

INSTITUT UNIVERSITAIRE DE TECHNOLOGIE  
UNIVERSITE DE AIX-MARSEILLE  
Département Mesures Physiques  
142, traverse Charles Susini  
13338 Marseille Cedex 13

## Etude d'un prototype d'une sonde capacité capable de mesurer le teneur en eau d'un sol au cours de son déplacement.



Etude réalisée par : Hassan Bouras  
Année universitaire 2003-2004.

## REMERCIEMENTS

*Je tiens à remercier toutes les personnes de la station Climat Sol et Environnement de l'INRA de Montfavet, qui m'ont apportées leur aide dans ma mission :*

*-André CHANZY, directeur de la station, mon maître de stage, qui a guidé mon travail tout au long de ces 10 semaines.*

*-Jean-Claude GAUDU, qui initialement devait s'occuper de moi, mais en raison de problèmes personnels n'a pas pu le faire.*

*-Charles Onier, thésard pour son aide lors de la rédaction de ce rapport.*

*-Sylvain Barbace et Nathalie Moïtrier sosti de l'unité Climat Sol et Environnement.*

*-et tous ceux, notamment les stagiaires, qui m'ont aidé en instaurant une ambiance amicale au sein de l'unité.*

*Et enfin, je remercie également les professeurs du département Mesures Physiques, et plus particulièrement Hugues Giovannini et la secrétaire pour leur aide dans la recherche du stage et Jean Claude Fumanal pour sa visite instructive.*

# Table des matières

A) Introduction.....	1
B) PRESENTATION DE L'ENTREPRISE.....	2
I) L'INRA.....	2
1) Historique.....	2
2) Organisation.....	2
3) Missions.....	3
4) Moyens.....	3
II) Le Centre d'Avignon.....	4
III) L'unité Climat Sol et Environnement.....	4
C) MA MISSION.....	5
I) Principales méthodes de mesure de l'humidité du sol.....	5
1) Mesure directe de l'humidité massique par la méthode gravimétrique.....	5
2) Mesures indirectes de la teneur en eau des sols.....	6
a) La méthode nucléaire.....	6
b) La méthode diélectrique.....	6
II) Le capteur capacitif.....	10
1) Principe de la mesure : analogie électrique de base.....	10
2) Présentation du capteur utilisé.....	10
III) Caractérisation des performances du capteur.....	11
1) But de cette expérimentation.....	11
2) Protocoles expérimentaux et résultats.....	11
a) Stabilité et bruit.....	11
b) Caractérisation du temps de chauffe du capteur.....	14
c) Caractérisation de l'effet de la température sur l'électronique du capteur.....	16
IV) Traitement des données acquises au cours de l'expérimentation de juillet 2003.....	17
1) But de cette expérimentation.....	17
2) Protocole expérimental.....	18
3) Résultats et solutions apportées.....	19
a) Signal obtenu.....	19
b) Filtrage des données.....	20
c) Relation Capacité=f(humidité).....	23
4) Conclusion.....	25
V) Expérimentation à Montoldre.....	25
1) But de l'expédition.....	25
2) Protocole expérimental.....	25
3) Résultats et conclusion.....	25
D) Conclusion.....	26
E) Bibliographie.....	28
F) ANNEXES.....	29
	30

## Index des illustrations

Figure 1 Organigramme général de l'INRA	3
Figure 2 L'effet destructeur de la méthode gravimétrique	6
Figure 3 Exemple d'une sonde TDR (celle qu'on a utilisée)	9
Figure 4 Répétabilité de la mesure pour l'air	13
Figure 5 Répétabilité de la mesure pour l'alcool	14
Figure 6 Temps de chauffe du capteur pour l'alcool	15
Figure 7 Zoom du temps de chauffe pour l'air	15
Figure 8 Effet de la température sur le capteur	17
Figure 9 Signal obtenu	20
Figure 10 Exemple d'une séquence victime de l'effet "collage".	21
Figure 11 Le capteur recouvert partiellement de terre après retrait du sol	22
Figure 12 Relation signal de sortie / teneur en eau	24

## A) Introduction

Depuis toujours, la maîtrise de l'eau est primordiale, et en particulier dans le domaine agricole.

C'est pour cela que la Recherche s'efforce d'améliorer les techniques permettant de mesurer la teneur en eau des sols afin de quantifier les stocks dans l'estimation du bilan hydrique (variation des stocks, propagation des erreurs...). L'agriculture de précision devient de plus en plus un outil important pour la production, afin d'augmenter le rendement tout en diminuant les pertes. Mesurer la quantité d'eau dans le sol permet aux agriculteurs de savoir où et quand ils peuvent planter le semis. Plusieurs techniques existent pour la mesure de la teneur en eau des sols, mais ces techniques se font localement. Aucune n'est capable de mesurer cette teneur en eau de manière efficace tout en se déplaçant dans l'espace. L'INRA (Institut National de Recherche Agronomique) en collaboration avec d'autres centres de recherches a mis au point un prototype d'une sonde capacitive capable de mesurer la teneur en eau du sol au cours du déplacement d'un engin agricole. Le capteur doit alors avoir un encombrement faible, une dérive thermique et un vieillissement négligeable, une absence de réglage, une répétabilité des caractéristiques, un fonctionnement normal même dans des sols à très forte conductance, et un étalonnage simple.

Cependant, bien que ce capteur capacitif présente de nombreux avantages (facilité de transport, mesure directe, non destruction du milieu), des perturbations dues à divers phénomènes tels que le mauvais contact électrode/sol, le tassement n'ont jamais été étudié (notamment la géométrie des électrodes) avec des électrodes se déplaçant dans le sol. Afin de mieux interpréter les mesures et améliorer la sonde parallèlement, il est nécessaire de connaître les différentes perturbations sur la mesure, et connaître leur ordre de grandeur. La part du signal liée aux variations de teneur en eau et celle liée aux fluctuations du contact sol/électrode sera considérée comme une perturbation.

Mon stage s'inscrit sur deux axes : -la caractérisation du capteur (stabilité des mesures)  
-sur la base d'expérimentation de mesure d'humidité,  
étudier les précisions obtenues avec le capteur en mouvement.

Ainsi, nous allons débiter par une présentation de l'I.N.R.A afin de mieux comprendre dans quelle lignée s'inscrit mon étude, puis nous verrons en détail en quoi consiste ma mission au sein de cet organisme national.

## B) PRESENTATION DE L'ENTREPRISE

### I) L'INRA

#### 1) Historique

L'Institut National de Recherche Agronomique a été créé en 1946, permettant ainsi le regroupement de certains laboratoires de recherches. C'est alors un Etablissement Public à caractère Administratif (EPA), placé sous la tutelle du ministère de l'Agriculture, qui a pour vocation d'organiser, exécuter et publier tous les travaux de recherche relatifs à l'amélioration et au développement des productions végétales et animales. En 1984 l'INRA est transformé en Etablissement Public à caractère Scientifique et Technologique (ESPT) placésous la double tutelle des ministères de l'Agriculture et de la Recherche. En 1998 l'INRA subit une réforme qui a pour but de favoriser une politique d'ouverture et de collaboration qui se traduit par une autonomie plus grande accordée aux unités et aux départements dans la mise en place et la réalisation des politiques de recherche.

#### 2) Organisation

L'INRA est dirigé d'une part par le conseil d'administration, à la tête duquel se trouve le président, et d'autre part, par le Directeur Général. Le président, avec l'aide des hauts conseillers, assure les relations avec l'extérieur et les différents ministères dont l'institut dépend. La direction générale s'occupe, quant à elle, de gérer trois groupes de direction : direction scientifique, direction relationnelle, direction administrative.

#### **Composition :**

- 14 départements de recherche touchant l'agriculture, l'alimentation et l'environnement.
- 21 centres régionaux répartis en près de 200 sites dans toute la France.
- 470 unités *dont 260 unités de recherche, 80 unités expérimentales et 130 unités d'appui et de service.*

# ORGANIGRAMME

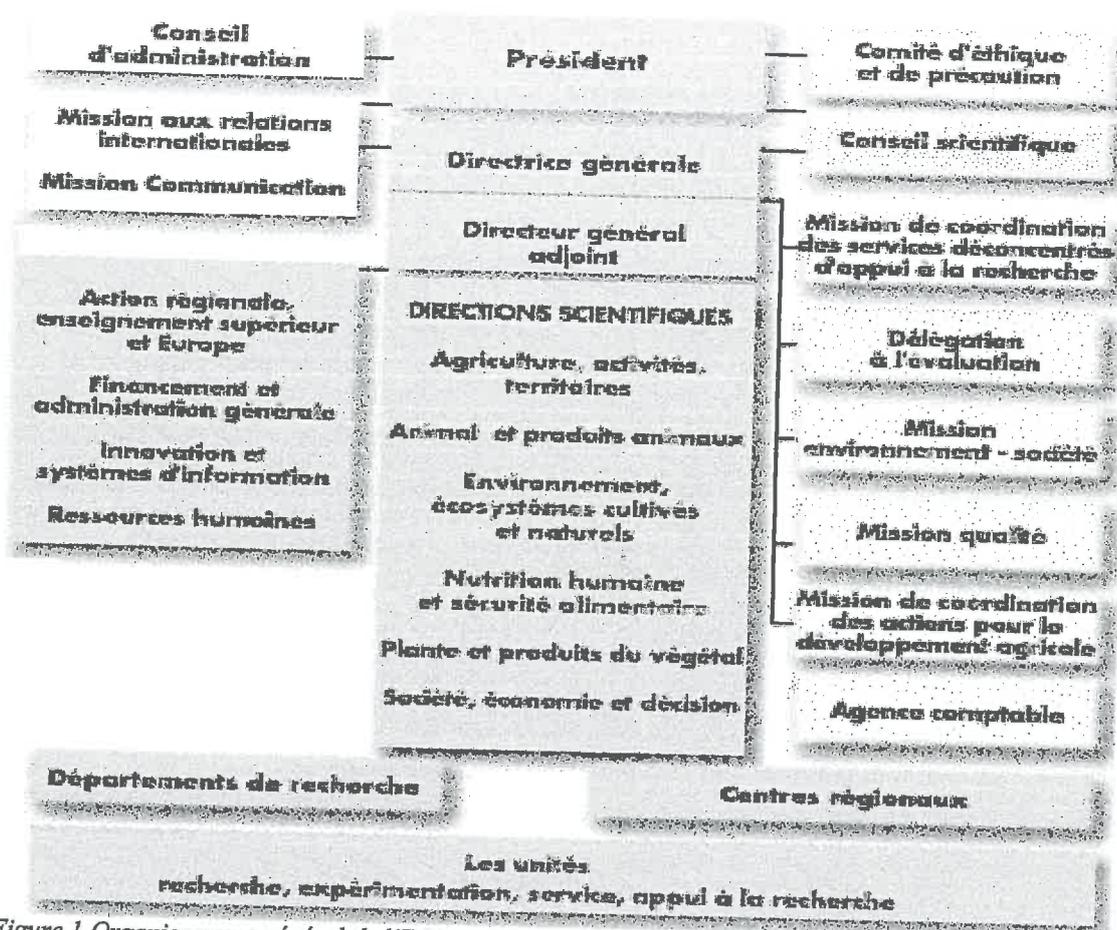


Figure 1 Organigramme général de l'INRA

## 3) Missions

L'I.N.R.A est chargé d'œuvrer au service de l'intérêt public tout en maintenant l'équilibre entre les exigences de la recherche et les demandes de la société, de produire et diffuser des connaissances scientifiques et des innovations, principalement dans les domaines de l'agriculture, de l'alimentation et de l'environnement et enfin de contribuer à l'expertise, à la formation, à la promotion de la culture scientifique et technique, au débat science/société.

## 4) Moyens

Aujourd'hui, l'INRA compte plus de 10 000 personnes dont :  
 - 4 120 chercheurs et ingénieurs,

- 4 470 techniciens et administratifs,
  - 1000 doctorats et 1 000 stagiaires et chercheurs étrangers.
- En 2004, le budget de l'INRA est de 596 millions d'euros.

## II) Le Centre d'Avignon

Le Centre d'Avignon, fondé en 1953, constitue un maillon important du dispositif de l'INRA tant par sa taille que par les thématiques de recherches qui lui sont confiées. Sa vocation est aussi bien régionale que nationale. Son implantation vauclusienne lui a conféré traditionnellement une responsabilité vis à vis de l'agriculture méditerranéenne pour la qualité de la production maraîchère et fruitière et pour l'industrie régionale de la transformation agro-alimentaire.

Ses nouvelles orientations de recherches visent à développer des connaissances et des savoir-faire :

- dans l'ingénierie de la gestion de l'environnement, pour les territoires cultivés et pour la forêt méditerranéenne,
- et dans la maîtrise de la qualité des produits cultivés et transformés pour la santé du consommateur.

Le président du centre est Jérôme Guerif.

## III) L'unité Climat Sol et Environnement

Cette unité est mixte INRA/UMPV (Université d'Avignon et des du Vaucluse).

L'Unité mène des travaux de recherche sur :

- la description des transferts de masse (eau, gaz, particules) et d'énergie dans le continuum nappe- sol- plante- atmosphère;
- le couplage des transferts de masse dans le sol avec les cycles biogéochimiques;
- le développement de la végétation des écosystèmes cultivés en relation avec le climat, les propriétés du sol et les pratiques agricoles.

Ces travaux ont pour objectif finalisé:

- la quantification de l'impact environnemental des pratiques agricoles et des épandages de déchets sur la qualité des eaux (eaux de nappe en particulier) et des sols
- l'optimisation des ressources pour les cultures (irrigation, fertilisation, agriculture de précision) et la mise au point d'itinéraires techniques préservant l'environnement;
- la prévision des rendements et la délimitation des potentialités des zones de production agricole en fonction du complexe agropédoclimatiques ou des changements climatiques.

Les recherches fondamentales portent sur la description des processus, sur leur spatialisation

en allant des échelles locales aux échelles régionales et sur l'élaboration de modèles dynamiques de fonctionnement des écosystèmes. Ceux-ci sont utilisés dans les études plus finalisées comme outil de diagnostic, de pronostic ou de simulation de données en complément des observations expérimentales. Pour accompagner ces recherches, l'Unité mène des travaux méthodologiques sur la caractérisation des propriétés physiques et chimiques des sols (flux hydrique, propriétés de transfert, ambiance géochimique, humidité mesurée par des méthodes géochimiques).

L'unité fonctionne avec 51 agents dont 16 chercheurs dont 8 enseignants chercheurs, 5 ingénieurs, 15 assistants ingénieurs / techniciens, 3 agents techniques, 3 secrétaires, 1 documentaliste et 14 doctorants et post doctorats.

4 équipes : Couplages entre transferts et cycles biogéochimiques - Transferts de masse et d'énergie dans le sol - Télédétection - Fonctionnement de l'espace agricole. De nombreux travaux s'appuient sur le développement de nouvelles techniques et méthodes de mesure spécifiques (Métrologie).

## C) MA MISSION

### I) Principales méthodes de mesure de l'humidité du sol

#### 1) Mesure directe de l'humidité massique par la méthode gravimétrique

La seule méthode de mesure directe de la teneur en eau se fait par un séchage d'un échantillon de sol. Pour extraire l'eau contenue dans un échantillon, celui-ci est placé dans une étuve à 105° pendant une période d'au moins 24 heures pour en assurer le séchage complet. Avec ce protocole, il ne reste dans l'échantillon de sol que l'eau de constitution des éléments solides. La masse d'eau est déduite de la différence entre le poids humide de l'échantillon et son poids sec obtenus respectivement avant et après séchage. Cette masse d'eau est rapportée au poids sec pour obtenir l'humidité massique.

L'humidité volumique est soit mesurée directement en prélevant un échantillon de sol non remanié dans un cylindre de volume connu, soit en combinant l'humidité massique avec la densité apparente sèche du sol.

La méthode gravimétrique est la méthode de mesure de référence à laquelle se rapportent toutes les mesures indirectes. Celle-ci est précise (un écart-type de l'ordre de 0.001 à 0.002 est généralement admis pour des pesées réalisées au centième de gramme près), mais sa mise en œuvre est laborieuse et exigeante en main d'œuvre. De plus, le prélèvement des échantillons de sol est destructeur (comme en atteste la figure 2) ce qui peut être un handicap considérable pour le suivi temporel de la teneur en eau.



*Figure 2 L'effet destructeur de la méthode gravimétrique*

## 2) Mesures indirectes de la teneur en eau des sols

### a) La méthode nucléaire

Les mesures nucléaires utilisent la rétro diffusion d'un flux de neutrons.

La rétro diffusion est basée sur le principe que des neutrons sont ralentis par les collisions avec des atomes d'hydrogène ; une source de neutrons est placée dans le sol, et à proximité un détecteur ; on montre que le nombre de neutrons à faible énergie cinétique reçues par le détecteur est proportionnel à la teneur en hydrogène du sol, dont la principale source est l'eau du sol.

L'inconvénient de cette méthode est le poids de l'équipement et le fait que son utilisation ne soit pas accessible à tout le monde, notamment du fait de la réglementation contraignante des sources radioactives. Néanmoins, les mesures étant non destructives, précises, cette méthode reste une des mieux adaptée pour suivre le bilan hydrique des sols.

### b) La méthode diélectrique

### **- Notion de diélectrique et phénomènes de polarisation**

Un diélectrique est un corps pouvant emmagasiner de l'énergie électrostatique. S'il est placé entre les armatures d'un condensateur, un diélectrique parfait est susceptible de maintenir constante une tension aux bornes de ce dernier, sans autre apport d'énergie. Cette propriété résulte de phénomènes de polarisation des porteurs de charges liés. Dans le cas d'un diélectrique réel, tel le sol, des porteurs libres se déplacent sous l'effet du champ électrique donnant lieu à des phénomènes de conduction électrique. Interviennent également des pertes d'énergie par effet Joule liés à l'existence de forces de frottement. Lorsque le champ appliqué est alternatif, la conduction et les frottements sont à l'origine d'un déphasage retard de la polarisation par rapport au champ appliqué. Pour traduire ces phénomènes, on adopte alors une notation complexe dans l'expression de la constante diélectrique :

$$K = K' - j K''$$

$K$  : permittivité diélectrique complexe

$K'$  : composante réelle de la permittivité, elle traduit les phénomènes de pertes diélectriques à se polariser.

$K''$  : composante imaginaire traduisant les phénomènes de pertes diélectriques responsables de déphasages entre le champ appliqué et la polarisation.

### **- Propriétés diélectriques des sols.**

En général, le sol est composé d'air, de particules minérales et organiques et d'eau. Son comportement diélectrique traduit la permittivité de chacun de ses composants élémentaires. Mais du fait d'interactions complexes entre les différentes phases, aucune loi simple ne permet de prédire son comportement diélectrique global à partir de la seule connaissance des proportions relatives de chacun de ses constituants. Les constantes diélectriques  $K$  pour ces matériaux (air, particules minérales et organiques et l'eau) sont :

Air	1
Particules minérales	3-7
Eau	80

Du fait de l'importante différence entre la valeur de constante diélectrique de l'eau et celles des autres constituants du sol, la constante diélectrique est principalement influencée par les variations de la teneur en eau.

### **- La sonde TDR.**

La vitesse de propagation d'une impulsion micro-onde électrique dans une ligne de transmission parallèle enfoncée dans le sol dépend beaucoup de la teneur en eau du sol, d'où la méthode TDR. Ce principe exploite également la loi physique qui permet de relier la vitesse de propagation d'une onde à la constante diélectrique  $K$ .

Les sondes qui fonctionnent en réflectométrie dans le domaine temporel ou sondes TDR (time domain reflectometry) mesurent l'humidité volumique du sol en place. Utilisée à l'origine pour tester des câbles de circuit électrique, la méthode TDR s'est développée rapidement à partir des années 1980 car elle est d'un emploi relativement simple. Son transport est facile et son fonctionnement est assez simple pour l'opérateur (figure 3). La sonde TDR permet une mesure de l'humidité volumique avec une incertitude inférieure à  $\pm 2\%$ .

La technique consiste à envoyer une impulsion électromagnétique dans un guide d'ondes généralement formé de deux électrodes (parfois trois) métalliques de longueur connue  $l$  et à analyser le temps de transit  $t$ , à partir du signal de retour de l'impulsion.

Les électrodes sont identiques et parallèles, en acier inoxydable (diamètre externe de l'ordre de 3 à 4 mm, et un espacement de 3 à 5 cm) et leur longueur choisie en fonction de l'épaisseur de sol à explorer. Elles sont reliées par un transformateur d'adaptation et un câble coaxial à un générateur d'impulsions de courant alternatif à une fréquence de l'ordre de 1 GHz (domaine des hyperfréquences).

Le comportement d'une impulsion micro-onde se propageant dans une ligne de transmission est similaire en de nombreux points à une onde lumineuse. Des discontinuités dans la ligne à transmission et dans le matériau provoquent des réflexions dans la ligne. Lorsque l'impulsion atteint l'extrémité de la ligne, pratiquement toute l'énergie restante de l'impulsion est réfléchiée en retour par la ligne. C'est un peu comme une onde lumineuse réfléchiée à l'extrémité d'un tube par un miroir.

Ces caractéristiques permettent, grâce à une électronique sophistiquée, de mesurer le temps nécessaire à une impulsion micro-onde pour parcourir une longueur connue d'une ligne de transmission (appelée « guide d'ondes ») enfoncée dans le sol.

La constante diélectrique « apparente »,  $K_a$ , du sol peut-être déterminée grâce à la formule :

$$K_a = \left( \frac{c_0 t}{2l} \right)^2$$

où  $l$  est la longueur du guide d'onde,  $2l$  pris en compte dans la formule pour le trajet aller et retour de l'onde dans le guide, ' $t$ ' le temps de transit en nanosecondes (milliardième de seconde) et ' $c_0$ ' la vitesse de la lumière dans le vide ( $3.10^8 \text{ m.s}^{-1}$ ). Le temps de transit est défini comme le temps nécessaire à l'impulsion pour parcourir dans une direction toute la longueur du guide d'ondes.

Si le sol est complètement sec,  $K_a$  sera alors de 3 ou 4. Si le sol contient 25% d'eau,  $K_a$  sera à peu près de 11-12. Pour les sols agricoles, la valeur  $K_a$  de la constante diélectrique

'apparente' dépend essentiellement de la teneur en eau volumique du sol et est pratiquement indépendante du type du sol.

La relation entre la valeur de  $K_a$  et la teneur en eau volumique a été soigneusement établie par des mesures de  $K_a$  dans des échantillons préparés avec des sols d'humidité parfaitement connue. Cette relation est ensuite utilisée automatiquement pour convertir la mesure de  $K_a$  en teneur en eau volumique du sol.

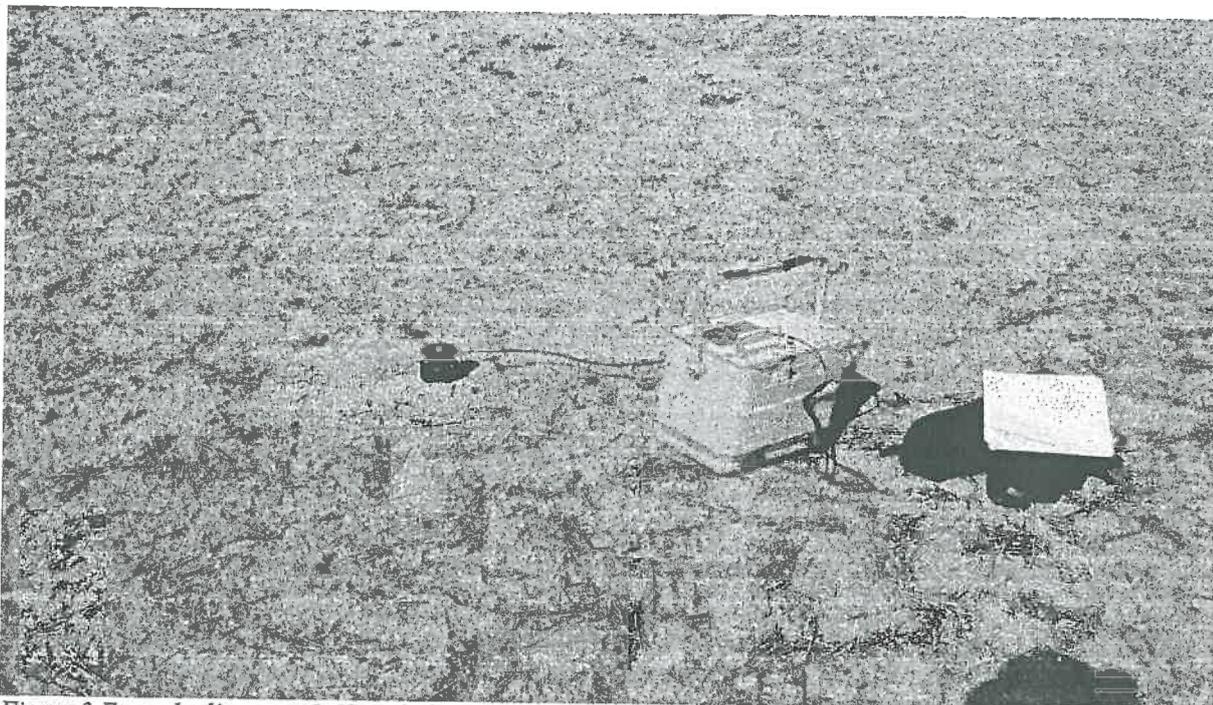


Figure 3 Exemple d'une sonde TDR (celle qu'on a utilisée)

### **- La méthode capacitive**

La méthode capacitive est basée sur la mesure de la permittivité diélectrique relative du sol à l'aide d'un pont capacitif ou d'un circuit électrique résonant. Le sol étant un système triphasique composé d'une matrice solide présentant des pores occupés en proportion variable par des gaz et la solution du sol, son comportement diélectrique global dépendra de la permittivité diélectrique relative, de l'arrangement de la concentration volumique de ses constituants élémentaires, en particulier l'eau.

La constante diélectrique est déterminée en mesurant la capacité d'un condensateur composé d'électrodes et du sol comme milieu diélectrique. La taille des électrodes est généralement beaucoup plus petite (quelques centimètres) que celle des guides d'ondes de la TDR. La conversion analogique du signal délivré par un humidimètre capacitif est relativement standard et ne nécessite pas d'équipement spécifique d'enregistrement. Par conséquent, une telle technique se prête particulièrement bien à l'automatisation des mesures de teneur en eau.

## II) Le capteur capacitif

### 1) Principe de la mesure : analogie électrique de base

Le principe de la mesure consiste à introduire deux électrodes dans le sol. Le système ainsi constitué est alors assimilé, du point de vue électrique à un condensateur avec pertes, capacité parfaite avec résistance de fuite en parallèle. La mesure consiste à introduire ce condensateur dans un circuit excité par un oscillateur et de mesurer la capacité. Le principe de cette mesure varie d'un capteur à l'autre. La fréquence utilisée est généralement comprise entre 1 et 100 Mhz. Elle résulte souvent d'un compromis entre les contraintes technologiques et la fréquence qui doit être la plus élevée possible pour éviter l'influence de la conduction du sol qui va perturber la mesure de la constante diélectrique (effet Maxwell Wagner par exemple).

### 2) Présentation du capteur utilisé

Le pont capacito-résistif MCRM20 développé par AOIP/TECH est le seul produit dans cette catégorie, à réunir en un seul boîtier, les fonctions de mesure de capacité et de résistance de fuite parallèle, selon la technique du pont asservi. Cette technique permet la mesure précise et stable d'une large gamme d'impédances (de l'infini à une centaine d'ohm).

Dans notre cas, le circuit oscille à une fréquence de 20Mhz, car c'est la fréquence la plus élevée autorisée par le pont de mesure AOIP. On est plutôt bas en fréquence et on peut se retrouver à avoir une influence significative de la conductivité du milieu.

Rappelons que la capacité entre deux électrodes conductrices dépend de leur surface, de la constante diélectrique du milieu et de la distance qui les sépare. La valeur de cette capacité croît avec la surface des électrodes et la valeur de la constante diélectrique relative du milieu. Elle décroît avec la distance. La résistance parallèle suit les lois inverses, en ce qui concerne les paramètres dimensionnels et est proportionnelle à la résistivité du matériau.

Une des applications concerne la mesure d'humidité des corps solides ou pâteux, que ce soit statique ou dynamique.

#### 1. Résumé du fonctionnement de la partie électronique.

Le système est bâti autour d'un pont de mesure à fréquence porteuse de 20 Mhz. On en retrouve donc les fonctions essentiels : oscillateur, amplificateur, démodulateur synchrone. Ce pont a la particularité d'être asservi à l'équilibre par l'utilisation d'une boucle de retour commandée à partir d'un comparateur (réseau intégrateur RC de sortie) et d'un modulateur d'amplitude.

#### 2. Spécification.

- \*Précision de mesure (hors étalonnage spécifique) avec capteur standard :  $< \pm 2.5\%$  de l'étendue de mesure
- \*Fréquence de mesure : du continu à 10Hz max  $\pm 1$ Hz (à -3dB)
- \*Niveau de sortie : de 0 à +2.5 V (saturation à 2.8 V  $\pm 0.2$  V)
- \*Dérive en température de la ligne de base :  $< 10^{-3}/^{\circ}\text{C}$  de l'E.M
- \*Dérive en température de la sensibilité :  $< 5.10^{-4}/^{\circ}\text{C}$  de l'E.M
- \*Impédance de charge en sortie mesure : 2kOhm minimum en // avec 1nF maximum
- \*Nombre de gamme de mesure : 1 (correspondant à un capteur capacitif standard)
- \*Fréquence de polarisation du capteur : 20Mhz  $\pm 0.1$  kHz
- \*Niveau de polarisation maximal du capteur :  $V_{cc} \pm 5\%$
- \*Longueur standard de câble capteur (à 100pF/m) : 0.1m
- \*Longueur maximale de câble capteur (à 100pF/m) : 0.2 m
- \*Alimentation : +12V  $\pm 0.5$ V ; consommation  $< 300$ mA  $\pm 10\%$
- \*Boîtier métallique IP55 ; dimensions 130\*180\*70 (en mm) ; masse  $< 1$ Kg.

### III) Caractérisation des performances du capteur

#### 1) But de cette expérimentation

Notre capteur semble donner des valeurs de capacité et de résistivité correctes sur le terrain tout en se déplaçant. Cela dit, nous aimerions mettre en valeur les facteurs susceptibles d'interférer sur nos mesures. Pour cela, nous établissons un cahier des charges à réaliser afin d'étudier la variabilité des mesures données par notre capteur dans le but d'optimiser son fonctionnement. La stabilité et le bruit des mesures prises par le capteur sont donc à étudier. D'autre part, la constante diélectrique des matériaux varie avec leur température. Selon les matériaux, la variation peut-être croissante ou décroissante. Pour valider les solutions adoptées, il convient donc de dissocier les variations thermiques propres au capteur de celles du diélectrique. De plus, une caractérisation du temps de chauffe est à réaliser.

Nous décidons pour mener à bien notre objectif, de travailler en laboratoire afin de contrôler des paramètres tels que la température du milieu, les milieux dans lesquelles on travaille.

#### 2) Protocoles expérimentaux et résultats

##### a) Stabilité et bruit

Nous optons tout d'abord pour travailler dans 3 milieux différents judicieusement

choisis afin de couvrir la gamme de mesure, travailler avec des milieux dont la constante diélectrique est connue et constante dans le temps. Notre choix se porte vers l'eau, l'air et l'alcool. En effet, comme je vous l'ai précisé précédemment (I.b.2), nous connaissons la valeur de la permittivité de l'eau libre :  $K' = 80$ , celle de l'air :  $K'=1$ , celle de l'alcool  $K'=25$ . De plus, les variations de température du laboratoire aussi faible qu'elle soit n'interféreront pas nos mesures, car la constante diélectrique de l'air est assimilable à celle du vide et ne varie donc pas avec la température. Cependant, lorsque l'on a plongé nos électrodes dans l'eau, l'alimentation n'a pas tenue le choc. On a alors changé d'alimentation avec une gamme plus grande (12V à +/- 2V) que l'alimentation originale (résolution de 10%) ce qui confère à notre capteur une plus large possibilité de dépassement de la tension. Du fait du problème engendré l'eau, nous décidons de travailler sur l'air et l'alcool.

L'idée est de placer nos électrodes dans l'air pendant une durée de 2h10 pour juger ainsi de la répétabilité des mesures dans le temps. Nous nous assurons que la constante diélectrique de l'air et de l'alcool reste constante, on maintient la température du laboratoire constante (à l'aide d'un climatiseur), et on mesure la température au plus proche des électrodes pour le vérifier.

#### Matériel :

- Laboratoire équipé d'un climatiseur
- notre sonde capacitive
- un récipient suffisamment grand pour immerger notre capteur
- une acquisition de données (Campbell 21X) avec une interface
- un sèche cheveux pour le chauffage
- un capteur de température (thermocouple : Chromel-Alumel)
- une batterie de 12V avec un débit de 100 Ampères par heure afin de couvrir sans soucis notre zone temporelle de prise de mesures. En effet, notre capteur nécessite d'être alimenté avec une tension de 12V et un ampérage de 350mA par heure.

Ainsi, on veut avoir une idée de la dérive à long terme et des variations à court terme. L'utilisation d'une acquisition de données est nécessaire afin de collecter nos mesures tout en les contrôlant.

On veut acquérir 3 données : la température, la résistivité et la conductivité. Il nous faut donc utiliser 3 voies d'entrées sur notre interface. Nous décidons d'établir deux protocoles d'échantillonnage (dessin ci-dessous). En effet, pour avoir l'idée de la dérive à long terme, nous désirons prendre une mesure des 3 paramètres recherchés toutes les 10 secondes. De plus, en parallèle avec cette prise, on veut prendre 300 mesures avec un intervalle de temps d'un dixième de secondes toutes les 10 minutes afin de mieux caractériser les variations à court terme (bruit de capteur).

#### *Deux protocoles d'échantillonnages*



10s

10 min

On débute l'expérience sur une acquisition au  $1/10^{\circ}$  pour avoir une idée du bruit à la mise sous tension du capteur.

### Résultats.

A l'issue de ces prises de mesures, on décide d'élaborer un graphique de l'évolution de la capacité et de la résistivité en fonction du temps (figure 4).

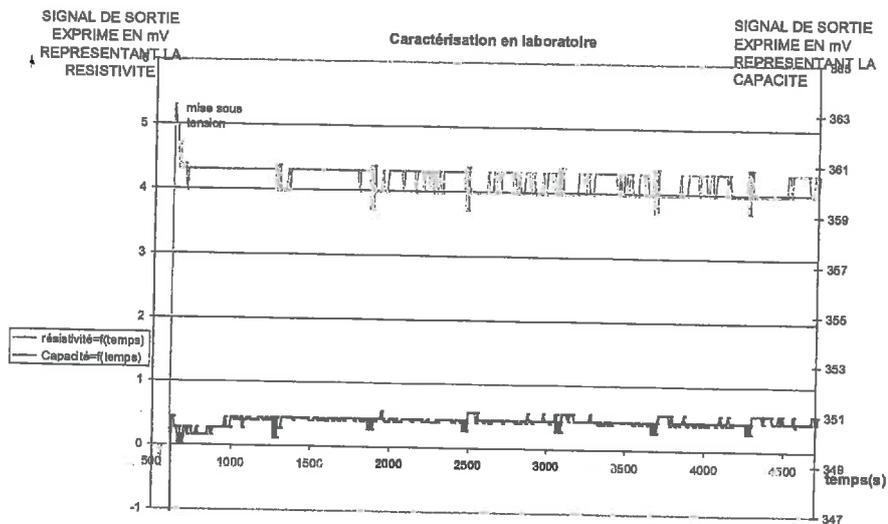


Figure 4 Répétabilité de la mesure pour l'air

Nous avons sur la figure 4 le graphique représentant l'évolution du signal de sortie caractérisant la capacité et la résistivité en fonction du temps pour l'air. Le capteur a une très bonne répétabilité dans le temps, ce qui est très satisfaisant.

Comme le montre la figure 5, les valeurs relevées par notre capteur avec les électrodes plongées dans l'alcool sont également répétables dans le temps. Les valeurs des résistivités n'ont pas été prises en compte, car la partie résistive ne fonctionne plus correctement. Des réparations seront à envisager. Tout au long de la manipulation, le capteur donne des valeurs de capacité très homogène. Les expérimentations dans l'air et l'alcool montrent que le capteur offre une bonne répétabilité des mesures sur des périodes de quelques heures de fonctionnement et que la correspondance avec l'humidité conduira à l'élaboration de cartographie hydrique de bonne qualité.

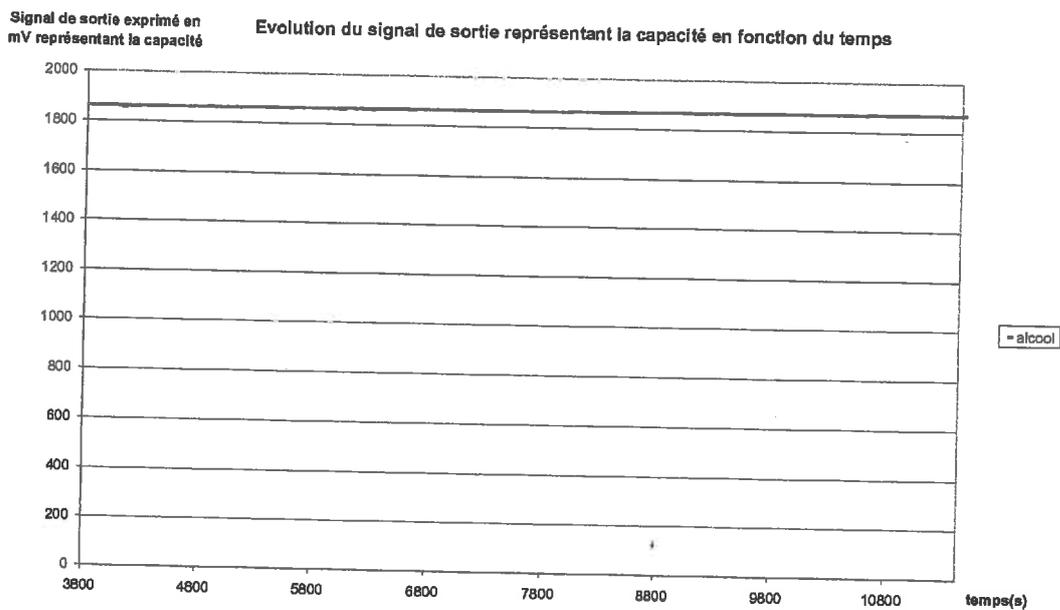


Figure 5 Répétabilité de la mesure pour l'alcool

### b) Caractérisation du temps de chauffe du capteur

Dans le but de savoir à partir de quel moment après mise sous tension du capteur nos mesures sont valides, nous mettons en valeur le temps de chauffe du capteur. Pour cela, nous débutons l'expérience de la caractérisation de la stabilité de nos mesures 10 minutes après avoir lancé le début de l'acquisition afin de bénéficier du programme au  $1/10^{\circ}$  ce qui permet alors d'avoir une idée du bruit à la mise sous tension du capteur. On se focalise sur les parties correspondants aux débuts des manipulations avec l'air et l'alcool pour caractériser ce temps de chauffe.

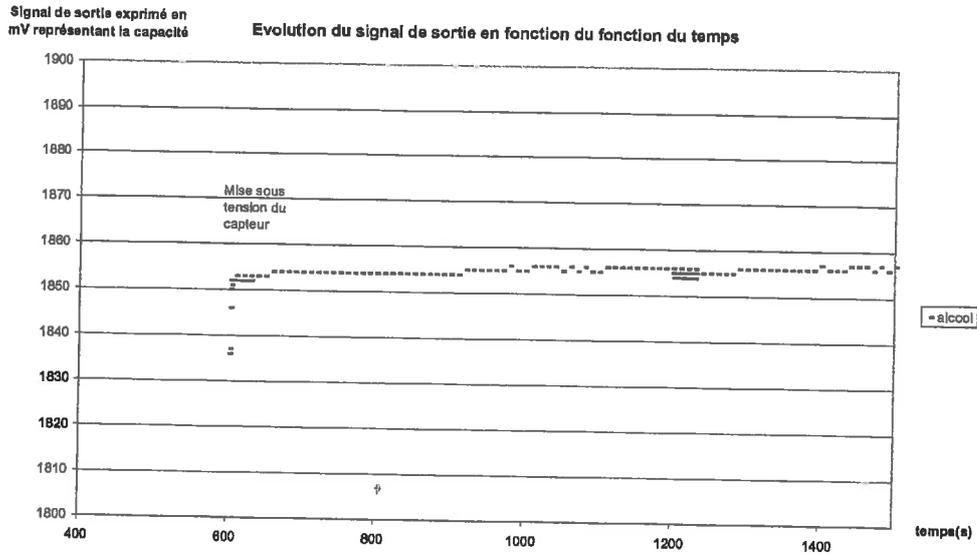


Figure 6 Temps de chauffe du capteur pour l'alcool

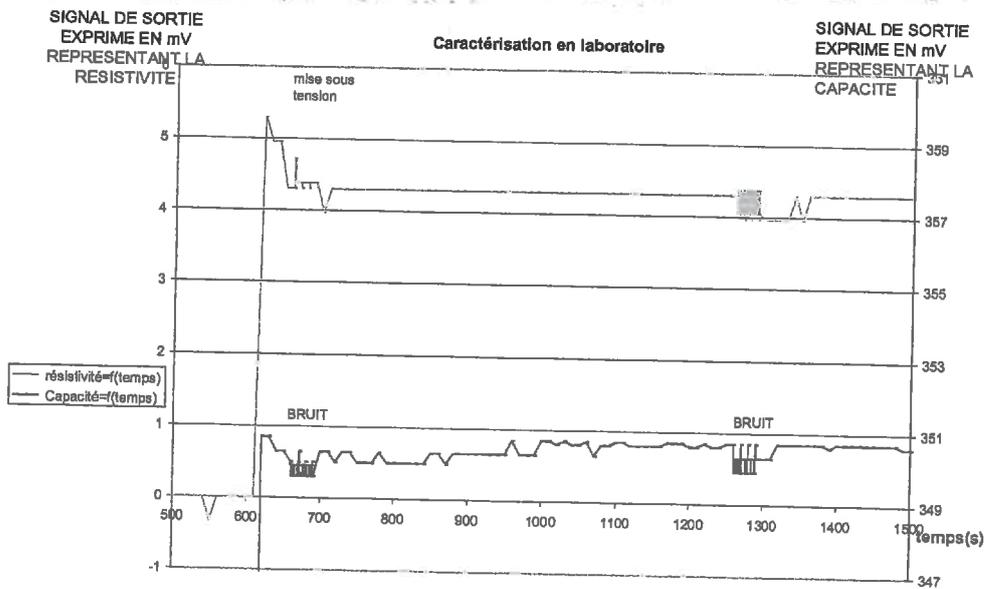


Figure 7 Zoom du temps de chauffe pour l'air

On peut voir clairement, sur le zoom (figure 6 et 7) que notre capteur connaît un temps de chauffe. En effet, j'ai marqué le moment où on met sous tension le capteur par la flèche annoté 'mise sous tension', et nous pouvons voir que le capteur a besoin d'une période de stabilisation d'environ 10 minutes. Dans la notice, il est indiqué que le temps de chauffe est de quelques minutes, ce qui conforte nos résultats. Cependant, dès la mise sous tension notre capteur donne des valeurs du signal de sortie représentant la capacité proches à 3 millivolts près des valeurs courantes ce qui montre qu'il est opérationnel très rapidement, et que l'omission par l'utilisateur du temps de chauffe n'influerait pas de manière conséquente ses prises de mesures d'humidité.

La précision de nos points est liée d'une part à la résolution de la centrale et a un bruit résiduel du capteur qui reste inférieur au millivolt probablement dû au protocole de numérisation des signaux analogiques qui font appel à des temps d'intégration différents.

### **c) Caractérisation de l'effet de la température sur l'électronique du capteur**

Afin de voir si la température a un effet sur l'électronique du capteur, nous faisons un test bref avec un sèche cheveux. En effet, nous chauffons pendant 5 minutes le boîtier du capteur afin d'avoir dans un premier temps une idée grotesque de l'effet température. La mesure est très altérée, mais cela n'est pas inquiétant car le chauffage effectué n'est pas représentatif des conditions opératoires. On effectue alors une étude plus approfondie de l'effet de la température sur le boîtier. La caractérisation est donc réalisée à l'aide de la chambre climatique afin d'imposer des conditions de température plus proche de la réalité. L'ensemble du dispositif est soumis à des températures comprises entre 5°C et 40°C avec un pas de 5°C en chambre climatique.

Dans la chambre climatique nous plaçons notre capteur ainsi que nos électrodes. Nous imposons des températures avec une étendue de mesure de 30°C. Nous commençons à 10°C, puis nous passons à 20 °C. Ensuite nous augmentons la température avec un pas de 5°C jusqu'à 40 °C. Pour chaque palier de température, nous prenons 10 valeurs de capacité et de température à un intervalle de temps régulier d'environ une minute. La prise de nos mesures est réalisée à l'aide de l'acquisition de données. Deux voies de mesures sont utilisées : une pour la capacité, l'autre pour la température, que nous nous efforçons de relever au plus près du boîtier à l'aide d'un thermocouple. Ensuite, nous moyennons ces valeurs afin d'établir une relation Capacité=f(Température).

### **Résultats**

Une fois la prise de mesure effectuée nous représentons l'évolution de la capacité en fonction de la température au plus près de l'électronique (figure 8).

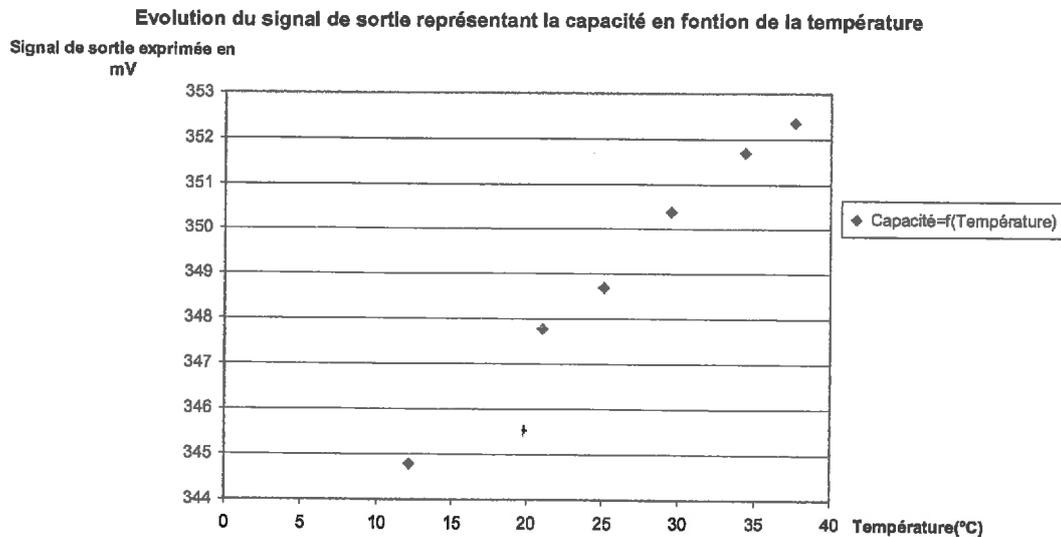


Figure 8 Effet de la température sur le capteur

Pour chaque palier de température nous constatons que la valeur de la capacité est très régulière. Le changement de palier entraîne un décalage de 2 à 3 millivolts la valeur de la capacité. Notre capteur ne semble pas être affecté par le changement de température si ce n'est ce décalage de quelques unités.

Par conséquent, la dérive thermique de notre capteur est satisfaisante.

#### IV) Traitement des données acquises au cours de l'expérimentation de juillet 2003

##### 1) But de cette expérimentation

En juillet 2003, des expériences ont été réalisées par une équipe de chercheurs de l'I.N.R.A d'Avignon (A.Chanzy, JC Gaudu...) afin de tester la capacité du capteur capacitif et de cartographier l'humidité lorsque celui-ci est en mouvement.

## 2) Protocole expérimental

1. Cette expérimentation consistait à effectuer des mesures de teneur en eau sur une parcelle de 50m/50m, en séparant le terrain en 2. Sur le dessin ci-dessous est présenté la manipulation. La partie I du terrain est utilisée le 17 et 18 juillet 2003 alors que la partie II est utilisée le 31 juillet et le 1 août 2003. Les deux parties ont été arrosées de la même façon . On a arrosé deux bandes de terrain, la première avec un apport simple d'eau (H<sub>2</sub>O), la seconde en doublant cette quantité. Mon travail s'inscrit donc dans un cadre de traitement des données prises au cours de cette expérimentation. Pour cela André Chanzy, me confie une copie de ces données sous forme de fichiers informatiques de deux types. En effet, dans un premier temps des fichiers en partie déjà traités, c'est-à-dire que des courbes ont été réalisées, et dans un second temps des fichiers de données non traités.

1	2	3					
			2H <sub>2</sub> O				
			H <sub>2</sub> O				

PARTIE I

PARTIE II

*Manipulation de l'été 2003*

Sur 1, 2, et 3 on a joué sur la vitesse d'avancement du tracteur, sur la position des électrodes, et sur l'orientation du « coutre ».

Les mesures réalisées font donc intervenir 3 facteurs dans leur mise en œuvre :

- la vitesse d'avancement du tracteur
- la position des électrodes
- l'orientation du coutre.

Les 2 vitesses sont : L800 (soit environ 0.5m/s) et L1600 (soit environ 1m/s).

Les 2 positions des électrodes sont : vertical (E1) et horizontal (E2).

### 3) Résultats et solutions apportées

Nous avons recensé 10 réglages différents.

Nous avons réuni tous les fichiers correspondants au même réglage dans un même dossier.

En voici la synthèse :

1E1v800	1E1v1600	2E1v800	2E1v1600	1E2v800
0717_1	0717_4	0717_5	3107_4	0718_1
0717_2	0718_8	0718_5	0801_4	
0717_3	3107_2	0718_6		
0717_7	0801_2	3107_3		
0718_7		3107_5		
3107_1		0801_3		
3107_6				
0801_1				

1E2v1600	2E2v800	2E2v1600	3E1v800	2E1v2000
0718_2	0718_3	0718_4	0717_6	0801_5

**Nota** : -explication de 1E1v800 :1 (position de l'électrode) E1 (électrode verticale) v800 (vitesse d'avancement du tracteur en tour par minute).

-explication de 0717\_1 : 07 (mois de juillet) 17 (jour) 1 (nom donné au fichier contenant les mesures).

#### a) Signal obtenu

A l'issue du premier traitement des données acquises, un signal est obtenu pour chaque réglage. Comme le montre la figure 12, ce signal est bruité et n'est pas exploitable tel qu'il est. Cependant, nous voyons que les zons humides (les 2 pics) ainsi que les zones sèches se révèlent très bien et suit bien la dynamique de la sonde TDR (en vert). La variabilité est forte, car ce signal prend en compte tous les point de mesures qui sont fortement influencés par la variabilité de la qualité du contact entre les électrodes et le sol.

Signal de sortie exprimé en  
mV représentant la capacité

0717\_5 soc=2 v=21800

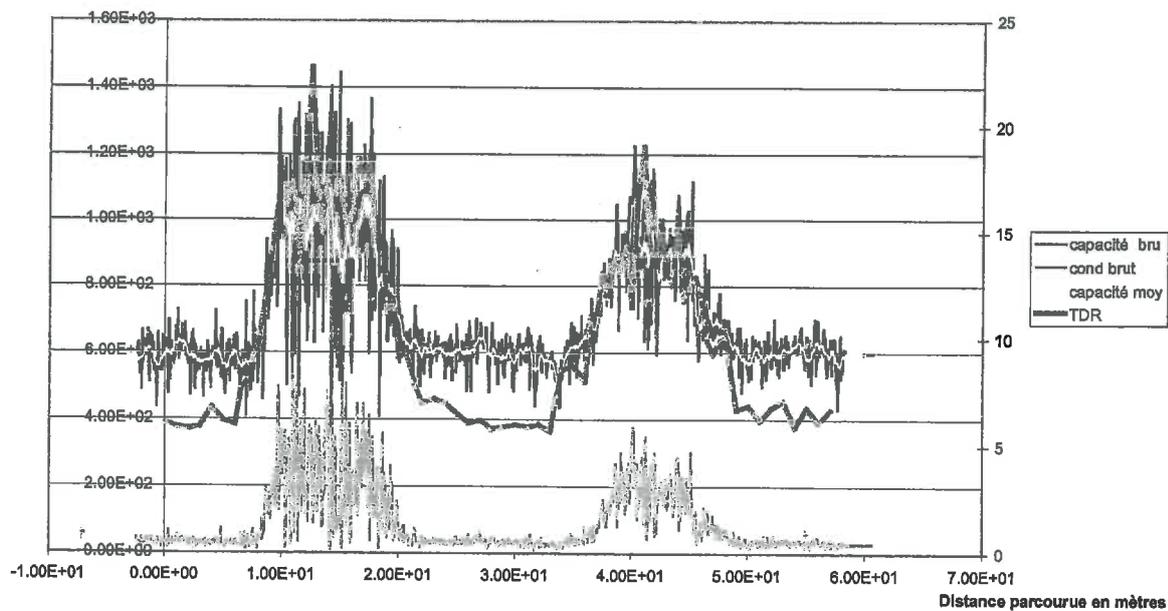


Figure 9 Signal obtenu

## b) Filtrage des données

Pour minimiser les fluctuations observées sur le signal obtenu, on propose de réaliser un

filtrage du signal par un moyennage spatial. Le filtrage des données est réalisé en jouant sur la moyenne des valeurs sur une fenêtre de 10 points et d'affecter la valeur moyenne à la position médiane des points considérés. La figure 9 montre qu'avec des moyennes (en jaune sur le graphe) sur 10 points le signal est considérablement lissé et que les variations suivent bien les valeurs observées à la TDR.<sup>2</sup>

### Problème de collage et filtrages nécessaires de certaines séquences.

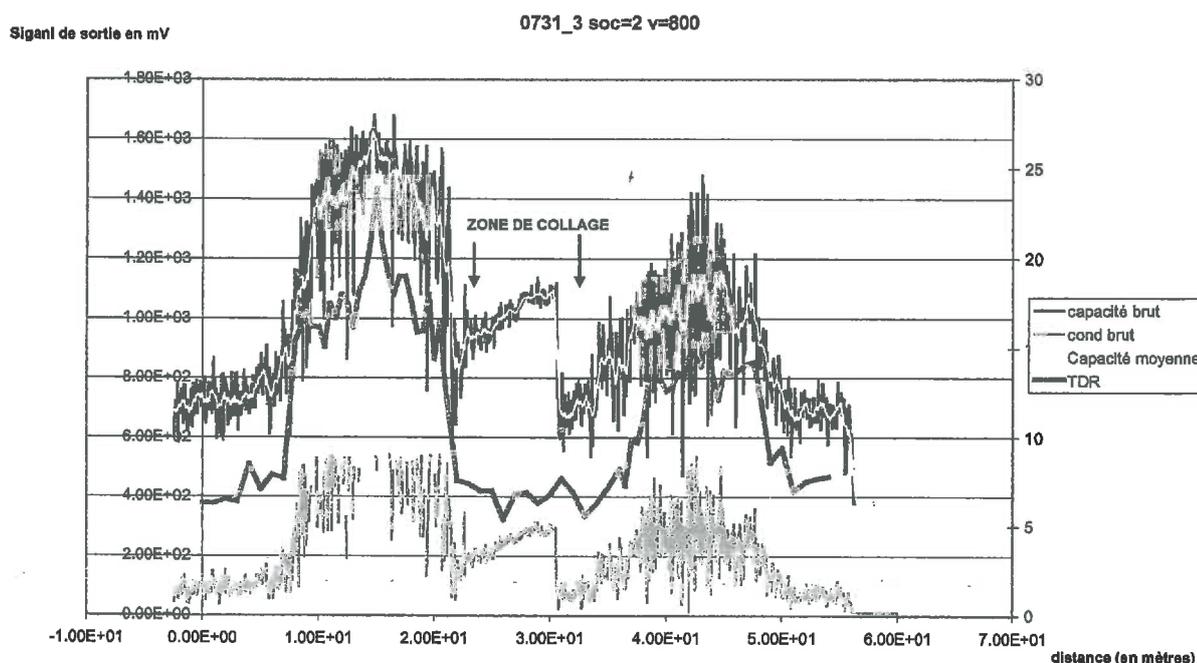


Figure 10 Exemple d'une séquence victime de l'effet "collage".

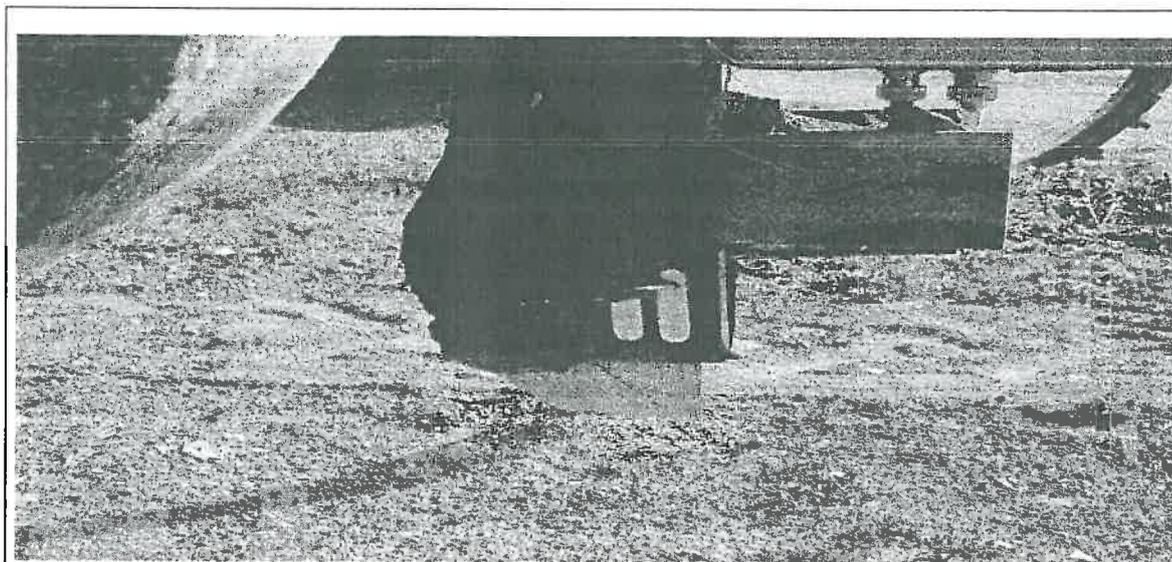
### Un effet parasite : le « collage »

Sur certaines courbes, nous avons noté qu'à certains moments, la capacité augmentait de manière anormale car elle ne suit plus la dynamique de la mesure de l'humidité TDR et qu'elle chutait brutalement avant de retrouver une valeur normale. On s'est alors aperçu que des mottes de terre restaient fixées sur les électrodes pendant le déplacement (voir figure 11), ce qui a pour conséquence une altération des prises de mesures. En effet, la sonde prend alors des mesures au voisinage des électrodes, donc sur la motte de terre fixée. Cette altération cesse lorsque la terre se décolle des électrodes. Cependant, cette gêne ne remet pas en cause le

bon fonctionnement du capteur car c'est la conséquence du collage de la terre sur l'acier. C'est donc un problème mécanique qu'il faudra résoudre en prenant un matériau pouvant être traîné sous la terre sans que celle-ci se fixe sur le matériau. Le problème étant connu, des études sur le choix du matériau sont donc à faire, mais cet aspect sera certainement traité dans le futur. De mon côté, cette information est importante afin d'éliminer des points aberrants.

Etudions un cas particulier afin d'illustrer mes affirmations : l'exemple du réglage 2E1v800 me semble pertinent. En observant la séquence 0731\_3 (figure 10), on remarque l'effet constaté sur la prise de mesure. Sur la figure 10 on voit que cette zone d'aberration manifeste (annotée "ZONE DE COLLAGE") est comprise entre 20 mètres et 30 mètres. En effet, la capacité monte progressivement pour chuter brutalement ensuite. Afin d'éliminer cette zone, j'ai simplement supprimé tous les points relevés à ce niveau

Voici une photo qui montre que les électrodes subissent de temps à autre cet effet de collage.



*Figure 11 Le capteur recouvert partiellement de terre après retrait du sol*

Nous voyons donc clairement que de la terre se fixe sur les électrodes et gêne de ce fait le bon fonctionnement de la sonde capacitive .

Nous avons recensés des séquences nécessitant d'être filtrées de manière importante dont en voici le résumé :

Séquence a traiter	Traitement effectué
-0718_1	-retrait des points compris entre 22m et 38m
-0717_2	-retrait des ponts compris entre 18m et 25m
-0717_4	-retrait des point
-0801_2	-0718_7
-0731_4	-0801_1s compris entre 18m et 24m
-0731_3	-retrait des points compris entre 35m et 45m
	- retrait des points compris entre 18m et 23m
	-retrait des points compris entre 22m et 38m
	- retrait des points compris entre 23m et 38m
	- retrait des points compris entre 21m et 30m

### c) Relation Capacité=f(humidité)

Afin d'établir les possibilités que l'appareil possède, à fournir une estimation quantitative de l'humidité nous avons établi pour chacun des réglages la relation entre la capacité et l'humidité mesurée soit par gravimétrie soit par TDR. Pour cela, nous avons utilisé le géoréférencement des mesures pour extraire des couples de valeurs acquis au même endroit. Pour la mesure capacitive nous avons pris les valeurs moyennées sur 10 points. Nous avons éliminé les valeurs aberrantes décrite précédemment ("collage").

A l'issue de l'interprétation des graphes capacité=f (humidité), il s'avère que certains réglages procurent une meilleur homogénéité des mesures et une variabilité faible par rapport aux autres réglages.

Ces réglages sont: 1E2v1600, 2E1v800, 2E2v1600, 2E1v2000, 2E2v800. Pour chaque réglage on déduit des filtrages apportés (bruit, effet du collage), un graphe (voir en annexe une partie de l'ensemble des graphes réalisés) représentant l'évolution de la capacité en fonction de la teneur en eau afin d'en déduire une relation exploitable.

En conséquence, on peut en déduire que les réglages utilisant l'angle {2} sont mieux adaptés à nos attentes. La position de l'électrode ne semble pas avoir d'importance sur nos mesures.

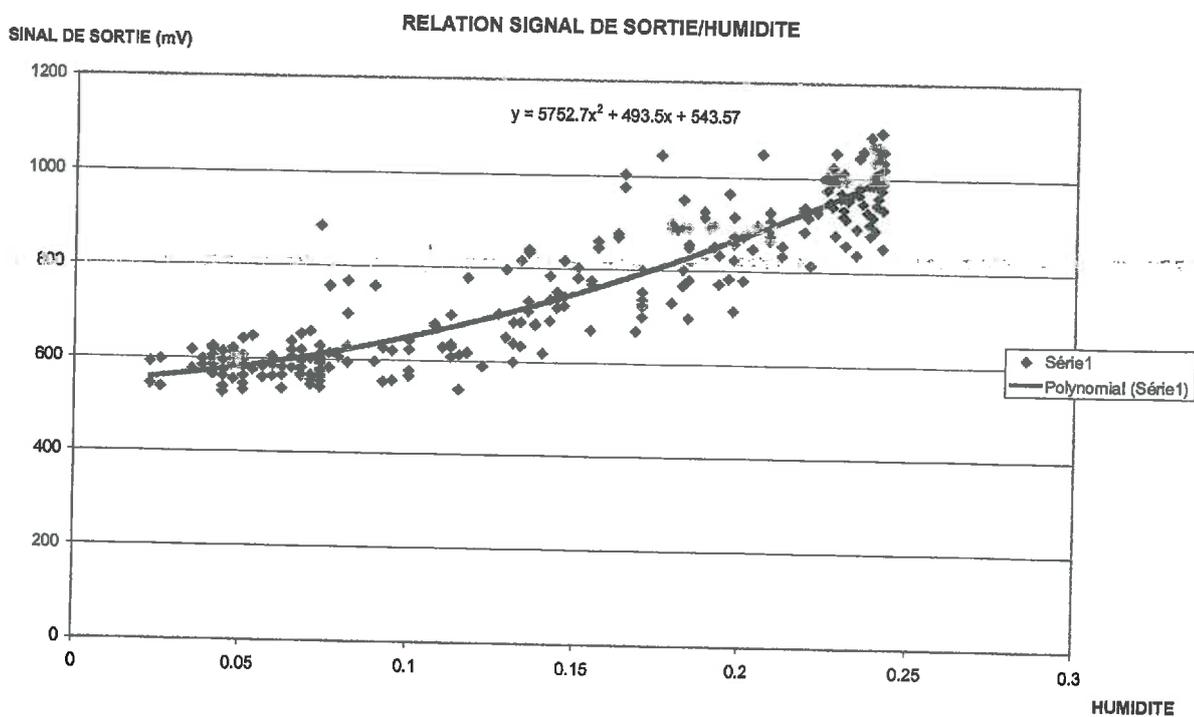
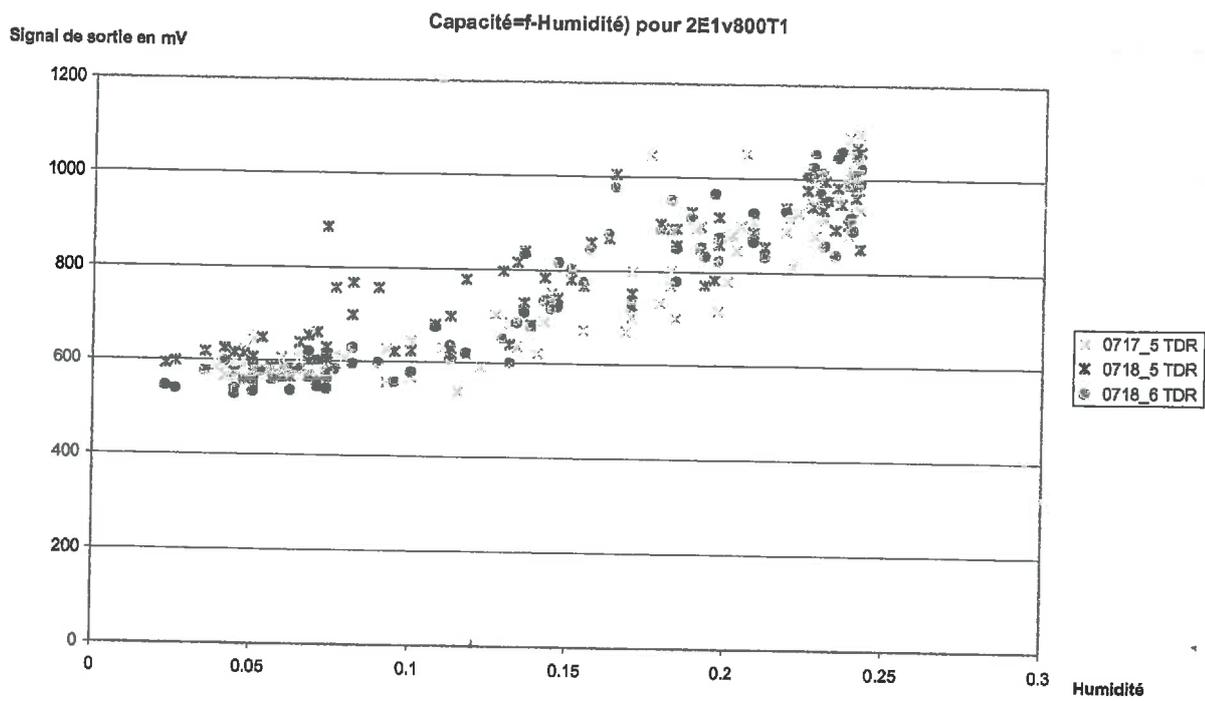


Figure 12 Relation signal de sortie / teneur en eau

Le réglage 2E1v800 est acceptable car nous pouvons tirer une relation reliant la capacité à l'humidité et ainsi en faire la correspondance.

#### 4) Conclusion

A l'issue de l'interprétation des graphes capacité=f (humidité), il s'avère que certains réglages sont mieux adaptés que d'autres pour la prise de mesure de la teneur en eau du sol.

La position de l'électrode (vertical ou horizontal) ne semble pas avoir d'importance sur nos mesures.

Note: une différence d'humidité est révélée sur les deux périodes (T1 et T2). Cela s'explique probablement par le tassement de terrain entre les dates, ce qui provoque une différence sur le contact sol-électrodes et donc engendre une variation sur les prise de mesures.

#### Détails des réglages

<i>BON</i>	<i>MOYEN</i>	<i>MAUVAIS</i>
2E2v800T1	1E2v1600T1	3E1v800
2E1v800T1	1E1v1600T1	1E1v800T1
2E2v1600	2E1v2000	1E1v800T2
1E2v800T1	2E1v1600T2	1E1v1600T2

### V) Expérimentation à Montoldre

#### 1) But de l'expédition

En avril 2004, une expérimentation sur le site de Montoldre (village situé au nord -est de Clermont-Ferrand, dans le département de l'Allier) a été réalisée par des collaborateurs du Cemagref (Institut de recherche pour l'ingénierie de l'agriculture et de l'environnement) à l'aide de notre capteur capacitif (embarqué sur un tracteur en mouvement) et d'un GPS, dans le but d'établir une cartographie d'humidité d'une parcelle de terrain.

Afin de vérifier cette cartographie, mon tuteur de stage et moi-même décidons d'aller à Montoldre.

#### 2) Protocole expérimental

Equipés d'une sonde TDR et d'un GPS, nous avons donc pris des mesures d'humidité en essayant de prendre ces mesures aux mêmes endroits qu'en avril.

En effet, cela a été possible du fait des traces laissées par le tracteur équipé de notre capteur capacitif et des balises permettant le repère de points fixes. Ce décalage temporel pour la prise de mesure ne nous permet pas de comparer les données TDR et celle de la sonde capacitive. Par contre, nous faisons l'hypothèse que les variations spatiales de l'humidité conservent les mêmes structures ce qui nous permet d'appréhender la pertinence de la cartographie réalisée en Avril.

Note : une difficulté s'est présentée quant au géoréférencement de notre GPS avec celui du CEMAGREF.

### 3) Résultats et conclusion

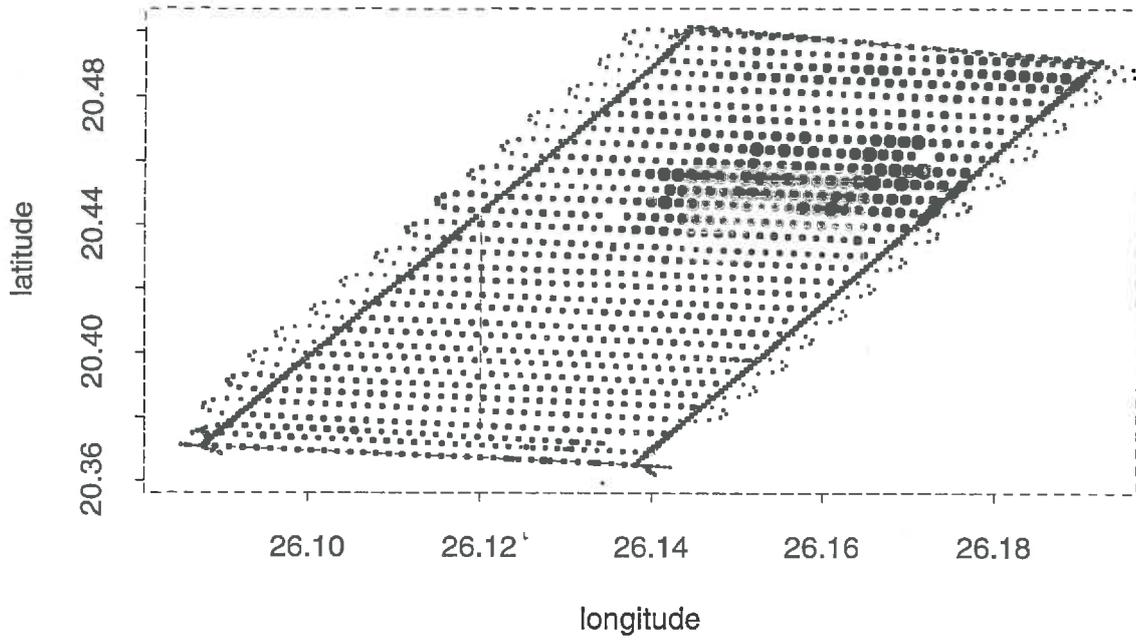
Nous effectuons la cartographie de la parcelle avec les points que les collaborateurs du CEMAGREF ont relevés en avril et on la compare avec celle que l'on a réalisée en mai 2004. Comme on peut le voir sur la carte réalisée en mai ( voir page suivante), nous retrouvons les mêmes zones humides que celle détectées en avril. La taille des points est proportionnelle à la valeur de l'humidité.

Nous remarquons que la zone la plus humide se retrouve au nord pour les deux cartes, et que la zone la plus sèche se retrouve au sud. Il y a donc analogie de la position des zones humides malgré le décalage temporel. Cependant, la prise de nos mesure diffère de celle effectuée par le CEMAGREF. En effet, cela s'explique du fait que les mesures ont été prises avec des résolutions verticales différentes. C'est à dire qu'en avril les collaborateurs du CEMAGREF ont effectué les prises de mesures avec la sonde capacitive embarquée sur le tracteur, et la sonde était enfoncée à environ 10 centimètres dans le sol alors que nos prises de mesure du mois de mai effectuées avec la sonde TDR sont prises à une profondeur de 15 centimètres.

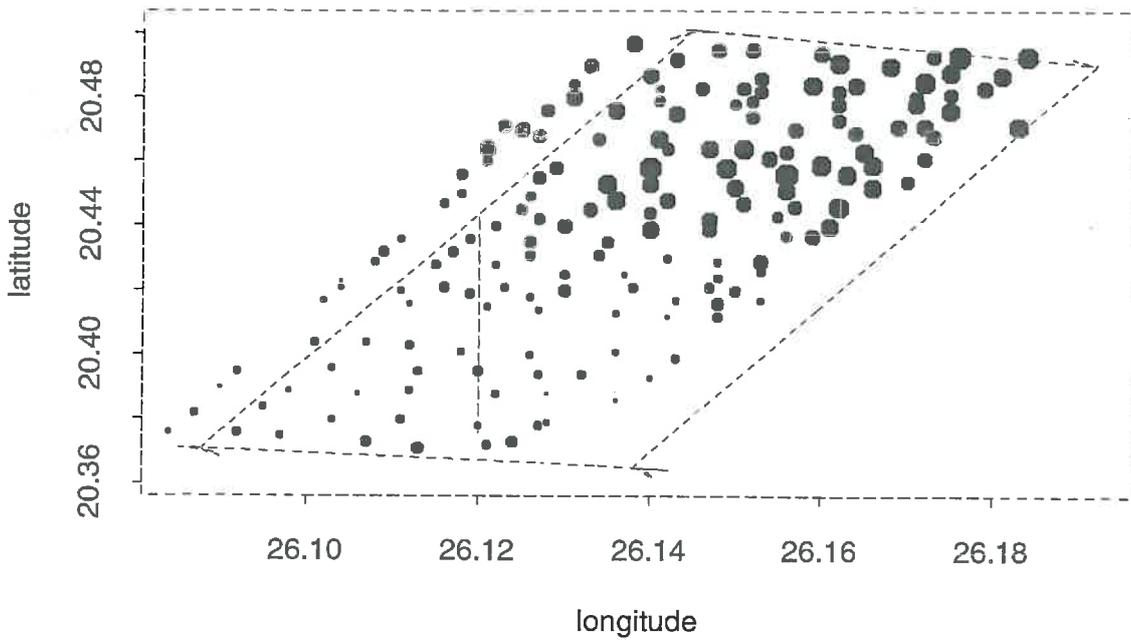
Or, l'humidité en surface est plus variable que celle en profondeur ce qui explique par conséquent en partie les divergences observées.

Sur la page suivante vous est présentée les deux cartes et on peut alors constater les analogies et les divergences.

capacite-Montolde -Avril 2004



TDR-Montolde - Mai 2004



## D) Conclusion

Après les caractérisations que j'ai effectuées, il s'avère que notre prototype de capteur d'humidité apporte entière satisfaction quant à la répétabilité et la validité des mesures dans le temps. Cela dit, on constate que pour les prises de mesures en mouvement effectuées en juillet 2003, l'humidité est parfois faussée lorsque des mottes de terre restent 'collées' sur les électrodes. Un effort est donc à faire au niveau du contact sol/électrode afin de supprimer les effets néfastes du collage. D'autre part, lors des manipulations effectuées avec le tracteur en mouvement, le boîtier contenant l'électronique a été endommagé à plusieurs reprises. Ceci s'explique du fait que la distance électrode/boîtier est petite car actuellement des lacunes persistent quant à la réalisation des câbles coaxiaux suffisamment long pour que le boîtier ne touche plus le sol. L'autre solution réalisable actuellement, est la miniaturisation du circuit électronique, de telle sorte que celui-ci puisse être introduit dans un capteur de petites dimensions, au plus près des électrodes. D'autre part l'effet du chauffage sur l'électronique n'interfère nos mesures de manière significative, et le non respect du temps de chauffe par l'utilisateur ne nuit pas grandement à la prise de mesure.

Ce capteur capacitif en mouvement semble promis à un bel avenir, d'autant plus que le principe de prise d'humidité en mouvement intéresse d'autres domaines que l'agriculture tel que la fabrication du béton...

Le stage que j'ai effectué au sein même d'une unité de recherche m'a permis de comprendre l'importance d'avoir une démarche précise quant au suivi d'un projet. En effet, savoir élaborer un protocole expérimental à partir d'une idée, et d'un objectif à atteindre est un concept primordial dans la recherche. De plus, ce stage m'a apporté une nouvelle vision de la mesure, en particulier sur la difficulté de la mise en oeuvre de certaines mesures en milieu naturel.

## E) Bibliographie

### -Revue scientifique :

-Chanzy A., Bertuzzi P., Bruckler L., Gaudu J.C, 1997 - Mesure de la teneur en eau et du potentiel hydrique dans le sol, dans *L'eau dans l'espace rural*, C.Riou, R.Bonhomme, P.Chassin, A.Nevu, F.Papy, ed., Edition INRA, p. 143-152.

-Mätzler C., 1990- Volume scattering and effective dielectric constants of heterogeneous media, dans *Télévision spatiale : aspects physique et modélisation*, p.223-272, Ecole d'été du CNES, août 1998, Cepadues, Toulouse (FRANCE).

-Gaudu J.C., Mathieu J.M., Fumanal J.C., Bruckler L., Chanzy A., Bertuzzi P., Stengel P. Et Guennelon R., 1993 – Mesure de l'humidité des sols par une méthode capacitive : Analyse des facteurs influençant la mesure. *Agronomie*, 13, p 57-73.

-Chanzy A., Chadoeuf J., Gaudu J.C., Mohrat D., G.Richard & Bruckler L., 1998 – Soil moisture monitoring at the field scale using automatic capacitance probes, *European Journal of Soil Science*, p1-13.

– Rosny G., Chanzy A., Pardé M., Gaudu J-C, Frangi J-P, Laurent J-P, 2001 – Numerical Modeling of a Capacitance Probe Response, published in *Soil Soc.*, p13-18.

– Bolvin H, Chambarel A., Chanzy A., 2004 – Three-Dimensional Numerical Modeling of a Capacitance Probe : Application to Measurement Interpretation, p 440-446.

### -Sites internet

-[www.projet.cnes.fr : 8110/tutoria/debutbgi.htm](http://www.projet.cnes.fr/8110/tutoria/debutbgi.htm)

-[www.illfruth.wha.fr/faraday/dielectric.htm](http://www.illfruth.wha.fr/faraday/dielectric.htm)

-[www.melounou.com/~memoire/liste-des-tableaux.htm](http://www.melounou.com/~memoire/liste-des-tableaux.htm)

-[www.ifrance.com/assocampus/pages/dielectr.htm](http://www.ifrance.com/assocampus/pages/dielectr.htm)

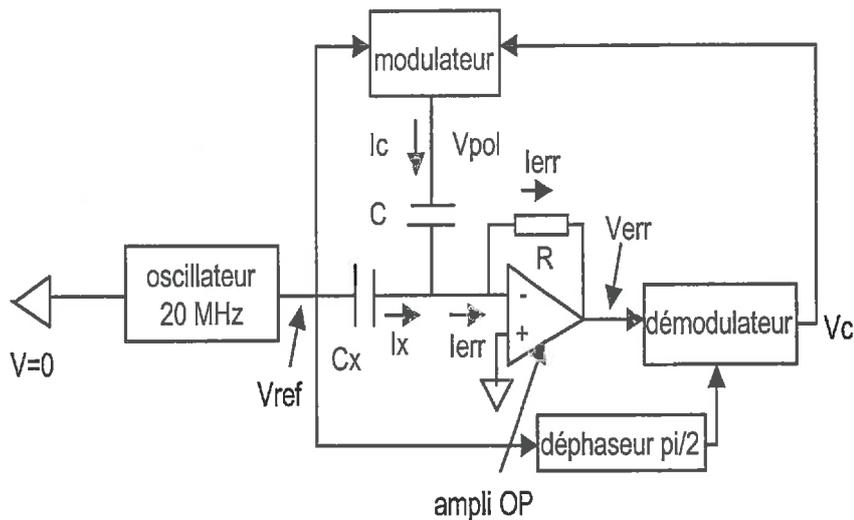
-[www.inra.avignon.fr](http://www.inra.avignon.fr)

## F) ANNEXES

-Résumé du fonctionnement de l'électronique p 31

-Ensemble des graphes obtenus p 32 à 37

## Résumé du fonctionnement de l'électronique du capteur



**Modulateur** : crée un signal  $V_{pol}$  à la fréquence de l'oscillateur, en phase avec celui-ci, et dont l'amplitude est  $kV_c$ , proportionnelle à  $V_c$ .

**Démodulateur** : fournit une tension  $V_c$  égale à l'amplitude de la composante de  $V_{err}$  en quadrature de phase avec l'oscillateur (fonction du déphaseur  $\pi/2$ ).

Lorsque tout va bien, la sortie  $V_{err}$  de l'ampli OP s'établit de manière à ce que les tensions d'entrée  $V_+$  et  $V_-$  soient égales. Ici  $V_+ = 0$ . Les entrées de l'ampli OP ne consomment pas de courant, de sorte que :

$$I_{err} = -V_{err}/R$$

Par ailleurs on déduit du schéma la relation :

$$I_{err} = I_x + I_c = j\omega C_x V_{ref} + j\omega C V_{pol}$$

On remarque que  $I_x$  et donc  $V_{err}$ , est en quadrature de phase avec  $V_{ref}$ . C'est la raison de l'emploi du déphaseur qui précède le démodulateur.

On choisit  $R$  très grand, de sorte que  $I_{err}$  peut être considéré comme nul lorsque  $V_{err}$  ne sature pas aux valeurs des tensions d'alimentation de l'ampli OP.

Comme l'amplitude de  $V_{pol}$  est proportionnelle à  $V_c$ , qui dépend lui-même de  $V_{err}$ , on peut comprendre que la boucle d'asservissement, si elle est bien conçue, problème d'amplitude et de phase de la contre-réaction, conduise à ce que le système se stabilise à une valeur de  $V_{err}$ , et donc de  $V_c$ , stable et qui ne sature pas. On a alors :

$$I_{err} = j\omega C_x V_{ref} + j\omega C V_{pol} \cong 0$$

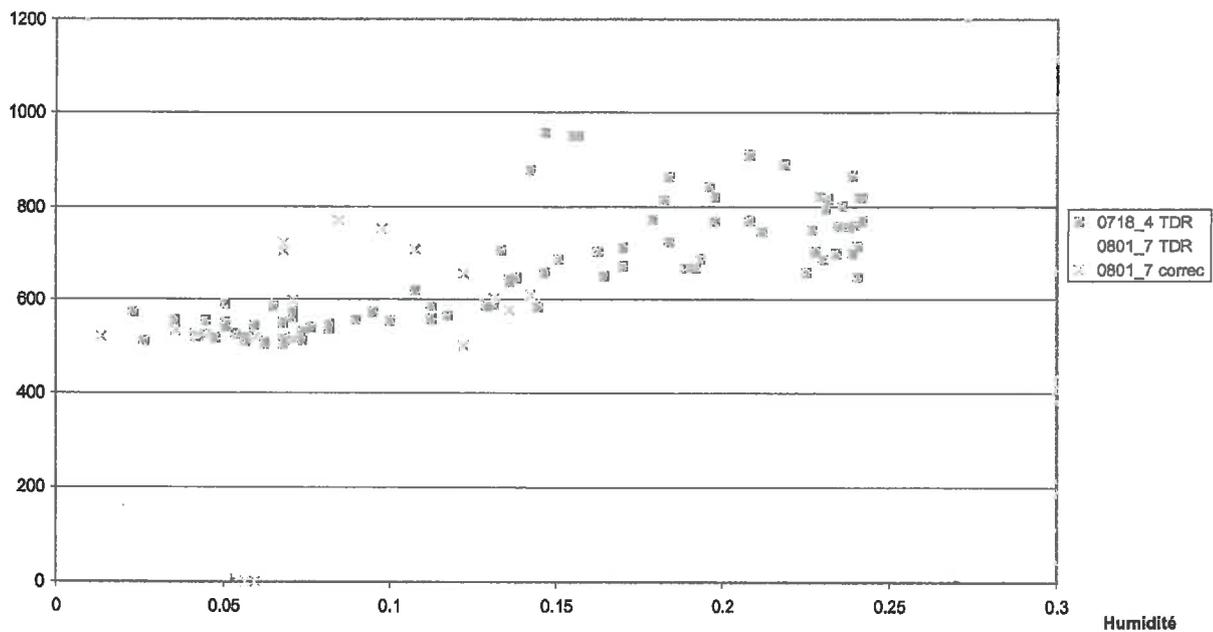
En termes d'amplitudes : en posant  $AV_{ref}$  la valeur de l'amplitude de  $V_{ref}$ , on en déduit :

$$C_x AV_{ref} = CkV_c$$

Pour la mesure de la résistance  $R_x$ , le circuit est analogue, sauf qu'il n'y a pas de déphaseur.

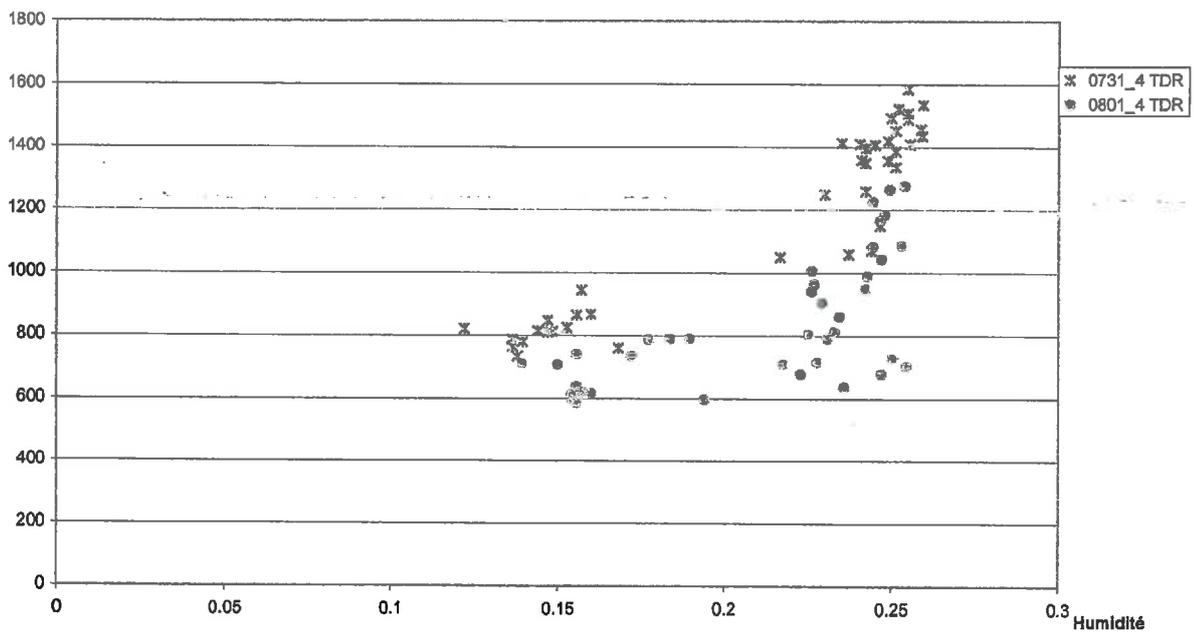
Capacité=f(humidité) pour 2E2v1600T1 + special

Signal de sortie en mV



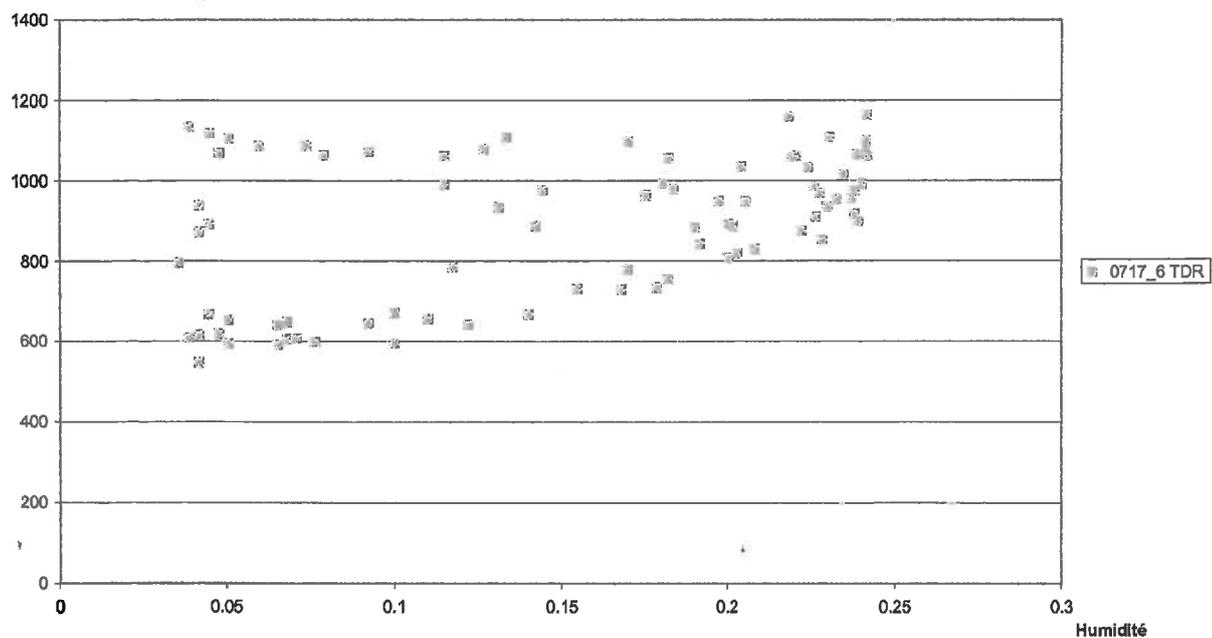
Capacité=f(humidité) pour 2E1v1600T1

Signal de sortie en mV



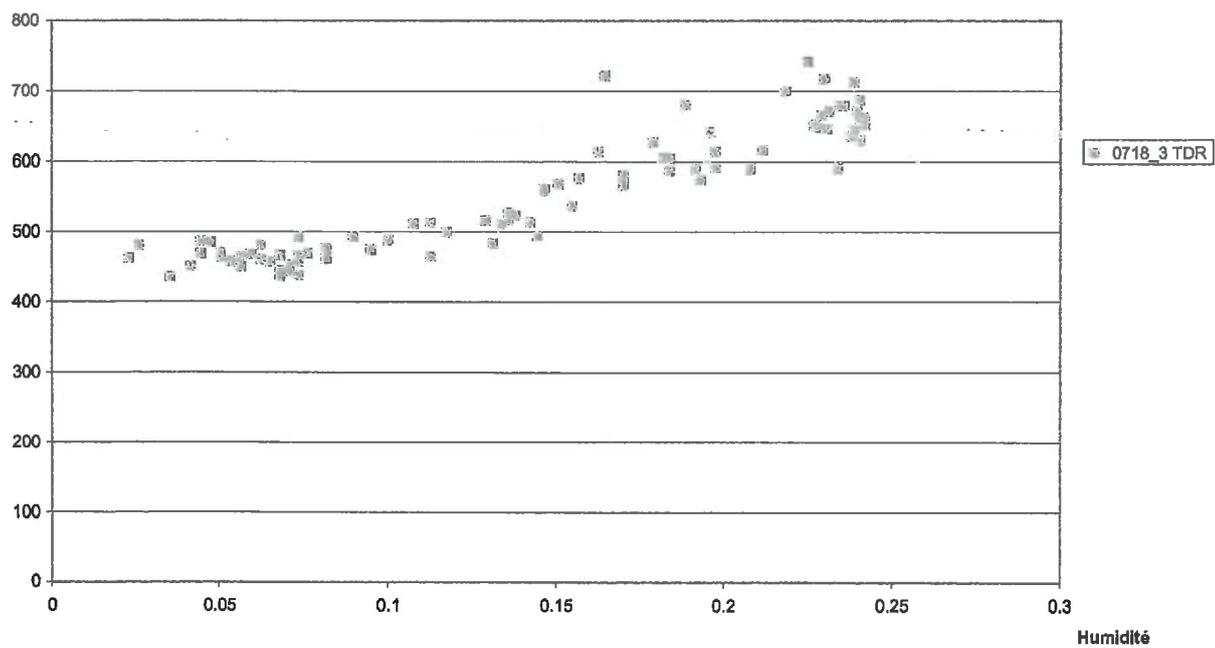
Capacité=f(Humidité) pour 3E1v800T1

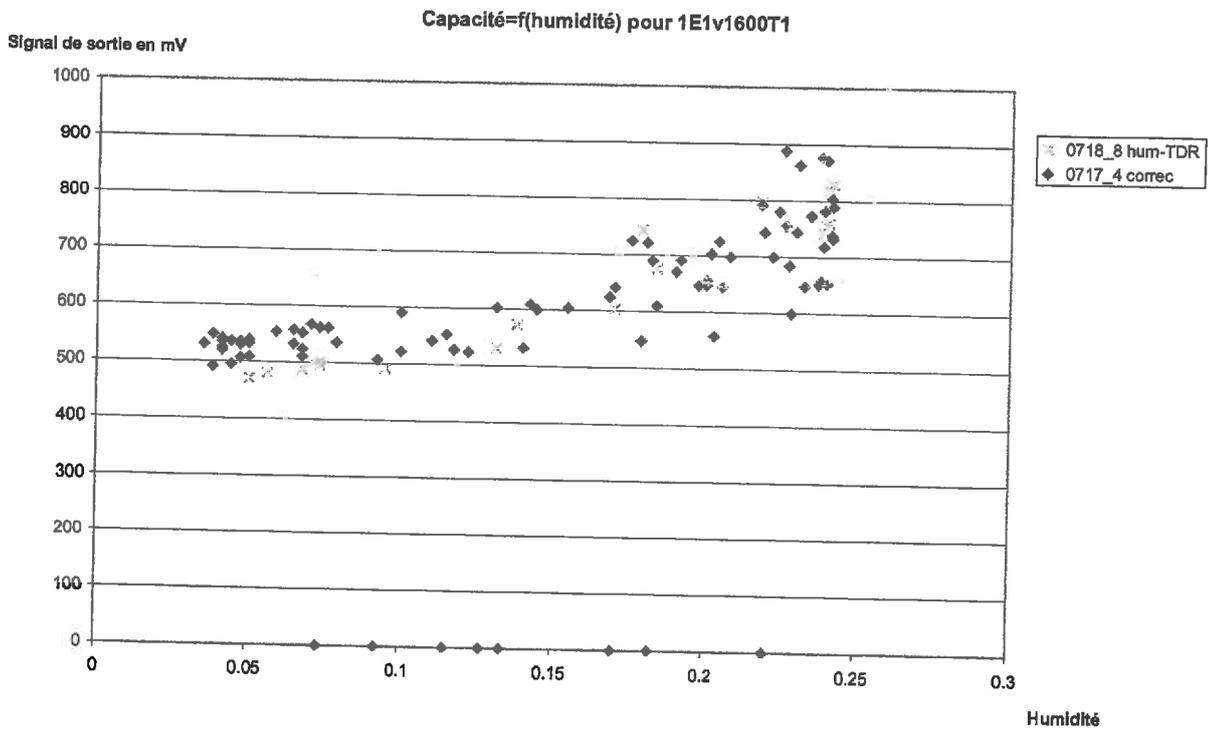
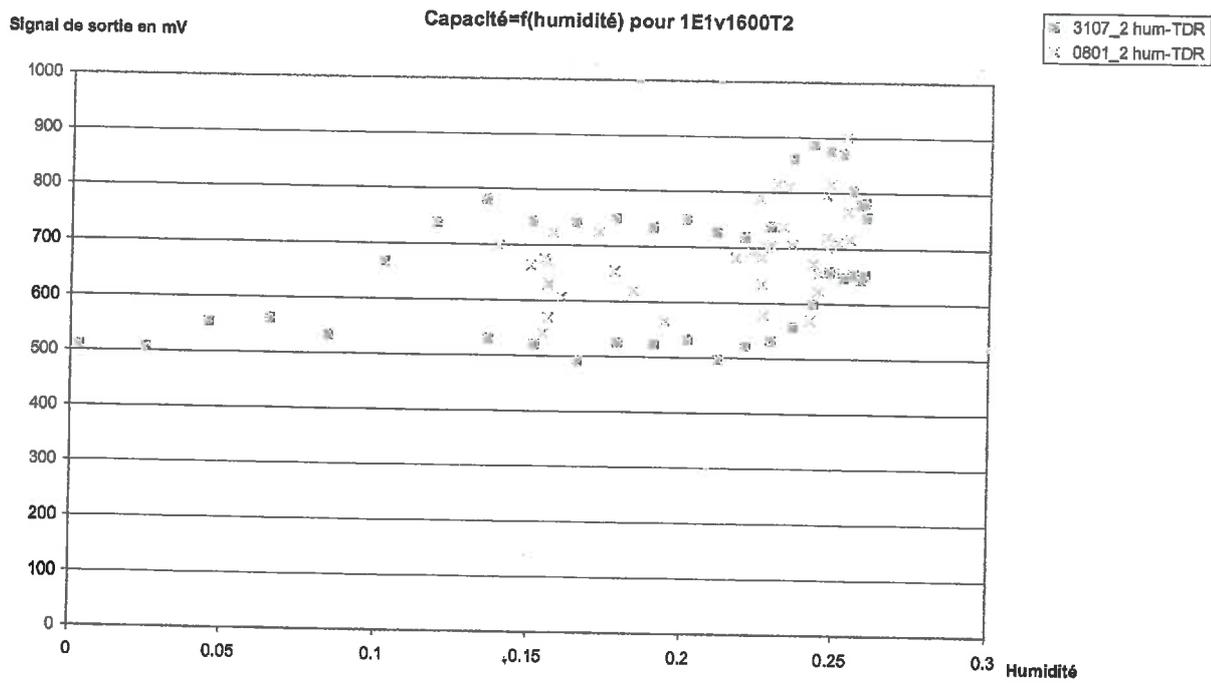
Signal de sortie en mV



capacité=f(humidité) pour 2E2v800T1

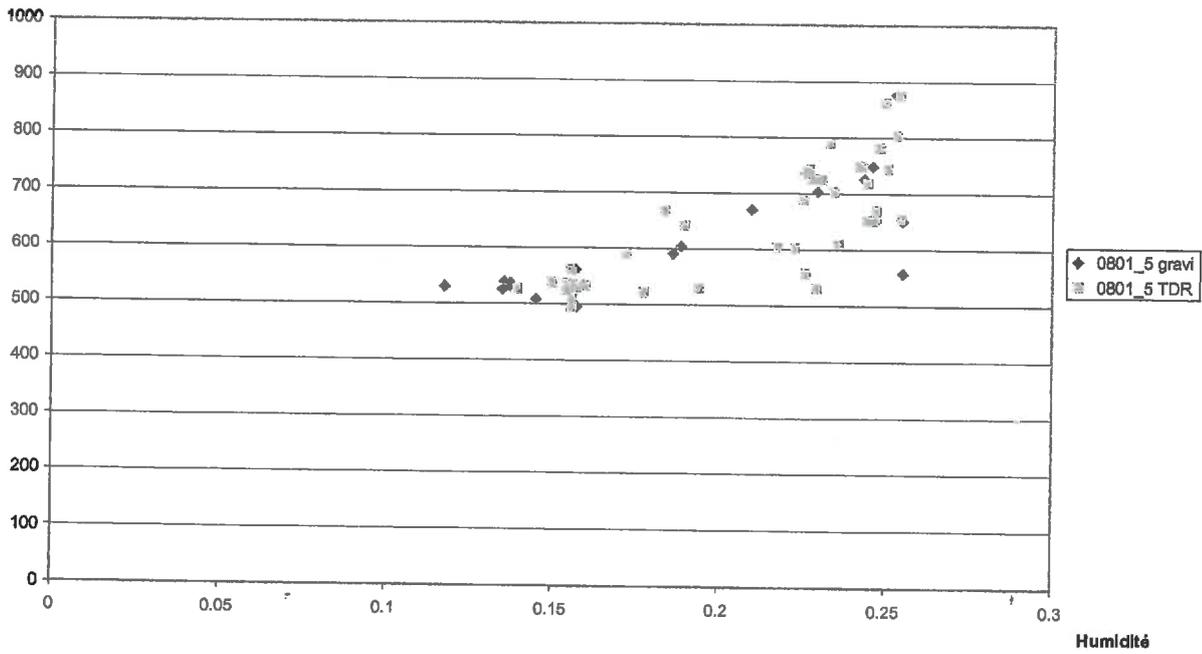
Signal de sortie en mV





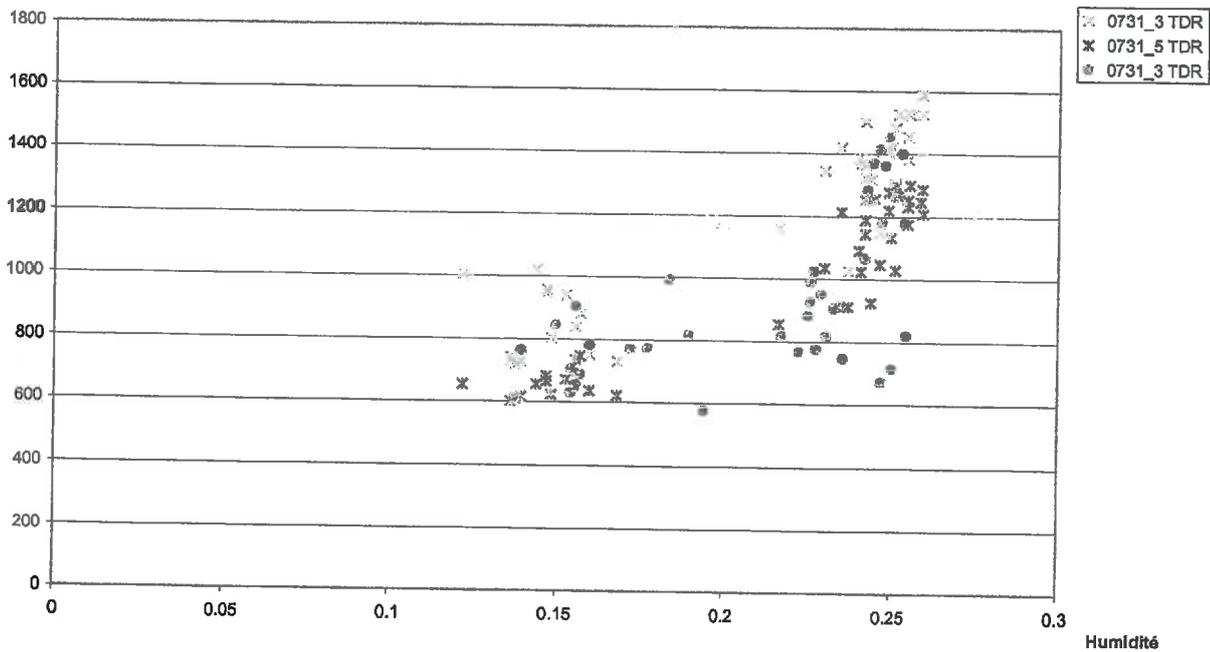
Capacité=f(Humidité) pour 2E1v2000T2

Signal de sortie en mV



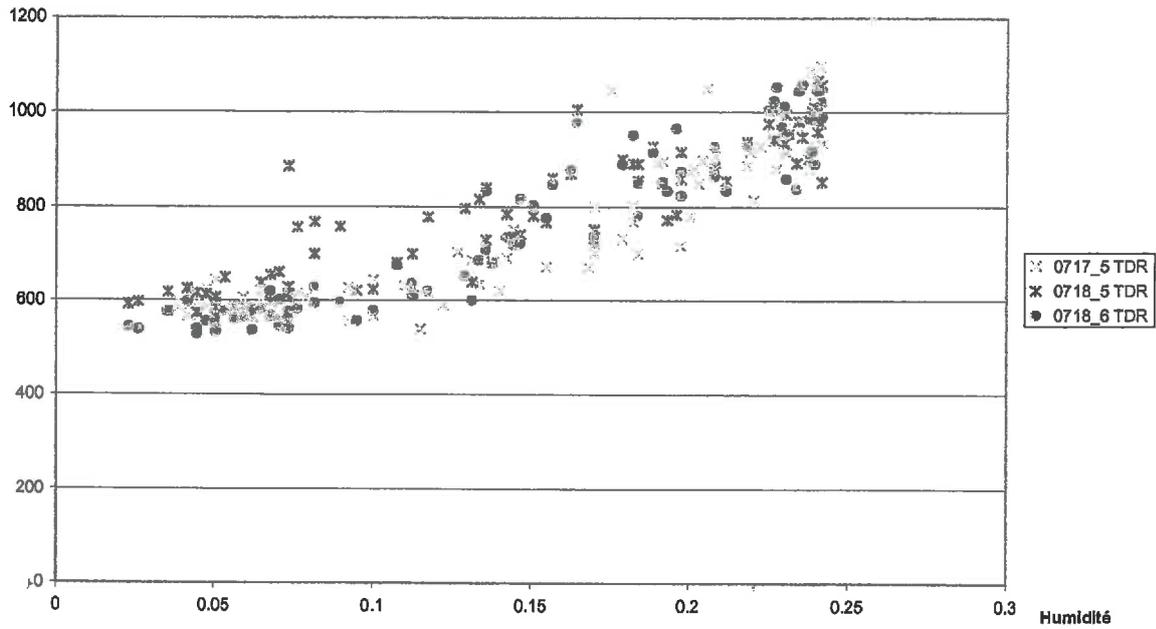
Capacité=f(humidité) pour 2E1v800T2

Signal de sortie en mV



Capacité=f(Humidité) pour 2E1v800T1

Signal de sortie en mV



Capacité=f(Humidité) pour 1E2v800T1

Signal de sortie en mV

