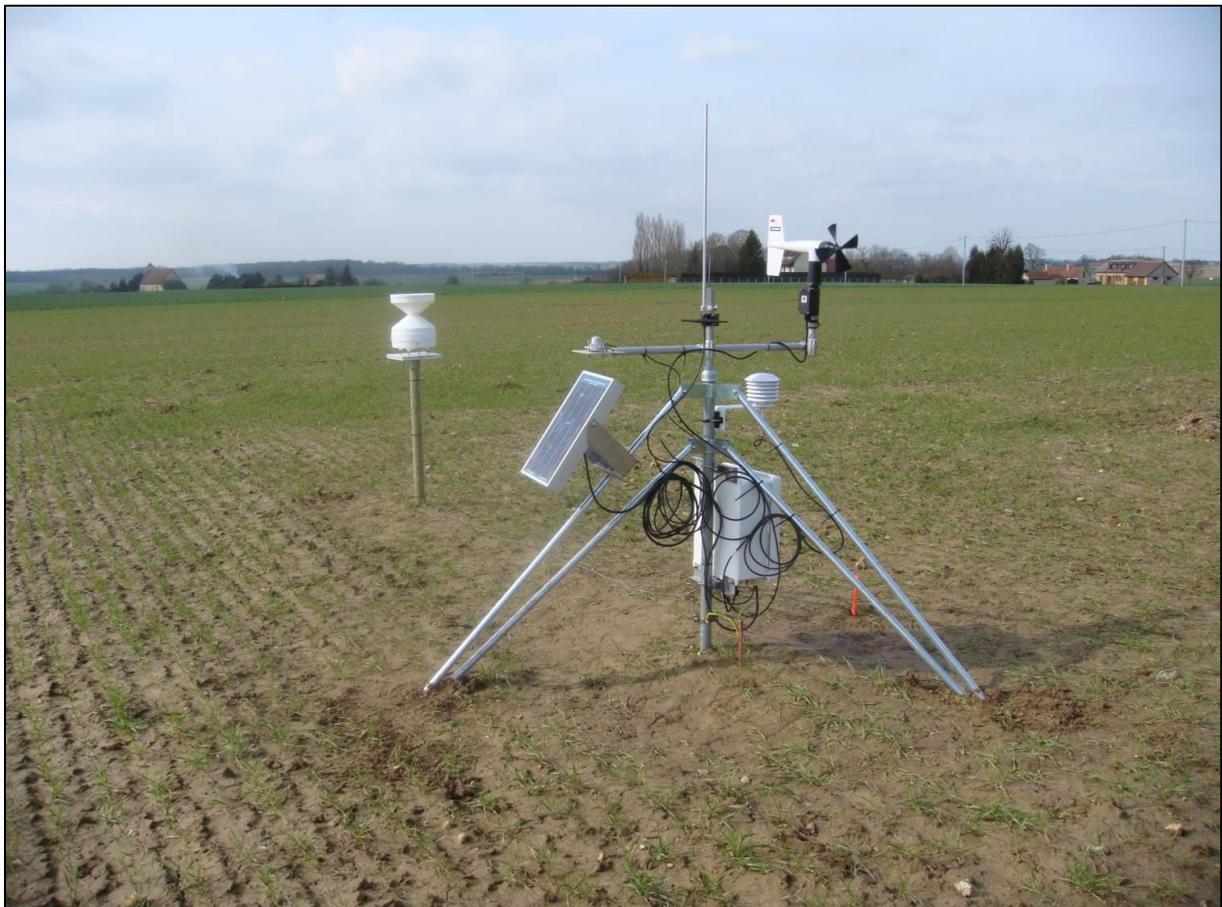


CANETTI Julien - DUT Mesures Physique - Institut Universitaire et Technologique de Bourges

MISE EN PLACE ET SUIVI DES DISPOSITIFS DE CARACTERISATION PHYSIQUES ET
HYDRIQUES DES SOLS SUR LE SITE ATELIER OS².



Apprentissage effectué à l'INRA Unité Science du Sol d'Orléans du 01/09/13 au 31/08/14.

Encadrement :

GIOT Guillaume, Assistant ingénieur INRA.

JOSSERAND Laurence, Enseignant chercheur.

REMERCIEMENTS

Je remercie Guillaume GIOT, mon maître d'apprentissage, pour sa disponibilité ainsi que l'aide et les conseils qu'il m'a apporté tout au long de mon apprentissage.

Je tiens à remercier également l'ensemble des personnes de l'unité Sciences du Sol pour leur accueil ainsi que leurs conseils et Catherine Henault, directrice de l'unité, pour m'avoir accueilli au sein de l'unité qu'elle dirige actuellement.

RESUME

L'unité UR SOLS, étudie les interactions entre les propriétés des sols et leurs fonctionnements selon différentes échelles spatiales et temporelles.

J'effectue mon apprentissage dans le cadre du projet ANR (Agence Nationale de la Recherche) ESCAPADE. Ce projet vise à optimiser l'usage de l'azote dans les applications agricoles et réduire les pertes dans l'environnement.

Mes missions consistent à caractériser les propriétés physiques et hydriques du sol. J'instrumente des parcelles expérimentales avec des centrales d'acquisition et des capteurs environnementaux.

Dans un premier temps, mon travail a essentiellement consisté à étalonner et vérifier les capteurs puis à instrumenter les sites expérimentaux du projet ANR ESCAPADE.

Dans un second temps, j'ai réalisé à partir des données ponctuelles de teneur en eau, le calibrage des réflectomètres de teneur en eau mis en œuvre sur le terrain. J'ai également effectué le traitement des données de température, pluviométrie, tensiométrie et piézométrie.

Mon apprentissage au sein de l'INRA, qu'il se soit passé en laboratoire ou sur le terrain, m'a permis de découvrir le monde de la recherche et d'acquérir de nouvelles compétences. J'ai pu appliquer les connaissances théoriques acquises en cours au sein de l'entreprise.

ABSTRACT

UR SOLS studies the interactions between soil properties and their functionings according to various spatial and temporal scales.

I make my apprenticeship within the framework of the project ANR (National Agency of the Research) ESCAPADE. This project aims at optimizing the use of N₂O in the agricultural applications and at reducing the losses in the environment.

My missions consist in characterizing the physical and hydric properties of the soil. I instrument experimental plots of land with dataloggers and environmental sensors.

At first, my work essentially consisted in testing and in verifying the sensors then in instrumenting the experimental sites of the project ANR ESCAPADE.

Secondly, I realized from the punctual data of moisture content, the calibration of the water content reflectometer implemented in the soil. I also made the data processing of temperature and pluviometry.

My apprenticeship within INRA, in laboratory or on the field, allowed me to discover the world of the research and to acquire new skills. I was able to apply the current acquired theoretical knowledge within the company.

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS	1
RESUME	2
ABSTRACT	2
SOMMAIRE	3
1 PRESENTATION DE LA STRUCTURE D'ACCUEIL	4
1.1 NIVEAU NATIONAL	4
1.2 SITE ORLEANS	6
1.3 UNITE SCIENCE DU SOL	7
1.4 PRESENTATION DU SUJET D'APPRENTISSAGE	8
2 LE SOL ET LE CYCLE DE L'EAU	9
2.1 PRESENTATION DU SOL	9
2.2 LE CYCLE DE L'EAU	11
3 ETALONNAGE, VERIFICATION ET CABLAGE	15
3.1 PREPARATION CENTRALE D'ACQUISITION	15
3.2 LES DIFFERENTS CAPTEURS	17
4 SUR LE TERRAIN	28
4.1 INSTALLATION CENTRALE D'ACQUISITION ET CAPTEURS	28
4.2 PRELEVEMENT DE SOL	28
4.3 MAINTENANCE DU SITE EXPERIMENTAL ET DES APPAREILS DE MESURES	30
4.4 PRELEVEMENT EAU	28
4.5 PRELEVEMENT DE DONNEES	30
5 EXPLOITATION DES RESULTATS	31
5.1 TEMPERATURE	31
5.2 PLUVIOMETRIE	33
5.3 TENSIOMETRES	35
5.4 PIEZOMETRES	36
5.5 TENEUR EN EAU	37
6 ETUDE DE L'INFLUENCE DE LA TEMPERATURE SUR LES REFLECTOMETRES CS650	43
6.1 PREPARATION DE L'EXPERIMENTATION	43
6.2 EXPLOITATIONS DES RESULTATS	44
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	47

1 PRESENTATION DE LA STRUCTURE D'ACCUEIL

1.1 NIVEAU NATIONAL

1.1.1 HISTORIQUE

L'Institut National de la Recherche Agronomique (INRA) est un organisme français de recherche en agronomie fondé en 1946 dans le contexte de la reconstruction nationale d'après-guerre et du projet de modernisation de l'agriculture française.

Depuis 1984, l'INRA est placé sous le statut d'établissement à caractère scientifique et technologique (EPST), et sous la double tutelle du ministère chargé de l'Agriculture et du ministère chargé de la Recherche.

L'INRA entretient des partenariats scientifiques avec les grands instituts de recherche scientifique dans le monde, les universités et 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.

Il mène des recherches ayant pour but une alimentation saine et de qualité, une agriculture durable et un environnement préservé et valorisé.

1.1.2 MISSIONS

Les six grandes missions confiées à l'INRA sont les suivantes :

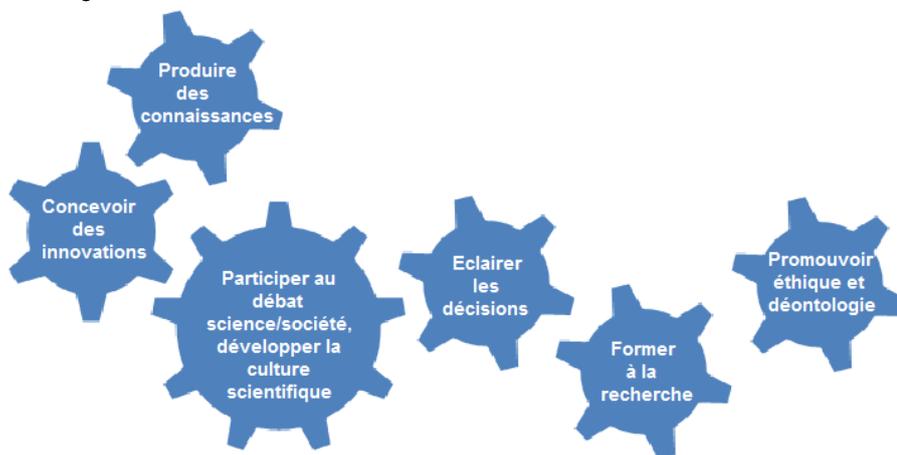


Image 1 : Les missions de l'INRA

1.1.3 ORGANISATION

En 2013, l'INRA est présent sur 19 centres régionaux. Avec 74 % de ses effectifs implantés en province sur plus de 150 sites, l'institut est présent dans la quasi-totalité des régions françaises, y compris l'outre-mer.

Les recherches à l'INRA s'articulent autour de différentes thématiques réparties au sein de 13 départements scientifiques :

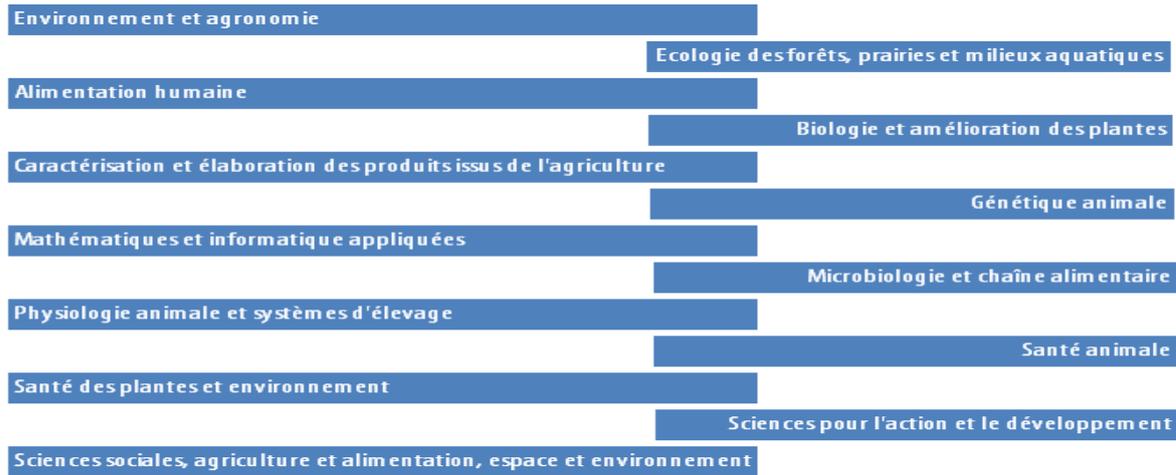


Image 2 : Les différents départements de recherche à l'INRA

L'INRA met en œuvre des dispositifs originaux et des bases de données ouverts à la communauté scientifique : observatoires de recherche en environnement, centres de ressources génétiques ou encore plateformes expérimentales.

L'INRA compte 218 unités de recherche dont 141 unités mixte de recherche (UMR) associant l'INRA à d'autres organismes de recherche ou d'enseignement supérieur.

L'INRA compte également 52 unités expérimentales qui représentent une surface de l'ordre de 10 500 ha et qui élèvent 94 000 animaux.

L'INRA compte environ 8 500 agents titulaires dont :

- 1800 chercheurs
- 2400 ingénieurs
- 4300 techniciens et administratifs

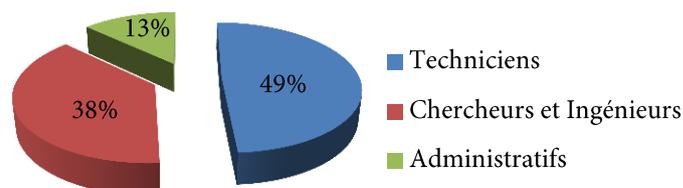


Image 3 : La répartition des employés à l'INRA

1.2 SITE D'ORLEANS

Le site d'Orléans, qui fait partie du Centre Val de Loire, regroupe quatre domaines de recherches :

- La sélection d'arbres forestiers
- La biologie des insectes forestiers ravageurs
- La maîtrise des érosions et des pollutions, l'évaluation des risques agro-climatiques
- L'amélioration génétique des performances des troupeaux et la qualité de leurs produits

Ces domaines de recherche sont répartis au sein de plusieurs unités qui sont :

- 3 Unités de recherche
 - Amélioration, Génétique et Physiologie Forestière
 - Zoologie Forestière
 - Science du Sol
- 1 Unité de service
 - InfoSol
- 2 Unités expérimentales
 - Génétique et Biomasse Forestières Orléans / Bourges



Image 4 : Les différentes unités présentes sur le site d'Orléans.

Sur le centre INRA d'Orléans, en une année on peut compter 200 agents titulaires dont 28 chercheurs, 53 ingénieurs, 119 techniciens et administratifs, ainsi que 150 agents non titulaires.

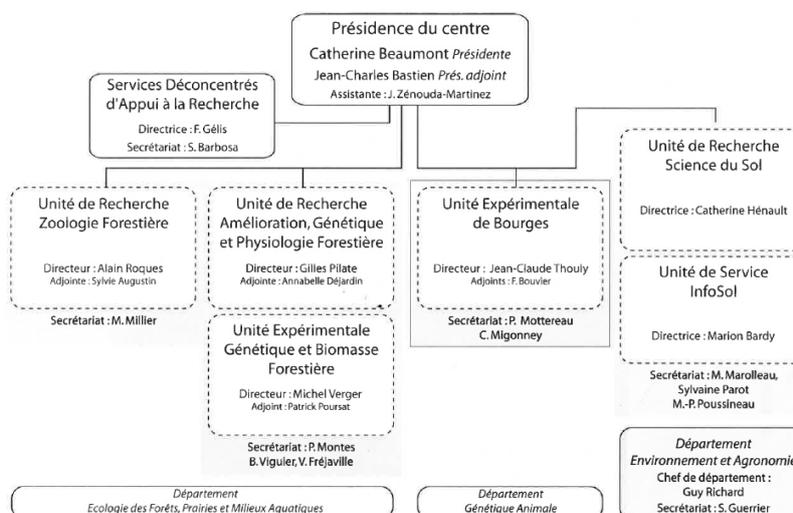


Image 5 : Organigramme du site d'Orléans

1.3 UNITE DE RECHERCHE SCIENCE DU SOL



Image 6 : Bannière du site internet de l'unité UR SOLS

1.3.1 PRESENTATION

L'Unité de Recherche Science du Sol (UR Sols) est une unité de recherche propre à l'INRA appartenant au département Environnement et Agronomie.

Cette unité s'appuie essentiellement sur des compétences d'observations, de mesures spatiales *in situ*, d'expérimentation et de modélisation.

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 (textures 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.

A la date du 24 septembre 2013, le site d'Orléans est composé de vingt-deux permanents dont dix scientifiques ainsi que d'un doctorant et de deux non-permanents.

1.3.2 MISSION

Dans le cadre du projet de Recherches de l'unité (Projet Sol'Hyd'Air – 2012-2015), l'UR SOLS a pour mission principale de développer des travaux de recherche sur les interactions entre les propriétés physiques des sols (structures, propriétés hydriques...) et leurs fonctionnements hydriques (ruissellement, infiltration) et biogéochimiques (dénitrification) dans des contextes climatique et anthropiques changeant.

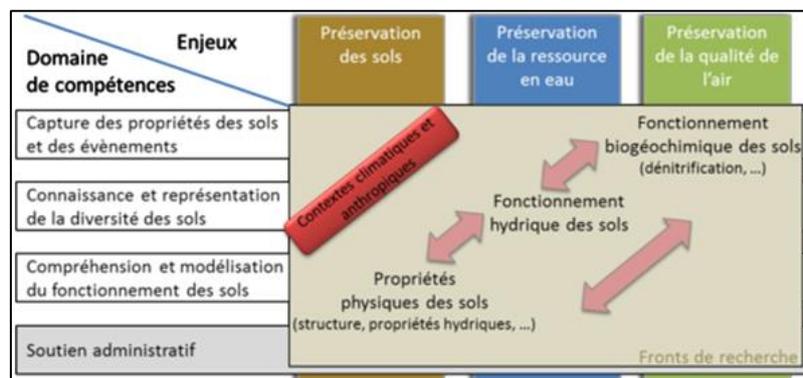


Image 7 : Schéma des missions de l'UR SOLS

1.4 PRESENTATION DU SUJET D'APPRENTISSAGE

Dans le cadre de mon apprentissage au sein de l'INRA ; je suis amené à travailler principalement pour le projet ANR ESCAPADE (Evaluation de Scénarios sur la Cascade de l'Azote dans les Paysages Agricoles et moDELisation territoriales).

Pour ce projet, l'unité a besoin d'acquérir les caractéristiques physiques et hydriques des sols afin d'étudier le fonctionnement spatialisé des sols et leur dynamique d'évolution.

Ainsi mon travail consiste à instrumenter les parcelles agricoles du site atelier OS² (Observatoire Spatialisé Orléanais des Sols) à l'aide de centrales d'acquisition et de capteurs environnementaux (température, teneur en eau, pluviométrie...).

Le projet ESCAPADE, lancé le 1er février 2013, réunit 11 partenaires sous la coordination de Jean-Louis Drouet (INRA Grignon, UMR EGC), plusieurs organismes d'enseignement et de recherche, un institut technique et deux coopératives pour une durée de 4 ans qui représente un investissement total de 6,5 millions d'euros (dont 1 million financé par l'ANR dans le cadre du programme AGROBIOSPHERE).

Le projet ESCAPADE vise à rechercher des voies innovantes à l'échelle du territoire, pour optimiser l'usage de l'azote et en réduire les pertes dans l'environnement, et ainsi préserver durablement les agro-écosystèmes tout en maintenant la productivité des systèmes de production.

Les travaux menés dans le cadre du projet ESCAPADE se déroule sur le site OS². Il est localisé à la limite des petites régions naturelles de la Beauce Chartraine et du Faux-Perche, proche de la source du Loir. Les parcelles agricoles colorées en orange sont les parcelles choisies pour l'étude.

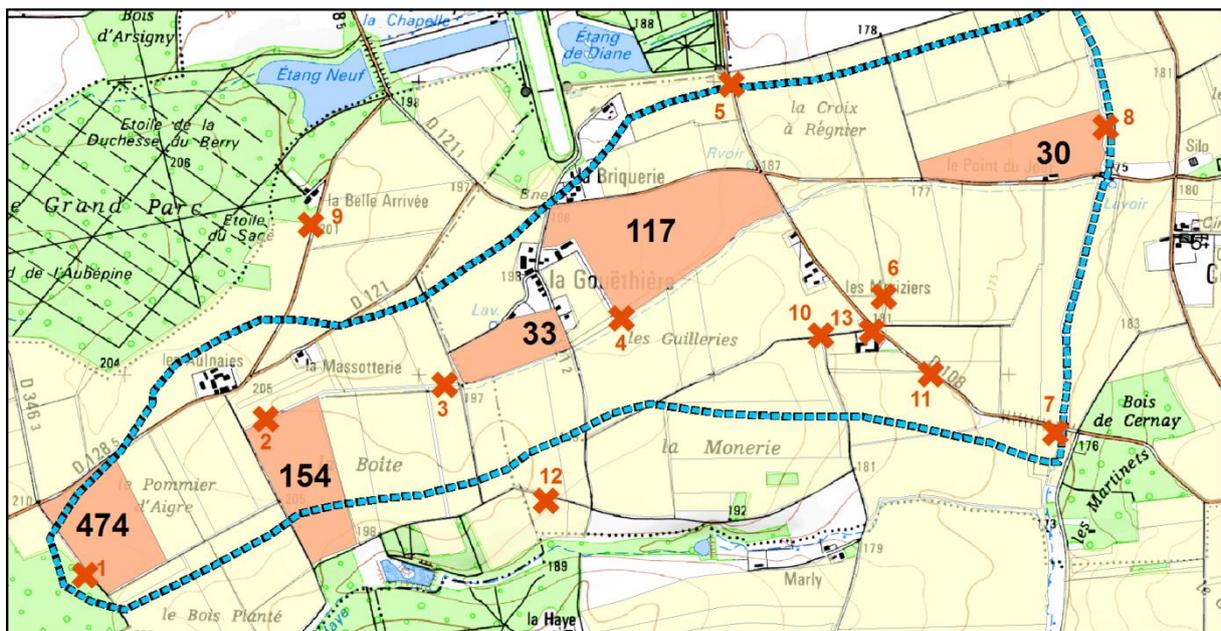


Image 8 : Carte du site d'étude ESCAPADE

2 LE SOL ET LE CYCLE DE L'EAU

2.1 PRESENTATION DU SOL

Dans le cycle de l'eau, la couverture pédologique joue un rôle clef tant pour les aspects quantitatifs que qualitatifs. Elle est un réservoir d'eau pour l'alimentation en eau des plantes et pour l'ensemble des êtres vivants qui y sont présent.

2.1.1 CONSITUTION DU SOL

Le sol représente la couche superficielle de la croûte terrestre, résultant de la transformation de la roche mère, enrichie par des apports organiques. Il est composé de trois principales phases :

- Solide : elle contient la matière minérale et la réserve nutritive.
- Liquide : il s'agit de la solution du sol assurant la nutrition des végétaux et la migration des sels minéraux.
- Gazeuse : c'est l'atmosphère interne du sol qui est composé de 15% d'O₂, 80% de N et 0.2 à 3% de CO₂. La différence avec la composition de l'atmosphère résulte de l'activité du sol.

La couche pédologique contient également des pores (cavités dans lesquels se loge l'eau ou l'air) et de la matière organique (formée des êtres vivants végétaux, animaux ou de micro-organismes).

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.

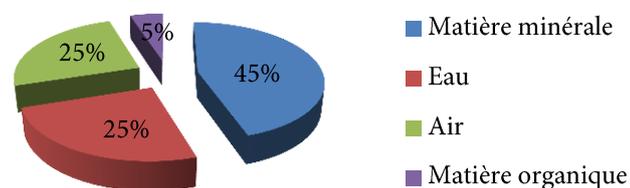


Image 9 : Répartition des composants dans le sol

2.1.2 TEXTURES DU SOL

La texture d'un sol correspond à la répartition des minéraux par catégorie de grosseur indépendamment de la nature et de la composition de ces minéraux.

La texture du sol ne tient pas compte du calcaire et de la matière organique.

Le classement des particules s'effectue en trois catégories (le diamètre des particules étant supposées sphérique) :

- Argile (< 2 µm)
- Limons (2 à 50 µm)
- Sable (50µ à 2 mm)

Les éléments tels que les blocs, les galets et les graviers qui ont un diamètre de plus de 2 mm sont classés à part.

2.1.3 PROFIL DE SOL

Le profil de sol est l'ensemble des horizons d'un sol donné ; chaque horizon étant une couche repérable et distincte de ce sol.

On décrit un horizon en fonction de son épaisseur, de sa composition granulométrique (argiles, limons, sables, cailloux), de son degré d'altération de la roche mère ou encore de son acidité.

L'ensemble des horizons constituent le profil de sol ou solum.



Image 10 : Profil de sol

2.2 LE CYCLE DE L'EAU

2.2.1 CARACTERISTIQUES HYDRIQUES DU SOL

Les variations d'état énergétique de l'eau dans la couverture pédologique sont le moteur des transferts d'eau.

Ces variations sont déterminées par les conditions externes à la couverture pédologique qui sont soit directement appliquées à la limite supérieure (apport d'eau lors d'une pluie ou départ par évaporation) et à la limite inférieure (nappe présente à sa base) soit indirectement appliquées par l'intermédiaire de prélèvement d'eau par les racines (transpiration des plantes).

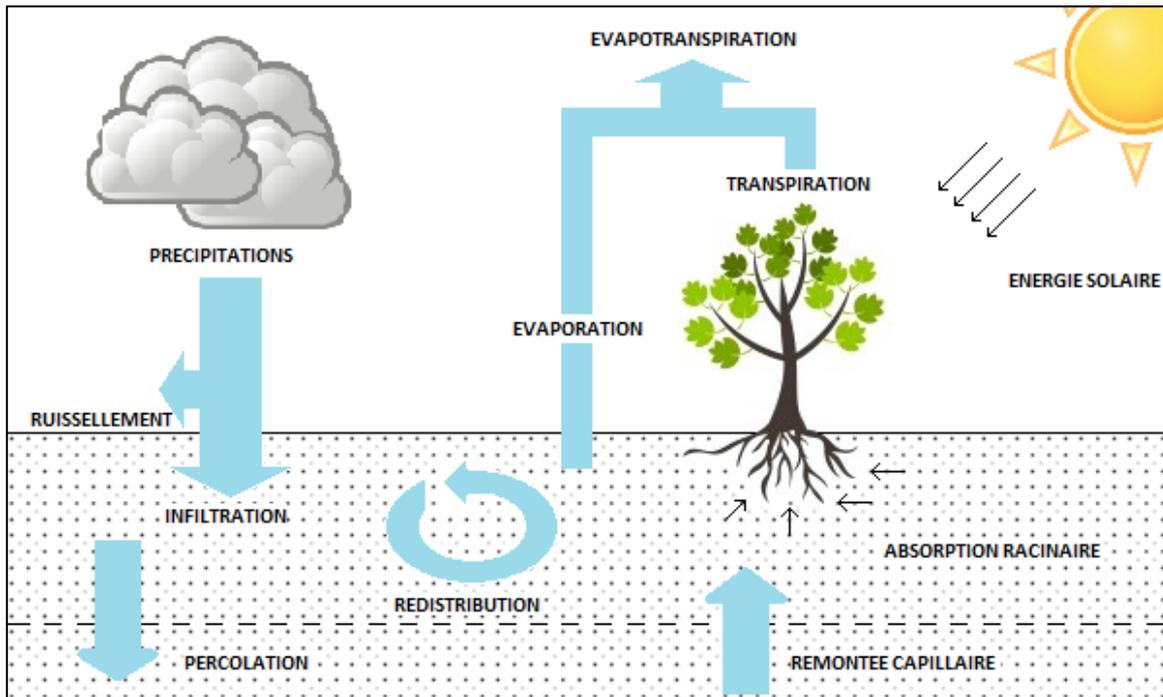


Image 11 : Schéma du cycle de l'eau

La description des transferts d'eau dans la couverture pédologique s'appuie donc sur la connaissance de trois grandeurs :

- Sa teneur en eau : θ (volumique) ou W (massique)
- L'état énergétique de l'eau : son potentiel matriciel h
- Sa capacité à conduire l'eau : sa conductivité hydraulique K

Les relations entre ces trois grandeurs varient selon les types de sol et sont appelées « caractéristiques hydriques » du sol.

2.2.2 TENEUR EN EAU

La **teneur en eau massique** W (ou pondérale) correspond au rapport entre la masse d'eau M_w contenue dans le sol et la masse du sol sec M_s (défini comme l'état du sol séché à une température de 105°C).

On choisit une température de 105°C pour se situer un peu au-dessus du point d'ébullition de l'eau sans pour autant détruire les matières organiques.

$$W = M_w / M_s \quad (1)$$

La **teneur en eau volumique** θ correspond au rapport entre le volume d'eau V_w contenue dans le sol et le volume total des trois phases du sol V_B (B pour Bulk : Global)

$$\theta = V_w / V_B \quad (2)$$

Le passage d'une teneur en eau massique W à une teneur en eau volumique θ s'obtient par l'équation suivante :

$$\theta = (\rho_B / \rho_W) \times W \quad (3)$$

Avec la masse volumique de l'eau ρ_W d'approximativement 1 g.cm^{-3} et la masse volumique apparente du sol $\rho_B = M_S / V_B$ qui se situe généralement entre 1.1 et 1.7 g.cm^{-3} .

Dans le cas de sol extrêmement secs, la teneur en eau volumique d'un sol peut se rapprocher de 0 tandis qu'elle est bornée à la limite supérieure de son domaine de variation par la porosité P .

$$P = 1 - (\rho_B / \rho_S) \quad (4)$$

Avec ρ_S étant la masse volumique de la phase solide du sol. Dans le cas des sols peu organique et à faible teneur en oxydes et hydroxydes de fer, elle peut être estimée voisine de celle du quartz qui est de 2.65 g.cm^{-3} .

En réalité, la teneur en eau maximale d'un sol, appelée aussi teneur en eau à saturation θ_s , n'atteint pas la valeur de la porosité en raison de la difficulté à déplacer l'ensemble de la phase gazeuse du sol par de l'eau et de l'existence de pores difficilement accessibles. θ_s représente 90 à 95% de la porosité.

2.2.3 POTENTIEL DE L'EAU

La grandeur qui permet de décrire et prévoir les transferts d'eau dans la couverture pédologique est le « potentiel de l'eau », quantité d'énergie contenue dans une quantité unitaire d'eau.

L'état énergétique de l'eau dans le sol se décompose en :

- Energie potentielle de position dans un champ de force
- Energie cinétique due à la vitesse de déplacement du liquide.

L'énergie cinétique étant faible dans les sols, on considère donc qu'elle est négligeable devant l'énergie potentielle.

Si l'on se limite à des sols indéformables, non salés et pour lesquels on peut négliger les variations de température, on distingue deux composantes de base du potentiel total :

- Gravitaire
- Pression

Le **potentiel** (ou charge) **gravitaire** correspond à un déplacement dans le champ de pesanteur. Le niveau du sol pris pour zéro, le potentiel gravitaire sera négatif dans le sol et positif au-dessus de la surface du sol.

$$h_G = z \quad (5)$$

Le **potentiel** (ou charge) **de pression** peut être différent selon que l'on ait à faire à un sol saturé en eau, ou non-saturé. On peut donc distinguer deux types de potentiel de pression :

- Le potentiel de pression hydrostatique : lorsque le sol est saturé, l'eau est soumise à la pression exercée par la colonne d'eau qui la surmonte au point considéré. Le potentiel est alors positif et correspond à la hauteur de la colonne d'eau (m)
- Le potentiel de pression capillaire (ou matriciel) : lorsque le sol n'est pas saturé, il existe des forces de tension superficielle aux interfaces entre les phases gazeuse, liquide et solide.

3 ETALONNAGE, VERIFICATION ET CABLAGE

3.1 PREPARATION CENTRALE D'ACQUISITION

L'un des objectifs de mon projet est de récolter différentes données physiques et hydriques du sol et d'analyser leurs comportements au fil du temps, des saisons, du climat et des actions de l'homme sur l'environnement.

Pour cela nous utilisons une centrale de mesure et de contrôle et nous avons choisi la CR1000 du constructeur Campbell Scientific.

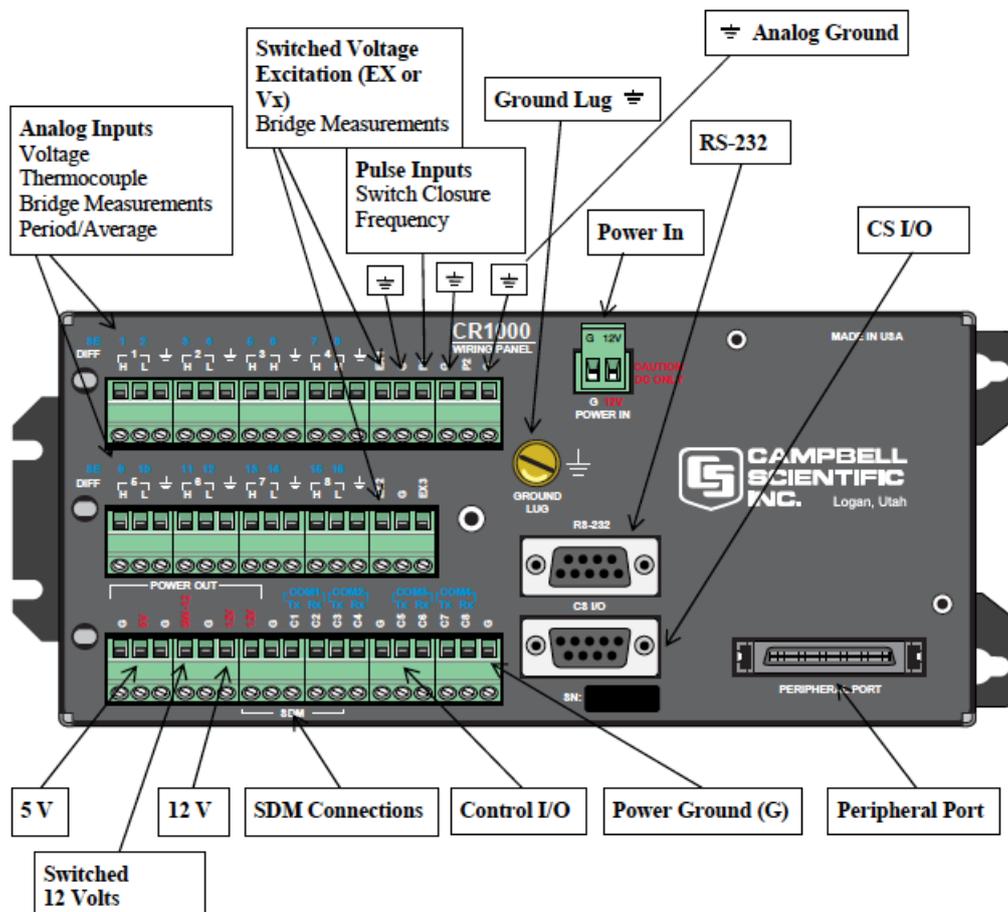


Image 12 : Diagramme de la centrale d'acquisition CR1000

La CR1000 alimenté en 12V peut être utilisé en :

- **Analogique** : 8 entrées différentielles ou 16 entrées unipolaires pour effectuer des mesures de tension jusqu'à ± 5 V. La résolution pour l'étendue de mesure la plus sensible, est de $0,67\mu\text{V}$.
- **Numérique** : 8 entrées/sorties numériques

Elle possède trois sources d'excitation commuté afin d'effectuer des mesures de ponts de mesure. Chaque sortie analogique peut alors fournir une tension d'alimentation de $\pm 2,5$ V jusqu'à 25mA.

Il est possible d'utiliser deux voies d'entrée impulsion qui peuvent compter des impulsions à haut niveau (signal carré à 5V), des contacts sec ou du courant alternatif bas niveau.

Le programme en CRBasic est créé sur ordinateur via le logiciel LOGGERNET puis envoyé à la centrale d'acquisition CR1000. Celui-ci détermine quand et comment les capteurs sont mesurés, et les données stockées.

La CR1000 peut stocker des mesures individuelles, ou bien elle peut utiliser ses capacités de traitement afin de calculer des moyennes, minimum ou maximum, à des intervalles de temps périodiques ou selon des conditions particulières.

Les données sont stockées dans des tableaux tels que celui-ci :

TOA5	Test	CR1000	22010	CR1000.Std.26	CPU :Test.CR1
TIMESTAMP	RECORD	BattV_Min	VW_A	Conduc_A	Temp_A
TS	RN	Volts	m3/m3	dS/m	C
		Min	Smp	Smp	Smp
29/10/2013 16:00	0	13.74	0.305	0.16	11.76
29/10/2013 18:00	1	12.89	0.306	0.158	11.73
29/10/2013 20:00	2	12.78	0.306	0.155	11.18
29/10/2013 22:00	3	12.75	0.304	0.151	10.55
30/10/2013 00:00	4	12.72	0.304	0.148	9.98
30/10/2013 02:00	5	12.70	0.303	0.145	9.48
30/10/2013 04:00	6	12.68	0.302	0.143	8.98
30/10/2013 06:00	7	12.68	0.302	0.141	8.57
30/10/2013 08:00	8	12.67	0.302	0.14	8.23
30/10/2013 10:00	9	14.02	0.302	0.14	7.959

Tableau 1 : Exemple de fichiers de données

Nous communiquons avec la CR1000 grâce au port RS232 que nous venons connecter à un ordinateur portable.

MULTIPLIXEUR :

Dans le but d'augmenter le nombre de capteurs installé sur la centrale d'acquisition CR1000, nous utilisons l'AM16/32B Relay Multiplexer du constructeur Campbell Scientific.

Selon le type de capteurs utilisés, un commutateur manuel nous permet de configurer l'AM16/32B pour multiplexer :

- 16 groupes de 4 voies à travers quatre terminaux communs (COM).
- 32 groupes de 2 voies à travers seulement 2 terminaux COM.



Image 13 : Multiplexeur AM16/32B

Ce multiplexeur prend en charge de nombreux types de capteurs dont les thermistances, les potentiomètres, les sondes réflectométriques et de teneur en eau du sol.

Lors d'une nouvelle campagne de mesures, je dois préparer une centrale d'acquisition entièrement. Elle est composée le plus souvent d'une CR1000, d'un multiplexeur, d'une batterie, et de différents capteurs.

CABLAGE :

A l'aide de l'utilitaire ShortCut du logiciel LOGGERNET, j'ai édité les plans de câblage de la centrale d'acquisition, du multiplexeur ainsi que des capteurs pour les 5 sites expérimentaux.

J'ai ensuite câblé, tout en étant hors tension, les différents capteurs sur la CR1000 et sur le multiplexeur.



Image 14 : Plan de câblage

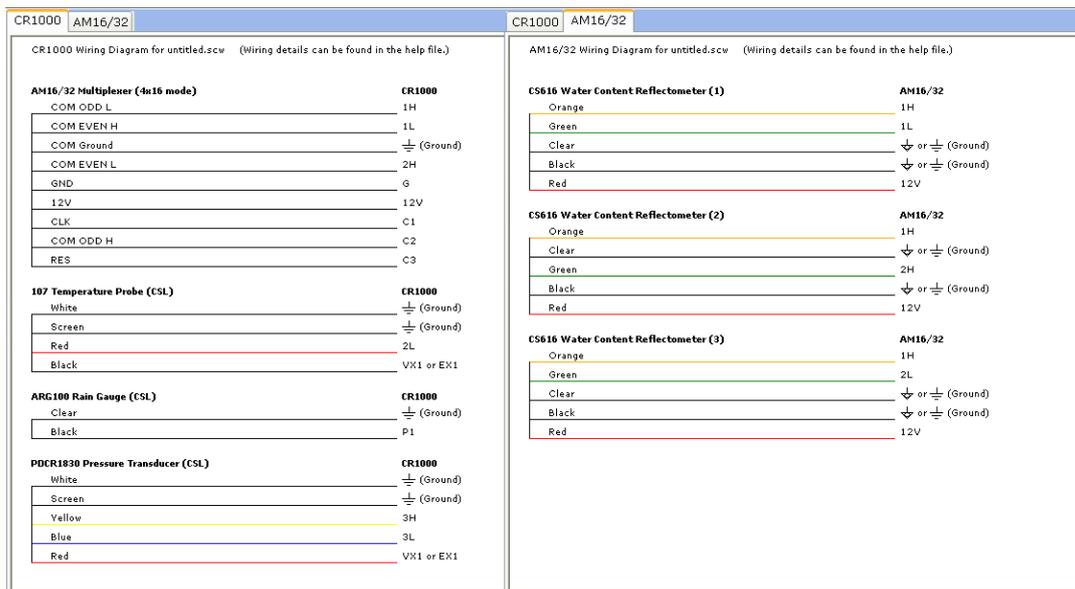


Image 15 : Plan de câblage de la CR1000 (à gauche) et du multiplexeur (à droite)

3.2 LES DIFFERENTS CAPTEURS

3.2.1 SONDE DE TEMPERATURE

Présentation :

Nous utilisons une thermistance 107 du constructeur Campbell Scientific pour nos mesures de températures. Ce capteur passif est précis ($\pm 0.1^{\circ}\text{C}$) et peut mesurer la température de l'air, du sol ou de l'eau de -35° à $+50^{\circ}\text{C}$.

Les thermistances sont basées sur la loi de variation de la résistance électrique en fonction de la température.

On peut exprimer une relation entre la résistance de la thermistance et sa température par la relation de Steinhart-Hart :

$$T = 1 / (A + B (\ln (R)) + C (\ln (R))^3)$$

Avec : T sa température (en Kelvins)
 R sa résistance électrique (en Ohms).
 A, B et C sont des coefficients donnés :
 $A = 8,271.10^{-4}$
 $B = 2,088.10^{-4}$
 $C = 8,059.10^{-8}$

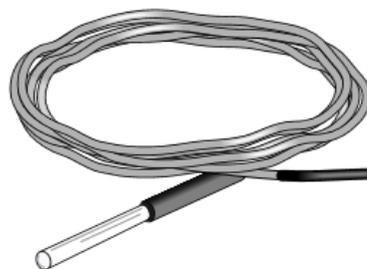


Image 16 : Sonde de température T107

Vérification :

Dans le but de vérifier le bon fonctionnement de ces capteurs, nous effectuons un étalonnage par comparaison ainsi qu'un jugement de conformité par rapport à un critère préalablement défini par nos soins.

Nous plongeons les thermistances ainsi qu'une sonde de température de référence dans un bain thermostaté.

Nous imposons au bain la température désirée et l'on attend 1 heure par la suite afin de stabiliser la mesure. Puis, nous relevons la température indiquée par les thermistances ainsi que celle de la sonde de température de référence.

Valeur Vraie		Valeur Lue	
Etalon	Capteur 1	Capteur 2	Capteur 3
T (°C)	T (°C)	T (°C)	T (°C)
6,1	6,2	6,2	6,2
11,1	11,1	11,1	11,1
16	16	16,1	16,1
20,9	21	21	21
25,8	25,9	25,9	25,9

Tableau 2 : Etalonnage T107

L'erreur de fidélité étant négligeable, nous quantifierons uniquement l'erreur de justesse.

Notre tolérance est de $\pm 0,5$ °C par rapport à la valeur vrai. L'écart maximal est de 0,1°C donc les 3 thermistances sont conformes.

Au cours de mes missions, j'ai du instrumenter 5 sites. Chaque site nécessitait 3 thermistances pour mesurer la température à 3 profondeurs différentes. Toutes se sont révélées conformes.

3.2.2 PLUVIOMETRIE

Présentation :

Pour mesurer la pluie nous utilisons, l'ARG100, un pluviomètre à auget basculant du constructeur Campbell Scientific.

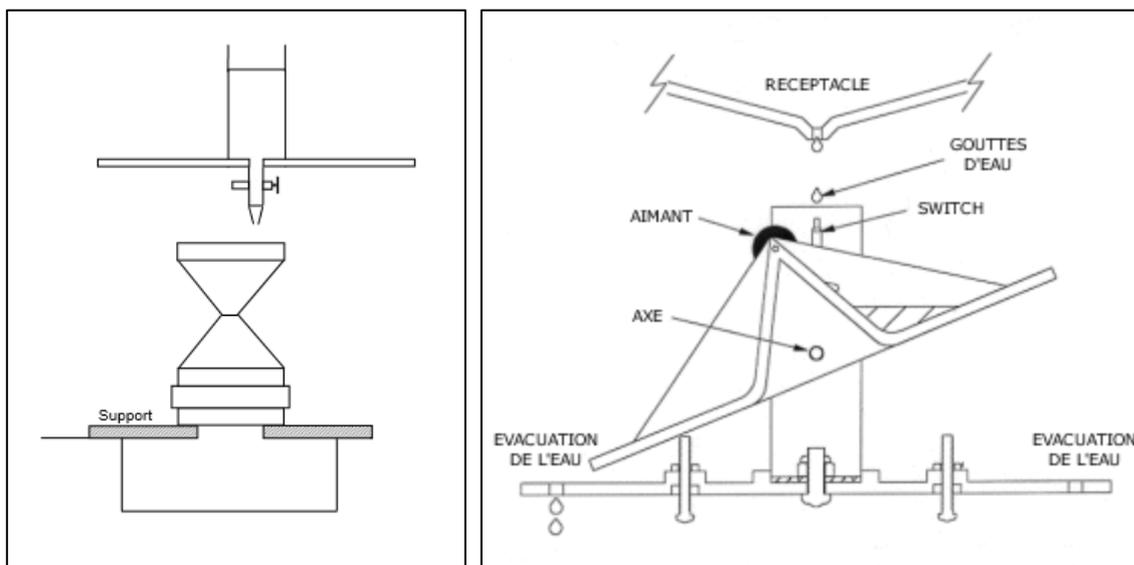


Image 17 : Pluviomètre à augets basculant ARG100

Ce capteur est branché sur une voie de comptage de la centrale d'acquisition. Ce compteur est incrémenté de 1 à chaque basculement d'auget, qui correspond à 0,2 mm de pluie.

Vérification :

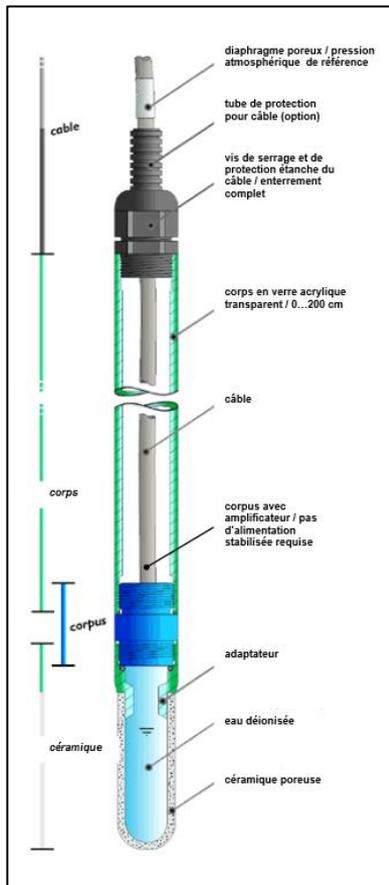
La vérification du pluviomètre consiste à faire tomber dans le réceptacle du pluviomètre, une quantité d'eau précise et connue.

Le diamètre interne du disque d'ouverture du pluviomètre correspond à 25,4 cm (un rayon de 12,7 cm), ce qui correspond donc à une aire de 506,7 cm². Pour simuler une pluie de 10 mm (10 l/m²) il faudra alors faire tomber 506,7 ml d'eau. Considérant la masse volumique de l'eau à 1, nous ferons tomber une masse de 506,7 g d'eau.

Une fois que l'eau s'est totalement vidée du bidon, il faut vérifier que l'ARG100 a bien compté 50 basculements d'augets soit 10 mm de pluie. Si ce n'est pas le cas c'est que le pluviomètre doit être calibré. Pour cela, il faut régler le pluviomètre en vissant ou dévissant les butées qui se situent sous l'auget et nous recommençons la manipulation jusqu'à ce que le pluviomètre nous indique une mesure correcte de notre volume d'eau.

Nous autorisons une erreur de justesse de 0,2 mm de pluie pour 10 mm de pluie.

3.2.3 TENSIOMETRIE

Présentation :

Image 18 : Tensiomètre T4e
Etalonnage :

Afin d'étalonner le tensiomètre, il faut enlever la céramique poreuse du tensiomètre et placer un calibre de pression de référence au niveau du capteur. On impose différentes pressions avec le calibre et on relève simultanément les valeurs de tension (mV) indiquées par le tensiomètre.

On obtient un tableau à 2 colonnes : valeur lue (mV) et valeur vraie (mbar).

Avec ce tableau je réalise un graphique sur lequel je trace une droite d'étalonnage afin de pouvoir obtenir l'équation qui me permettra de convertir la tension mesurée par ce capteur en pression.

L'équation pour ce tensiomètre dans cet exemple est $P = - 9,99 \times U - 1,36$.

Tensiomètre	
Valeur Vraie	Valeur Lue
P (mbar)	U (mV)
-0,2	0
-103	10,14
-200,8	19,61
-300,1	29,75
-402,1	39,89
-507,5	50,71
-604,7	60,18
-700	69,64
-606,1	60,85
-500,1	50,03
-405,1	40,57
-300,2	29,75
-202,2	20,28
-100,1	9,8
-0,2	0

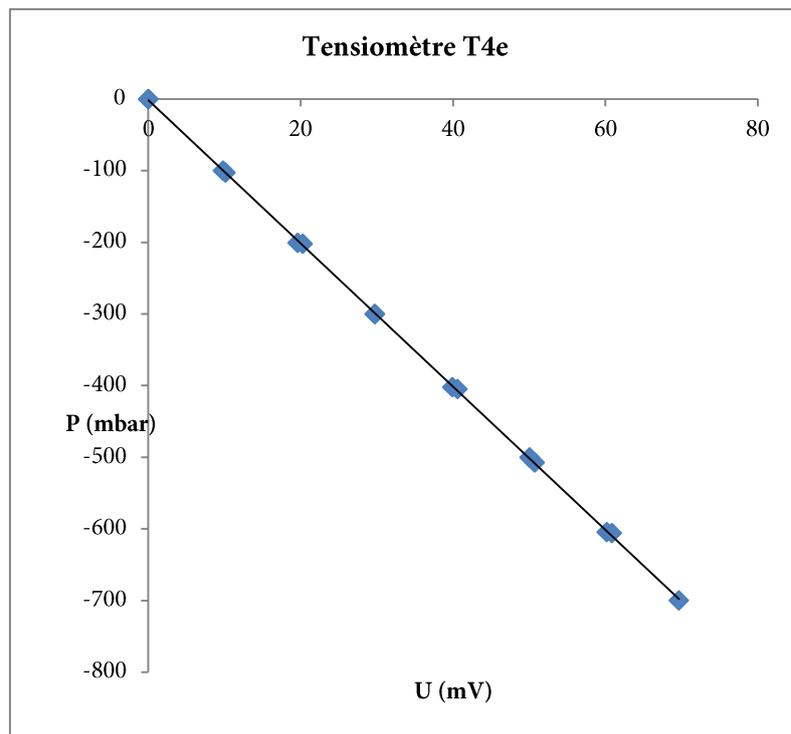


Tableau 3 : Etalonnage T4e

On peut voir ici que le phénomène d'hystérésis est inexistant.

3.2.4 *SONDE DE NIVEAU D'EAU*

Afin de suivre l'évolution du niveau de l'eau dans le sol, nous disposons des piézomètres à proximité des centrales d'acquisitions dans lesquels nous installons les sondes de niveau d'eau PDCR1830. Nous pourrions ainsi étudier les mouvements d'eau dans d'éventuelles nappes superficielles.

Il s'agit d'un capteur de pression : lorsque qu'une tension d'excitation est appliquée, la résistance électrique varie avec le changement de la pression du liquide (pont de jauges de contraintes intégrées dans une membrane en silicium). La tension d'excitation est au maximum de 10 Volts à 5 mA.

Ils peuvent mesurer jusqu'à une pression de 350 mbar ce qui représente une mesure de 3,43 m dans l'eau pure. Cela est suffisant pour le projet puisque la sonde se trouvera à 60 cm sous la surface du sol.

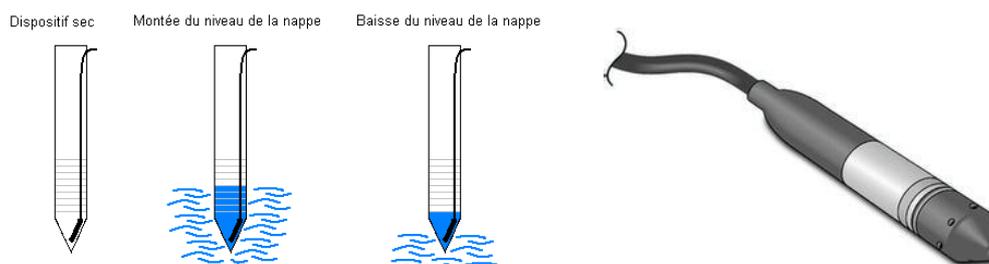


Image 19 : Capteur de niveau d'eau PDCR1830

Etalonnage :

Nous installons le capteur au fond d'une grande éprouvette gradué en mm. Nous remplissons l'eau progressivement au niveau désiré (valeur vraie), on patiente quelques instant pour que la mesure soit stabilisé puis nous relevons la valeur lue par le PDCR1830

PDCR1830	
Valeur Vraie	Valeur Lue
H (cm)	U (mV)
6	0,126
8	0,193
10	0,260
12	0,325
14	0,392
16	0,458
18	0,525
20	0,588
22	0,653
24	0,722
26	0,788
28	0,852
30	0,919
32	0,989
34	1,053
36	1,117
38	1,184
40	1,251
42	1,319
44	1,383
46	1,449

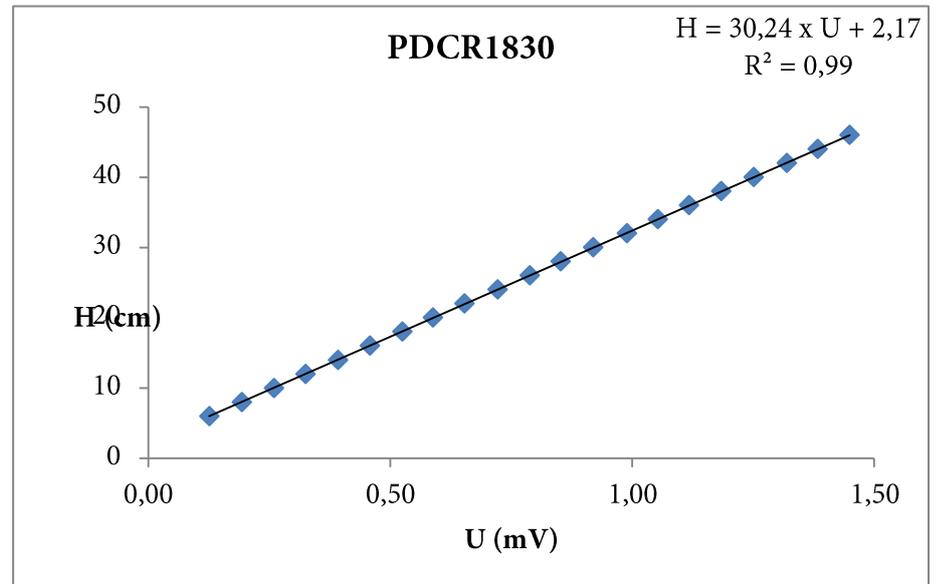


Tableau 4 : Etalonnage PDCR1830

Pour ce capteur nous devons rentrer directement au sein du programme l'équation obtenu pour que celui-ci nous indique les valeurs en cm.

Nous utiliserons la valeur de +30,244 pour le gain mais ne prendrons pas la valeur de +2,170 pour l'OFFSET. Celui-ci correspond à son OFFSET dans l'air ambiant. Or le capteur se trouvera au fond d'un piézomètre avec initialement une certaine hauteur d'eau au dessus de lui.

Pour déterminer l'OFFSET à appliquer nous avons laissé la sonde au fond d'un piézomètre et nous avons inséré de l'eau dans celui-ci. L'eau a d'abord rempli la pointe du piézomètre, ensuite une petite hauteur de cylindre puis arrivé à la zone crépinée, l'eau s'évacuait hors du piézomètre.

Nous avons attendu que ce niveau se stabilise pour relever la valeur de l'OFFSET à appliquer. Ainsi nous avons déterminé qu'il fallait appliquer un OFFSET de -9,21 pour ce capteur.

L'équation finale sera alors $H \text{ (cm)} = 30,24 \cdot U - 9,21$. (6)

3.2.5 TENEUR EN EAU

Réflectomètre de teneur en eau du sol : CS616

Présentation :

Le réflectomètre de teneur en eau mesure la teneur en eau volumique des milieux en utilisant la méthode de mesure temporelle avec une précision de 0,05 de teneur en eau volumique.

La sonde CS616 est composée de deux tiges en acier connectées à un circuit imprimé, dans cette sonde se trouve un multivibrateur bistable (oscillateur électronique) qui envoie un signal le long des tiges d'acier.

Cette méthode consiste à générer à partir d'une CS616 une impulsion électromagnétique. Le temps de propagation de l'onde et la réflexion des impulsions sont ensuite mesurés et utilisés pour calculer la teneur en eau volumique du sol.

Le temps de parcours du signal le long des tiges du capteur dépend de la constante diélectrique du sol qui elle-même dépend de la teneur en eau volumique du matériau mesuré. Ainsi la fréquence du multivibrateur dépend de la teneur en eau volumique du matériau mesuré.

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

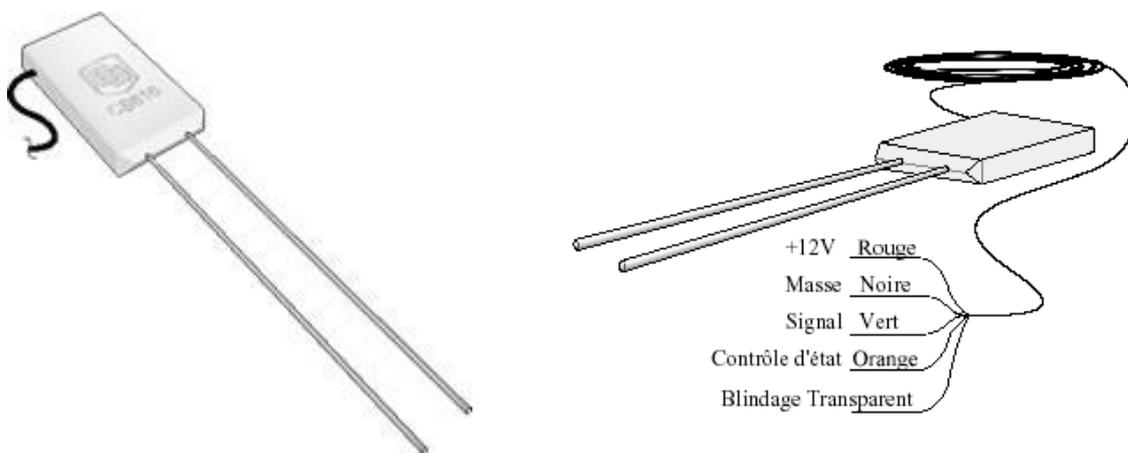


Image 20 : Réflectomètre CS616

Les sondes CS616 que nous implantons dans le sol ont une dimension de :

- Tiges : 300 mm de long, 3,2 mm de diamètre, 32 mm d'espacement
- Tête : 85 x 63 x 18mm

Le signal de sortie de la CS616 est un signal périodique carré de +/- 0,7 Volts, dont la fréquence dépend de la teneur en eau. La période P du capteur (en microseconde) est reliée de façon empirique à la teneur en eau via deux équations de calibration.

Le choix de la formule linéaire ou quadratique dépend de la gamme attendue et des exigences d'exactitude.

L'équation linéaire est :

$$\blacksquare \text{ VWC} = -0,4677 + 0,0283 \times P \quad (7)$$

L'équation quadratique est :

$$\blacksquare \text{ VWC} = -0,0663 - 0,0063 \times P + 0,0007 \times P^2 \quad (8)$$

Où P est la période du signal en μSec

VWC : Volumic Water Content = Teneur en Eau Volumique.

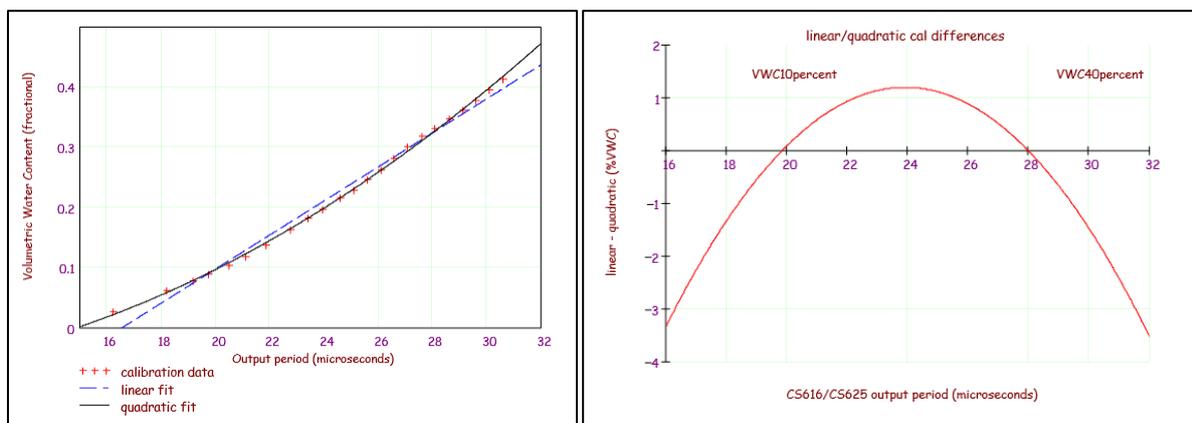


Image 21 : Différences entre les deux méthodes

Vérification :

Pour vérifier les réflectomètres de teneur en eau du sol, nous allons les connecter à la centrale d'acquisition et vérifier les différentes mesures de teneur en eau volumique dans différents milieux.

Nous réaliserons trois expériences sur lesquelles nous ferons deux points de mesures pour contrôler la fidélité des capteurs. Nous effectuerons une mesure dans l'air, dans le sable et dans l'eau.

Pour que les sondes CS616 soient conformes, il faut que ces dernières respectent un écart maximal de 0,005 (0,5 point d'humidité)

Sonde N°	Unité	AIR		SABLE		EAU	
		Mesure 1	Mesure 2	Mesure 1	Mesure 2	Mesure 1	Mesure 2
1	θ (m3/m3)	-0,0027	-0,0027	0,0137	0,0137	0,82	0,82
	P (μ s)	15,04	15,04	16,1	16,1	40,36	40,36
2	θ (m3/m3)	-0,0031	-0,0031	0,0107	0,0107	0,8213	0,822
	P (μ s)	15,01	15,01	15,91	15,91	40,39	40,41
3	θ (m3/m3)	-0,0045	-0,0045	0,015	0,015	0,8145	0,8138
	P (μ s)	14,92	14,92	16,18	16,18	40,26	40,24
4	θ (m3/m3)	-0,0051	-0,0049	0,0122	0,0122	0,8104	0,8104
	P (μ s)	15,07	14,89	16	16	40,17	40,17
5	θ (m3/m3)	-0,0053	-0,0053	0,0107	0,0107	0,8179	0,8186
	P (μ s)	14,87	14,87	15,91	15,91	40,32	40,34

Tableau 5 : Etalonnage CS616

Réflexomètre de teneur en eau du sol : CS650



Présentation :

Ce réflexomètre de teneur en eau utilise le protocole SDI12 et possède une thermistance au bord du boîtier époxy qui lui permet de mesurer la température.

La définition du SDI-12 est : Serial Data Interface at 1200 baud (Interface de données série à 1200 Baud).

Le protocole SDI-12 a été développé pour les capteurs utilisés en hydrologie afin de les rendre compatibles avec la plupart des centrales de mesures.

Le protocole de données séries définit précisément comment le capteur doit communiquer avec une centrale de mesure, les spécifications d'entrée, de sortie, d'excitation, d'alimentation, de programmation, etc.

Ainsi les capteurs SDI-12 ont seulement 3 fils : un câble série, un câble de 0 Volt et un câble de 12 Volts.

Au cours de mon apprentissage j'ai effectué plusieurs expérimentations afin d'étudier le comportement des nouvelles sonde de teneur en eau CS650 (voir page 43).

3.2.6 LOGGERNET

LOGGERNET est le logiciel qui nous permet de communiquer avec la centrale d'acquisition.

On peut, dans l'onglet :

- « Main » : configurer et se connecter à une centrale d'acquisition
- « Program » : créer ou modifier divers programmes que l'on peut par la suite envoyer à une centrale d'acquisition



C'est à travers ce logiciel que toutes nos interactions ordinateur/centrale d'acquisitions s'effectuent.

Image 22 : Menu du logiciel LOGGERNET

En cliquant sur le module « Connect » dans l'onglet Main on obtient ceci à l'écran :

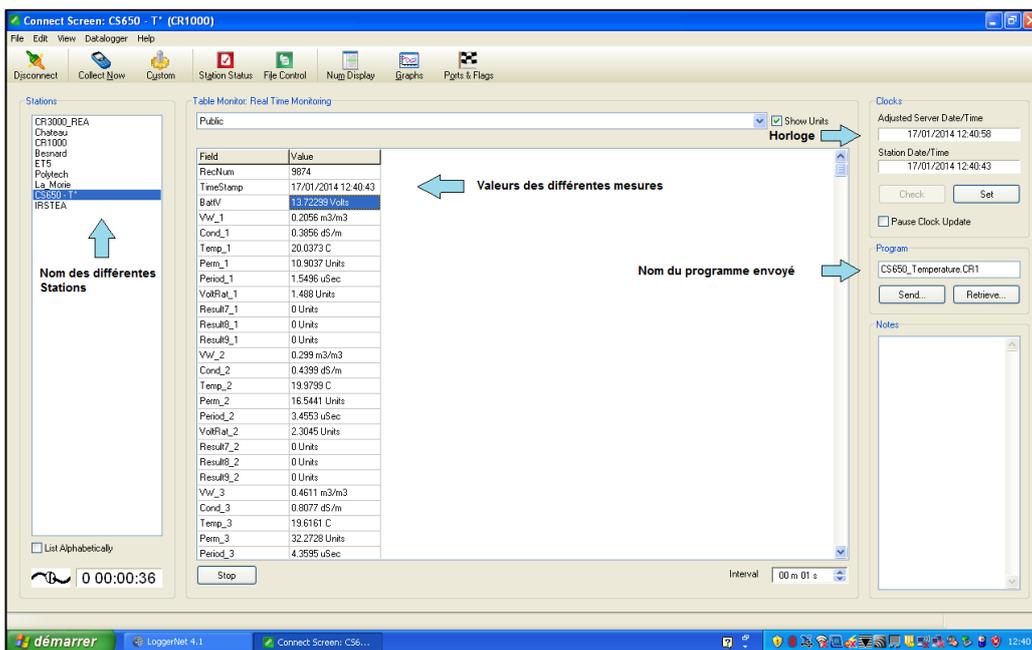


Image 23 : Interface de l'option Connect

A partir de cette page, nous pouvons choisir la centrale d'acquisition à laquelle nous connecter, vérifier son horloge et le programme qu'elle détient et contrôler les différentes valeurs des mesures effectuées par les capteurs

Grâce à l'icône « Custom », il est possible de récupérer les données de différentes façons :

- Toutes les données depuis le début
- Les nouvelles données depuis la dernière récupération de données

4 SUR LE TERRAIN

4.1 INSTALLATION CENTRALE D'ACQUISITION ET CAPTEURS

Lors d'une nouvelle campagne de mesures, nous devons instrumenter un site. Pour cela nous nous rendons sur le site OS² où nous installons une centrale d'acquisition ainsi que ses différents capteurs sur un trépied avec un panneau solaire. Le système doit être autonome d'un point de vue énergétique te permettre le suivi des différents paramètres physiques du sol (mesure toutes les 2 heures).

Les capteurs de teneur en eau CS616 et CS650 sont implantés de façon horizontale dans le sol sur le front de la fosse pédologique grâce à un guide d'onde. Les thermistances T107 sont implantées de façon horizontale dans le sol à différentes profondeurs.

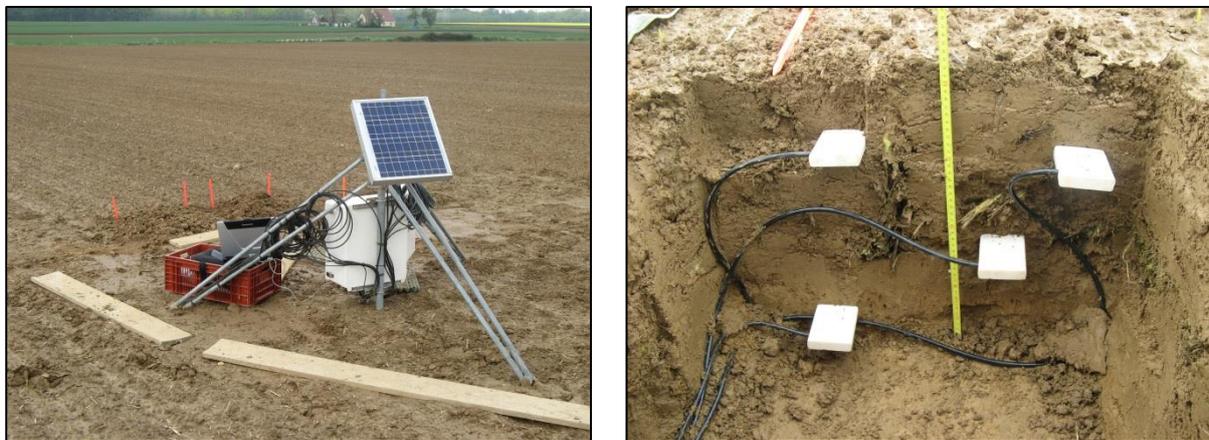


Image 24 : Installation Centrale d'acquisition sur le site PUJOL

4.2 PRELEVEMENT DE SOL

Dans le but d'améliorer la qualité des mesures de teneur en eau, nous devons calibrer les réflectomètres de teneur en eau.

Pour cela nous avons besoin de faire des prélèvements de densité du sol et de teneur en eau pondérale du sol.

Grâce à la l'équation (3) nous allons pouvoir calculer la teneur en eau volumique à un instant t donné et ainsi calibrer la courbe de réponse des réflectomètres de teneur en eau.

4.2.1 DENSITE

La densité du sol dans l'horizon de surface (couche 30 premier cm) évolue au cours de la saison culturale sous l'action du climat et de la croissance des plantes. Pour cela nous devons effectuer plusieurs relevés au cours de la campagne de mesure.

Afin de réaliser un prélèvement de densité, nous devons tout d'abord enfoncer un cylindre dans le sol de façon verticale, retirer la terre autour de ce cylindre et couper le sol à environ 2cm en-dessous du cylindre dans le but de pouvoir dégager le cylindre sans altérer l'échantillon.

Par la suite, nous araserons le cylindre sur place en faisant attention à ne pas enlever des mottes de terres qui pourraient provoquer un trou dans le cylindre ce qui engendrera une mesure fausse.



Nous obtenons ainsi un volume de sol prélevé connu (V_s). Par séchage à l'étuve à 105 °C, nous déterminons la masse de sol sec (M_s). Le rapport M_s/V_s nous permet de déduire la densité apparente (D_a) de l'échantillon.

Image 25 : Cylindre de sol

4.2.2 TENEUR EN EAU PONDERALE

Il est nécessaire de faire des relevés ponctuels de teneur en eau pondérale à des moments pertinents de la saison culturale pour calibrer les capteurs de teneur en eau, pour cela nous devons procéder à des prélèvements de sol.

A l'aide d'une tarière, nous effectuons un trou dans le sol où nous prélevons nos échantillons de terre à différentes profondeurs.

Après avoir récupéré le sol, il est stocké dans des boîtes de métal et fermés afin que la teneur en eau ne varie pas.

Une fois au laboratoire, les échantillons sont directement pesés et nous avons donc une masse humide du sol.

Suite à cela, les échantillons sont ensuite passés dans une étuve que l'on règle à 105°C pour se situer un peu au-dessus du point d'ébullition de l'eau sans pour autant détruire les matières organiques.

Après 1 ou 2 jour, le temps que le poids de l'échantillon devienne constant, nous effectuons une nouvelle pesée. Nous avons désormais la masse sèche.

Grâce à ces deux pesées, nous pouvons donc calculer la teneur en eau pondérale.

N° Sonde	Masse Humide	Masse Sèche	Masse Boite	Masse Eau	Masse Sol Sec	Teneur en eau pondérale
1	160,9 g	137,4 g	21,3 g	23,5 g	116,1 g	0,202 g.g ⁻¹
2	147,1 g	126,7 g	18,5 g	20,4 g	108,2 g	0,189 g.g ⁻¹
3	157,8 g	142,4 g	20,9 g	15,4 g	121,5 g	0,127 g.g ⁻¹
4	157,9 g	132,6 g	19,5 g	25,3 g	113,1 g	0,224 g.g ⁻¹
5	138,3 g	120,6 g	20,9 g	17,7 g	99,7 g	0,178 g.g ⁻¹
6	157,3 g	141,8 g	19,7 g	15,5 g	122,1 g	0,127 g.g ⁻¹
7	176,3 g	148,3 g	20,3 g	28,0 g	128,0 g	0,219 g.g ⁻¹
8	150,8 g	131,4 g	21,6 g	19,4 g	109,8 g	0,177 g.g ⁻¹
9	153,7 g	139,0 g	20,1 g	14,7 g	118,9 g	0,124 g.g ⁻¹
10	155,3 g	131,5 g	21,6 g	23,8 g	109,9 g	0,217 g.g ⁻¹

Tableau 6 : Etalonnage CS616

La masse d'eau est obtenue en effectuant le calcul : Masse Humide – Masse Sèche.

Il est nécessaire de connaître la masse de sol séché exact pour le calcul de la teneur en eau pondérale, le calcul de la masse de sol sec est la suivante : masse sèche – masse boite.

Le calcul de la teneur en eau pondérale est donné par l'équation (1).

4.3 MAINTENANCE DU SITE EXPERIMENTAL ET DES APPAREILS DE MESURES

A chaque sortie sur le terrain, nous devons contrôler le bon fonctionnement des appareils et nous effectuons :

- le contrôle de la tension de la batterie
- la cohérence des données (présence de données aberrantes ou marqué par un « NAN »)
- l'état des câbles des capteurs
- le nettoyage du panneau solaire
- Le nettoyage du pluviomètre
- La collecte des données

4.4 PRELEVEMENT D'EAU

Dans le but d'étudier les propriétés physico-chimiques de l'eau du sol, nous avons installés différents dispositifs pour l'échantillonnage de l'eau :

- Des bougies poreuses
- Des piézomètres
- Des pièges à eau
- Sortie de drain

Nous avons installé des pluviomètres qui récupèrent l'eau de pluie dans des bacs isolés de la lumière et de la température. Régulièrement, nous venons récupérer cette eau dans un petit flacon qui passera dans un appareil de chromatographie ionique pour déterminer les concentrations en nitrate (NO_3^-) et en ammoniac (NH_4^+) et nous vidons le bac afin de pouvoir récupérer l'eau des prochaines pluies sans qu'elles soient altérées par les précédentes.

Afin de contrôler l'eau tout au long de son cycle dans le sol nous avons besoin d'étudier l'eau dans le sol. Pour cela on utilise des bougies poreuses, qu'il faudra au préalable mettre sous vide pour créer un effet de suction, pour l'eau retenu par le sol, et les piézomètres pour l'eau libre dans le sol

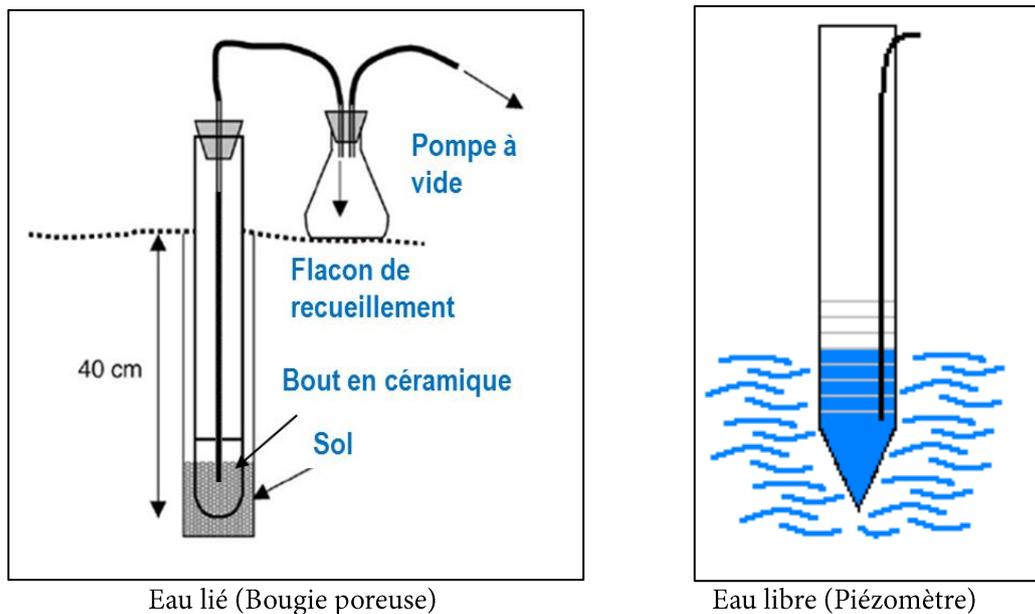


Image 26 : Récupération de l'eau dans le sol

5 EXPLOITATION DES RESULTATS

Les fichiers bruts récupérés des centrales d'acquisition possèdent l'extension « .DAT ». Nous utilisons le logiciel Microsoft Excel afin de les ouvrir et de les exploiter.

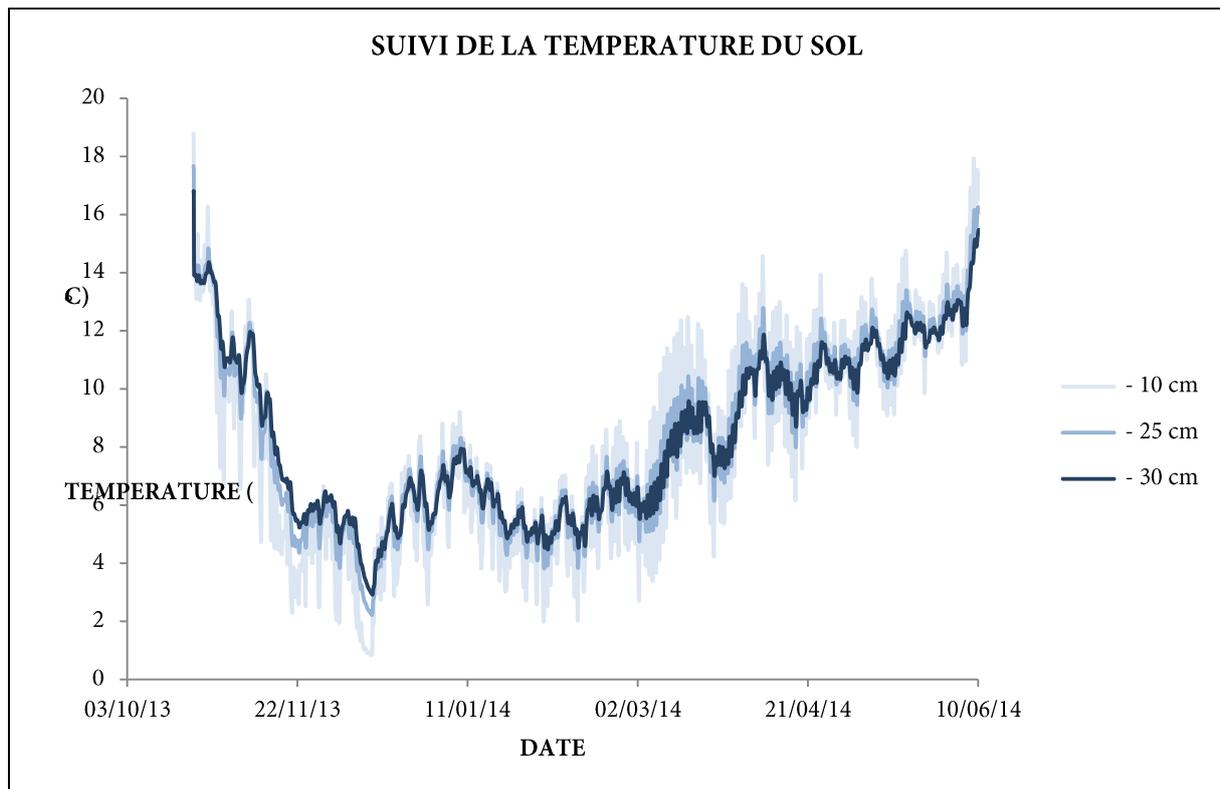
Nous obtenons un fichier nommé avec le préfixe « Table1 » dans lequel se trouvent les données concernant les réflectomètres de teneur en eau. Dans le deuxième fichier avec le préfixe « Table2 » nous retrouvons les données liées aux autres capteurs comme la pluviométrie, la température, et la tensiométrie. Nous avons réparti les données sur 2 fichiers afin de pouvoir mieux organiser le traitement des données.

Dans chaque fichier, les données brutes se trouveront dans la première feuille. Il y aura dans les autres feuilles, les différentes catégories de données que l'on souhaite traiter ainsi que les graphiques qui les accompagnent.

5.1 TEMPERATURE

Nous avons choisi d'installer des thermistances T107 dans le sol à différentes profondeurs (-10 cm, -25cm et -35cm) afin de pouvoir réaliser un profil de température.

Nous réalisons ainsi une graphique de température en fonction du sol afin de voir l'évolution de la température au cours du temps et des saisons.



Graphique 1 : Profil de température sur le site Château

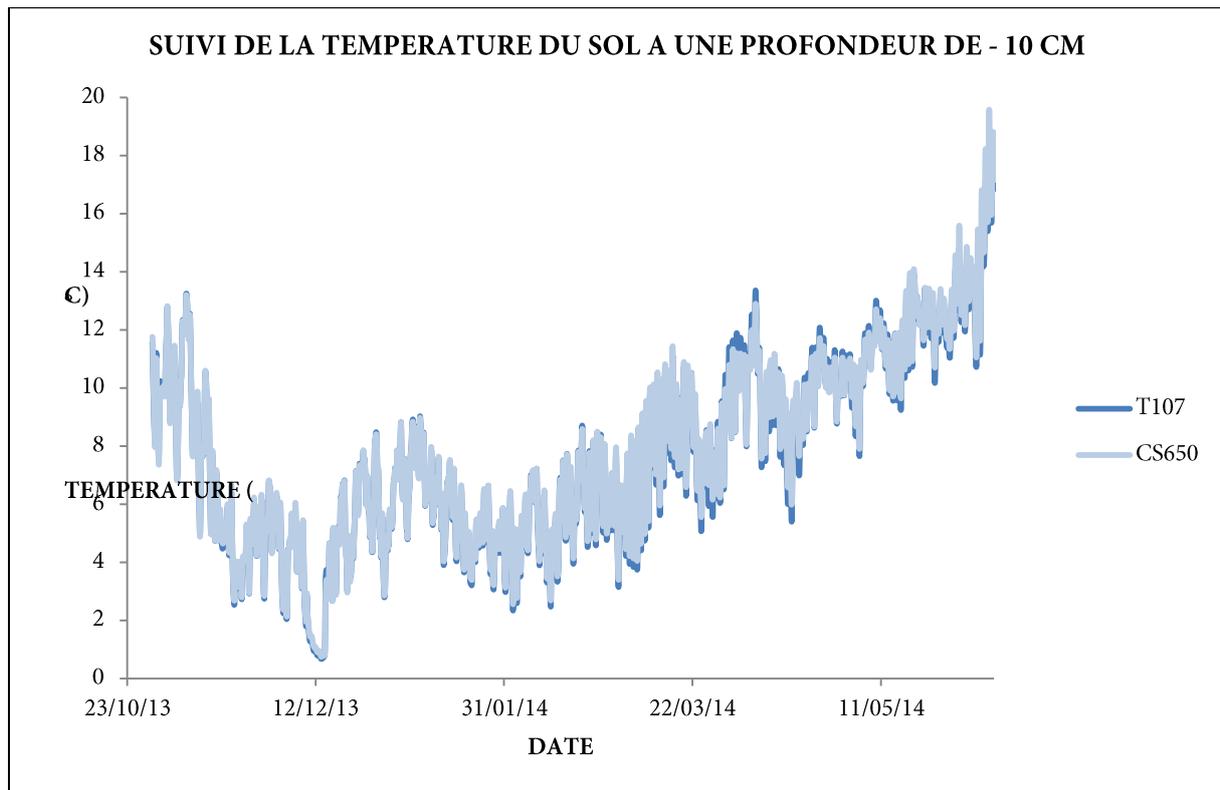
Sur ce graphique on peut remarquer que la température varie au cours du temps et plus on se trouve en profondeur dans le sol et moins celui-ci est sensible aux changements de température en surface.

La mesure de température du sol nous permettra également de compenser les effets de la température sur les sondes de teneur en eau.

Au cours de mon apprentissage je devais étudier la fiabilité des réflectomètres de teneur en eau de nouvelle génération (CS650). Celles-ci ont une thermistance d'intégrée dans le boîtier époxy.

D'après le graphique suivant qui compare la température prise avec une thermistance T107 et celle du réflectomètre de teneur en eau CS650, on peut conclure que les deux capteurs ont une réponse quasiment identique.

Cela nous indique que si l'on devait, à l'avenir, utiliser les réflectomètres de teneur en eau CS650, nous n'aurions pas besoin d'installer un capteur de température supplémentaire.



Graphique 2 : Comparaison de température Pt100 et CS650 sur le site Besnard

5.2 PLUVIOMETRIE

Grâce aux pluviomètres ARG100 installés sur les sites d'expérimentation, nous pouvons observer et étudier la pluviométrie.

Ceci nous permet de mieux comprendre certains événements, comme par exemple une remontée soudaine de la teneur en eau dans le sol.

Avec les données de pluviométrie nous pouvons calculer une pluviométrie journalière ou encore un cumul de pluie.

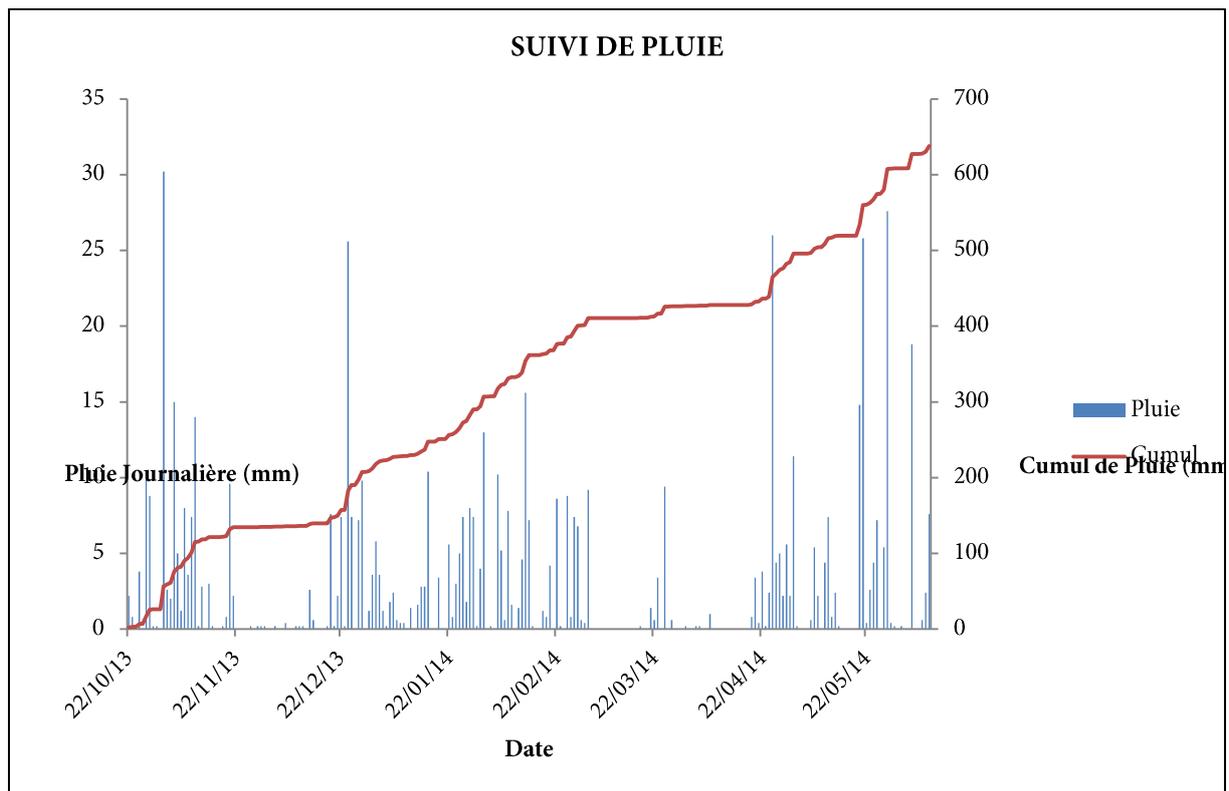
Dans le tableau de gauche on voit qu'il n'a plu qu'à certaines heures pour un total journalier de 10,4 mm ce qui correspond à 10,4 l/m².

La pluie du 27/10/2013 s'effectue encore après 22h, or la centrale d'acquisition enregistre les données toutes les deux heures et à minuit celle-ci change de jour, il ne faudra pas oublier de soustraire d'un jour la date lorsque l'on passera la donnée de la pluie journalière dans le tableau de droite.

TIMESTAMP	Rain (mm) Tot	Date	Pluie Journalière	Cumul	
27/10/2013 02:00	0	22/10/2013 00:00	2,2	0	
27/10/2013 04:00	0	23/10/2013 00:00	0,8	3	
27/10/2013 06:00	0	24/10/2013 00:00	0	3	
27/10/2013 08:00	0,6	25/10/2013 00:00	3,8	6,8	
27/10/2013 10:00	2,8	26/10/2013 00:00	0	6,8	
27/10/2013 12:00	1,4	27/10/2013 00:00	10,4	17,2	
27/10/2013 14:00	0	28/10/2013 00:00	8,8	26	
27/10/2013 16:00	0	29/10/2013 00:00	0,2	26,2	
27/10/2013 18:00	0,4	30/10/2013 00:00	0,2	26,4	
27/10/2013 20:00	0,4	31/10/2013 00:00	0	26,4	
27/10/2013 22:00	2	01/11/2013 00:00	30,2	56,6	
28/10/2013 00:00	2,8	10,4	02/11/2013 00:00	2,6	59,2

Tableau 6 : Données de pluviométrie

Grâce à ce tableau nous pouvons réaliser le graphique suivant :



Graphique 3 : Pluviométrie sur le site Château

5.3 TENSIOMETRES

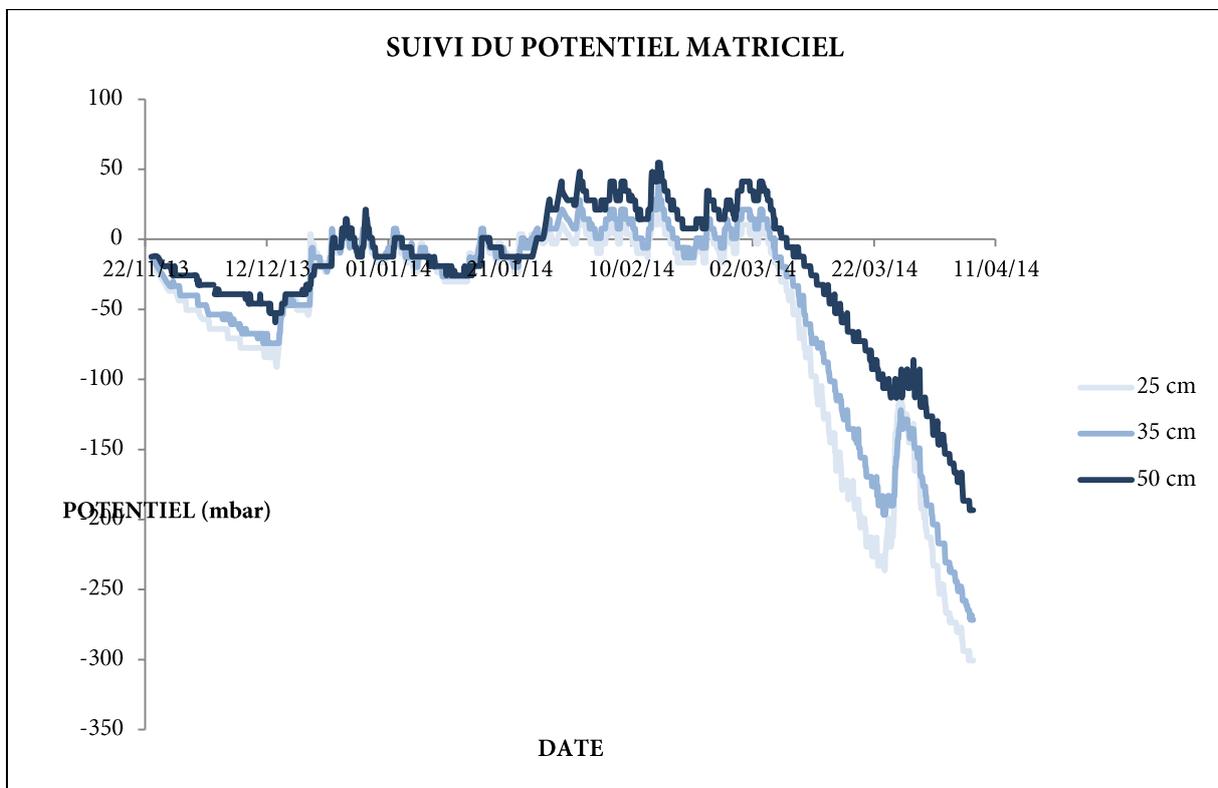
Les tensiomètres nous donnent une réponse en mV, c'est à nous de la convertir en millibar grâce à l'équation obtenu lors de l'étalonnage.

C'est la droite d'étalonnage qui nous donne l'équation à utiliser pour chaque capteur, en effet tous les capteurs sont différents :

- le tensiomètre 1 a une équation : $P = ((-9,99*U) - 1,36) + 5$
- le tensiomètre 2 a une équation : $P = ((-10,07*U) + 2,58) + 5$
- le tensiomètre 3 a une équation : $P = ((-9,915*U) + 2,74) + 5$

TIMESTAMP	DiffVol1	DiffVol2	DiffVol3	Pression1	Pression2	Pression3
TS	mV	mV	mV	mbar	mbar	mbar
23/11/2013 00:00	2,028	2,028	2,028	-16,6	-12,8	-12,4
24/11/2013 00:00	2,705	2,705	2,028	-23,4	-19,7	-12,4
25/11/2013 00:00	3,381	3,381	2,705	-30,2	-26,5	-19,1
26/11/2013 00:00	4,057	4,057	2,705	-36,9	-33,3	-19,1
26/11/2013 12:00	3,381	4,057	3,381	-30,2	-33,3	-25,8
26/11/2013 14:00	3,719	3,719	3,381	-33,6	-29,9	-25,8

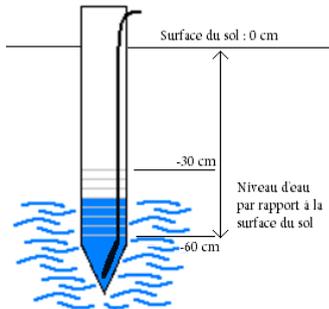
Tableau 7 : Données des tensiomètres



Graphique 4 : Tensiomètres sur le site Polytech

A la fin de ce graphique, on remarque que c'est à -25cm que la pression chute premièrement, puis à -35cm et enfin à -50cm. C'est d'abord en surface qu'il y a une perte d'eau, et donc qui se créer un effet de succion. L'inertie de l'assèchement du sol justifie le graphique ci-dessus.

5.4 PIEZOMETRES



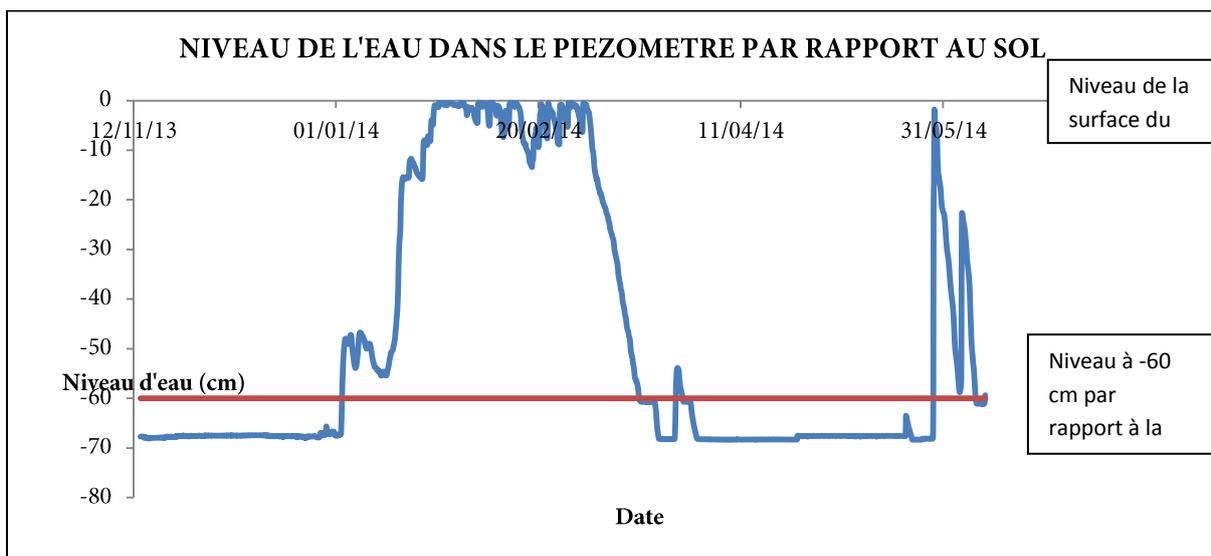
Pour installer ce capteur, nous effectuons un forage d'environ 80 cm de profondeur dans lequel on viendra installer le piézomètre. On utilise de la bentonite (matériau argileux) pour étanchéifier la base du piézomètre et éviter ainsi les écoulements préférentiels. Par la suite, nous venons glisser le capteur PDCR1830 au fond du piézomètre.

Lors de notre étalonnage, nous avons établi une équation (6) à appliquer au capteur de niveau d'eau installé.

TIMESTAMP	Lvl_Water (cm)	Niveau par rapport à la surface (cm)
13/11/2013 16:00	-7,723	-67,723
13/11/2013 18:00	-7,697	-67,697
13/11/2013 20:00	-7,693	-67,693
13/11/2013 22:00	-7,693	-67,693
14/11/2013 00:00	-7,693	-67,693
14/11/2013 02:00	-7,692	-67,692

Tableau 8 : Données des piézomètres

Nous pouvons ainsi obtenir un graphique nous montrant l'évolution du niveau de l'eau dans le sol au cours du temps. La limite inférieure correspondant à une hauteur d'eau de -60 cm en dessous de la surface du sol.



Graphique 5 : Piézomètres sur le site La Morie

5.5 TENEUR EN EAU

Réfléctomètres de teneur en eau CS616

Dans les fichiers de données brutes des capteurs de teneur en eau CS616 on a deux colonnes par capteur, la teneur en eau calculée à l'aide de l'équation (7) et la période du signal.

TIMESTAMP	VW(1)	PA_uS(1)	VW(2)	PA_uS(2)	VW(3)	PA_uS(3)
TS		uSec		uSec		uSec
22/10/2013 12:00	0,26	26,56	0,171	23,44	0,232	25,63
22/10/2013 14:00	0,261	26,6	0,172	23,51	0,233	25,68
22/10/2013 16:00	0,262	26,62	0,173	23,55	0,235	25,72
22/10/2013 18:00	0,264	26,68	0,174	23,56	0,235	25,73
22/10/2013 20:00	0,266	26,75	0,174	23,57	0,236	25,76
22/10/2013 22:00	0,267	26,79	0,175	23,59	0,237	25,78
23/10/2013 00:00	0,268	26,8	0,175	23,6	0,238	25,82
23/10/2013 02:00	0,268	26,8	0,175	23,61	0,236	25,77
23/10/2013 04:00	0,268	26,8	0,176	23,63	0,24	25,89
23/10/2013 06:00	0,267	26,79	0,176	23,64	0,238	25,84
23/10/2013 08:00	0,267	26,77	0,176	23,65	0,239	25,88

Tableau 9 : Données brutes des réflectomètres CS616

Des études ont montrées que les réflectomètres de teneur en eau CS616 sont sensibles à la température. (Rüdiger et al, 2010 ; Western and Siegfried, 2005 ; Benson and Wang, 2006). Nous ne pouvons donc pas utiliser les données brutes telles qu'elles sont enregistrées. En effet il pourrait y avoir un écart important entre les mesures brutes et les valeurs vraies de teneur en eau.

Le réflectomètre de teneur en eau CS616 effectue une mesure brute (période en µsec) puis, la centrale calcule la teneur en eau volumique et stocke ces données dans un fichier. C'est sur la mesure de la période que nous allons effectuer la correction en température.

L'équation de correction en température sur la période du signal est :

$$P_{20} = (P / (1 + 0,002 * (T - 20))) \quad (9)$$

Nous avons ramenée la température à 20°C, P₂₀ étant la période corrigée à cette température.

TIMESTAMP	PA (uS) 10cm		PA (uS) 25cm		T107 (10cm)	T107 (25cm)
	Smp	P ₂₀	Smp	P ₂₀	Smp	Smp
22/10/2013 12:00	26,560	26,624	23,440	23,550	18,790	17,670
22/10/2013 14:00	26,600	26,707	23,510	23,627	17,990	17,520
22/10/2013 16:00	26,620	26,899	23,550	23,823	14,820	14,270
22/10/2013 18:00	26,680	26,958	23,560	23,833	14,850	14,280
22/10/2013 20:00	26,750	27,036	23,570	23,842	14,710	14,290

Tableau 10 : Période corrigée à 20°C

Avec les échantillons de sols prélevés sur le terrain, nous avons pu calculer une teneur en eau pondérale exprimé en $\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$. Grâce aux calculs de densité effectuée sur les différents sites, nous obtenons la densité pour les différentes profondeurs. Nous pourrions ainsi convertir la teneur en eau pondérale en teneur en eau volumique exprimée en $\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$.

Sonde N°	Masse Humide (g)	Masse Sèche (g)	Masse Boîte (g)	W ($\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	Da	θ ($\text{m}^3\cdot\text{m}^{-3}$)
1	160,9	137,4	21,3	0,202	1,24	0,250
2	147,1	126,7	18,5	0,189	1,39	0,262
3	157,8	142,4	20,9	0,127	1,59	0,201
4	157,9	132,6	19,5	0,224	1,17	0,261
5	138,3	120,6	20,9	0,178	1,44	0,256
6	157,3	141,8	19,7	0,127	1,59	0,202
7	176,3	148,3	20,3	0,219	1,16	0,254
8	150,8	131,4	21,6	0,177	1,34	0,237
9	153,7	139,0	20,1	0,124	1,54	0,190
10	155,3	131,5	21,6	0,217	1,19	0,257

Tableau 11 : Conversion de teneur en eau pondérale W en teneur en eau volumique θ

Nous avons réalisé ceci pour chaque prélèvement d'échantillon de sol à chaque sortie sur le terrain. Par la suite nous avons réuni toutes les données en un seul tableau :

	1	2	3	4	5	6
22/10/2013	0,250	0,262	0,201	0,261	0,256	0,202
07/11/2013	0,366	0,355	0,348	0,331	0,395	0,340
16/12/2013	0,348	0,363	0,338	0,328	0,377	0,339
07/01/2014	0,335	0,380	0,354	0,317	0,394	0,355
19/02/2014	0,358	0,411	0,345	0,337	0,427	0,346
27/03/2014	0,319	0,366	0,347	0,301	0,380	0,348
15/04/2014	0,238	0,278	0,289	0,225	0,288	0,290
27/05/2014	0,315	0,339	0,343	0,297	0,352	0,343

Tableau 12 : Synthèse des teneurs en eau volumique déterminés par les prélèvements d'échantillons sur le terrain

Nous mettons en relation la teneur en eau calculé via le prélèvement sur le terrain à la période mesurée par le capteur au même moment.

Nous obtenons une nouvelle équation qui servira à calculer la teneur en eau volumique à partir de notre période corrigée à 20 °C. Nous effectuons cela pour chaque capteur installé sur le site d'expérimentation.

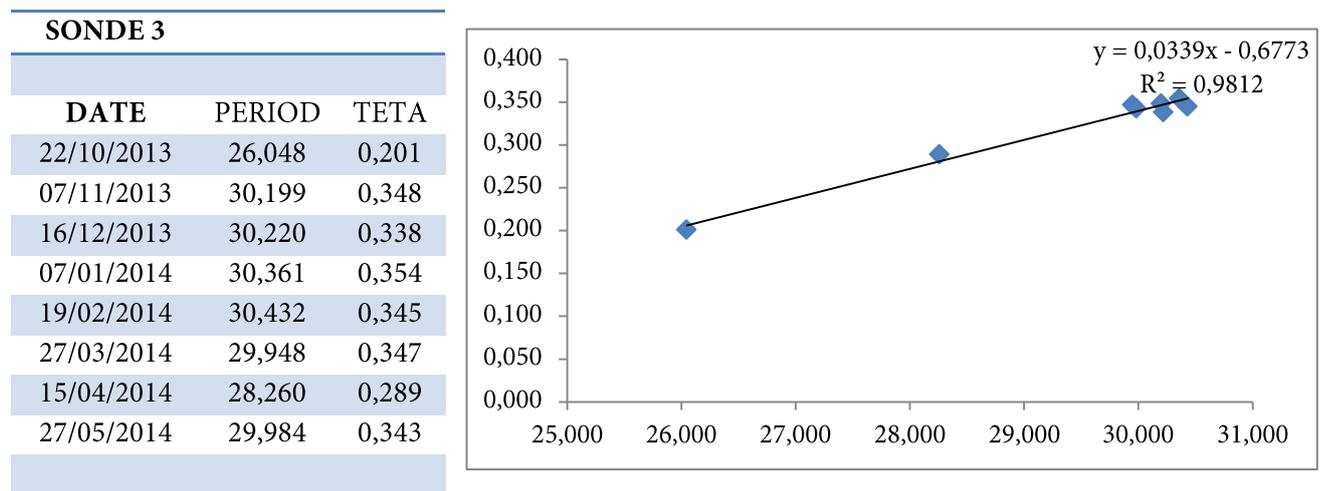


Tableau 13 : Calibrage de la sonde 3 du site Château

Grâce aux prélèvements de sols sur le site expérimental, nous obtenons une équation spécifique pour la sonde 3. L'objectif de ce calibrage est d'améliorer la qualité des mesures de teneur en eau volumique effectuées avec les CS616. Chaque sonde est donc calibrée de cette façon.

TIMESTAMP	1		2		3	
TS	VW		VW		VW	
	P20	10cm_1	P20	25cm_1	P20	35cm_1
22/10/2013 12:00	26,624	0,224	23,550	0,238	25,797	0,197
22/10/2013 14:00	26,707	0,226	23,627	0,239	25,845	0,199
22/10/2013 16:00	26,899	0,232	23,823	0,243	26,037	0,205
22/10/2013 18:00	26,958	0,234	23,833	0,243	26,048	0,206
22/10/2013 20:00	27,036	0,236	23,842	0,243	26,077	0,207
22/10/2013 22:00	27,090	0,238	23,863	0,244	26,097	0,207
23/10/2013 00:00	27,111	0,238	23,875	0,244	26,137	0,209
23/10/2013 02:00	27,126	0,239	23,888	0,244	26,087	0,207
23/10/2013 04:00	27,140	0,239	23,912	0,245	26,208	0,211
23/10/2013 06:00	27,145	0,239	23,927	0,245	26,160	0,210

Tableau 14 : Calibrage des sondes à partir de P₂₀

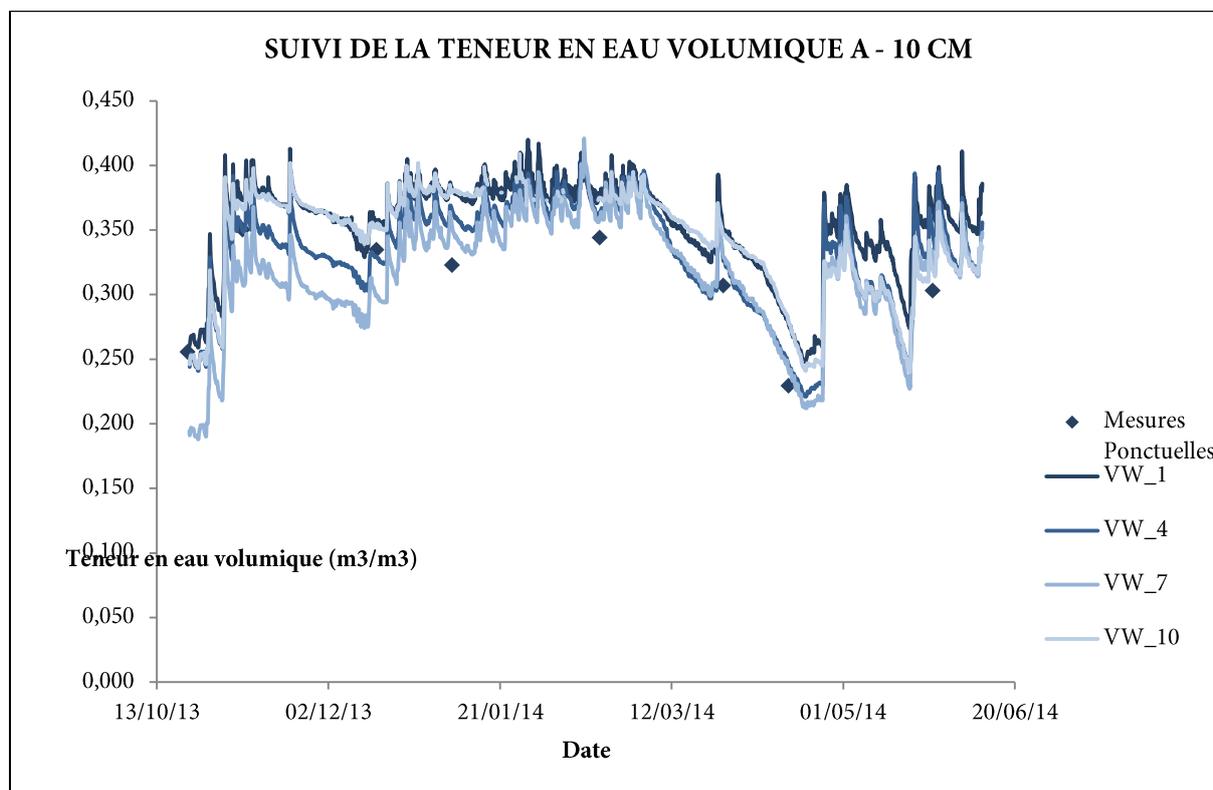
Chaque capteur, pour un site précis et une expérimentation précise a son équation propre :

- Sonde n°1 : $\theta_{\text{corrigé}} = 0,0295 * P20 - 0,5614$
- Sonde n°2 : $\theta_{\text{corrigé}} = 0,0183 * P20 - 0,1929$
- Sonde n°3 : $\theta_{\text{corrigé}} = 0,0339 * P20 - 0,6773$

Observons la différence entre les données avant calibrage et les données après calibrage. Les deux graphiques suivants représentent :

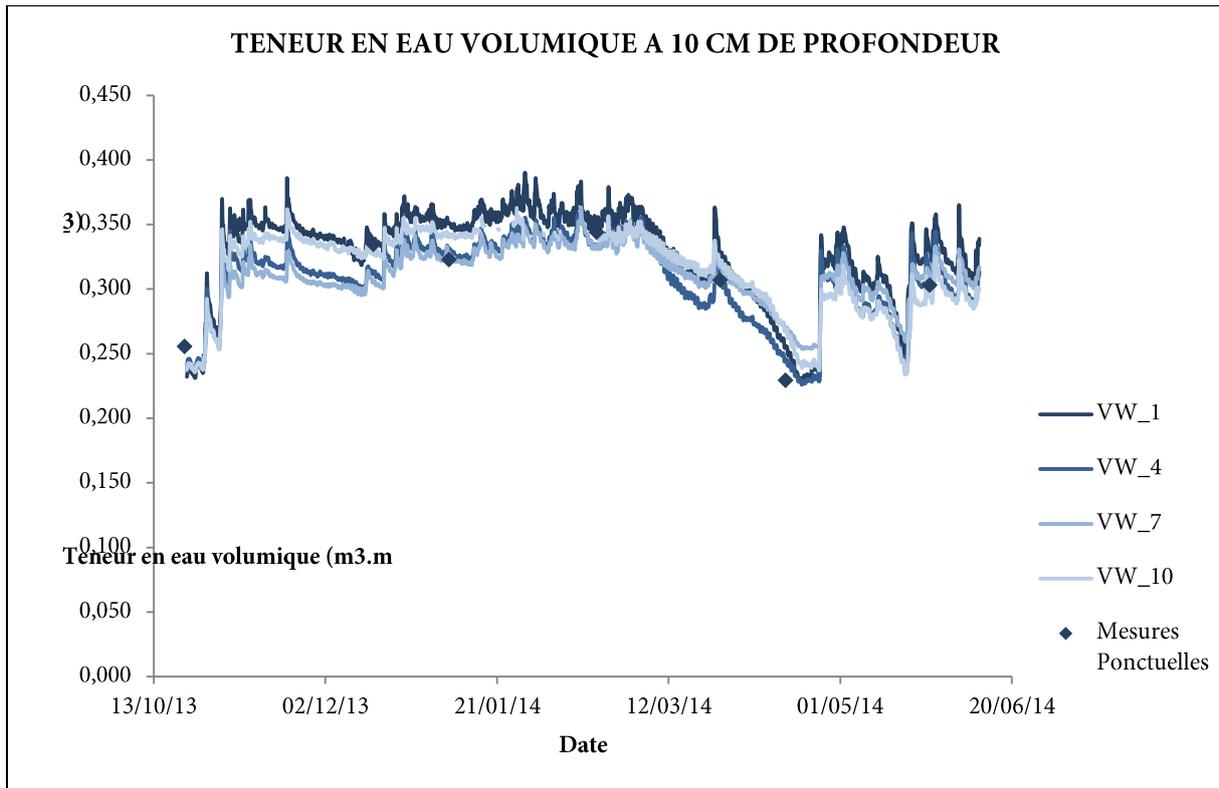
- Graphique 6 : La teneur en eau mesurée directement par le capteur.
- Graphique 7 : La teneur en eau calibrée et calculée avec la période corrigée en température.

Dans le cas des données non-calibrées (graphique 6) on remarque bien que la réponse du capteur n'est pas si proche que cela de la réalité. Grâce à la correction en température et notre calibrage du capteur, on peut obtenir le graphique 7 qui, lui, est plus représentatif de la réalité. Les mesures ponctuelles représentent la moyenne des 4 mesures de teneur en eau pondéral. Ces moyennes sont symbolisées sur le graphique par des losanges.

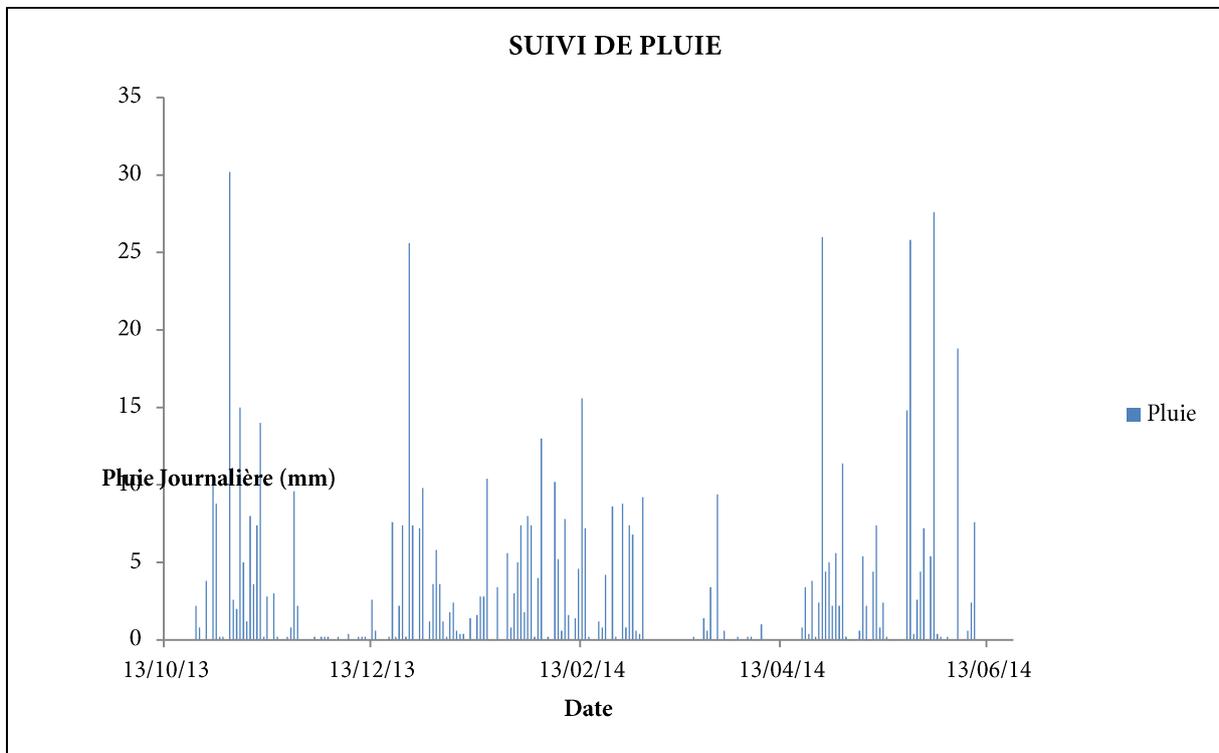


Graphique 6 : Teneur en eau non-calibrée – site Château

Avec le graphique de la pluviométrie (graphique 8) on peut remarquer que la teneur en eau remonte lors d'une et diminue s'il n'a pas pluie pendant un certain temps. C'est les premières profondeurs qui réagisse le plus rapidement puis les dernières.

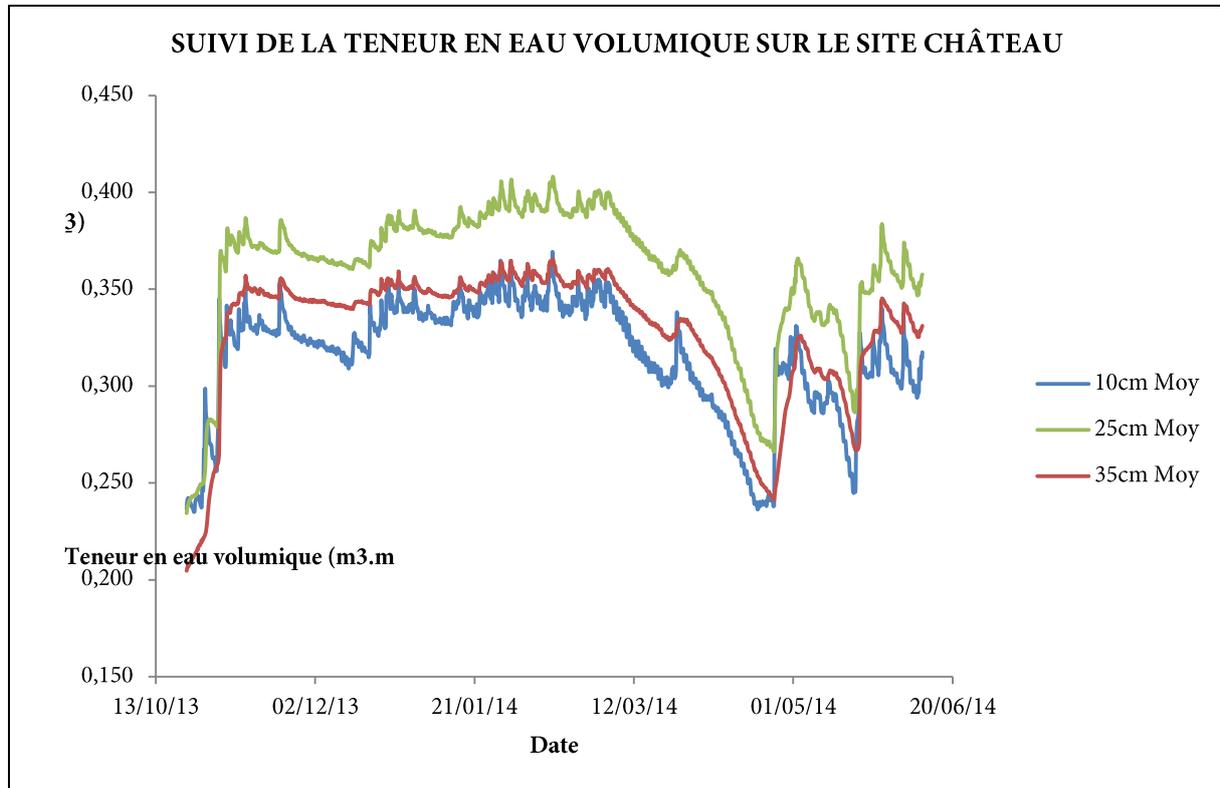


Graphique 7 : Teneur en eau calibré – site Château



Graphique 8 : Pluviométrie sur le site de Château

Nous avons réalisé une moyenne des valeurs sur la même profondeur afin d'obtenir une seule courbe représentative de la profondeur et à la fin nous pouvons réaliser un graphique de synthèse (graphique 9). On observe d'ailleurs sur ce graphique des variations de température assez rapides sur la profondeur 10 cm. Plus on descend en profondeur dans le sol et moins on a de grandes variations de températures.



Graphique 9 : Synthèse de la teneur en eau sur le site Château

Conclusion :

Le traitement des données ne pourra être finalisé qu'au démontage des sites expérimentaux (moisson).

En effet, ils nous manquent encore des points secs pour couvrir le domaine des teneurs en eau et effectuer un calibrage complet des sondes CS616.

Sans ces valeurs, nos équations ne couvrent pas toute la gamme de mesures. On peut notamment constater que la teneur en eau à -25cm semble surestimé : ceci est probablement dû à une mesure de densité localement très élevé lors de l'installation du site expérimental. Il y a un offset à corriger dû à la densité initiale mesurée.

C'est au cours du démontage des sites expérimentaux, début juillet, que je pourrai réellement finaliser le traitement et l'exploitation des données.

6 ETUDE DE L'INFLUENCE DE LA TEMPERATURE SUR LES REFLECTOMETRE CS560

J'ai étudié l'influence de la température sur les sondes CS650 à partir d'expérimentation en enceinte climatique. L'objectif de cette étude est d'établir une équation permettant de compenser les effets de la température sur les sondes.

6.1 PREPARATION DE L'EXPERIMENTATION

Pour réaliser une étude de mesures sur les sondes CS650, nous devons implanter ces capteurs dans une colonne de sol adaptée à la géométrie de l'espace d'étude de ces sondes. Ainsi, nous avons utilisé des colonnes de 14 cm de diamètre et de 35 cm de hauteur.

Ces colonnes sont remplies de sol échantillonné sur le site atelier OS². Nous avons dû le faire sécher à 105°C pendant 48h afin d'avoir une masse d'eau nulle puis nous avons broyé et tamiser ce sol à 5mm.

Souhaitant cibler des valeurs de densité apparente et de teneur en eau pour nos colonnes de sols, nous avons calculé, via le tableau ci-dessous, la masse de sol sec et la masse d'eau à ajouter à chaque colonne pour respecter nos critères.

Il est nécessaire d'ajouter 100g à notre préparation que nous disposerons par la suite dans une petite boîte de métal et que nous ferons sécher à 105°C afin de vérifier l'exactitude de la teneur en eau.

	Colonne N°1	Colonne N°2	Colonne N°3
Volume du cylindre (cm ³)	4862,5	4862,5	4862,5
Masse de terre à ajouter pour contrôle (g)	100	100	100
Densité du sol (g.cm ⁻³)	2,65	2,65	2,65
Masse volumique recherchée	1,3	1,3	1,3
Teneur en eau recherché	0,20	0,30	0,50
Masse : Sol Sec (g)	6321,25	6321,25	6321,25
Masse : Eau (g)	1264,25	1896,38	3160,63
Masse : Sol Humide à mettre dans la colonne	7585,50	8217,63	9481,88
Masse : Sol Sec à préparer (g) (ajout de 100g)	6421,25	6421,25	6421,25
Masse : Eau à ajouter (g)	1284,25	1926,38	3210,63

Tableau 16 : Calculs pour la préparation de colonnes de sols

Pour préparer le sol, nous devons déposer la masse exacte de sol sec dans une barquette et ajouter la quantité d'eau nécessaire avec un brumisateuse. Il faudra toujours homogénéiser le sol avec une spatule et une fourchette.

Si après vérification de la masse, celle-ci s'avère être fautive, c'est qu'il y a eu une légère perte d'eau par évaporation. Il faut alors compléter le volume d'eau jusqu'à obtenir la masse totale calculée.

Une fois le sol préparé, il faut alors le disposer dans une colonne à l'aide d'une presse manuelle.

Une fois ces colonnes préparées, nous y installons les réflectomètres de teneur en eau CS650 et nous les plaçons à l'intérieur de l'enceinte climatique.

Comme nous avons bloqué l'évaporation de l'eau avec un film recouvrant la colonne et bloqué le drainage, la teneur en eau est maintenue constante.

Seul le paramètre de la température changera au cours de cette expérimentation. Nous avons réalisé plusieurs paliers de températures (d'environ 24h) afin de pouvoir étudier si les sondes y sont sensibles.

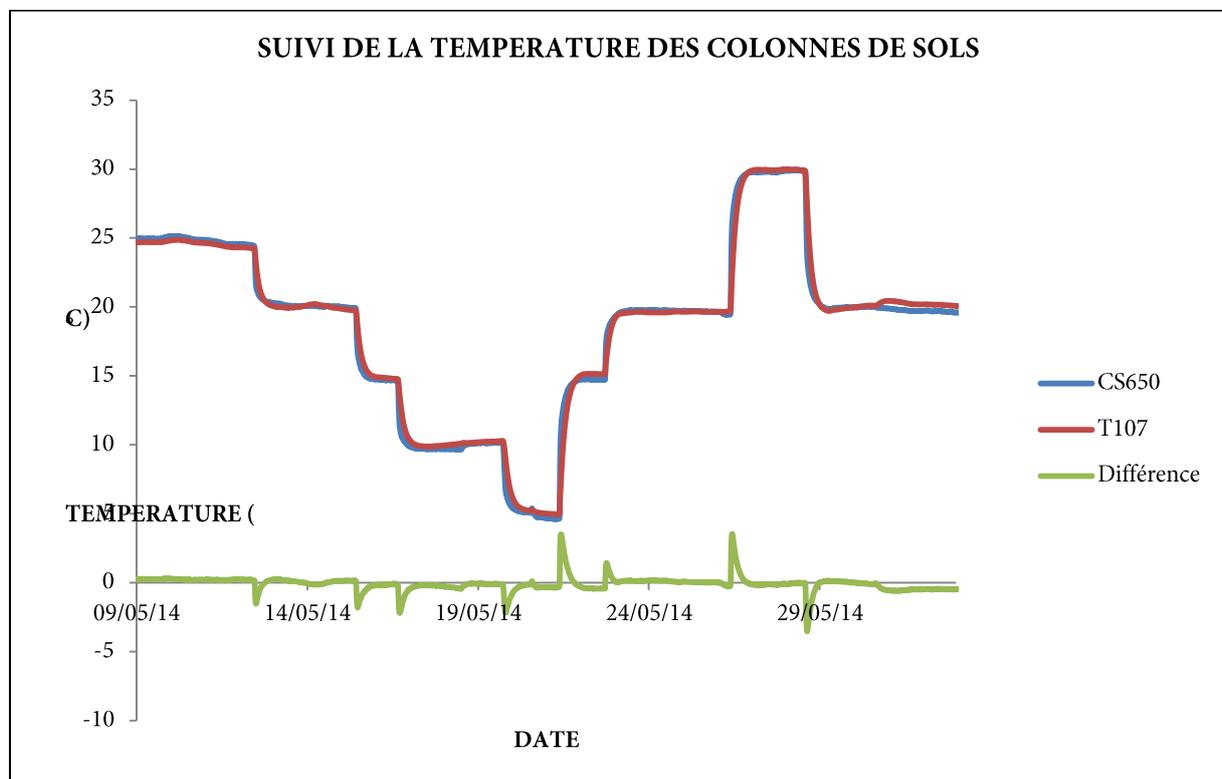
6.2 EXPLOITATIONS DES RESULTATS

Une fois l'expérimentation finie, nous avons récupéré les données de la centrale d'acquisition CR1000 et nous avons établi différents graphiques.

6.2.1 ETUDE DE PERFORMANCE DE LA THERMISTANCE INTEGRE A LA SONDE CS650

Etant donné que seule la température varie au cours de cette expérimentation, nous pourrons étudier les performances des sondes de température T107 ainsi que la thermistance de la sonde CS650.

On peut dire que les sondes CS650 et T107 ont des mesures de température proches. L'erreur de fidélité est négligeable pour les deux capteurs ; lorsque que l'on se trouve sur un palier de température, la température reste effectivement constante. Seule une différence d'erreur de justesse entre les deux capteurs est observable.



Graphique 10 : Suivi de la température des colonnes de sols

La différence de la réponse de la thermistance de la sonde CS560 par la sonde T10, est maximale lors des rapides changements de température, ce qui pourrait laisser croire que la sonde de température CS650 a une réponse plus rapide que la sonde T107.

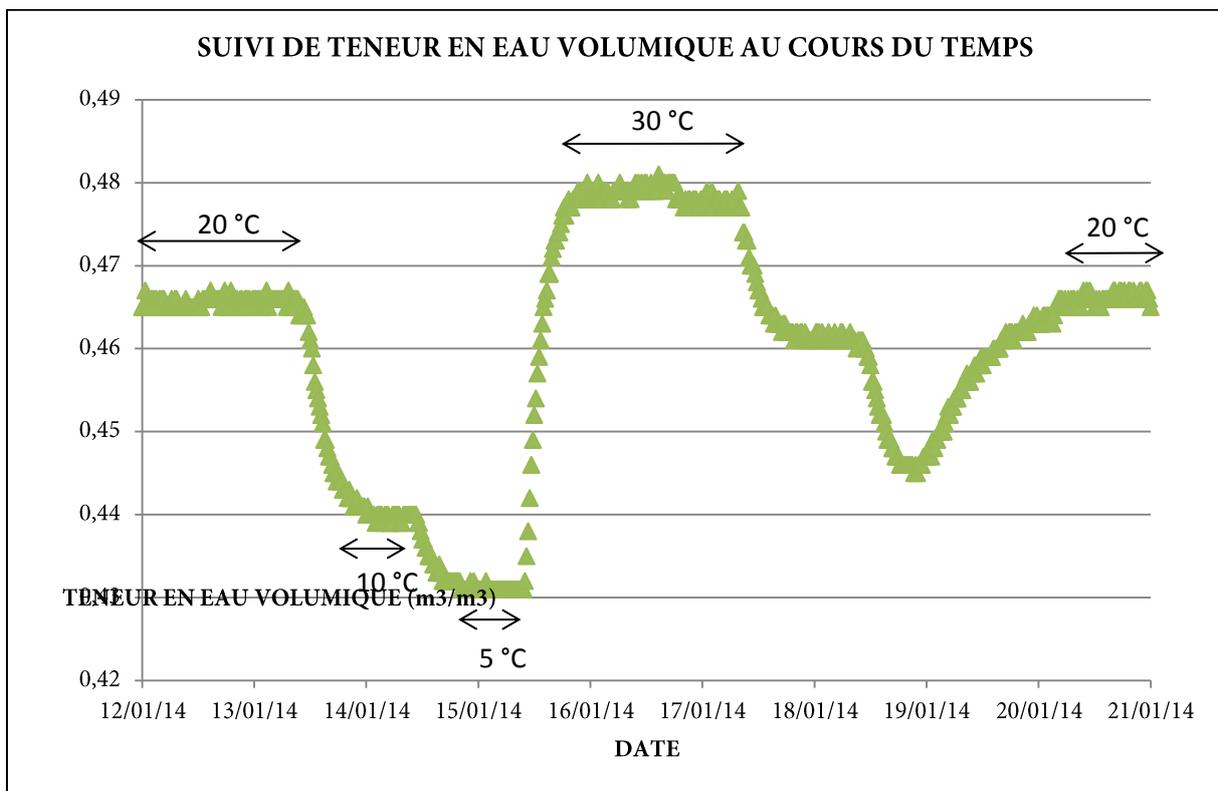
Dans cette expérimentation, étant donné que la sonde T107 est enfoncée dans le sol, alors que la thermistance de la sonde CS650 est en contact avec le sol on ne peut pas dire si l'une ou l'autre est plus rapide. Il faudrait réaliser une nouvelle expérience avec les sondes complètement enterrées comme sur le terrain pour comparer la rapidité des réponses des capteurs.

En régime stationnaire, l'écart étant inférieur à 0,2 °C, on estime que cela est convenable.

6.2.2 ETUDE DE PERFORMANCE DES MESURES DE TENEUR EN EAU PAR LA SONDE CS560

Lors de cette expérimentation, la sonde 1 est une sonde CS655 et les sondes 2,3 et 4 sont des sondes CS650. La différence qui existe entre ces deux sondes est que la CS655 est plus petite que la CS650.

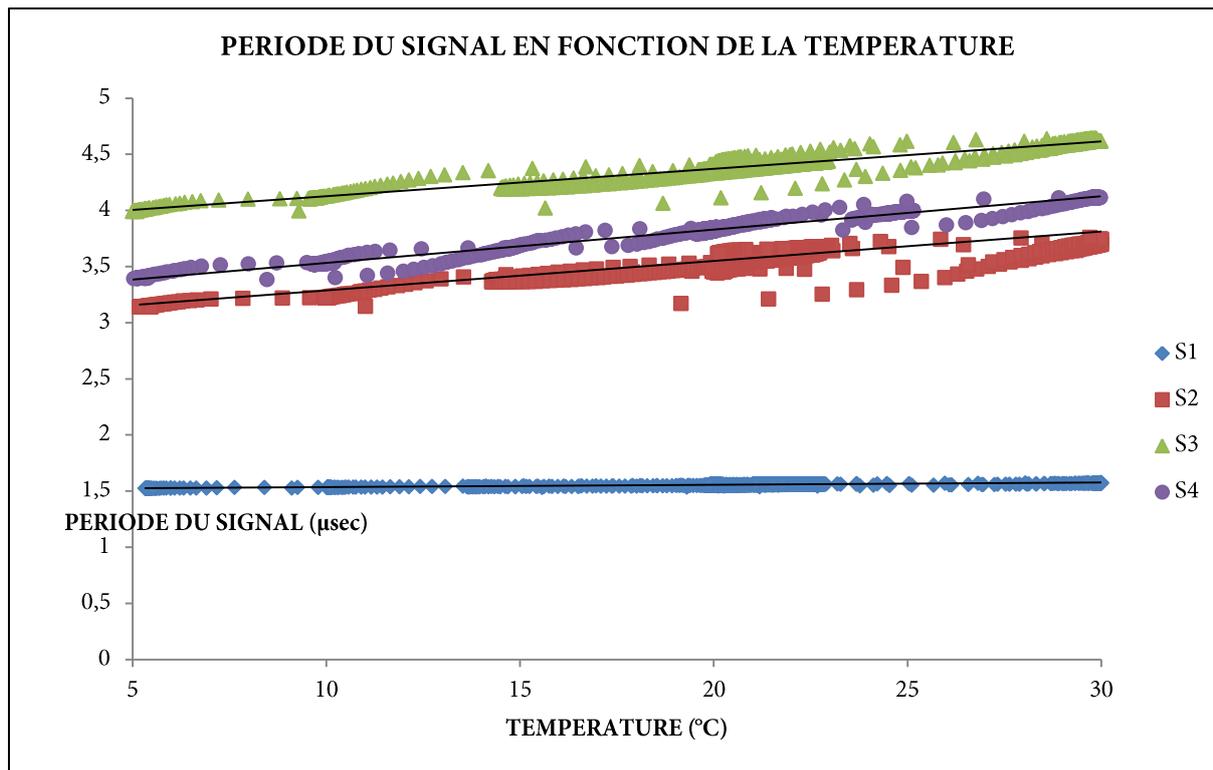
Tous les paramètres, excepté la température, sont maintenu bloqués lors de l'expérimentation. Etant donné que la teneur en eau volumique varie au cours du temps, on n'en conclut que la température a un effet sur ces sondes. Notre colonne était hermétiquement bien fermé car lorsque l'on effectue à nouveau un palier à 20°C à la fin de notre expérimentation, on retrouve bien la même teneur en eau volumique initiale d'environ 0,465.



Graphique 14 : Exemple de la colonne 3 : suivi de la teneur en eau volumique au cours du temps

Sur les graphiques suivant, on remarque que la sonde CS655 n'a, elle, pas l'air sensible à la température. Cependant elle se situe sur le taux d'humidité le plus bas et il faudrait vérifier si cela se confirme avec une teneur en eau plus importante.

La sonde effectue une mesure de période (en μsec) et la converti en permittivité. Le constructeur ne nous informe pas comment il effectue cette conversion, il me faudra lui demander pour le savoir.

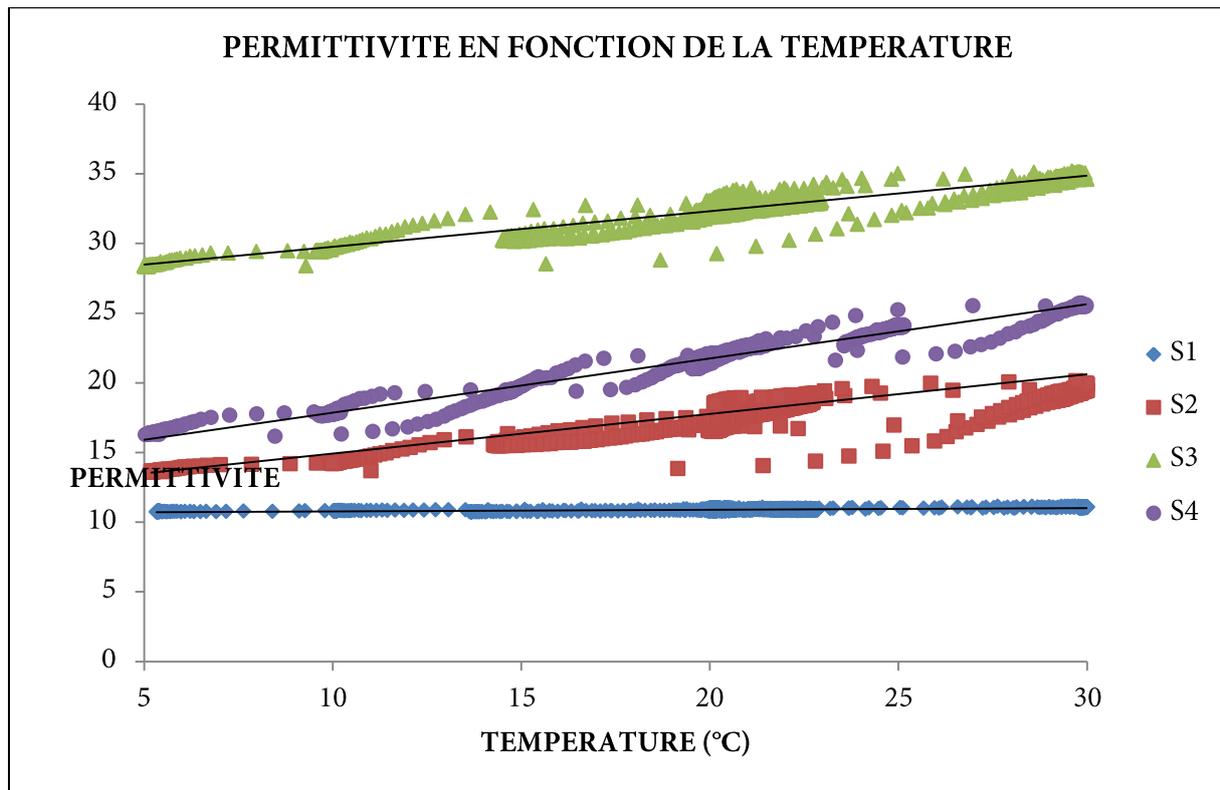


Graphique 11: Période du signal en fonction de la température

Sur le graphique 11 :

- S1 : Sonde 1 : $P = 0,002 \cdot T + 1,515$ ($R^2=0,854$)
- S2 : Sonde 2 : $P = 0,026 \cdot T + 3,026$ ($R^2=0,728$)
- S3 : Sonde 3 : $P = 0,024 \cdot T + 3,881$ ($R^2=0,934$)
- S4 : Sonde 4 : $P = 0,030 \cdot T + 3,237$ ($R^2=0,987$)

On remarque qu'il existe un phénomène important d'hystérésis. Pour une même température il existe (au maximum) une différence de $0,44 \mu\text{sec}$. Les équations de courbe de tendance (pour les sondes CS650) semblent indiquer un même coefficient directeur et ne semble pas évoluer en fonction de la valeur de teneur en eau initial. Seul l'offset de cette équation est directement touché par la teneur en eau initiale.



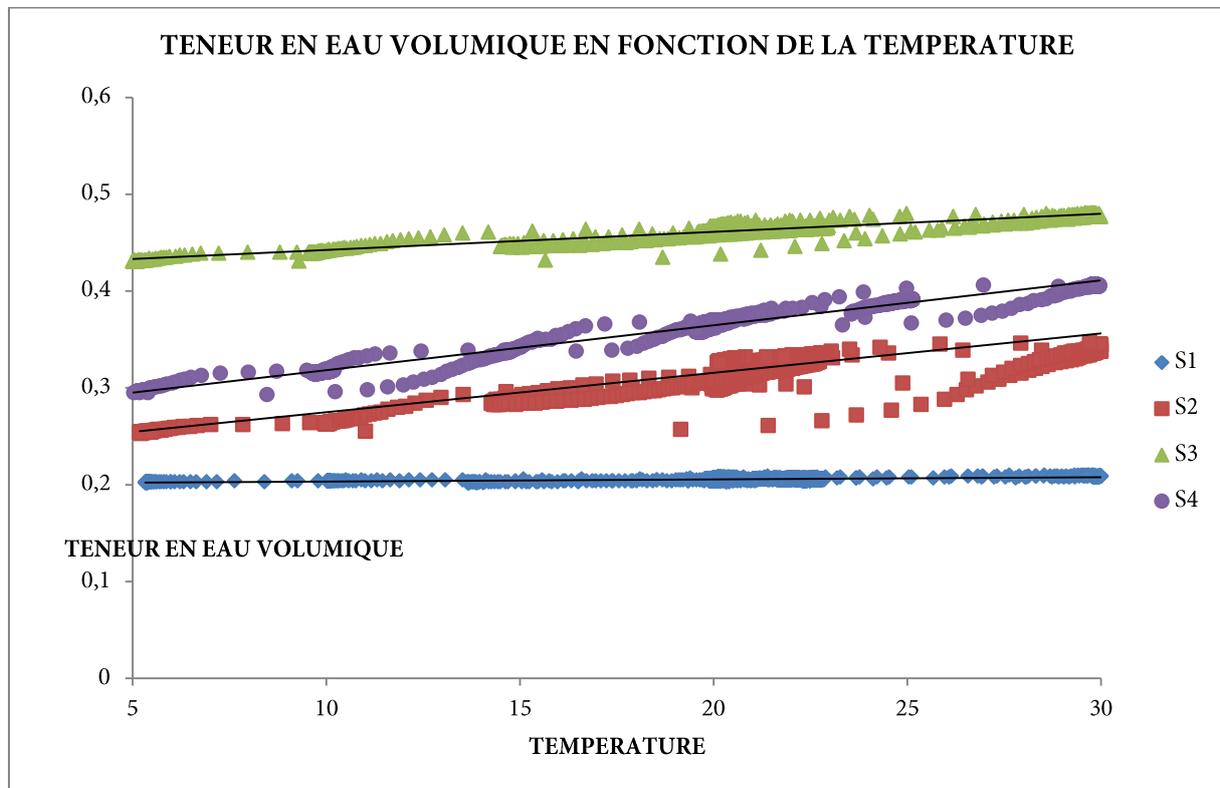
Graphique 12 : Permittivité en fonction de la température

Sur le graphique 12 :

- S1 : Sonde 1 : Permittivité = $0,012 \cdot T + 10,653$ ($R^2=0,497$)
- S2 : Sonde 2 : Permittivité = $0,285 \cdot T + 12,087$ ($R^2=0,690$)
- S3 : Sonde 3 : Permittivité = $0,255 \cdot T + 27,203$ ($R^2=0,906$)
- S4 : Sonde 4 : Permittivité = $0,389 \cdot T + 13,975$ ($R^2=0,978$)

Lors de la conversion de la période en permittivité on remarque que le phénomène d'hystérésis est toujours présent. Nous observons une différence maximale 4.81 de permittivité entre 20 et 25°C

Par la suite, le capteur utilise finalement l'équation de Topp (Topp et al 1980) pour estimer la teneur en eau volumique à partir de cette permittivité.



Graphique 13 : Teneur en eau en fonction de la permittivité

Sur le graphique 13 :

- S1 : Sonde 1 : $P = 0,0019 \cdot T + 0,4239$ ($R^2=0,9049$)
- S2 : Sonde 2 : $P = 0,0046 \cdot T + 0,2719$ ($R^2=0,9797$)
- S3 : Sonde 3 : $P = 0,0041 \cdot T + 0,2343$ ($R^2=0,7001$)
- S4 : Sonde 4 : $P = 0,0002 \cdot T + 0,2008$ ($R^2=0,4793$)

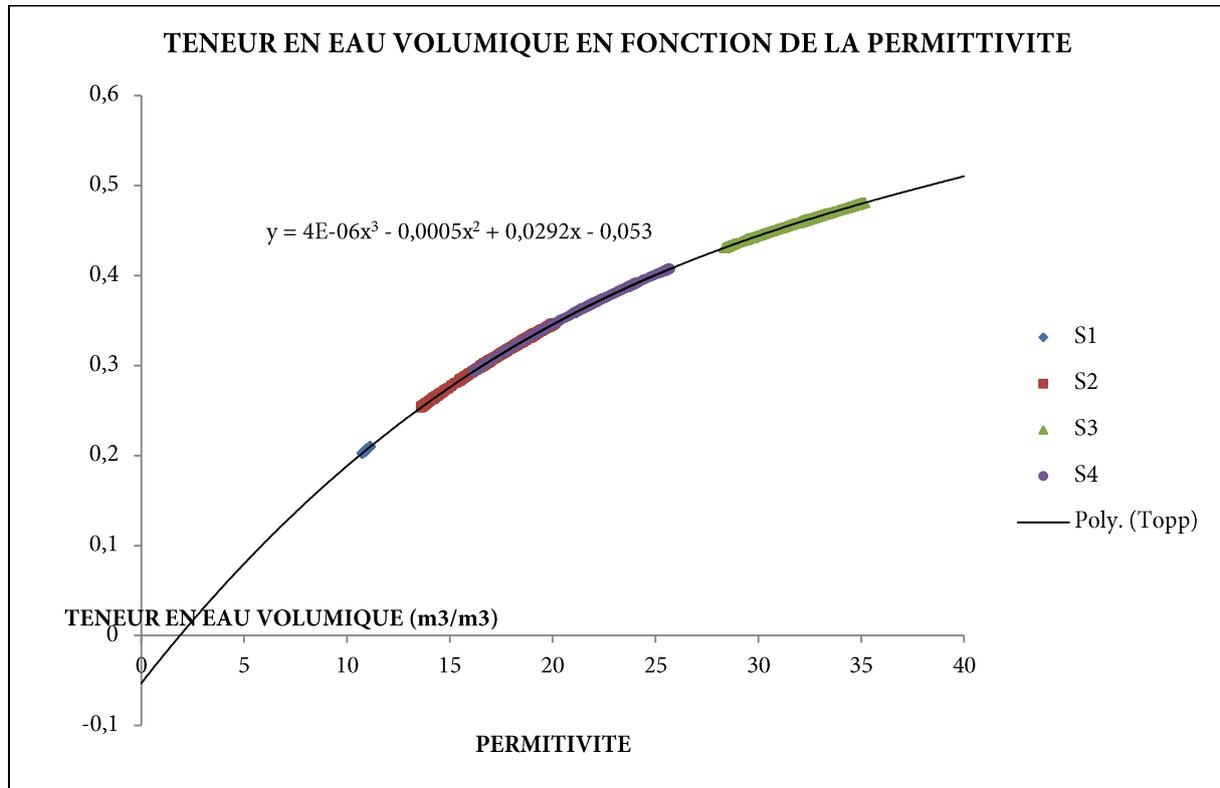
A 23°C on observe deux valeurs de teneur en eau : 0,266 et 0,335 ce qui représente une différence non négligeable.

Pour la sonde 2 on observe

- à 5°C une teneur en eau de 0,254 m³/m³
- A 30°C une teneur en eau de 0,345 m³/m³

Ceci nous montre l'importance de devoir corriger les mesures effectuées par les CS650, les données brutes ne seraient pas exploitables directement.

Sur le graphique 14 on peut observer que les 4 courbes respectent une même équation : l'équation de Topp : $\Theta \text{ (m}^3\text{/m}^3\text{)} = 4.3 \times 10^{-6} \cdot \epsilon^3 - 5.5 \times 10^{-4} \cdot \epsilon^2 + 2.92 \times 10^{-2} \cdot \epsilon - 5.3 \times 10^{-2}$.



Graphique 14 : Teneur en eau en fonction de la permittivité

Conclusion :

L'étude de la performance des sondes CS650 en étant à ce point, je dois poursuivre les expérimentations avant de pouvoir conclure sur leur efficacité.

Cependant je peux déjà dire que la thermistance de la sonde CS650 est fiable, elle présente un comportement similaire à la sonde T107.

On peut aussi observer que les sondes CS650 sont effectivement sensibles à la température ; alors que l'on a bloqué l'évaporation et le drainage de l'eau dans le sol, la teneur en eau évolue en fonction de la température.

On peut observer jusqu'à une différence de 0,091, soit 9,1% de teneur en eau. Ceci n'est pas négligeable d'où l'intérêt d'établir une équation de correction de température.

Les mois de Juillet et d'Aout me permettrons de quantifier cet effet et ainsi d'établir l'équation de correction en température.

Conclusion générale :

Mon apprentissage m'a permis de découvrir le monde de la recherche à l'INRA.

J'ai été amené à travailler en équipe lors des sorties sur le terrain ou lors d'expérimentations, et seul, dans le laboratoire pour étalonner et vérifier les différents appareils de mesures.

Le travail que j'ai effectué dans le cadre de mes missions m'a aidé à porter un regard critique sur les différents appareils de mesures existants et à comprendre la nécessité de les étalonner avant leur utilisation.

J'ai appris à utiliser les centrales d'acquisitions CR1000, à créer des programmes en Basic, à collecter les données environnementales et à les traiter en vue de leur interprétation.

J'ai découvert des capteurs de différentes technologies, j'ai dû m'adapter à chacune pour comprendre le fonctionnement des capteurs et établir un processus d'étalonnage propre à chaque capteur.

Mon travail à l'URSOLS m'a également permis de mieux connaître le fonctionnement des sols et leur rôle dans le fonctionnement des écosystèmes.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Sources internet :

http://www.inra.fr	Site de l'INRA
http://www6.val-de-loire.inra.fr/ur-sols	Site de l'unité UR SOLS
http://www.n-escapade.fr	Site du projet ANR ESCAPADE
https://www.campbellsci.fr	Site de constructeur de centrales d'acquisitions et de capteurs
http://www.ums-muc.de	Site de constructeur de capteurs

Sources bibliographiques :

« Sols et environnement -deuxième édition-» de M.-C. Girard, C. Walter, J.-C. Rémy, J. Berthelin et J.-L. Morel

« Le Cahier des Techniques de l'INRA 2012(77) n°3 » Méthode d'étalonnage des réflectomètres de teneur en CS616 pour la mesure et le suivi de l'humidité du sol sur le site atelier OS² de G.Giot et I. Cousin

« Campbell Scientific Inc (2011) CS616 & CS625 Water Content Reflectometer User Guide »

Topp GC, Davis JL, Amman AP (1980) Electromagnetic determination of soil water content: measurement in coaxial transmission lines. Water Resour Res 16:574-582.