



HAL
open science

Mise en place d'une chaîne d'acquisition de la température et de l'humidité du sol

Ludovic Moulin

► **To cite this version:**

Ludovic Moulin. Mise en place d'une chaîne d'acquisition de la température et de l'humidité du sol. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2019. hal-03136402

HAL Id: hal-03136402

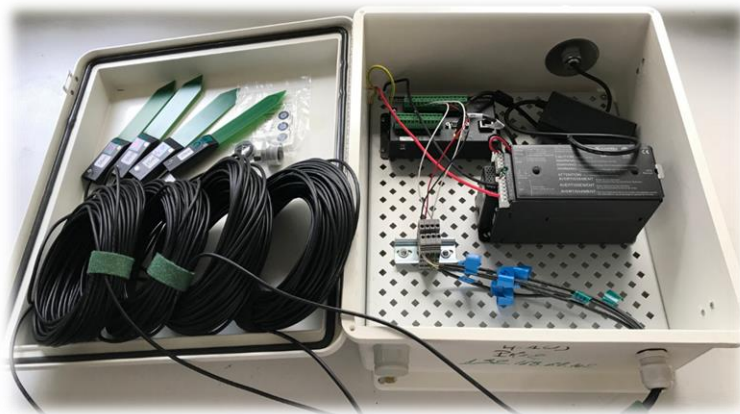
<https://hal.inrae.fr/hal-03136402>

Submitted on 9 Feb 2021

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.

Mise en place d'une chaîne d'acquisition de la température et de l'humidité du sol



Remerciement

Tout d'abord, je tiens à remercier toutes les personnes ayant contribué au bon déroulement de mon stage et à l'avancement du projet qui m'a été confié lors de ce stage.

Je tiens principalement à remercier les deux agents de l'équipe instrumentation, Robert FALCIMAGNE et David COLOSSE pour, leur disponibilité, tous les conseils pratiques et théoriques qu'ils m'ont donnés ainsi que leur expérience qui a été d'une très grande importance dans la réalisation de mon stage.

Je suis également reconnaissant envers Frédérique LOUAULT, responsable du site de Theix, qui a été très présente au cours du développement du projet, mais aussi Julien VIGIGNOL alternant en BTS CIRA au lycée Lafayette, pour l'aide et les conseils qu'il m'a apporté.

Je tiens à remercier l'Institut National de Recherches Agronomique (INRA) et plus particulièrement l'Unité mixte de Recherche sur l'Ecosystème Prairial (UREP), pour m'avoir accueilli durant ces dix semaines de stages. Sans oublier l'ensemble des personnels techniques et scientifiques de l'UREP et des autres unités avec qui j'ai pu travailler et qui m'ont rapidement intégré au sein de l'Institut.

Sommaire

Introduction	1
1 Présentation de l'INRA.....	2
1.1 L'Institut National de Recherche Agronomique	2
1.2 Le site de Crouël et l'Unité mixte de Recherche sur l'Ecosystème Prairial (UREP)..	4
1.3 L'équipe « Instrumentation »	6
2 Ma mission au sein de l'UREP	7
2.1 Dispositif actuel.....	7
2.1.1 Principe de mesure de la sonde ECHO 10	8
2.2 Nouveau dispositif.....	11
2.2.1 Centrale CR310 Campbell Scientific	11
2.2.2 Sonde SMT100 Truebner	12
2.2.3 Principe de mesure d'une sonde SMT100.....	14
2.2.4 Logiciel LoggerNet Campbell Scientific	15
2.2.5 Installation du dispositif	16
3 Mise en place du projet.....	18
3.1 Inventaire des sondes.....	18
3.2 Adressage des sondes	18
3.3 Programmation des centrales d'acquisition	20
3.3.1 Déclaration des variables	20
3.3.2 Définition de la table de données	21
3.3.3 Programme principal	22
3.4 Confection des coffrets	23
3.5 Création du réseau wifi.....	24
4 Etalonnage.....	26
4.1 Etalonnage en température	26
4.1.1 Courbe d'étalonnage	27
4.1.2 Incertitudes de mesures	27
4.2 Vérification et comparaison de fonctionnement en humidité.....	29
Conclusion.....	30

Introduction

Etant en deuxième année de Diplôme Universitaire de Technologie Mesures Physiques (DUT MP option Instrumentation), à l'Institut Universitaire de Technologie (IUT) de Clermont-Ferrand, j'ai postulé à l'Institut National de Recherches Agronomique (INRA), dans le but de réaliser mon stage de fin d'étude. Après un entretien individuel et un choix de l'Institut entre plusieurs candidats, j'ai eu le plaisir d'apprendre que j'étais sélectionné et intégré au sein de l'Unité mixte de Recherche sur l'Ecosystème Prairial (UREP).

L'INRA effectue des recherches dans divers domaines touchant aux secteurs de l'agriculture, de l'alimentation et de l'environnement. Une de ses unités, l'Unité mixte de Recherches sur l'Ecosystème Prairial (UREP) effectue des recherches spécialisées sur la prairie permanente dans un contexte de changement climatique.

De nos jours, les chaînes d'acquisition sont de plus en plus utilisées dans le monde professionnel afin de réaliser toute sorte de mesures et en particulier à l'INRA dans le cadre des recherches. Une chaîne d'acquisition est un système électronique, composé d'une centrale d'acquisition, d'un conditionneur, d'un ou plusieurs capteurs, permettant de mesurer une ou plusieurs grandeurs physiques et d'une unité de visualisation. Les chaînes d'acquisition ne cessent d'évoluer et de se perfectionner. Ces dernières agissent de la réalisation de la mesure jusqu'à la visualisation des résultats par l'expérimentateur, en transmettant les données (numériques ou analogiques) liées à la mesure.

Ce rapport scientifique se décompose en quatre parties principales. Premièrement, une présentation globale de l'INRA et de l'UREP sera réalisée. Dans un second temps, ma mission au sein de l'Unité sera détaillée. Ensuite la mise en place du projet sera développée et, pour finir, toute la partie portant sur l'étalonnage et la vérification du fonctionnement des capteurs sera abordée.

1 Présentation de l'INRA

Dans cette partie, une présentation générale de l'INRA est réalisée, accompagnée de plus de précision sur l'UREP, l'unité de l'INRA qui m'a accueilli durant mon stage.

1.1 L'Institut National de Recherche Agronomique

L'Institut National de Recherche Agronomique (INRA) est un organisme public dont le siège se trouve à Paris. Avec un total de 13 000 collaborateurs, c'est le premier institut de recherche agronomique d'Europe et le deuxième en termes de sciences agricoles dans le monde.



Figure 1 : Logo INRA

Il a été créé en 1946, afin de trouver une solution aux famines présentes en France à la sortie de la guerre. Il est composé de dix-sept centres régionaux répartis sur le territoire français et chaque centre est lui-même divisé en unités de recherche et d'expérimentation. [1]

Un organisme national de recherche scientifique publique, sous la double tutelle des ministères en charge de la Recherche et de l'Agriculture.



(chiffres 2015)

Figure 2 : Les missions de l'INRA [2]

Aujourd'hui, l'INRA s'inscrit dans un mouvement orienté sur les moyens de nutrition de l'Homme dans un souci de respect de l'environnement et sur les bases du développement durable.

Ses missions sont donc variées et ont tout autant pour objectif la recherche et les avancées scientifiques, que la transmission des connaissances et la prévention auprès des populations.

En ce qui concerne le centre Auvergne-Rhône Alpes (ARA), il compte plus de 1000 agents (titulaires et contractuels) répartis sur 32 unités (de recherche, expérimentales ou d'appui) ce qui représente 10% du potentiel total de l'INRA. [3]

Au niveau de l'Auvergne, il existe actuellement huit sites dont le principal est celui de Theix qui constitue le centre névralgique pour la région (figure 3).

Pour ma part, j'ai été accueilli sur le site de Crouël au sein duquel se trouve plusieurs unités dont l'Unité mixte de Recherche sur l'Ecosystème Prairial UREP.

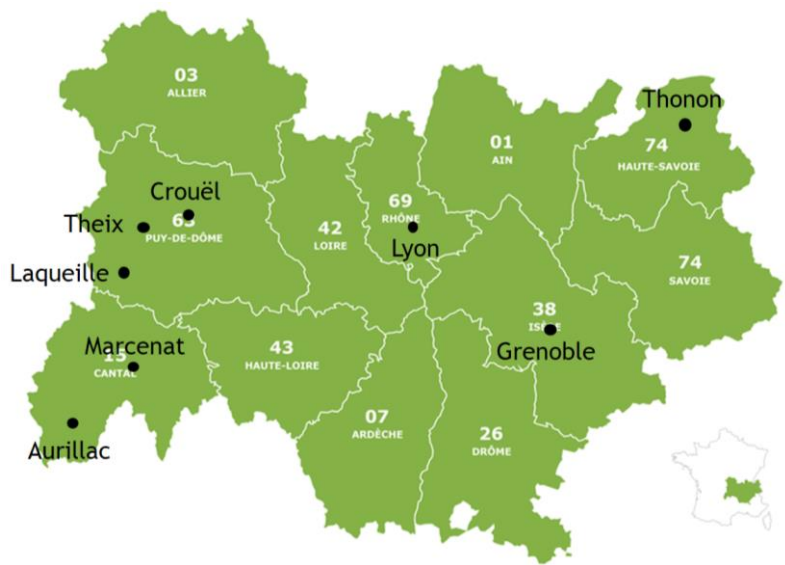


Figure 3 : l'implantation géographique de l'INRA en Auvergne - Rhône-Alpes

1.2 Le site de Crouël et l'Unité mixte de Recherche sur l'Ecosystème Prairial (UREP)

Le site de Crouël regroupe trois unités mixtes de recherche et une unité expérimentale :

- L'Unité mixte de Recherche sur l'Ecosystème Prairial (UREP)
- L'unité mixte de recherche Physique et physiologique Intégratives de l'Arbre en environnement Fluctuant (PIAF)
- L'unité mixte de recherche Génétique Diversité Ecophysiologie des Céréales (GDEC)
- L'unité expérimentale PHénotypage Au Champ des Céréales (PHACC)

Une unité mixte est composée d'une unité de l'INRA et d'un partenaire extérieur. Dans le cas de l'UREP, le partenariat est organisé avec VetAgro Sup Clermont, un institut d'enseignement supérieur et de recherche en agronomie.



Figure 4 : le site de Crouël ; en jaune, les bâtiments de l'UREP



Figure 5 : logo de VetAgro Sup



Figure 6 : logo de l'UREP

L'UREP, unité d'un effectif de 25 agents permanents et de 9 agents non titulaires, porte un Système d'Observation et d'Expérimentation pour la Recherche en Environnement (SOERE). Ce dernier comporte deux sites distincts, Laqueuille (Alt. 1040m) et Theix (Alt. 890m).

L'unité concentre ses recherches sur l'écosystème prairial, plus précisément sur l'impact du changement climatique sur cet écosystème et sa contribution dans les bilans de Gaz à Effet de Serre (GES).

De nombreuses expérimentations sont mises en place par plusieurs équipes afin d'étudier différentes espèces végétales (graminées, légumineuses, ...) et leur développement dans des conditions variées et contrôlées (sécheresse, présence d'animaux, chaulage, modification de la concentration de certains gaz ...) ainsi que les interactions avec les GES rencontrés en agriculture (CO_2 , H_2O , N_2O , CH_4). Le sol des prairies permanentes est également étudié notamment pour les échanges gazeux présents entre le sol et l'atmosphère. [4]

L'ensemble de ces différentes études requiert l'installation de dispositifs expérimentaux la plupart du temps uniques nécessitant un recours à des techniques d'instrumentation et de maintenance.

La majorité des chaînes d'acquisition mises en place sont maintenant automatisées (automates industriels, centrales d'acquisition (figure 5) ce qui peut permettre une prise de contrôle à distance.



Figure 5 : centrale d'acquisition de données fréquemment utilisée dans l'unité, modèle CR6

1.3 L'équipe « Instrumentation »

J'ai effectué mon stage au sein de l'équipe « Instrumentation ». Cette équipe est composée de deux agents titulaires : Robert FALCIMAGNE, ingénieur d'étude et David COLOSSE, technicien de recherche, mes deux maîtres de stage et d'un apprenti en BTS CIRA, Julien VIGIGNOL. L'équipe est ponctuellement renforcée par des agents recrutés en CDD sur des contrats de recherche, en cas de surcharge de travail.

Cette équipe, rattachée à l'UREP, est chargée de la conception, du suivi et de la maintenance des installations expérimentales (serres, cellules climatisées, ...) et de l'ensemble des dispositifs expérimentaux automatisés utilisés par les agents de l'unité.

Le travail de l'équipe « Instrumentation » va de la simple réparation mineure (changement de piles ou de batteries défectueuses par exemple) au développement complet de projets expérimentaux (dimensionnement, chiffage, mise en service, programmation).



Figure 6 : Laboratoire d'instrumentation

2 Ma mission au sein de l'UREP

Lors de mon stage à l'UREP, un projet bien précis m'a été confié. Au cours de ce paragraphe, les aspects et enjeux de la mise en place de ce projet sont abordés ainsi que le matériel et les outils utilisés.

Tout d'abord, pour comprendre l'enjeu du projet, il faut savoir que dans un contexte de changement climatique et dans le cadre des recherches de l'UREP, un suivi des paramètres du sol est effectué sur les deux sites constituant le Système d'Observation et d'Expérimentation pour la Recherche en Environnement (SOERE), à savoir Theix et Laqueuille. Les paramètres faisant l'objet de ce suivi sont la température et l'humidité du sol à deux profondeurs différentes, -20 cm et -60 cm sur 28 parcelles distinctes. Ces mesures sont actuellement réalisées par un système d'acquisition qui nécessite une certaine rénovation ou plutôt une modernisation, c'est là tout l'enjeu du projet.

Les objectifs de cette modernisation sont d'automatiser la collecte des données grâce à l'utilisation d'un réseau sans fil (wifi) et de pouvoir visualiser ces dernières en temps réel sur une page web, qui sera accessible à tous et de limiter la plupart des opérations de maintenance nécessaires sur le dispositif actuel.

2.1 Dispositif actuel

Le dispositif qui assure en ce moment la réalisation des mesures, a été mis en place et installé en 2007, mais présente aujourd'hui plusieurs inconvénients.

Tout d'abord le dispositif est constitué de deux chaînes d'acquisition ; une effectue les mesures de température et l'autre celles d'humidité. Pour ce qui est des mesures de température, les capteurs utilisés sont des thermocouples de type T. Ces derniers sont reliés à des boîtiers enregistreurs HOBO (figure 7) qui permettent la conversion directe des valeurs renvoyées par le thermocouple en valeurs de température. Ils permettent également le stockage de ces données. Pour mesurer l'humidité, des sondes ECHO10 de la marque Decagon Devices, associées à des boîtiers Em50 de la même marque sont utilisés (figure 8). Ces derniers permettent également le stockage des données mais sous une forme qui ne permet pas de les exploiter directement (enregistrements en mV). Il faut donc ensuite convertir ces tensions en pourcentage d'humidité grâce aux courbes d'étalonnage. Les fichiers générés par ces deux chaînes d'acquisition nécessitent deux méthodes distinctes de mise en forme et de traitement des données.

L'alimentation de ces enregistreurs s'effectue avec des piles, ce qui est très contraignant du fait de leur faible durée de vie. La collecte des données doit être effectuée tous les deux mois environ à cause des capacités limitées de stockage et de la faible durée de vie des piles.



Figure 7 : Boitier HOBO et thermocouple Type T Figure 8 : Boitier DECAGON Em50 et sonde ECHO 10

2.1.1 Principe de mesure de la sonde ECHO 10

La sonde ECHO 10 est une sonde capacitive. Sa technique est basée sur la mesure de la conductivité électrique du sol et plus précisément de la permittivité diélectrique relative du sol, qui permet de remonter à l'humidité volumique. Les techniques diélectriques se basent sur le fait que l'eau est une molécule polarisée (figure 9). Les charges positives sont localisées au niveau des atomes d'hydrogènes et la charge négative au niveau de l'atome d'oxygène. La molécule d'eau constitue donc un dipôle permanent.

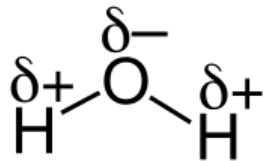


Figure 7 : Polarisation de la molécule d'eau

Lorsqu'un champ électrique E est appliqué dans le sol, les charges ont tendance à s'aligner sur le champ électrique (figure 10) et le matériau se polarise.

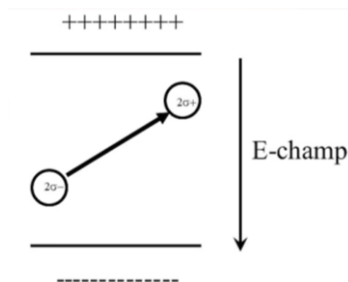


Figure 8 : Réaction des charges partielles de la molécule d'eau lors de l'application d'un champ électrique E dans le sol

La polarisation du milieu peut être modélisée par un champ d'induction électrique D qui est proportionnel à l'intensité du champ électrique E imposé et à la permittivité du milieu. [5]

$$D = \epsilon E \quad (1)$$

avec : D le champ d'induction électrique en C/m^2 ;
 E le champ électrique en N/C ;
 ϵ la permittivité en F/m .

La permittivité ϵ est exprimée suivant l'équation 2.

$$\epsilon = \epsilon_r \times \epsilon_0 \quad (2)$$

avec : ϵ_r la permittivité diélectrique relative, sans dimension ;
 ϵ_0 la permittivité du vide qui vaut $8,854187 \times 10^{-12} F.m^{-1}$.

C'est la permittivité relative du sol qui permettra d'obtenir sa teneur en eau ou humidité volumique.

Cependant, le sol n'est pas homogène, c'est pour cela qu'il est considéré comme un diélectrique non parfait à cause de différents phénomènes. Pour traduire ces derniers, le milieu est caractérisé par $\bar{\epsilon}$ sa permittivité diélectrique relative complexe (équation 3).

$$\bar{\epsilon} = \epsilon' - j \epsilon'' \quad (3)$$

avec : ϵ' partie réelle de la permittivité diélectrique relative, sans dimension ;
 ϵ'' partie imaginaire de la permittivité diélectrique relative, sans dimension.

Le principe de mesure consiste à introduire deux électrodes dans le sol et considérer ensuite cet ensemble, sol et électrodes comme un condensateur imparfait avec pertes, constitué d'une capacité parfaite γ et d'une résistance disposée en parallèle p . Ce condensateur est relié à un circuit électrique oscillant situé dans le boîtier de la sonde. Cette capacité est directement reliée à la partie réelle ϵ' de la permittivité diélectrique relative, par l'équation 4.

$$\boxed{\varepsilon' = \frac{\gamma}{\gamma_0}} \quad (4)$$

avec : γ la capacité électrique en F ;
 γ_0 la capacité électrique à vide.

La résistance globale du sol, assimilée à une résistance disposée en parallèle est reliée à la partie imaginaire ε'' de la permittivité diélectrique relative, par l'équation 5. [6]

$$\boxed{\rho = \frac{1}{\varepsilon'' \gamma_0 \omega}} \quad (5)$$

avec : ρ la résistance de fuite disposée en parallèle en Ω ;
 γ_0 la capacité électrique à vide ;
 ω la pulsation en rad.s^{-1} .

Lorsque la permittivité complexe du milieu est mesurée, cette dernière est reliée à l'indice de réfraction n de ce milieu par l'équation 6.

$$\boxed{n = \bar{\varepsilon}^2} \quad (6)$$

Et pour finir la permittivité diélectrique relative ε_r du milieu est relié à son indice de réfraction n par l'équation 7. [7]

$$\boxed{\varepsilon_r = n^2} \quad (7)$$

Maintenant que la permittivité diélectrique du milieu a été mesurée, l'équation de Topp (équation 8) permet d'obtenir l'humidité volumique du milieu θ en $m^3.m^{-3}$ de n'importe quel type de sol. [5]

$$\boxed{\theta = a + b. \varepsilon_r + c. \varepsilon_r^2 + d. \varepsilon_r^3} \quad (8)$$

avec : $a = -0,05$
 $b = 0,0293$
 $c = -0,00055$
 $d = 0,0000043$

2.2 Nouveau dispositif

Le nouveau dispositif est une chaîne d'acquisition composée de 7 centrales et de 56 capteurs délivrant l'information selon le protocole numérique SDI-12 qui possède des normes particulières qui seront détaillées plus tard. Les capteurs permettront d'effectuer les mesures de température et d'humidité du sol sur les 28 parcelles du SOERE de Theix, aux profondeurs de -20 cm et -60 cm. Ces capteurs sont interfacés à un ensemble de centrales d'acquisition de données communiquant entre elles en transmission sans fil grâce au réseau wifi. Un seul type de fichier sera donc généré et cela facilitera donc le travail de mise en forme et de traitement de données.

2.2.1 Centrale CR310 Campbell Scientific

Les centrales utilisées sont des modèles CR310 du groupe Campbell Scientific (figure 11), groupe ayant une réputation internationale dans les systèmes de mesure.



Figure 9 : Centrale CR310 Campbell Scientific

La communication entre la centrale d'acquisition et l'ordinateur de stockage (unité de visualisation) peut être réalisée soit avec une liaison série (câble USB ou câble RS232) ou selon le protocole de communication IP, qui peut être le wifi ou l'Ethernet. Pour le bon fonctionnement de la centrale, l'alimentation USB n'est pas suffisante, une alimentation externe en 12V est nécessaire, qui peut être une batterie (bornes BAT +/-) ou une alimentation stabilisée (bornes CHG +/-) qui peut servir de chargeur à la batterie. Les bornes G, (Ground), correspondent à la masse commune.

La CR310 comporte deux ports de communication numériques C1 et C2 qui peuvent être configurés en entrée et/ou en sortie. Il y a également des entrées analogiques situées sur le bornier en bas de la figure 11.

Diverses autres bornes sont présentes sur la CR310 comme la borne PSW qui correspond à un compteur d'impulsions. La borne SW12, de l'anglais SWitched, est une borne qui délivre une tension de 12V en fonction d'une commande programmée.

Selon le protocole SDI-12, au maximum 10 capteurs adressés peuvent être reliés par port COM, ce qui fait un maximum de 20 capteurs par centrale. De plus, pour limiter les pertes d'informations, il est recommandé que la somme totale de câble n'excède pas 600m par port COM, et 60m par capteur. Cependant avec des câbles de bonne qualité, il est possible d'aller jusqu'à 80 voire 100m de câble par capteur.

Sur le terrain, les centrales sont chacune reliées à une batterie qui est rechargée par un panneau solaire, ce qui permet aux centrales d'être autonomes du point de vue alimentation.

Commenté [RF1]: Qu'est-ce qu'un câble de bonne qualité ?

2.2.2 Sonde SMT100 Truebner

Les sondes utilisées pour réaliser les mesures de température et d'humidité du sol sont des SMT100 de la marque Truebner (figure 12). La sonde délivre trois informations : la température du sol, la permittivité du sol et l'humidité du sol. Les mesures brutes effectuées par la sonde sont la température et la permittivité. Ensuite la permittivité mesurée est intégrée dans une équation standard (Equation de Topp) qui nous permet d'avoir l'humidité. Le principe de mesure est détaillé dans le paragraphe 2.2.3.




Figure 10 : Sonde SMT100 Truebner

Les sondes SMT100 sont des capteurs délivrant l'information selon le protocole numérique SDI-12. Ce dernier, qui vient de l'anglais Serial Digital Interface at 1200 baud, est un protocole de communication série asynchrone. Ce protocole suit une configuration maître-esclave, dans laquelle le système d'acquisition de données interroge les capteurs [8]. Chaque capteur est identifié par une adresse unique.

Trois fils sont nécessaires pour une communication SDI-12 (fil de masse, fil d'alimentation 12V et fil de données). Pour la sonde SMT100, le fil blanc correspond à la masse, le marron à l'alimentation 12V et le vert aux données.

D'après les données constructeur (figure 13), la sonde SMT100 a déjà fait l'objet d'un étalonnage constructeur, et peut être alimentée par une tension entre 4 et 24 V avec une intensité allant jusqu'à 40 mA.

SMT100 Soil Moisture Sensor



SPECIFICATION

Accuracy:	Soil volumetric water content (VWC) <ul style="list-style-type: none"> » Using factory calibration up to $\pm 3\%$ (VWC) in mineral soils with moderate salinity from 0 to 50% VWC » Using medium specific calibration up to $\pm 1\%$ (VWC) Temperature <ul style="list-style-type: none"> » Typical $\pm 0.2^\circ\text{C}$, max. $\pm 0.4^\circ\text{C}$ over full range » Analog version $\pm 0.8^\circ\text{C}$ Additional output <ul style="list-style-type: none"> » Raw measurement data » Dielectric permittivity
Resolution:	0.1% volumetric water content or better 0.01°C or better (analog version 0.2°C)
Range:	0 to 60% volumetric water content (up to 100% volumetric water content with limited accuracy) Temperature: -40 to +80°C (analog version -40 to +60°C)
Interface options:	RS485 with TBUS RS485 with Modbus RS485 with ASCII SDI-12 Analog: 0 - 10 V (other voltage ranges on request)
Power:	4-24 V DC, up to 40 mA during measurement (analog version 12 - 24 V DC for 0 - 10 V output) Measurement time digital versions: less than 50 ms Measurement time analog versions: less than 200 ms
Cable length:	10 m
Sensor dimensions:	ca. 18,2 cm x 3 cm x 1,2 cm
Data logger compatibility:	Any logger capable of appropriate power excitation and RS-485 (TBUS, Modbus, ASCII), SDI-12 or analog input Free PC logger software available on request

Figure 11 : Extrait de la documentation constructeur

2.2.3 Principe de mesure d'une sonde SMT100

En température, une sonde SMT100 utilise un capteur de type thermistance. Pour ce qui est de l'humidité volumique le principe de mesure diffère de celui utilisé par la sonde capacitive ECHO10.

Une impulsion de très haute fréquence (supérieure à 1GHz) est émise et se propage le long d'un câble. Ensuite cette impulsion se répand le long d'un guide d'onde. C'est en réalité une onde électromagnétique. Deux réflexions successives ont lieu. Une première lors du passage de l'onde entre le câble et le guide, puis une deuxième à l'extrémité du guide d'onde. L'intervalle de temps Δt entre les échos de ces deux réflexions, correspond au temps d'aller-retour de l'onde électromagnétique le long du guide. Il est alors possible de déduire la vitesse moyenne de propagation v de l'onde dans le sol (équation 9). [9]

$$v = \frac{2 \Delta l}{\Delta t} \quad (9)$$

avec : Δl la longueur du guide d'onde en m ;

Δt temps d'aller-retour de l'onde en s.

La vitesse de propagation de l'onde électromagnétique dans le sol est liée à sa permittivité diélectrique relative ϵ_r suivant l'équation 10.

$$\epsilon_r = n^2 = \frac{c^2}{v^2} \quad (10)$$

avec : n l'indice de réfraction du milieu ;

c la vitesse de propagation de l'onde dans le vide en $m.s^{-1}$;

v vitesse de propagation de l'onde dans le milieu en $m.s^{-1}$.

Ensuite la permittivité diélectrique est introduite dans l'équation de Topp (cf 2.1.1 équation 8) et l'humidité volumique du sol est obtenue.

2.2.4 Logiciel LoggerNet Campbell Scientific

Le logiciel LoggerNet a été créé par Campbell Scientific. C'est le logiciel pilote des centrales d'acquisition de cette marque. Il inclut de nombreuses applications (client) allant de la programmation jusqu'à l'affichage des données sur une interface personnalisée.

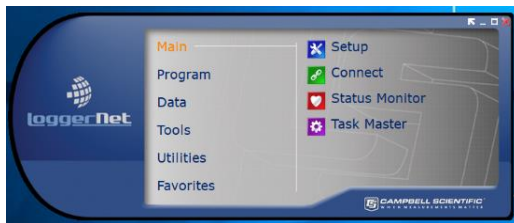


Figure 12 : Ecran d'accueil du logiciel LoggerNet

Le menu Main permet de prendre le contrôle des centrales d'acquisition utilisant plusieurs modes de communication, réseau wifi, liaison USB ou RS 232. Ces centrales ainsi que leur mode de communication sont déclarées au préalable via le client Setup. La connexion aux centrales, le visionnage et la collecte des données s'effectuent dans ce menu (client Connect). Cette dernière peut être configurée de façon automatique avec le client Task Master.

Le menu Program est dédié à tout ce qui est en rapport avec la programmation. Grâce à la documentation du constructeur et à Short Cut, la version simplifiée de création de programme, il est facile de réaliser des programmes simples permettant le suivi d'un ou plusieurs paramètres en fonction des types de capteurs interfacés à la centrale. Par la suite CRBasic Editor deviendra indispensable à la création de programmes plus complexes et personnalisés. LoggerNet utilise son propre langage de programmation.

Le menu Data est constitué de diverses applications dont RTMC Pro qui permet de créer une interface personnalisée afin de visualiser les mesures en temps réel (figure 15).

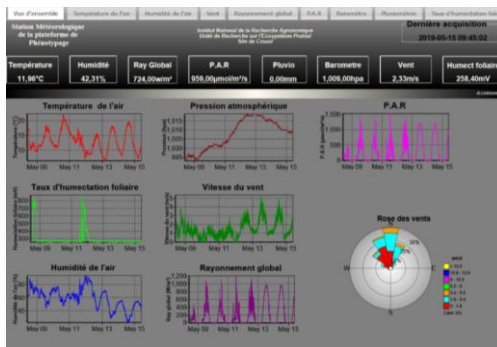


Figure 13 : exemple d'interface créée à partir de RTMC Pro

2.2.5 Installation du dispositif

La chaîne d'acquisition va être mise en place sur le site de Theix qui se compose de deux blocs, chacun ayant une nature de sol différente. Le premier bloc nommé Blatière possède un sol de roche mère granitique, alors que le second nommé Moine est composé d'un sol plutôt volcanique mélangé de plusieurs roches dont le granit et le basalte. Les deux blocs comptent chacun 15 parcelles qui sont soumises à des modes de gestion différentes : intensité de pâturage, degrés de fertilisation, intensité des fauches... En tenant compte du nombre de capteurs qui l'on peut connecter par centrale, des longueurs de câble, des exigences des chercheurs et du relief du terrain, sept centrales étaient nécessaires à la mise en place des 56 capteurs. Elles ont été réparties suivant la figure 16. Le bloc Blatière comptera deux centrales d'acquisition et 28 sondes réparties par paires sur 14 de ses parcelles. Le bloc Moine comptera cinq centrales d'acquisition et 28 sondes également, qui seront aussi réparties par paires sur 14 de ces parcelles.

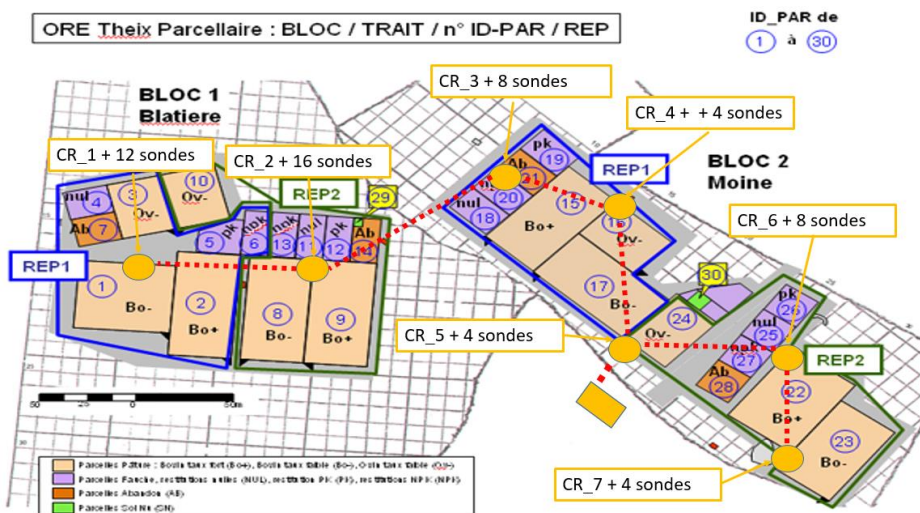


Figure 14 : Schéma du site de Theix et du nouveau dispositif

Les coordonnées GPS de l'emplacement des fosses et des centrales (figure 19) ont été déterminées et les longueurs de câbles théoriques ont pu être calculées (figures 17 et 18). Ces longueurs ne sont pas définitives, car de légères modifications d'emplacements peuvent être envisagées pour cause de passage d'animaux, de place sur les chemins desservant les parcelles ou de systèmes de mesures déjà installés. Les emplacements définitifs seront établis lors du piquetage sur le terrain avec la responsable du site de Theix.



Figure 15 : Emplacement des fosses et longueurs de câble sur le bloc Blatière

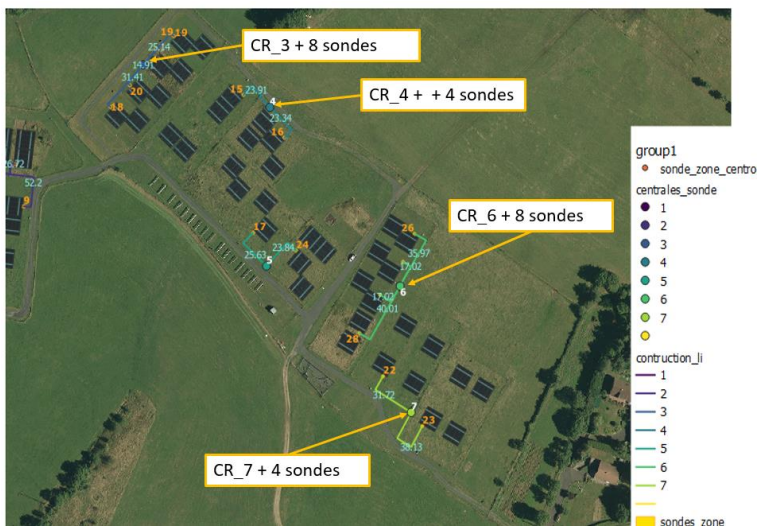


Figure 178 : Emplacement des fosses et longueurs de câble sur le bloc Moine

id	X	Y
1	701505.092	6513759.062
2	701594.608	6513760.578
3	701686.806	6513818.289
4	701758.309	6513796.961
5	701757.923	6513712.318
6	701833.119	6513702.932
7	701840.486	6513635.705

Figure 169 : Coordonnées GPS des centrales d'acquisition

3 Mise en place du projet

La mise en place du projet se décompose en plusieurs étapes qui sont détaillées au cours de cette partie.

3.1 Inventaire des sondes

La première chose qui a été faite est un inventaire de toutes les centrales ainsi que leurs sondes correspondantes (figure 20) afin de faciliter les câblages et la reconnaissance de chacune d'entre elle. De plus la longueur théorique des câbles ainsi que l'identifiant des parcelles ont été rajoutés pour faciliter l'identification. Le port COM et l'adresse de chaque sonde ont également été renseignés dans cet inventaire. Les lignes surlignées en couleur symbolisent les sondes qui seront installées à la profondeur de -60 cm et les lignes sans couleur à celle de -20 cm.

CR310_4337_pk5 (centrale 1)					etiquette	id sonde
port	théorique / m	id_parcelle	exp / m	adresse		
1	60,64	5	70	0	110	1
			70	1	111	2
	58,24	1	70	2	112	3
			70	3	113	4
	57,91	10	60	4	114	5
			60	5	115	6
2	54,98	4	60	0	120	7
			60	1	121	8
	37,07	7	45	2	122	9
			45	3	123	10
	33,21	3	40	4	124	11
			40	5	125	12

Figure 18 : Extrait de l'inventaire des centrales et des sondes

Ensuite un étiquetage composé de trois chiffres a été réalisé:

- chiffre 1 : numéro de centrale ;
- chiffre 2 : numéro de port COM ;
- chiffre 3 : adresse SDI-12 de la sonde.

3.2 Adressage des sondes

Chaque sonde doit être adressée afin de pouvoir être identifiée lors de la programmation. Les adresses peuvent être des entiers entre 0 et 9 ou des caractères alphabétiques de A à Z ou de a à z. L'adresse par défaut donnée à chacune des sondes par le constructeur est le 1.

Chacune des 56 sondes a été adressée via le Terminal Emulator (figure 22) qui se trouve dans le client Connect de LoggerNet. Pour l'adressage, une centrale de type CR6 (figure 5) a été utilisée en liaison série USB.

Une fois la centrale connectée avec LoggerNet, les commandes suivant le protocole SDI12 peuvent être entrées sur le Terminal Emulator qui est le point d'accès de communication entre l'expérimentateur et la centrale. La sonde est ensuite câblée sur les bornes de la centrale en respectant le code couleur (cf 2.2.2).

Premièrement il faut indiquer que le protocole SDI12 va être utilisé. Ensuite le terminal demande sur quel port de communication la sonde est reliée. Puis les commandes suivant le protocole SDI12 peuvent être entrées. Parmi ces dernières, celles les plus couramment utilisées sont :

?! Interroge le capteur sur son adresse ;

aAb! Change l'adresse a du capteur en b ;

aI! Informations sur le type de capteur : modèle du capteur, protocole associé ;

aM! Affiche des informations sur le capteur ; a0025 adresse / temps de réponse / nb de variables de sorties ;

aD0! Affiche les données mesurées par le capteur, dans notre cas 6 valeurs.

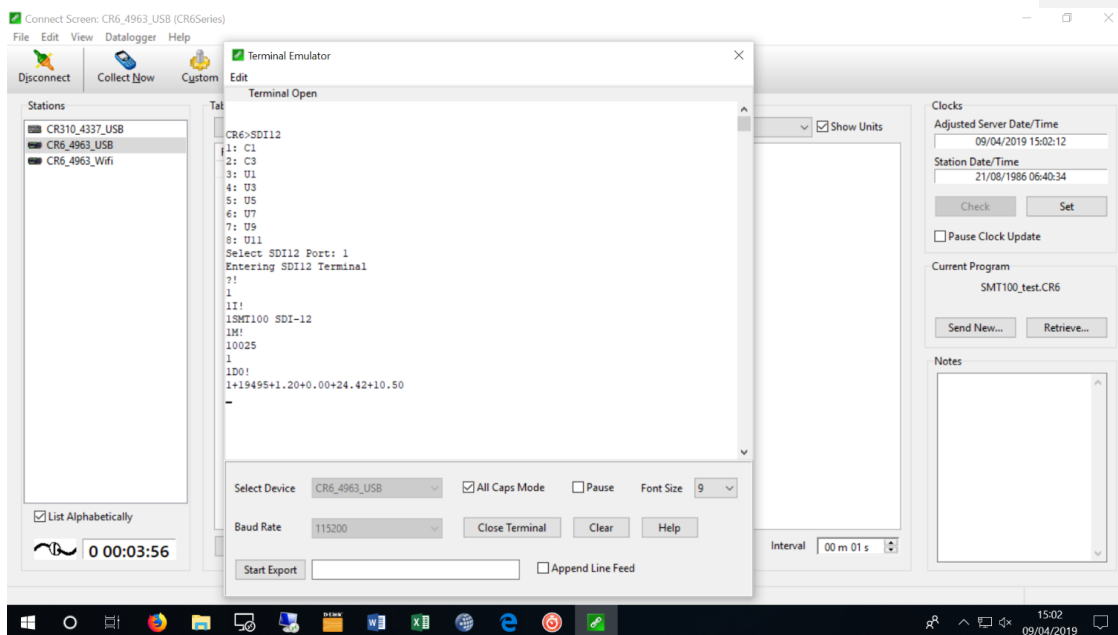


Figure 20 : Terminal Emulator et quelques commandes utilisées

Pour le changement d'adresse, la commande aAb! est utilisée. D'après la documentation du constructeur, suite à la commande aD0!, les cinq variables de la sonde sont renvoyées, précédées de son adresse. La variable 1 correspond à la fréquence du capteur, la variable 2 à la permittivité diélectrique relative sans unité, la variable 3 à l'humidité volumétrique en %, la variable 4 à la température en degrés Celsius et la variable 5 à la tension d'alimentation du capteur en volt.

3.3 Programmation des centrales d'acquisition

Chacune des centrales d'acquisition doit recevoir des instructions d'un programme afin de collecter les mesures à la fréquence voulue. Les programmes sont réalisés à partir de l'application CRBasic editor du logiciel LoggerNet. Chaque centrale a été programmée selon le même schéma, car seul le nombre de capteurs et donc le nombre d'instructions varient dans le programme. C'est pour cela que seul le programme de la centrale 4 présent en annexe 2 sera détaillé.

Avant de créer un programme, il faut comprendre que les commentaires sont importants, ils sont une aide pour le créateur du programme qui sera peut-être amené à retravailler dessus même plusieurs années après la création. De plus, il faut se dire que d'autres personnes seront susceptibles de travailler sur ces programmes et les commentaires leurs seront une aide précieuse.

3.3.1 Déclaration des variables

Premièrement, il faut déclarer les variables publiques (figure 23). Il s'agit des variables de mesures, issues des différentes sondes et acquises par la centrale. Pour la centrale 4, il y a 22 variables publiques qui sont la température et la tension de la centrale et les cinq variables de chacune des quatre sondes SMT100.

```
11 'Declare Public Variables
12
13 'Variables CR310_4109_2
14 Public Temp_CR310_4109_2 : Units Temp_CR310_4109_2= deg C
15 Public Volt_CR310_4109_2 : Units Volt_CR310_4109_2= volt
16
17 'Variables Port COM 1 -> 2 sondes de 37 a 38
18 Public SDI12_37(5)
19 Public SDI12_38(5)
20
21 'Variables Port COM 2 -> 2 sondes de 39 a 40
22 Public SDI12_39(5)
23 Public SDI12_40(5)
24
```

Figure 21 : Déclaration des variables publiques

Ensuite il faut déclarer les variables privées (figure 24) qui sont les variables renvoyées par les sondes car ces dernières en renvoient cinq. Ici les paramètres qui nous importent sont la permittivité diélectrique relative, l'humidité volumique ainsi que la

température qui correspondent respectivement aux variables 2, 3 et 4 (cf 3.2) délivrées par le capteur SDI-12. A chacune des variables d'une sonde est associé le nom du paramètre mesuré accompagné de l'identifiant de la sonde à laquelle il appartient. Une fois toutes les variables déclarées, il faut leur attribuer leurs unités. La tension de la centrale est exprimée en volt. La permittivité relative n'a pas d'unité, elle est comprise entre 1 et 80, 1 correspond à de l'air et 80 à de l'eau. L'humidité volumique s'exprime en pourcentage. Et pour finir, les températures de la sonde et de la centrale qui sont exprimées en degrés Celsius.

```

27 'Declare Private Variables
28
29 'Variables de mesures et unites sondes Port COM 1 (les longueurs sont a titre indicatif avec les donnees GPS et non la valeur exact)
30
31 'sonde 37
32 'adresse 0 / parcelle 15 / longueur 24m
33 Alias SDI12_37(2)=Perm_37 : Units Perm_37= unit
34 Alias SDI12_37(3)=Humidite_37 : Units Humidite_37= %
35 Alias SDI12_37(4)=Temp_37 : Units Temp_37= deg C
36 Alias SDI12_37(5)=Volt_SMT100_37 : Units Volt_SMT100_37= volt
37
38 'sonde 38
39 'adresse 1 / parcelle 15 / longueur 24m
40 Alias SDI12_38(2)=Perm_38 : Units Perm_38= unit
41 Alias SDI12_38(3)=Humidite_38 : Units Humidite_38= %
42 Alias SDI12_38(4)=Temp_38 : Units Temp_38= deg C
43 Alias SDI12_38(5)=Volt_SMT100_38 : Units Volt_SMT100_38= volt
44

```

Figure 22 : Déclaration des variables privées et unités

3.3.2 Définition de la table de données

Ensuite vient la partie concernant la « data table », qui signifie table de données (figure 25). Cette dernière doit être définie et est en réalité un tableau dans lequel les données sont stockées. L'instruction datatable est écrite dans le programme. Dans cette instruction il faut préciser le nom de la table qui est table_CR_4109 dans notre cas. Ensuite True indique que la table sauvegarde chaque nouvelle donnée qui lui parvient. Puis La valeur -1 signifie que la table sera de taille automatique, c'est-à-dire qu'elle dispose d'autant de lignes et de colonnes que nécessaire.

L'instruction datainterval sert à définir les paramètres de la table déclarée juste au-dessus. Dans cette instruction, la valeur de l'offset est précisée, suivie de la fréquence de remplissage de la table avec son unité. Ceci définit la fréquence d'acquisition des données. Et pour finir il faut préciser le paramètre des lapsus. Plus précisément il faut indiquer si chaque lapsus ou plutôt données manquantes sont horodatées ou si la table ne tient pas compte de ces lapsus. Pour cela il faut respectivement entrer la valeur 0 ou une valeur positive.

Les données affectées à la table peuvent maintenant être paramétrées. Dans le programme, les données sont toutes des moyennes, traduit par l'utilisation de l'instruction Average en anglais. Dans cette instruction, les deux paramètres importants sont la source des mesures sur lesquelles la moyenne est réalisée, ainsi que le format des

données. Ici le format choisi est FP2 qui correspond à "two byte floating point" ; Virgule flottante sur deux octets autrement dit que la précision est au dixième.

```
65 'Define Data Tables.
66 DataTable (Table1,True,-1)
67   DataInterval (0,1,min,10)
68
69   Average (1,Temp_CR310_4109_2,FP2,False)
70   Average (1,Volt_CR310_4109_2,FP2,False)
71
72 'Mesures Permittivite
73   Average (1,Perm_37,FP2,False)
74   Average (1,Perm_38,FP2,False)
75   Average (1,Perm_39,FP2,False)
76   Average (1,Perm_40,FP2,False)
77
```

Figure 23 : Définition de la DataTable

3.3.3 Programme principal

La figure 26 représente le programme principal. Il faut d'abord entrer l'instruction Scan, qui définit la fréquence à laquelle s'exécute le programme et les instructions qui y sont incluses. Dans notre cas, l'intervalle entre deux scan est d'une minute. Le 0 signifie que le scan est renouvelé à l'infini, c'est-à-dire que le programme s'exécute infiniment. Une autre valeur permettrait de définir le nombre de scan à effectuer. Les instructions PanelTemp et Battery sont les instructions utilisées pour récupérer les mesures de température et de tension de la centrale. L'instruction SDI12Recorder permet de récupérer les mesures d'un capteur SDI12. Pour cela il faut préciser la variable publique correspondant à la sonde utilisée, le port sur lequel la sonde est branchée, l'adresse de la sonde, la commande qui, ici, est M! et qui signifie le début des mesures, et pour finir, le multiplicateur s'il y en a un ainsi que l'offset.

La ligne « If SDI12_37(1)=NAN Then Move(SDI12_37(),3,NAN,1) » permet de préciser que si lors d'une mesure, le message d'erreur NAN (Not A Number) s'affiche, les autres valeurs affichent NAN également.

L'instruction SW12 est utilisée, car elle permet d'alimenter la sortie SW12 en 12V seulement le temps des mesures. Ceci est préférable à une alimentation en continu afin de solliciter le moins possible la batterie et éviter qu'elle se décharge inutilement.

Pour terminer, la table de sortie de données est appelée à l'aide de l'instruction CallTable et le scan suivant est effectué avec l'instruction NextScan.

```

100 'Main Program
101 BeginProg
102 'Main scan
103 Scan (20,sec,1,0)
104 PanelTemp (Temp_CR310_4109_2,60)
105 Battery (Volt_CR310_4109_2)
106
107
108 SW12 (1) 'sortie SW12_1 a 12V
-----
109
110 SDI12Recorder (SDI12_37(),C1,"0","M!",1,0,-1) 'Debut des mesures de la sonde 37
111 If SDI12_37(1)=NAN Then Move(SDI12_37(),3,NAN,1)
112
113 SDI12Recorder (SDI12_38(),C1,"1","M!",1,0,-1) 'Debut des mesures de la sonde 38
114 If SDI12_38(1)=NAN Then Move(SDI12_38(),3,NAN,1)
115
116 SDI12Recorder (SDI12_39(),C2,"0","M!",1,0,-1) 'Debut des mesures de la sonde 39
117 If SDI12_39(1)=NAN Then Move(SDI12_39(),3,NAN,1)
118
119 SDI12Recorder (SDI12_40(),C2,"1","M!",1,0,-1) 'Debut des mesures de la sonde 40
120 If SDI12_40(1)=NAN Then Move(SDI12_40(),3,NAN,1)
121
122 SW12 (0) 'sortie SW12_1 a 0V
123
124 CallTable Table1
125
126 NextScan
127 EndProg

```

Figure 24 : Programme principal

Pour résumer, le programme effectue des mesures (ou scan) toutes les 30 secondes, qui sont moyennées et inscrites dans un tableau toutes les minutes.

3.4 Confection des coffrets

Les coffrets (figure 27-a) ont pour rôle de protéger les centrales d'acquisition et leurs batteries contre les intempéries. La centrale et la batterie ont été installées et fixées sur la grille de support. Ensuite, les antennes wifi ont été installées (figure 27-d). Puis les rails permettant de maintenir les borniers (figure 27-b) ont été fixés sur la grille de support. Ces borniers permettent de réaliser une jonction simplifiée entre le bornier de la centrale et le nombre important de capteurs (figure 27-e). De plus, pour permettre aux câbles d'arriver dans le coffret, des trous ont été percés afin d'installer des presse-étoupes (figure 27-c), qui maintiennent l'étanchéité entre le milieu extérieur et l'intérieur du coffret.

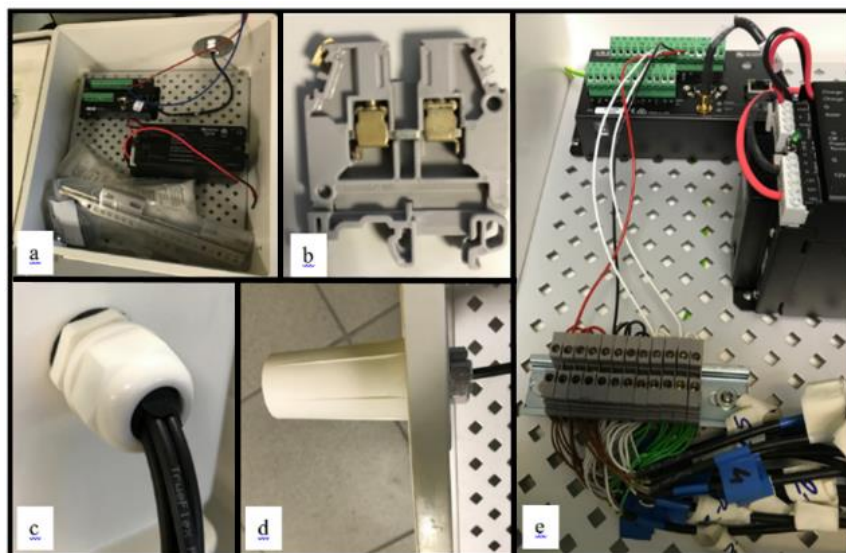


Figure 25 : a) coffret, b) bornier, c) presse-étoupe, d) antenne wifi, e) branchements situation réelle

3.5 Création du réseau wifi

Pour créer le réseau wifi, l'application Device Config Utility de LoggerNet a été utilisée. Le constructeur a configuré chaque centrale par défaut avec l'adresse IP 192.168.67.1. Ces dernières sont ensuite renommées afin de pouvoir les identifier dans le réseau wifi. Elles ont également une adresse packbus (voir description plus loin) qui est aussi renommée. Les centrales sont configurées de telle sorte que chaque centrale communique avec une ou plusieurs centrales voisines. Ainsi les chemins reliant les centrales à l'ordinateur du SOERE de Theix symbolisé par la case verte (figure 28), ne sont pas directs. Ceci permet d'augmenter le champ d'action du réseau wifi avec un plus large périmètre.

A partir de la centrale cœur du réseau qui est la CR310_4336_1, le réseau wifi « Wifi_SOERE_Theix » est créé. Toutes les autres centrales sont configurées de manière à rejoindre ce réseau. Sur la figure 28, il est possible de voir l'architecture globale de ce réseau. Le nom des centrales contient leur numéro de série ainsi que leur adresse packbus qui vont de 1 à 7 dans notre cas.

Le Packbus est un protocole de communication destiné aux centrales d'acquisition de la marque Campbell Scientific. Il s'agit d'un bus de données en paquets d'où le nom Packbus. Toutes les données sont transférées en paquets, qui comprennent des adresses de destination et de source. Il est optimisé pour bien fonctionner sur des connexions à faible bande passante (comme avec les radios). Le protocole de communication Packbus possède plusieurs avantages. Il permet une communication simultanée, c'est-à-dire que plusieurs dispositifs peuvent se connecter et communiquer avec un seul enregistreur de données. Il permet également une communication "peer-to-peer", c'est-à-dire qu'une centrale de mesure peut contrôler d'autres centrales de mesures sans l'utilisation d'un PC. [10]

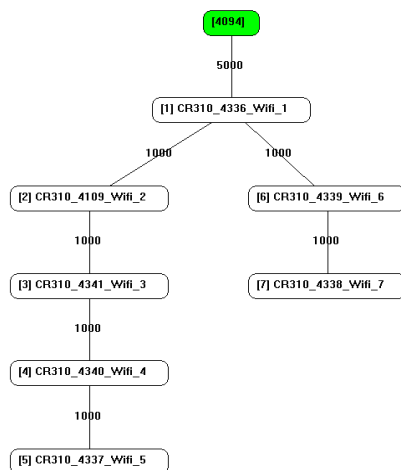


Figure 26 : Schéma de l'ensemble du réseau wifi, obtenu à partir de PackBus Graph

Lors de la configuration d'une centrale, il faut préciser l'adresse IP des centrales voisines ou plutôt des centrales avec lesquelles elle peut communiquer. Il faut également préciser si les centrales sont "router" ou "leaf", qui se traduit respectivement par routeur et feuille en français. Dans notre configuration, seules les centrales 4337 et 4338 sont configurées en leaf car elles sont situées aux extrémités, toutes les autres sont en router.

Des fichiers de configuration appartenant à chaque centrale ont été enregistrés afin de pouvoir réaliser la configuration très rapidement lors de la mise en place du réseau sur le terrain en envoyant simplement le fichier à la centrale correspondante.

4 Etalonnage

Avant d'être installés sur le terrain, les capteurs doivent être étalonnés même si ces derniers ont déjà été soumis à un étalonnage constructeur.

4.1 Etalonnage en température

Pour l'étalonnage en température, les sondes ont toutes suivi le même protocole d'étalonnage. Un bain thermostaté a permis d'obtenir un milieu de température homogène. Les résultats expérimentaux obtenus sur le terrain depuis plusieurs années, ont montré que les températures de sol à une profondeur de -10 cm vont de -5°C à +30°C. La procédure d'étalonnage est donc la suivante :

- plage d'étalonnage allant de -10°C à +40°C ;
- 11 paliers, tous les 5°C ;
- 5 minutes de mesures par palier ;
- mesures toutes les 20 secondes, qui sont moyennées toutes les minutes.
- un capteur de température étalonné est mis avec les sondes dans le bain thermostaté et sert de température de référence.

Etant donné que toutes les sondes ont été étalonnées suivant cette même procédure, seulement l'exemple de la sonde 1 est détaillé. La réponse des capteurs sur la plage de température étudiée est linéaire.

Consigne	5		
Sonde	Temp sonde / °C	Temp sonde moyenne / °C	Temp réf / °C
1	4,80	4,79	4,80
	4,79		
	4,77		
	4,80		
	4,78		
	4,79		

Figure 27 : Mesures obtenues avec la sonde 1 pour le palier de 5°C

4.1.1 Courbe d'étalonnage

Une courbe d'étalonnage (figure 30) a été tracée pour chaque sonde, grâce aux moyennes des mesures réalisées. Chaque sonde a donc sa propre droite de calibration avec son équation propre (fonction affine $y = ax + b$)

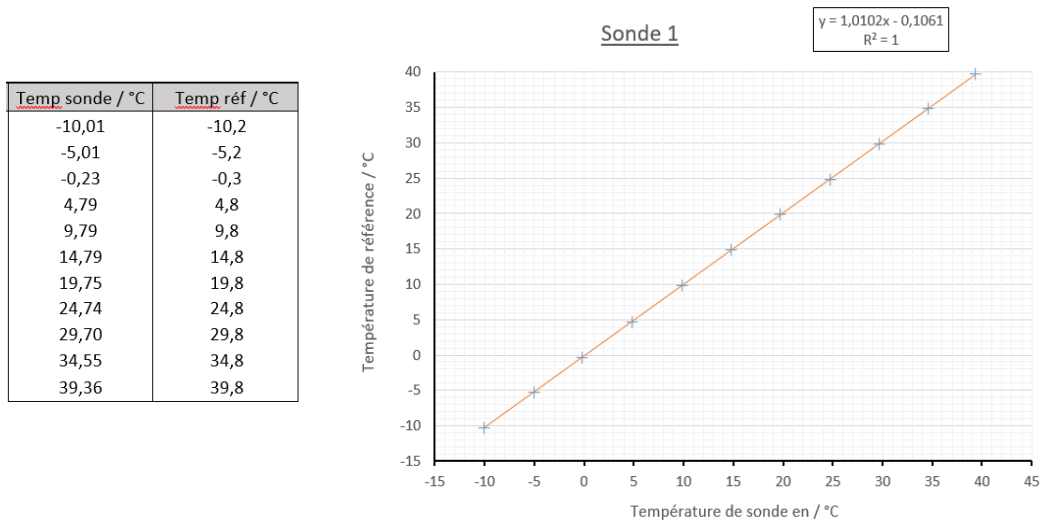


Figure 28 : Moyenne des mesures et courbe d'étalonnage pour la sonde 1

4.1.2 Incertitudes de mesures

Les incertitudes de mesures ont été faites sur l'ensemble des mesures. Sur le palier représenté en figure 29, le calcul d'incertitudes est détaillé ci-dessous.

Incertitude type A :

L'incertitude de type A vaut $u_a = \frac{\sigma}{\sqrt{n}}$

avec : σ l'écart type de la série de mesure ;
n nombre de mesures de la série.

Application numérique : $u_a = \frac{1,074089 \times 10^{-2}}{\sqrt{6}} = 4,38495 \times 10^{-3} \text{ °C}$

Incertitude type B :

L'incertitude de type B est composée de l'incertitude de résolution du capteur ainsi que de celle liée au constructeur.

$$\text{L'incertitude de type B liée à la résolution vaut } u_b(r) = \frac{r}{\sqrt{12}}$$

avec : r la résolution du capteur.

$$\text{Application numérique : } u_b(r) = \frac{0,01}{\sqrt{12}} = 2,88675 \times 10^{-3} \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\text{L'incertitude de type B liée au constructeur vaut } u_b(c) = \frac{u}{3}$$

avec : u l'incertitude donnée par le constructeur.

$$\text{Application numérique : } u_b(c) = \frac{0,2}{3} = 0,06667 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\text{L'incertitude de type B vaut } u_b = \sqrt{u_b^2(r) + u_b^2(c)}$$

$$\text{Application numérique : } u_b = \sqrt{(2,88675 \times 10^{-3})^2 + (0,06667)^2} = 0,06673 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Incertitude composée :

$$\text{L'incertitude composée vaut } u = \sqrt{u_a^2 + u_b^2}$$

$$\text{Application numérique : } u = \sqrt{(4,38495 \times 10^{-3})^2 + (0,06673)^2} = 0,06687 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Incertitude élargie :

$$\text{L'incertitude élargie vaut donc } U = k \times u$$

avec : k le facteur d'élargissement.

$$\text{Application numérique : } U = 3 \times 0,06687 = 0,20 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Le résultat de la mesure du tableau figure 26 est donc $(4,79 \pm 0,20) \text{ } ^\circ\text{C}$ à k=3.

[11]

4.2 Vérification et comparaison de fonctionnement en humidité

En ce qui concerne l'humidité, cela a été plus compliqué car il n'y avait pas d'appareil étalonné permettant de mesurer et fournir une humidité de référence. Cependant un étalonnage constructeur a déjà été réalisé par ce dernier. Selon la documentation (cf 2.2.2 figure 13), les capteurs sont étalonnés à $\pm 3\%$. Une vérification du fonctionnement des sondes a donc été réalisée. Pour cela, quatre milieux artificiels, d'humidités différentes ont été mis en place.

- milieu 1 : air
- milieu 2 : billes de verre sèches
- milieu 3 : billes de verre saturées
- milieu 4 : eau

Les 56 sondes suivent le même protocole que celui de l'étalonnage en température (cf 4.1) en ce qui concerne le nombre de mesures, ainsi que les intervalles et temps de mesures. Ensuite la permittivité et l'humidité volumique correspondante fourni par le capteur sont mesurées (figure 31).

sonde	Permittivité				Humidité / %					
	billes sèches	billes saturées	eau	air	billes sèches	moyenne	billes saturées	moyenne	eau	air
1	3,12	27,91	80	1,05	3,28		42,7		96,5	0
	3,11	27,92	80	1,05	3,27		42,71		96,5	0
	3,11	27,93	80	1,05	3,27		42,72		96,5	0
	3,11	27,93	80	1,043	3,27	3,27	42,72	42,72	96,5	0
	3,11	27,93	80	1,04	3,27		42,72		96,5	0
	3,11	27,93	80	1,04	3,27		42,72		96,5	0

Figure 29 : mesures de permittivité et d'humidité volumique de la sonde 1, dans les quatre milieux

Afin de mettre les capteurs en situation réelle de fonctionnement, des prélèvements ou plutôt des carottes de sol sont effectués sur le site, dans les fosses où seront implantés les capteurs. Dans un premier temps la carotte sera saturée en eau. Ensuite elle sera mise en situation de dessèchement au cours duquel son humidité volumique et sa masse seront suivies. Le suivi de la masse de la carotte permet de connaître les pertes en eau dues à l'évaporation. Le dessèchement est relativement lent (environ deux mois). Ceci permettra de comparer la réponse des capteurs à des mesures précises, par pesée des pertes en eau des carottes (méthode gravimétrique).

Conclusion

Pendant ce stage au sein de l'INRA, un projet bien précis m'a été confié. Il s'agit de la rénovation du système d'acquisition permettant de mesurer la température et l'humidité du sol.

Dans un premier temps, il a fallu prendre connaissance du matériel et des logiciels utilisés et étudier le déroulement de la mise en place du projet. Après avoir fait l'objet d'un inventaire, toutes les sondes ont été adressées afin de les reconnaître et de pouvoir communiquer avec elles à partir d'une centrale d'acquisition. Ensuite, les centrales ont chacune été personnellement programmées afin de collecter les mesures désirées. Le réseau wifi a ensuite pu être mis en place grâce à la configuration des centrales.

Pour que les mesures puissent être exploitées, la partie étalonnage était indispensable. Cependant, ce dernier n'a pu être réalisé que pour la température à l'aide d'un bain thermostaté. En ce qui est de l'humidité, une simple vérification du bon fonctionnement et de la réponse des capteurs a été effectuée en fonction des moyens matériels disponibles.

Pour finir il a fallu commencer la mise en place sur le terrain. Cela a consisté à réaliser les coffrets, en fixant les centrales, l'antenne wifi et en branchant les sondes. Après les mâts portant les coffrets ont été installés et les panneaux solaires servant d'alimentation ont pu être fixés à leur extrémité.

Pour conclure, ce stage a été une première expérience professionnelle très enrichissante du fait que les tâches liées à ce projet ont été très diverses, allant de la programmation à la mise en place sur le terrain du dispositif en passant par l'étalonnage des capteurs. Cela m'a permis de manipuler tous les aspects d'une chaîne d'instrumentation et d'avoir une première expérience professionnelle dans ce domaine.

Bibliographie

- [1] <http://institut.inra.fr>, [page consultée le 19 avril 2019]
- [2] <http://institut.inra.fr/Missions>, [page consultée le 19 avril 2019]
- [3] <http://www.ara.inra.fr/>, [page consultée le 24 avril 2019]
- [4] <https://www6.ara.inra.fr/urep>, [page consultée le 2 mai 2019]
- [5] <https://www.youtube.com/watch?v=7BzDZ1lZ9sc>, [page consultée le 3 juin 2019]
- [6] <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00885528/document>, [page consultée le 4 juin 2019]
- [7] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Permittivit%C3%A9>, [page consultée le 5 juin 2019]
- [8] <https://en.wikipedia.org/wiki/SDI-12>, [page consultée le 7 mai 2019]
- [9] https://fr.wikipedia.org/wiki/Humidim%C3%A8tre_TDR, [page consultée le 6 juin 2019]
- [10] <https://www.campbellsci.fr/blog/many-possibilities-of-pakbus-networking>, [page consultée le 4 juin 2019]
- [11] Cours de Métrologie et capteurs, IUT Mesures Physiques année 2017-2018

Annexes

CR310_4337_pk5 (centrale 1)					etiquette	id sonde
port	théorique / m	ld_parcelle	exp / m	adresse		
1	60,64	5	70	0	110	1
			70	1	111	2
	58,24	1	70	2	112	3
			70	3	113	4
	57,91	10	60	4	114	5
			60	5	115	6
2	54,98	4	60	0	120	7
			60	1	121	8
	37,07	7	45	2	122	9
			45	3	123	10
	33,21	3	40	4	124	11
			40	5	125	12

CR310_4340_pk4 (centrale 2)					etiquette	id sonde
port	théorique / m	ld_parcelle	exp / m	adresse		
1	52,76	8	60	0	210	13
			60	1	211	14
	52,2	9	60	2	212	15
			60	3	213	16
	28,73	6	40	4	214	17
			40	5	215	18
26,72	14	35	6	216	19	
		35	7	217	20	
2	23,95	2	30	0	220	21
			30	1	221	22
	17,06	12	20	2	222	23
			20	3	223	24
	15,69	13	20	4	224	25
			20	5	225	26
3,65	11	15	6	226	27	
		15	7	227	28	

CR310_4341_pk3 (centrale 3)					etiquette	id sonde
port	théorique / m	ld_parcelle	exp / m	adresse		
1	31,41	18	60	0	310	29
			60	1	311	30
	25,14	19	45	2	312	31
			45	3	313	32
2	14,91	20	30	0	320	33
			30	1	321	34
		21	60	2	322	35
			60	3	323	36

CR310_4109_pk2 (centrale 4)					etiquette	id sonde
port	théorique / m	Id_parcelle	exp / m	adresse		
1	23,91	15	35	0	410	37
			35	1	411	38
2	23,34	16	25	0	420	39
			25	1	421	40

CR310_4336_pk1 (centrale 5)					etiquette	id sonde
port	théorique / m	Id_parcelle	exp / m	adresse		
1	25,63	17	35	0	510	41
			35	1	511	42
2	23,84	24	30	0	520	43
			30	1	521	44

CR310_4339_pk6 (centrale 6)					etiquette	id sonde
port	théorique / m	Id_parcelle	exp / m	adresse		
1	40,01	28	60	0	610	45
			60	1	611	46
	35,97	26	60	2	612	47
			60	3	613	48
2	17,02	25	25	0	620	49
			25	1	621	50
	17,02	27	20	2	622	51
			20	3	623	52

CR310_4338_pk7 (centrale 7)					etiquette	id sonde
port	théorique / m	Id_parcelle	exp / m	adresse		
1	38,13	23	60	0	710	53
			60	1	711	54
2	31,72	22	40	0	720	55
			40	1	721	56

Annexe 1 : Inventaire des centrales et de sondes

'Date: 24/04/2019
'Program author: Moulin Ludovic

'Programme CR310_4109_pk2
'2 Port COM
'4 sondes SMT100
'2 sondes par port COM

'Declare Public Variables

'Variables CR310_4109_2
Public Temp_CR310_4109_2 : Units Temp_CR310_4109_2= deg C
Public Volt_CR310_4109_2 : Units Volt_CR310_4109_2= volt

'Variables Port COM 1 -> 2 sondes de 37 a 38
Public SDI12_37(5)
Public SDI12_38(5)

'Variables Port COM 2 -> 2 sondes de 39 a 40
Public SDI12_39(5)
Public SDI12_40(5)

'Declare Private Variables

'Variables de mesures et unites sondes Port COM 1 (les longueurs sont à titre indicatif avec les données GPS et non la valeur exact)

'sonde 37
'adresse 0 / parcelle 15 / longueur 24m
Alias SDI12_37(2)=Perm_37 : Units Perm_37= unit
Alias SDI12_37(3)=Humidite_37 : Units Humidite_37= %
Alias SDI12_37(4)=Temp_37 : Units Temp_37= deg C

'sonde 38
'adresse 1 / parcelle 15 / longueur 24m
Alias SDI12_38(2)=Perm_38 : Units Perm_38= unit
Alias SDI12_38(3)=Humidite_38 : Units Humidite_38= %
Alias SDI12_38(4)=Temp_38 : Units Temp_38= deg C

'Variables de mesures et unités sondes Port COM 2

'sonde 39

'adresse 0 / parcelle 16 / longueur 24m

Alias SDI12_39(2)=Perm_39 : Units Perm_39= unit
Alias SDI12_39(3)=Humidite_39 : Units Humidite_39= %
Alias SDI12_39(4)=Temp_39 : Units Temp_39= deg C

'sonde 40

'adresse 1 / parcelle 16 / longueur 24m

Alias SDI12_40(2)=Perm_40 : Units Perm_40= unit
Alias SDI12_40(3)=Humidite_40 : Units Humidite_40= %
Alias SDI12_40(4)=Temp_40 : Units Temp_40= deg C

'Define Data Tables.

DataTable (Table_CR_4109,True,-1)

DataInterval (0,1,min,10)

Average (1,Temp_CR310_4109_2,FP2,False)

Average (1,Volt_CR310_4109_2,FP2,False)

'Mesures Permittivité

Average (1,Perm_37,FP2,False)

Average (1,Perm_38,FP2,False)

Average (1,Perm_39,FP2,False)

Average (1,Perm_40,FP2,False)

'Mesures Humidité

Average (1,Humidite_37,FP2,False)

Average (1,Humidite_38,FP2,False)

Average (1,Humidite_39,FP2,False)

Average (1,Humidite_40,FP2,False)

'Mesures Température

Average (1,Temp_37,FP2,False)

Average (1,Temp_38,FP2,False)

Average (1,Temp_39,FP2,False)

Average (1,Temp_40,FP2,False)

EndTable

Main Program

BeginProg

Scan (20,sec,1,0)

PanelTemp (Temp_CR310_4109_2,60)

Battery (Volt_CR310_4109_2)

SW12 (1) 'sortie SW12 a 12V

SDI12Recorder (SDI12_37(),C1,"0","M!",1,0,-1) 'Début des mesures de la sonde 37

If SDI12_37(1)=NAN Then Move(SDI12_37(),3,NAN,1)

SDI12Recorder (SDI12_38(),C1,"1","M!",1,0,-1) 'Début des mesures de la sonde 38

If SDI12_38(1)=NAN Then Move(SDI12_38(),3,NAN,1)

SDI12Recorder (SDI12_39(),C2,"0","M!",1,0,-1) 'Début des mesures de la sonde 39

If SDI12_39(1)=NAN Then Move(SDI12_39(),3,NAN,1)

SDI12Recorder (SDI12_40(),C2,"1","M!",1,0,-1) 'Début des mesures de la sonde 40

If SDI12_40(1)=NAN Then Move(SDI12_40(),3,NAN,1)

SW12 (0) 'sortie SW12 a 0V

CallTable Table_CR_4109

NextScan

EndProg

Annexe 2 : Programme créé avec CRBasic Editor pour la centrale 4 (le rouge correspond aux commentaires)

Résumé

Le stage d'une durée de dix semaines au sein de L'Institut De Recherche Agronomique, dans le domaine de l'instrumentation, aura été une première expérience professionnelle très enrichissante. En effet, des tâches très diverses ont pu être réalisées comme la programmation des centrales, l'étalonnage des capteurs, le traitement des données et le début de la mise en place du dispositif sur le terrain. Le stage consistait à moderniser une chaîne d'acquisition mesurant la température et l'humidité du sol, en remplaçant l'ancien dispositif qui se fait vieillissant. Une nouvelle chaîne d'acquisition a donc été mise en place. Elle est composée de capteurs, de centrales d'acquisition et d'une unité de visualisation. Ceci m'a donc permis de manipuler une chaîne d'acquisition dans sa globalité, c'est-à-dire de la réalisation de la mesure jusqu'à son affichage.

Mots-clés :

Instrumentation, Température du sol, Humidité du sol, Permittivité, Etalonnage

Abstract

The internship of ten weeks at the agronomic research institute, in the instrumentation field, was a first professional experience very rewarding. Indeed, very diversified tasks has been realized, like programing of acquisition unit, sensors calibration, data manipulation and the beginning of devices positioning. The internship involves to modernize an acquisition chain measuring the soil temperature and humidity, replacing the old devices. It is composed of sensors, acquisition units and a display unit. This allowed me to manipulate an acquisition chain in its globality from the measurement to the display.

Key words :

Instrumentation, Soil temperature, Soil humidity, Permittivity, Calibration