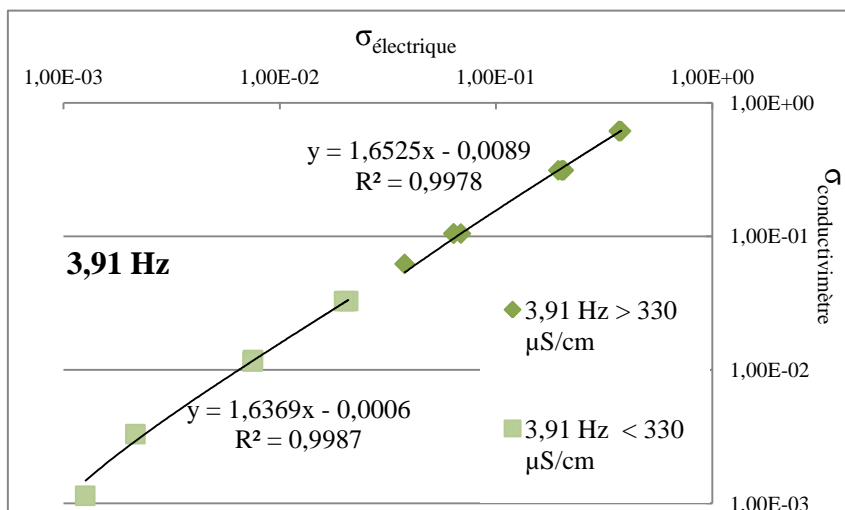
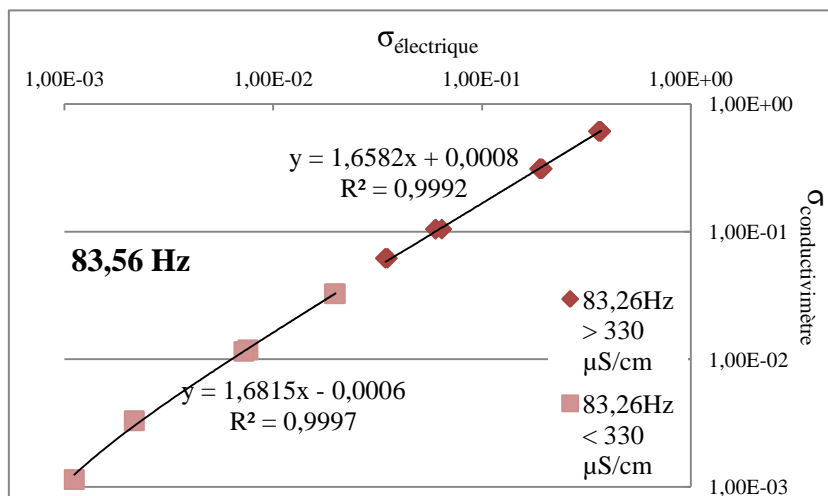
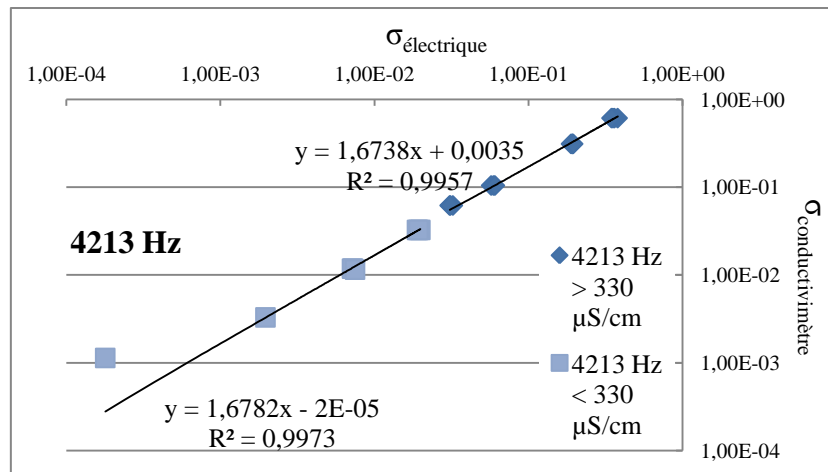


Figure 11 Corrélation entre conductivité mesurée par le dispositif et conductivité mesurée par le conductivimètre, à 4213 Hz, 83,26 Hz et 3,91 Hz

Toutefois, comme indiqué plus haut, la tension d'injection impacte les mesures. Il semble donc indispensable d'intégrer ce paramètre dans l'étude électrique. Ainsi, en prenant en compte la tension d'injection, 6 formules empiriques sont établies : à chaque fréquence, une fonction pour les conductivités inférieures à 330 μS/cm, et une pour les conductivités supérieures à 330 μS/cm. Les 6 fonctions et leurs coefficients respectifs sont présentés en annexe 2, elles sont du type :

$$\sigma_{\text{prévisionnel}} = (aV + b) \times \sigma_{\text{électrique}} + (cV + d)$$

Elles donnent de très bons résultats comme le prouvent les graphiques suivants qui présentent la conductivité mesurée par le conductivimètre ( $\sigma_{\text{conductivimètre}}$ ) en fonction de la conductivité prévisionnelle ( $\sigma_{\text{prévisionnel}}$ , calculé suivant les formules). A chaque fois, les courbes de tendance sont très proches de la droite  $y = x$ .

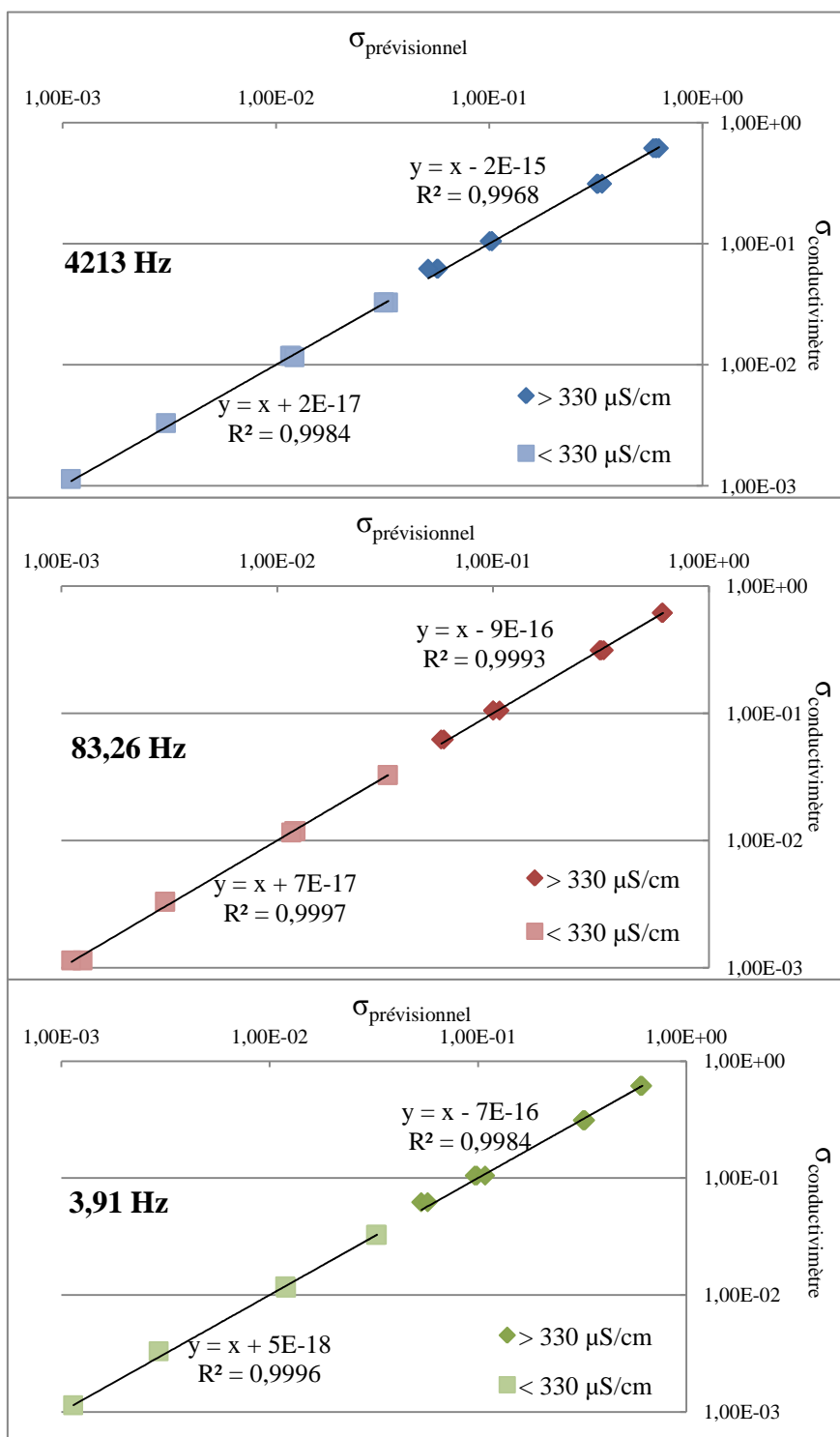


Figure 12 Corrélation entre conductivité prévisionnelle et conductivité mesurée par le conductivimètre, à 4213 Hz, 83,26 Hz et 3,91 Hz; en intégrant la tension d'injection à la mesure électrique

### III.1.2. Quatre électrodes de coté

Les données obtenue par ce dispositif permettent d'établir un graphique, qui exprime l'évolution de la conductance en fonction du potentiel matriciel, à chaque une des trois fréquences. Plus le potentiel s'intensifie, plus la conductance diminue, ce qui concorde avec la théorie.

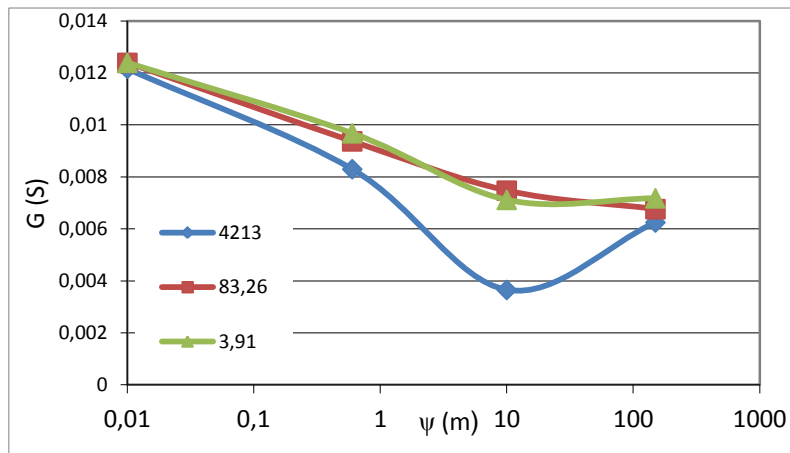


Figure 13 Evolution de la conductance en fonction du potentiel matriciel, pour l'échantillon test, par le dispositif "4électrodes de coté"

Toutefois, cette méthode est difficile à manipuler et ne semble pas appropriée aux matériaux étudiés. Les sols, trop meubles, sont sujets à de fortes perturbations. En effet, les électrodes qui entrent en contact latéralement à travers le cylindre de PVC (cf. schéma) sont montées sur ressort forçant l'intrusion de celles-ci dans le sol. La pression qu'elles exercent déforme le milieu et réduit la surface de contact au fur de la dessiccation, ce qui biaise les mesures de résistance. L'utilisation d'un gel conducteur semble inconcevable ici ; étant donné le petit diamètre de l'orifice par lequel l'électrode traverse la cellule en PVC (5 mm), il est impossible de déposer le gel et le retirer efficacement et sans perturber le sol.

Le graphique suivant met en évidence le manque de corrélation entre les résultats obtenus par la méthode « quatre électrodes en ligne » et « quatre électrodes de côté ». Cette corrélation est assez bonne pour les mesures à 83,26 Hz, mais les marges d'erreur pour les mesures à 4213 Hz et 3,91 Hz sont trop importantes pour considérer la méthode « quatre électrodes de côté » comme fiable. Cette méthode semble donc inexploitable dans ce cas ; elle ne sera pas retenue par la suite.

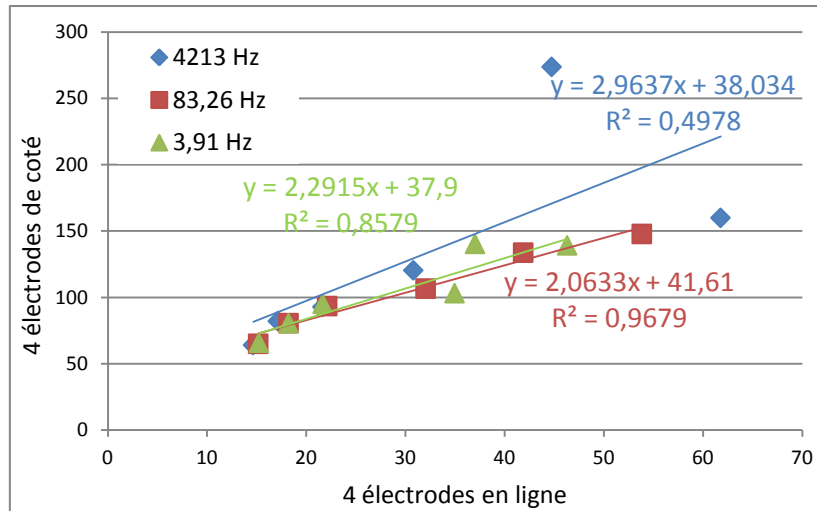


Figure 14 Corrélation entre le dispositif Wenner et "4 électrodes de coté"

### III.1.3. Deux plaques

Les mesures synthétisées dans les graphiques suivants mettent en évidence une pertinence dans les résultats. En effet, à chaque fréquence la conductivité du milieu diminue avec l'augmentation du potentiel matriciel, et donc du degré de dessiccation du milieu. Toutefois, la polarisation à laquelle sont sujettes les plaques dans un système à deux électrodes, entraîne la dispersion des mesures par la fréquence, d'où l'intérêt de travailler avec plusieurs fréquences, qui atténuent plus ou moins la polarisation.

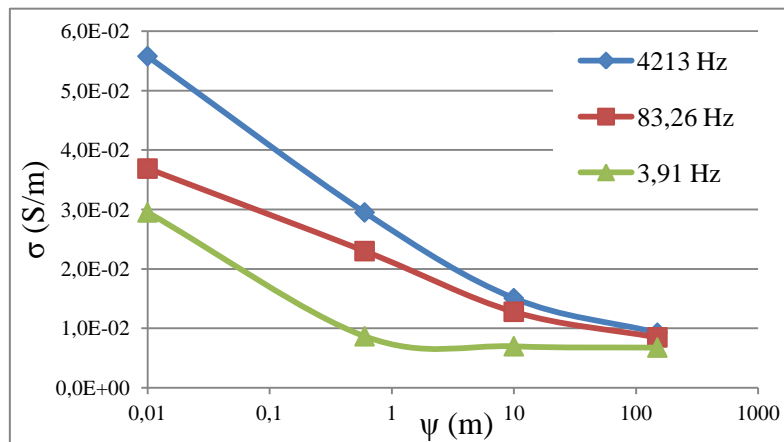


Figure 15 Evolution de la conductivité en fonction du potentiel matriciel, pour l'échantillon test, par le dispositif "2 plaques"

D'autre part, comme le prouve le graphique qui compare les conductivités par la méthode « quatre électrodes en ligne » et la méthode « deux plaques », il y a une bonne corrélation entre ces deux dispositifs.

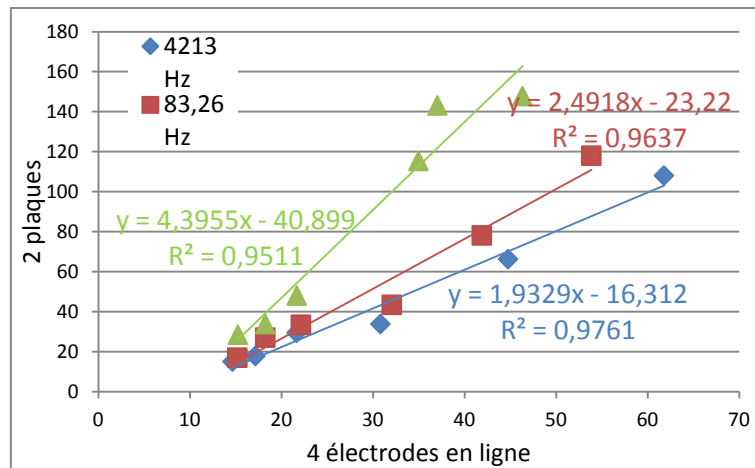


Figure 16 Corrélation entre le dispositif Wenner et "2 plaques"

Le contact a, ici aussi, causé quelques problèmes : la plaque qui n'est pas parfaitement plate n'entre pas en contact sur toute sa surface et la rétraction du sol à fort degré de dessiccation déforme la surface de l'échantillon. Pour pallier à ce problème, une masse est déposée sur l'électrode supérieure afin d'exercer une pression constante et favoriser ainsi le contact électrode – papier filtre – sol. La variation de la masse, et donc de la pression qui s'exerce sur les électrodes, fait varier le contact et donc les mesures de résistance pour un même potentiel matriciel. C'est pourquoi la même masse doit être appliquée à chaque fois, ici 1500g. D'autre part ce dispositif présente l'avantage de ne pas perturber la surface de l'échantillon, contrairement aux deux autres, où les électrodes pénètrent dans le sol.

### III.2. Mesure des propriétés électriques des sols échantillonnés

Les protocoles énoncés dans II. et rectifiés par les résultats de III.1. pour les dispositifs *Wenner* et *deux plaques* ont été appliqués pour les 14 échantillons. Ils ont été pesés et mesurés aux potentiels matriciels suivant : saturation, 3 cm, 10 cm, 30 cm, 50 cm, 1 m, 2 m, 5 m, 10 m, 20 m et 40 ou 50 m.

#### III.2.1. Courbes de rétention

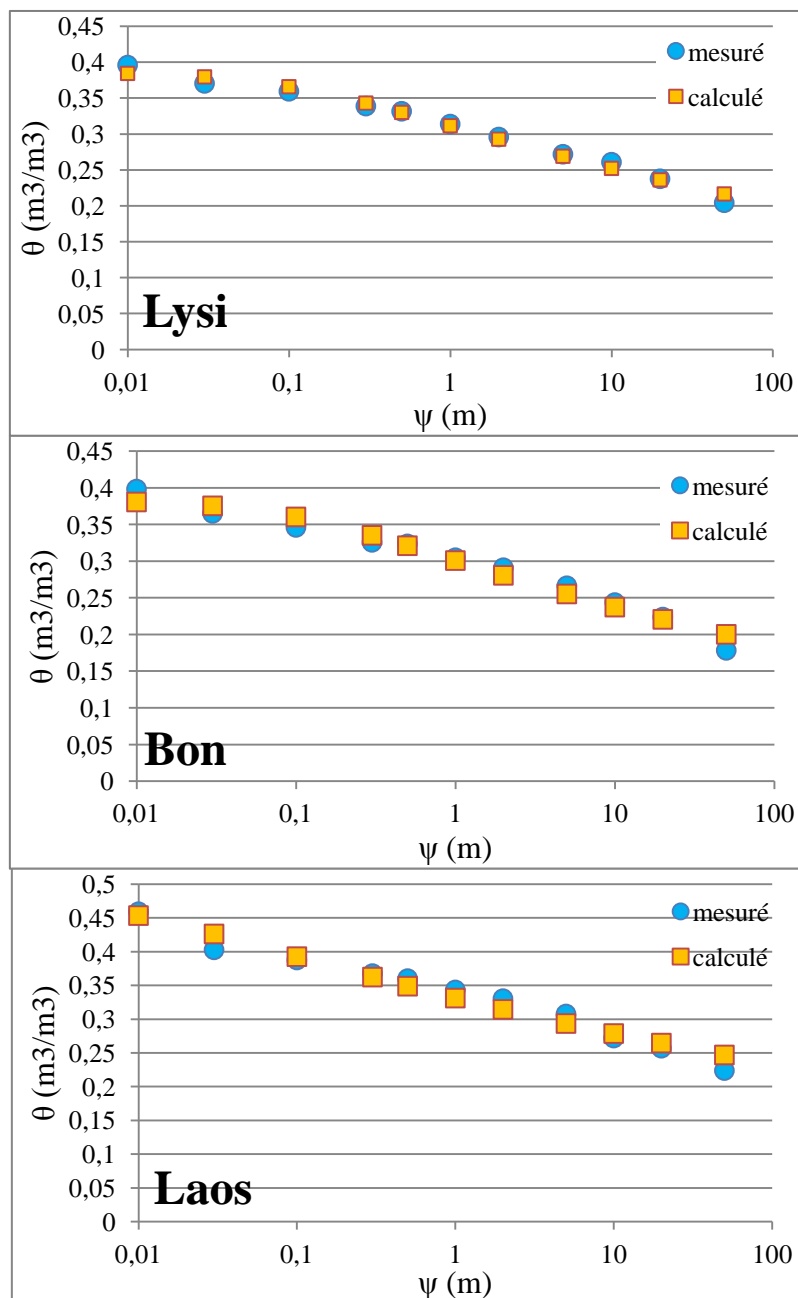
L'évolution pondérale des échantillons présentés en annexe 3 permet de s'assurer de la perte en eau au cours de l'expérience. Ces données ont permis de réaliser la courbe de rétention de chacun des sols (en faisant la moyenne des deux échantillons). La forme de ces courbes reflète la désaturation de chaque échantillon (d'abord les macropores puis les micropores). Les sols sableux retiennent peu l'eau et se désaturent très rapidement. Les courbes de Tavel sont caractéristiques des sables (avec une dispersion relativement faible de la taille des particules et de la taille des pores associés) : elles décroissent par paliers. Une fois que le point d'entrée d'air est dépassé dans les capillaires, ils se vident sans qu'une autre force ne les retienne et la cassure correspond au moment où les plus gros capillaires se vident *d'un coup*. C'est le seul sol qui est quasiment désaturé à la fin de l'expérience (teneur en eau avoisinant  $0 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ ). Les échantillons de Velleron ont le même type de comportement, mais amoindri, de par sa composition assez spécifique où plus de 99% des particules solides sont du  $\text{CaCO}_3$ . Toutefois, la répartition de la taille des pores est ici plus large, c'est pourquoi la cassure est plus atténuée.



La texture des autres sols est d'avantage constituée de particules fines ; ils ont donc tendance à mieux retenir l'eau, comme le prouve la décroissance plus progressive de leurs courbes de rétention. Les échantillons des Vignères ont une courbe caractéristique des argiles, où l'important pouvoir d'adsorption lie fortement l'eau aux particules solides : la pente de la courbe de rétention est très faible ici.

Ensuite, les paramètres d'ajustement du modèle de Van Genuchten ont été déterminés en calant au mieux la courbe calculée à la courbe mesurée.

$$\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = (1 + (\alpha\psi)^n)^{-m}$$



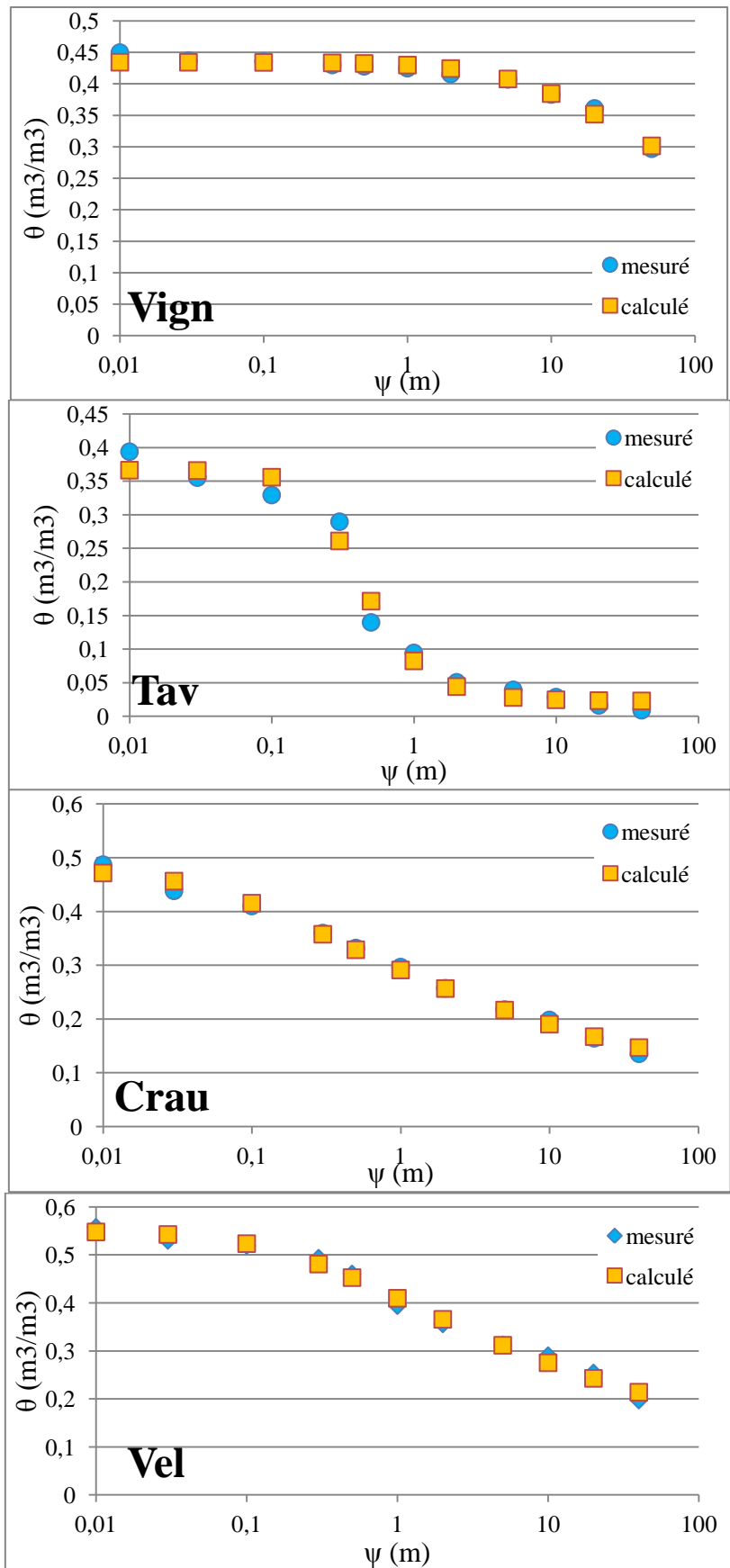


Figure 17 Courbe de rétention des sols étudiés

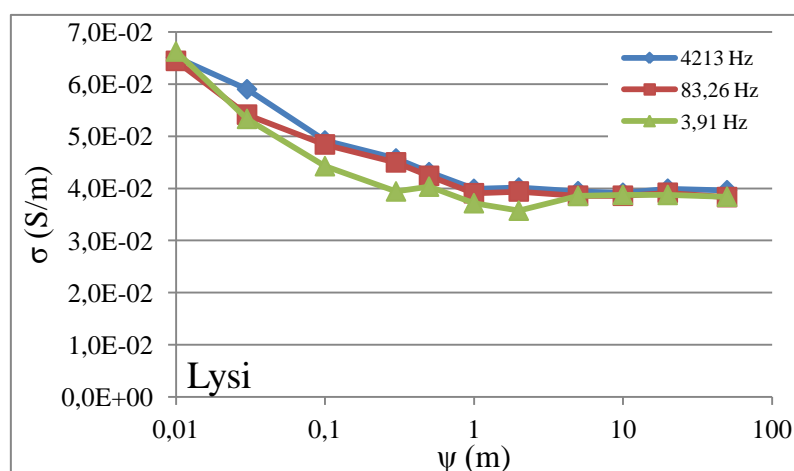
Les paramètres d'ajustement sont récapitulés dans le tableau suivant ; la somme des écarts au carré (entre  $\theta$  mesuré et  $\theta$  calculé selon le modèle de Van Genuchten) confirme le bon ajustement du modèle.

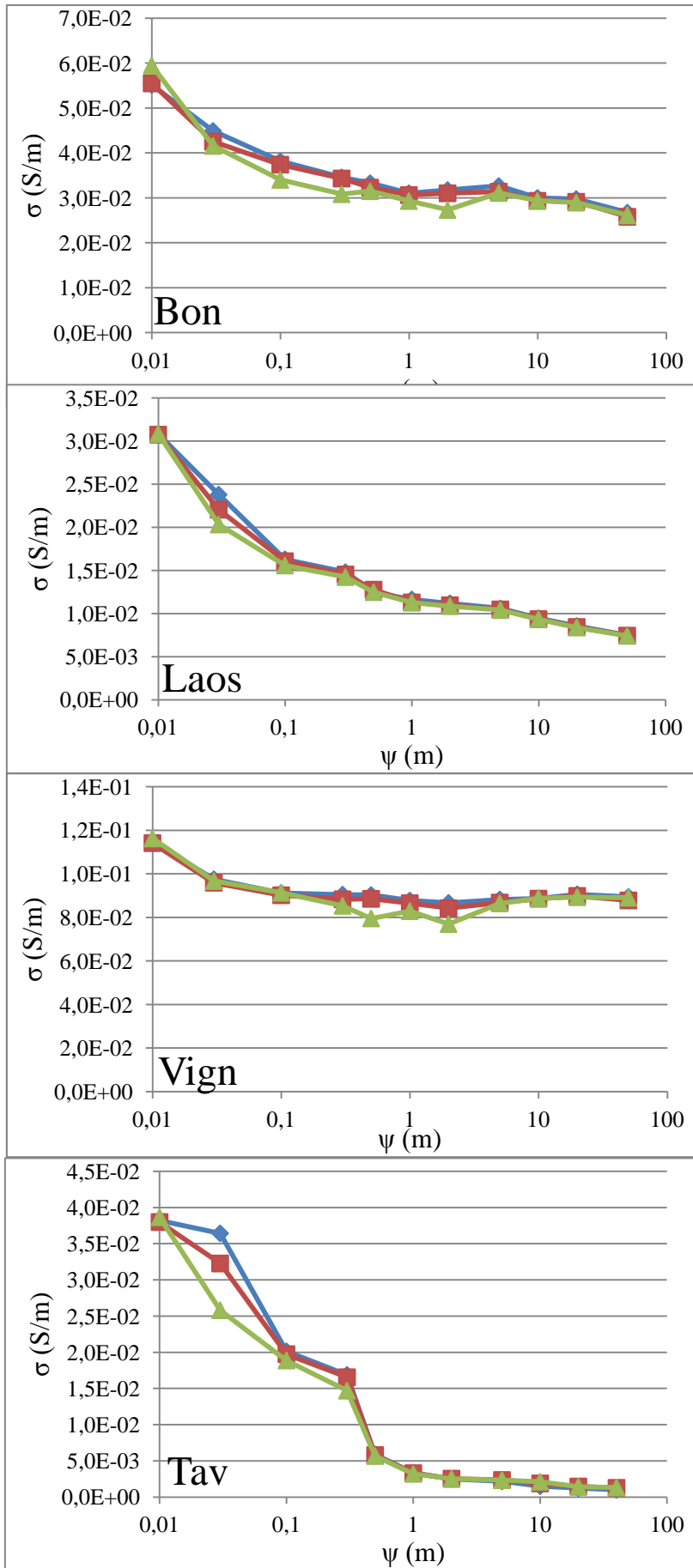
	$\theta_S$	$\theta_r$	$\alpha$	$n$	$m$	$\Sigma \text{ecarts}^2$
Lysi	3,867E-01	0,000E+00	9,056E+00	1,095E+00	8,655E-02	5,259E-04
Bon	3,833E-01	0,000E+00	9,083E+00	1,106E+00	9,586E-02	1,489E-03
Laos	4,860E-01	0,000E+00	1,643E+02	1,075E+00	6,992E-02	1,997E-03
Vign	4,346E-01	0,000E+00	1,009E-01	1,211E+00	1,744E-01	4,819E-04
Tav	3,662E-01	2,261E-02	3,106E+00	2,513E+00	6,021E-01	3,958E-03
Crau	4,782E-01	0,000E+00	1,359E+01	1,188E+00	1,579E-01	8,495E-04
Vel	5,498E-01	0,000E+00	4,373E+00	1,183E+00	1,545E-01	1,430E-03

Tableau 3 Paramètres d'ajustement du modèle Van Genuchten pour chaque sol

### III.2.2. Dispositif Wenner

Les résultats des mesures électriques par le dispositif *Wenner* sont résumés dans les graphiques suivants, qui représentent pour chaque sol l'évolution de la conductivité électrique en fonction du potentiel matriciel, par fréquence (4213 Hz en bleu, 83,26 Hz en rouge, 3,91 Hz en vert). De façon générale, les courbes ont une forme sigmoïdale, à l'instar des courbes de rétention. La dispersion des mesures au potentiel 0.03 m s'explique par l'absence du gel conducteur au moment des mesures électriques. Il est possible de corréler l'interprétation du comportement électrique à celui de la courbe de rétention : les conductivités des sols de sableux de Tavel, et limoneux calcaire de Velleron décroissent par paliers, pouvant traduire la désaturation successive des capillaires de différents diamètres. Les autres sols, présentent une conductivité surfacique évidente au vu de l'atténuation plus ou moins importante de la chute de leur conductivité, principalement due à la présence non négligeable d'argiles et/ou de matière organique. C'est le cas caractéristique du sol des Vignères. Cependant la conductivité électrique de Bonpas et du lysimètre ne semble plus évoluer malgré l'accentuation du potentiel matriciel, ce qui est inattendu. On se saurait dire pour le moment s'il s'agit du comportement naturel des sols, ou d'une erreur de mesure.





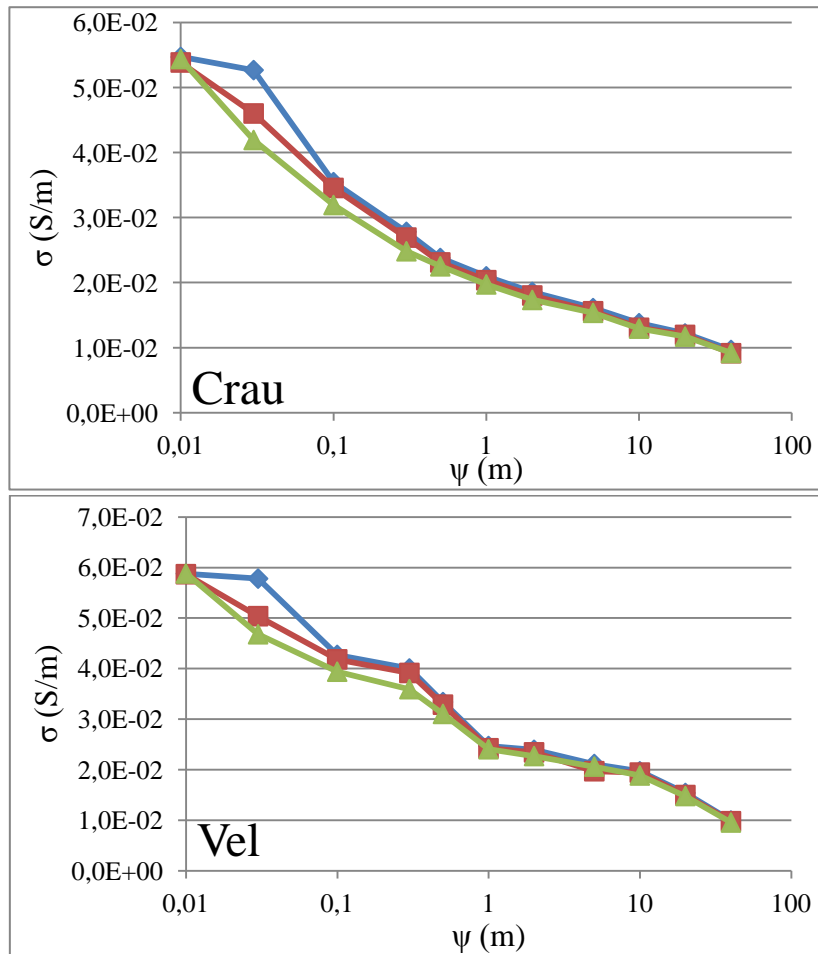
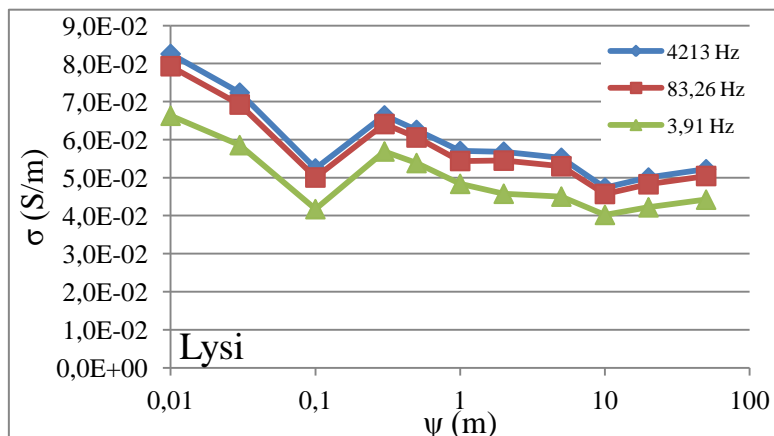
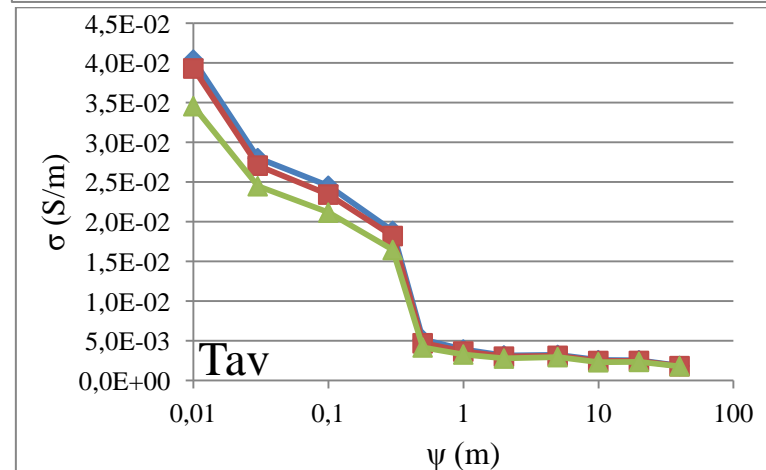
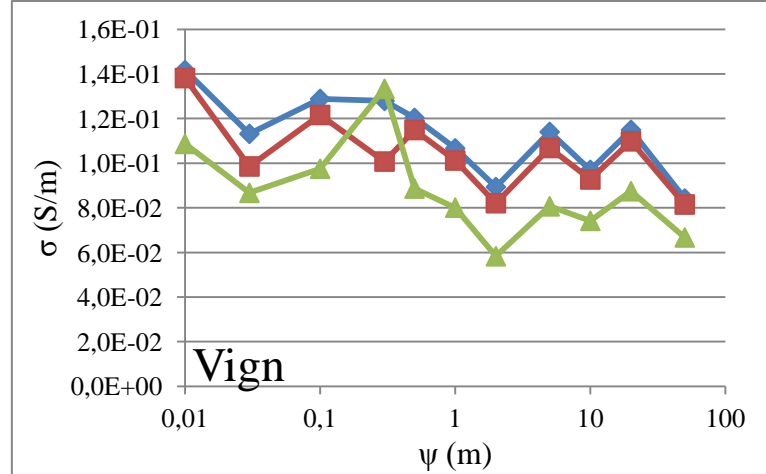
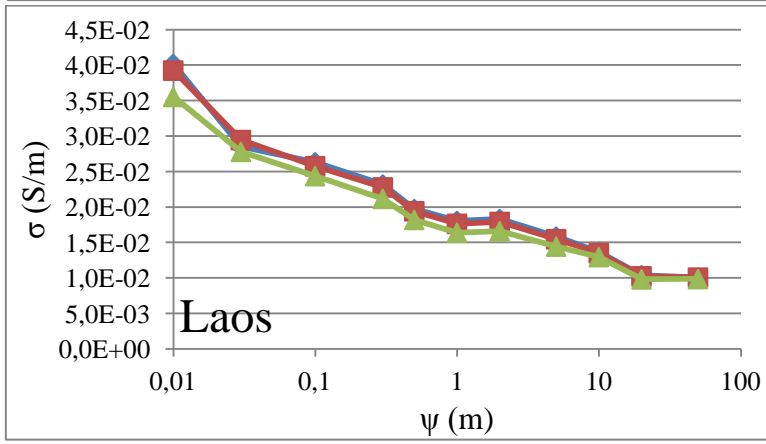
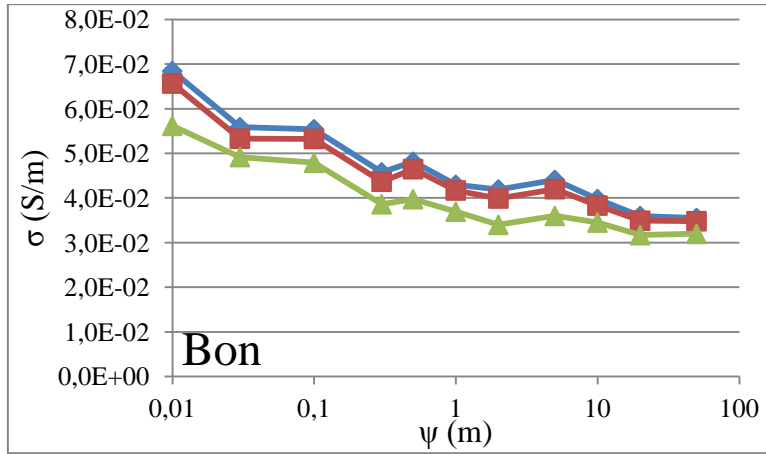


Figure 18 Evolution de la conductivité électrique des sols étudiés, par de dispositif Wenner

### III.2.3. Dispositif deux plaques

Les résultats des mesures électriques pas le dispositif *2 plaques* sont résumés dans les graphiques suivants, qui représentent pour chaque sol l'évolution de la conductivité électrique en fonction du potentiel matriciel, par fréquence (4213 Hz en bleu, 83,26 Hz en rouge, 3,91 Hz en vert). Les tendances sigmoïdales sont beaucoup moins évidentes ici, notamment pour les sols du lysimètre, de Bonpas, mais surtout le sol des Vignères. Toutefois, la tendance générale à la décroissance de chaque sol est comparable pour les deux méthodes. En outre, il y a une dispersion manifeste des mesures par les fréquences due à la polarisation des électrodes.





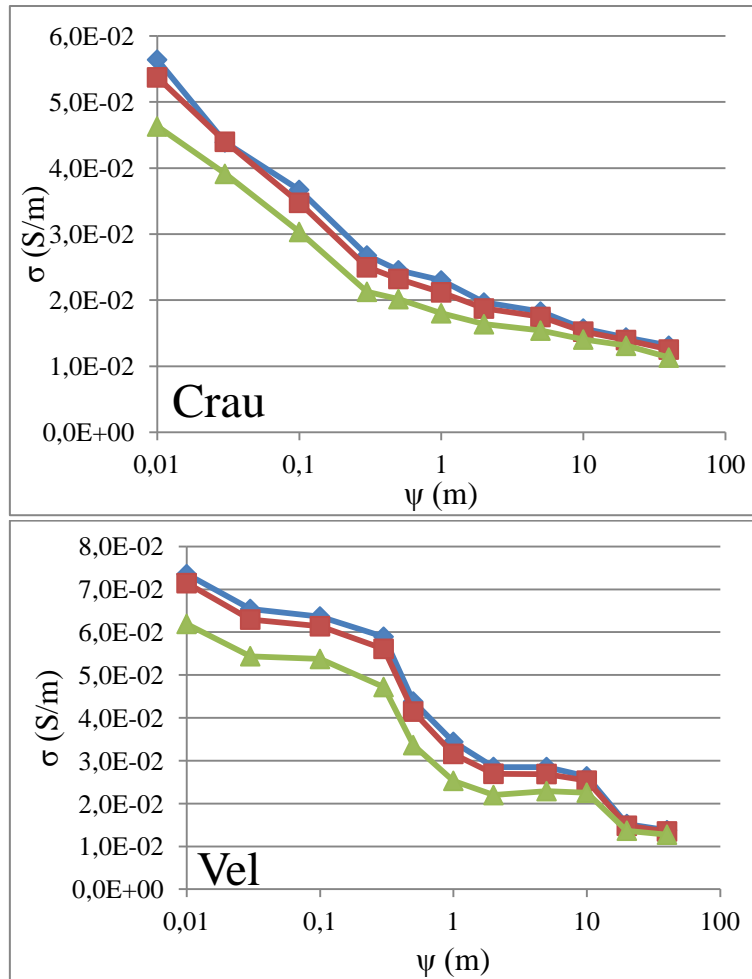


Figure 19 Evolution de la conductivité électrique en fonction du potentiel matriciel des sols étudiés, par de dispositif 2 plaques

### III.3. Ajustement des modèles

Le dispositif *Wenner* a été retenu pour la régularité de la décroissance des mesures électriques à mesure que le potentiel matriciel s'intensifie. Les résultats vont permettre d'ajuster trois modèles de prévision de la conductivité électrique d'un sol. Ces trois modèles sont celui de Waxman et Smits, 1968, Rhoades et al., 1976 et Brovelli et al., 2011 (cf. I.2.3.). Pour chaque sol les modèles sont calés trois fois : un ajustement par fréquence.

#### III.3.1. Waxman et Smits, 1968

Le modèle de Waxman et Smits fait intervenir le taux de saturation du sol  $S_w$ , sa porosité  $\Phi$ , la conductivité de la solution  $\sigma_w$  et la conductivité surfacique des particules solides  $\sigma_s$ .

$$\sigma_a = S_w^n \phi^m \left( \sigma_w + \frac{\sigma_s}{S_w} \right)$$

La conductivité surfacique, m et n sont les paramètres qui sont ajustés.

Toutefois, la stagnation de la conductivité électrique entre 1 m et 50 m pour les sols du lysimètre, de Bonpas et des Vignères ne permet pas de caler le modèle sur l'ensemble des

données. C'est pourquoi, pour ces trois sols, le modèle est ajusté sur les 6 premières mesures (de 0 à 1 m). Les paramètres pour chaque sol et chaque fréquence sont récapitulés dans le tableau suivant.

		m	n	$\sigma_s$	$\Sigma \text{cartes}^2$
Lysi	4213 Hz	1,279E+00	2,456E+00	3,872E-02	2,086E-05
	83,26 Hz	1,296E+00	2,406E+00	3,517E-02	9,922E-06
	3,91 Hz	1,657E+00	3,206E+00	1,222E-01	4,484E-05
Bon	4213 Hz	1,474E+00	2,486E+00	3,768E-02	4,798E-06
	83,26 Hz	1,476E+00	2,554E+00	3,617E-02	1,082E-05
	3,91 Hz	1,884E+00	3,483E+00	1,493E-01	3,732E-05
Laos	4213 Hz	4,926E+00	3,538E+00	1,187E+00	5,182E-05
	83,26 Hz	4,939E+00	3,545E+00	1,176E+00	4,405E-05
	3,91 Hz	4,952E+00	3,557E+00	1,165E+00	4,480E-05
Vign	4213 Hz	3,631E+00	5,801E+00	1,880E+00	3,727E-05
	83,26 Hz	3,636E+00	6,038E+00	1,874E+00	3,705E-05
	3,91 Hz	3,580E+00	7,639E+00	1,850E+00	3,087E-05
Tav	4213 Hz	4,161E+00	3,310E+00	1,710E+00	9,129E-05
	83,26 Hz	4,191E+00	3,391E+00	1,693E+00	6,031E-05
	3,91 Hz	4,198E+00	4,065E+00	1,683E+00	5,369E-05
Crau	4213 Hz	4,559E+00	2,606E+00	1,256E+00	1,562E-04
	83,26 Hz	4,596E+00	2,578E+00	1,216E+00	9,195E-05
	3,91 Hz	4,510E+00	2,575E+00	1,080E+00	1,194E-04
Vel	4213 Hz	5,053E+00	2,720E+00	8,761E-01	1,850E-04
	83,26 Hz	5,041E+00	2,680E+00	8,208E-01	1,205E-04
	3,91 Hz	5,089E+00	2,621E+00	8,002E-01	1,693E-04

Tableau 4 Paramètres du modèle Waxman et Smits (1968), ajustés pour les 7 sols étudiés

Les deux graphiques suivants représentent pour Bonpas et Crau, l'évolution en fonction de la teneur en eau de la conductivité électrique mesurée aux trois fréquences (marqueurs bleus, rouges et verts, correspondant respectivement à 4213 Hz, 83,26 Hz et 3,91 Hz) et de la conductivité électrique calculée par le modèle (les courbes continues bleue, rouge, et verte, correspondant respectivement à 4213 Hz, 83,26 Hz et 3,91 Hz).

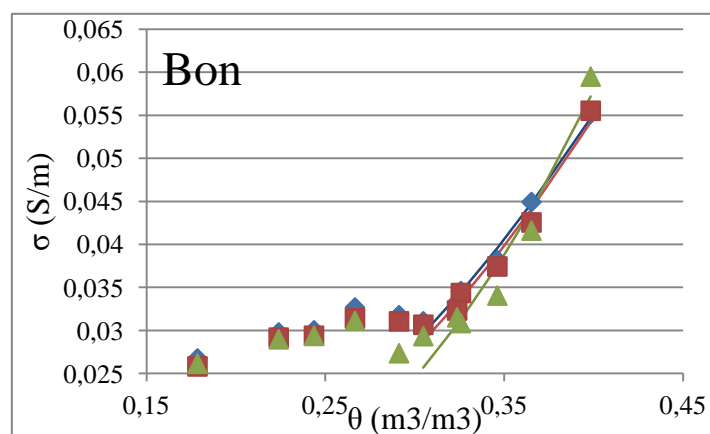


Figure 20 Ajustement du modèle Waxman et Smits sur les 6 premières mesures électriques de Bonpas



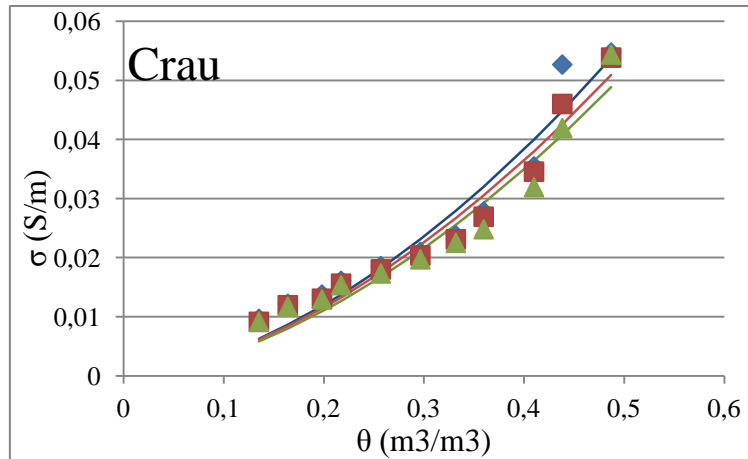


Figure 21 Ajustement du modèle Waxman et Smits sur l'ensemble des mesures électriques de Crau

### III.3.2. Rhoades et al., 1976

Le modèle de Rhoades et al., 1976 ne fait intervenir que la teneur en eau volumique  $\theta$ , la conductivité volumique  $\sigma_w$ , et la conductivité surfacique  $\sigma_s$ .

$$\sigma_a = (a\theta^2 + b\theta)\sigma_w + \sigma_s$$

Ici,  $\sigma_s$ ,  $a$  et  $b$  sont à ajuster. Pour les mêmes raisons que précédemment (cf. III.3.1.), les ajustements pour les sols du lysimètre, de Bonpas et des Vignères ne seront appliqués que sur les 6 premières mesures électriques (de 0 à 1 m). La conductivité surfacique et les coefficients  $a$  et  $b$  de chaque sol et pour chaque fréquence sont synthétisés dans le tableau suivant.

		a	b	$\sigma_s$	$\Sigma \text{cartes}^2$
Lysi	4213 Hz	8,383E+00	-4,111E+00	1,206E-01	1,913E-05
	83,26 Hz	1,228E+01	-6,975E+00	2,103E-01	3,181E-06
	3,91 Hz	2,549E+01	-1,607E+01	4,798E-01	1,187E-05
Bon	4214 Hz	4,934E+00	-1,956E+00	5,427E-02	2,717E-06
	83,26 Hz	1,132E+01	-6,447E+00	1,904E-01	1,581E-06
	3,91 Hz	2,160E+01	-1,337E+01	3,911E-01	1,881E-06
Laos	4215 Hz	3,177E+00	-1,606E+00	4,286E-02	2,297E-05
	83,26 Hz	3,213E+00	-1,644E+00	4,405E-02	1,327E-05
	3,91 Hz	3,307E+00	-1,723E+00	4,646E-02	1,002E-05
Vign	4216 Hz	1,517E+01	-6,964E+00	1,232E-01	4,067E-05
	83,26 Hz	1,485E+01	-6,470E+00	9,537E-02	4,153E-05
	3,91 Hz	1,892E+01	-7,975E+00	7,387E-02	3,549E-05
Tav	4217 Hz	1,803E+00	-1,903E-01	2,511E-03	8,126E-05
	83,26 Hz	1,782E+00	-2,103E-01	2,859E-03	4,638E-05
	3,91 Hz	1,865E+00	-2,802E-01	3,351E-03	5,019E-05
Crau	4218 Hz	2,085E+00	-5,481E-01	1,763E-02	9,473E-05
	83,26 Hz	1,972E+00	-5,223E-01	1,709E-02	3,377E-05
	3,91 Hz	2,146E+00	-6,642E-01	2,036E-02	4,028E-05

Vel	4219 Hz	1,798E+00	-6,650E-01	2,384E-02	1,456E-04
	83,26 Hz	1,681E+00	-6,114E-01	2,244E-02	8,490E-05
	3,91 Hz	1,651E+00	-6,287E-01	2,347E-02	1,296E-04

Tableau 5 Paramètres du modèle Rhoades et al. (1976), ajustés pour les 7 sols étudiés

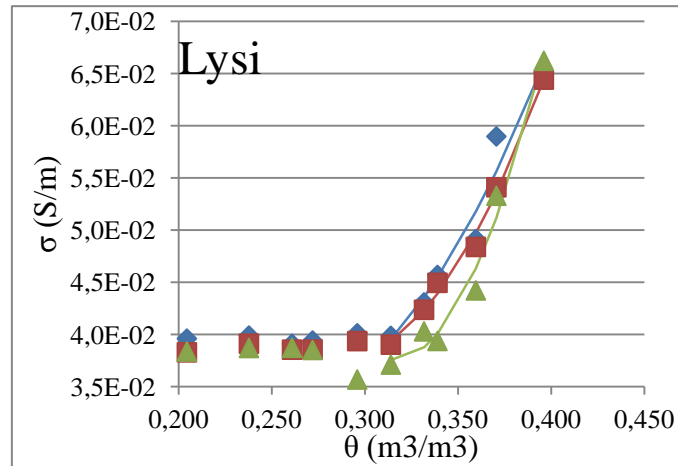


Figure 22 Ajustement du modèle de Rhoades et al., sur les 6 premières mesures électriques du lysimètre

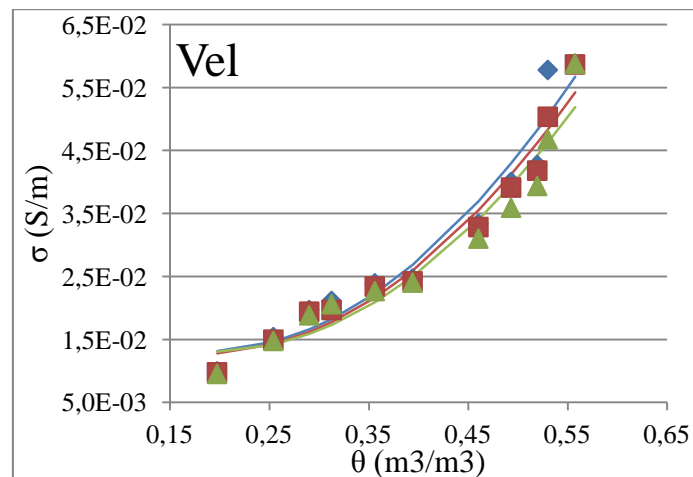


Figure 23 Ajustement du modèle de Rhoades et al., sur l'ensemble des mesures électriques de Velleron

### III.3.3. Brovelli et al., 2011.

Toutes les composantes qui entre en jeu dans le modèle de Brovelli et al., (2011), font de son ajustement une étape délicate. Cependant, seuls 3 paramètres sont à ajuster :  $m$ ,  $n$  et  $\sigma_s$ . Encore une fois, les ajustements pour le lysimètre, Bonpas et les Vignères ne concernent que les mesures de 0 à 1 m de potentiel hydrique. Les paramètres ajustés sont présentés dans le tableau qui suit :

		$\sigma_s$	$m-1$	$n$	$\Sigma \text{cartes}^2$
Lysi	4213 Hz	1,655E-02	3,122E-01	3,037E+00	2,316E-05
	83,26 Hz	2,033E-02	5,639E-01	3,550E+00	1,604E-05

	<b>3,91 Hz</b>	2,170E-02	5,675E-01	4,673E+00	5,667E-05
Bon	<b>4214 Hz</b>	1,334E-02	6,492E-01	3,431E+00	3,299E-06
	<b>83,26 Hz</b>	1,319E-02	6,620E-01	3,575E+00	7,624E-06
	<b>3,91 Hz</b>	1,680E-02	6,882E-01	5,064E+00	2,626E-05
Laos	<b>4215 Hz</b>	2,513E-03	1,531E+00	3,875E+00	3,759E-05
	<b>83,26 Hz</b>	2,526E-03	1,562E+00	3,947E+00	2,856E-05
	<b>3,91 Hz</b>	2,550E-03	1,594E+00	4,042E+00	2,708E-05
Vign	<b>4216 Hz</b>	6,425E-02	-6,200E-01	7,434E+00	2,982E-05
	<b>83,26 Hz</b>	6,314E-02	-5,947E-01	7,810E+00	2,864E-05
	<b>3,91 Hz</b>	6,076E-02	-9,795E-01	9,061E+00	2,784E-05
Tav	<b>4217 Hz</b>	6,177E-03	8,831E-01	3,773E+00	6,887E-05
	<b>83,26 Hz</b>	7,112E-03	1,016E+00	4,343E+00	3,025E-05
	<b>3,91 Hz</b>	7,761E-03	1,111E+00	5,773E+00	1,227E-05
Crau	<b>4218 Hz</b>	7,626E-03	9,500E-01	2,500E+00	1,243E-04
	<b>83,26 Hz</b>	6,692E-03	1,024E+00	2,459E+00	8,650E-05
	<b>3,91 Hz</b>	6,268E-03	1,075E+00	2,520E+00	1,231E-04
Vel	<b>4219 Hz</b>	4,989E-03	1,331E+00	2,514E+00	1,647E-04
	<b>83,26 Hz</b>	4,643E-03	1,420E+00	2,492E+00	1,017E-04
	<b>3,91 Hz</b>	4,454E-03	1,525E+00	2,480E+00	1,486E-04

Figure 24 Paramètres du modèle Brovelli et al. (2011), ajustés pour les 7 sols étudiés

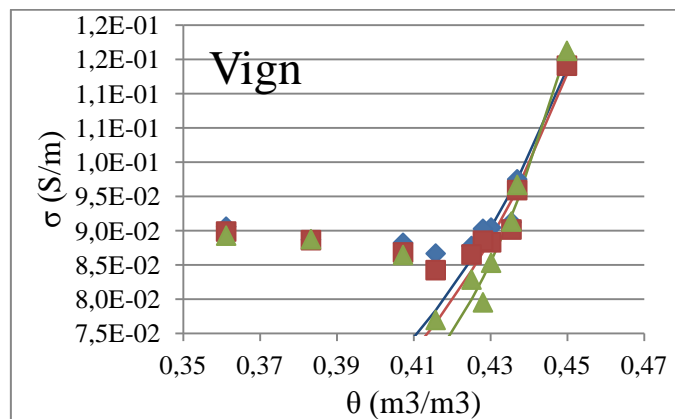


Figure 25 Ajustement du modèle de Brovelli et al., pour les 6 premières mesures électriques des Vignères

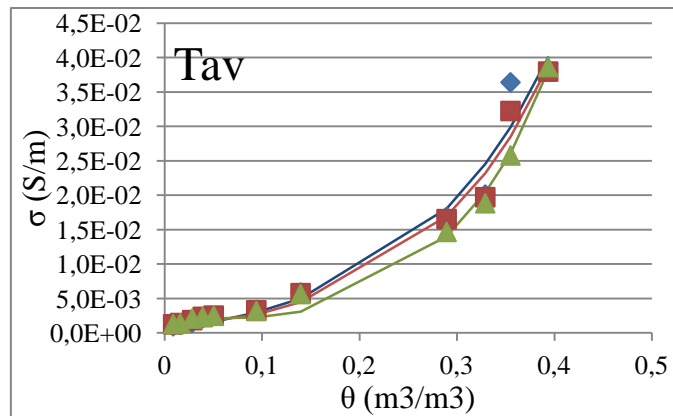


Figure 26 Ajustement du modèle de Brovelli et al., sur l'ensemble des mesures électriques de Tavel

### Conclusion et Perspectives

Dans un premier temps, il convient d'affirmer que le dispositif en configuration Wenner avec 4 électrodes en ligne est le plus adapté aux mesures réalisées dans ce travail. Il ne présente pas de dispersion des mesures et est facile à manipuler. Les résultats sur divers sols montrent que ce système permet d'obtenir ici l'évolution de la conductivité en fonction du potentiel matriciel. La similarité de cette évolution avec la courbe de rétention nous incite à poursuivre l'étude en cherchant à ajuster la courbe  $\sigma = f(\psi)$  de façon similaire à la courbe de rétention.

D'autre part, sur les gammes de variations des mesures déjà acquises, il semblerait qu'il n'y ait pas un modèle "teneur en eau - conductivité" plus représentatif que les autres. En effet, les écarts entre modèles ajustés et données sont relativement semblables et ne permettent pas actuellement une discrimination entre les modèles. Toutefois, si la qualité d'ajustements de ces différents modèles est plus ou moins semblable, les sols plus argileux semblent montrer une évolution différente et non représentée par ces modélisations.

Par manque de temps (équilibre long à fort potentiel), il manque des mesures à faible saturation (au delà de 100 m). Il sera intéressant d'ajuster à nouveau les différents modèles dans de telles conditions, où la conductivité surfacique tend à devenir prépondérante. Ces équilibres à plus fort potentiel sont en cours. Une fois ces données obtenues, il sera également possible d'évaluer l'influence de la fréquence sur les mesures électriques, en comparant les ajustements finaux suivant les 3 fréquences. Afin de réduire le nombre de paramètres dans les modèles utilisés, Il serait également intéressant d'estimer le facteur de formation  $F$ , en mesurant les échantillons à saturation, avec différentes conductivités de la solution. En effet, en estimant  $F$ , on pourra obtenir le paramètre  $m$  (coefficient de cimentation) des modèles.

Enfin d'autres essais ont débuté, quant à l'influence d'avoir du sol remanié sur les mesures électriques en comparaison avec les mêmes sols intacts.

## Bibliographie

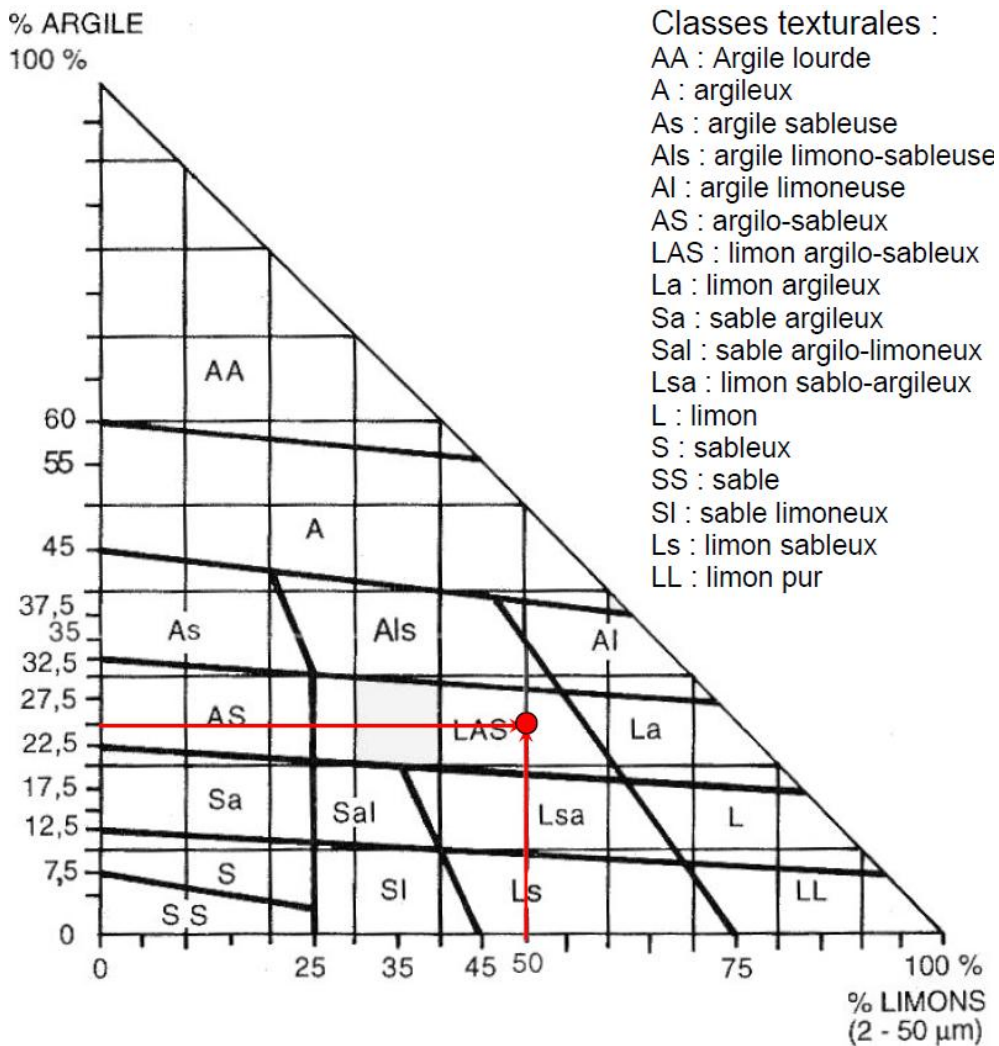
- Archie, G.E. 1942. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. *Trans. Am. Insti. Min. Metall. Pet. Eng.* 146 :54-62.
- Battle-Aguilar J.; Schneider S.; Pessel M., Tucholka, P.; Coquet, Y; Vachier, P, 2009, Axisymmetrical Infiltration in Soil Imaged by Noninvasive Electrical Resistivity, *Soil Science Society of America Journal*, 73, 510-520.
- Besson A. 2007. Analyse de la variabilité spatio-temporelle de la teneur en eau des sols à l'échelle parcellaire par la méthode de résistivité électrique. Thèse pour doctorat en Sciences de la Terre, Université d'Orléans, Orléans, France.
- Briggs, L.J. 1899. Electrical instrument for determining the moisture, temperature and soluble salts content of soils. *USDA Div. Sols Bull.* 10, U.S. Gov. Print. Office, Washington, DC.
- Brovelli, A., and Cassiani G. 2001. Combined estimation of electrical conductivity and permittivity for soil monitoring. *Water Resources Research*, VOL. 47 W08510.
- Brovelli, A., and Cassiani G. 2010a, Sensitivity of intrinsic permeability to electrokinetic coupling in shaly and clayey porous media, *Transp. Porous Media*, 83(3), 681–697.
- Brovelli, A., and Cassiani G. 2010b, A combination of the Hashin-Shtrikman bounds aimed at modelling electrical conductivity and permittivity of variably saturated porous media, *Geophys. J. Int.*, 180(1), 225–237.
- Doussan C., Ruy S., 2009, Prediction of unsaturated soil hydraulic conductivity with electrical conductivity, *Water Resources Research*, 45, W10408
- Friedman, S.P. 1998. Simulation of a potential error in determining soil salinity from measured apparent electrical conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 62 :593-599.
- Fukue, M., Minato, T, Horibe, H., and Taya, N. 1999. The micro-structure of clay given by resistivity measurement. *Engineering Geology*. 54 :43-53
- Hashin Z. ; Shtrikman S. 1963, A variational approach to the theory of elastic behaviour of multiphase materials. *J. Mech. Phys. Solids* 11, 127-140.
- Hendrickx, J.M., Das, B., Corwin, D.L., Wraith, J.M., and Kachanoski, R.G. 2002. Relationship between soil water solute concentration and apparent soil electrical conductivity, p. 1275-1282, In J. H. Dane and J. C. Topp, eds. *Methods of soil Analysis : part 4. Physical methods*. Soil Society of America, Madison, WI, USA.
- Hillel daniel eau et le sol, principes et processus physiques. (livre)
- Jackson, T.J. 2002. Remote sensing of soil moisture: implications for ground water recharge. *Hydrology Journal* 10:40-51.
- Journiaux, L., Zamora, M., and Reuschlé, T. 2006. Electrical conductivity evolution of non-saturated carbonate rocks during deformation up to failure. *Geophys. J. Int.* 167 :1017-1026.
- Keller, G.V., and Frischknecht F.C. 1966. *Electrical methods in geophysical prospecting*. Pergamon Press, Oxford.
- Kemna, A., Vanderborght, J., Kulesa B., and Vereecken, H. 2002, Imaging and characterisation of subsurface solute transport using electrical resistivity tomography (ERT) and equivalent transport models, *Journal of Hydrology*, 267, 125-146
- Loke, M. H. (2002), Rapid 2D resistivity forward modelling using the finite-difference and finite element methods. *Manuel RES2DMOD ver 3.01.*, 128 p.

- 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 en Pédologie-Géophysique, Paris 6, Paris.
- Muñoz, D.R., and Berga, S.C. 2005. An analog electronic interface to measure electrical conductivity in liquids. *Measurement* 38 :181-187.
- Mualem Y., 1976. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Wat. Res. Res.* 12:513-522.
- Mualem Y. and Friedman S.P., 1991. Theoretical prediction of electrical conductivity in saturated and unsaturated soil. *Wat. Res. Res.* 27:2271-2777.
- Nadler, A. 2005. Methodologies and the practical aspects of the bulk soil EC ( $\sigma_a$ ) – Soil solution EC ( $\sigma_w$ ) relations. *Advanced in Agronomy* 88 :273-312.
- Nadler, A., Frenkel, H., and Mantell, A. 1984. Applicability of the four probe technique under extremely variable water contents and salinity distributions. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 45 :1258-1261.
- Rhoades, J.D., Ratts, P.A.C., and Prather, R.J. 1976. Effects of Liquid-phase electrical conductivity, water content and surface conductivity on bulk soil electrical conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 40 :651-655
- Rhoades, J.D., Kaddah, M.T., Halvorson, A.D., and Prather, R.J. 1977. Establishing soil electrical conductivity-salinity calibration using Four-Electrode Cells containing undisturbed soil cores. *Soil Science* 123 :137-141.
- Rhoades, J.D., Manteghi, N.A., Souse, P.J., and Alves W.J. 1989. Soilelectrical conductivity and soil salinity : new formulations and calibrations. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 53 :433-439.
- Roberts, J.J., and Schwartz, L. 1996. Grain consolidation and electrical conductivity in porous media. *Phys. Rev.* B31 :5990-5997.
- Saarenketo, T. 1998 Electrical properties of water in clay and silty soils. *Journal Of Applied Geophysics* 40 :73-88.
- Samouelian A. 2004 Analyse tridimensionnelle non destructive de la fissuration d'un sol cultivé à partir de mesures de résistivité électrique. Sciences de la Terre et de l'Univers, Université d'Orléans, Orléans, France.
- Samouelian A., Richard G., Cousin I., Guérin R., Bruand A., and Tabbagh A. 2004. 3D cracks monitoring by electrical resistivity tomography. *European Journal of Soil Science* 55 :751-762.
- Samouelian A., Cousin I., Tabbagh A., Bruand A., and Richard G. 2005. Electrical resistivity survey in soil science : a review. *Soil & Tillage Res.* 83 :173-193.
- Sauer M.C., Southwick P.E. Spiegler, K.S., and Wyllie M.R.J. 1955. Electrical conductance of porous plugs : ion exchange resin-solution systems. *Ind Eng Chem.* 47 :2187-2193.
- Schwartz L., and Kimminau S. 1987. Analysis of electrical conduction in the grain consolidation model. *Geophysics* 52 :1402-1411.
- Shainberg I., Rhoades J.D., and Prather R.J. 1980. Effect of ESP, cation exchange capacity and soil solution concentration on soil electrical conductivity. *Soil. Sci. Soc. Am. J.* 44 :469-473.
- Schneider S. 2010. Estimation des paramètres hydrodynamiques des sols partir d'une modélisation inverse de données d'infiltration et de résistivité électrique. Thèse de doctorat en Science de la Terre et de l'Univers, Paris-SUD 11, Paris.

- Tabbagh A., Dabas M., Hesse A., and Panissod C. 2000. Soil resistivity : a non-intrusive tool to map soil structure horizonation. *Geoderma* 97 : 393-404.
- Tabbagh A., Panissod C., Guérin R., and Cosenza P. 2002 Numerical modeling of the role of water and clay content in soils and rocks bulk conductivity. *Journal Of Geophysical Research-Solid Earth* 107. et al., 2002
- Taylor S., and Barker R. 2006. Modelling the DC electrical response of fully and partially saturated Permo-Triassic sandstone. *Geophysical Prospecting* 54 :351-367.
- Van Genuchten, M. Th. 1980. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 44:892-898.
- Waxman M.H., and Smits L.J.M. 1968. Electrical conductivities and oil-bearing shaly sands. *Soc. Pet. Eng. J.* 8 :107-122.
- Wenner F. 1915. A method of measuring Earth Resistivity. U.S. Dept. Com. Bureau of Standards Sci. Paper No. 258, Gaithersburg, MD.

## Annexes

### Annexe 1 : Triangle des Textures GEPPA.



### Annexe 2 : Fonction correction des eaux

À 4213 Hz, pour  $\sigma > 330 \mu\text{S/cm}$  :

$$\sigma_{\text{prévisionnel}} = (3,4555 \cdot 10^{-2} \times V + 1,6101) \times \sigma_{\text{électrique}} + (-3,0135 \cdot 10^{-3} \times V + 9,3725 \cdot 10^{-3})$$

À 4213 Hz, pour  $\sigma < 330 \mu\text{S/cm}$  :

$$\sigma_{\text{prévisionnel}} = (-2,1452 \cdot 10^{-2} \times V + 1,768) \times \sigma_{\text{électrique}} + (1,7095 \cdot 10^{-4} \times V - 1,06 \cdot 10^{-3})$$

À 83,26 Hz, pour  $\sigma > 330 \mu\text{S/cm}$  :

$$\sigma_{\text{prévisionnel}} = (8,9082 \cdot 10^{-3} \times V + 1,6416) \times \sigma_{\text{électrique}} + (-4,5786 \cdot 10^{-4} \times V + 1,6239 \cdot 10^{-3})$$

À 83,26 Hz, pour  $\sigma < 330 \mu\text{S/cm}$  :

$$\sigma_{\text{prévisionnel}} = (7,9611 \cdot 10^{-3} \times V + 1,6561) \times \sigma_{\text{électrique}} + (-8,9847 \cdot 10^{-6} \times V - 5,9171 \cdot 10^{-4})$$

À 3,91 Hz, pour  $\sigma > 330 \mu\text{S/cm}$  :

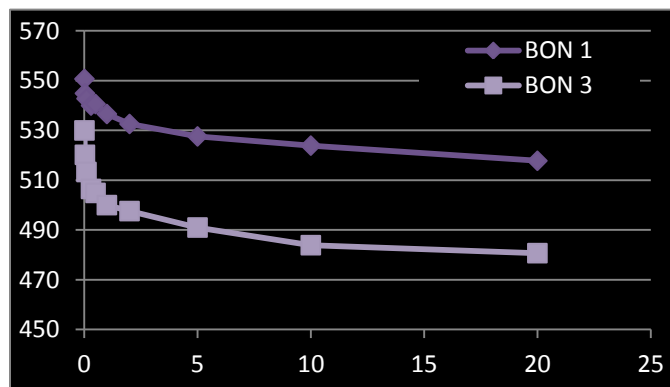
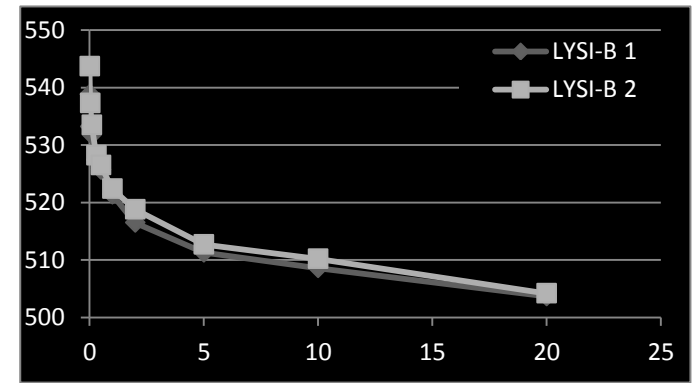
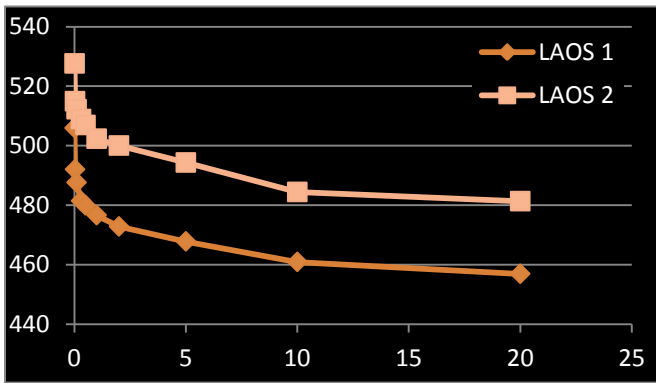
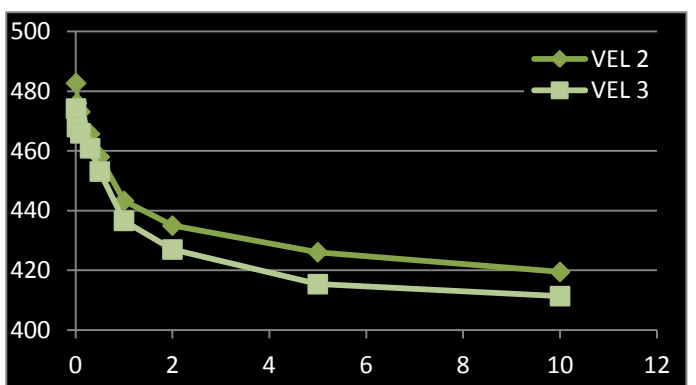
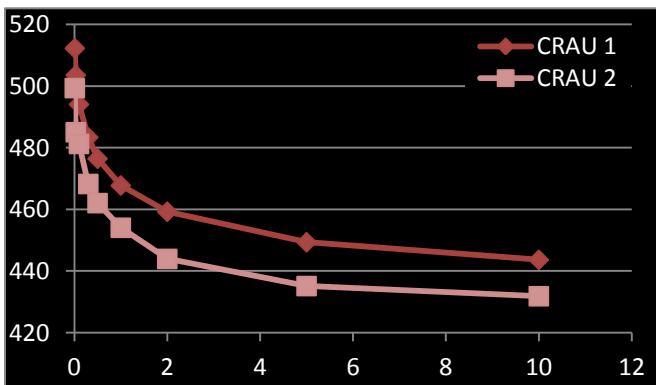
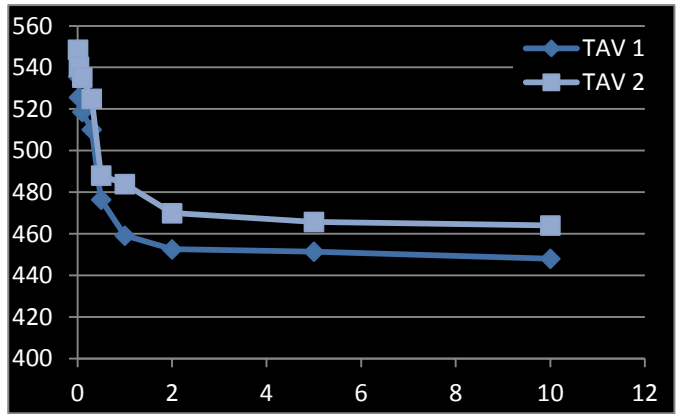
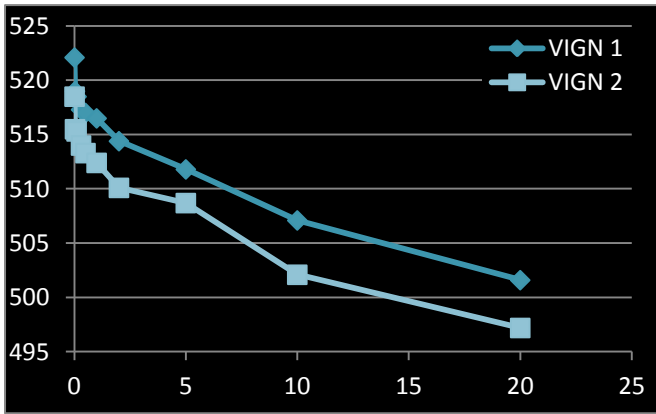
$$\sigma_{\text{prévisionnel}} = (-1,12 \cdot 10^{-2} \times V + 1,6769) \times \sigma_{\text{électrique}} + (6,8348 \cdot 10^{-3} \times V - 2,2827 \cdot 10^{-2})$$

À 3,91 Hz, pour  $\sigma < 330 \mu\text{S/cm}$  :

$$\sigma_{\text{prévisionnel}} = (3,0569 \cdot 10^{-2} \times V + 1,5429) \times \sigma_{\text{électrique}} + (-6,2175 \cdot 10^{-5} \times V - 4,0641 \cdot 10^{-4})$$



### Annexe 3 Evolutions Pondérales



## Résumé

L'utilisation de la conductivité électrique dans l'estimation de l'humidité des sols a débuté il y a de nombreuses années déjà (Briggs, 1899). Toutefois, la complexité des interactions entre tous les paramètres pédologiques rend la caractérisation hydro-électrique assez difficile. C'est pourquoi il convient de comprendre au mieux l'interaction entre paramètres pédologiques et paramètres électriques. C'est ce que propose le présent travail, qui cherche à mettre en relation la conductivité électrique ( $\rho$ ) la teneur en eau volumique ( $\theta$ ) et le potentiel matriciel ( $\psi$ ) de différents sols. Pour cela, nous commençons par développer trois dispositifs de mesures en laboratoire sur échantillons prélevés dans des cylindres (électrodes de mesure/injection sur l'extérieur du cylindre, 4 électrodes en ligne sur la surface et 2 électrodes circulaires en haut et en bas du cylindre), qui sont testés et jugés adaptés (pour les deux derniers) ou non (4 électrodes de côtés) à la mesure électrique d'échantillons de sol. Enfin, les deux dispositifs retenus permettent de caractériser l'évolution de la conductivité électrique  $\sigma$  en fonction du potentiel matriciel pour 7 sols de textures et structures variées. Il semble que le dispositif des 4 électrodes en lignes donne les meilleurs résultats. Les relations expérimentales entre conductivité électrique et teneur en eau ont été ajustées à différents types de modèles existants. Si la qualité d'ajustements pour les différents modèles est plus ou moins semblable, les sols plus argileux semblent montrer une évolution différente et non représentées par ces modélisations.

Mots clefs : conductivité électrique ; comportement hydro-électrique ; courbe de rétention ; dispositif expérimental ; mesures électriques en laboratoire ; modélisation ; potentiel matriciel ; teneur en eau.