



HAL
open science

Mesure et suivi de la teneur en eau des sols par utilisation de sondes TDR

Solenne Tonneau

► **To cite this version:**

Solenne Tonneau. Mesure et suivi de la teneur en eau des sols par utilisation de sondes TDR. [Stage] Institut Universitaire de Technologie de Bourges (IUT de Bourges), Bourges, FRA. 2011, 56 p. hal-02810824

HAL Id: hal-02810824

<https://hal.inrae.fr/hal-02810824>

Submitted on 6 Jun 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



2163, Avenue de la Pomme de Pin-Ardon
45075 Orléans cedex 2



63, Avenue de Lattre de Tassigny
18020 Bourges Cedex.

TONNEAU Solenne

Projet industriel
Licence professionnelle
Expertise Mesures et Environnement
2010-2011

Mesure et suivi de la teneur en eau des sols par utilisation de sondes TDR

Stage effectué à l'unité INRA de Science du Sol d'Orléans
du 21 Février au 10 Juin 2011



Encadrement :

GIOT Guillaume, Assistant ingénieur INRA.
FEVE Stéphanie, Professeure d'Analyse de l'eau.

Remerciements

Je remercie Catherine HENAULT de m'avoir accueilli au sein de l'Unité INRA Science du Sol d'Orléans qu'elle dirige actuellement.

Merci à Isabelle COUSIN d'avoir retenue ma candidature pour ce projet.

Je remercie Guillaume GIOT, mon encadrant, pour sa disponibilité, pour le suivi attentif de mon projet et pour toutes les aides et conseils qu'il m'a apporté lors de ma formation.

Enfin, je remercie l'ensemble des personnes de l'Unité Science du Sol pour l'accueil chaleureux pendant toute la durée du stage ainsi que la bonne ambiance au sein de l'unité.

Sommaire

I.	Présentation du centre de Recherche INRA	4
A.	L'INRA, un institut national	4
B.	Le centre de Recherche d'Orléans	5
C.	Unité de Recherche Science du Sol.....	6
D.	Organigramme structurel de l'unité Science du Sol.....	8
II.	Présentation du sujet de stage.....	9
III.	Le sol.....	11
A.	Qu'est ce que le sol ?.....	11
B.	L'eau dans le sol.....	12
1.	Le cycle de l'eau	12
2.	La teneur en eau du sol.....	12
IV.	Principales méthodes de mesure de la teneur en eau d'un sol	14
A.	Mesure directe	14
B.	Mesures indirectes.....	15
1.	Méthode TDR (Time Domain Reflectometry).....	15
2.	Méthode FDR (Frecency Domain Reflectometry).....	17
3.	Méthode CS616 de Campbell	17
V.	Matériel et méthode.....	20
A.	Prélèvements sur site	20
B.	Remaniement des échantillons	20
C.	Préparation du sol.....	21
D.	Fabrication des colonnes	23
E.	Mise en place des capteurs	24
VI.	Résultats et discussion.....	26
A.	Effet température.....	26
1.	Effet température sur les sondes CS616.....	27
2.	Effet température sur les sondes TDR Trase system.....	34
B.	Définition d'une nouvelle équation d'étalonnage	36
C.	Effet de la conductivité électrique du sol	40
D.	Effet densité.....	41
VII.	Conclusion et perspectives	44
	Références Bibliographiques.....	45
	Annexes	46

I. Présentation du centre de Recherche INRA

A. L'INRA, un institut national

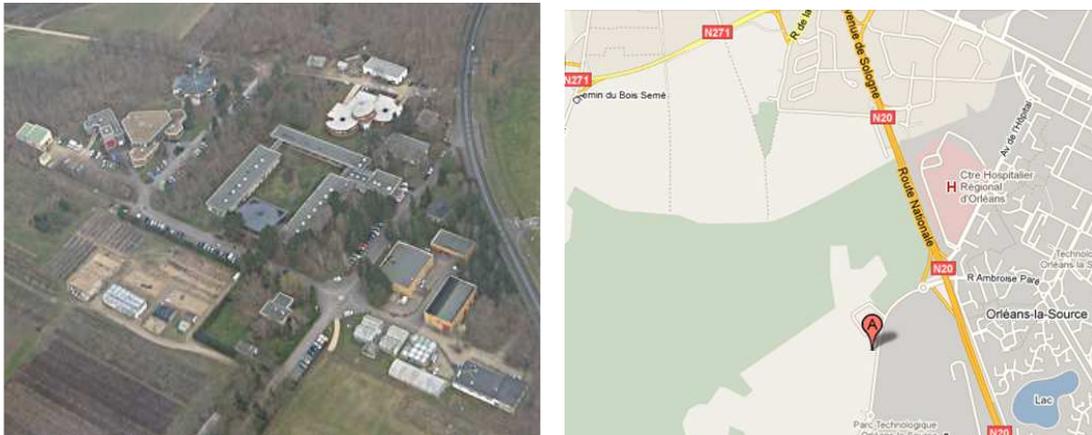


Figure 1 : Plan du site INRA.

Créé en 1946 dans le contexte de la reconstruction nationale d'après-guerre et du projet de modernisation de l'agriculture française, l'Institut national de recherche agronomique (INRA) accompagne depuis les mutations du monde agricole, des filières alimentaires et des territoires avec l'objectif de répondre aux attentes de la société, notamment celle de la suffisance alimentaire de la nation.

Depuis 1984 l'Inra est un Établissement public à caractère scientifique et technologique (EPST) placé sous la double tutelle du ministère de l'Enseignement supérieur et de la Recherche et du ministère de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Pêche. Ces deux ministères assurent 4/5 du budget de l'institut.

L'INRA est aujourd'hui le premier institut européen de recherche agronomique et le deuxième institut mondial pour les publications en sciences agricoles, de la plante et de l'animal. Il entretient des partenariats scientifiques avec les grands instituts de recherche scientifique dans le monde, les universités, l'enseignement agronomique et vétérinaire, il développe de multiples collaborations et échange avec la communauté scientifique internationale dans de nombreux pays en Europe, Amérique, Asie et Afrique.

Ses recherches concernent les questions liées à l'agriculture, à l'alimentation et à la sécurité des aliments, à l'environnement et à la gestion des territoires, avec une perspective de développement durable.

B. Le centre de Recherche d'Orléans

Quatre domaines de recherche sont traités sur le centre de Recherche INRA d'Orléans :

- La sélection d'arbres forestiers sur des critères de croissance optimale, de qualité du bois, et de résistance aux parasites : des domaines de connaissances sont développés en génétique, physiologie de l'arbre, biotechnologies, et sur l'amélioration des techniques de diffusion des variétés améliorées.
- La biologie des insectes forestiers ravageurs, leur épidémiologie, et leurs relations avec les arbres-hôtes.
- La maîtrise des érosions et des pollutions, l'évaluation des risques agro-climatiques s'appuient sur des recherches sur la modélisation des comportements physiques et hydriques des sols, en relation avec leur histoire et leur cartographie (plusieurs programmes au niveau national).
- L'amélioration génétique des performances des troupeaux et la qualité de leurs produits : productivité numérique et qualités bouchères des ovins, prolificité et qualité de la viande des porcins, rendement fromager des caprins, aptitudes bouchères et qualités maternelles de la race charolaise.

Ses thématiques de recherche, au travers des unités présentes sur le site d'Ardon, donnent au centre d'Orléans une orientation marquée en matière d'environnement et de développement durable.

Le centre INRA d'Orléans est composé de six unités :

- 3 unités de recherches (Amélioration, Génétique et Physiologie Forestière / Zoologie Forestière / **Science du Sol**)
- 1 unité service (InfoSol)
- 2 unités expérimentales (Génétique et Biomasse Forestières Orléans / Bourges)



Figure 2 : Organigramme structurel.

Les effectifs du Centre d'Orléans sont de 200 personnes (agents titulaires) répartis de la manière suivante : 38% de Chercheurs et Ingénieurs, 49% de Techniciens et 13% d'Administratifs.

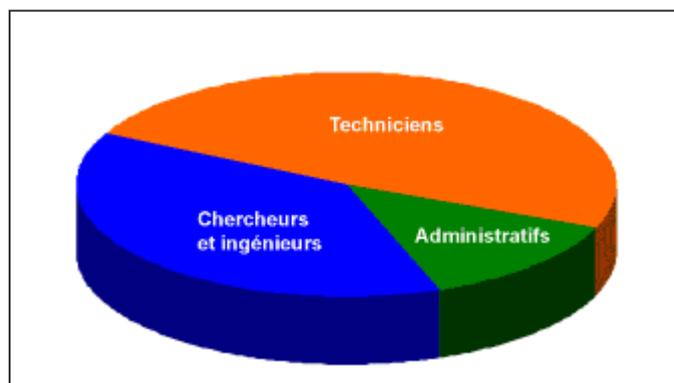


Figure 3 : Répartition des effectifs.

Le centre d'Orléans accueille en outre chaque année 50 non-titulaires parmi lesquels un nombre important d'étudiants, Doctorats ou Masters, post-doctorants et chercheurs étrangers.

Ces séjours ont donné lieu de puis 2000 à 27 thèses de Doctorat et 42 Thèses de Master (ou DEA ou DESS).

C. Unité de Recherche Science du Sol

L'Unité de Recherche INRA de Science du Sol d'Orléans étudie l'organisation, l'évolution et le fonctionnement des sols selon différentes échelles spatiales (horizon, solum, parcelle, bassin versant, paysage) et temporelles (événement pluvieux, saison culturale, rotation, décennie, siècle et au delà).

Elle analyse la variabilité des caractéristiques et propriétés des sols (texture et minéralogie, porosité, stabilité structurale, propriétés hydrodynamiques, géochimie) en fonction de leur origine (matériau parental, pédogenèse), de leur utilisation par l'homme et du climat.

L'Unité de Recherche de Science du Sol d'Orléans est constituée d'une équipe de recherche qui est composée de 26 membres permanents, dont 7 chercheurs et 6 ingénieurs.

L'Unité a été créée en 2000 à partir du Service d'Etude des Sols et de la carte Pédologique de France et cohabite avec l'Unité de Service InfoSol qui a en charge la cartographie et la surveillance des sols sur le territoire national.

L'Unité développe ses activités autour de deux axes de recherche :

Unité de recherche de Science du Sol d'Orléans

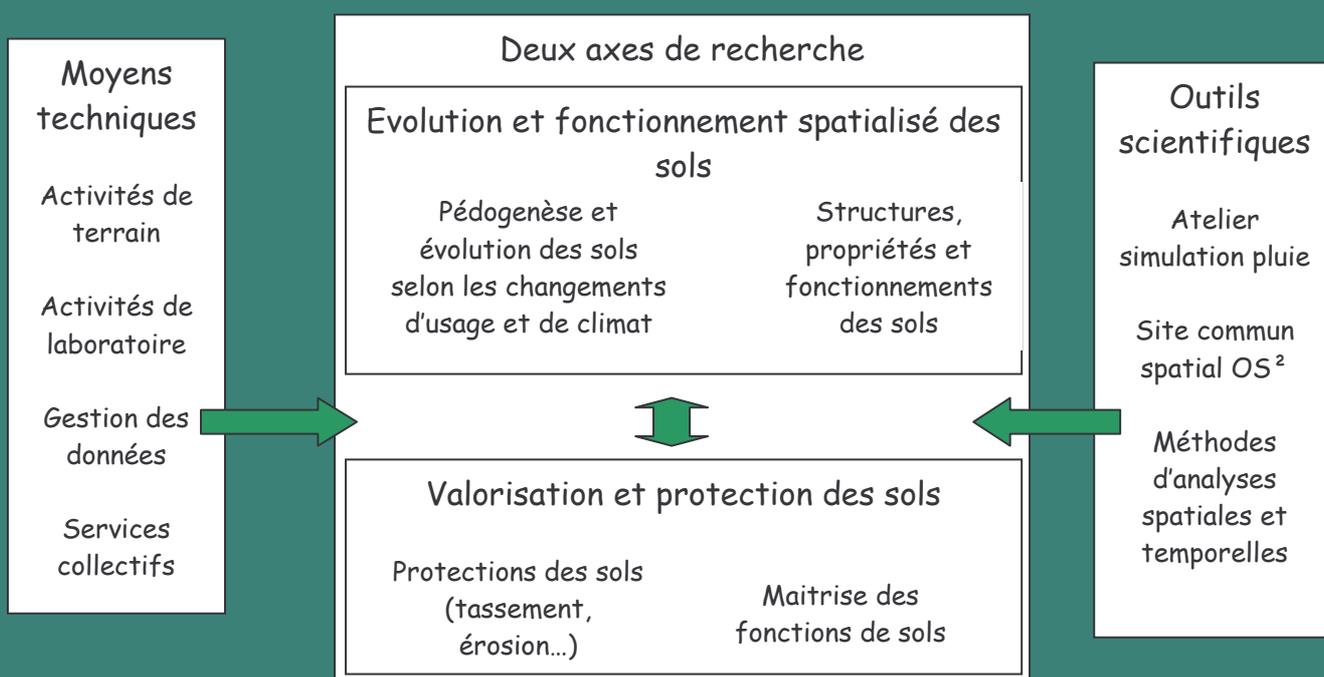
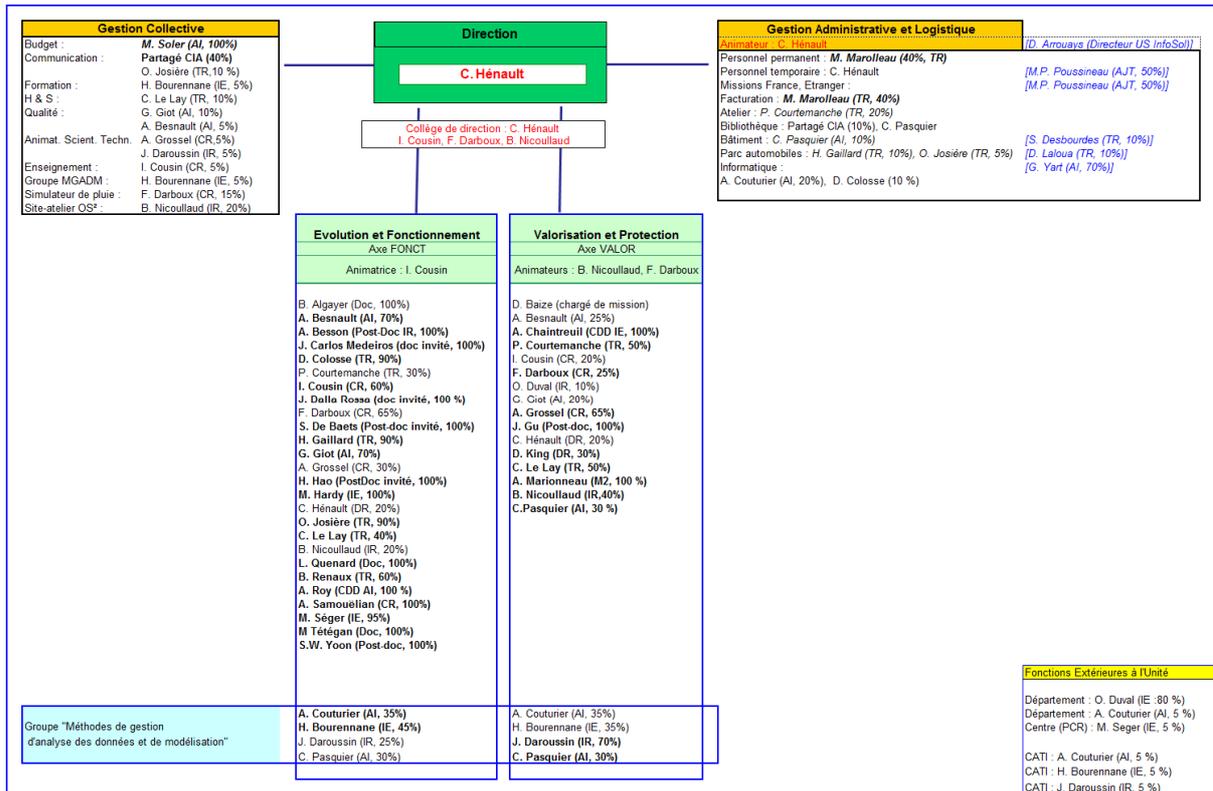


Figure 4 : Organisation de l'unité de recherche Science du Sol.

D. Organigramme structurel de l'unité Science du Sol

UR SOLS - INRA Orléans - Unité de SCIENCE DU SOL
Organigramme fonctionnel et hiérarchique (année 2011, MaJ 14/02/2011)



en gras, groupe d'affectation
 en italique, % de temps pour les deux unités Science du Sol et InfoSol
 [bleu entre crochets, personnel InfoSol]

Figure 5 : Organigramme de l'unité Science du Sol.

II. Présentation du sujet de stage

Dans le cadre des travaux sur l'étude du fonctionnement des sols, l'unité de Recherche Science du Sol doit disposer de mesures de teneur en eau volumique précises et continues afin d'alimenter différents modèles qu'elle utilise pour comprendre le fonctionnement spatialisé des sols et leur dynamique d'évolution.

Afin de mesurer la teneur en eau des sols, l'UR Sols utilise deux types de sondes :

- Des sondes TDR Trase (utilisées pour des mesures ponctuelles)
- Des sondes CS616 Campbell (utilisées pour le monitoring de la teneur en eau).

L'objectif de mon étude est de définir une nouvelle équation d'étalonnage, pour les sondes CS616 Campbell, permettant d'obtenir des données de teneur en eau volumique fiables, précises dans le temps, notamment à l'échelle de la saison culturale.

Pour cela nous avons reconstitué des colonnes de sol à densité et teneur en eau connues, nous avons utilisé des sondes TDR (Time Domain Reflectometry : Réflectométrie dans le domaine temporel) ainsi qu'un appareil TDR permettant de faire des mesures ponctuelles de teneur en eau volumique. Parallèlement nous avons mis en place des sondes CS616 Campbell dans les colonnes de sol, connectées à une centrale d'acquisition pour un suivi temporel de la mesure de teneur en eau volumique, et enfin nous avons effectué un suivi en température avec des thermistances placées dans les colonnes de sol.

Pour évaluer les délais et planifier les différentes étapes de mon projet j'ai réalisé un diagramme de Gantt, figure 7.

Mon projet n'a pas occasionné de nouvelle dépense pour l'unité de recherche cependant nous avons réalisé une estimation des coûts sur le matériel que nous avons utilisé.

Matériel utilisé	Coût
Centrale d'acquisition	1 500 €
Coffret + alimentation	500 €
6 sondes CS616	200 € x 6
2 thermistances	50 € x 2
Appareil TDR Trase system	10 000 €

Tableau 1 : Estimation des coûts sur le matériel utilisé.

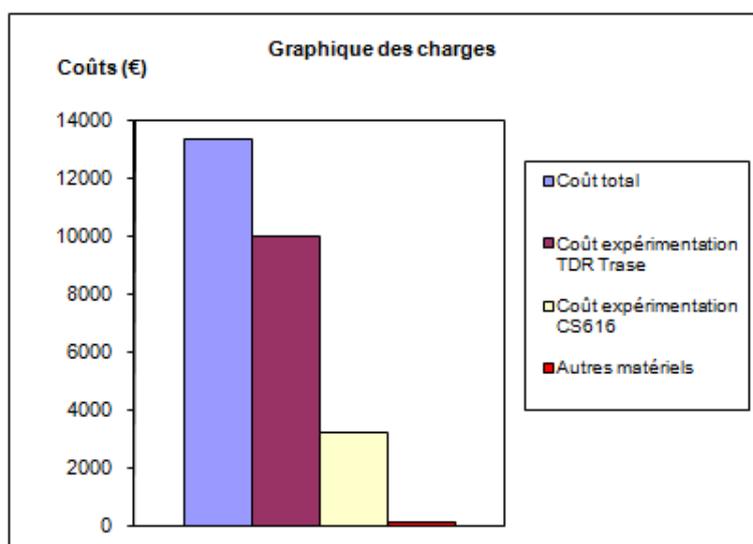


Figure 6 : Graphique des charges.

III. Le sol

A. Qu'est ce que le sol ?

Le sol est un objet d'étude important à l'INRA. Menacé dans ces fonctions productives et environnementales par l'érosion et par des atteintes à sa structure et à son équilibre biologique, il ne doit plus être considéré comme un simple support de culture mais comme un patrimoine à préserver.

Le sol constitue la partie superficielle de l'écorce terrestre. Il provient de l'altération des roches et de la décomposition de la matière organique par l'action de l'eau, de l'air et des êtres vivants.

Le sol est constitué de 4 horizons :

- 1 = sombre, agrégats arrondis : organo-minéral = horizon A
- 2 = clair, caillouteux, sans agrégats : appauvri en argile = horizon E
- 3 = brun-rouge, agrégats anguleux : enrichi en argile = horizon Bt
- 4 = blanc : roche altérée = horizon C

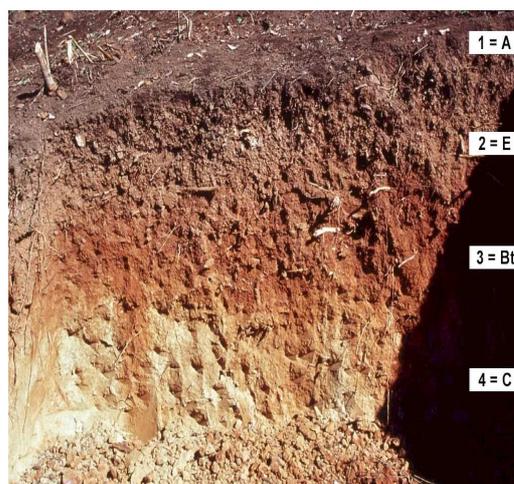


Figure 8 : Différents horizons du sol.

Les sols évoluent constamment sous l'effet de grands facteurs naturels et sous l'effet des activités humaines (usages, aménagements fonciers, pratiques agricoles, épandages de boues, retombées atmosphériques, pollutions accidentelles, ...).

On considère qu'un bon sol agricole est constitué de 25% d'eau, 25% d'air, 45% de matière minérale et de 5% de matière organique.

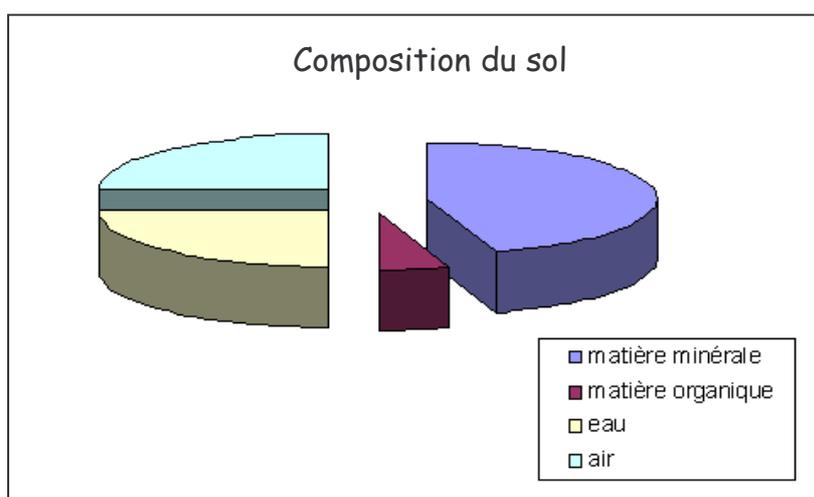


Figure 9 : Partage des composants principaux d'un sol cultivé.

B. L'eau dans le sol

1. Le cycle de l'eau

Sous nos climats, l'apport d'eau au sol se fait sous forme de pluie, neige, rosée et brouillard. Toute l'eau des précipitations n'atteint pas le sol: une part est évaporée directement pendant et après la pluie; les gouttes peuvent être interceptées en partie interceptées en partie par le feuillage. L'eau qui atteint le sol ruisselle, s'infiltré et réhumecte le sol. Les racines absorbent cette eau que la tige et les feuilles évaporent par transpiration. Une fraction réduite finalement gagne la profondeur et atteint la nappe.

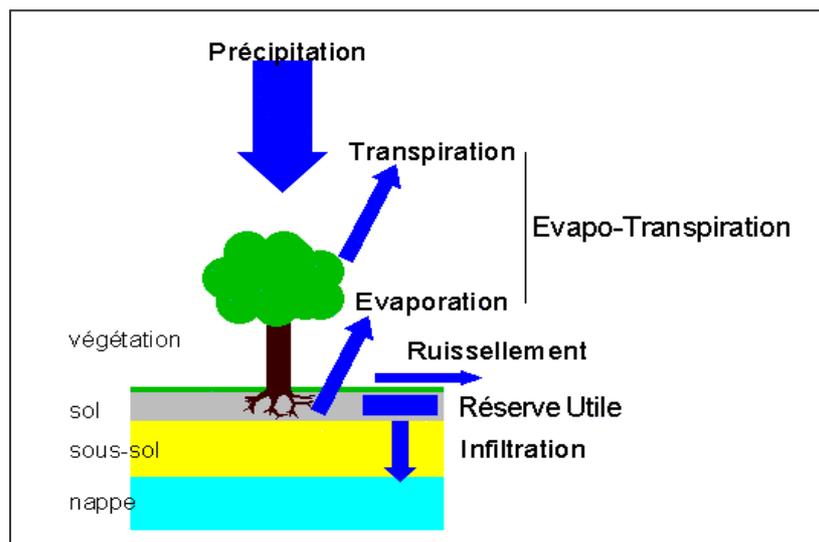


Figure 10 : La place de l'eau, du sol dans le cycle de l'eau.

2. La teneur en eau du sol

La teneur en eau permet de quantifier la quantité d'eau dans le sol, elle est fonction de la porosité et de la perméabilité du sol.

Le volume maximal d'eau qu'un sol peut retenir est la "capacité au champ" ou capacité de rétention du sol qui dépend essentiellement de la granulométrie du sol. A partir d'une certaine profondeur, la teneur en eau n'augmente plus: le sol est saturé, tous les pores du sol sont remplis d'eau: cette zone saturée forme une nappe.

a) Teneur en eau massique ou pondérale

La teneur en eau massique W (pour water = eau) exprimée en (g/g) correspond au rapport entre la masse d'eau M_w en g contenue dans le sol (cette masse correspond à la masse du sol humide M_h moins la masse du sol sec M_s) et la masse du sol sec M_s en g (sans oublier de retirer la masse des boîtes de prélèvement):

$$W = \frac{(Mh - Ms)}{Ms} \quad (3.1)$$

Le sol sec est défini de façon standard comme l'état du sol séché pendant 24 heures à une température de 105 °C.

b) Teneur en eau volumique

La teneur en eau volumique θ , exprimée en (m^3/m^3), correspond au rapport entre le volume d'eau V_w (m^3) en contenu dans le sol et le volume total des trois phases (liquide, solide, gazeuse) du sol V_t (m^3):

$$\theta = \frac{V_w}{V_t} \quad (3.2)$$

Le passage de la teneur en eau massique W à la teneur en eau volumique θ s'obtient par :

$$\text{Soit :} \quad \theta = (\rho_b / \rho_w)W \quad (3.3)$$

Où ρ_w est la masse volumique de l'eau (approximativement 1 Mg.m^{-3}) et ρ_b la masse volumique apparente du sol définie par :

$$\rho_b = \frac{M_s}{V_b} \quad (3.4)$$

On utilise aussi fréquemment la densité apparente D_a en g/cm^3 du sol pour passer de W à θ .

D_a est définie par :

$$D_a = \frac{M_s}{(V_b \times \rho_w)} \quad (3.5)$$

Dans ce cas :

$$\theta = W \times D_a \quad (3.6)$$

La teneur en eau volumique d'un sol peut se rapprocher de 0 dans le cas de sols extrêmement secs, tandis qu'elle est bornée à la limite supérieure de son domaine de variation par la porosité P . la valeur de P peut se calculer à partir de ρ_b lorsque l'on connaît la masse volumique de la phase solide du sol ρ_s :

$$P = 1 - \rho_b / \rho_s \quad (3.6)$$

IV. Principales méthodes de mesure de la teneur en eau d'un sol

La teneur en eau est un paramètre très important en physique des sols. Il existe évidemment différentes méthodes concernant sa mesure, lors de mon stage j'ai mis en œuvre les méthodes suivantes :

- Mesure directe
- Mesure TDR
- Mesure CS616

A. Mesure directe

Elle consiste à prélever des échantillons de sol, ensuite on les pèse puis on les fait sécher à l'étuve ventilée à 105°C jusqu'à atteindre un poids constant, ce qui peut prendre entre 24 et 48 heures. Cette méthode destructive est appelée méthode gravimétrique.



On peut alors calculer la teneur en eau massique en (g/g) de chaque échantillon connaissant sa masse M_h au moment du prélèvement et sa masse M_s après séchage.

$$W = \frac{(M_h - M_s)}{M_s} \quad (3.1)$$

Pour obtenir la teneur en eau volumique θ (m^3/m^3) à partir de la teneur en eau massique W (g/g) on utilise l'équation suivante:

$$\theta = W \times Da \quad (3.3)$$

Avec

$$Da = \frac{M_s}{V_t} \quad (3.4)$$

Tout au long de mon stage nous avons utilisé cette méthode pour effectuer un contrôle sur la teneur en eau massique des colonnes de sol reconstituées.

Voir tableau en annexe 1.

B. Mesures indirectes

1. Méthode TDR (Time Domain Reflectometry)

La réflectométrie est une méthode de diagnostic basée sur le principe du radar. Une onde électromagnétique est envoyée dans le système ou le milieu à diagnostiquer, ici le sol, ce signal se propage selon les lois de propagation du milieu étudié et lorsqu'il rencontre une discontinuité (d'impédance), une partie de son énergie est renvoyée vers le point d'injection. L'analyse du signal réfléchi permet de déduire des informations sur le système ou le milieu considéré. La réflectométrie est donc un moyen de contrôle non destructif.

Plusieurs chercheurs comme Topp et Dalton ont montré au début des années quatre vingt qu'il est possible de mesurer la teneur en eau en utilisant la réflectométrie dans le domaine temporel.

Cette méthode permet d'effectuer des mesures de teneur en eau ponctuelles, elles sont réalisées avec un appareil TDR (un oscilloscope numérique couplé à un générateur d'impulsion), connecté par un câble coaxial et une tête de raccordement à une ligne de transmission de longueur L , placé dans le sol.



Figure 11 : Appareil Trase de Soil Moisture avec sa sonde TDR.

Le système TDR est basé sur le calcul du temps de parcours d'une onde électromagnétique le long de la sonde TDR. Ce temps de parcours est mesuré en créant une impulsion électrique à front très rapide qui va se propager d'abord dans le câble, puis dans la sonde, se réfléchir à l'extrémité pour revenir à l'entrée de l'oscilloscope qui visualise le signal.

Des points de réflexion « repères » comme les extrémités de la sonde, permettent de calculer le temps de parcours de l'onde le long de la sonde (aller / retour), donc la constante diélectrique K_a du milieu.

L'allure d'un signal TDR est caractérisée par la figure 12.

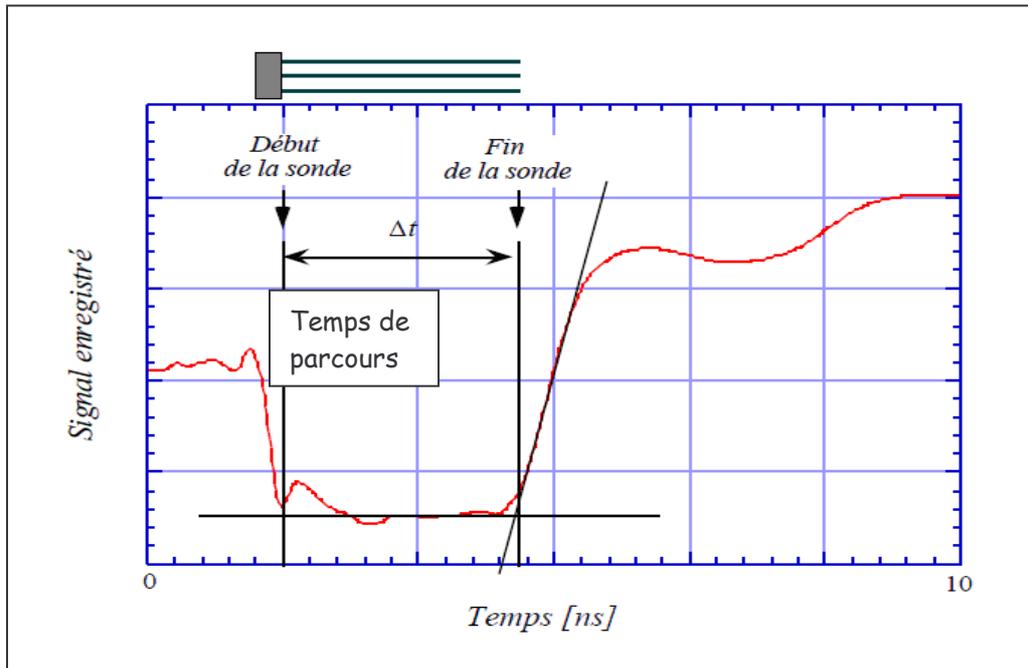


Figure 12 : Différentes parties d'un signal TDR.

Il reste à transformer la constante diélectrique Ka en teneur en eau. Pour cela il existe une relation empirique générale proposé par Topp $\theta = f(Ka)$ de la forme :

$$\theta = -0.053 + 0.029 \cdot Ka - 5.5 \cdot 10^{-4} \cdot Ka^2 + 4.3 \cdot 10^{-6} \cdot Ka^3 \quad (4.2)$$

qui relie la teneur en eau volumique (m^3/m^3) et la constante diélectrique du sol Ka . Ka est obtenu à partir du temps de transit (t) d'une impulsion électromagnétique à travers le sol, le long de la sonde :

$$Ka = \left[\frac{c \times t}{2 \times L} \right]^2 \quad (4.1)$$

$c = 3 \times 10^8$ (m/s) est la vitesse de la lumière,
 L (m) est la longueur de la tige de la sonde,
 t (s) est le temps de transit.

2. Méthode FDR (Frecency Domain Reflectometry)

La méthode FRD est fondée sur le même principe que la méthode TDR, les principales différences sont au niveau de la procédure d'injection et du traitement du signal.

Dans le domaine temporel (TDR), l'analyse des signaux réfléchis donne les informations sur la composition du milieu alors que dans le domaine fréquentiel (FDR), c'est l'analyse de l'onde stationnaire qui fournit ces informations.

Cette méthode consiste à former une capacité C (condensateur) avec le sol connue diélectrique. On mesure cette capacité autour d'une fréquence donnée en créant un circuit RLC avec le sol à caractériser.

Je n'ai pas travaillé avec ce type de sonde pendant mon stage, ces méthodes étant relativement peu précises.



Figure 8 : Sonde SM300, mesure deux paramètres : teneur en eau volumique et température.

3. Méthode CS616 de Campbell

Cette méthode permet d'avoir un suivi sur site expérimental de la teneur en eau volumique (monitoring). Les sondes utilisées pour cette méthode sont des réflectomètres de teneur en eau CS616, figure 14.

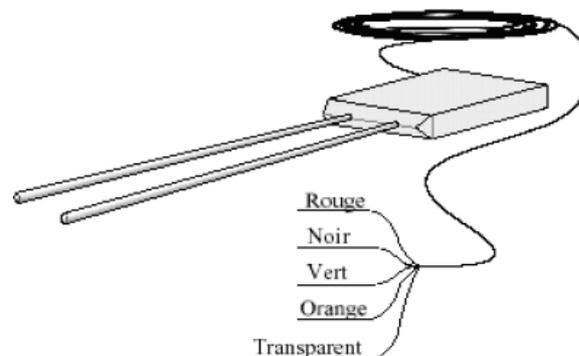


Figure 14 : Sonde de teneur en eau CS616.

- La précision du réflectomètre de teneur en eau volumique est de +/- 2,5%.
- La résolution est le changement minimum de la constante diélectrique que peut détecter le réflectomètre de façon fiable. La résolution de la sonde CS616 est de 0,1%.
- La répétitivité de la mesure, est déterminée par une prise de mesures répétées dans un même matériau. L'erreur de répétitivité est de 0,1%.

La sonde réflectométrique est composée de deux tiges en acier connectées à un circuit imprimé.

Des composants électroniques, présents sur le circuit imprimé sont configurés de façon à être des multivibrateurs bistables. La sortie du multivibrateur est connectée à la tige du capteur. Le temps de parcours du signal le long des tiges du capteur, dépend de la constante diélectrique du sol, et la constante diélectrique dépend de la teneur en eau volumique. Ainsi la fréquence du multivibrateur dépend de la teneur en eau volumique du matériau mesuré.

Un circuit numérique convertit le signal du multivibrateur en une fréquence compatible avec la centrale de mesure.

La fréquence mesurée avec le capteur dans l'air est d'environ 70MHz. Cette fréquence est mise à l'échelle afin d'être rentrée dans la gamme des mesures de la teneur en eau volumique, et afin d'être facilement mesurées par la centrale d'acquisition.

Le signal de sortie du capteur est une période qui est liée de façon empirique à la teneur en eau via deux équations d'étalonnage définies par le constructeur :

Une équation linéaire :

$$\theta = -0.4677 + 0.0283 \times P$$

Une équation quadratique :

$$\theta = -0.0663 - 0.0063 \times P + 0.0007 \times P^2$$

avec P la période du signal en (μ s) et θ la teneur en eau volumique (m^3/m^3).

Le signal en sortie du capteur CS616, est un signal carré +/- 0,7 Volts, figure 15 dont la période évolue en fonction de la teneur en eau volumique du matériau.

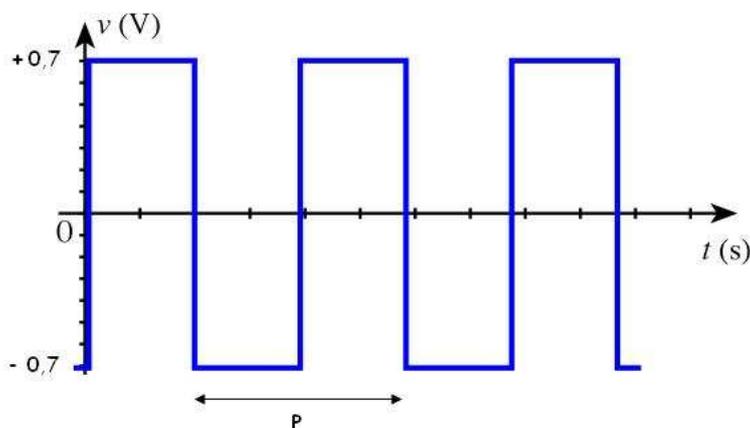


Figure 95 : Signal carré en sortie du capteur CS616.



Photo 1 : Centrale d'acquisition CR1000 et batterie.

La CR1000, photo 1, permet d'avoir des capacités de mesures de précision. Elle est alimentée par batterie, comprend un processeur et des entrées/sorties analogiques ou numériques. La langage de programmation se rapproche du BASIC et comprend des fonctions de traitement et d'analyse. Cette centrale est commandé par un logiciel LoggerNet qui permet de généré ou modifier des programmes, de récupérer des données ou de les visualiser en temps réel.

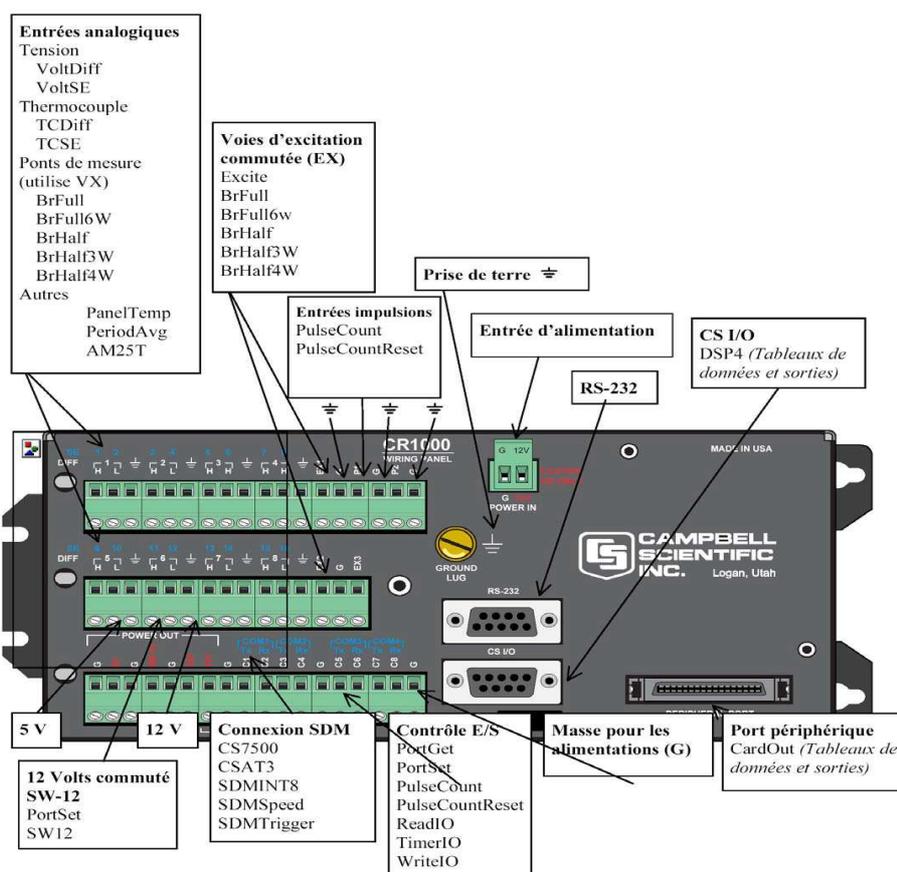


Figure 106 : Bornier de la CR1000 et instructions associées.

Le câblage des sondes sur la centrale d'acquisition CR1000 se fait à partir du tableau contenant les codes de câblage de la sonde CS616 voir annexe 2 et du diagramme de câblage voir annexe 3.

V. Matériel et méthode

A. Prélèvements sur site

Les échantillons de sol (vrac) ont été prélevés sur le site atelier de l'Unité OS² (Observatoire Spatialisé Orléanais des Sols). Ce site d'une surface de l'ordre de 10 km² est localisé à la limite des petites régions naturelles de la Beauce Chartraine et du Faux-Perche, proche de la source du Loir. Il se situe au nord d'Illiers-Combray, dans le département d'Eure et Loir. Nous avons procédé au prélèvement d'environ 15 kg de sol à différentes profondeurs.

Nous avons effectué des prélèvements de sol, sur le site La Gouéthière aux profondeurs suivantes :

- 0 à 20cm
- 20 à 30cm
- 30 à 40cm

Et sur le site La Morie à une profondeur de 0-20cm.



Photo 2 : Fausse de prélèvement de 40cm de profondeur.

B. Remaniement des échantillons

Dès leur arrivée au laboratoire, les échantillons de sol sont répartis dans des barquettes de 43 x28 cm puis séchés dans une étuve à 30°C pendant une semaine. (Photo 3).



Photo 3 : Etuve à 30°C avec échantillons de sol.

Après une semaine de séchage, le sol est broyé à l'aide d'un mortier et d'un pilon puis tamisé à 5 mm (photo 4). Nous obtenons ainsi des fragments terreux de diamètre < 2 mm (terre fine) ou compris entre 2 et 5 mm (mottes) dans le but de créer des géométries d'espace poral différentes).



Photo 4 : Tamisage du sol à 5 mm.

Afin de connaître la teneur en eau résiduelle de notre sol, nous avons ensuite fait sécher un aliquote de sol à 105°C pendant 48 heures. A partir des mesures de masse humide (M_h) et de masse sèche (M_s), on obtient cette teneur en eau résiduelle :

$$W = \frac{(M_h - M_s)}{M_s} = \frac{(89,48 - 88,48)}{88,48} = 0,011 \rightarrow 1\%$$

La teneur en eau pondérale résiduelle est donc de 1%. Nous tiendrons compte de cette teneur en eau initiale pour la fabrication des colonnes de sol à teneur en eau prédéterminées.

C. Préparation du sol

Afin d'obtenir un volume de sol adapté à la géométrie des sondes de mesure de la teneur en eau, nous avons décidé de fabriquer des colonnes de sol de 14 cm de diamètre et 35 cm de hauteur.

Pour reconstituer ces colonnes (photo 5) nous avons utilisé un fichier Excel (tableau 2) afin de calculer la masse de sol à teneur en eau initiale (1%) et la masse d'eau à introduire dans les cylindres en fonction de la densité et de la teneur en eau recherchées.

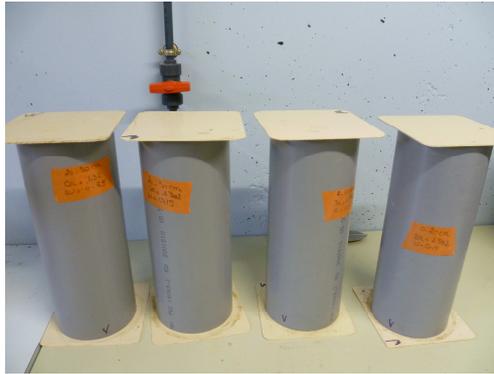


Photo 5 : Cylindres de sol.

Calcul de la masse de sol et de la masse d'eau en fonction de la densité et du % d'eau pour la préparation des cylindres

$$\text{densité } D_s = \frac{M \text{ sol (kg/m}^3\text{)}}{V_t \text{ (V cylindre m}^3\text{)}} \quad \% \text{ eau} = \frac{M_h - M_s}{M_s}$$

Volume du cylindre

Masse de terre à ajouter pour contrôle

Teneur en eau initiale du sol

Densité du solide

Masse volumique recherchée

Teneur en eau recherchée

M sol sec (g)

M eau (ml)

M sol humide à mettre dans le cylindre (g)

M sol sec à préparer (g) (ajout de 100 g)

M sol à la teneur en eau initiale à mettre dans la boîte

M eau à apporter dans la boîte (ml)

	0-20cm		20-30cm	
	4862,50	4862,50	4862,50	4862,50
	100,00	100,00	100,00	100,00
	0,01	0,01	0,01	0,01
	2,65	2,65	2,65	2,65
	1,30	1,30	1,30	1,30
	0,150	0,250	0,150	0,250
	6321,25	6321,25	6321,25	6321,25
	948,19	1580,31	948,19	1580,31
	7269,44	7901,56	7269,44	7901,56
	6421,25	6421,25	6421,25	6421,25
	6485,46	6485,46	6485,46	6485,46
	898,98	1541,10	898,98	1541,10

Tableau 2 : Calcul de la masse de sol et de la masse d'eau en fonction de la densité et de la teneur en eau.

$$\text{Volume du cylindre (cm}^3\text{)} = \pi \times \left(\frac{d}{2}\right)^2 \times h$$

$$\text{Densité de solide} = 2,65(\text{g/cm}^3)$$

Exemple :

Pour obtenir une teneur en eau pondérale de 10% et une densité de 1,30 par exemple pour le sol 0-20cm de la parcelle La Gouéthière, nous devons utiliser 6485,5 g de sol à teneur en eau initiale et 577,9 ml d'eau.

Dans une grande barquette, de 52 x 37 cm, on ré humecte le sol en ajoutant petit à petit la quantité d'eau prévue avec un vaporisateur. On homogénéise constamment le sol et l'eau avec une spatule et une fourchette.

Une fois la manipulation terminée on vérifie la masse totale avec une balance, soit :

Masse totale = Masse de sol à teneur en eau initiale + Masse d'eau à ajouter au sol sec

Dans le cas de notre exemple Masse totale = 6485,46 + 577,91 = 7063,37g

Si la masse n'est pas juste : il peut y avoir une perte d'eau au cours de la vaporisation, on complète alors avec le volume d'eau nécessaire jusqu'à obtenir la masse totale souhaitée.

Au cours de cette manipulation il ne faut surtout pas perdre un gramme de matière sèche sinon la densité pourrait être faussée.

Pour avoir une bonne homogénéité on laisse le sol reposer pendant quelques heures en bloquant l'évaporation avec un couvercle plastique.

Remarque : La masse totale de sol préparé correspond à la masse de sol humide nécessaire à la fabrication de l'échantillon + un échantillon de sol supplémentaire (100g de sol sec) pour le contrôle de l'humidité pondérale.

D. Fabrication des colonnes

Nous avons utilisé des cylindres en plastique, de 35 cm de hauteur et 13,3 cm de diamètre intérieur (14 cm extérieur) soit un volume de 4862,5 cm³, photos 5 et 6.

Pour fabriquer les colonnes de sol il suffit d'introduire environ 500 g de sol humide dans la colonne, de tasser le sol à l'aide d'une presse manuelle, photos 6 et 7, il faut renouveler l'opération jusqu'à ce que la colonne soit remplie de la totalité du sol humide préparé dans les barquettes.



Photo 6 : Presse manuelle pour la fabrication des colonnes.



Photo 7 : Presse manuelle et colonnes de sol.

E. Mise en place des capteurs

Afin de bloquer les transferts d'eau (plan de flux nul), les cylindres sont posés sur un support en plastique et nous bloquons l'évaporation par un film plastique. La teneur en eau de la colonne reste ainsi constante durant toute l'expérimentation.

Nous avons placé une sonde CS616 de 30 cm dans chaque colonne : celle-ci est reliée à une centrale d'acquisition Campbell CR1000 alimentée en 12V ce qui nous permet d'avoir un suivi temporel sur les mesures de teneur en eau volumique. Nous avons programmé la centrale d'acquisition grâce au logiciel LoggerNet pour mesurer la teneur en eau toutes les 20min. On admettra que la température et la teneur en eau sont constantes et homogènes le long de la sonde.

Pour mesurer la température à l'intérieur de la colonne nous plaçons une thermistance qui est aussi relié à la centrale d'acquisition.

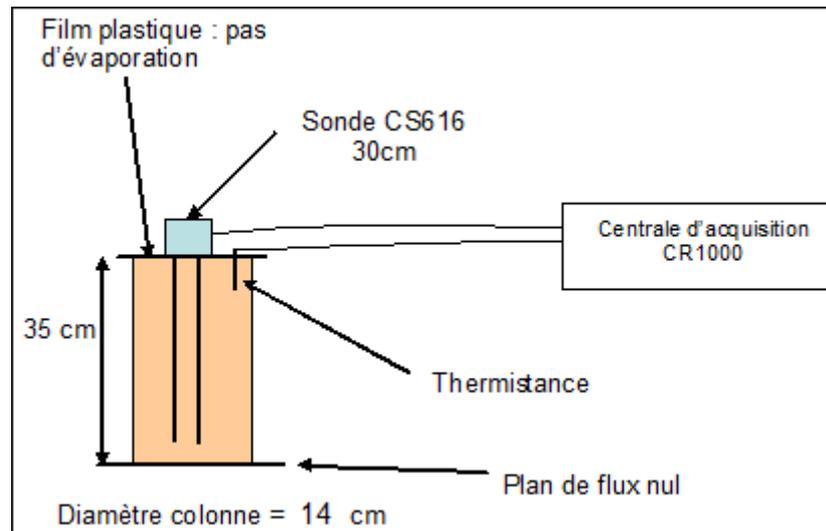


Figure 117 : Mise en place de la sonde CS616.

Une fois les mesures avec les sondes CS616 terminées, nous remplaçons les sondes CS616 par des guides d'ondes TDR Trase de 20cm de longueur. Nous effectuons ensuite avec l'appareil TDR Trase System une mesure ponctuelle de la teneur en eau volumique.

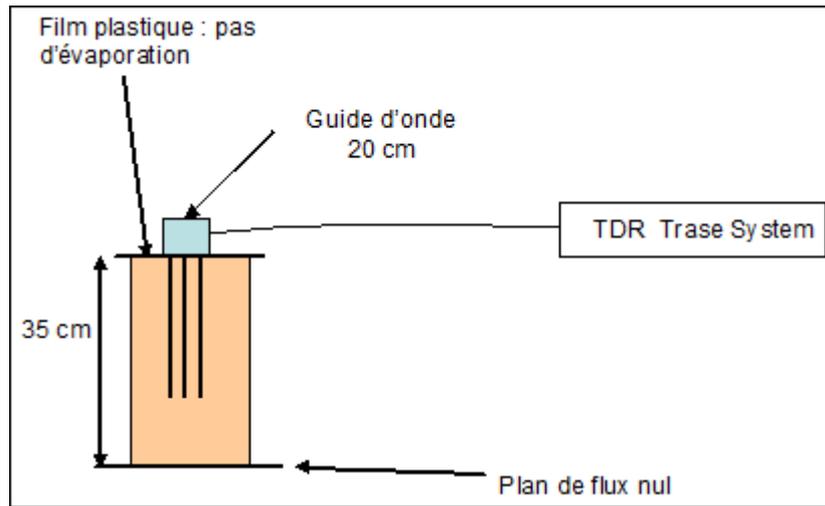


Figure 128 : Mise en place de la sonde TDR Trase system.

Nous obtenons donc pour chaque colonnes de sol à densité et teneur en eau pondérale connues :

- Une mesure de la teneur en eau volumique par méthode TDR Trase System.
- Une mesure de la température de la colonne.

VI. Résultats et discussion

A. Effet température

Différentes études (Rüdiger et al, 2010 ; Western and Siegfried, 2005 ; Benson and Wang, 2006) ont montré un effet de la température sur la période (P) mesurée par les sondes CS616.

Nous avons donc voulu chercher à quantifier cet effet température sur les sols des sites expérimentaux OS², instrumentés en 2011.

Le but étant de trouver un coefficient de correction de la température simple à appliquer aux données de teneur en eau volumique enregistrées par les centrales d'acquisition installées sur les sites de La Gouethière et La Morie.

Pour cela 10 colonnes de sol ont été fabriquées avec : une teneur en eau massique W fixe et une densité Da connue. Une fois ces colonnes fabriquées, nous avons bloqué l'évaporation et la percolation de l'eau afin de travailler à teneur en eau et densité constante. Seul le paramètre **TEMPERATURE** varie au cours de cette expérimentation.

Profondeur	Densité Da (g/cm ³)	Teneur en eau pondérale recherchée W (g/g)	Teneur en eau volumique théorique θ (m ³ /m ³)
0-20cm	1,32	0,10	0,132
0-20cm	1,32	0,15	0,198
0-20cm	1,32	0,20	0,260
0-20cm	1,32	0,25	0,320
20-30cm	1,32	0,10	0,132
20-30cm	1,32	0,15	0,198
20-30cm	1,32	0,20	0,260
20-30cm	1,32	0,25	0,320
30-40cm	1,32	0,25	0,320
30-40cm	1,40	0,25	0,320

Tableau 3 : Récapitulatif des colonnes.

L'expérimentation a été réalisée, pour les deux types de sondes CS616 et TDR Trase system. Les colonnes de sol sont placées dans une enceinte climatique où l'on fait varier la température pendant une semaine, en faisant des paliers de 48 heures à 5°C, 15°C, et 25°C, (figure 19). Ces températures correspondent au domaine des températures de sol couramment enregistrées sur le site expérimental OS².

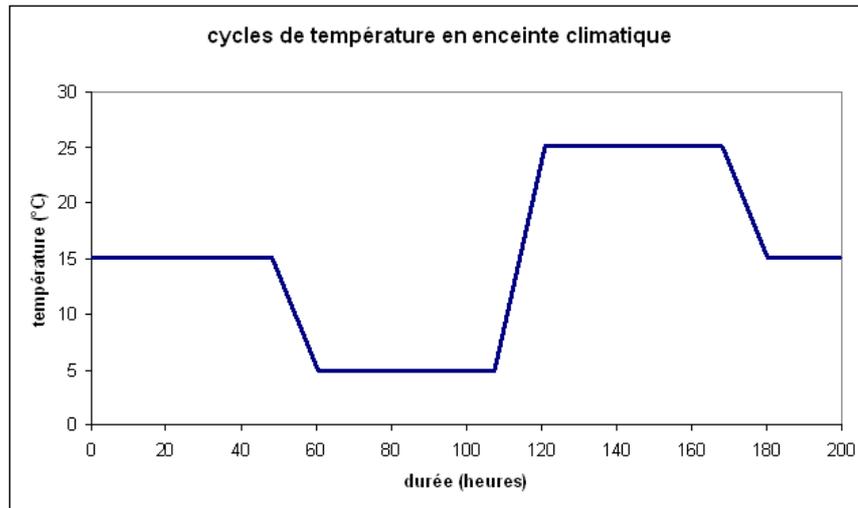


Figure19 : Cycles de température en enceinte climatique.

1. Effet température sur les sondes CS616

Pour vérifier l'effet température sur les sondes CS616, nous avons placés 10 colonnes de sol avec les sondes, dans une enceinte climatique, (figure 20), où nous avons fait varier la température de 5°C à 25°C.

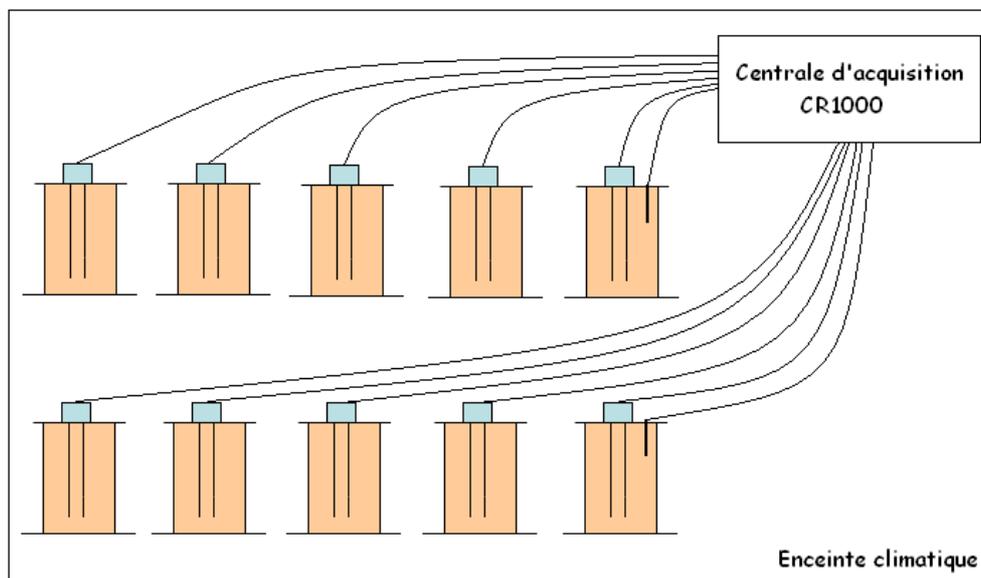


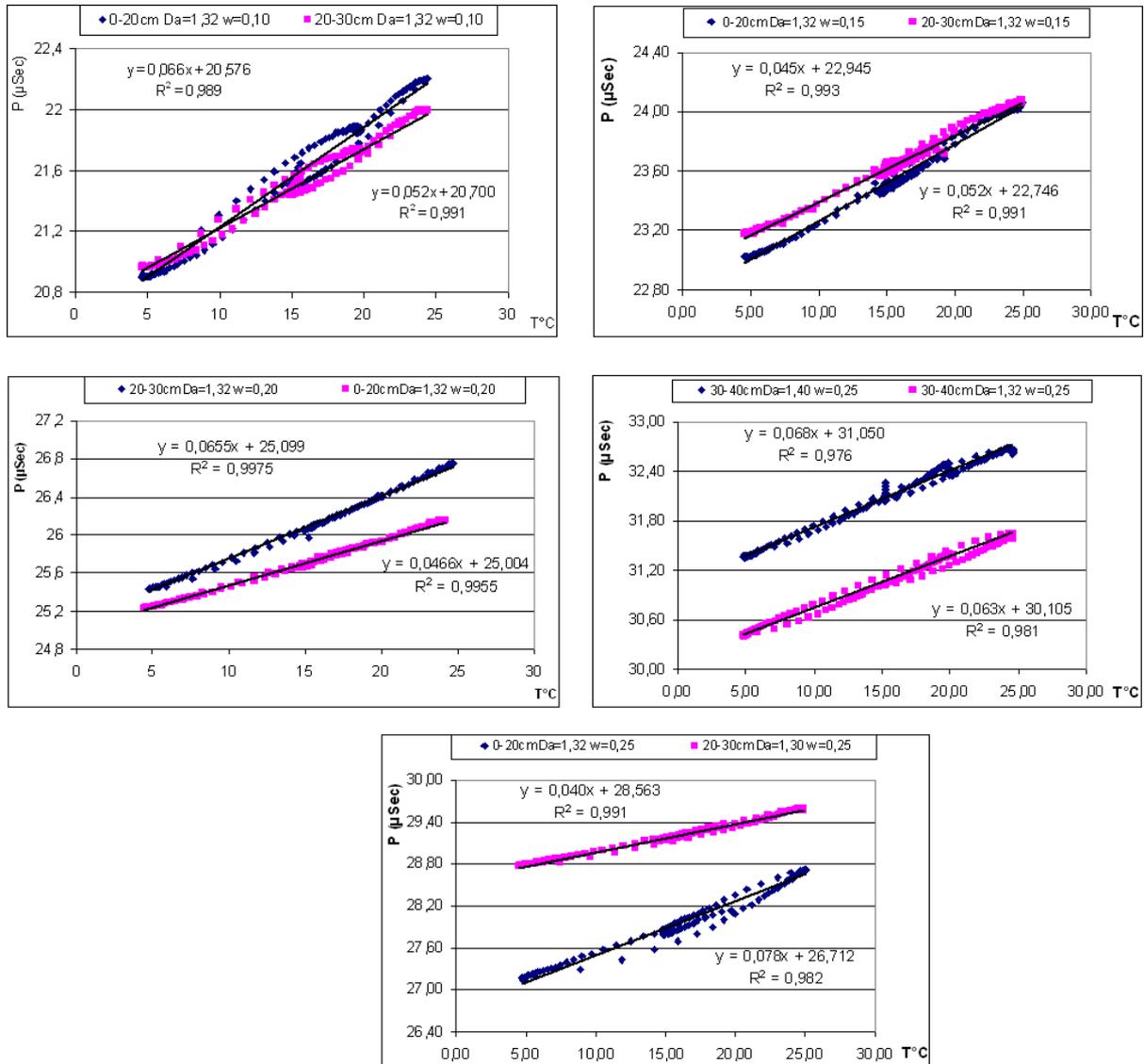
Figure 20 : Dispositif expérimental avec les sondes CS616 en enceinte climatique.

Pour chacune des sondes CS616, la période (μSec) est enregistrée toutes les 20 minutes.

En parallèle, 2 colonnes de sol sont équipées d'une thermistance qui nous permettent un suivi de la température du sol.

Une fois le cycle terminé nous avons collecté les données de la centrale d'acquisition, nous les avons regroupées dans un fichier Excel et nous avons fait les graphiques suivants qui montrent :

a) Evolution de la période du signal de sortie en fonction de la température.

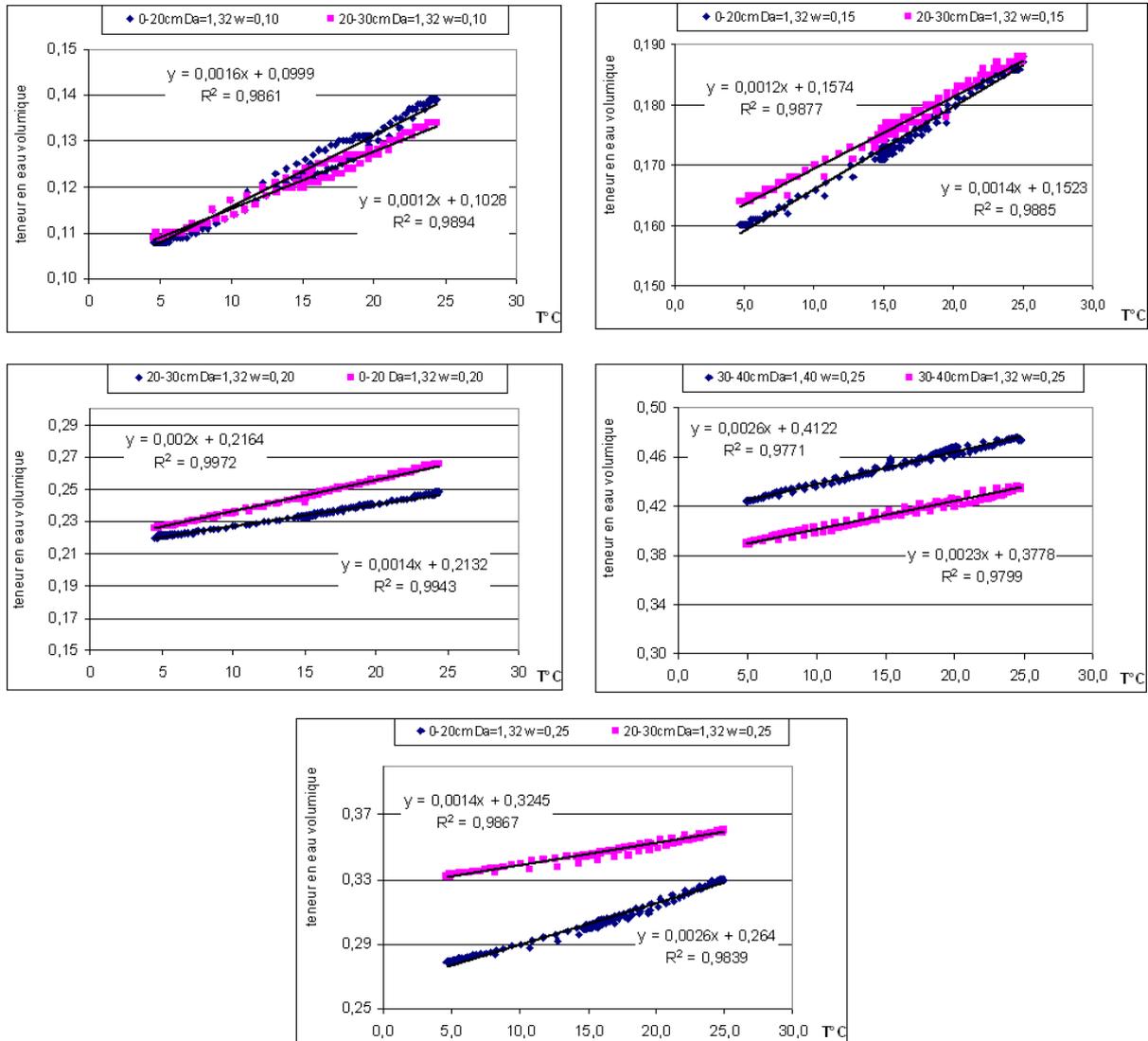


On constate une augmentation linéaire de la période en fonction de la température environ 1 μSec de différence entre les deux extrémums. Au cours de l'expérimentation, les paramètres suivants sont fixes :

- densité (structure du sol)
- texture du sol
- teneur en eau (plan de flux nul et évaporation bloqué)

Seule la température varie au cours de cette expérimentation. Les variations constatées de la période sont donc dues aux variations de température du sol. On peut donc conclure que ces sondes ne sont pas uniquement sensibles aux effets de la teneur en eau. Le signal brut est également sensible à la température. Nous allons maintenant quantifier l'influence de ces variations de température sur la teneur en eau volumique déterminée à partir de ces sondes CS616.

b) Evolution de la teneur en eau volumique en fonction de la température (avec équation du constructeur).



Nous étudions, ici, les variations de teneur en eau volumique en appliquant l'équation quadratique préconisé par le constructeur à la mesure de période brute.

$$\theta = C_0 \times P^2 + C_1 \times P + C_2$$

Nous rappelons que nous travaillons à teneur en eau, densité et texture constante. Seule la température varie.

On constate qu'à teneur en eau constante, la teneur en eau volumique mesurée par la sonde CS616 augmente avec la température : cette variation peut atteindre jusqu'à 5 points d'humidité volumique.

Dans le cadre des études de l'UR Sols, cette variation de 5 points d'humidité, due à la température, n'est pas négligeable et doit être réduite pour augmenter la précision des mesures de teneur en eau volumique avec les sondes CS616.

c) Correction en température

A teneur en eau constante, on constate donc un effet de la température, sur la période P, qui peut engendrer une erreur important sur les mesures de teneur en eau volumique. On décide donc de corriger l'effet de la température. Pour cela on propose de corriger la période brute mesurée par le capteur à l'aide d'un coefficient α afin d'obtenir une période corrigée en température à 20°C soit P_{20} .

On décide de faire une analogie avec la résistance électrique,
Soit la relation :

$$R = R_0(1 + \alpha\Delta T)$$

Nous appliquons cette relation à la période :

$$P = P_0(1 + \alpha\Delta T)$$

$$\Rightarrow P_{mesurée} = P_{20}(1 + \alpha\Delta T)$$

$$\text{Et } P_{20} = \frac{P_{mesurée}}{1 + \alpha\Delta T} = P_{mesurée} \left(\frac{1}{1 + \alpha(T_{mesurée} - 20)} \right)$$

avec $\Delta T = T_{mesurée} - 20^\circ\text{C}$

$$P_{mesurée} = P_{20} + P_{20}\alpha(T_{mesurée} - 20)$$

$$P_{mesurée} = P_{20} + \alpha P_{20} \Delta T$$

Nous obtenons donc une relation linéaire entre la température et la période mesurée par le capteur.

On a une équation de type

$$y = ax + b$$

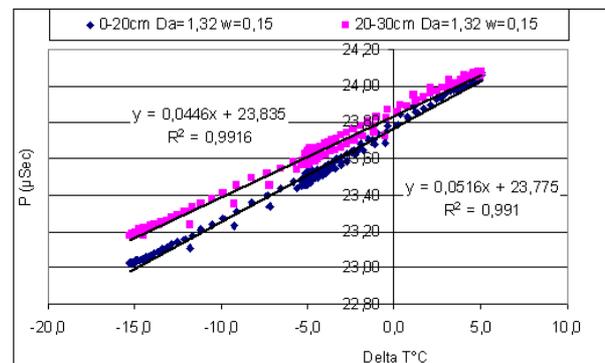
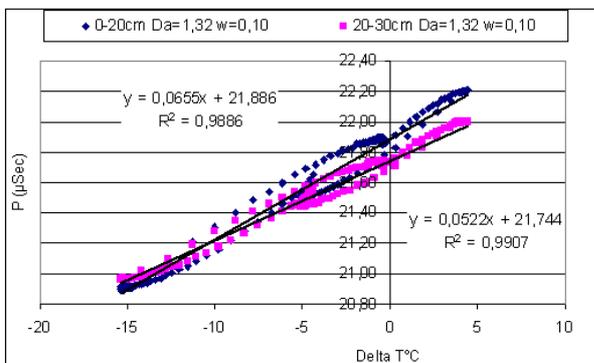
avec $a = \alpha P_{20} \Rightarrow$ pente de la relation linéaire obtenue avec les données expérimentales

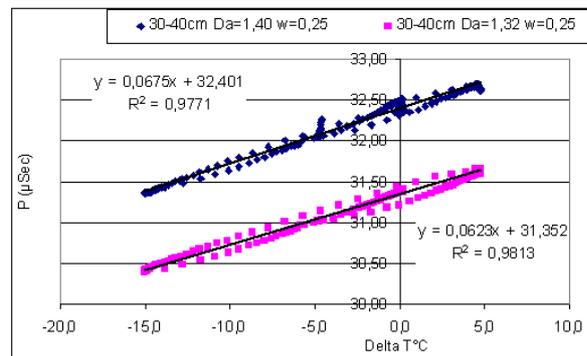
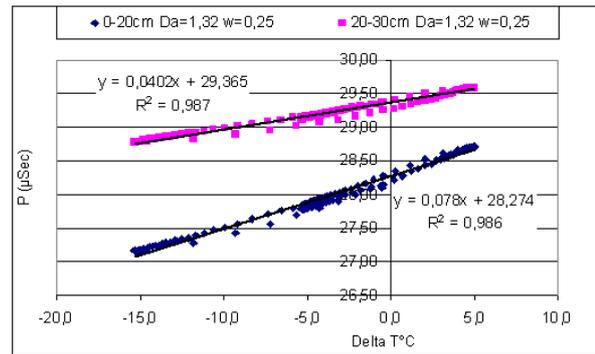
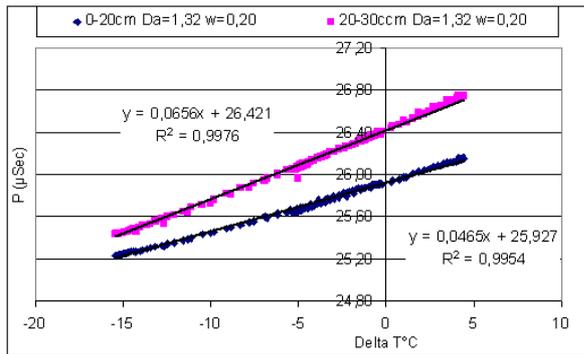
$b = P_{20} \Rightarrow$ offset de la relation linéaire obtenue avec les données expérimentales

$$\text{d'où } \alpha = \frac{a}{P_{20}}$$

Les données expérimentales nous permettent de déterminer la pente et l'offset de l'équation :

$$P_{mesurée} = a\Delta T + b$$





Avec les équations empiriques obtenues pour chaque colonne on peut déterminer les coefficients α :

$$\alpha = \frac{a}{P_{20}}$$

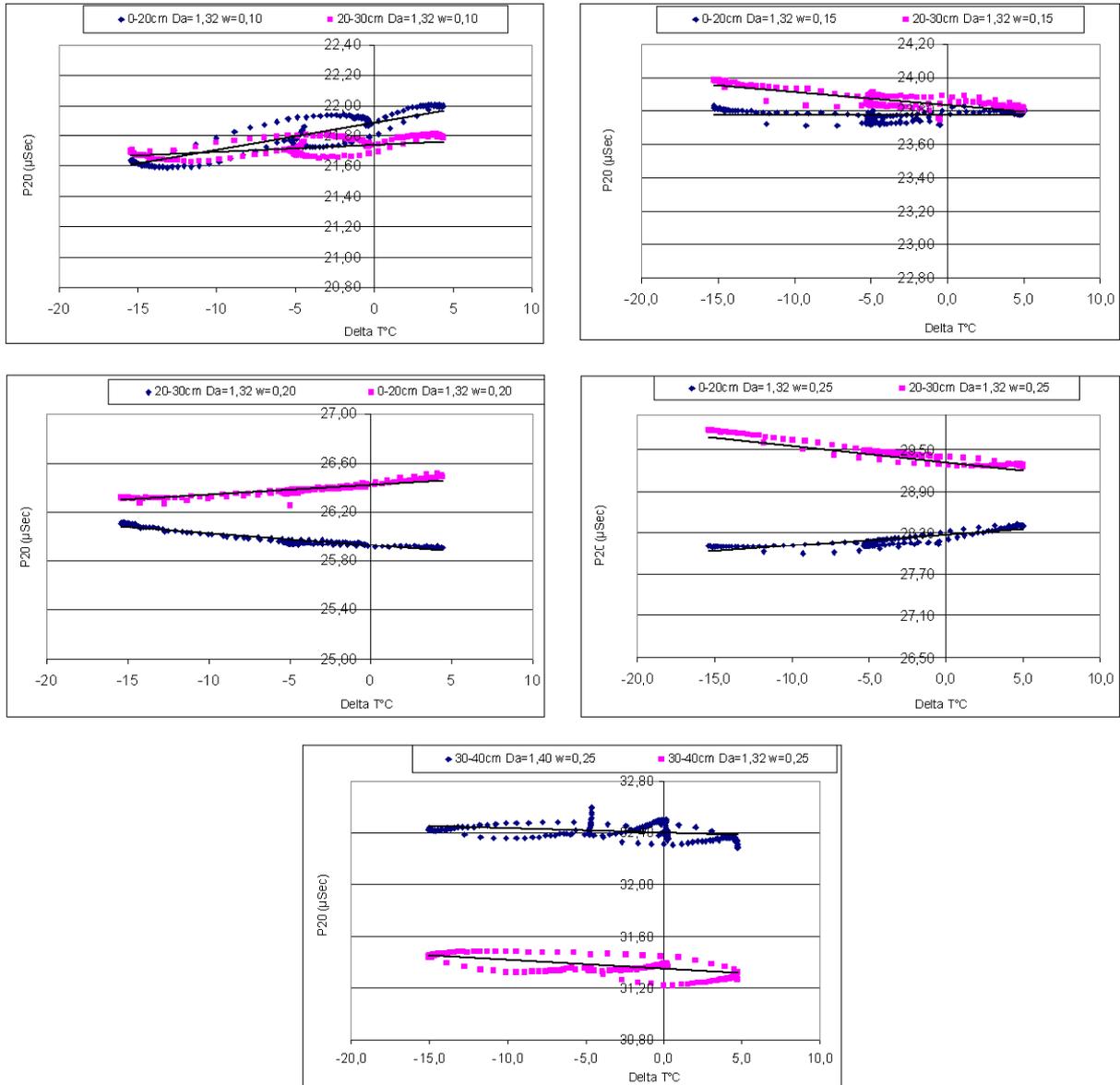
colonnes	α
0-20cm Da=1,32 w=0,10	0,00299
0-20cm Da=1,32 w=0,15	0,00217
0-20cm Da=1,32 w=0,20	0,00179
0-20cm Da=1,32 w=0,25	0,00276
20-30cm Da=1,32 w=0,10	0,00240
20-30cm Da=1,32 w=0,15	0,00187
20-30cm Da=1,32 w=0,20	0,00248
20-30cm Da=1,32 w=0,25	0,00137
30-40cm Da=1,40 w=0,25	0,00208
30-40cm Da=1,32 w=0,25	0,00199
moyenne α	0,00219

Tableau 4 : Coefficient de correction α pour les 10 colonnes de sol

On propose donc le coefficient de correction en température $\alpha = 0,0022$.

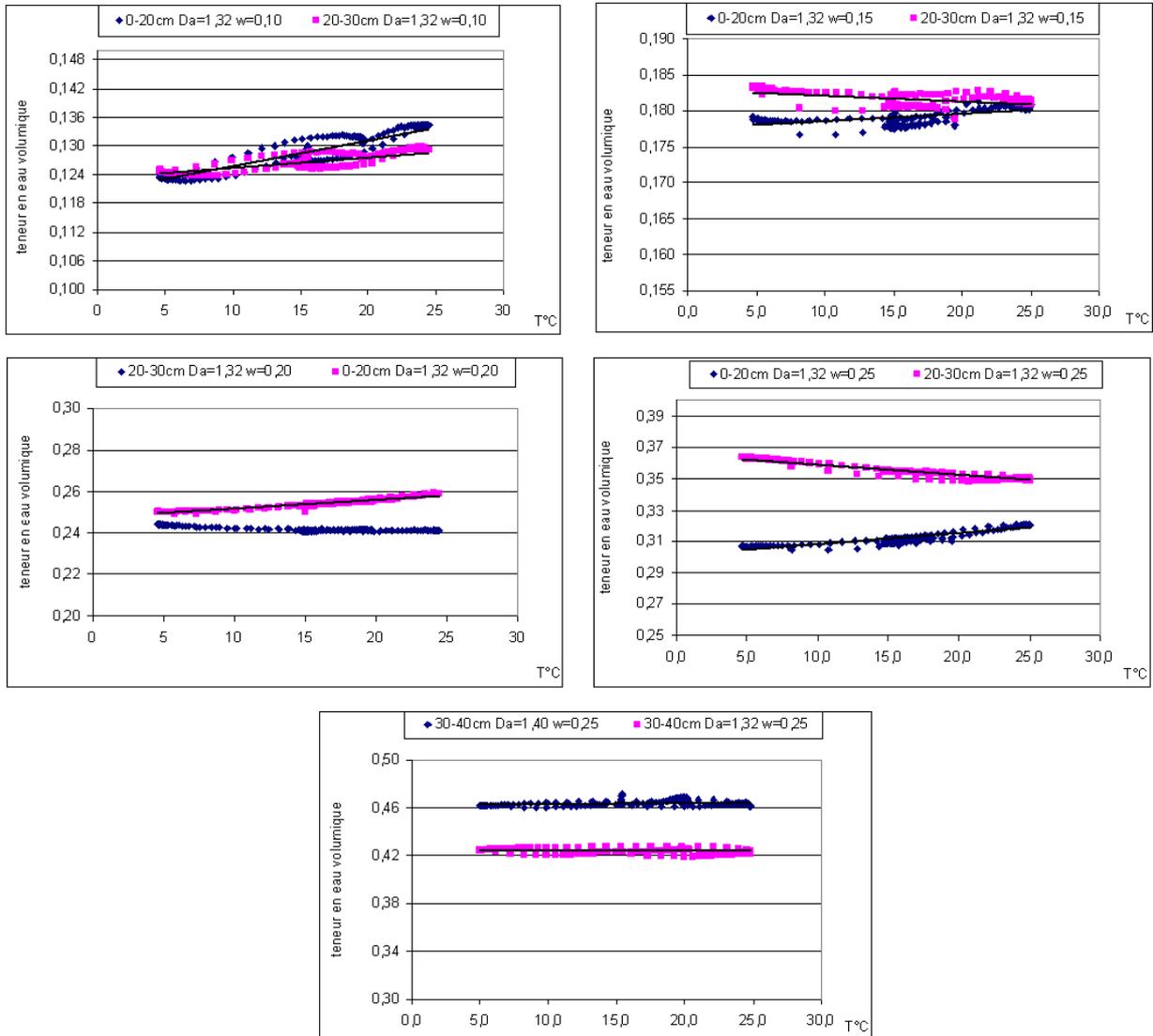
d) P_{20} : période corrigée à 20 °C

Ici nous appliquons le coefficient de correction en température α à nos données de période brutes initiales. Nous obtenons les graphiques suivants :



On constate que l'application du coefficient α à la période brute permet de réduire considérablement l'effet de la température : les relations linéaires obtenues entre la période corrigée à 20 °C et la température ont tendance à « s'aplatir » par rapport à (1. a). Les variations de période en fonction de la température sont désormais très faibles.

e) Evolution de la teneur en eau volumique après correction en température



Après correction en température à 20°C de la période brute, nous obtenons une période corrigée P_{20} à laquelle nous appliquons de nouveau l'équation quadratique du constructeur :

$$\theta = -0.0663 - 0.0063 \times P_{20} + 0.0007 \times P_{20}^2$$

Désormais, les variations de teneur en eau volumique ne dépassent jamais 1 point de teneur en eau. On a réduit d'un facteur 5 l'effet de la température en appliquant le coefficient α .

La teneur en eau volumique est quasiment constante en fonction de la température. La sensibilité à la température est désormais négligeable.

2. Effet température sur les sondes TDR Trase system

Pour vérifier l'effet température sur les sondes TDR Trase system, nous avons équipé 4 colonnes de sol avec des guides d'onde de 20cm (figure 21). Ces 4 colonnes sont ensuite placées dans une enceinte climatique afin d'effectuer des paliers en température à 5°C, 15°C, et 25°C.

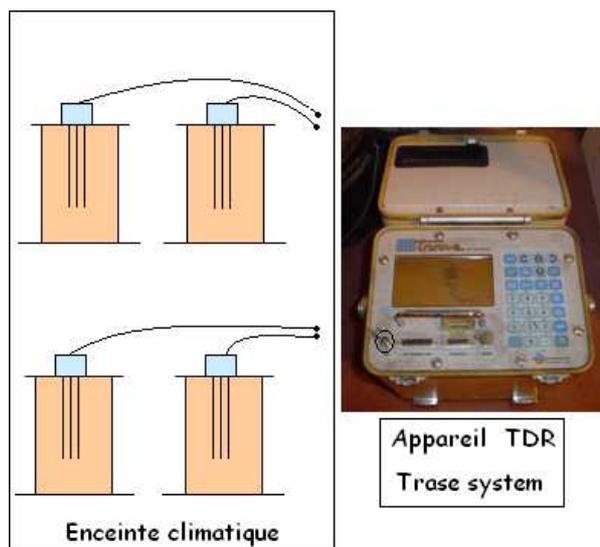
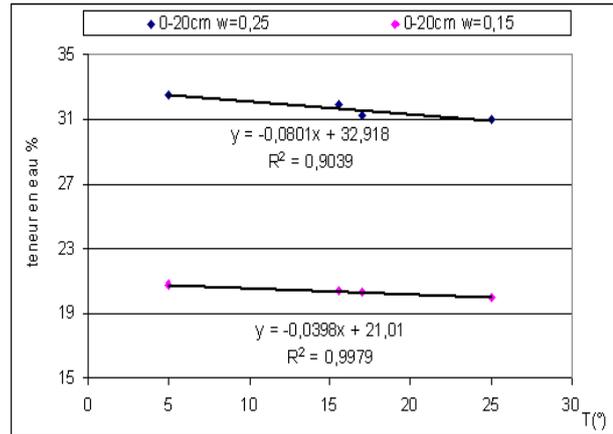
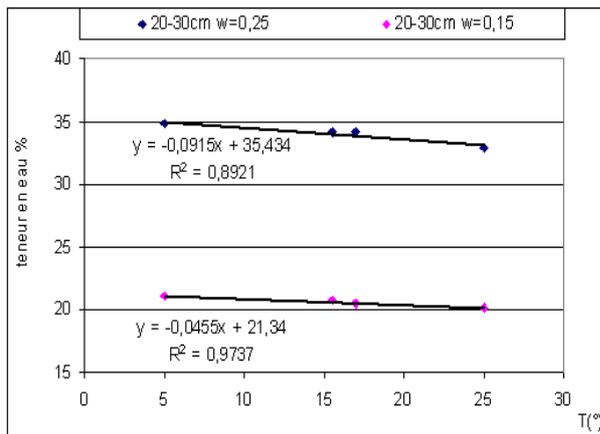


Figure 21 : Dispositif expérimental avec les sondes TDR Trase sytem en enceinte climatique

Profondeur	Densité D_a (g/cm^3)	Teneur en eau W (g/g)	Teneur en eau théorique θ (m^3/m^3)
0-20cm	1,32	0,15	0,198
0-20cm	1,32	0,25	0,320
20-30cm	1,32	0,15	0,198
20-30cm	1,32	0,25	0,320

Tableau 5 : Récapitulatif des colonnes de sol.

Après 48 heures de stabilisation à chaque palier de température (5°C , 15°C, 17°C et 25°C), on mesure la teneur en eau volumique de chaque colonne de sol. Pour chaque colonne de sol, nous avons donc 4 points de mesure en fonction de la température.



On constate que le système TDR Trase est peut sensible à la température, l'effet de la température sur les sondes TDR est linéaire, l'effet de la température ne dépasse jamais un point d'humidité entre la température la plus faible et le plus élevée.

Contrairement aux sondes CS616, l'évolution de la teneur en eau volumique décroît en fonction de l'augmentation de la température.

La différence entre les deux extrêmes est seulement de un point de teneur en eau volumique il ne sera pas nécessaire d'appliquer une correction en température. Cela ne ferait qu'alourdir le traitement des données, cette correction n'aboutirait pas à de meilleurs résultats.

B. Définition d'une nouvelle équation d'étalonnage

L'objectif de mon stage est de définir une nouvelle équation d'étalonnage, pour les sondes CS616 Campbell, permettant d'obtenir des données de teneur en eau volumique fiables, précises dans le temps et qui se rapproche au mieux de la réalité.

Nous pensons que les équations d'étalonnage du constructeur ont été définies pour un type de sol particulier qui ne correspondrait pas au sol de la Beauce Chartraine, où se trouve le site atelier de l'Unité OS² (Observatoire Spatialisé Orléanais des Sols).

Le constructeur CAMPBELL précise les deux équations suivantes à appliquer à la mesure de période brute du capteur :

Equation linéaire :

$$\theta = -0.4677 + 0.0283 \times P$$

Equation quadratique :

$$\theta = -0.0663 - 0.0063 \times P + 0.0007 \times P^2$$

Pour définir cette nouvelle équation nous allons d'abord proposer des coefficients d'étalonnage adaptés à chaque type de sol que nous avons prélevé. Pour cela nous avons analysé les mesures de teneur en eau volumique effectuées sur les 30 colonnes de sol fabriquées au cours du stage (tableau 6).

Pour chacune des 30 colonnes, nous avons mesuré la teneur en eau volumique à l'aide du System TRASE et à l'aide des sondes de teneur en eau CS616.

Pour les sondes CS616, nous avons enregistré la période brute P puis nous avons appliqué le coefficient α afin d'obtenir la période corrigée P20.

Profondeur	Densité (g/cm ³)	W recherchée (g/g)	θ théorique (m ³ /m ³)	P20 cs616 (µSec)	θ cs616 constructeur (m ³ /m ³)	θ trase (m ³ /m ³)
0-20cm	1,32	0,10	0,132	21,88	0,130	0,122
	1,32	0,15	0,198	23,8	0,180	0,204
	1,32	0,20	0,260	26,42	0,260	0,260
	1,32	0,25	0,320	28,44	0,330	0,318
20-30cm	1,32	0,27	0,356	31,28	0,416	0,370
	1,32	0,10	0,132	21,74	0,130	0,128
	1,32	0,15	0,198	23,86	0,180	0,207
	1,32	0,20	0,260	25,92	0,240	0,257
30-40cm	1,32	0,25	0,330	29,28	0,350	0,344
	1,32	0,27	0,356	31,56	0,427	0,377
	1,32	0,10	0,132	23,75	0,176	0,121
	1,32	0,15	0,198	24,74	0,203	0,192
0-20cm la morie	1,32	0,20	0,260	27,185	0,276	0,259
	1,32	0,25	0,330	31,38	0,430	0,339
	1,30	0,10	0,130	22,32	0,139	0,110
	1,30	0,15	0,195	24,73	0,203	0,198
30-40cm	1,30	0,20	0,260	28,35	0,310	0,254
	1,30	0,25	0,325	30,75	0,400	0,316
	1,30	0,27	0,350	31,12	0,414	0,339
	1,40	0,10	0,140	23,06	0,158	0,128
30-40cm	1,40	0,15	0,210	26,23	0,246	pas de mesure
	1,40	0,17	0,238	26,38	0,252	0,253
	1,40	0,20	0,280	28,25	0,310	0,290
	1,40	0,25	0,350	32,38	0,460	0,358
30-40cm	1,50	0,15	0,225	27,65	0,293	0,263
	1,50	0,20	0,300	30,14	0,376	0,297
	1,50	0,25	0,375	33,08	0,488	0,366
30-40cm	1,60	0,15	0,240	28,92	0,330	0,270
	1,60	0,20	0,320	31,37	0,420	0,326
	1,60	0,25	0,400	32,35	0,460	0,367

Tableau 6 : Résultats sur les mesures de teneur en eau volumique effectués sur les 30 colonnes.

Les graphiques suivants permettent de définir les coefficients d'étalonnage pour chaque type de sol étudié.

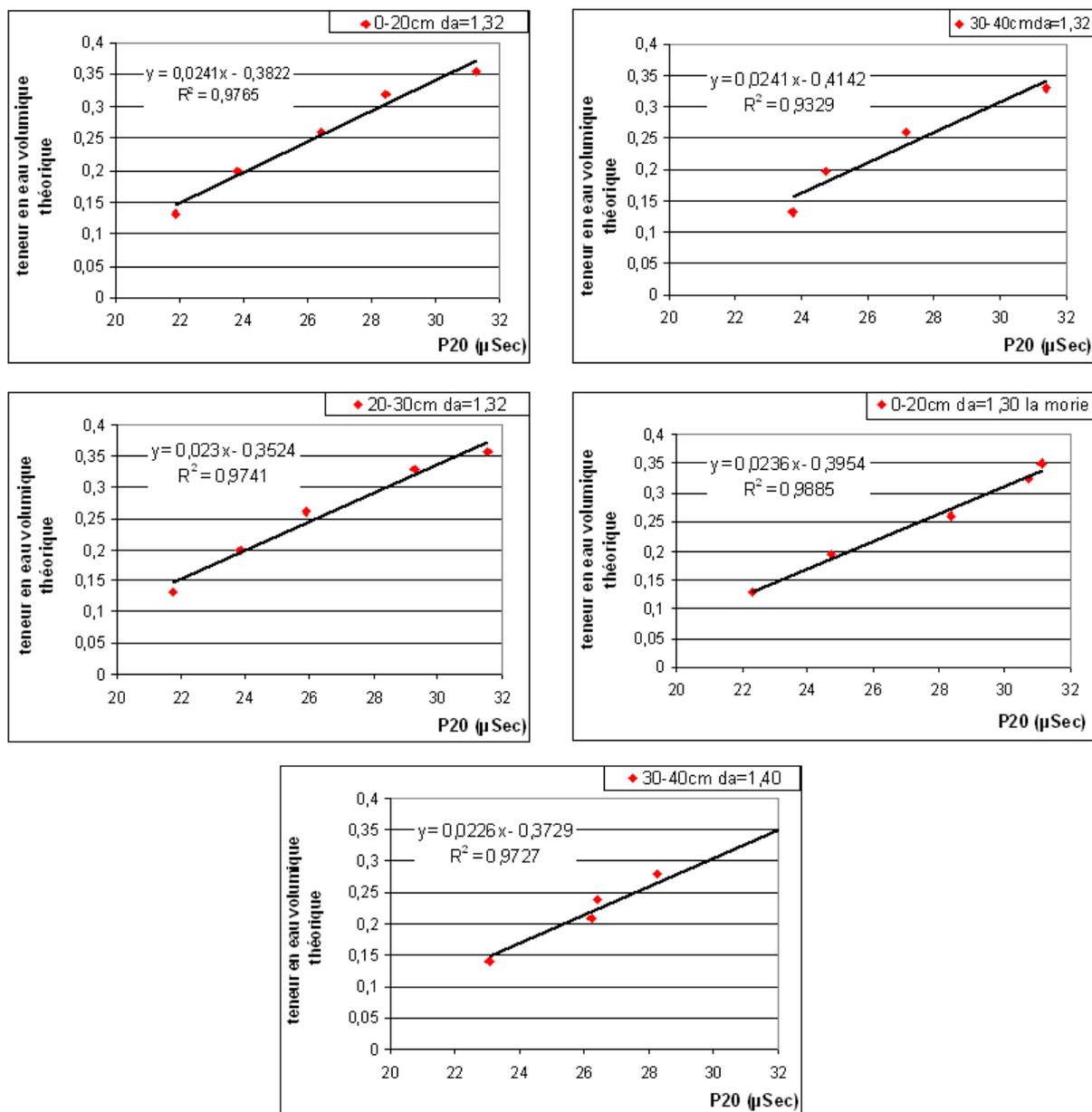


Figure 22 : relation entre la teneur en eau volumique théorique et P20.

Caractéristique colonnes	penete	offset	R ²
0-20cm Da=1,32 g/cm ³	0,241	0,3822	0,9765
20-30cm Da=1,32 g/cm ³	0,0230	0,3524	0,9741
30-40cm Da=1,40 g/cm ³	0,0226	0,3729	0,9727
30-40cm Da=1,32 g/cm ³	0,0241	0,4142	0,9329
0-20cm Da=1,30 g/cm ³ La Morie	0,0236	0,3954	0,9885

Tableau 7 : Synthèse sur les équations des cinq colonnes de sol.

Nous décidons donc de synthétiser toutes les données, cela nous permettra de faire une moyenne sur les valeurs des coefficients a et b des équations empiriques et par la suite nous pourrons définir des coefficients adaptés pour le site expérimental OS².

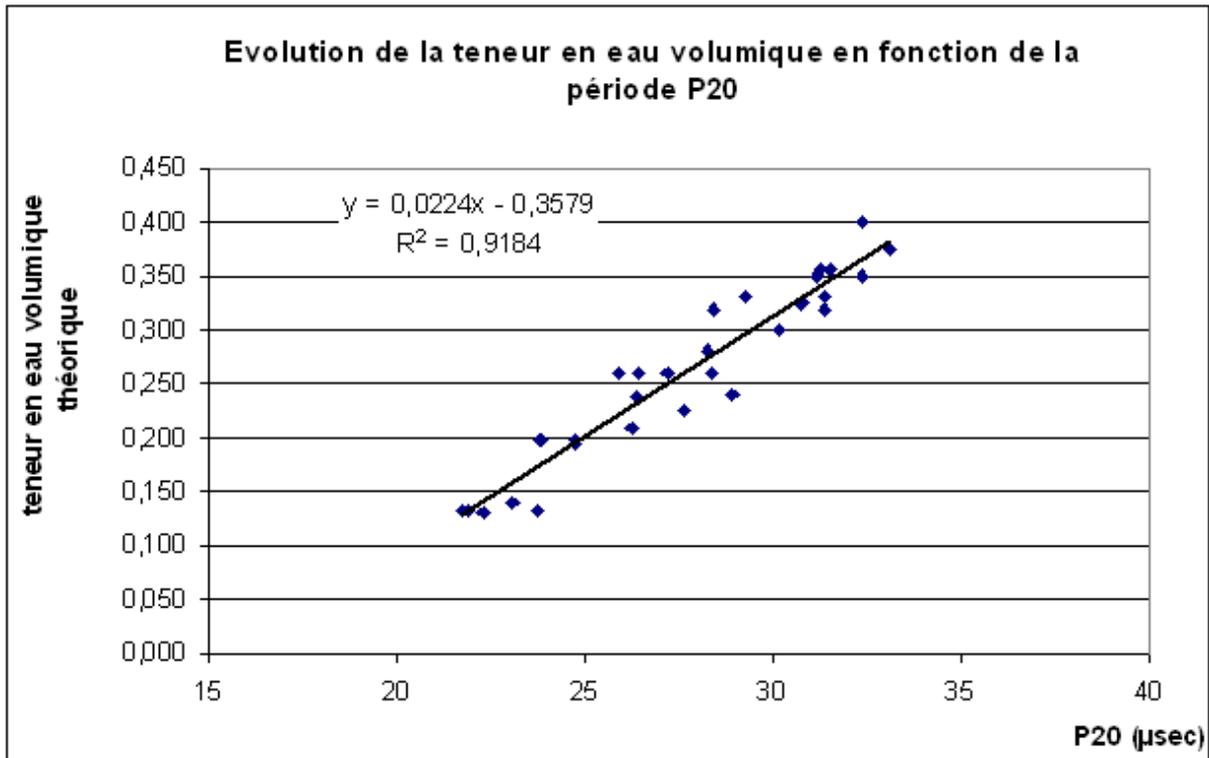


Figure 23 : Synthèse des mesures effectuées sur les 30 colonnes : évolution de la teneur en eau volumique théorique en fonction de la période corrigée P20

La relation obtenue entre P20 et la teneur en eau volumique théorique est linéaire, du type :

$$y = ax + b$$

Par analogie avec le graphique (figure 23) on a :

$$\theta_{\text{théorique}} = a \times P_{20} + b$$

$$\text{Avec } P_{20} = \frac{P_{\text{mesurée}}}{1 + \alpha \Delta T}$$

$$\text{D'où } \theta_{\text{théorique}} = a \times \frac{P_{\text{mesurée}}}{1 + \alpha(T_{\text{mesurée}} - 20)} + b$$

avec $a = 0,0224$

$$b = -0,3579$$

$$\alpha = 0,0022$$

$P_{\text{mesurée}}$: période mesurée par CR1000

$T_{\text{mesurée}}$: température mesurée par CR1000

Nous avons comparé notre équation avec les équations linéaire et quadratique du constructeur :

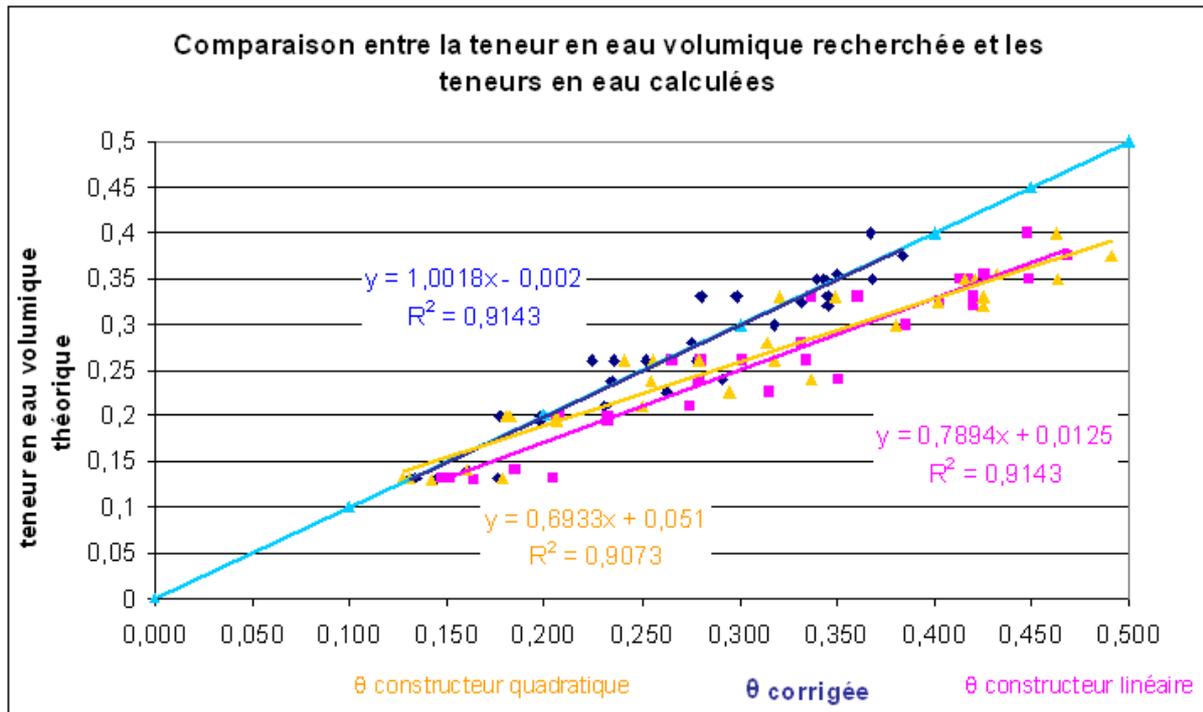


Figure 24 : Comparaison entre les différentes teneurs en eau volumique.

Les valeurs teneur en eau obtenues à partir de notre équation correspondent mieux à la teneur en eau théorique, les valeurs obtenues sont plus fiables. On voit qu'elles correspondent bien aux valeurs de la teneur en eau volumique théorique, puisqu'elles coïncident avec la première bissectrice.

Les valeurs des teneurs en eau obtenues avec les équations du constructeur divergent à partir de $0,2 \text{ m}^3/\text{m}^3$ par rapport à la droite d'équation $y = x$, elles s'éloignent de la valeur théorique θ .

On remarque aussi que plus le sol est humide plus les valeurs des teneurs en eau volumique constructeur divergent.

On peut donc conclure que grâce à la correction en température et grâce à notre équation nous avons des résultats sur la mesure de la teneur en eau volumique plus fiables (θ corrigée).

Nous proposons donc l'équation suivante :

$$\theta_{\text{corrigée}} = a \times \frac{P_m}{1 + \alpha(T_m - 20)} + b$$

avec : $a = 0,0224$

$b = -0,3579$

$\alpha = 0,0022$

P_m : période mesurée par CR1000

T_m : température mesurée par CR1000

C. Effet de la conductivité électrique du sol

Dans cette partie nous avons comparé quatre textures de sol :

- 0-20cm
- 20-30cm
- 30-40cm
- 0-20cm La Morie

Pour chacune de ces modalités de sol, nous obtenons une droite d'étalonnage : $\theta = f(P_{20})$.

Nous nous sommes intéressés à l'effet de la conductivité électrique spécifique sur les quatre types de sol. La conductivité électrique a été déterminée selon la norme NF ISO 11265 (Annexe 4).

La conductivité électrique quantifie l'aptitude, ici d'un sol à laisser passer un courant électrique, elle augmente avec la salinité de ce dernier et permet de juger la concentration en sels solubles. La mesure s'effectue entre deux électrodes de platine, elle s'exprime en $\mu\text{Siemens/cm}$. (Tableau 8)

Profondeur	Densité (g/cm ³)	conductivité σ ($\mu\text{S/cm}$)
0-20cm	1,32	82
20-30cm	1,32	53
30-40cm	1,32	27
0-20cm La Morie	1,30	131

Tableau 8 : Résultats des manipulations faites en laboratoire pour les mesures de conductivité électrique.

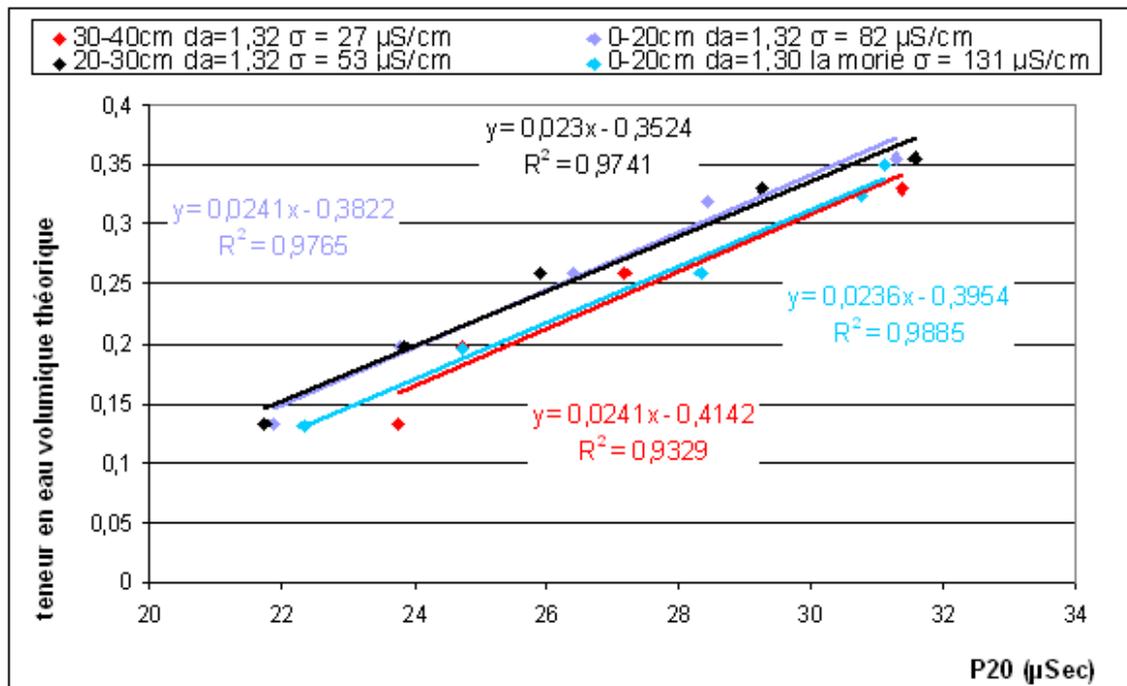


Figure 25 : Variation de la teneur en eau volumique en fonction de la période corrigée P20 pour quatre types de sol et résultats de conductivité électrique.

En ce qui concerne l'effet de la conductivité électrique du sol, on observe qu'il y a deux comportements différents pour la même parcelle de sol La Gouéthière :

- Les courbes des profondeurs de 0-20cm et 20-30cm ont un comportement qui se rapproche, par contre leur conductivité est éloignée.
- La courbe de la profondeur de 30-40cm à deux points d'écart de teneur en eau volumique avec les profondeurs de 0-20cm et 20-30cm et une conductivité très inférieure aux deux autres textures.

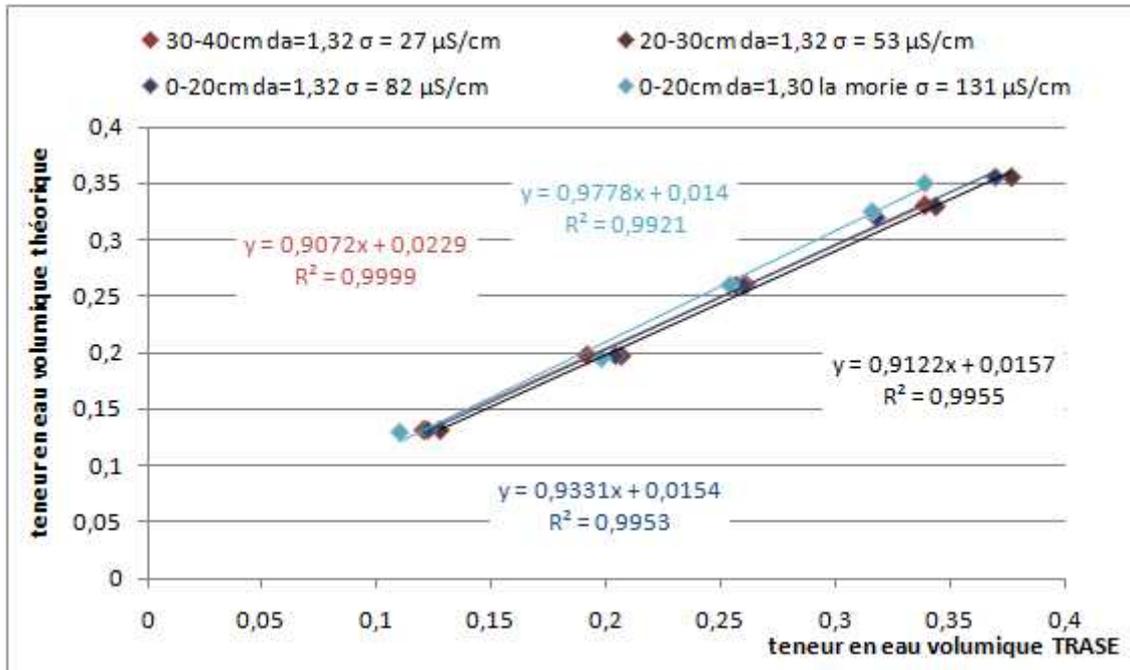


Figure 26 : Variation de la teneur en eau volumique théorique en fonction de la teneur en eau volumique TRASE pour quatre types de sol.

L'effet de la conductivité électrique sur les mesures effectuées avec les sondes TRASE semble très faible. A confirmer sur sols plus argileux.

D. Effet densité

Plusieurs chercheurs (V.P. Drnevich, A.K. Ashmawy, X.Yu, and A.M Sallam, 2003) ont montrés un effet de la compaction sur les mesures de teneur en eau volumique.

Dans cette partie nous avons voulu voir l'effet de la densité sur la teneur en eau volumique, nous avons donc différentes densités :

- 1,30 g/cm³
- 1,32 g/cm³
- 1,40 g/cm³
- 1,50 g/cm³
- 1,60 g/cm³

On notera que nous avons utilisé des densités entre 1,30 et 1,60 g/cm³, ce qui correspond aux densités de sol le plus couramment observées sur le terrain.

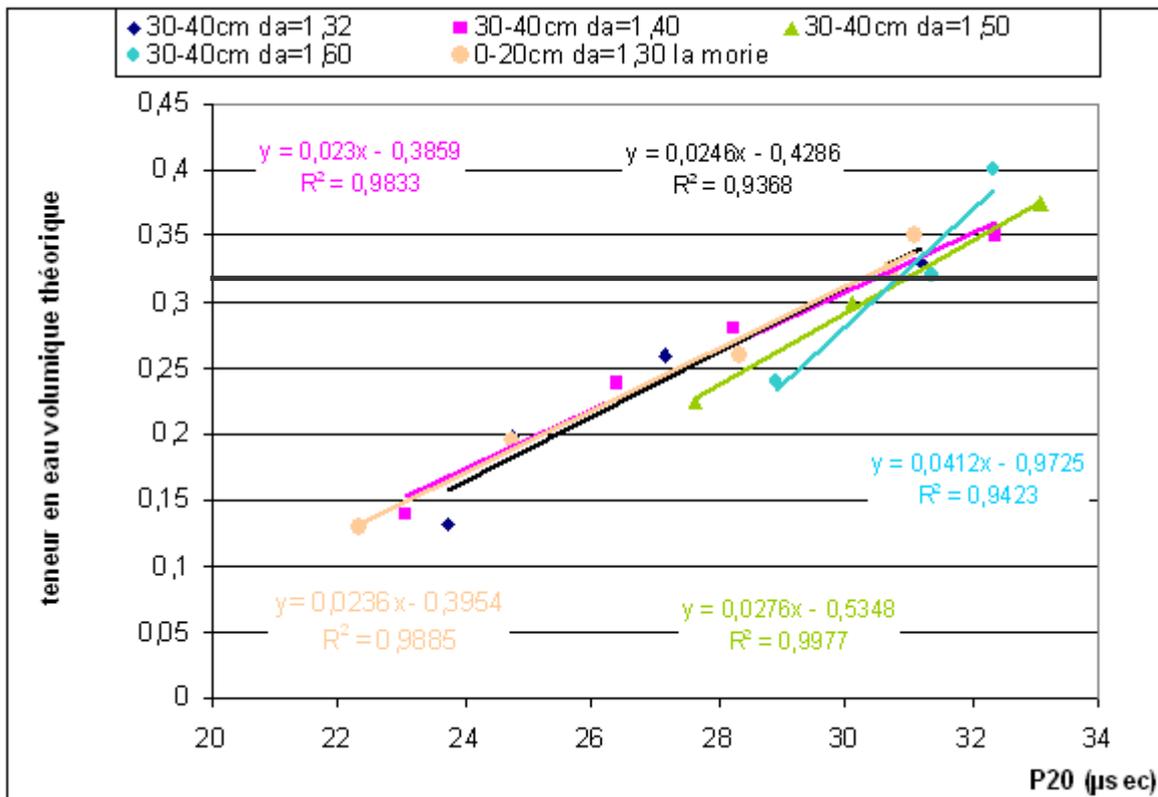


Figure 137 : Variation de la teneur en eau volumique théorique en fonction de la période corrigée P20 pour cinq densités.

Pour la figure 27, on note un changement de pente important à partir d'une densité de 1,50 g/cm³. Au-delà de 32% de teneur en eau volumique les sondes CS616 ont tendance à surestimer la teneur en eau lorsque la densité augmente. En deçà de ce seuil ($\theta=32\%$) les sondes CS616 sous-estiment la teneur en eau quand la densité augmente.

Nous avons ensuite étudié l'effet de la densité sur les mesures de teneur en eau volumique θ avec le système TRASE.

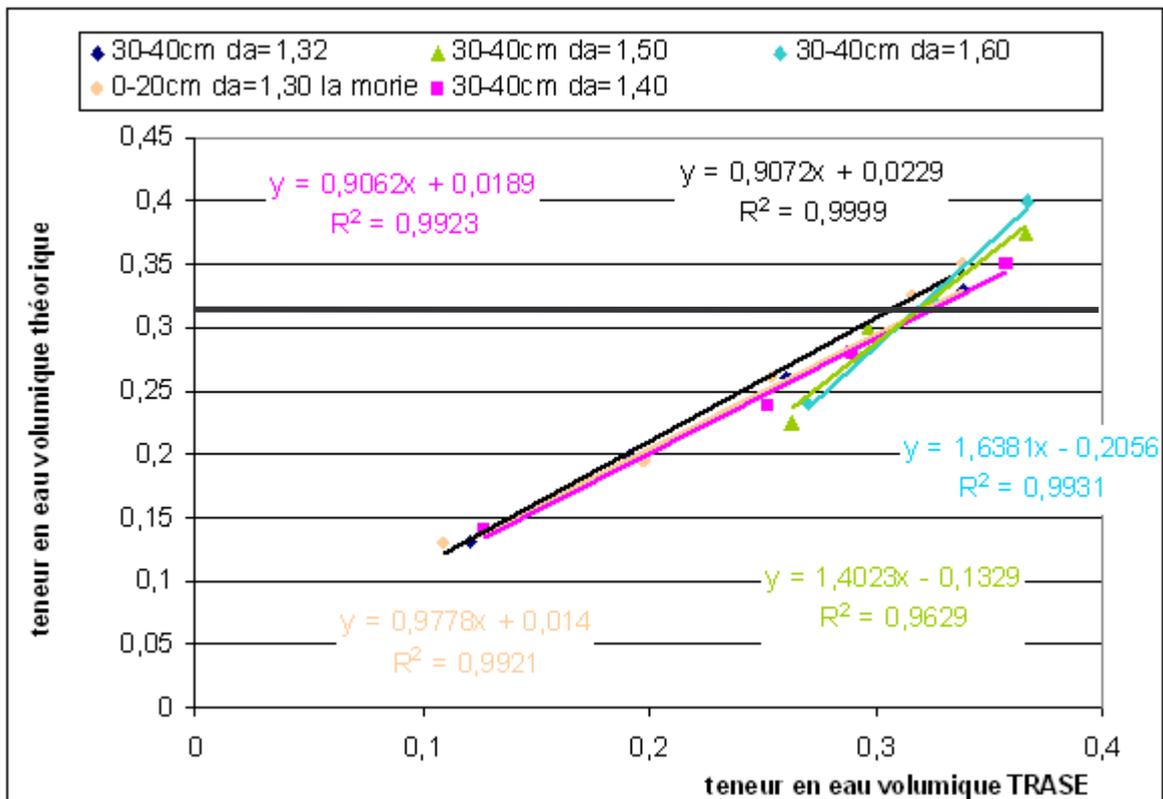


Figure 148 : Variation de la teneur en eau volumique théorique en fonction de la teneur en eau volumique mesurée par les sondes TRASE pour cinq densités.

Pour le système TRASE on note aussi un changement de pente à partir d'une densité de $1,50 \text{ g/cm}^3$. Comme pour le système CS616 au-delà de 32% de teneur en eau volumique les sondes TDR Trase ont tendance à surestimer la teneur en eau lorsque la densité augmente. En deçà de ce seuil ($\theta=32\%$) les sondes TDR Trase sous-estiment la teneur en eau quand la densité augmente.

Remarque :

Afin de déterminer si le changement de pente constaté à $1,50 \text{ g/cm}^3$ est significatif un teste de comparaison de pente est à réaliser (teste statistique en cours).

VII. Conclusion et perspectives

Le but de ce stage a été de définir une nouvelle équation d'étalonnage, pour les sondes CS616 de CAMPBELL, afin d'obtenir de meilleurs résultats sur les mesures de teneur en eau volumique. Avec les expérimentations effectuées lors du stage, nous avons redéfini une équation d'étalonnage adaptée au site expérimental OS² et plus particulièrement aux parcelles La Gouethière et La Morie. Le problème maintenant c'est d'avoir une équation qui soit adaptée pour tous les types de sols.

Grace à l'exploitation des données, nous avons mis en évidence un effet de la température sur la teneur en eau volumique mesurée par les sondes CS616. Cette variation pouvait atteindre jusqu'à 5 points d'humidité volumique ce qui n'était pas négligeable. Nous avons donc réduit cet effet pour augmenter les précisions des mesures de teneur en eau volumique, après correction en température la variation ne dépasse jamais 1 point d'humidité volumique. Nous avons réduit d'un facteur 5 l'effet de la température en appliquant le coefficient de correction $\alpha = 0,0022$

Il reste encore à mieux évaluer les phénomènes de densité et de texture afin de comprendre l'évolution de la teneur en eau volumique à forte densité et en fonction de la structure du sol.

Un teste de comparaison de pente est en cours afin de déterminer si le changement de pente constaté à 1,50 g/cm³ est significatif.

Ce stage m'a permis d'intégrer une unité de recherche et d'en apprécier le fonctionnement. Lors de cette formation j'ai pu suivre un projet sur le long terme et dans sa globalité, j'ai pu également acquérir de nouvelles connaissances notamment sur le fonctionnement hydrique du sol ainsi que l'étalonnage de sondes réflectométriques.

Références Bibliographiques

Campbell Scientific, 1987-2007, Manuel d'utilisation CS616 et CS625 Réflectomètres de teneur en eau.

Decagon Devices, 2008, Operator's manuel, Water content, EC and temperature sensors.

L. Gaidi, I. Alimi-Ichola, 1999, *Etude des caractéristiques hydrodynamiques des sols par la méthode TDR (time domain reflectometry)*.

N. Yeoh, J. Walker, R. Young, C. Rüdiger, A. Smith, K. Ellett, R. Pipunic, A. Western, 2008, *Calibration of the murrumbidgee monitoring network CS616 soil moisture sensors*.

Christoph Rüdiger, Andrew W. Western, Jeffrey P. Walker, Adam B. Smith, Jetse D. Kalma, Garry R. Willgoose, 2009, *Towards a general equation for frequency domain reflectometers*.

V.P. Drnevich, A.K. Ashmawy, X. Yu, and A.M Sallam, 2003, *Time domain reflectometry for water content and density of soils: study of soil-dependent calibration constants*.

Annexes

Annexe 1 : Contrôle d'humidité.....	46
Annexe 2 : Tableau codes pour le câblage des sondes CS616.....	47
Annexe 3 : Diagramme de câblage des sondes CS616.....	48
Annexe 4 : Norme Française ; détermination de la conductivité électrique spécifique.....	49

Annexe 1 : Contrôle d'humidité

Contrôle d'humidité								
profondeur	densité	boîte	masse (g) avant séchage	masse (g) après séchage	teneur en eau vérifiée W (g/g)	teneur en eau W recherchée (g/g)	θ théorique (m ³ /m ³)	θ vérifiée (m ³ /m ³)
0-20cm	1,32	177	137,9	127,2	0,101	0,10	0,1320	0,1328
20-30cm	1,32	592	129,2	118,9	0,106	0,10	0,1320	0,1394
30-40cm	1,4	277/515	140,9	119	0,223	0,20	0,2800	0,3119
0-20cm	1,32	177	136,3	111,6	0,272	0,27	0,3564	0,3593
20-30cm	1,32	592	150,9	122,8	0,277	0,27	0,3564	0,3658
30-40cm	1,4	277/515	115,1	98,6	0,212	0,20	0,2800	0,2965
0-20cm la Morie	1,3	228	120,9	106,5	0,168	0,15	0,1950	0,2187
0-20cm la Morie	1,3	39	114,8	105,1	0,115	0,10	0,1300	0,1498
0-20cm la Morie	1,3	B 154	139,7	120	0,196	0,20	0,2600	0,2553
0-20cm la Morie	1,3	183	109,1	91,5	0,250	0,25	0,3250	0,3245
0-20cm la Morie	1,3	228	125,1	102,9	0,271	0,27	0,3510	0,3520
30-40cm	1,5	B 154	120,9	108	0,146	0,15	0,2250	0,2191
30-40cm	1,5	203	146,4	121,1	0,254	0,25	0,3750	0,3803
30-40cm	1,6	B156	129,6	114,7	0,160	0,15	0,2400	0,2552
30-40cm	1,6	B 156	139,1	119,9	0,191	0,20	0,3200	0,3060
30-40cm	1,6	B 156	144,2	120,5	0,235	0,25	0,4000	0,3754
30-40cm	1,6	228	192,9	159,4	0,242	0,25	0,4000	0,3870

terre seche la Morie	261	109,3	108,3	0,011	sec
-------------------------	-----	-------	-------	-------	-----

Annexe 2 : Tableau codes pour le câblage des sondes CS616

Tableau 1 Codes pour le câblage des CS616/CS625		
Couleur	Fonction	Liaison à la centrale d'acquisition
Rouge	+12V	+12V
Vert	Sortie	Entrée analogique unipolaire (SE)
Orange	Mise en fonctionnement	Port de contrôle
Noir	Masse	G
Clair	Blindage (masse)	G

Les fils noir et clair doivent être branchés à la masse tous les deux.

Annexe 3 : Digramme de câblage des sondes CS616

CR1000 Wiring Diagram for untitled.scw

CS616 Water Content Reflectometer (1)

Green	1H
Clear	⊥ (Ground)
Black	G
Red	12V
Orange	C1

CR1000

107 Temperature Probe (CSL) (1)

White	⊥ (Ground)
Screen	⊥ (Ground)
Red	4H
Black	VX1 or EX1

CR1000

CS616 Water Content Reflectometer (2)

Green	1L
Clear	⊥ (Ground)
Black	G
Red	12V
Orange	C2

CR1000

107 Temperature Probe (CSL) (2)

White	⊥ (Ground)
Screen	⊥ (Ground)
Red	4L
Black	VX1 or EX1

CR1000

CS616 Water Content Reflectometer (3)

Clear	⊥ (Ground)
Green	2H
Black	G
Red	12V
Orange	C3

CR1000

CS616 Water Content Reflectometer (4)

Clear	⊥ (Ground)
Green	2L
Black	G
Red	12V
Orange	C4

CR1000

CS616 Water Content Reflectometer (5)

Clear	⊥ (Ground)
Green	3H
Black	G
Red	12V
Orange	C5

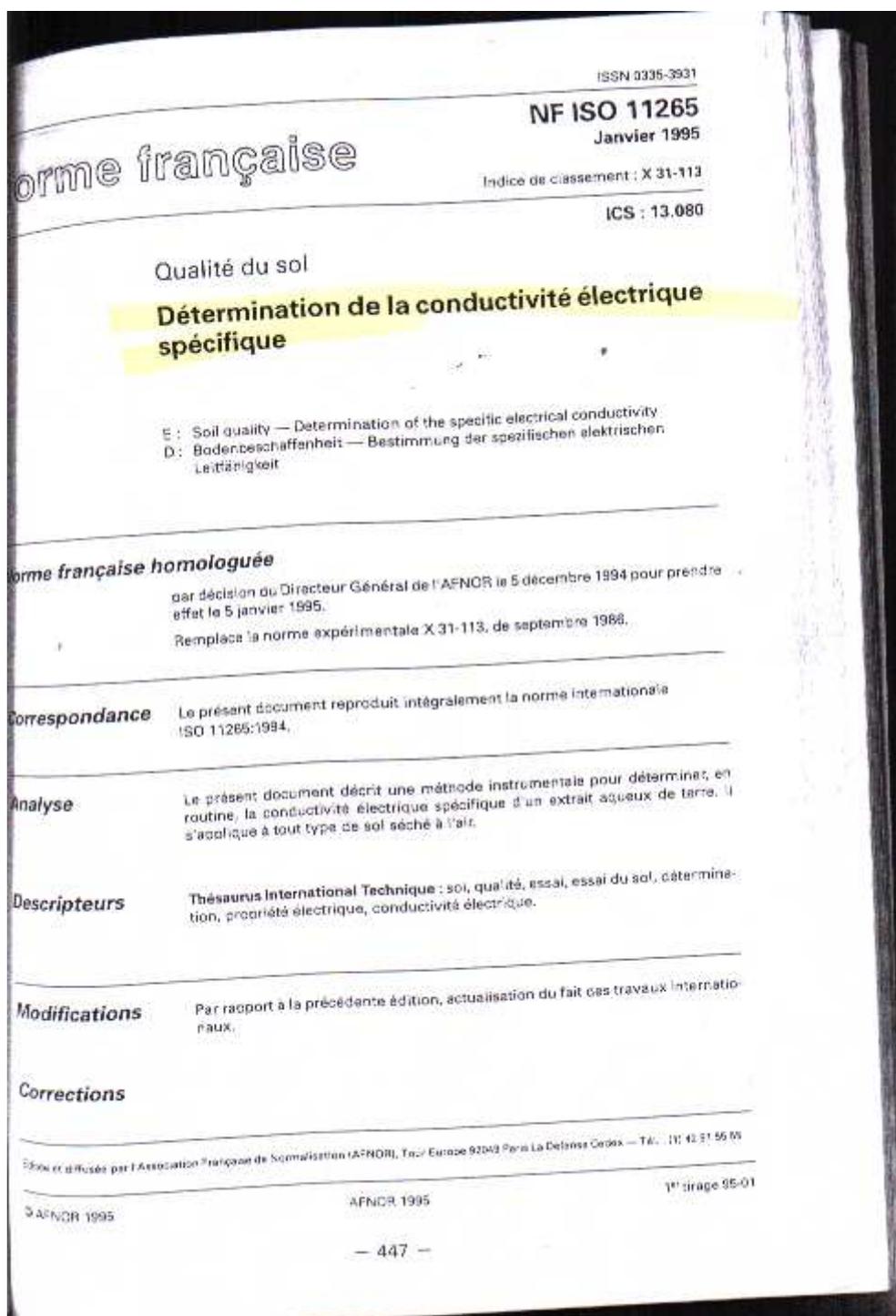
CR1000

CS616 Water Content Reflectometer (6)

Clear	⊥ (Ground)
Green	3L
Black	G
Red	12V
Orange	C6

CR1000

Annexe 4 : Norme Française ; détermination de la conductivité électrique spécifique



Membres de la commission de normalisation

Président : M STERCKEMAN

Secrétariat : MME GUILLAUME — AFNOR

M	AUZOLLE	INRAE
M	BAILLON	MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE — DERF
M	BERMOND	INRA
M	BORSIER	BRGM
M	BOURGOIS	AFES
M	CARRÉ	LABORATOIRE DE TOURNAI
M	CESIELSKI	INRA
M	CLEMENT	INRA
M	COURMONT	LABORATOIRES SICAGRO
M	DE SALLE DE HYS	SEITA — INSTITUT DU TABAC
M	DEMANZE	LABORATOIRE WOLFF
M	DUNAL	INRA
M	GOMEZ	INRA
MME	HAUSS	ELF ATOCHEM
M	HAUT	
M	HUE	LDASB
M	IMBERT	CNRS
MME	LAVILLE-TIMST	BRGM
M	LEGRET	MINISTÈRE DE L'EQUIPEMENT — LOPC
M	LEMAIRE	STATION AGRONOMIQUE DE NANTES
M	MANTIS	ELF ATOCHEM CAL
MME	MARMET	LABO DEPT D'ANALYSES CHAMBERY
M	MATHIAS	CEDEST
M	NERELLE	EUROPE SOLS
M	ORSINI	INRA
M	FERRIET	INERIS
M	POUSSON	SAS
M	ROYE	LABORATOIRES WOLFF
M	SAUGUES	BRGM
M	SOMMIER	MINISTÈRE DE L'AGRICULTURE — DERF
M	SONDAG	CRSTOM
M	SPECKLIN	SADEF
M	STERCKEMAN	INRA

Avant-propos national

Références aux normes françaises

La correspondance entre les normes mentionnées à l'article «Références normatives» et les normes françaises identiques est la suivante :

ISO 3695	: NF EN 23695 (indice de classement : T 01-070) ¹⁾
ISO 7888	: NF EN 27888 (indice de classement : T 90-031)
ISO 17464	: NF ISO 17464 (indice de classement : X 31-412)

1) En préparation.

Avant-propos

L'ISO (Organisation internationale de normalisation) est une fédération mondiale d'organismes nationaux de normalisation (comités membres de l'ISO). L'élaboration des Normes internationales est en général confiée aux comités techniques de l'ISO. Chaque comité membre intéressé par une étude a le droit de faire partie du comité technique créé à cet effet. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec l'ISO participent également aux travaux. L'ISO collabore étroitement avec la Commission électrotechnique internationale (CEI) en ce qui concerne la normalisation électrotechnique.

Les projets de Normes internationales adoptés par les comités techniques sont soumis aux comités membres pour vote. Leur publication comme Normes internationales requiert l'approbation de 75 % au moins des comités membres votants.

La Norme internationale ISO 11285 a été élaborée par le comité technique ISO/TC 180, Qualité du sol, sous-comité SC 3, Méthodes chimiques et caractéristiques du sol.

L'annexe A de la présente Norme internationale est donnée uniquement à titre d'information.

Qualité du sol — Détermination de la conductivité électrique spécifique

1 Domaine d'application

La présente Norme internationale prescrit une méthode instrumentale pour la détermination en routine de la conductivité électrique spécifique d'un extrait aqueux de sol. La détermination est effectuée afin d'obtenir une indication sur la teneur en électrolytes hydrosolubles dans un échantillon de sol.

La présente Norme internationale est applicable à tout échantillon de sol séché à l'air.

2 Références normatives

Les normes suivantes contiennent des dispositions qui, par suite de la référence qui en est faite, constituent des dispositions valables pour la présente Norme internationale. Au moment de la publication, les éditions indiquées étaient en vigueur. Toute norme est sujette à révision et les parties prenantes des accords fondés sur la présente Norme internationale sont invitées à rechercher la possibilité d'appliquer les éditions les plus récentes des normes indiquées ci-après. Les membres de la CEI et de l'ISO possèdent le registre des Normes internationales en vigueur à un moment donné.

ISO 3696:1987, Eau pour laboratoire à usage analytique — Spécification et méthodes d'essai.

ISO 7888:1985, Qualité de l'eau — Détermination de la conductivité électrique.

ISO 11464:1994, Qualité du sol — Prétraitement des échantillons pour analyses physico-chimiques.

3 Principe

L'échantillon de sol est extrait avec de l'eau à $20\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ [rapport d'extraction de 1:5 (m³/t)], pour dissoudre les électrolytes. La conductivité électrique

spécifique de l'extrait filtré est mesurée et le résultat est corrigé à une température de $25\text{ }^{\circ}\text{C}$.

NOTE 1 Pour les définitions des cœurs utilisés, voir ISO 7888.

4 Réactifs

Utiliser uniquement des réactifs de qualité analytique reconnue.

4.1 Eau, de conductivité électrique spécifique ne dépassant pas $0,2\text{ mS/m}$ à $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ (eau de qualité 2 conformément à l'ISO 3696).

4.2 Solution de chlorure de potassium, $c(\text{KCl}) = 0,1\text{ mol/l}$.

Dissoudre 7,456 g de chlorure de potassium, préalablement séché pendant 24 h à $220\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ dans de l'eau (4.1) et diluer à 1 000 ml à $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. La conductivité électrique spécifique de cette solution à $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ est de $1\,250\text{ mS/m}$.

4.3 Solution de chlorure de potassium, $c(\text{KCl}) = 0,020\,0\text{ mol/l}$.

Ajouter 2 000 ml de la solution de chlorure de potassium (4.2) dans une fiole jaugée de 1 000 ml et diluer au volume avec de l'eau à $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. La conductivité électrique spécifique de cette solution à $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ est de 277 mS/m .

4.4 Solution de chlorure de potassium, $c(\text{KCl}) = 0,010\,0\text{ mol/l}$.

Ajouter 100,0 ml de la solution de chlorure de potassium (4.2) dans une fiole jaugée de 1 000 ml et diluer au volume avec de l'eau à $20\text{ }^{\circ}\text{C}$. La conductivité électrique spécifique de cette solution à $25\text{ }^{\circ}\text{C}$ est de 141 mS/m .

Toutes les solutions de chlorure de potassium (4.2, 4.3 et ci-dessus) utilisées pour l'étalonnage doivent être conservées dans des flacons à fermeture étanche ne libérant pas suffisamment de métal alcalin ou de cations alcalino-terreux pour affecter la conductivité électrique des solutions.

NOTES

- 2 Des flacons en plastique peuvent convenir.
- 3 Pour les flacons contenant les solutions de chlorure de potassium, une fermeture en plastique est recommandée, du fait que le verre risquerait de se scinder au froc.
- 4 On peut utiliser des étalons commerciaux disponibles pour la conductivité.

5 Appareillage et verrerie

5.1 Conductimètre, équipé d'une cellule de mesure de la conductivité, d'un système de réglage de la plage de mesure et d'un dispositif de correction (automatique) de la température, le tout assurant, à une température de 20 °C, une précision de 1 mS/m. Le conductimètre doit, de préférence, être également équipé d'un système de réglage de la constante de la cellule.

5.2 Balance analytique, d'une précision d'au moins 0,01 g.

5.3 Thermomètre, capable de mesurer à 0,1 °C près.

5.4 Agitateur mécanique, avec un mouvement horizontal suffisamment vigoureux pour produire et maintenir une suspension 1:5 solide, placé dans une enceinte où la température est contrôlée et maintenue à 20 °C ± 1 °C.

NOTE 5 Un agitateur réglé à 160 cycles par minute sur une longueur d'environ 5 cm peut convenir.

5.5 Papier filtre, à faible teneur en cendres et à haut pouvoir de rétention.

5.6 Flacon, en verre borosilicaté ou en polyéthylène, d'une capacité de 250 ml.

5.7 Verrerie courante de laboratoire.

6 Échantillon de laboratoire

Utiliser des échantillons de sol. séchés à l'air et tamisés à 2 mm, conformément à l'ISO 11464.

2

7 Procédure

7.1 Extraction

Peser 20,00 g de l'échantillon pour laboratoire et transférer cette quantité dans le flacon (5.6). Ajouter 100 ml d'eau (4.1) à 20 °C ± 1 °C. Fermer le flacon et le placer à l'horizontale dans l'agitateur mécanique (5.4). Agiter pendant 30 min. Filtrer directement sur un papier filtre (5.5). De la même manière, effectuer une détermination à blanc. La valeur du blanc ne doit pas dépasser 1 mS/m. Si la valeur du blanc excède cette valeur, recommencer l'extraction.

NOTES

5 Il convient que le volume de filtrat soit juste suffisant pour permettre les mesurages.

7 Pour être sûr d'obtenir des extraits d'un volume suffisant que quel soit le type d'échantillon (y compris ceux à forte teneur en matières organiques), on choisit un taux d'extraction de 1:5 (m/V). Pour certains sols, il est pratiquement impossible d'obtenir un extrait si on utilise un taux d'extraction plus faible.

8 L'extraction devrait être effectuée à la température fixée de 20 °C ± 1 °C, car la solubilité des sels présents dépend de la température. Après filtration, il n'est plus nécessaire de maintenir constante la température de l'extrait. Le mesurage est effectué avec le dispositif de correction de température réglé à 25 °C.

On effectue le mesurage à blanc pour déterminer dans quelle mesure l'eau, la verrerie et le papier filtre utilisés contribuent à la conductivité électrique des extraits.

9 L'agitation sera juste suffisante pour produire et maintenir une suspension. Une agitation plus vigoureuse pourrait conduire à une dispersion trop importante de l'argile, à des problèmes de filtration et donc à un effet sur la conductivité.

7.2 Vérification de la constante de cellule

7.2.1 Mesurer la conductivité (κ_x) des solutions de chlorure de potassium (4.2 à 4.4) suivant les recommandations du manuel d'instructions de l'instrument.

7.2.2 Calculer, pour chaque solution de chlorure de potassium, une constante de cellule conformément à

$$K = \frac{\kappa_x}{C_x}$$

ou

K est la constante de cellule, en mètres à la puissance moins un;

est la conductivité électrique spécifique à l'une des solutions de chlorure de potassium, en millisiemens par mètre;

est la conductivité électrique mesurée de la même solution de chlorure de potassium, en millisiemens par mètre.

Prendre la moyenne des valeurs calculées comme constante de cellule de l'instrument.

La constante de cellule calculée ne doit pas différer de plus de 5 % par rapport à la valeur donnée par le constructeur.

7.2.3 Régler la constante de cellule sur le conductimètre.

7.3 Mesurage de la conductivité électrique des filtrats

Mesurer la conductivité électrique des filtrats (κ_w) conformément aux instructions données par le constructeur de l'instrument de mesure de la conductivité (5.1). Effectuer les mesurages avec le dispositif de correction de température réglé à 25 °C. Noter les résultats à une décimale près, exprimés en millisiemens par mètre.

8 Interférences

8.1 Les valeurs mesurées de la conductivité électrique peuvent être influencées par contamination des électrodes. Ce type d'interférence est très difficile à déceler. Toute contamination des électrodes peut modifier la constante de cellule, ce qui peut apparaître en mesurant la conductivité des solutions de chlorure de potassium.

8.2 Les bulles d'air qui se développent sur les électrodes pendant le temps de chauffe des extrémités perturbent les mesurages.

8.3 Les mesurages de la conductivité électrique inférieurs à 1 mS/m peuvent être influencés par le dioxyde de carbone et l'ammoniac présents dans l'atmosphère. Dans ces cas, les mesurages doivent être effectués avec une cellule adaptée. Ces mesurages ne font pas partie du domaine d'application de la présente Norme internationale.

9 Répétabilité

La répétabilité des mesurages de la conductivité électrique dans deux filtrats préparés séparément doit satisfaire aux exigences indiquées dans le tableau 1.

Tableau 1 — Répétabilité

Conductivité électrique mS/m à 25 °C	Écart toléré
0 à 50	5 mS/m
> 50 à 200	20 mS/m
> 200	10 %

10 Rapport d'essai

Le rapport d'essai doit contenir les informations suivantes:

- une référence à la présente Norme internationale;
- toute information nécessaire à l'identification complète de l'échantillon;
- les résultats de la détermination en nombre entier de millisiemens par mètre;
- les informations concernant toute opération non spécifiée dans la présente Norme internationale ou considérée comme facultative, ainsi que tout facteur ayant pu affecter les résultats.

Résumé

L'objectif du stage a été de définir une nouvelle équation d'étalonnage des sondes réflectométriques CS616 pour la mesure de la teneur en eau volumique. Pour cela nous avons reconstitué des colonnes de sol à densité et teneur en eau volumique fixes.

Lors du stage nous avons évalué plusieurs effets sur la mesure de la teneur en eau volumique par les sondes CS616 et TDR (Time Domain Reflectometry), dont l'effet température présent sur les sondes CS616, que nous avons corrigé, grâce à un coefficient de température (α). Nous avons également étudié l'effet densité et l'effet de la conductivité électrique du sol.

Mots clés : étalonnage, teneur en eau volumique, sonde réflectométrique, densité, température.

Abstract

The training course focused to define a new calibration equation for the reflectometers CS616 to measuring the moisture content of water volume. For that, we reconstructed soil columns with density and texture fixed.

During the training period we evaluated several effects, on the measurement of moisture content by the CS616 and TDR (Time Domain Reflectometry) probes, which the temperature effect on the reflectometer CS616 that we corrected with a temperature coefficient (α). We also studied the density effect and effect of soil electrical conductivity.

Key words : calibration, moisture content, water content reflectometer, density, temperature.