



HAL
open science

Conception d'un capteur distribué pour la surveillance de l'état hydrique des sols

Julien Roux

► **To cite this version:**

Julien Roux. Conception d'un capteur distribué pour la surveillance de l'état hydrique des sols. Micro et nanotechnologies/Microélectronique. INSA de Toulouse, 2017. Français. NNT : 2017ISAT0031 . tel-02050725v1

HAL Id: tel-02050725

<https://theses.hal.science/tel-02050725v1>

Submitted on 27 Feb 2019 (v1), last revised 26 Feb 2019 (v2)

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.



THÈSE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par :

Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse (INSA de Toulouse)

Présentée et soutenue par :

ROUX Julien

le jeudi 28 septembre 2017

Titre :

Conception d'un capteur distribué pour la surveillance de l'état hydrique des sols

École doctorale et discipline ou spécialité :

ED GEET : Micro et Nanosystèmes

Unité de recherche :

LAAS - CNRS - Laboratoire d'Analyse et d'Architecture des Systèmes (UPR 8001)

Directeur/trice(s) de Thèse :

FOURNIOLS Jean-Yves - Prof. - INSA Toulouse

Jury :

FRESSE Virginie - MdC HDR - Telecom Saint Etienne - Rapporteur
TANOUGAST Camel - Prof. - Université de Lorraine - Rapporteur
DRAGOMIRESCU Daniela - Prof. - INSA Toulouse - Examineur
PROBST Jean-Luc - Directeur de recherche - Ecolab-OMP - Examineur
MILPIED Jean - Manager R/D de TE Connectivity - Examineur
CONTARDO Michel - PDG de TCSD - Invité
ESCRIBA Christophe - MdC - INSA Toulouse - Invité

Conception d'un capteur distribué pour la surveillance de l'état hydrique des sols

Résumé

Avec les nouvelles directives de modernisation de l'agriculture, il est de plus en plus nécessaire de contrôler les ressources en eau. Pour cela, des études sont à mener sur la distribution d'une instrumentation pour mesurer l'état hydrique du sol pour contrôler l'irrigation.

Dans le cadre du projet IRRIS, nous réalisons un capteur d'humidité du sol intelligent. Nous allons tout d'abord réaliser le corps d'épreuve de ce capteur. Nous choisissons une mesure capacitive pour obtenir un capteur réactif avec un coût de réalisation faible. Le corps est cylindrique pour pouvoir être inséré facilement dans le sol. Les électrodes sont réalisées par dépôt électrochimique de cuivre sur ce cylindre plastique. Nous concevons ensuite l'électronique de mesure associée à ce corps. Pour cela, nous comparons deux solutions, l'une à base de composants discrets et l'autre logicielle sur microcontrôleur embarqué. Nous les soumettons ensuite à une variation thermique pour les caractériser afin de créer une loi de compensation. Puis nous assemblons notre capteur suivant deux modes. Le premier, le multi capteur, fige les profondeurs mais permet d'intégrer l'électronique et donc réduire les coûts. Le second, le mono capteur, libère le choix de ces profondeurs mais multiplie le nombre de capteur. Nous réalisons un concentrateur permettant la création du réseau de capteurs à l'aide de communication sans fil située dans la bande ISM 868MHz et nous la caractérisons en termes de portée suivant le débit de données pour optimiser cette communication. Enfin, nous observons les résultats de trois campagnes de mesures dans des champs cultivés pour valider le fonctionnement sur différents types de sols et de cultures.

Aux termes de ces travaux de recherches, nous avons créé un capteur permettant la mesure de l'humidité du sol avec un coût réduit par rapport aux capteurs industriels déjà existant. Les expérimentations sur site montrent sa facilité d'insertion ainsi que son bon fonctionnement.

Summary

With the new guidelines of improvement of agriculture, there is a need to control water resources. Studies need to be lead on a distributed instrumentation to measure soil moisture to control the irrigation.

In the project IRRIS context, we realize a smart soil moisture sensor. First, we have to realize the sensing element of this sensor. We choose a capacitive detection to get a reactive sensor despite low cost. The body is a cylinder to be easily buried in the soil. The electrodes are made by electrochemical deposition on the plastic tube. Then, we design the measurement electronic. We compare two solutions, one with discrete components and the other software on embedded microcontroller. We submit those electronics at thermic variations to observe their comportment to create the law of compensation. Next we assemble the sensor according to two ways. The first, the multi sensor, forces the depths of sensing but reduces the costs by pooling the measurement electronic. The second, the mono sensor, frees the choice of depth but multiplies the number of sensors. We create at this step the sensor network thanks a wireless communication placed on 868MHz, an ISM band that we characterize in terms of range depending on the flow rate to optimize this communication. Finally, we observe the results of three measurement campaigns to validate the operating for different soil and cultures.

This study ends in the realization of a sensor to measure soil moisture with a reduced cost relative to the industrial sensor on the market. Experiments prove its ease of use as well as its proper functioning.

Sommaire

<i>Conception d'un capteur distribué pour la surveillance de l'état hydrique des sols</i>	3
Résumé.....	5
Summary.....	5
<i>Sommaire</i>	7
<i>Introduction générale</i>	11
<i>Chapitre 1 : L'agriculture connectée</i>	15
1.1 Contraintes d'une instrumentation distribuée	15
1.2 Etat de l'art pour la mesure de l'humidité du sol	16
1.2.1 Le capteur Decagon	16
1.2.2 Le capteur Sentek	17
1.2.3 La sonde Waterscout	18
1.2.4 La sonde Watermark	19
1.2.5 Le jardin connecté Gardena.....	20
1.2.6 Le pot connecté Parrot.....	21
1.3 Le projet IRRIS	23
<i>Chapitre 2 : Les principes de mesures de l'humidité du sol</i>	25
2.1 Humidité et principes physiques	25
2.2 Conditions expérimentales pour maîtriser un environnement de RH	
contrôlé	26
2.2.1 Séchage du sol.....	26
2.2.2 Calibration des échantillons	26
2.2.3 Stockage des échantillons	27
2.2.4 Réalisation des tests	27
2.3 Signatures électriques de l'humidité	28
2.3.1 Mesure avec contact direct : mesure de la résistivité	28
2.3.2 Mesure sans contact direct : mesure de la capacité	28
2.3.3 Extension vers la mesure de salinité du sol	29
2.4 Vers une architecture de capteur	29
2.5 La mesure microscopique	30
2.5.1 Mesure de l'humidité de l'air à l'aide de membranes	30
2.5.2 Adaptation à la mesure de l'humidité du sol	31
2.6 Conclusion	33
<i>Chapitre 3 : Etude du transducteur</i>	35
3.1 Modèle du capteur	35

3.1.1	Modèle impédance	36
3.1.2	Approche capacitive	38
3.1.2.1	Mesure de l'humidité.....	38
3.1.2.2	Mesure de la salinité	39
3.1.3	Modèle électrique du capteur construit	41
3.1.4	Validation du modèle électrique par la simulation	42
3.2	Simulation aux éléments finis	43
3.2.1	Les principes physiques	44
3.2.2	Le plan d'expérience.....	46
3.2.3	Les paramètres mesurés	47
3.3	Premier design à partir d'une forme de condensateur	48
3.3.1	Design original non optimisé mathématiquement	48
3.3.2	Optimisation du transducteur cylindrique	50
3.3.2.1	Optimisation géométrique	50
3.3.2.2	Choix du matériau	53
3.3.2.3	Optimisation du potentiel de mesure	54
3.4	Changement de forme.....	54
3.4.1	Double spirale	55
3.4.2	Capteurs à branches	56
3.5	Conclusion	57
Chapitre 4	L'électronique de mesure	61
4.1	Introduction.....	61
4.2	Les méthodes de mesures d'une capacité.....	61
4.2.1	Les montages à capacités commutées	61
4.2.2	Le pont de Sauty.....	63
4.2.3	Les oscillateurs.....	66
4.3	Les fonctionnalités	70
4.3.1	Le multiplexage de fréquence pour la mesure	70
4.3.2	Système de lecture de la fréquence.....	71
4.3.2.1	Solution analogique : utilisation d'un convertisseur fréquence/tension	71
4.3.2.2	Solution numérique : utilisation d'un fréquencemètre embarqué ..	73
4.4	Effets thermiques	75
4.4.1	Test de l'oscillateur Colpitts	75
4.4.2	Test de la mesure à l'aide de la chaîne discrète	75
4.4.3	Test de la mesure à l'aide de la chaîne numérique	76
4.5	Conclusion	77
Chapitre 5	L'intégration	81
5.1	Introduction.....	81
5.2	La solution multi capteur	81
5.2.1	Association des capteurs	81
5.2.2	Mutualisation de l'électronique de mesure	84
5.2.3	Le concentrateur communicant.....	85

5.3 Vers l'industrialisation du capteur	87
5.3.1 Le partenaire industriel.....	87
5.3.2 Le transducteur industriel	88
5.3.3 Vers un capteur industriel.....	90
5.4 Le mono capteur	91
5.4.1 Le capteur individuel	91
5.4.2 Effet du moulage sur le comportement du transducteur	92
5.4.3 Le concentrateur transféré industriellement.....	94
5.5 Conclusion.....	97
<i>Chapitre 6 : Les tests effectués</i>	<i>99</i>
6.1 Les sites implantés	99
6.2 Test du multi capteur	101
6.3 Notre solution : le mono capteur	106
6.3.1 Première campagne de mesures.....	106
6.3.2 Nouveau design de l'assemblage mono capteur	109
6.3.3 Troisième campagne de mesures.....	110
6.4 Conclusion.....	112
<i>Conclusion Générale</i>	<i>115</i>
<i>Nos perspectives</i>	<i>123</i>
A court terme	123
A long terme	123
<i>Annexes</i>	<i>127</i>
Annexe 1 : BOM de la carte de mesure du capteur IRRIS	127
<i>Liste des figures</i>	<i>129</i>
<i>Liste des tables</i>	<i>133</i>
<i>Bibliographie</i>	<i>135</i>
<i>Liste des publications</i>	<i>139</i>
Journaux	139
Conférences internationales	139

Introduction générale

L'agriculture se modernise avec le temps. Il est communément admis d'associer l'évolution de l'agriculture avec les révolutions industrielles avec la rupture apportée par la technologie et la notion de révolution verte par des innovations techniques mécaniques et chimiques. La troisième révolution agricole est souvent associée à la troisième révolution industrielle, où l'assolement triennal tend vers des techniques culturales simplifiées et des organismes génétiquement modifiés et une maîtrise des intrants.

Nous pensons que la prochaine étape de cette évolution passera par l'association de l'utilisation de l'intelligence artificielle pour la gestion des exploitations, avec la conjonction de collaborations entre capteurs, machines robotisées conférant une intelligence matricielle qui va accompagner une production agricole raisonnée et adaptée aux spécificités des sols et de leurs évolutions.

Actuellement, beaucoup de machines sont présentes pour cultiver les champs mais encore peu de systèmes de surveillance existent. Il faut maintenant accompagner l'agriculteur pour l'aider dans la prise de décision et la gestion de ses parcelles.

Le contexte climatologique actuel nous impose de plus en plus de contraintes sanitaires et de contrôle des ressources. C'est pour cela que l'irrigation dans l'agriculture moderne doit être surveillé et optimisé. Beaucoup d'exploitants utilisent encore des savoirs faire ou des méthodes archaïques pour gérer l'irrigation. C'est pour cela qu'ont été créées de nouvelles stations pour mesurer dans les parcelles les principales informations nécessaires pour la gestion de l'irrigation.

Dans cette thèse, nous allons étudier la conception d'un capteur d'humidité du sol, très contraint du point de vue coût afin de pouvoir prétendre à une multi prise d'informations par opposition à l'approche actuelle de concentration de la mesure dans une « station météo locale » qui ne répond pas aux variations parfois à quelques centaines de mètres carrés de comportement hydrique du sol.

Dans un premier temps, nous allons étudier l'apport des nouvelles technologies dans l'agriculture et en particulier dans l'irrigation. Nous allons aussi étudier les principaux capteurs existants pour en extraire leurs avantages et leurs inconvénients. Nous étudierons aussi les contraintes inhérentes à la propriété de distribution de l'instrumentation dans les champs au centre du programme de recherche IRRIS, programme multi partenaires de l'appel d'offre FUI.

Dans le deuxième chapitre, nous allons étudier les différentes méthodes de mesures de l'humidité du sol avec l'ambition de réutiliser des capteurs fabriqués en masse dans le marché de l'automobile et de l'électroménager. Nous étudions la possibilité d'effectuer une mesure à l'aide d'un capteur d'humidité de l'air dans un milieu absent de convection ou bien s'il faut focaliser les mesures en exploitant les propriétés diélectriques du sol à l'aide de capteurs macroscopiques.

Dans le troisième chapitre, nous décrirons la conception d'un transducteur « low cost » pour une mesure électrique sans contact direct avec la terre. L'approche de modélisation électrique sera privilégiée pour optimiser le facteur de forme du transducteur en s'inspirant

de formes géométriques simples et aussi « faciles à l'usage et à l'implantation » sur le terrain. Nous optimiserons ensuite ses caractéristiques pour obtenir une réponse simple à exploiter par la suite.

Dans un quatrième temps, nous étudierons l'électronique de mesure à associer à ce transducteur. Nous concevrons tout d'abord la partie de mesure de la capacité puis ensuite du système de lecture en répondant au dilemme analogique ou logiciel. On étudiera ensuite les effets thermiques sur ces solutions pour choisir la plus adaptée.

Dans le cinquième chapitre, nous implémenterons nos conceptions pour créer des prototypes avec deux approches : une solution regroupant plusieurs capteurs associés verticalement et capable de mesurer l'absorption par strates de sol (et limiter les déperditions d'eau au-delà de la zone racinaire des plantes) et une solution mono capteur faible coût et liberté de positionnement. Ces deux solutions seront étudiées pour être facilement industrialisées.

Dans le dernier chapitre, nous observerons les résultats des campagnes de mesures effectuées pour ce capteur. Nous débiterons par les tests du multi capteur pour aboutir sur les deux campagnes de mesure du mono capteur.

Chapitre 1 : L'agriculture connectée

Dans ce chapitre, nous allons étudier les besoins et les attentes apportées par la modernisation de l'agriculture. En effet, les nouvelles techniques introduites (modernisation des engins agricoles, surveillance des pesticides, capteurs pour la surveillance des parcelles) permettent de diminuer la charge de travail ainsi que la pénibilité du travail mais apportent de nouvelles contraintes de déploiement et d'utilisation.

Beaucoup de progrès ont été effectués dans les moyens d'actions comme les machines agricoles mais peu concernent l'irrigation. Cependant avec le nouveau plan d'action « Agriculture – Innovation 2025 » [1], de nouvelles transformations sont à prévoir concernant l'environnement. Les ressources en eau seront plus contrôlées et tout excès sera sanctionné. Un besoin en termes de surveillance est donc créé avec la nécessité de déployer une instrumentation au plus près des cultures pour limiter les erreurs.

C'est dans ce cadre qu'est né le projet IRRIS (IRRigation Ingénierie Services) en collaboration avec des partenaires académiques et industriels pour fournir un capteur d'humidité du sol déployable dans les champs.

1.1 Contraintes d'une instrumentation distribuée

Le principal apport de ces dernières années est la modernisation des machines agricoles. Avec le développement des intelligences artificielles et des calculateurs embarqués, les machines deviennent de plus en plus efficaces et autonomes [2], [3] avec cependant assez peu d'innovations pour une irrigation raisonnée.

Deux techniques d'observation sont utilisées à ce jour :

- Une observation par les agriculteurs associant prévisions météo, connaissances personnelles et visites des cultures pour ajuster la quantité d'eau à apporter ; technique très chronophage avec la difficulté pour spécifier précisément les besoins d'une parcelle.
- Une observation par satellite des parcelles [4], [5]. Cet outil permet à l'échelle d'une « assez grande parcelle » de cartographier l'état de santé des plantes. Combinée avec les données météorologiques, cette méthode permet de prévoir les irrigations et apporte une information sur les quantités d'eau à apporter.

Il semble évident que ces deux techniques laissent une place pour une surveillance à l'intérieur des parcelles pour être au plus près des cultures et proposer un service généralisable à nombre d'agriculteurs.

Le principe de l'instrumentation distribuée sur lequel le groupe de recherche S4M du LAAS-CNRS s'emploie, est de collecter en différents points une information en vue de construire une vision globale d'un système complexe observé en différents points constitués de capteurs, principalement météo et humidité du sol, et de systèmes permettant de collecter les données et de les transmettre.

On aurait pu imaginer un système de collecte de données effectué par un véhicule autonome (type drone ou robot) (entreprise Naio Technologies [6]) qui se mettrait à portée des capteurs cartographiés pour relever les mesures. On privilégiera, de par l'appartenance de la société TCSD au consortium du projet IRRIS, une balise concentrateur (Comsag [7]) connectée au réseau via des technologies LORA, SIGFOX et GSM GPRS.

Si on consent qu'un des verrous avant la phase de conception est d'analyser les contraintes d'implantation de ces capteurs dans les champs et comment récupérer ces données de façon « **non-invasive** » sans gêner le travail de l'agriculteur ; alors on peut très vite dresser le cahier des charges en identifiant des contraintes pour certaines spécifiques aux conditions d'utilisation:

- **La prise de mesure doit être dans le sol**, à une profondeur variable selon le type de cultures, sans trop dénaturer le sol lors du placement. Cet enfouissement contraint les capteurs à être étanches. En effet, le sol étant irrigué l'eau le pénètre, le capteur doit donc résister à cette contrainte, tout en étant capable d'être reconfigurable logiquement en cas de mise à jour des fonctionnalités.
- **chaque point de mesure doit être autonome**. En effet, dans les cultures on ne peut déployer de systèmes filaires donc chaque point de mesure est autonome en énergie. Il faut donc prévoir une autonomie énergétique de ces points de la durée d'une culture, de l'ensemencement à la récolte.
- **la transmission sans fil des données vers un concentrateur**. En effet, de par la prohibition d'un déploiement filaire, la liaison doit être de type réseau sans fil où la portée de cette liaison (assez faible débit du point de vue réactivité à la dizaine de minutes de la mesure de l'hydrométrie) va donc créer une nouvelle contrainte d'installation. Analysons tout de suite la liaison entre les capteurs et le système communiquant. Il est difficile d'émettre des signaux RF dans le sol [8]. Pour des fréquences autour de 1GHz, cette atténuation peut atteindre 40dB à 30cm de profondeur ce qui rend toutes communications sans fil « quasi impossibles » entre un capteur dans le sol et un système hors sol. De la même manière, les systèmes de transmission des données doivent être en surface.

1.2 Etat de l'art pour la mesure de l'humidité du sol

Il y a sur le marché plusieurs capteurs d'humidité du sol présentant plusieurs technologies de mesures. Nous débutons notre étude avec les deux principaux en termes d'utilisation, le capteur Decagon et le capteur Sentek.

1.2.1 Le capteur Decagon

Le capteur le plus utilisé dans les systèmes actuels est le capteur « EC-5 small soil moisture sensor » [9]. Il s'agit d'un capteur capacitif de mesure d'humidité du sol composé d'un corps ainsi que de deux électrodes comme le montre la Figure 1.



Figure 1 : Vue du capteur Decagon EC-5

Ce capteur est assez compact puisque que ses dimensions sont de 5cm de long et 2cm de large. Il permet la mesure d'une seule profondeur de mesure. Il est étanche via un surmoulage de la partie haute qui englobe l'électronique associée et un vernis de protection enrobant les électrodes.

Son fil de connexion permet l'alimentation du capteur et possède une sortie analogique. Les équations pour retrouver la valeur de l'humidité du sol sont fournies par la documentation du constructeur et varient selon le type de sol implanté. Son coût unitaire est de 140€.

On résume ces caractéristiques dans le Tableau 1.

Précision	Plage de mesure	Temps de mesure	Alimentation	Température d'utilisation
±2%	0 – 100%	10ms	2.5V-3.6V @10mA	-40°C à +50°C

Tableau 1: Fiche technique du capteur Decagon EC-5

Enfin, ce capteur possède de bonnes performances en termes de mesures en adéquation avec les besoins. Cependant, son coût reste élevé si l'on veut mesurer plusieurs profondeurs pour un même point. De plus, sa forme n'est pas adaptée pour une insertion facile : la plupart des agriculteurs interrogés dans le cadre de la thèse creusent un trou carré de 1m de côté pour l'installer à l'horizontale comme précisé sur la documentation. Cela détériore donc le sol environnant ce qui perturbe les cultures ainsi que les premières mesures effectuées.

1.2.2 Le capteur Sentek

Le deuxième est le capteur Sentek « EnviroSCAN Probe » [10]. Il s'agit d'un capteur d'humidité du sol capacitif multi niveaux comme le montre la Figure 2 de forme cylindrique.

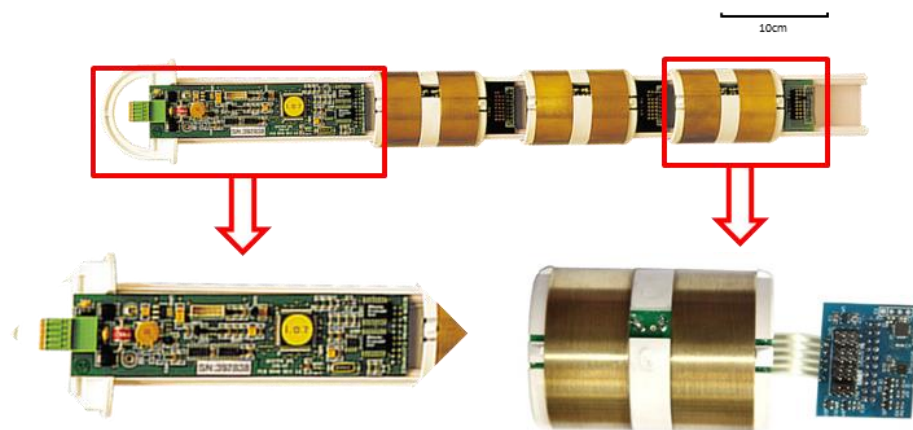


Figure 2 : Vue de la sonde Sentek EnviroSCAN

Ce capteur est composé de plusieurs anneaux métalliques couplés par paires pour matérialiser les électrodes de mesures. Sous chaque couple d'électrodes vient se placer l'électronique de mesure.

Une électronique d'interface est positionnée sur le haut de la sonde. Cette électronique permet la centralisation des données de chaque hauteur et permet l'interface en liaison SDI-12 via son câble qui réalise le bus de communication et l'alimentation électrique. Cette sonde vient s'insérer dans un tube plastique préalablement inséré dans le sol et un joint permettant d'assurer l'étanchéité du capteur. Son principal avantage est sa flexibilité. On peut configurer la sonde de 1 à 16 capteurs pour adapter les profondeurs. Un logiciel de configuration permet de configurer les équations internes pour ajuster la nature du sol.

Le coût d'une sonde 4 niveaux est d'environ 1200€.

On résume ces caractéristiques dans le Tableau 2.

Précision	Plage de mesure	Temps de mesure	Alimentation	Température d'utilisation
± 2%	0-100%	50ms/capteur	12V @100mA	-20°C à +75°C

Tableau 2 : Fiche technique du Sentek EnviroSCAN

En conclusion, ce capteur est nettement plus cher que le précédent pour le même nombre de points de mesure. Son avantage est son bus de communication numérique qui permet l'interfaçage de tous les capteurs sur une même connexion et son facteur de forme qui permet une insertion par carottage sans trop dénaturer le sol.

Cependant il consomme plus avec une tension d'alimentation plus élevée. Son temps de mesure est aussi deux fois supérieur.

Son coût s'explique par le logiciel de configuration plus élaboré que la simple équation du Decagon mais aussi par ces fonctionnalités supplémentaires comme la mesure de la salinité du sol couplée avec celle de l'humidité.

1.2.3 La sonde Waterscout

La sonde SMEC300 Waterscout est un capteur capacitif commercialisé par SDEC. La sonde, représentée en Figure 3, présente une forme similaire à celle du Decagon vu précédemment.



Figure 3 : Vue de la sonde SMEC300 Waterscout

Ce capteur diffère du capteur Decagon avec la forme de ses électrodes. Elles se composent d'une électrode centrale et d'une seconde en arc de cercle autour de la première. Sa taille est de 5cm de long et 2cm de large. Il ne réalise qu'une profondeur de mesure par capteur.

Il intègre en plus de la mesure de l'humidité du sol la mesure de la salinité et la mesure de la température. Chaque mesure est une tension de sortie présente chacune sur un fil de connexion. Il est vendu au prix unitaire de 200€.

On résume ces caractéristiques dans le Tableau 3.

Précision	Plage de mesure	Temps de mesure	Alimentation	Température d'utilisation
± 3%	0-100%	20ms	3V @10mA	+0.5°C à +80°C

Tableau 3: Fiche technique du capteur SMEC300

Pour conclure sur ce capteur, sa forme lui procure le même désavantage de placement que le Decagon. Sa précision et sa plage de mesure sont les mêmes que tous les capteurs capacitifs du marché soit 3% pour l'erreur d'humidité et une plage de mesure couvrant tous les états du sol. La mesure est plus lente du fait de la mesure de salinité supplémentaire. Malgré cette mesure et la mesure de la température, la consommation annoncée est identique au capteur Decagon.

Cependant, la mesure de la température du sol est valable jusqu'à une profondeur de 30cm, au-delà on considère le sol comme thermalisé donc cette mesure est inutile. De plus, le surcoût apporté par la mesure de la salinité est ajouté à chaque point de mesure mais n'est nécessaire que dans les profondeurs où les racines sont présentes. Ces surcoûts supplémentaires ne sont alors que très peu justifiés dans une instrumentation distribuée, c'est pour notamment cette raison que ce capteur est peu utilisé dans les installations.

1.2.4 La sonde Watermark

Les sondes Watermark, fabriquées par Irrrometer, sont des matériels de type tensiométrique qui permettent de connaître l'état hydrique du sol mesuré en tension. Il s'agit d'une sonde à placer dans le sol à l'aide d'un tube comme présenté sur la Figure 4.



Figure 4 : Vues d'une sonde Watermark

Cette sonde mesure la tension de l'eau du sol, c'est-à-dire la force de succion que la racine doit exercer pour absorber l'eau [11]. La tension du sol est proportionnelle à son humidité.

Cette mesure est adaptée à la mesure d'humidité pour l'irrigation puisque elle se rapproche du comportement de la culture pour puiser l'eau. De plus, elle ne nécessite pas de calibration en fonction du type de sol et n'est pas influencée par la salinité de ce dernier. Elle fournit donc un outil simple pour la gestion de l'irrigation. De plus, le coût de ces sondes restent plus faibles au regard des sondes capacitatives, environ 40€ chacune.

Cependant, elle nécessite plusieurs sondes par niveaux de lecture pour obtenir une information fiable. La pose de ces sondes est complexe et donc peut entraîner de fausses mesures, il est donc courant d'en placer trois pour s'assurer une bonne mesure [12]. De plus, le temps de réponse de ces sondes est lent. La sonde met plusieurs heures à détecter un apport d'eau, en effet le sol doit absorber l'eau pour que cela ait un effet sur la tension. Pour finir, pour pouvoir traiter les données, cette mesure nécessite la mesure de la température du sol. En effet, la tension du sol est dépendante de la température et donc elle est indispensable pour s'assurer une mesure complète.

On résume ces caractéristiques dans le Tableau 4.

Précision	Plage de mesure	Temps de mesure	Alimentation	Température d'utilisation
±2%	0-200 kPa	Ques heures	2.5V-3.6V @20mA	-10°C à +40°C

Tableau 4: Fiche technique de la sonde Watermark

Pour conclure, ce capteur a le principal avantage d'être peu cher. Cependant, il nécessite d'être multiplié pour assurer la mesure. Sa technique de mesure est la plus adaptée pour la mesure de l'humidité du sol pour les cultures mais elle ne permet pas d'observation en temps réel.

1.2.5 Le jardin connecté Gardena

Cette gamme de produit permet d'instrumenter un jardin de particuliers. Il s'agit d'un système de capteurs et d'actionneurs permettant de contrôler l'arrosage d'un jardin entier. La Figure 5 présente le système complet. Il se compose d' :

- une tondeuse automatique permettant la tonte automatique de la pelouse (1),
- un système d'arrosage à l'aide d'une électrovanne permettant l'arrosage, automatique (2),
- un capteur d'humidité permettant le contrôle de l'arrosage (3),
- une centrale connectée à Internet à placer à l'intérieur (non représentée),
- une application mobile de gestion du système.



Figure 5 : Présentation du système Gardena

On se concentre sur le capteur d'humidité. Ce capteur permet la mesure de l'humidité du sol grâce à une technologie identique à la sonde Waterscout présentée en 1.2.3. Il s'agit donc d'une technologie capacitive. La sonde présente un détrompeur (Figure 6) qui permet de planter le capteur à 12cm de la surface. Il est alimenté par 2 piles AA.



Figure 6 : Capteur d'humidité Gardena Smart sensor

Le capteur coûte 120€ seul et le système complet coûte 1799€.

1.2.6 Le pot connecté Parrot

Ce produit est destiné à un usage domestique. Il s'agit d'un pot de fleur intelligent permettant l'entretien d'une plante. La Figure 7 présente ses fonctionnalités.



Figure 7 : Présentation du Parrot Pot

Ce pot contient une plante pour l'intérieur avec une contenance de 2.4 litres de terre. Ce pot permet à l'aide de capteur de luminosité, de température, d'humidité du sol et d'engrais de gérer l'arrosage de cette plante. Pour cela, il dispose d'une réserve d'eau de 2 litres qu'il faut remplir manuellement. Le pot est alimenté par quatre piles AA. Le tout est géré par une application mobile qui se connecte au pot en Bluetooth.

Cette application permet de monitorer les valeurs des différents capteurs avec les valeurs instantanées ou un graphe de suivi sur plusieurs jours (Figure 8).

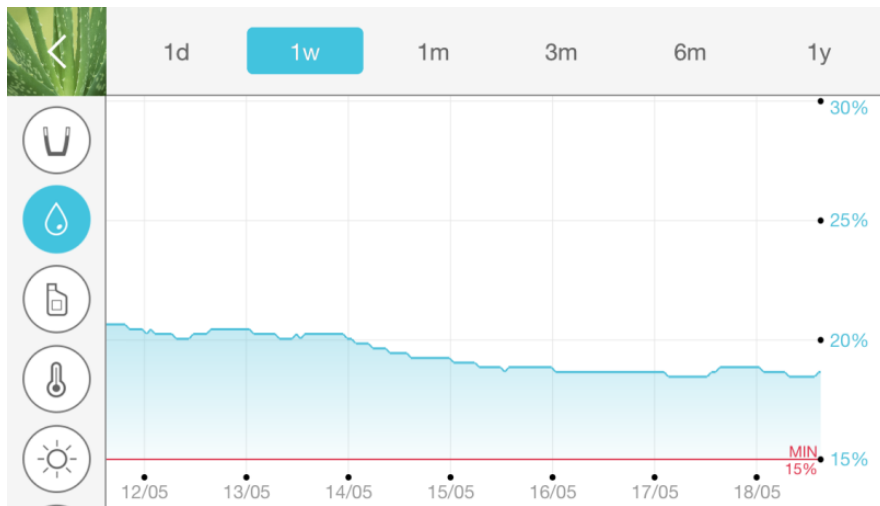


Figure 8 : Graphe de suivi sur l'application Parrot Pot

Cette application permet aussi de modifier le mode d'arrosage automatique avec les modes suivants :

- Mode « Perfect Drop » : ce mode permet un arrosage optimal de la plante. Il permet le développement de la fleur mais consomme rapidement (environ 4 jours suivant la plante) la réserve d'eau.
- Mode « Vacances » : ce mode permet un arrosage minimal de la plante. Il permet d'économiser la réserve d'eau pendant l'absence du propriétaire (jusqu'à 20 jours)
- Mode manuel : ce mode inhibe l'arrosage automatique. Il permet à l'utilisateur de gérer lui-même l'arrosage.

Le capteur d'humidité présent dans ce capteur est un capteur similaire au capteur Decagon. Il s'agit de deux électrodes en forme de bâtons posés sur un support au centre du pot (carré rouge sur la Figure 9).

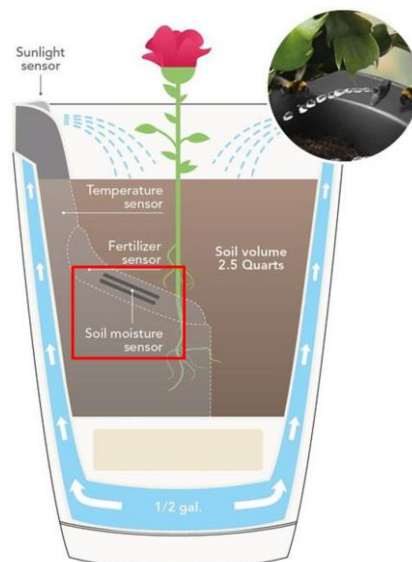


Figure 9 : Zoom sur le capteur d'humidité du Parrot Pot

Le constructeur ne nous donne pas ses caractéristiques mais en fonction de sa forme et de sa taille, on estime que ses caractéristiques sont analogues à celles du capteur Decagon présenté en 1.2.1.

Le coût de ce pot varie de 99€ à 149€ selon les revendeurs. L'application mobile est gratuite.

1.3 Le projet IRRIS

Un premier bilan de cette analyse montre que le marché présente soit des solutions professionnelles assez onéreuses (et non développées dans l'hexagone), soit des solutions de « jardinerie connectée ».

Si on souhaite construire un modèle d'observation par une multiplication des points de mesure, on ne peut pas s'appuyer sur les solutions actuellement disponibles.

Le projet IRRIS s'avère donc incontournable pour fournir un capteur adapté aux besoins et aux contraintes d'une instrumentation distribuée pour les agriculteurs avec l'objectif de raisonner l'irrigation. Ce projet est un projet FUI (Fonds unique interministériel) qui fédère trois types de partenaires :

- Des industriels :
 - TCSD (chef du projet) spécialisé dans le déploiement de station pour l'agriculture ;
 - TE Connectivity, société spécialisée dans les capteurs automobiles.
- Des coopératives agricoles :
 - Mais Adour spécialisé dans la culture du maïs dans le bassin de l'Adour mais aussi dans la culture de carottes dans les Landes ;
 - CACG possédant une ferme expérimentale à Masseube (32) ;
 - Bluewhale spécialisé dans la culture des pommes près de Montauban (82).
- Des laboratoires de recherches :
 - Ecolab spécialisé dans l'étude des sols ;
 - LAAS-CNRS spécialisé dans les systèmes embarqués.

Dans le cadre du projet, les coopératives agricoles définissent les lieux d'expérimentations pour le système, les industriels mettent à disposition les ressources et le personnel pour le déploiement des systèmes et les laboratoires développent le système et analysent les résultats.

Le travail à mener est donc la conception d'un nouveau capteur d'humidité du sol avec comme objectifs :

- un coût le plus faible possible ;
- des performances égales au capteur du marché ;
- une insertion dans le sol simple et non destructrice ;
- une connectique compatible avec le système Comsag.

Les travaux présentés dans cette thèse vont donc se concentrer sur la conception et la caractérisation d'un capteur innovant au service d'une agriculture résolument moderne.

Chapitre 2 : Les principes de mesures de l'humidité du sol

Dans ce chapitre, nous allons évoquer les phénomènes physiques mis en jeu pour mesurer l'humidité relative du sol.

2.1 Humidité et principes physiques

La notion d'humidité du sol que l'on aborde ici est une notion d'humidité massique, notée %RH et exprimée selon :

$$\%RH = \frac{M_{eau}}{M_{sol}} * 100, \text{ où } \begin{cases} \%RH \text{ est l'humidité du sol en \%} \\ M_{eau} \text{ est la masse d'eau en g} \\ M_{sol} \text{ est la masse du sol en g} \end{cases}$$

En agriculture on définit trois répartitions dans le sol tel que le montre la Figure 10.

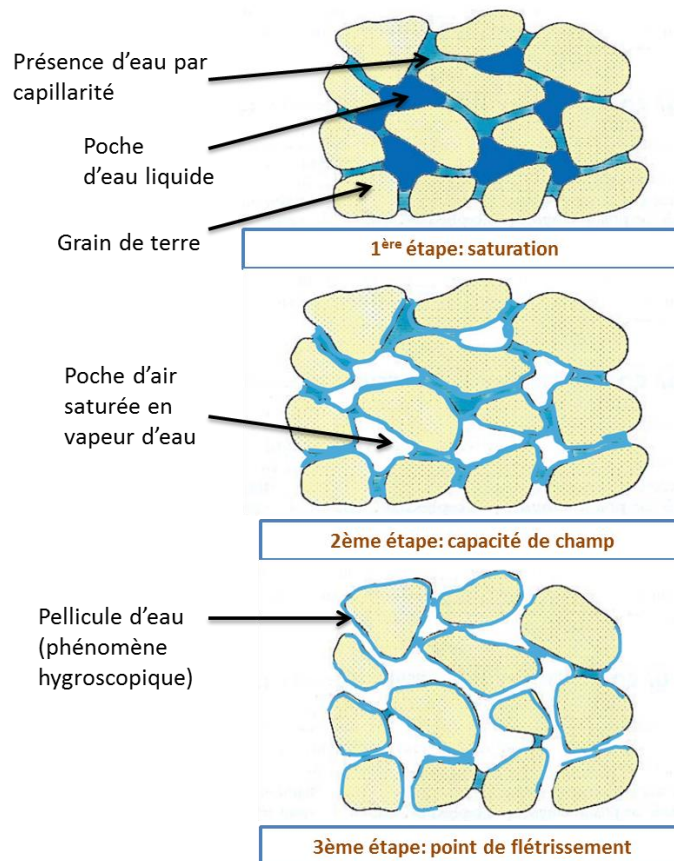


Figure 10 : Répartitions de l'eau dans le sol

La première répartition est la saturation. Il est avéré que le sol est saturé lorsqu'il y a présence d'eau à l'état liquide dans sa composition. Son %RH est alors supérieur à 60%.

Cet état n'est pas souhaité car les racines ont tendances à pourrir dans cette humidité ambiante.

Le deuxième état du sol est qualifié de sol humide. Dans cet état, l'humidité est comprise entre 60% et 20%. C'est l'état idéal en agriculture. Le sol contient de l'eau sous forme de poches d'air humide situées entre les grains du sol. Il s'agit de cette humidité que les racines viennent capter pour se nourrir. Le taux exact d'humidité est variable selon le type de culture et de sol.

Le dernier état est le point de flétrissement. Cet état intervient aux alentours de 20% d'humidité selon les sols. L'humidité est toujours présente mais sous forme de fines pellicules d'eau autour des grains du sol. En deçà de cette humidité, la plante n'est plus capable de prélever l'eau contenue dans le sol, il faut donc l'éviter.

En résumé, l'irrigation doit réguler l'humidité du sol au-dessus du point de flétrissement mais en dessous de la saturation pour favoriser un développement optimal des cultures.

Les seuils de changement d'état sont variables selon la température. En effet, plus la température sera élevée, plus l'eau se transformera facilement en gaz. Les seuils seront donc relevés car la formation d'eau liquide sera plus difficile et l'eau aura tendance à être présente sous forme de vapeur. Ces variations interviennent sur les couches supérieures du sol, en effet au-delà de 30cm de profondeur le sol est thermalisé.

2.2 Conditions expérimentales pour maîtriser un environnement de RH contrôlé

On va décrire ici le protocole utilisé pour étalonner des échantillons de terre nécessaires aux tests en laboratoire.

2.2.1 Séchage du sol

La première étape consiste à évacuer la totalité de l'eau présente dans l'échantillon de sol. Pour cela, on évapore l'eau du sol. Les étapes sont :

- 1 – Pesée de l'échantillon à température ambiante
- 2 – Mettre à l'étuve à 80°C pendant une heure
- 3 – Pesée de l'échantillon refroidi à température ambiante
- 4 – On répète les opérations 1 à 3 jusqu'à que la masse soit égale avant et après cuisson

Quand les masses sont égales, cela veut dire que l'échantillon ne possède plus d'eau et est complètement sec. On considère l'échantillon à 0%RH.

2.2.2 Calibration des échantillons

En sortie de cuisson, le sol crée des mottes de plusieurs centimètres de diamètre. Cela ne permet pas une bonne répartition de l'eau dans l'échantillon car il n'est pas homogène. Pour le rendre plus homogène, on tamise donc la terre avec une grille de 1mm. Cela a pour effet de transformer l'échantillon en particules de terre fine, comme du sable, ce qui permet une bonne répartition de l'eau par la suite.

Par la suite, on crée les échantillons calibrés en humidité. Pour cela, on divise l'échantillon de sols en plusieurs échantillons pesant 2kg. Pour calibrer, les échantillons on rajoute à chaque échantillon une masse d'eau pour créer l'humidité choisie. Par exemple, pour créer un pot à 30%RH, on rajoute 600g d'eau. On mélange ensuite à la main pour rendre homogène la répartition de l'eau dans l'échantillon.

2.2.3 Stockage des échantillons

Pour pouvoir stocker les échantillons dans le temps, il est nécessaire de les conserver dans des récipients étanches. Pour cela, nous utilisons des pots en verre possédant des couvercles hermétiques comme le montre la Figure 11.



Figure 11 : Pots de stockage des échantillons de sols

On observe sur cette figure trois pots du plus sec à gauche au plus humide à droite. La différence de niveau révèle que la terre humide se tasse plus facilement que la terre sèche mais il y'a la même masse de terre dans chaque pot.

2.2.4 Réalisation des tests

Pour réaliser les tests, on utilise directement le pot. En effet, celui-ci est en verre et n'interfère donc pas sur le champ électrique. Seul le couvercle en métal est retiré pour ces tests. On insère donc directement le capteur dans le pot comme le montre la Figure 12.



Figure 12 : Tests d'un capteur dans un pot calibré

Ces pots facilitent donc le transport, le stockage et les tests tout en gardant une calibration de l'humidité du sol.

2.3 Signatures électriques de l'humidité

L'eau contenue dans le sol modifie les paramètres électriques (résistance ou capacité électrique) ce qui peut, sous réserve d'un procédé de transduction électrique conduire à deux types de mesures :

- La mesure avec contact : mesure de la résistivité
- La mesure sans contact : mesure de la capacité

2.3.1 Mesure avec contact direct : mesure de la résistivité

Le premier paramètre va être la mesure de la résistivité du sol. En effet selon le « Rapport 229-6, Caractéristiques Electriques du sol » [13], la conductivité du sol augmente avec son humidité donc sa résistivité diminue. On passe pour une température de 20°C de 200Ω/m à 10%RH à 5Ω/m à 50%RH pour un sol argileux. On peut donc conclure que la mesure est réalisable par une électronique de mesure classique type pont de Wheatstone.

Cependant la lecture présente deux défauts majeurs :

- le premier est la sensibilité de la mesure à la composition du sol [13], [14]. En effet, la composition intrinsèque du sol modifie sa résistivité et donc une calibration précise pour chaque point de mesure est nécessaire. Cela alourdit donc le protocole d'installation ;
- le second est le contact direct avec le sol. Pour effectuer la mesure de résistivité, il faut mettre en contact les électrodes et le sol. Cela va donc accélérer le vieillissement de ces électrodes qui seront soumis aux variations d'humidité et aux attaques chimiques du sol.

La mesure de la résistivité est donc une mesure facile à réaliser mais complexe à interpréter par la suite.

2.3.2 Mesure sans contact direct : mesure de la capacité

Le second paramètre que l'on va étudier est la permittivité du sol. « Rapport 229-6, Caractéristiques Electriques du sol » [13], la permittivité relative du sol varie en fonction de l'humidité. Par exemple, la valeur passe de 1.2 à 10%RH à 4.5 à 50%RH pour un sol argileux. Le défaut de cette variation est la dépendance à la fréquence [15]. Il faut donc fixer une fréquence de lecture pour cette mesure. Cependant les études [16], [17] montrent que cette mesure fréquentielle permet de s'affranchir de l'influence de la nature du sol.

La mesure à effectuer pour mesurer ce paramètre est donc une mesure de capacité, qui pour un condensateur plan s'exprime selon :

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{S}{e}$$

Avec : $\varepsilon_0 \varepsilon_r$: permittivité du diélectrique,
S: surface des électrode, *e* : distance inter électrodes

Cette mesure est donc plus complexe à réaliser que la mesure résistive cependant elle supprime les deux défauts liés à la résistivité, le contact avec le sol et la dépendance au type de sol.

2.3.3 Extension vers la mesure de salinité du sol

Grâce à la mesure capacitive, on peut mesurer la salinité du sol. Cette salinité définit la quantité de sels minéraux présents dans le sol et donc la quantité d'engrais dilué dans le sol. Cette mesure est utile pour limiter l'utilisation de produits toxiques et réduire les contaminations des nappes phréatiques.

En effet certains ions tels que le Na^+ , le Cl^- et le Mg^{2+} peuvent modifier la polarisation du champ électrique et influencer la capacité lue [18], [19]. Cependant cet effet est lent donc en choisissant le bon domaine fréquentiel de lecture, on peut décorrélérer cet effet de la mesure de l'humidité.

On peut donc mesurer à la fois l'humidité et la salinité avec le capteur capacitif.

2.4 Vers une architecture de capteur

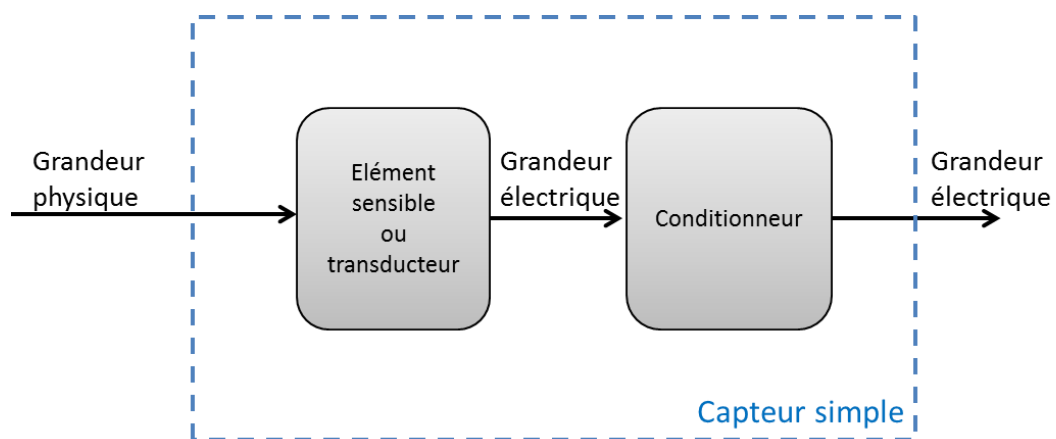


Figure 13 : Modélisation d'un capteur simple

On observe sur ce capteur (Figure 13) plusieurs parties [20] [21].

- La grandeur d'entrée est une grandeur physique non électrique. Il s'agit de la grandeur à mesurer par ce capteur.
- L'élément sensible (ou transducteur) est l'élément qui va réagir à la grandeur physique à mesurer et la transformer en grandeur électrique.
 - Si le capteur est passif, cette grandeur électrique sera une variation d'élément passif (résistivité, capacité ou inductance).
 - Si le capteur est actif, cette grandeur sera une grandeur directement exploitable (tension, courant, charge, ...).
- Le conditionneur est un circuit électrique qui permet de mettre en forme la grandeur électrique donnée par le transducteur. Ces circuits sont généralement constitués de pont de mesures, de montages à amplificateurs linéaires ou de circuits oscillants.

- La grandeur de sortie est une grandeur électrique directement exploitable par un circuit extérieur.

Cependant, il arrive que pour certains capteurs, un élément supplémentaire est ajouté, comme le montre la Figure 14.

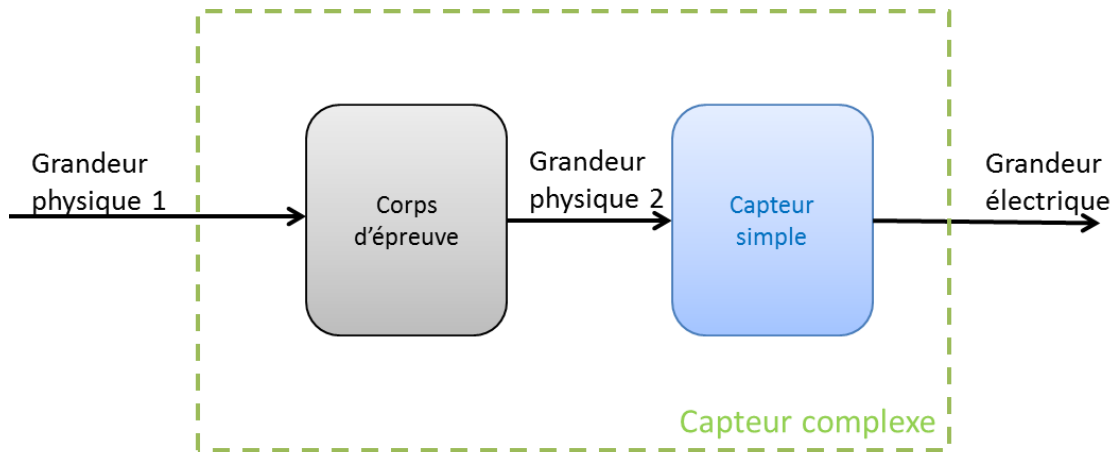


Figure 14 : Modélisation d'un capteur complexe

Sur ce capteur, on rajoute un élément appelé corps d'épreuve. Cet élément permet de transformer une grandeur physique non électrique d'entrée en une autre grandeur physique généralement plus simple à mesurer. Néanmoins, il faut ajouter les deux éléments précédents pour compléter le capteur complexe.

Dans ce chapitre, nous allons étudier plusieurs technologies pour le transducteur. Nous débuterons par une mesure microscopique en passant par la mesure de l'humidité de l'air puis nous finirons sur une mesure macroscopique directe avec une mesure de résistivité et de capacité.

2.5 La mesure microscopique

Nous étudions tout d'abord un principe de mesure de l'humidité l'air puis nous l'adaptions à la mesure de l'humidité du sol.

2.5.1 Mesure de l'humidité de l'air à l'aide de membranes

La méthode la plus utilisée pour la mesure de l'humidité de l'air est la mesure par membrane. Elle consiste à mettre en contact avec l'air une surface qui va réagir en fonction de l'humidité de l'air [22], [23]. Ce membrane est en polymères tels que le Nafion [24]. Un paramètre électrique de la membrane va donc varier en fonction de l'humidité de l'air. On vient donc ensuite instrumenter cette membrane pour obtenir l'image de l'humidité de l'air.

Le principal avantage de cette méthode est la faible surface nécessaire pour effectuer la mesure. En effet quelques mm² suffisent pour obtenir un capteur fonctionnel. C'est pour cela que beaucoup de ces capteurs sont utilisés dans des endroits restreints tels que l'automobile ou les climatisations.

2.5.2 Adaptation à la mesure de l'humidité du sol

Dans ce projet nous souhaitons mesurer l'humidité du sol. Pour cela, on doit donc adapter ces capteurs pour mesurer l'humidité du sol. Pour nos tests, nous utiliserons le capteur HTG de chez Measurement. Ce capteur est un capteur d'humidité de l'air à membrane comprenant aussi la mesure de la température visible sur la Figure 15.

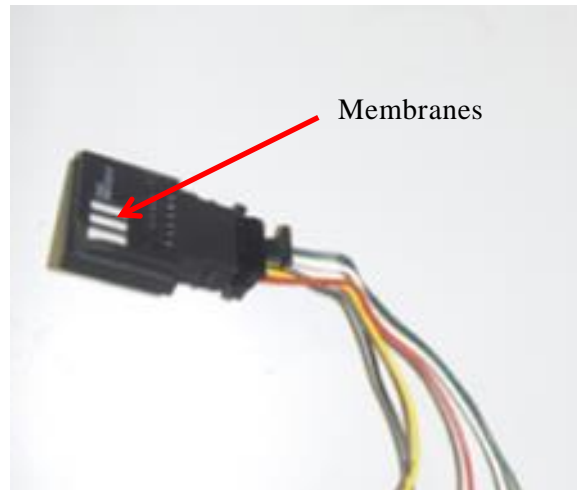


Figure 15 : Photographie du capteur HTG

Sur cette photo, on peut voir en blanc la zone des membranes qui réagissent avec l'humidité de l'air. Ce capteur possède en sortie une tension analogique image de l'humidité ainsi qu'une tension image de la température. La plage de mesure de l'humidité s'étalonne de 0 à 100%.

Pour l'adapter nous le plaçons dans une chambre fermée contenant de l'air. Cette chambre est isolée de la terre pour conserver l'air pour la mesure du capteur cependant pour permettre l'échange d'humidité entre la terre et l'air, nous plaçons une fenêtre de Gore-Tex. Cette membrane est une membrane microporeuse qui laisse l'humidité la traverser [25] mais qui va bloquer la terre. Cela permet donc l'échange d'humidité entre le sol et l'air pour effectuer la mesure de l'air qui sera image de l'humidité du sol. On effectue aussi les tests avec du voile d'hivernage qui possède les mêmes propriétés. On réalise donc le système de la Figure 16.

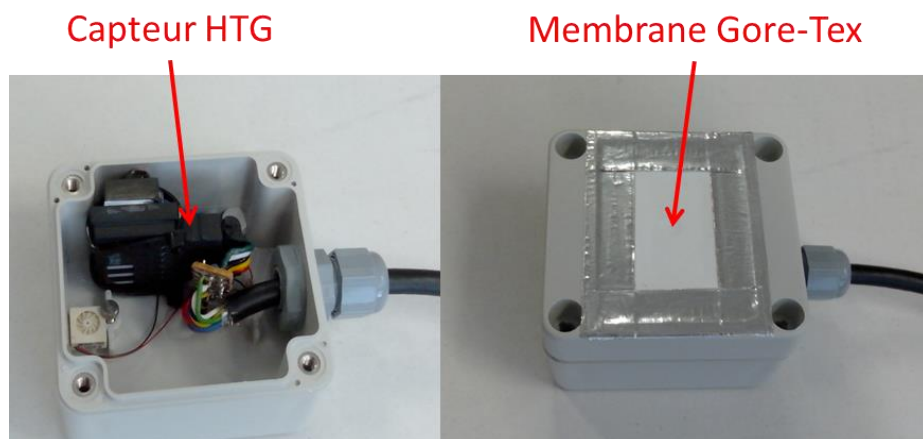


Figure 16 : Système d'adaptation pour la mesure d'humidité du sol

Le capteur est donc placé dans la boîte étanche qui renferme la chambre de mesure. On utilise un presse étoupe pour isoler le câble de connexion. La membrane de liaison est placée sur le couvercle de la boîte. On place ensuite la boîte dans le sol et on relève les résultats de la Figure 17.

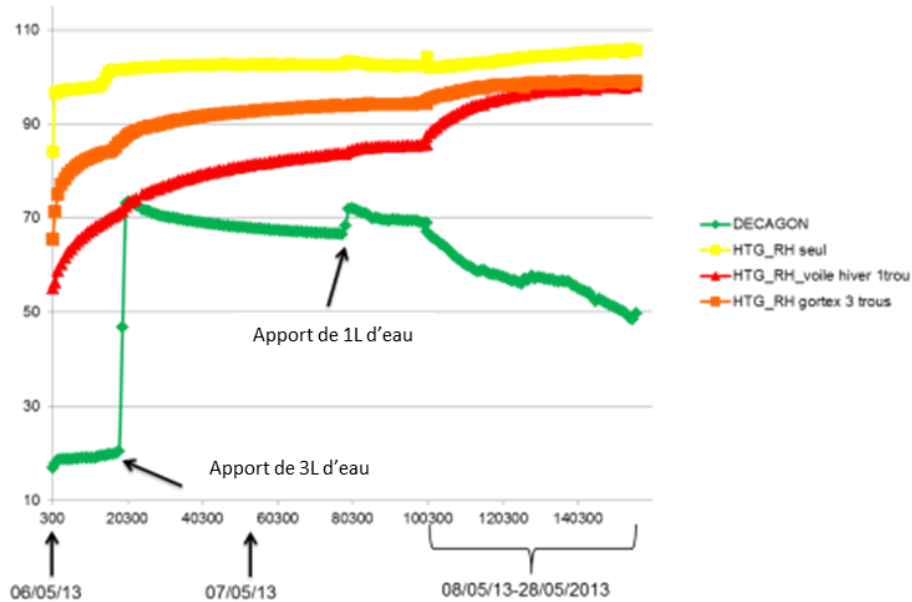


Figure 17 : Tests en condition réelle du capteur HTG

On relève sur cette courbe les valeurs de plusieurs dispositifs :

- le capteur Decagon utilisé en référence,
- un capteur HTG dans une boîte sans membrane extérieure,
- un capteur HTG avec un voile d'hivernage comme membrane,
- un capteur HTG avec une membrane Gore-Tex.

On effectue deux apports d'eau successifs à un jour d'intervalle. Le capteur Decagon réagit bien à ces apports d'eau. Sa valeur lue augmente avec ces apports puis redescend lentement par la suite, la terre évacuant l'eau par évaporation et les plantes se nourrissant de cet apport.

Cependant tous les dispositifs avec le capteur HTG possèdent un retard de lecture avec les apports. La valeur lue pour le deuxième apport n'augmente que quatre heures après. De plus, la valeur ne redescend pas ensuite. Elle reste bloquée à 100% d'humidité. Ces erreurs sont dues à un phénomène de saturation dans le boîtier. L'air se sature en eau à cause de l'humidité de la terre environnante mais le système ne revient pas dans son état initial. L'eau dans l'air ne parvient pas à réintégrer la terre. Après plusieurs tests en laboratoire, on a observé qu'il fallait au système plus de 16 jours pour évacuer 10mL d'eau dans le boîtier.

On en conclut donc que le système ne convient pas pour la mesure dans le sol. En effet dans l'industrie, tous les capteurs d'humidité de l'air sont utilisés dans des milieux ventilés où l'air ne stagne pas ce qui permet d'éviter cette saturation en eau.

2.6 Conclusion

Pour mesurer l'humidité du sol, on peut donc effectuer deux types de mesures. Le premier est la mesure microscopique à l'aide d'un capteur d'humidité de l'air. Cependant le système permettant l'adaptation de la mesure de l'humidité du sol par celle de l'air rend la mesure impossible.

Le second type est la mesure macroscopique. On va mesurer les paramètres de la terre avec des capteurs de l'ordre de la dizaine de centimètres pour optimiser le contact. Le premier paramètre variant avec l'humidité est la résistivité qui peut être mesuré très facilement en électronique. Cependant cette mesure nécessite un contact direct avec le sol et dépend de la composition du sol. Le second paramètre est la permittivité du sol qui peut être mesuré à l'aide d'une mesure de capacité. Cette méthode est plus complexe à mettre en œuvre mais elle permet l'isolation des électrodes et l'insensibilité à la composition du sol. De plus, elle permet la mesure de la salinité.

On va donc concevoir dans ce travail de thèse un capteur capacitif d'humidité du sol dont on résume les sous fonctions sur la Figure 18.

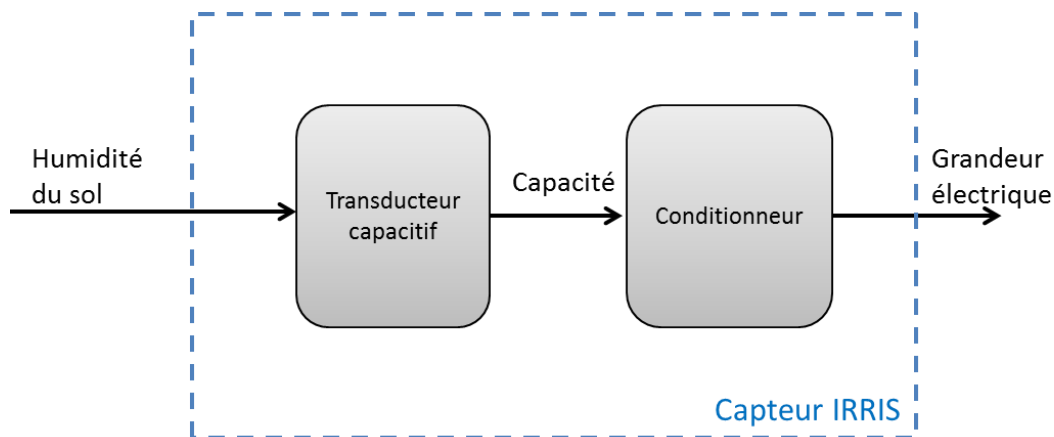


Figure 18 : Sous fonctions du capteur IRRIS

Chapitre 3 : Etude du transducteur

Suite aux études réalisées, la technologie de mesure utilisée sera la mesure capacitive sans contact où le capteur à réaliser doit posséder plusieurs caractéristiques concernant son transducteur :

- la première est d'avoir une dimension macroscopique. En effet, la surface de mesure doit être suffisante pour mesurer correctement la capacité du sol. Le capteur doit être facile à insérer dans le sol et permettre un bon contact avec celui-ci, ce qui va déterminer la forme de l'élément sensible.
- la deuxième est que cet élément doit être isolé du sol. Pour que la mesure soit correcte, il faut séparer les électrodes du transducteur par un diélectrique [26].
- nécessairement pour des raisons économiques le capteur doit être industrialisable (fiabilité et reproductibilité)

Afin de déterminer des critères de choix de facteurs de forme du corps d'épreuve, les mesures vont être effectuées dans différentes conditions d'humidité du sol [13], reconstruites conformément au protocole défini dans le chapitre précédent, où nous avons prélevé des échantillons de sols de type argileux, type très représenté dans les cultures environnantes.

Pour assurer « en laboratoire » l'isolation entre le capteur et le sol nécessaire à ce type de capteur, chaque capteur testé a été encapsulé dans de la gaine thermo rétractable pour épouser au mieux la forme de celui-ci. Cette gaine possède une épaisseur de 1mm.

Pour réaliser les mesures, le capteur gainé sera donc placé dans un pot en verre contenant l'échantillon de sol calibré en humidité. Le substrat est structuré de telle sorte que le capteur soit en contact sur toute sa longueur avec celui-ci sans bulle d'air parasite.

3.1 Modèle du capteur

Avant de nous focaliser sur une optimisation du facteur de forme par une résolution aux éléments finis, nous allons prédéterminer un facteur de forme capable de créer un condensateur avec trois modèles de transducteur (Figure 19) :

- Le premier modèle, celui de gauche, est composé de deux armatures face à face, en cuivre, isolées vis-à-vis du sol.
- Le second modèle, au centre, est une variante du premier. On donne au transducteur une forme cylindrique pour faciliter l'insertion dans le sol. On répartit donc les deux armatures en bagues autour du cylindre.
- Le dernier modèle, à droite, garde la forme cylindrique mais on place les armatures hélicoïdales autour de celui-ci. Cela a pour but de faciliter l'insertion dans le sol mais aussi de reformer le condensateur plan entre les deux armatures.



Figure 19 : Différentes formes du transducteur

3.1.1 Modèle impédance

L'élément sensible du capteur est un élément passif, son modèle ne comportera que des dipôles passifs. Assimilons le capteur à une impédance pour déterminer ses caractéristiques vis-à-vis de l'humidité du sol mais aussi de la fréquence de mesure.

L'idée sous-jacente est de déterminer le comportement fréquentiel selon le taux d'humidité du sol avec comme objectif d'identifier si il existe une plage de fréquences pour exploiter ce capteur. Pour réaliser les mesures d'impédances, on utilise un analyseur d'impédance Agilent 4294A et on relève les valeurs d'impédance pour une gamme de fréquence allant du kHz à la centaine de MHz.

Sur la Figure 11, on observe le tracé fréquentiel de l'impédance exprimée en décibels selon :

$$Z_{dB} = 20 \log|Z|, Z \text{ étant l'impédance.}$$

Nos observations doivent répondre à deux questions :

- la structure dessinée a-t-elle un comportement capacitif qui varie selon le facteur de forme ?
- si comportement capacitif il y a, la structure est-elle sensible aux variations d'humidité du sol ?

Analysons le comportement fréquentiel de nos trois types d'électrodes (Figure 20). En rappelant l'évidence du comportement d'un condensateur idéal de capacité C , dont l'impédance est :

$$|Z| = \frac{1}{2\pi C f}$$

Il suffit d'identifier des fonctions linéaires (en dB) avec une ordonnée à l'origine différente et une pente -20dB/décade, ce qui confirme la propriété capacitive de nos électrodes.

On relève des tracés que l'équation de l'impédance pour chacune des trois structures est de la forme :

$$|Z| = \frac{1}{a \omega} = \frac{1}{a 2\pi f} \text{ avec } a \text{ un gain fixe}$$

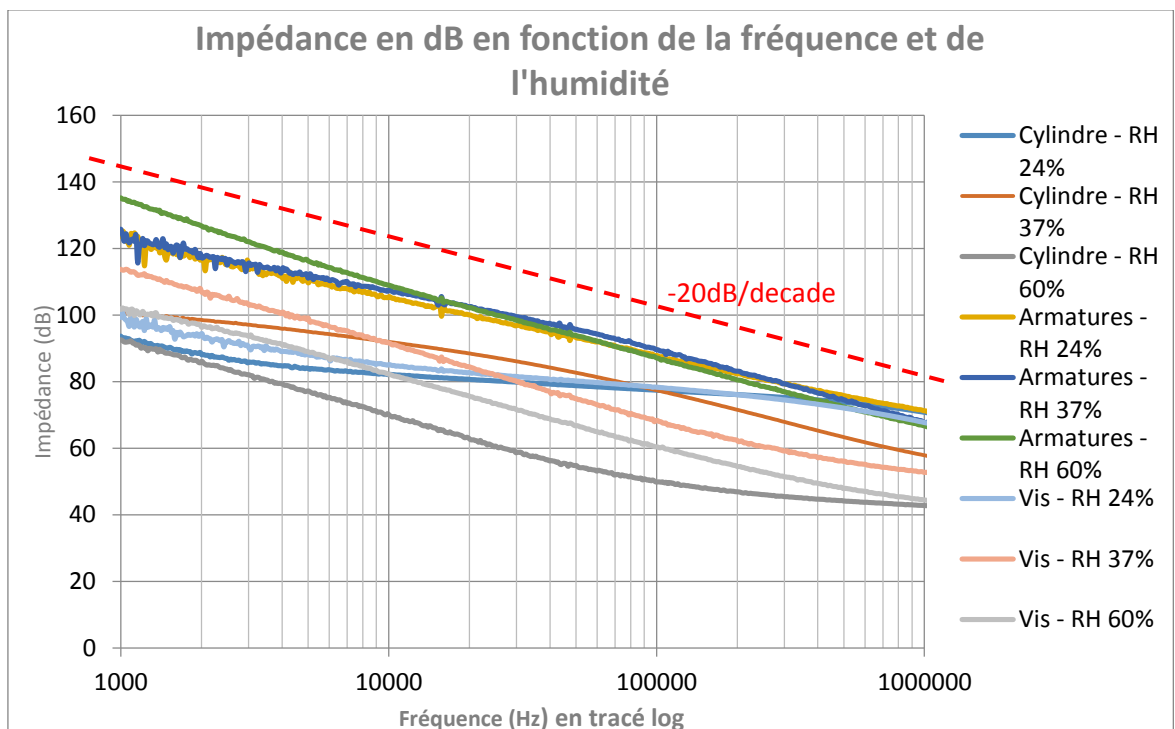


Figure 20 : Mesure de l'impédance en décibels du capteur en fonction de la fréquence

En faisant à présent varier l'humidité, pour chaque facteur de forme donné, on observe une variation de la capacité selon l'humidité, ce qui valide le principe de sensibilité à l'eau des structures.

On peut donc conclure dans notre cas, que notre transducteur est une capacité qui est différente selon la forme de l'électrode.

Au-delà de ces observations macroscopiques et comportementales, focalisons-nous sur la valeur de cette impédance en fonction de la fréquence afin de pouvoir l'exploiter (ou pas) électroniquement.

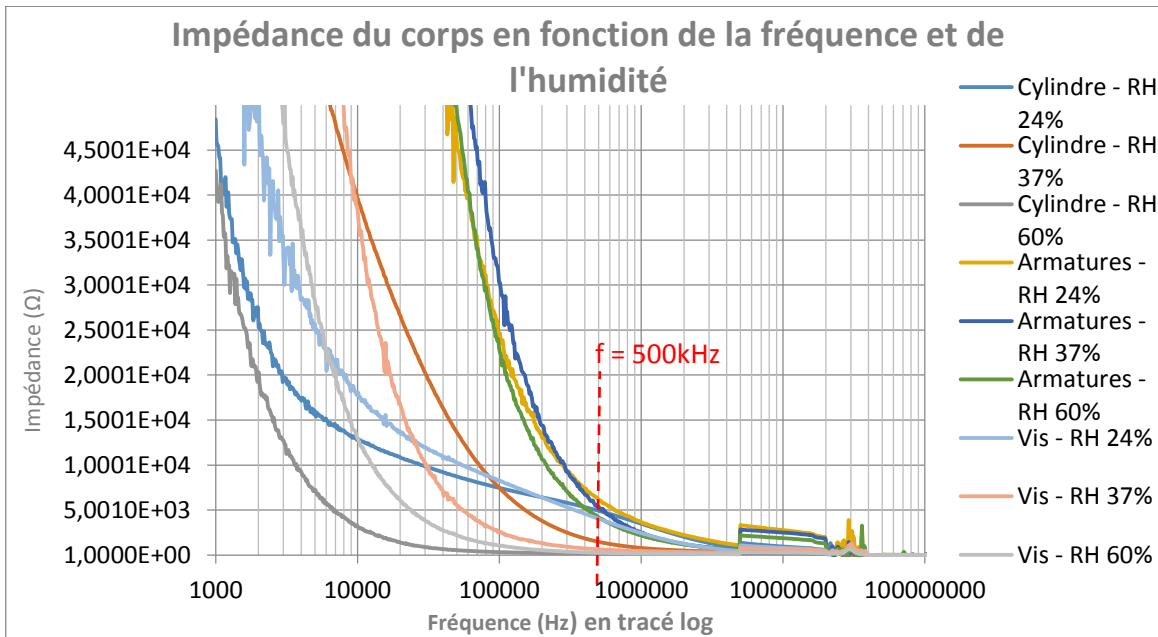


Figure 21 : Tracé de l'impédance pour différentes formes et différentes humidités en fonction de la fréquence

La Figure 21 permet d'identifier deux intervalles fréquentiels distincts :

- pour des fréquences inférieures à 500kHz. Dans cette partie, la pente est de $1\Omega.Hz^{-1}$ en moyenne ce qui montre une forte dépendance à la fréquence de mesure et donc une difficulté supplémentaire pour obtenir une mesure reproductible.
- pour des fréquences au-delà de 500kHz, la pente est de $1m\Omega.Hz^{-1}$ ce qui induit une dépendance mille fois moins importante et donc une mesure qui sera facilitée. **On choisit donc de mesurer le capteur à une fréquence au-delà de 1MHz pour assurer une bonne lecture.**

3.1.2 Approche capacitive

3.1.2.1 Mesure de l'humidité

Le capteur possède un comportement macroscopique capacitif variant avec l'humidité du sol, avec des comportements bornés par intervalles. Vérifions l'influence de la fréquence de mesure sur la capacité.

Une analyse plus précise sur la plage de fréquences permet d'observer que le tracé en dB de l'impédance n'est pas parfaitement linéaire ; on peut en déduire que la capacité ne sera pas constante en fonction de la fréquence de mesure.

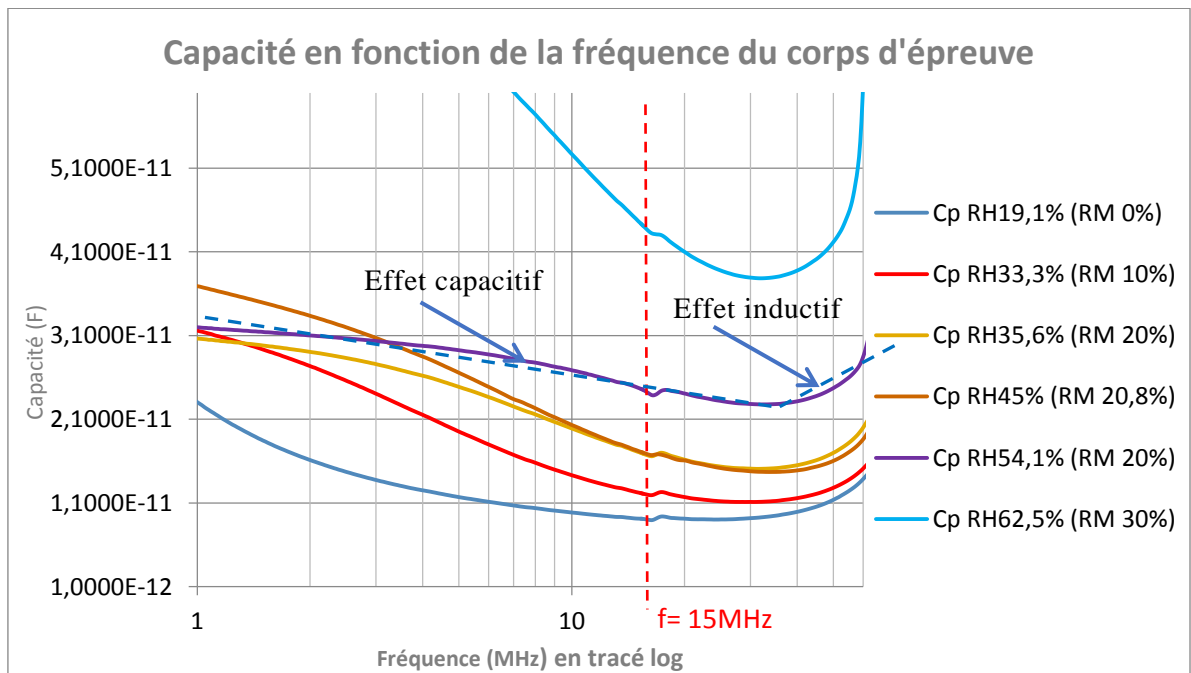


Figure 22 : Mesure de la capacité en fonction de la fréquence pour différentes humidités

Sur cette Figure 22, on peut observer que :

- la capacité diminue quand l'humidité du sol augmente ce qui confirme le fonctionnement souhaité.
- Comme prédit, la capacité n'est pas fixe selon la fréquence mais plus la fréquence augmente plus celle-ci diminue jusqu'à un palier atteint à partir de 15MHz environ.
- Au-delà de cette fréquence, l'effet inductif parasite se manifeste. Ceci démontre qu'au-delà de 15MHz, il devient difficile pour électronique « classique » de fonctionner, il est donc nécessaire d'effectuer des conceptions HF. Or cela complexifie fortement le capteur final, on effectuera donc des mesures en deçà de cette fréquence.

Notre but étant de réaliser un capteur correspondant au cahier des charges, on choisit donc une fréquence de 8MHz qui satisfait les deux critères précédents, supérieures à 1MHz mais inférieure à 15MHz.

3.1.2.2 Mesure de la salinité

Peut-on conférer à nos électrodes une seconde propriété à savoir la mesure de la salinité du sol, sous réserve de trouver un intervalle de fréquences sensible aux variations de salinité du sol.

Pour cela, mettons en place un protocole similaire à celui de la mesure de l'humidité : on prépare plusieurs échantillons de sols à différents taux de salinité en ajoutant à l'eau pour humidifier le sol, un engrais qui va enrichir le sol à différents niveaux. On crée donc des échantillons de sols à la même humidité mais à des salinités différentes. On mesure

donc la capacité pour des fréquences allant du kilohertz à la dizaine de Mégahertz (Figure 23).

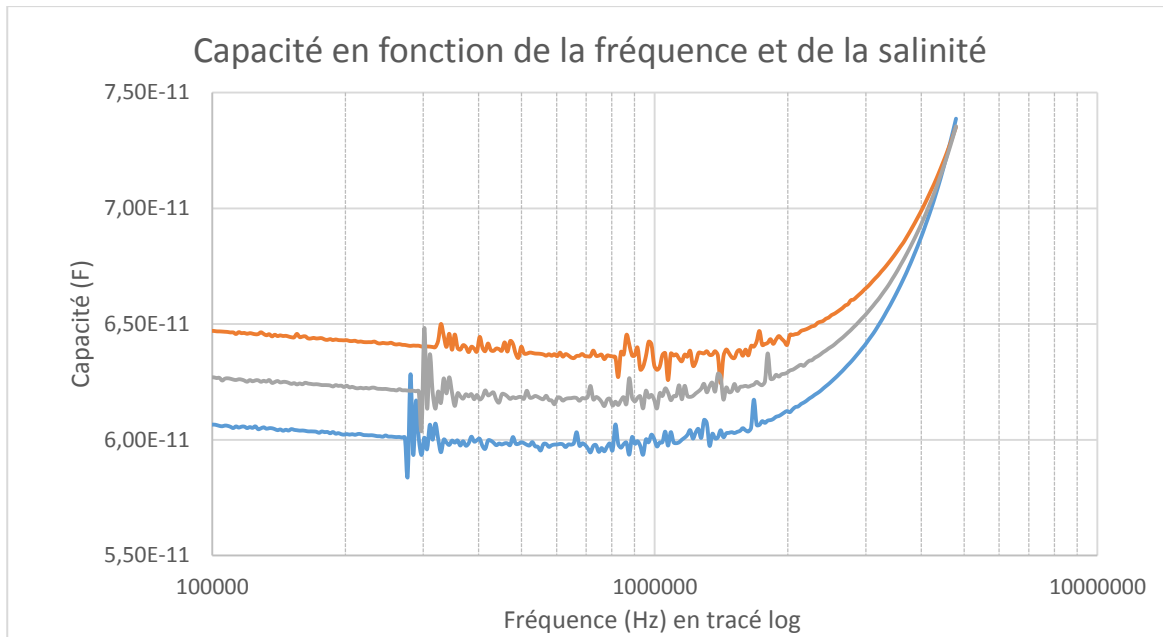


Figure 23 : Mesure de la capacité en fonction de la fréquence pour différentes salinités

On observe que pour des fréquences au-delà de 4MHz, la salinité n'a aucune influence sur la capacité du capteur. Cela signifie que la mesure d'humidité réalisée avec ce capteur n'est pas influencée par la salinité du sol ce qui rend la mesure indépendante. Mais en dessous de 4MHz, la capacité augmente avec la salinité donc la mesure est possible.

Cependant, la capacité n'est pas fixe selon la fréquence de mesure comme pour la mesure de l'humidité. Il n'y a pas de zone préférentielle dans cette courbe mais des perturbations sont observées en deçà de 300kHz, cette zone est donc à éviter. La mesure est donc possible pour toute fréquence comprise entre 300kHz et 1MHz.

On résume donc les fréquences de mesures sur la Figure 24.

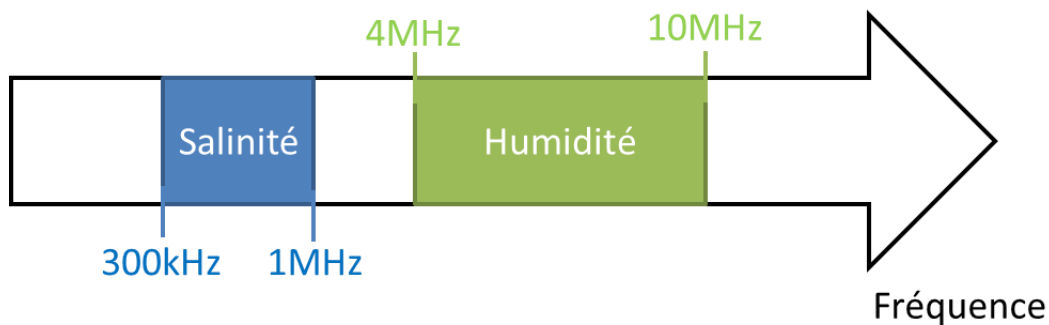


Figure 24 : Fréquences de mesures

3.1.3 Modèle électrique du capteur construit

On va maintenant traduire les caractéristiques du transducteur en modèle électrique. On rappelle les caractéristiques sur la Figure 25.

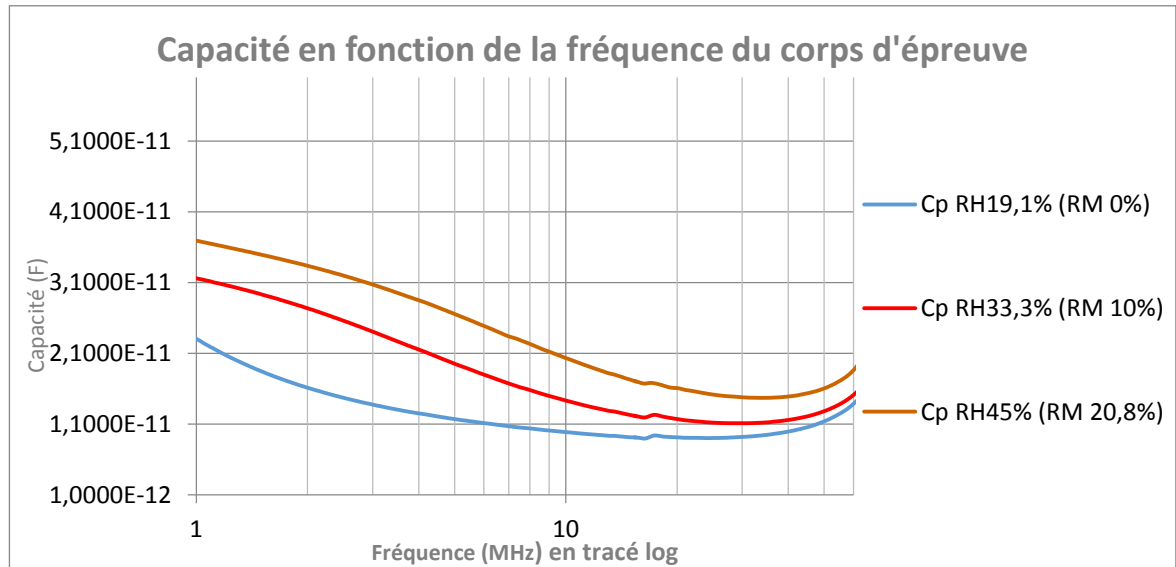


Figure 25 : Tracé de la capacité en fonction de la fréquence

Tout d'abord, notre capteur peut être modélisé par une capacité variable suivant l'humidité. Cette capacité n'est pas parfaite. Le premier parasite est l'ESR (Equivalent Serie Resistance). C'est une résistance qui modélise la résistance entre les deux électrodes à travers le diélectrique (ici la terre). On mesure pour notre capteur une $ESR = 105\text{m}\Omega$.

Ensuite ce capteur possède des fils de connexions. On modélise ces fils par une ESL (Equivalent Serie Inductance). Cette inductance provoque la pente montante de capacité au-delà des 40MHz de notre capteur ce qui montre son effet inductif. On mesure cette $ESL = 60\mu\text{H}$. Pour finir, une capacité parasite créée par les électrodes elles-mêmes à travers le tube apparaît. On la note C_{tube} et elle vaut $C_{\text{tube}} = 5.18\text{fF}$.

On modélise le schéma sur la Figure 26.

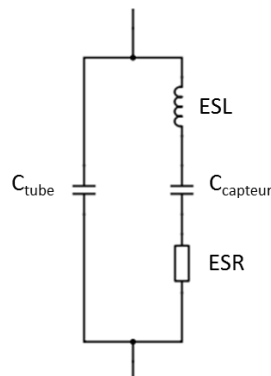


Figure 26 : Modélisation schématique du transducteur

Le condensateur C_{capteur} représente la capacité variable de notre transducteur. Elle est de l'ordre de la dizaine de pF (entre 10pF et 40pF) à notre fréquence de travail. En considérant que notre fréquence de travail est inférieure à 40MHz, l'effet de l'ESL n'est pas prépondérant ($|Z_{\text{ESL}}| < 1\Omega$), on peut donc simplifier le modèle en l'excluant. L'ESR est de valeur très élevée, on peut donc aussi l'enlever du modèle. On voit aussi que $C_{\text{tube}} \ll C_{\text{capteur}}$ donc son effet est négligeable. Le modèle devient donc le modèle présenté en Figure 27.

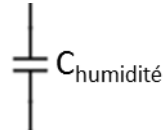


Figure 27 : Modèle simplifié du transducteur pour l'humidité

Cette modélisation présente donc une seule capacité variant avec l'humidité suivant l'équation suivante :

$$C_{\text{humidité}} = \Delta C_{\text{hum}} + C_{\text{hum}_0} \text{ où } \begin{cases} \Delta C_{\text{hum}} : \text{variation de capacité avec l'humidité} \\ C_{\text{hum}_0} : \text{capacité pour 0\% d'humidité} \end{cases}$$

La conception du schéma est identique pour la salinité. On obtient donc le dipôle de la Figure 28.

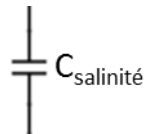


Figure 28 : Modèle simplifié du transducteur pour la salinité

Ce modèle est régi par :

$$C_{\text{salinité}} = \Delta C_{\text{sal}} + C_{\text{sal}_0} \text{ où } \begin{cases} \Delta C_{\text{sal}} : \text{variation de capacité avec la salinité} \\ C_{\text{sal}_0} : \text{capacité pour 0\% de salinité} \end{cases}$$

On peut donc modéliser ce transducteur par une capacité si l'on mesure l'humidité ou par une autre capacité si l'on mesure la salinité.

3.1.4 Validation du modèle électrique par la simulation

Pour valider le modèle électrique de notre transducteur, on effectue la simulation à l'aide de PSPice du schéma obtenu et on compare aux résultats expérimentaux. On simule alors le schéma de la Figure 26 et on obtient le résultat de la Figure 29.

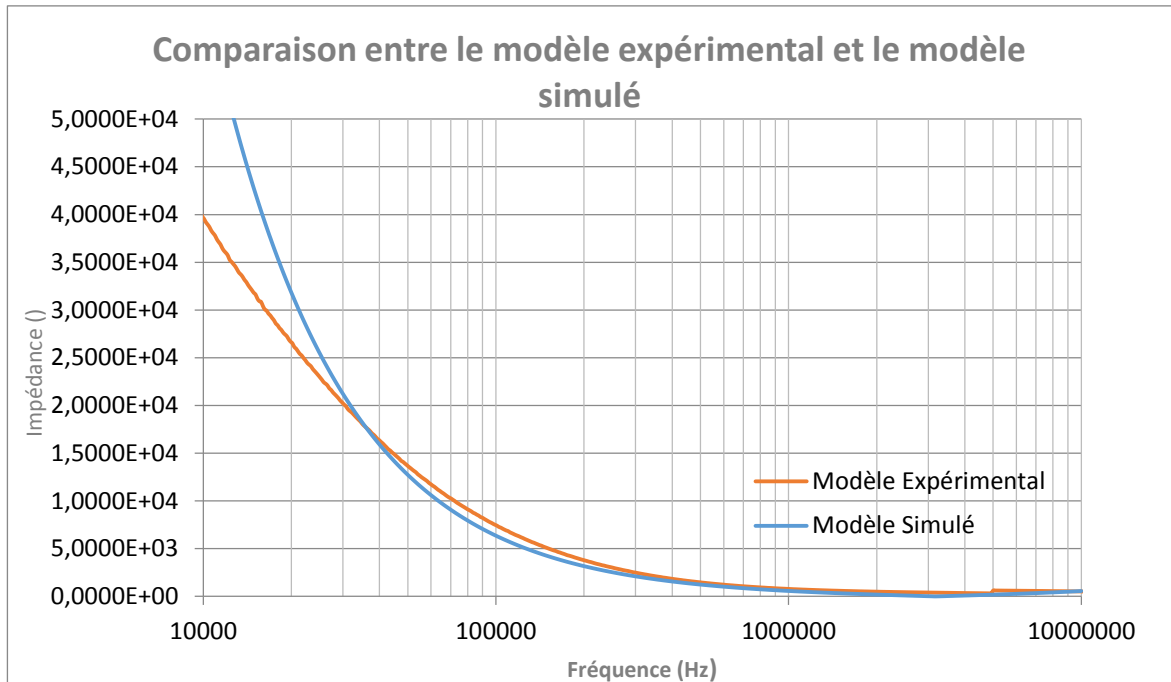


Figure 29 : Comparaison du modèle expérimental et du modèle simulé

On observe tout d'abord qu'à partir de 35kHz, le modèle simulé est semblable au modèle expérimental. La courbure est la même avec une différence maximale de 2.3kΩ et à partir de 400kHz, les courbes sont confondues. Cela valide donc le modèle déduit pour des fréquences supérieures à 35kHz.

Cependant, en deçà de cette fréquence les deux comportements sont distincts. En effet, le modèle simulé modélise C_{capteur} comme une simple capacité fixe. Le comportement des ions présents dans l'eau du sol est différent selon la fréquence d'excitation. A basse fréquence (<100kHz), le champ électrique oriente les ions selon les lignes de champ ce qui modifie la capacité du sol. A cause de cet effet, la capacité varie à basse fréquence ce qui explique la différence de pente entre la simulation et l'expérimental.

On peut donc dire que le modèle est validé par la simulation pour des fréquences supérieures à 35kHz.

La suite de ce chapitre va donc présenter l'optimisation des paramètres pour la mesure de l'humidité ce qui reste la principale fonction à garantir.

3.2 Simulation aux éléments finis

Pour analyser le comportement de ce transducteur, il est nécessaire de pouvoir le simuler à l'aide de simulateur numérique aux éléments finis. Dans notre étude, nous utilisons le logiciel COMSOL Multiphysics permettant ce type de simulation. Le principe de ce type de simulation est de mailler l'élément à simuler pour pouvoir résoudre des équations différentielles dans chacune des mailles. De ce fait, plus le maillage est petit, meilleure est la précision mais les calculs seront plus long (pouvant excéder plusieurs jours pour des maillages inférieurs au mm). Le maillage est donc adapté pour être de taille équivalente à la plus petite mesure de notre système, dans notre cas autour de 5mm.

3.2.1 Les principes physiques

Pour paramétrer nos simulations et interpréter les résultats, il faut tout d'abord étudier les phénomènes physiques mis en jeu.

Notre capteur est un dipôle capacitif, c'est-à-dire que les électrodes servent à créer une capacité et le milieu environnant joue le rôle de diélectrique pour cette capacité. Ainsi, lorsque la permittivité relative du diélectrique change, la capacité varie avec. Cette dépendance est particulièrement visible dans le calcul de la capacité de deux plaques placées en vis-à-vis :

$$C = \epsilon_r \frac{A}{4\pi d} = \frac{Q}{E d}$$

Avec A, correspondant à l'aire des électrodes et d, la distance les séparant (Figure 30).

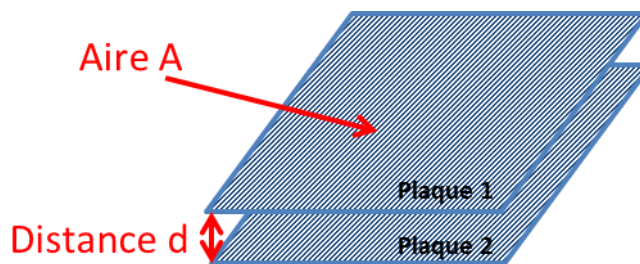


Figure 30 : Représentation du dipôle capacitif

Dans notre situation, les plaques ne sont pas en vis-à-vis, mais côte à côte, ce qui augmente l'importance du matériau autour des électrodes plutôt qu'entre. Il va donc être primordial dans notre cas de plonger le plus directement possible les électrodes dans la terre, avec un minimum de plastique de protection autour, pour éviter que la permittivité du plastique n'altère les mesures.

En effet, c'est la modification des lignes de champ électrique produites par les électrodes par le changement de permittivité, qui va altérer la capacité desdites électrodes. On sait donc que le champ électrique est régi par une équation du type :

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{q_1}{r^2}$$

On y retrouve donc la dépendance en permittivité, et on comprend l'importance d'avoir une protection la plus fine possible autour des électrodes, puisque le champ électrique diminue avec le carré de la distance.

Mesurer la capacité peut donc s'avérer être une méthode particulièrement efficace pour mesurer le taux d'humidité d'un milieu, à condition la permittivité du milieu soit différente de celle de l'eau. Dans notre cas, le sol sec possède une permittivité relative allant entre 2 et 3, et l'eau possède une permittivité relative de 80. Comme ces deux milieux se mélangent facilement, on peut considérer la terre humide comme un seul milieu dont la permittivité relative serait entre celle de la terre sèche et celle de l'eau pure. De très nombreuses formules sont disponibles pour calculer cette relation, mais toutes sont grandement liées au milieu considéré, si bien qu'il fut très difficile de trouver une relation

correspondant à la terre utilisée pour tester le capteur. Un travail de modélisation analytique nous permet d'obtenir la permittivité relative d'un sol en fonction de la fraction volumique de ses composants :

$$\varepsilon_t^b = \varepsilon_m^b V_m + \varepsilon_a^b V_a + \varepsilon_e^b \theta + \varepsilon_{mo}^b V_{mo} + \varepsilon_g^b V_g$$

Avec t, m, a, e, mo et g correspondant respectivement à la terre, les minéraux, l'air, l'eau, la matière organique et la glace, et b une constante proche de 0,5 [19] [27]. Dans notre cas, le capteur fonctionnant à des températures supérieures à 0°C, nous pouvons considérer le taux de glace comme nul, et nous pouvons rassembler les permittivités des minéraux de l'air et de la matière organique afin d'avoir la permittivité de notre sol à une humidité de 0%. On obtient alors :

$$\varepsilon_{humidite}^b = \varepsilon_{sec}^b V_{sec} + \varepsilon_{eau}^b \theta$$

Toutefois les prototypes antérieurs réalisés ont été calculés par des rapports massiques entre la terre et l'eau pour ses expériences, on peut donc également définir la relation entre fraction massique et fraction volumique d'eau :

$$M = \frac{\theta \rho_{eau}}{\rho_{terre\ sèche} + \theta(\rho_{eau} - \rho_{terre\ sèche})}$$

La terre utilisée était constituée de 60% d'argile, 30% de terreau et 10% de calcaire, ce qui nous amène à une permittivité pour la terre sèche (obtenue grâce à des banques de données) de 2,458. Sachant que l'eau pure a une permittivité de 80, on obtient la courbe suivante (Figure 31):

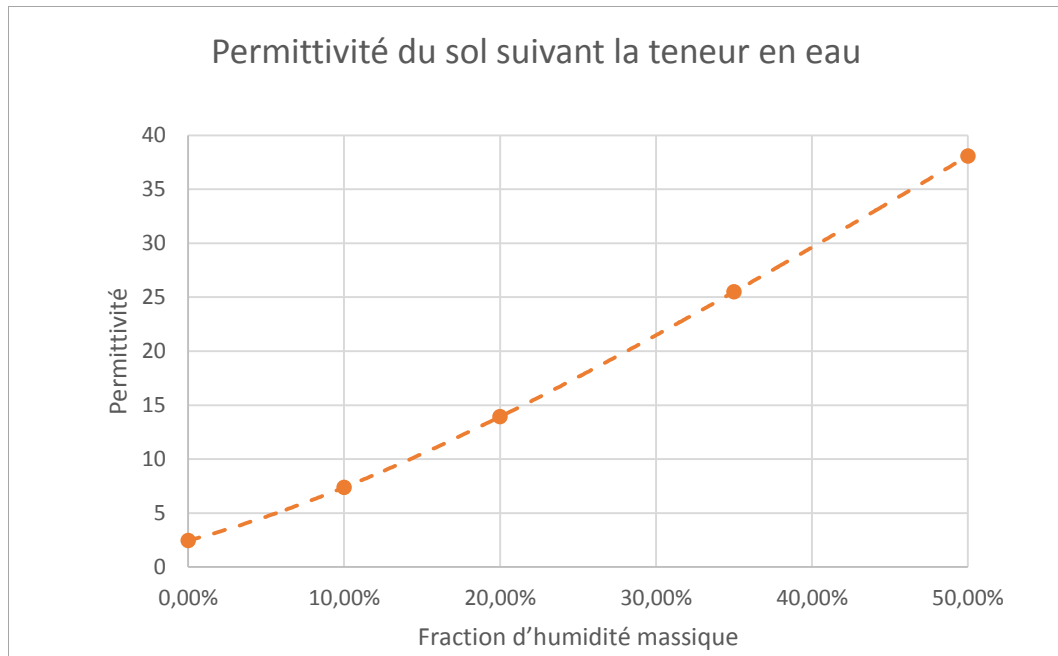


Figure 31 : Permittivité du sol en fonction de son humidité

On obtient donc une courbe particulièrement linéaire, une fois 10% d'humidité atteint. Des valeurs inférieures à 10% d'humidité n'étant atteignables qu'en laboratoire, on pourra considérer la courbe comme linéaire.

3.2.2 Le plan d'expérience

Une méthode particulièrement efficace afin d'optimiser les paramètres d'un système est la méthode des plans d'expérience, que nous allons ici brièvement décrire, puisque nous nous en sommes servi pour améliorer les caractéristiques du capteur à hélices. Cette méthode permet, avec un nombre minimum d'expériences, d'obtenir une courbe représentative du système étudié. Cette méthode se décompose en deux étapes : la première permet de créer une fonction linéaire caractérisant le système, et la seconde, appelée plan composite, affine le modèle avec une fonction quadratique.

La création d'un plan d'expérience passe tout d'abord par la construction d'une matrice de Hadamard [28], qui définit les expériences à réaliser en fonction du nombre de paramètres présents et de leurs interactions. Pour la matrice de Hadamard utilisée, nous devons tester deux paramètres ainsi que leur interaction. C'est donc la matrice de Hadamard (Tableau 5) suivante qui fut choisie, associée aux paramètres précités :

Constante	Espace	Largeur	Interaction
1	1	1	1
1	-1	1	-1
1	1	-1	-1
1	-1	-1	1

Tableau 5 : Matrice de Hadamard du système

On aura donc une série de quatre expériences à faire, avec à chaque fois l'espace et la largeur à faire varier entre leur maximum (valeur de 1 dans la matrice) et leur minimum (valeur de -1) de la plage de valeurs envisagées. Une fois ces données acquises, une série de calculs matriciels nous permettent d'obtenir un coefficient associé à chaque paramètre, décrivant son importance dans le modèle considéré. Une dernière étape est alors nécessaire, afin de supprimer les paramètres non représentatifs du système. Enfin, comme la fonction considérée est, dans un premier temps, linéaire, il convient de ne pas prendre une plage de valeurs trop larges, afin de correspondre au mieux à notre système expérimental.

La réalisation d'un plan composite permet d'affiner la modélisation de notre système à l'aide d'une fonction quadratique, en réalisant quelques simulations supplémentaires. La matrice des expériences (Tableau 6) à réaliser est, cette fois :

Constante	Espace	Largeur	Interaction	Espace	Longueur
1	1	1	1	1	1
1	-1	1	-1	1	1
1	1	-1	-1	1	1
1	-1	-1	1	1	1
1	1.29	0	0	1.6641	0
1	0	1.29	0	0	1.6641
1	-1.29	0	0	1.6641	0
1	0	-1.29	0	0	1.6641
1	0	0	0	0	0

Tableau 6 : Plan composite du système

On voit que toute la première partie reprend les expériences précédemment réalisées, limitant ainsi le nombre de nouvelles expériences. Seule difficulté, les coefficients de 1,29, qui nous imposent de sortir des limites de la plage envisagée, et celui de 0, correspondant à la valeur moyenne entre la valeur maximale et la valeur minimale de la plage.

Cette méthode fut particulièrement efficace pour optimiser certaines topologies, en prenant comme paramètres la largeur des électrodes et leur écart. Les résultats obtenus étaient très similaires pour le plan d'expérience et le plan composite, et tous deux révélèrent que la linéarité la plus importante se trouvait pour les fortes valeurs d'écart (1.29) et de largeur (1.29).

3.2.3 Les paramètres mesurés

On extrait de ces simulations les paramètres suivant :

- La sensibilité du capteur, pour laquelle on récupérerait la variation de capacité entre deux humidités. Ainsi, afin d'avoir la meilleure sensibilité possible, il est nécessaire que les électrodes aient la plus grande variation de capacité possible.
- La linéarité de la réponse. Puisque rajouter de l'électronique pour rétablir la linéarité coûte cher et qu'on ne pourra pas pour autant avoir une réponse aussi exacte, il est essentiel d'avoir la meilleure linéarité possible.
- Le volume d'influence de mesure. C'est-à-dire le volume capté par le capteur. Celui-ci ne doit à la fois pas être trop petit, pour que le volume considéré soit représentatif du sol, ni trop grand pour éviter qu'il ne contienne des pierres, qui n'absorbent pas l'humidité et donc fausseraient les mesures.
- La surface de cuivre. Car ce métal coûte cher et que l'on cherche à avoir un capteur au plus bas prix possible, ne pas augmenter la surface de cuivre est donc essentiel.

3.3 Premier design à partir d'une forme de condensateur

3.3.1 Design original non optimisé mathématiquement

Le cahier de charges impose que le capteur doit facilement s'insérer dans le sol sans dénaturer la structuration pour avoir une image fidèle des infiltrations en eau. La forme simple la plus adaptée à cette contrainte est donc le cylindre :

- le transducteur sera donc composé de deux électrodes séparées, qui pour éviter tout moulage ou fabrication spécifique, électrodes déposées sur un tube comme le montre la Figure 32.

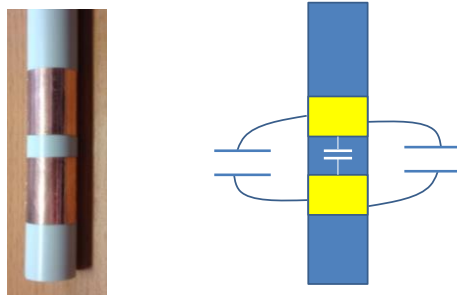


Figure 32 : Premier design du capteur en forme de tube

Le condensateur ainsi créé aura donc comme diélectrique le sol dont la permittivité dépend de son humidité. Les électrodes étant très fines (inférieur au 1/10 mm), la capacité en vis à vis des deux électrodes est négligeable.

Le premier transducteur réalisé possède un **diamètre de 40mm** pour des raisons d'usage et de solidités mécaniques :

- pour faciliter l'insertion dans le sol, on creusera un pré trou à l'aide d'une tarière, le diamètre des mèches permettant de creuser est donc standardisé.
- pour **ne pas trop déstructurer le sol**. Ce diamètre assure donc d'une part une certaine solidité à l'insertion dans le sol mais assez faible pour veiller à ne pas trop détériorer une trop grosse quantité de terre autour du capteur afin de ne pas fausser les mesures.

Ensuite, on choisit des tailles d'électrodes et un espace inter électrodes suffisant pour assurer une connectique et éviter la capacité parasite entre électrode. On prend donc des électrodes de 40mm de large et un espacement de 10mm (Figure 33). Cela donnerait, si l'on approxime ce condensateur à un condensateur plan, pour une humidité de sol de 10% une capacité de 25pF.

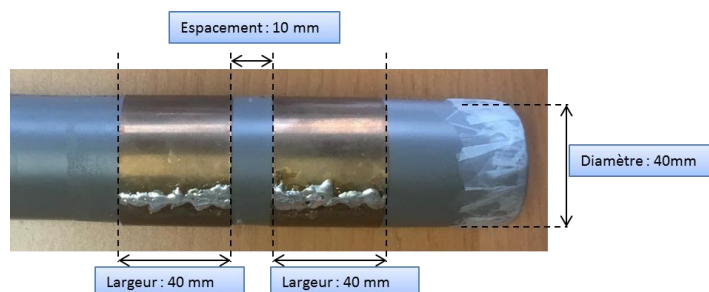


Figure 33 : Dimension du capteur inspiré d'un condensateur

Tout d'abord, nous allons vérifier à l'aide d'une simulation aux éléments finis (logiciel Comsol Multiphysics), le principe de fonctionnement de ce transducteur. Nous relevons tout d'abord la variation de capacité en fonction de l'humidité du sol.

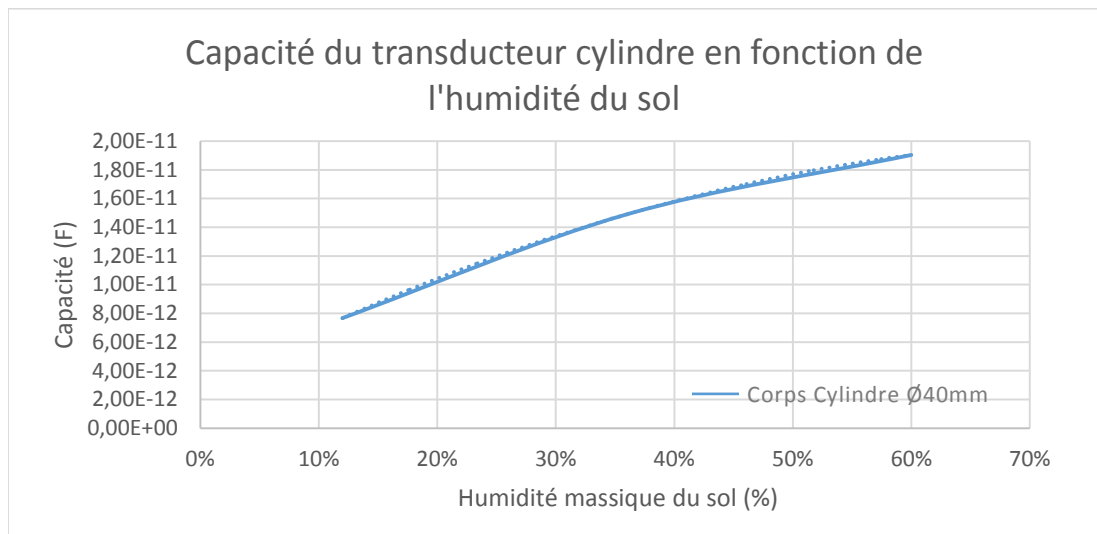


Figure 34 : Courbe de variation de capacité du capteur cylindre

Cette Figure 34 montre bien que la capacité du transducteur **varie non linéairement en fonction de l'humidité du sol** comme dans le paragraphe précédent. Cette forme de transducteur est donc adaptée pour la mesure d'humidité du sol. Nous obtenons une variation de 12.7pF pour une variation de 48% d'humidité ce qui donne une sensibilité de $0.265\text{pF}\cdot\%^{-1}$, ce qui est une valeur exploitable par une électronique de mesure. On peut observer aussi les lignes de champs créées par cet élément sensible et ainsi déterminer la quantité de sol sondée pour en déduire le rayon d'action de ce capteur.

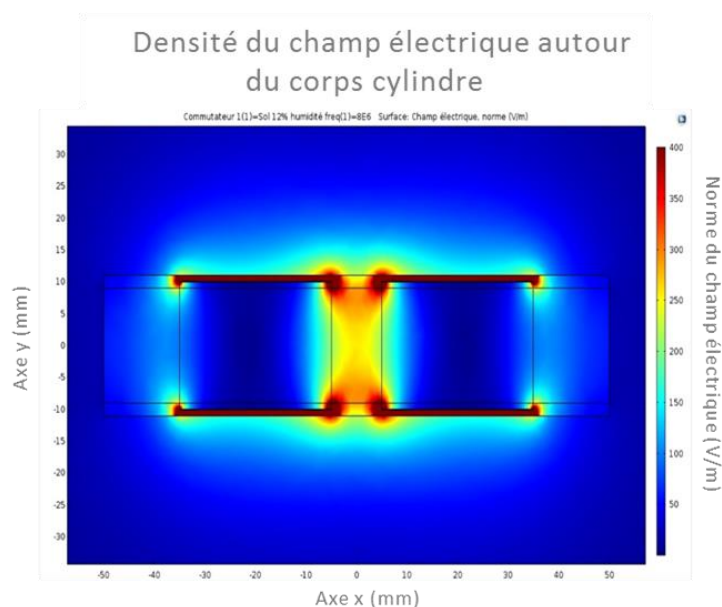


Figure 35 : Densité du champ électrique créée par le capteur en vue de face

On voit sur la Figure 35 que les électrodes, centrées en (-20 ; 0) et (20 ; 0), créent un champ électrique direct mais aussi à l'extérieur du capteur et donc dans la terre. On remarque une densité de champ supérieure à 100V/m jusqu'à 250mm autour du capteur. On peut donc estimer que le volume de terre sondé est **d'environ 14 litres**.

Ces premières simulations montrent que les formes cylindriques du transducteur et des électrodes sont adaptées pour mesurer l'humidité du sol. On obtient une sensibilité suffisante pour effectuer une mesure électronique et un grand volume de terre sondé. Mais la surface de cuivre nécessaire est très importante (15080 mm²) ce qui augmente fortement le coût de ce capteur.

Nous allons donc maintenant essayer d'optimiser les dimensions de ce transducteur pour diminuer la surface des électrodes dans un premier temps, puis d'améliorer ses performances dans un second temps.

3.3.2 Optimisation du transducteur cylindrique

Dans ce paragraphe, nous allons modifier les paramètres physiques du capteur pour réduire son coût et améliorer ses performances.

3.3.2.1 Optimisation géométrique

La première optimisation consiste à diminuer la surface des électrodes pour en diminuer le coût. Le choix est donc de minimiser le diamètre du capteur en conservant les mêmes rapports entre la largeur des électrodes et le diamètre d'une part et, entre l'espacement et le diamètre d'autre part. Ces rapports sont conservés pour ne pas modifier la capacité engendrée. Cette diminution du diamètre permet aussi de détériorer moins de sol à l'insertion du capteur ce qui est un autre point positif.

Dans un but de miniaturisation pour diminuer le coût de fabrication et limiter l'impact dû à l'installation, on divise le diamètre par 2 et on obtient donc un transducteur de diamètre 20mm avec des électrodes de largeur 30mm et un espacement entre-elles de 10mm. On effectue la même simulation aux éléments finis pour observer la variation de la capacité en fonction de l'humidité du sol.

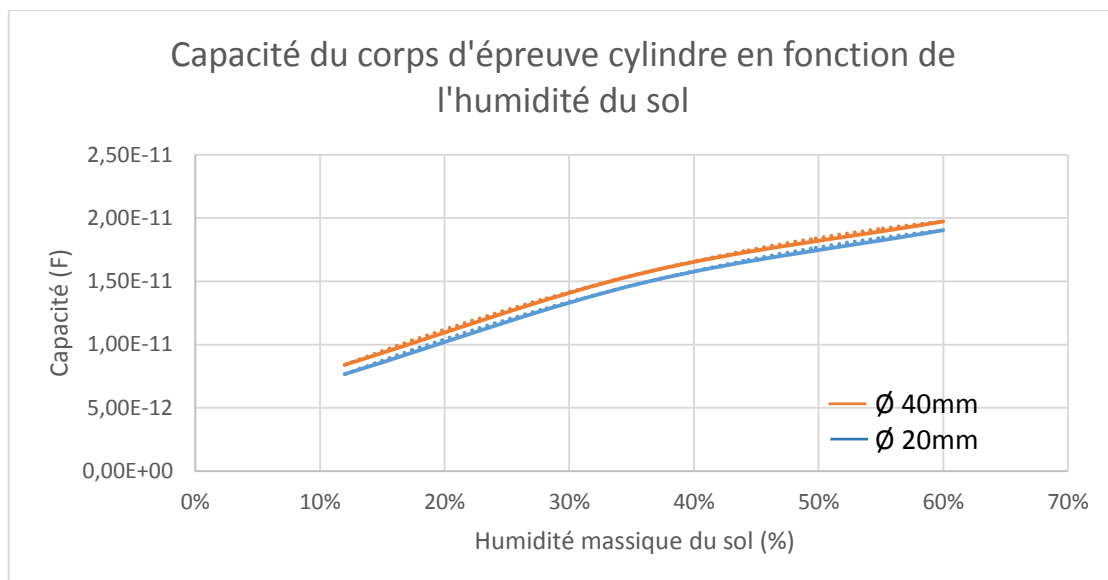


Figure 36 : Comparaison des variations de capacité pour un changement de diamètre du transducteur

Sur la Figure 36, on observe que l'élément de diamètre 20mm possède les mêmes caractéristiques que l'élément de diamètre 40mm. La variation est quasi identique, 12.6pF pour 48% de variation d'humidité. On étudie maintenant le volume de sol sondé grâce à la courbe de répartition de la densité du champ électrique autour du capteur (Figure 37).

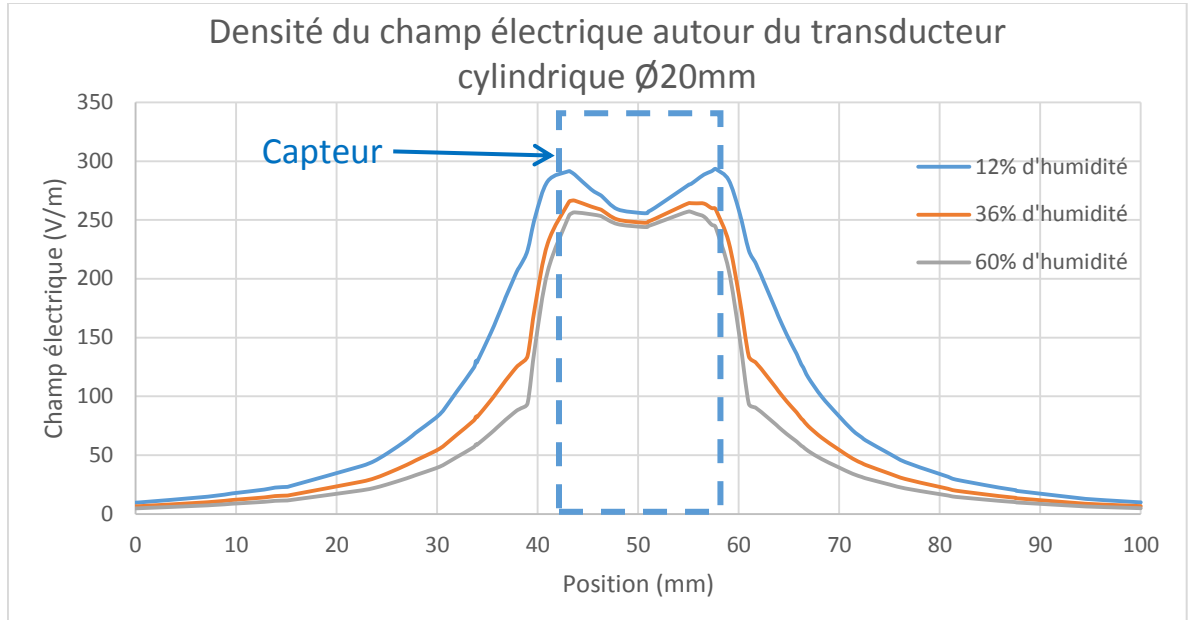


Figure 37 : Répartition du champ électrique autour du transducteur Ø20mm pour différentes humidité du sol

Si l'on considère que le sol est sondé s'il est parcouru par un champ minimum de 50V/m, on obtient un volume de sol de 1.32 litres. Cette valeur est plus faible que celle du transducteur 40mm mais elle reste acceptable par le cahier des charges puisque le capteur Decagon possède un volume de terre sondé de 0.25 litre selon sa documentation. Ce nouveau diamètre est donc validé pour le transducteur.

Le diamètre étant défini, on va maintenant ajuster les dimensions des électrodes pour améliorer les caractéristiques de ce transducteur. On veut augmenter la sensibilité du capteur, pour cela on s'appuie sur la formule d'un condensateur plan :

$$C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{\text{Surface}}{\text{Espacement}}$$

Pour augmenter la capacité, on va donc augmenter la surface des électrodes et diminuer l'espacement entre les électrodes, au risque de créer une capacité parasite entre électrodes. On résume les formes dans le Tableau 7.

Capteur	Diamètre de l'élément (mm)	Espace entre les électrodes (mm)	Largeur des électrodes (mm)	Surface des électrodes (mm ²)
Original	20	10	30	3769.91
Petit entraxe	20	5	30	3769.91
Grandes électrodes	20	10	50	6283.19

Tableau 7 : Dimensions des électrodes pour un transducteur Ø20mm

Effectuons la simulation aux éléments finis pour ces trois capteurs (Figure 38).

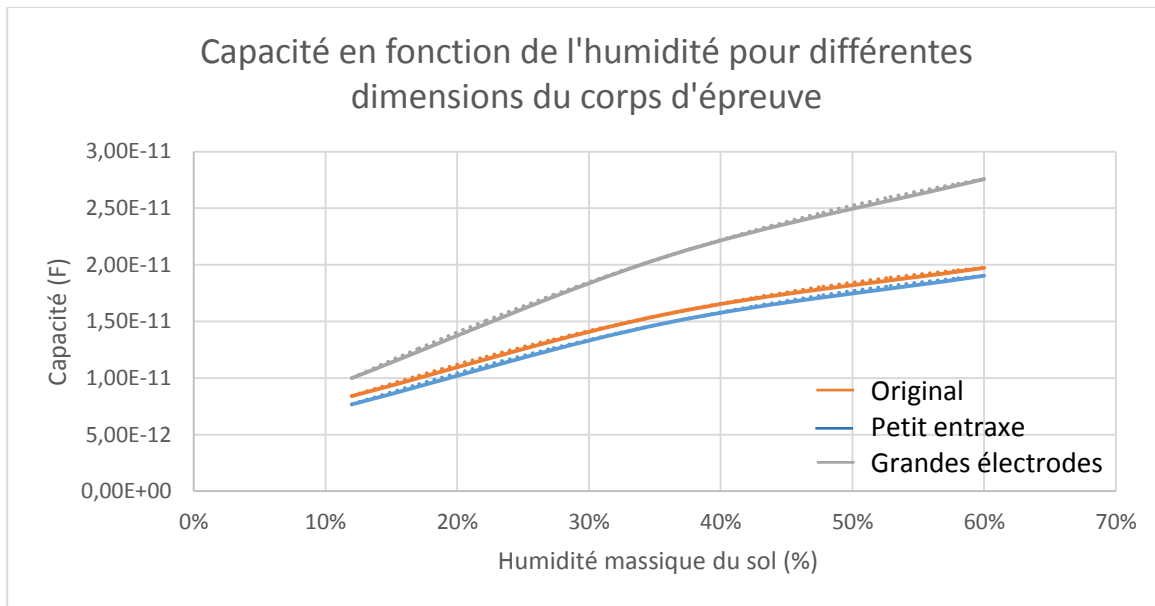


Figure 38 : Variation des capacités pour différentes dimensions des électrodes

Exploitions ces résultats en « règles de dessin des électrodes » :

- Si l'on réduit l'espace entre les électrodes, la capacité est plus élevée mais la sensibilité est réduite de 11% passant de $0.265\text{pF}\cdot\%^{-1}$ à $0.235\text{pF}\cdot\%^{-1}$. Cette variation de dimension n'est donc pas valable.
- Si l'on augmente cet espace, on diminuerait la capacité ce qui ne serait pas bénéfique donc on conserve un espace entre les électrodes de 10mm.
- Si l'on augmente la largeur des électrodes, on augmente la capacité ainsi que la sensibilité de l'élément sensible. En effet, on passe de $0.265\text{pF}\cdot\%^{-1}$ à $0.367\text{pF}\cdot\%^{-1}$ soit une augmentation de 38%. Cependant on augmente aussi la surface des électrodes de 67% ce qui provoque un surcoût. Cette augmentation de sensibilité n'est assez importante face au surcoût qu'elle entraîne. De plus, le capteur final serait plus grand et donc moins facile à installer et à manipuler.

- Si l'on diminue la largeur des électrodes, on diminue la sensibilité mais on gagne en coût. Or la dimension du transducteur actuelle convient, donc on conserve les dimensions actuelles.

Au bilan, pour des raisons de fabrication industrielle du capteur, le diamètre du transducteur est réduit à 17 mm pour obtenir en bout de chaîne un capteur final encapsulé de diamètre 20mm. Pour garder les proportions, les électrodes possèdent une largeur de 25 mm espacées de 8mm pour une longueur totale de 58mm, comme le montre la Figure 39. La sensibilité de ce transducteur est de $0.265\text{pF}\cdot\%^{-1}$ pour une surface d'électrodes de 2670.35mm^2 pour un volume de 1.14L de terre sondée.

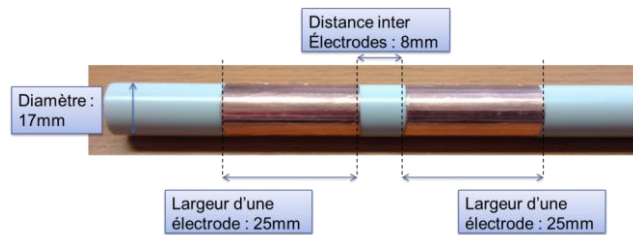


Figure 39 : Dimensions finales du transducteur cylindrique

3.3.2.2 Choix du matériau

Les dimensions ayant été fixées mais pour l'heure les électrodes sont en cuivre. Ce matériau possède est le plus utilisé dans les éléments magnétiques (bobines, transformateurs, ...) ce qui nous a conduit à le choisir pour notre application. Cependant, son coût est élevé du point de vue industrialisation.

Déterminons si l'on peut remplacer ce matériau par d'autres matériaux moins chers (zinc, bronze, étain) ou un alliage tout en gardant les mêmes caractéristiques (forte conductivité, propriétés diamagnétiques). Pour cela, on réalise à l'aide de Gilbert SA des prototypes dans différents matériaux et on analyse ces éléments sensibles à l'analyseur d'impédance pour observer leur comportement. On n'a pas réalisé de simulation Comsol pour ces tubes car le constructeur, pour des raisons de confidentialité, ne nous a pas fourni les compositions physico-chimiques exactes des alliages.

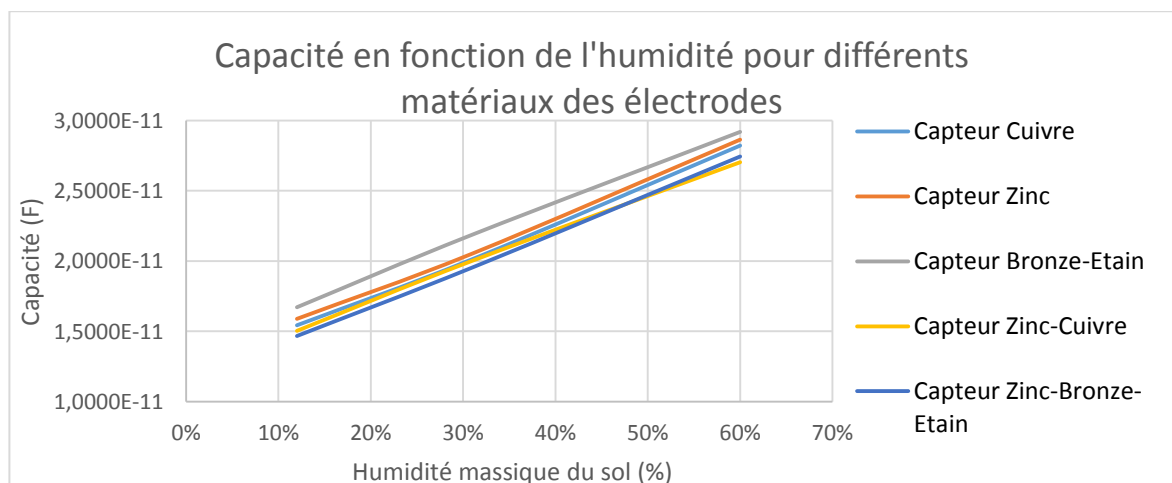


Figure 40 : Variation de la capacité en fonction du matériau des électrodes

On peut voir sur la Figure 40 que tous les matériaux permettent la lecture de l'humidité. Cependant, les électrodes en zinc-cuivre et en bronze-étain possèdent une sensibilité plus faible comme on peut le voir dans le Tableau 8.

Matériau	Cuivre	Zinc	Bronze-Etain	Zinc-Cuivre	Zinc-Bronze-Etain
Sensibilité (pF/%)	0.2664	0.2656	0.2599	0.2499	0.2661

Tableau 8 : Sensibilité du transducteur cylindrique en fonction du matériau des électrodes

On peut donc dire que le cuivre, le zinc et le zinc-bronze-étain conviennent pour le transducteur.

Nous choisissons, en vue de la fabrication en laboratoire en phase vapeur, le cuivre malgré un coût plus élevé car il s'agit du matériau le plus facile à travailler au regard des précédents pour réaliser avec facilité et reproductibilité la fonction des électrodes.

3.3.2.3 Optimisation du potentiel de mesure

Le phénomène exploité étant capacitif, la question à présent posée est quel potentiel de mesure et quel effet sur la sensibilité du capteur. En cas de tensions élevées, la nécessité de rajouter un élévateur de tension va se poser ainsi que son impact sur le coût de la BOM. Polarisons le capteur pour des tensions variant de 3V (tension classique en électronique embarquée) à 100V (Tableau 9).

Potentiel de mesure	3V	5V	15V	25V	50V	100V
Sensibilité (pF.% ⁻¹)	0.2661	0.2664	0.2679	0.2684	0.2706	0.2744
Volume sondé (L)	0.85	1.14	1.3	1.36	1.43	1.49

Tableau 9 : Comparaison des sensibilités pour différentes tensions de mesures

On observe les points suivants :

- la sensibilité augmente avec le potentiel ;
- il y a une variation de 3% sur la sensibilité entre 3V et 100V.
- le volume de terre sondée est affecté par cette tension mais il possède un comportement logarithmique.

La complexité engendrée par le fait de passer d'une excitation de 5V à 100V est trop importante et le gain trop faible pour que ce soit nécessaire. Le volume de terre sondée est fortement diminué (-25%) si l'on polarise à 3V, il faut donc éviter de descendre en dessous de 5V. Il vaut donc mieux, pour garder un coût faible et une faible complexité, mesurer le capteur avec une tension de 5V.

Tous les paramètres ont donc été optimisés pour ces électrodes cylindriques.

3.4 Changement de forme

La forme cylindrique a permis d'obtenir un transducteur simple répondant au cahier des charges mais grâce aux outils de simulation numériques, on peut évaluer des formes plus complexes pour les électrodes dans le but d'augmenter la sensibilité et avoir une électronique de mesure plus fiable.

3.4.1 Double spirale

Nous allons essayer d'optimiser les interactions entre les lignes de champs entre les électrodes et le sol. Pour cela, au lieu d'avoir deux électrodes séparées par un seul espace, nous allons essayer de répartir les électrodes le long du transducteur et dans ce cas, répartir les lignes de champs sur tout le transducteur. Pour cela, nous créons des électrodes en forme d'hélices le long du tube comme le montre la Figure 41.

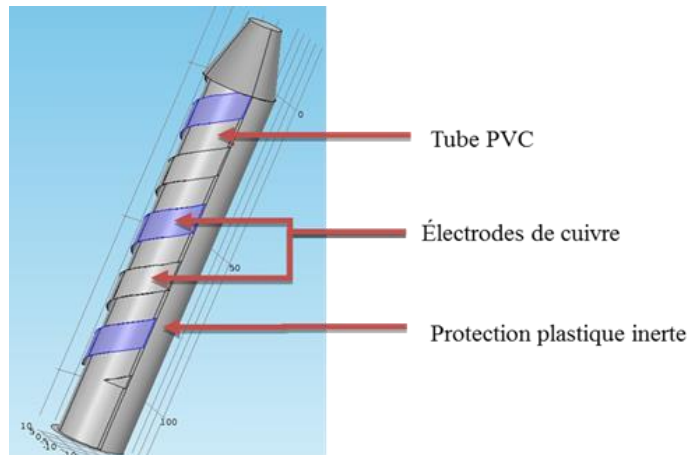


Figure 41: Format du transducteur avec des électrodes en hélices

Nous choisissons de garder le même espace inter-électrodes de 8mm. Cependant, chaque hélice aura une largeur de 8mm pour avoir un ratio 1 avec l'espace les séparant et une longueur de 167mm pour conserver la même surface de cuivre que les électrodes cylindriques soit 2670mm² pour les électrodes cylindriques. Les électrodes seront donc composées de cuivre comme vu précédemment. La longueur de ce transducteur est de 110mm.

On effectue ensuite la simulation aux éléments finis et l'on compare avec le transducteur cylindrique précédent.

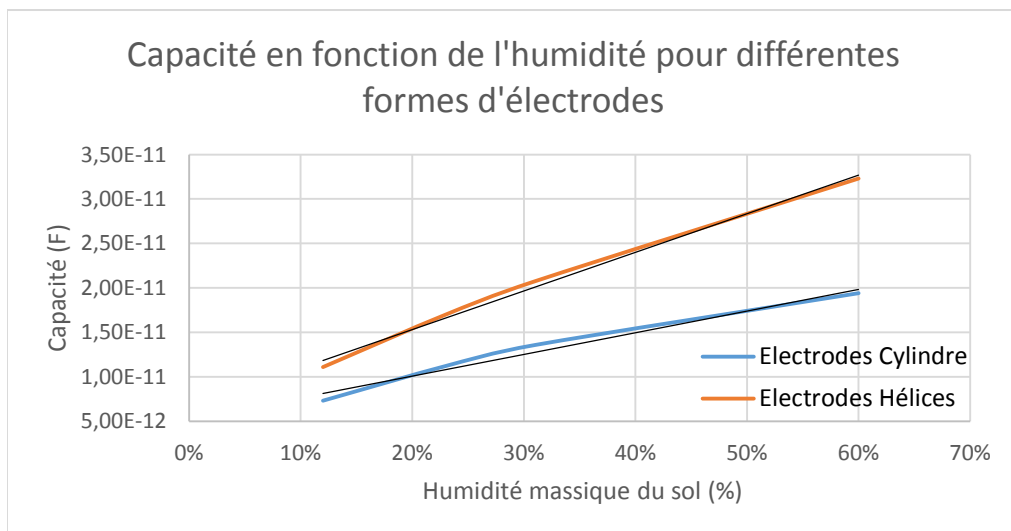


Figure 42 : Comparaison des variations de capacité entre les électrodes cylindriques et les électrodes hélicoïdales

Sur cette Figure 42, on peut voir que les électrodes en hélices produisent une meilleure sensibilité du capteur, $0.4417\text{pF}\cdot\%^{-1}$ contre $0.265\text{pF}\cdot\%^{-1}$ pour les électrodes cylindriques soit une augmentation de 67%. De plus, la réponse est plus linéaire et facilitera donc le traitement en aval. Nous obtenons donc un capteur plus sensible pour un coût de matériau équivalent.

On observe maintenant le volume de terre sondée par ce capteur en vue de dessus (Figure 43).

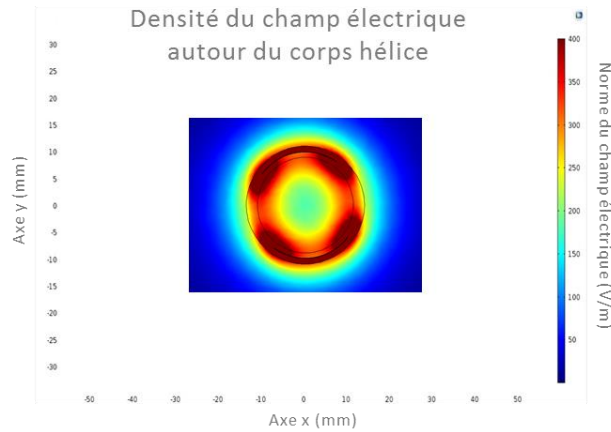


Figure 43 : Densité du champ électrique créée par l'élément à double spirale en vue de dessus

On observe sur cette figure que le champ créé est uniforme autour du capteur. Comme pour le capteur cylindre, on considère la terre sondée si elle est dans une densité de champ de 50V/m minimum. Dans ce cas, on sonde la terre dans un rayon de 35mm autour du capteur ce qui donne un volume sondé de 0.277 litre contre 1.13 litre précédemment.

Toutefois, cette valeur est toujours comparable à celle du capteur Decagon. Cela s'explique du fait d'avoir réparti les électrodes le long du tube. Les lignes de champs ont moins chemin à parcourir du fait de la diminution de la largeur des électrodes ce qui entraîne cette diminution de volume sondé.

3.4.2 Capteurs à branches

Nous avons voulu maintenant optimiser ce volume sondé tout en gardant cette forte sensibilité. Nous avons donc réalisé le capteur de la Figure 44.

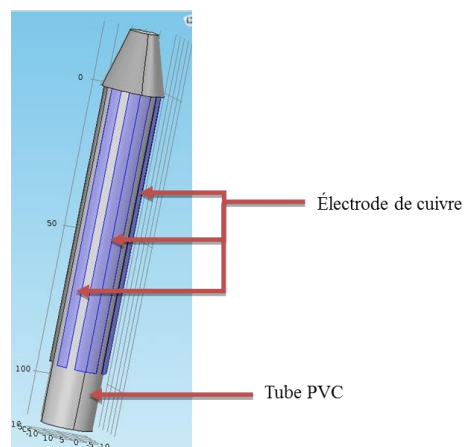


Figure 44 : Forme du transducteur avec électrodes à branches

Ce transducteur possède donc 2 électrodes composées chacune de trois branches reliées entre-elles. La branche centrale mesure 7.9mm et les deux sur les côtés 3.9mm séparées de 8mm entre chaque électrode. Chaque branche mesure 189mm de long pour conserver la même surface de cuivre. Les branches centrales de chacune des électrodes sont opposées l'une à l'autre. Cette forme a pour but de faire parcourir aux lignes de champ apportées par les branches centrales des électrodes et guidées par les branches annexes, la plus grande distance dans le sol pour augmenter le volume sondé.

On mesure un volume sondé de 1.737 litre soit plus de six fois plus que le capteur à hélice et 1.5 fois plus que le capteur à électrodes cylindriques. Le but est donc atteint pour ce capteur. Vérifions maintenant si la réponse à l'humidité est conforme (Figure 45).

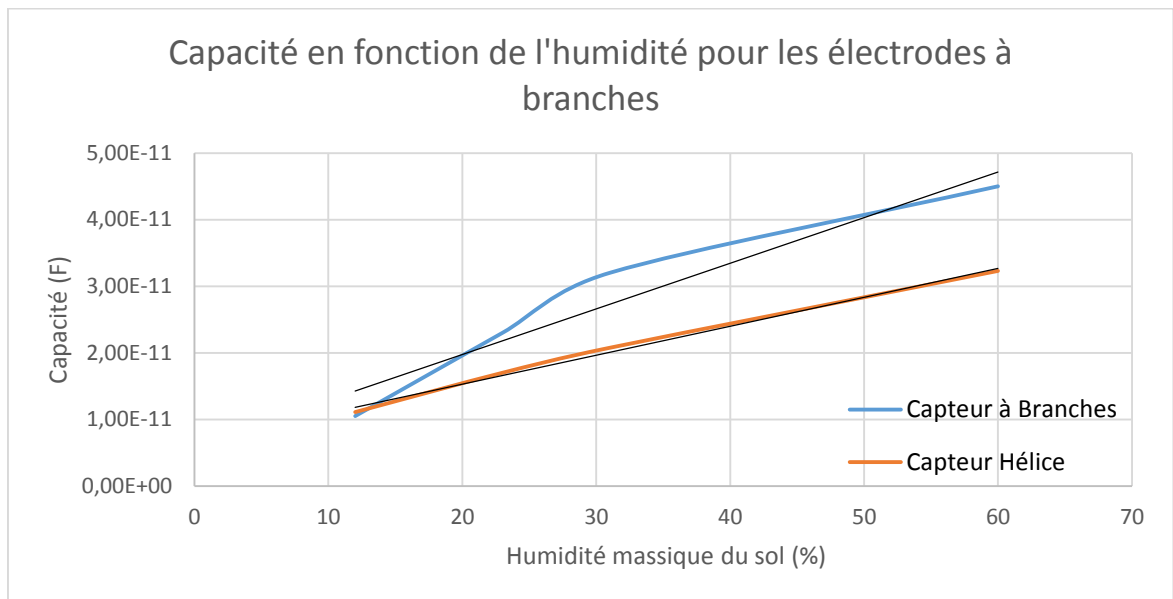


Figure 45 : Variation de la capacité du transducteur à électrodes à branches

Cette forme d'épreuve augmente la sensibilité jusqu'à $0.7188\text{pF}\cdot\%^{-1}$ cependant la réponse n'est plus linéaire. Le traitement à apporter par la suite sera donc plus lourd et nécessitera plus de complexité.

3.5 Conclusion

Pour réaliser le transducteur, nous nous sommes appuyés sur deux vecteurs de tests. Le premier est la simulation aux éléments finis. Cet outil nous permet de relever en simulant différentes humidités de sol, la variation de capacité de notre transducteur. De plus, en étudiant le champ électrique généré, on peut déterminer le volume de sol sondé. Le deuxième vecteur de tests est le prototype. On a réalisé pour chaque forme ou dimension simulées un prototype de ce transducteur que nous avons testé à l'analyseur d'impédance en suivant le protocole décrit en introduction. Cela a permis de valider les simulations avec un comportement réel.

Ce transducteur est composé de deux électrodes isolées l'une de l'autre. Ces électrodes forment une impédance avec un comportement capacitif. On modélise donc notre

transducteur par une capacité variant avec l'humidité du sol ou avec la salinité du sol suivant la fréquence de fonctionnement. La forme générale de cet élément sensible sera le cylindre pour faciliter l'insertion dans le sol.

Le premier design des électrodes est inspiré d'un condensateur possédant deux électrodes isolées. On enroule les électrodes autour du tube en laissant un espace entres-elle. On choisit ensuite d'optimiser les dimensions géométriques de ces électrodes en faisant varier le diamètre du tube, la largeur de celles-ci et l'espace les séparant. On obtient un optimum pour un diamètre de 17mm, des électrodes de 25mm de largeur séparées de 8mm.

Pour choisir la forme optimale, on résume leur caractéristique dans le Tableau 10.

Forme des électrodes	Sensibilité (pF.% ⁻¹)	Réponse linéaire	Volume sondé (Litre)	Surface de Cuivre (mm ²)
Bagues	0.265	Oui	1.32	2670.35
Double spirale	0.4417	Oui	0.277	2670.35
Branches	0.7188	Non	1.737	2670.35

Tableau 10 : Comparaison de différentes formes d'électrodes

Dès lors, on optimise les performances en modifiant la forme de ces électrodes. Pour optimiser les interactions avec le sol, on choisit des électrodes en forme d'hélice. Cette forme augmente la sensibilité ainsi que la linéarité de la réponse en fonction de l'humidité du sol. La seconde forme, les électrodes à branches, est créée dans le but d'augmenter le volume de sol sondé. Cela augmente aussi la sensibilité mais dégrade fortement la linéarité de la réponse.

On choisira donc comme forme d'électrode les hélices. Tout d'abord, cette forme possède une bonne sensibilité qui permet une lecture facilitée de l'humidité du sol. Deuxièmement, la réponse est linéaire ce qui facilite fortement le traitement à effectuer. Dernièrement, la forme hélice est une forme à révolution ce qui facilite la fabrication de ce transducteur

Au final, le transducteur est donc un cylindre de diamètre 17mm possédant des électrodes de 8mm de large et de 167mm de long enroulées en double hélice séparée de 8mm autour du tube comme le montre la Figure 46.

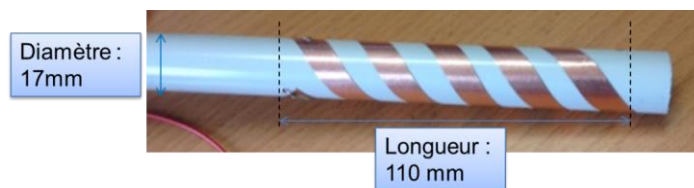


Figure 46 : Forme finale du transducteur

Ce transducteur possède une sensibilité de 0.4417pF/% avec une réponse présentée sur la Figure 47. Le volume de sol sondé est de 0.277 litre.

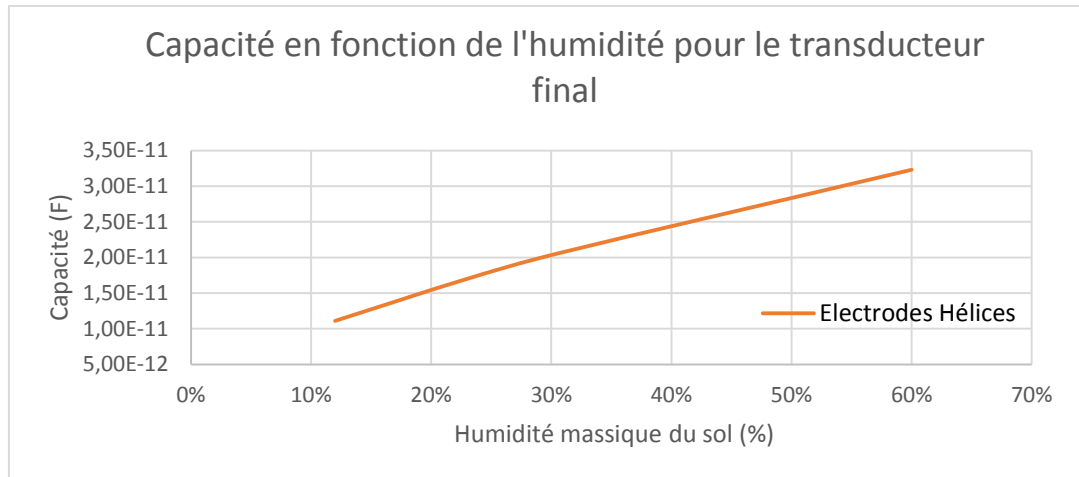


Figure 47 : Réponse du transducteur final en fonction à l'humidité du sol

On vérifie maintenant la réponse pour la salinité en Figure 48. On trace sur cette figure la réponse du transducteur pour différents taux d'engrais (engrais à base d'azote) rajouté à l'eau pour humidifier le sol. On effectue deux relevés pour une humidité de 20%RH et de 30%RH.

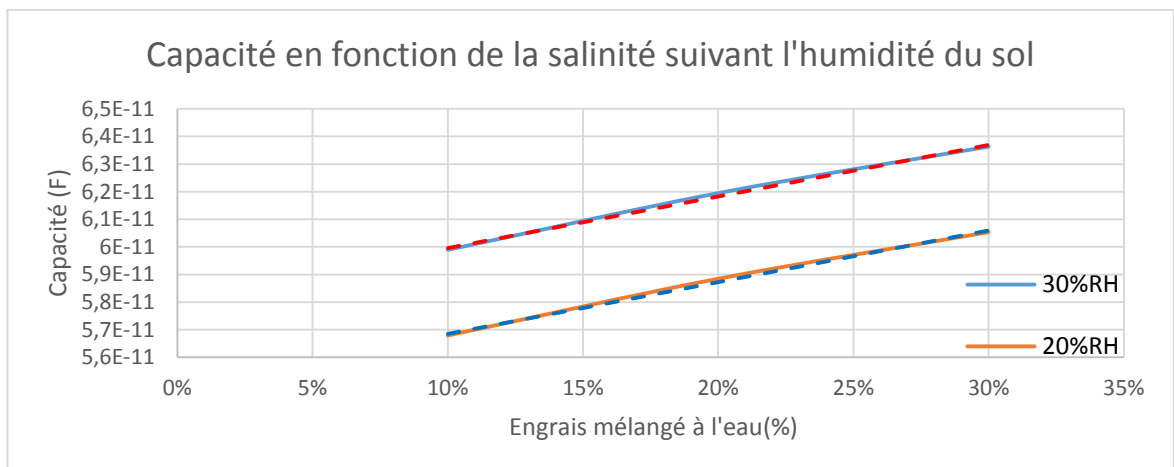


Figure 48 : Réponse du transducteur en fonction de la salinité du sol

On peut retenir de cette figure :

- la réponse de la salinité est linéaire suivant l'engrais
- la sensibilité est la même pour 20%RH et 30%RH, $S = 0.187 \text{pF} \cdot \%^{-1}$
- seule la capacité C_{sal0} est affectée par l'humidité.

Ce capteur a été optimisé pour la mesure de l'humidité. Cependant il est aussi capable de mesurer la salinité en modifiant la fréquence de lecture. La mesure de salinité est conjuguée à celle d'humidité, il faut donc maintenant concevoir une électronique pouvant mesurer à la fois l'humidité et la salinité du sol.

Chapitre 4 : L'électronique de mesure

4.1 Introduction

Le transducteur étant conçu, on va concevoir l'électronique nécessaire pour effectuer la mesure. Le transducteur possédant deux fréquences de mesures distinctes, 8MHz pour l'humidité et la centaine de kilohertz pour la salinité, il est nécessaire de prévoir une électronique étant capable d'effectuer la mesure dans ces deux gammes de fréquence.

Dans un premier temps, nous allons adapter la variation de capacité en variation de grandeurs électriques (tension, courant, fréquence, phase) pour faciliter l'exploitation. Il faut concevoir cette électronique avec la faisabilité de mesures aux deux fréquences distinctes.

Une fois la mesure établie, il faudra ensuite l'interfacer vers le concentrateur en définissant différents types de protocoles de communications. Forcément, nous allons étudier des architectures analogiques et numériques avec comme critères de choix la précision de la mesure, sa stabilité thermique tout en respectant la contrainte économique nécessaire au transfert industriel.

4.2 Les méthodes de mesures d'une capacité

Quelles architectures électroniques capables de transformer une variation de capacité en signal électrique ? A cette question nous proposons solutions techniques :

- Architectures à capacités commutées,
- Mesure en pont
- Oscillateur de relaxation.

4.2.1 Les montages à capacités commutées

Bien souvent les montages à capacités commutées sont très utilisés pour travailler avec des condensateurs intégrés. En pratique, le principe de commutation synchrone permet de réaliser une fonction de transfert sous forme d'un quotient d'impédances capacitives [29]. Pour adapter ce type de montage à notre application, on remplace une des capacités intégrées par notre capteur capacitif [30]. Pour faciliter la conception, l'entrée sera fixée pour que la sortie ne dépende que des variations de notre capteur.

Dans notre cas, on utilise un montage amplificateur inverseur comme le montre la Figure 49.

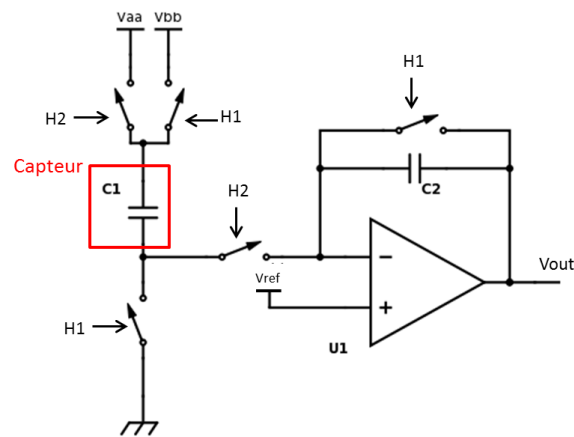


Figure 49 : Schéma d'un montage amplificateur inverseur à capacités commutées

On peut observer sur ce schéma le montage amplificateur inverseur. Les interrupteurs sont commandés par deux horloges distinctes H1 et H2. Le capteur à mesurer est placé en position de C₁. L'AOP est alimenté en V_{cc} et GND. Les tensions V_{aa} et V_{bb} permettent de positionner V_{moy}, la tension moyenne en sortie, en posant :

$$V_{aa} = V_{cc} + V_{moy} \text{ et } V_{bb} = V_{ref} + V_{moy} \text{ où } V_{cc} \text{ est l'alimentation de l'AOP}$$

Dans ce cas, on obtient une excursion en tension telle de la forme :

$$\Delta V_{out} = \frac{C_1}{C_2} (V_{cc} - V_{ref})$$

La tension de sortie varie linéairement selon un quotient capacitif :

$$V_{out} = k \cdot C_1 + V_{moy} \text{ avec } k = \frac{V_{cc} - V_{ref}}{C_2}$$

La relation de linéarité entre la tension sortie et la variation de capacité rend le traitement plus simple. Toutefois il possède quelques inconvénients :

- Le premier est la génération des tensions V_{aa} et V_{bb}. Il faut une très bonne précision sur ces tensions pour assurer une reproductibilité du montage. Il faut donc utiliser des composants précis et potentiellement onéreux.
- De plus, il faut pouvoir générer les horloges H₁ et H₂. Pour pouvoir fonctionner, il faut minimiser les dérives thermiques des fréquences de référence et synchroniser les fréquences autour de 8MHz. Cela entraîne une forte utilisation du microcontrôleur embarqué.
- Les derniers problèmes sont les switch analogiques. Il faut qu'ils soient rapides et possédant une résistance en fonctionnement très basse pour perturber le moins possible. Ce sont donc des composants critiques qui vont pénaliser le coût de la chaîne de mesure.

De plus, ce montage est adapté pour fonctionner à des fréquences élevées (supérieures au MHz) cependant si l'on veut mesurer la salinité du sol, il faut travailler avec des fréquences inférieures. Ce montage ne peut effectuer cette mesure, on ne le retiendra donc pas pour notre application.

4.2.2 Le pont de Sauty

Le deuxième montage présenté est le pont de mesure en régime harmonique. Il s'agit ici de construire un pont, à l'image du pont de Wheatstone pour la mesure de résistance, lequel permet de mesurer une variation de capacité. Ce pont est un pont hybride composé d'une branche résistive et d'une branche capacitive alimentée par une tension sinusoïdale (V_{ac} sur le schéma de la Figure 50).

Nous avons établi dans le chapitre précédent que la mesure d'humidité s'effectuerait à la fréquence de 8MHz ; le capteur étant modélisé par la capacité, V_{AB} étant l'image analogique consécutive à toute variation de capacité.

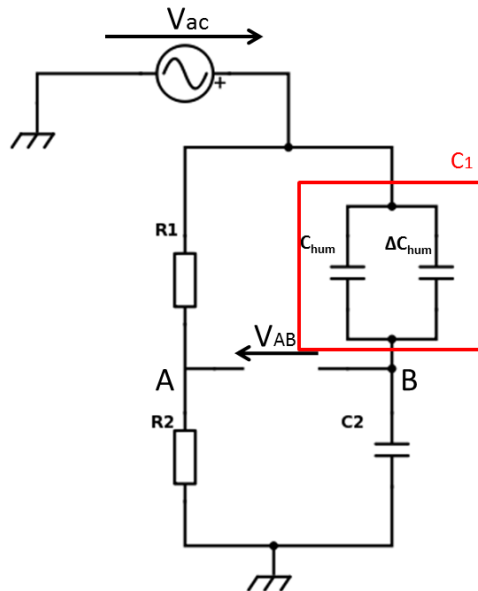


Figure 50 : Schéma d'un pont de Sauty

Ce pont possède un point d'équilibre pour l'obtention d'une tension de référence $V_{AB} = 0V$. Celle-ci est obtenue en respectant la relation $C_1 R_1 = R_2 C_2$.

A l'équilibre, le potentiel V_A égale :

$$V_A = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{ac}$$

Le potentiel V_B égale :

$$V_B = \frac{Z_{C_2}}{Z_{C_1} + Z_{C_2}} V_{ac} = \frac{C_1}{C_1 + C_2} V_{ac}$$

D'où la différence de potentiel V_{AB} :

$$V_{AB} = V_A - V_B = V_{ac} \left(\frac{R_2}{R_1 + R_2} - \frac{C_1}{C_1 + C_2} \right)$$

Pour satisfaire $V_{AB} = 0$, il faut :

$$V_{AB} = 0 \Rightarrow \frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{C_1}{C_1 + C_2} \Rightarrow R_2 C_2 = R_1 C_1$$

Pour notre application, on prendra $R_1 = R_2$, ainsi la condition d'équilibre s'écrit : $C_1 = C_2$.

On choisit donc comme valeur pour C_2 , la valeur maximale de la capacité du transducteur qui est de 11.1pF (cf. 3.4). La condition d'équilibre sera donc atteinte pour le minimum d'humidité mesuré, 10% dans notre étude.

L'amplitude V_A étant fixe, l'augmentation de la capacité C_1 va augmenter l'amplitude de V_B et par conséquent diminuer celle de V_{AB} . Les signaux étant sinusoïdaux, si l'amplitude de V_B devient supérieure à celle de V_A , le signal V_{AB} sera donc déphasé de 180° avec le signal V_{AC} mais son amplitude augmentera avec celle de V_B . On peut déduire que l'amplitude de la tension V_{AB} est proportionnelle à l'humidité.

On réalise dans une simulation de ce montage pour vérifier la variation de cette tension en fonction de la variation du transducteur.

On prendra pour cela, $R_1=R_2=100\text{k}\Omega$ et $C_2=33\text{pF}$. On obtient les résultats de la Figure 51.

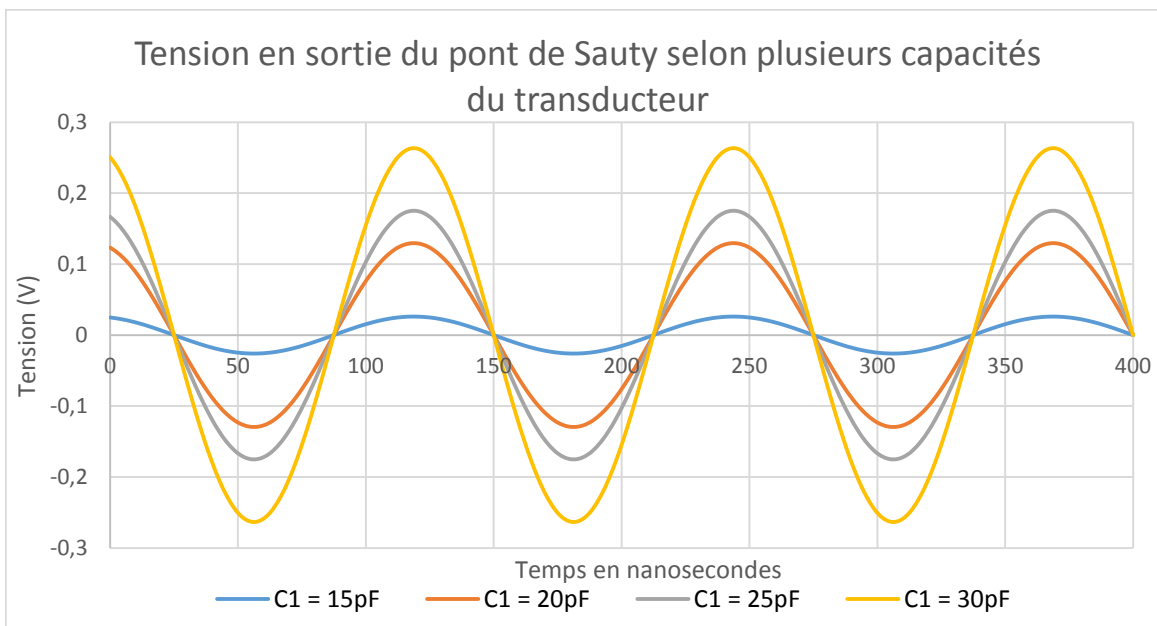


Figure 51 : Tracé de la tension en sortie du pont de Sauty en fonction de plusieurs capacités du transducteur

- Pour cette simulation, le signal en entrée est un signal sinusoïdal d'amplitude 1V et de fréquence 8MHz.

- On vérifie que l'hypothèse précédente est avérée. En effet quand la capacité du corps C_1 augmente, l'amplitude du signal V_{AB} augmente consécutivement.
- La plage de variation de C_1 égale à la plage de variation de la capacité du transducteur avec une humidité s'échelonnant de 10% à 60%.

Analysons plus précisément la variation d'amplitude en fonction de la variation d'humidité (Figure 52).

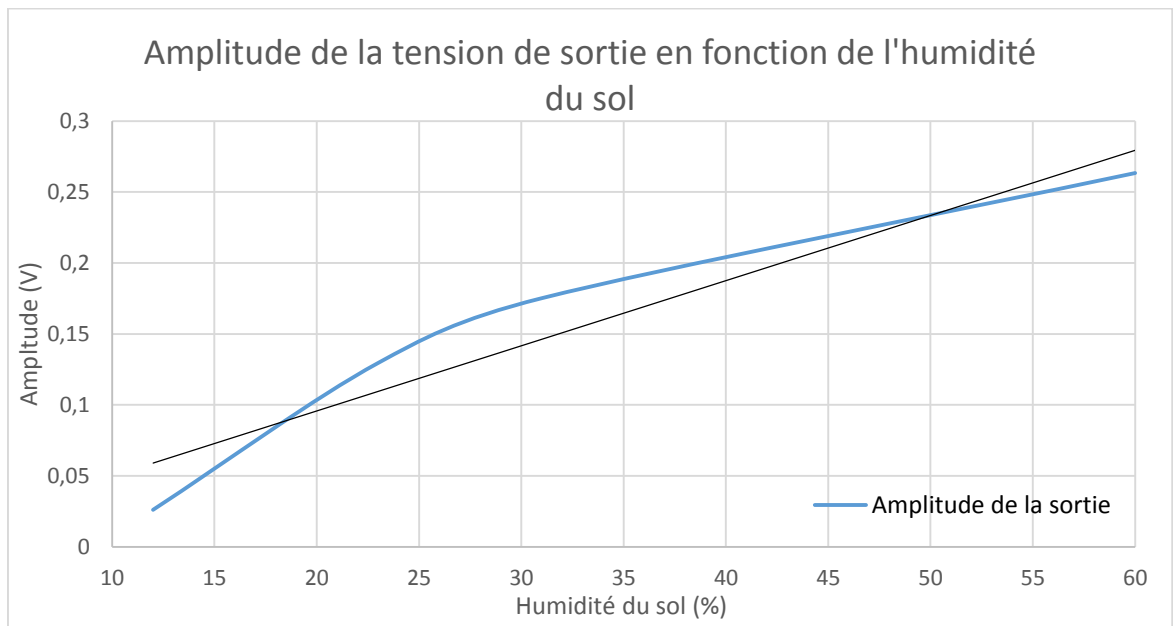


Figure 52 : Amplitude de la tension de sortie du pont de Sauty en fonction de l'humidité du sol

La réponse de ce montage n'est donc pas linéaire en fonction de l'humidité du sol. Le traitement de l'information s'avérera plus complexe.

Cependant si l'on approximait cette courbe par une droite, on obtiendrait une sensibilité à l'humidité de $0.0046V.\%^{-1}$.

On peut optimiser cette sensibilité en augmentant l'amplitude du signal de polarisation du pont. Si l'on polarise le pont avec un signal d'amplitude 5V, on obtient une sensibilité de $0.023V.\%^{-1}$. Cette nouvelle sensibilité est suffisante pour pouvoir mesurer l'humidité au pourcent près. En effet, le quantum de conversion d'un convertisseur analogique/numérique 8 bits alimenté en +3V (CAN présent dans la plupart des microcontrôleurs) est de 12mV, une variation de 23mV est donc mesurable sur ce type de convertisseur. Ainsi, on pourra distinguer une variation relative de 1% d'humidité.

Pour conclure sur ce montage, son principal avantage est sa simplicité. Son architecture s'appuie des composants simples mais il faut faire attention à la tolérance des composants. En effet, la condition d'équilibre est une égalité donc il faut que les valeurs soient précises pour avoir un système reproductible, ce qu'une production en série de pourrait tolérer. Il faut aussi concevoir le signal sinusoïdal de polarisation du pont. Pour cette fréquence, 8MHz, une solution est un oscillateur élémentaire.

De plus, dans son utilisation optimale, le signal analogique de polarisation est un signal alternatif. Cela implique une alimentation symétrique pour l'électronique de mesure. Or dans notre capteur final, cette fonction si elle était retenue aurait un coût puisque nous devrions concevoir une alimentation négative en plus de l'alimentation principale unipolaire.

4.2.3 Les oscillateurs

Dans cette architecture, on va intégrer notre transducteur dans un oscillateur et exploiter les variations d'impédances corrélées à l'humidité pour exploiter en sortie, une fréquence image du taux d'humidité du sol. Rappelons que la fréquence de travail est voisine de 8MHz, ce qui, parmi les architectures d'oscillateurs disponibles, nous conduit à choisir un oscillateur Colpitts.

Il est construit autour d'un transistor bipolaire, composant peu cher. Sa fréquence d'oscillation est fonction des capacités et d'inductance externe associées [31] (Figure 53).

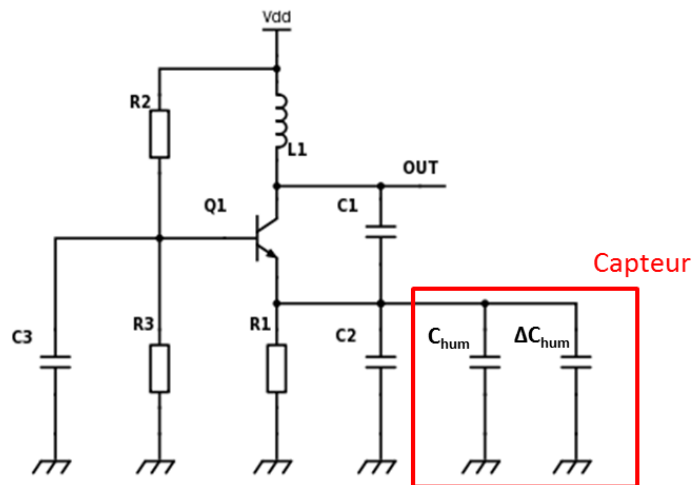


Figure 53 : Schéma d'un oscillateur Colpitts base commune

Pour ce type de montage, la fréquence d'oscillation caractéristique est donnée selon la relation :

$$f_{osc} = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_1 \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}}}$$

On place notre transducteur en parallèle du condensateur C_2 pour permettre à toute variation de capacité, une variation de fréquence. Dans ces conditions, la relation s'écrit :

$$f_{osc} = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_1 \frac{C_1 (C_2 + C_{hum_0} + \Delta C_{hum})}{C_1 + C_2 + C_{hum_0} + \Delta C_{hum}}}}$$

Pour choisir une fréquence centrale d'oscillation, on dimensionne :
 $L_1 = 7.8\mu\text{H}$, $C_1 = 100\text{pF}$, $V_{dd} = 5\text{V}$
 et $C_2 = 47\text{pF}$ sachant que $C_{\text{hum}0} + \Delta C_{\text{hum}} \in [11.1\text{pF}; 38\text{pF}]$

Ainsi, on observe donc le comportement de l'oscillateur sur la Figure 54.

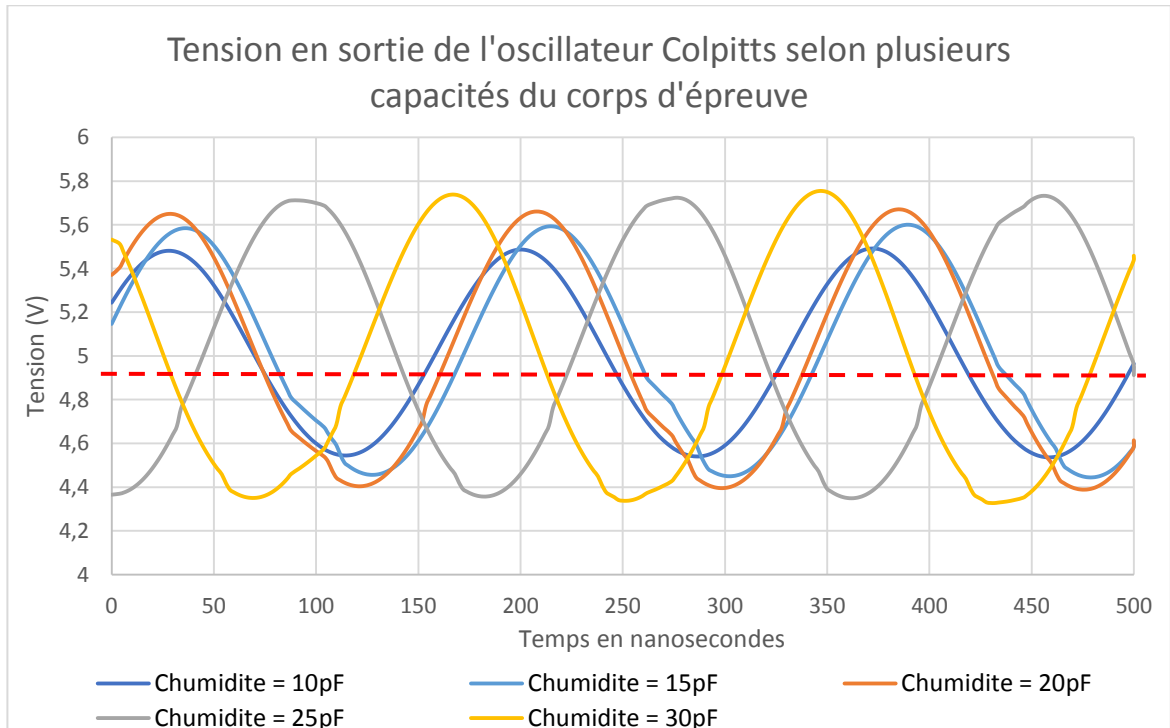


Figure 54 : Tracé de la tension en sortie de l'oscillateur Colpitts en fonction de plusieurs capacités du transducteur

On observe sur cette figure la forme des oscillations en sortie de l'oscillateur Colpitts en fonction de la capacité C_{humidite} du transducteur.

- La forme est quasi sinusoïdale mais comporte de petites distorsions quand l'amplitude d'oscillation dépasse 400mV. La forme théorique est sinusoïdale, cependant lorsque l'oscillation atteint 400mV, des non linéarités apparaissent ce qui provoque cette distorsion d'oscillation.
- On peut remarquer tout d'abord que le signal n'est pas centré en 0V ou en 2.5V mais il est centré autour de 5V. Cela est conforme à la théorie puisque en statique l'inductance se comporte comme un fil et donc la tension de repos de la sortie est V_{dd} . Il faudra donc ajuster ce signal autour de 2.5V pour pouvoir l'exploiter par la suite sans risque de saturation.
- De plus, on remarque que l'amplitude n'est pas constante en fonction de la capacité du transducteur. Cependant, l'amplitude passe de 557mV pour $C_{\text{humidite}} = 10\text{pF}$ à 740mV pour $C_{\text{humidite}} = 30\text{pF}$ ce qui permet tout de même d'exploiter le signal par la suite. Cette variation d'amplitude n'est donc préjudiciable pour l'exploitation.

Les paramètres amplitudes et formes des signaux étant maintenant connus, analysons les paramètres fréquentiels pour pouvoir en déduire la variation de fréquence (Figure 55).

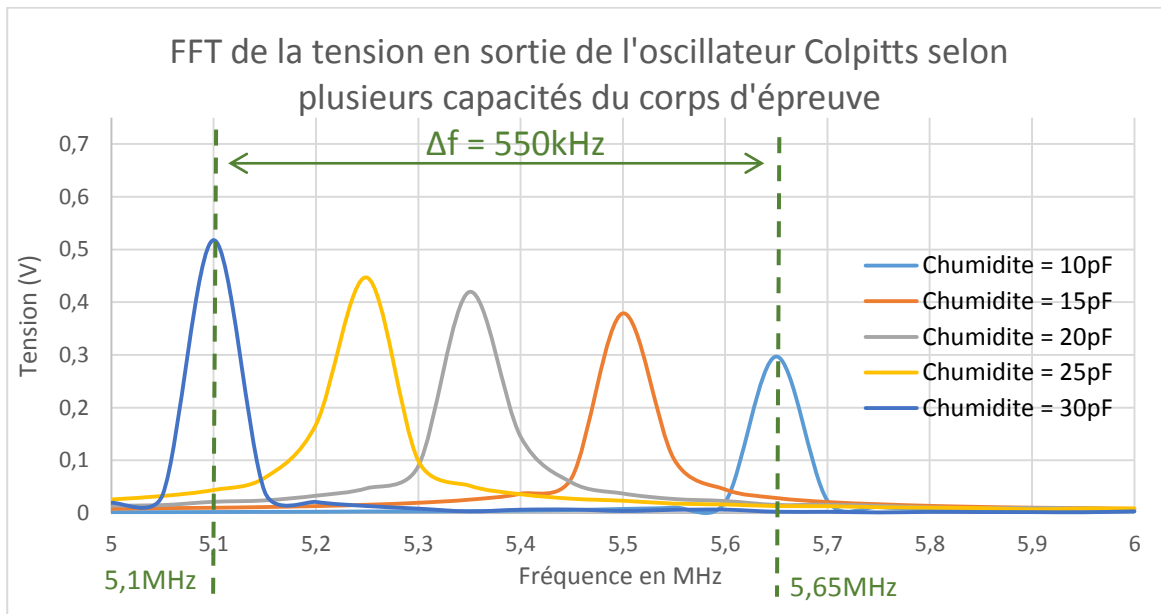


Figure 55 : Tracé de la FFT de la tension en sortie de l'oscillateur Colpitts en fonction de plusieurs capacités du transducteur

On retiendra de cette figure les enseignements suivants :

- la variation d'amplitude vue précédemment (cf. Figure 52);
- une variation de fréquence de 550kHz pour une variation de capacité de 20pF soit une sensibilité de $27.5\text{kHz}\cdot\text{pF}^{-1}$, une valeur qui permet de discerner une variation de capacité inférieure au picofarad ce qui correspond à une variation de 1% d'humidité avec le transducteur.

Intéressons-nous au comportement de la variation de cette fréquence en fonction de l'humidité. En connaissant la relation entre la capacité C_{humidite} du corps d'épreuve et l'humidité du sol, on peut relier sur la Figure 56 la fréquence d'oscillation en fonction de l'humidité du sol.

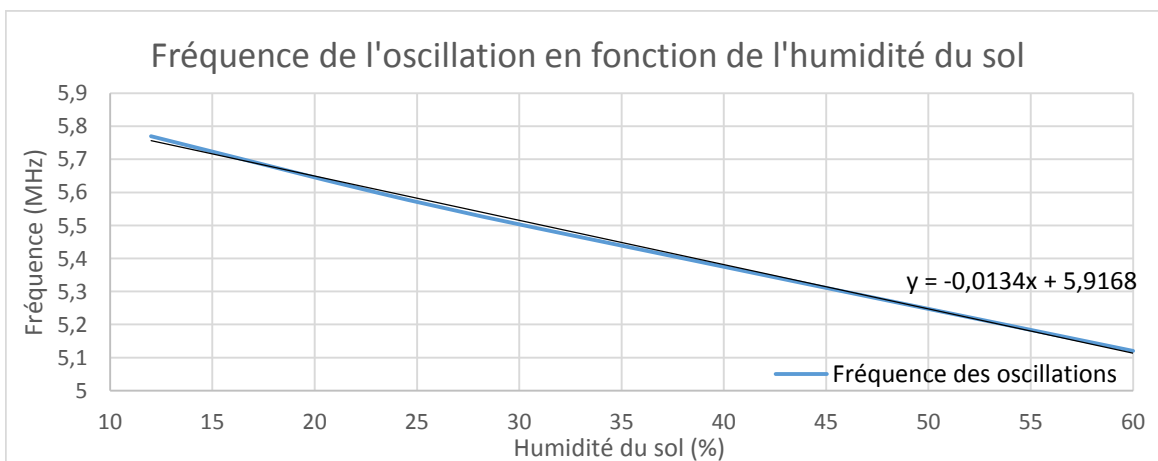


Figure 56 : Variation de la fréquence de sortie de l'oscillateur en fonction de l'humidité du sol

La première observation qui s'impose naturellement est la quasi linéarité de la variation : moins de 2% d'erreur par rapport à la fonction linéaire interpolée.

Du point de vue comportement vis-à-vis de la variation d'humidité :

- la fréquence diminue quand l'humidité augmente. En effet, dans l'équation de la fréquence, la capacité du corps est au dénominateur donc si cette capacité augmente avec l'humidité la fréquence diminue, ce que l'on observe ici.
- on relève une sensibilité de $13.4\text{kHz}\cdot\%^{-1}$, ce qui est permet de mesurer au pourcent près. Avec un composant convertisseur fréquence/tension ou bien au moyen d'un fréquencemètre codé, on peut quantifier une variation minimale inférieure à 1kHz. De ce fait, il est plus aisé de mesurer une variation relative de 1% d'humidité.

Une remarque qui semble anormale : la fréquence d'oscillation n'est pas de 8MHz comme attendu mais autour de 5.5MHz. Cela s'explique par le choix (toujours lié aux contraintes économiques) de privilégier des valeurs normalisées pour les composants. Ces 5.5Mhz sont toujours compatibles avec les zones fréquentielles déterminées dans le chapitre précédent.

Ce montage permet le mesure de l'humidité mais aussi de la salinité puisque il suffit de redimensionner les composants pour modifier la fréquence d'oscillation. Etant composé de peu composants basiques, son coût est faible. La linéarité de sa réponse permet un traitement facilité par la suite.

Cependant, la présence d'une inductance dans le montage complexifie l'intégration. Il est difficile d'intégrer les inductances en petit boîtier avec un faible coût. Toutefois, la faible valeur de celle présente dans notre oscillateur permet d'avoir un bon compromis entre la taille et le coût.

On résumé les intérêts de chaque montage dans le Tableau 11.

	Montage capacités commutées	Montage pont de Sauty	Montage Colpitts
Coût	-	o	+
Complexité	-	o	+
Equation de sortie	+	o	-
Linéarité de la réponse	+	-	+

Tableau 11 : Comparaison des montages de mesures de capacité

Pour conclure sur le choix de l'architecture le montage à capacités commutées permet de mesurer correctement l'humidité du sol. Cependant, il est complexe à mettre en œuvre et impose une forte contrainte sur la génération des fréquences d'horloges. Concernant le montage pont de Sauty, il permet également la mesure mais sa réalisation est plus simple.

De plus, sa réponse n'est pas linéaire en fonction de l'humidité ce qui rend l'exploitation complexe et nécessite une intelligence embarquée. Enfin, le montage oscillateur Colpitts permet la mesure de l'humidité avec une réalisation simple. Sa réponse est linéaire mais il s'agit d'une fréquence, ce qui est plus complexe à mesurer qu'une amplitude. On choisit tout même ce montage pour sa réponse linéaire. On va donc maintenant étudier comment mesurer cette fréquence et la transmettre à l'extérieur.

4.3 Les fonctionnalités

Ayant effectué le choix d'une conversion variation de capacité liée à la présence d'humidité en variation de fréquence, nous devons à présent comparer deux solutions de mesure de fréquence :

- la première entièrement analogique à l'aide des composants discrets dont le principe s'appuie sur un convertisseur fréquence/tension,
- La seconde entièrement numérique consistera à coder un fréquencemètre embarquée dans le microcontrôleur.

Mais avant de poursuivre, n'oublions pas d'adapter l'électronique de mesure pour obtenir l'information nécessaire à la mesure de la salinité.

4.3.1 Le multiplexage de fréquence pour la mesure

Afin de pouvoir mesurer les deux informations, humidité du sol et la salinité, il faut pouvoir ajuster le transducteur à deux fréquences distinctes. L'électronique choisie précédemment ne permet d'effectuer la mesure qu'à une seule fréquence, il faut donc élaborer une nouvelle fonction. Le montage avec l'oscillateur Colpitts étant bien adapté pour ce type de mesure, nous décidons de le doubler et de multiplexer le transducteur comme le montre la Figure 57.

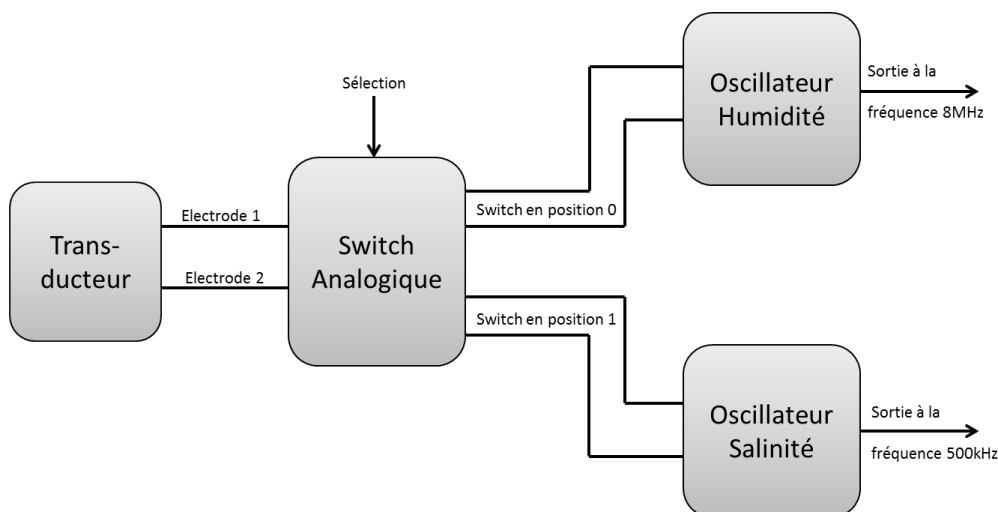


Figure 57 : Schéma fonctionnel du multiplexage de fréquence

Sur ce schéma, nous utilisons un switch analogique DPDT (Double Pole Double Throw) pour multiplexer le transducteur. En effet, ce type de switch permet de contrôler deux voies simultanément par une seule commande. Cela permet donc de contrôler la position des deux électrodes des armatures pour les connecter à l'oscillateur dédié à la mesure correspondante. La mesure de l'humidité s'effectuera pour un niveau bas de l'entrée de sélection, celle de la salinité sur un niveau haut. L'intelligence embarquée sélectionnera ensuite la sortie correspondante à l'information choisie.

Nous avons sélectionné comme switch analogique le DG2018. La Figure 58 rend compte du schéma fonctionnel extrait de sa documentation constructeur [32].

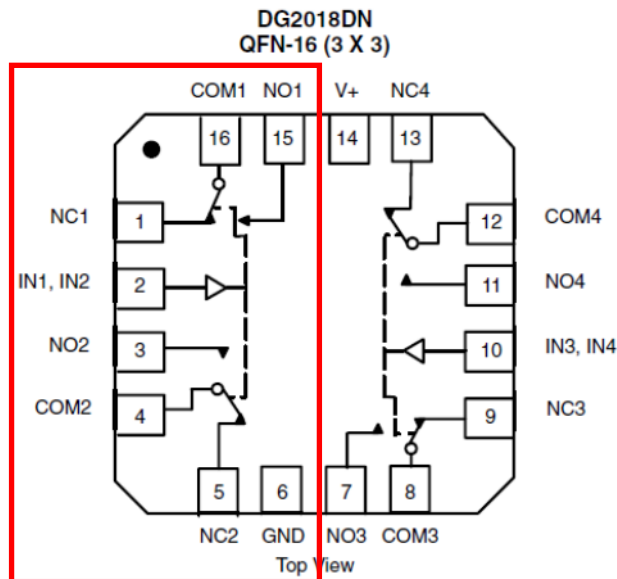


Figure 58 : Schéma fonctionnel du DG2018 extrait de la documentation constructeur

Notons sur cette figure que le composant possède en réalité deux switch indépendants, nous n'en utiliserons qu'un seul, celui de gauche.

On pourrait penser que ce composant est mal choisi (ou surdimensionné) mais à notre niveau il présente des caractéristiques nécessaires à l'application :

- la première est la fréquence maximale d'utilisation. En effet, dans le cas de la mesure d'humidité, un signal de fréquence 8MHz doit être commuté, ce composant ayant une bande passante de 180MHz, on s'assure que le signal ne sera pas altéré par ce switch.
- La seconde est la tension d'alimentation. Ce composant doit être alimenté en 3V pour être compatible avec l'alimentation intégrée.
- Enfin remarquons la faible valeur de résistance pour l'interrupteur à l'état fermé. En effet, la capacité du corps étant faible, il faut choisir un switch qui introduit le moins de parasite sur la connexion. Avec une résistance de 2Ω , ce composant reste pour nous un choix réfléchi malgré son double switch.

4.3.2 Système de lecture de la fréquence

L'électronique de mesure permet maintenant de lire l'humidité et la salinité en transformant la variation de capacité en variation de fréquence. Comment exploiter cette information pour pouvoir délivrer une sortie exploitable ?

4.3.2.1 Solution analogique : utilisation d'un convertisseur fréquence/tension

Pourquoi nous intéresser à une solution analogique ? La réponse évidente est de solliciter le moins possible l'intelligence embarquée et favoriser le choix d'un microcontrôleur minimaliste (et donc le moins cher).

On utilise ici un convertisseur fréquence/tension pour transformer la variation de fréquence en variation de tension directement connecté à un convertisseur analogique/numérique qui peut être intégré au microcontrôleur.

La principale contrainte de convertisseur est la fréquence d'utilisation. En effet, pour la mesure d'humidité, la fréquence est de 8MHz. Or, il est très difficile de trouver un

composant qui fonctionne à cette fréquence dans les composants « classiques ». Le maximum atteint par ces convertisseurs est 1MHz. Sans basculer vers un convertisseur « exotique » et donc hors spécification budget, on abaisse, via un diviseur de fréquence, la fréquence du signal humidité pour l'adapter avec ce type de composant.

Cependant pour attaquer un compteur, il faut créer un signal carré. Or notre signal est sinusoïdal, on place alors un AOP monté en montage comparateur pour convertir le signal sinusoïdal en signal carré.

Un compteur binaire peut être utilisé en plaçant notre signal sur son horloge et en prenant une sortie Q_n (Q_0 étant le poids faible), la fréquence du signal est divisée par 2^n . Attention, cela va aussi diviser la variation induite par l'humidité toutefois la variation étant relativement importante ($13.4\text{kHz}\cdot\%^{-1}$), on a une marge acceptable.

En divisant par 16 le signal on s'éloigne de la fréquence max du convertisseur (1MHz) avec une fréquence de travail autour de 500kHz. De plus, si l'on choisit une fréquence de lecture pour la salinité de 500kHz (fréquence dans la bande de lecture de la salinité), on peut mutualiser le convertisseur pour minimiser le coût et l'encombrement sans modifier son circuit.

Pour le convertisseur fréquence/tension, on choisit l'AD650 de chez Analog Device, c'est un VCO (Voltage Controled Oscillator) de type convertisseur tension/fréquence mais une note d'application, l'AN-279 [33], permet d'inverser la conversion !!! [34] (Figure 59).

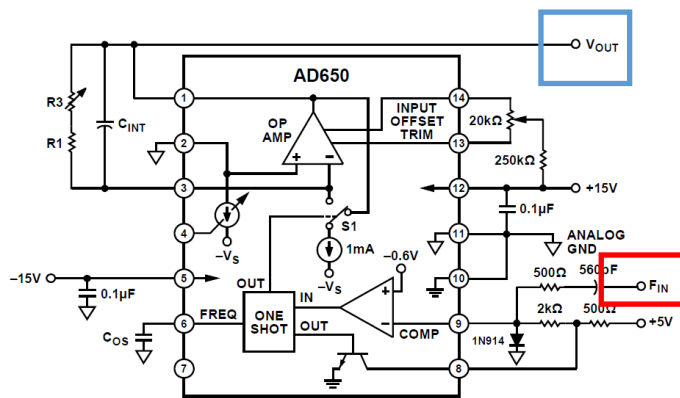


Figure 13. Connection Diagram for F/V Conversion

Figure 59 : Schéma d'utilisation de l'AD650 en convertisseur fréquence/tension

Sur ce schéma, l'entrée F_{in} est en rouge et la sortie V_{out} en bleu. La première contrainte de ce composant est la nécessité d'avoir une alimentation symétrique ; V_{cc+} (+15V sur le schéma) et V_{cc-} (-15V sur le schéma) ; contrainte qui va peser sur le coût de la fonction de conversion. La documentation constructeur indiquant l'acceptation d'une alimentation symétrique $\pm 9V$, on détermine via la note d'application [33], la valeur des composants C_{os} , C_{int} , R_1 et R_3 pour choisir l'excursion de sortie :

$$C_{os} = 180\text{pF}, C_{int} = 22.1\text{nF} \text{ et } R_1 + R_3 = 4.3\text{k}\Omega$$

On obtient ainsi la **réponse linéaire**, présentée en Figure 60, en fonction de la fréquence d'entrée.

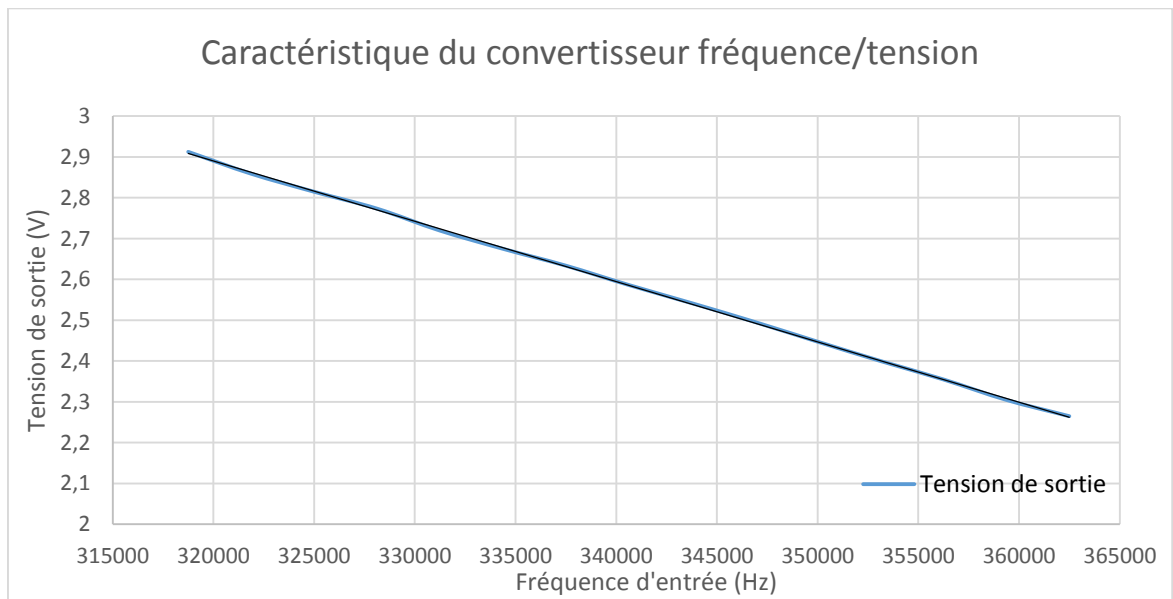


Figure 60 : Caractéristique du convertisseur fréquence/tension en fonction de la fréquence d'entrée

On place en entrée, des fréquences étalons correspondantes à une humidité comprise en 10% et 60% et on obtient une tension comprise entre 0V et 3V, ce qui est compatible avec le microcontrôleur alimenté en 3V. On obtient une sensibilité de 17mV.kHz^{-1} , ce qui donne une sensibilité du système complet de 15mV.\%^{-1} . Cette sensibilité est compatible pour être lue par un convertisseur analogique/numérique. Pour un convertisseur classique intégré à un microcontrôleur (8 bits alimenté en +3V), le quantum de mesure est de 11.8mV, on peut alors distinguer la variation de 1% d'humidité (15mV).

La solution discrète de lecture de la fréquence est donc composée d'un compteur binaire utilisé en diviseur de fréquence et d'un convertisseur fréquence/tension AD650 pour obtenir en sortie une tension exploitable par un système numérique.

4.3.2.2 Solution numérique : utilisation d'un fréquencemètre embarqué

La seconde solution proposée est une solution numérique. On code à l'intérieur du microcontrôleur un fréquencemètre pour permettre une lecture de la fréquence en sortie de l'oscillateur.

Nous sommes dans une électronique embarquée donc il faut que la fréquence de fonctionnement du microcontrôleur soit faible pour éviter d'utiliser un composant cher et gourmand en énergie, on va donc la limiter à 20MHz. La fréquence de mesure pour l'humidité étant de 8MHz, il va donc être très difficile d'avoir une lecture précise de celle-ci, on utilise donc le même diviseur de fréquence que précédemment pour abaisser la fréquence d'entrée autour de 500kHz (du même ordre que la fréquence de la salinité).

Pour lire une fréquence à l'aide d'un microcontrôleur, on utilise les timer. On va compter à l'aide d'un premier timer un nombre de période N du signal à mesurer et en même temps, on utilise un second timer pour compter le nombre de période d'horloge durant ce temps. A la fin, on relève ce nombre d'horloges et en connaissant la fréquence de fonctionnement, on identifie la fréquence du signal mesuré (Figure 61).

Comme on peut le voir le début du comptage est synchronisé sur un début de période pour réduire les erreurs de mesures.

La première erreur de mesure possible est de l'ordre d'une période d'horloge du microcontrôleur. Plus la fréquence d'horloge sera élevée, plus l'erreur sera petite, il faut donc choisir une période la plus grande possible. En se référant à notre limite, on choisira une fréquence de 16MHz qui est une valeur normalisée ce qui ferait une erreur de 62.5ps sur la lecture soit de moins de 0.01% en %RH.

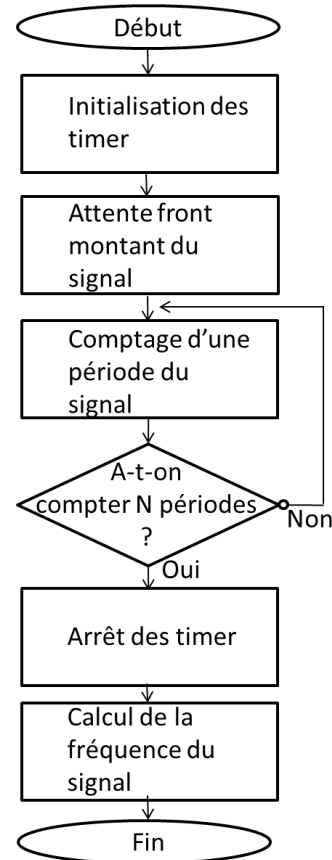


Figure 61 : Algorithme de mesure numérique de la fréquence

Après avoir lu le temps mesuré sur les timer, il faut revenir à la fréquence du signal à mesurer. Pour cela, nous avons établi la formule suivante :

$$Période_{signal} = \frac{\text{nombre d'horloges comptées} \times Période_{horloge}}{\text{Nombre de signal compté}}$$

L'erreur de mesure totale va donc aussi dépendre du nombre N de période de signal comptés. Plus ce nombre sera grand, plus l'erreur sera petite. Cependant, augmenter N augmentera aussi le temps nécessaire pour effectuer la mesure. La mesure durera N fois la période du signal avec en plus le temps du calcul qui n'est pas négligeable sur ce type de microcontrôleur. Il faut donc faire attention à ce temps de mesure car plus il sera long plus le capteur consommera d'énergie. On se limitera donc à 100 périodes de signal pour avoir un temps de mesure d'environ 2,5ms ce qui reste inférieur au temps de mesure du Decagon. L'erreur de mesure sera au maximum de 625ps soit une erreur de 0.03125% ce qui est négligeable. La plus grande source d'erreur viendra de l'arrondi induit par la limitation des nombres à l'intérieur du microcontrôleur. En effet, le nombre de bits du microcontrôleur va limiter la précision du calcul et donc induire une erreur.

La solution numérique utilise donc les ressources du microcontrôleur telles que les timer et du temps de calcul mais aussi le compteur comme la solution analogique. Cependant, elle est plus économe en prix mais aussi en encombrement.

4.4 Effets thermiques

Eprouvons à présent le fonctionnement de ces deux solutions en fonction des températures qu'elles peuvent subir in-situ dans le sol. Même si en profondeur le sol est thermalisé, les mesures superficielles sont contraintes par les variations de température climatique. On va donc étudier les effets sur nos 2 systèmes de mesures.

4.4.1 Test de l'oscillateur Colpitts

On teste en simulation le comportement thermique du montage Colpitts. Pour cela, nous le soumettons à des températures courantes dans le sol à une profondeur de 10cm, +15°C à +50°C. Caractérisons aussi, grâce à une enceinte thermique, la fréquence de l'oscillation du montage Colpitts réel (Figure 62).

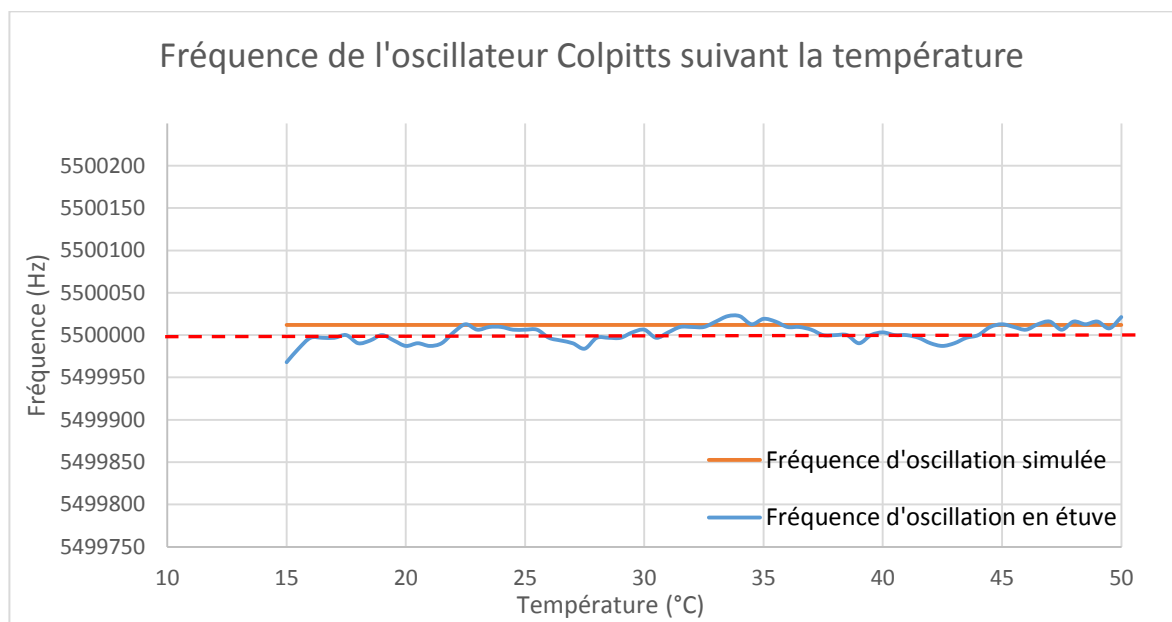


Figure 62 : Effet de la température sur l'oscillateur Colpitts

On constate donc l'effet de la température sur l'oscillateur Colpitts. Pour la simulation, la fréquence d'oscillation est de 5.000012MHz à 20°C. Cette fréquence ne varie quasiment pas avec la température (à 1mHz près).

Pour le système réel, la fréquence d'oscillation à 20°C, représentée par le trait pointillé rouge, est de 5.5MHz. La variation maximale de fréquence est de 22.4Hz ce qui donne une variation de 0.000343%. De plus, la forme de ces variations n'est pas relative à la température ce qui confère une immunité thermique du montage pour la mesure d'humidité.

4.4.2 Test de la mesure à l'aide de la chaîne discrète

On se place à une fréquence en entrée du compteur de 5.5MHz soit une tension en sortie du convertisseur fréquence/tension de 2.62V à 20°C. Explorons les effets de la variation thermique (Figure 63).

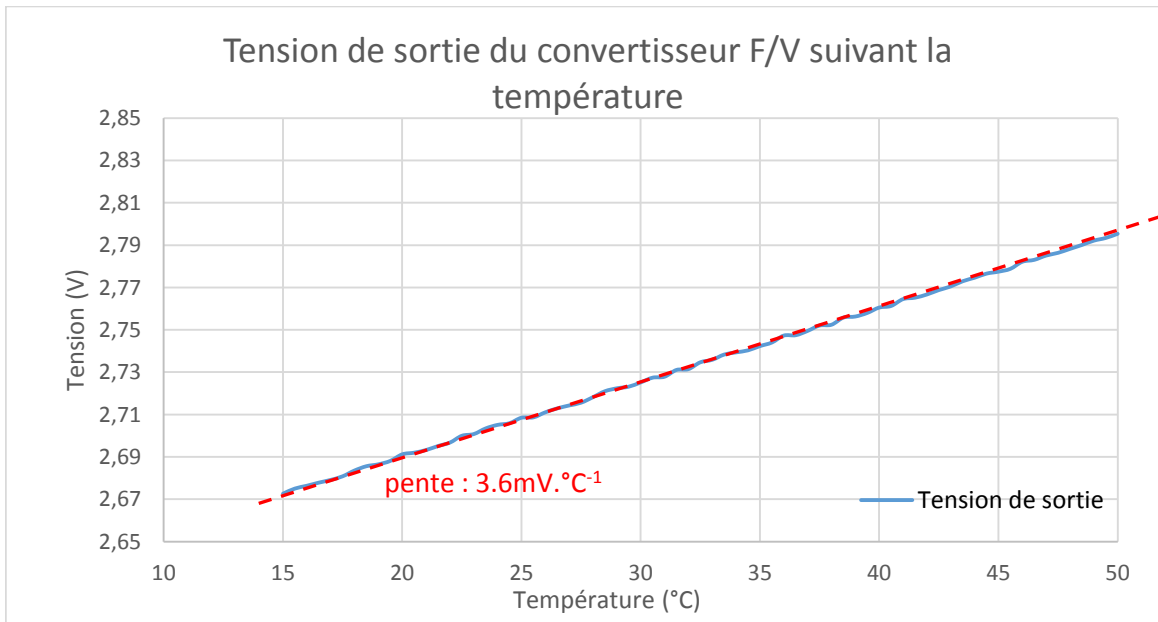


Figure 63 : Effet de la température sur le convertisseur fréquence/tension

On observe une augmentation proportionnelle de la tension de sortie en fonction de la température. Avec une variation de $3.6\text{mV}\cdot\text{°C}^{-1}$ de la tension de sortie ce qui induit une erreur de 1.35% pour une variation de 10°C soit une variation de 3% d'humidité !

On est donc **obligé d'effectuer une compensation thermique** ce qui induit de rajouter la mesure de température. Cette chaîne s'avère donc sensible à la température.

4.4.3 Test de la mesure à l'aide de la chaîne numérique

Pour la chaîne numérique, le point critique est la fréquence de l'horloge construite à partir d'un quartz qui naturellement sera un TCXO (Temperature Compensated X (Crystal) Oscillator). Il s'agit d'un composant créant l'horloge à l'aide d'un quartz mais qui possède un système de régulation en température, ce qui rend cette fréquence insensible à la température (inférieur à $3\text{ppm}\cdot\text{°C}^{-1}$).

Qualifions le comportement en mesurant la fréquence lue par le microcontrôleur si on place en entrée du compteur une fréquence de 5.5MHz et donc à sa sortie une fréquence de 340,487kHz (fréquence en entrée du microcontrôleur) (Figure 64).

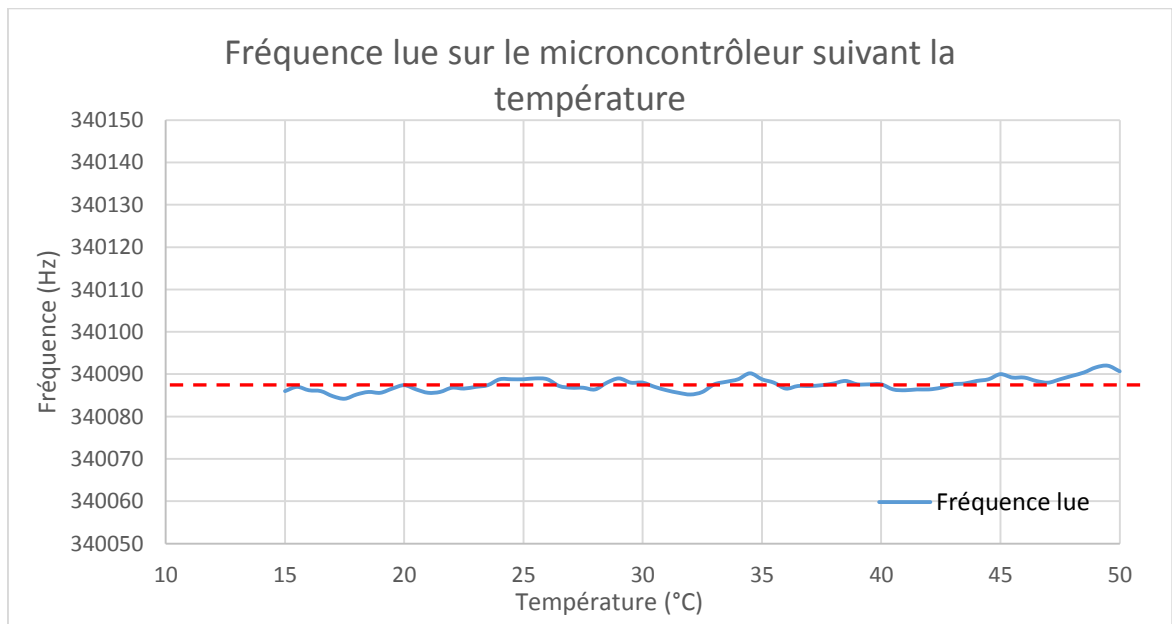


Figure 64 : Effet de la température sur la chaîne numérique de lecture de fréquence

On représente en rouge la fréquence à 20°C. On n'observe pas de sensibilité de cette lecture par rapport à la température. En effet, il y a une erreur maximale de lecture de 0.0002%. On peut donc en conclure qu'il n'est pas nécessaire d'effectuer de compensation en température.

4.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons réalisé les fonctions de l'électronique de mesure dédiées à la mesure de l'humidité et de la salinité.

Dans un premier temps, on a converti une variation de capacité en variation électrique. Le premier montage à base de capacités commutées permet une lecture correcte mais sa réalisation est trop complexe pour être embarquée. Le deuxième montage, le pont de Sauty, possède une réponse correcte mais non linéaire ce qui n'est pas satisfaisant. Le dernier montage, l'oscillateur Colpitts, permet une lecture simple avec une réponse linéaire tout en étant facilement intégrable. C'est donc ce dernier montage qui a été retenu pour l'élaboration du front end.

Pour mesurer à la fois l'humidité et la salinité, il faut pouvoir mesurer la capacité du transducteur à deux fréquences différentes. Pour cela, on multiplexe ce corps avec un DPDT pour le distribuer sur deux oscillateurs Colpitts distincts.

Pour enfin effectuer la mesure, on peut soit utiliser une chaîne discrète à l'aide d'un convertisseur fréquence/tension soit une chaîne numérique avec un programme spécifique embarqué sur microcontrôleur. Les deux solutions nécessitent un diviseur de fréquence en raison de la haute fréquence nécessaire pour la mesure de l'humidité. On choisira donc la chaîne numérique pour son insensibilité aux variations de températures. De plus, elle est moins coûteuse et moins encombrante. La seule contrainte apportée par cette solution est l'utilisation d'un TCXO pour créer une fréquence d'horloge précise et stable. Le schéma fonctionnel de la Figure 65 présente la carte ainsi créée.

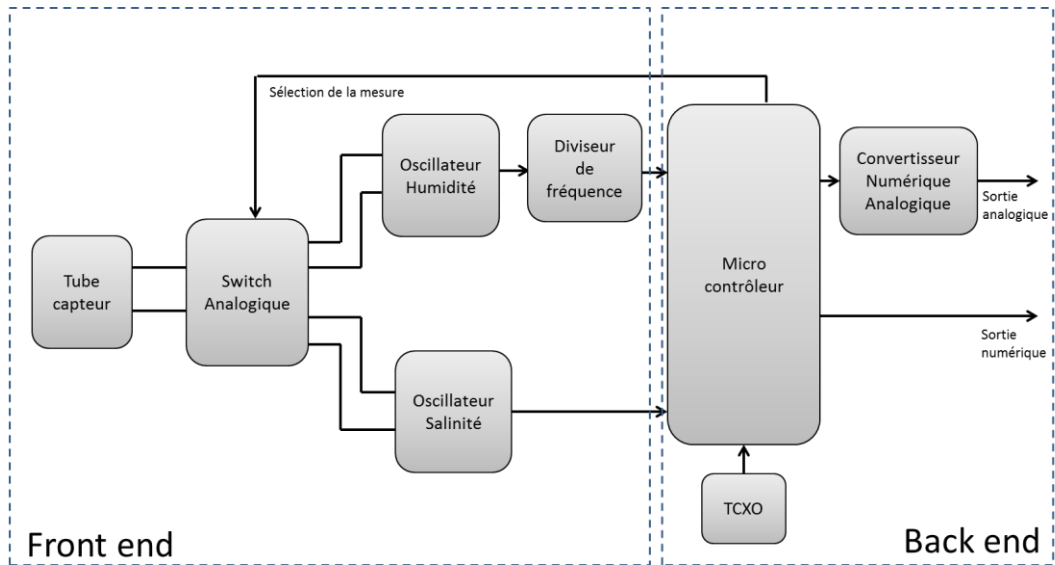


Figure 65 : Schéma fonctionnel de la carte de mesure

Sur ce schéma, on retrouve le front end composés des oscillateurs suivi de la chaîne numérique de lecture. Pour pouvoir communiquer avec l'extérieur, on place deux sorties. La première, analogique, créé par un convertisseur numérique/analogique permet de délivrer une tension image de l'humidité du sol pour une connexion directe sur une lecture de tension. La seconde est une sortie numérique. On se permet donc de pouvoir communiquer en SPI, I2C ou liaison série vers un concentrateur ou un autre système numérique.

On résume la liste des composants de cette carte dans la BOM présentée en Annexe 1.

On retrouve sur cette BOM l'intégralité de composants utiles pour la réalisation des études précédentes, le DG2018 pour le front end, le compteur 74HC161 pour le diviseur de fréquence, les composants de l'alimentation TPS61222 et TPS71730, le convertisseur numérique/analogique MCP4901 ainsi que le microcontrôleur PIC24FJ64GB004.

Les fonctions de la carte de mesure étant maintenant fonctionnelles, il faut maintenant les intégrer pour réaliser la carte électronique. De plus, il faut penser à l'assemblage avec le transducteur pour créer un capteur facile à insérer dans le sol, résistant, étanche et fonctionnel.

Chapitre 5 : L'intégration

5.1 Introduction

Les chapitres précédents ont modélisés de façon disjointe le transducteur et l'électronique de mesure. Reste à les associer afin d'évaluer les performances globales du « système de mesure d'humidité du sol ».

Deux orientations vont être étudiées dans le processus d'assemblage des fonctions réalisées :

- soit la possibilité de créer un point de mesure complet, c'est-à-dire avec plusieurs profondeurs de mesures. Ceci dans un capteur unitaire qui se présentera sous la forme d'une « canne à insérer dans le sol ». Pour cela, on va étudier l'intégration de plusieurs électrodes dans un même support avec une électronique déportée.
- soit une approche encore plus épurée et intégrée constituée d'un transducteur et de son électronique de mesure placée au plus près des électrodes.

5.2 La solution multi capteur

Observer par la mesure la progression latente de la gravité de l'eau dans le sol présente l'avantage non seulement de pouvoir maîtriser l'apport en eau mais aussi d'ajouter la quantité optimale. Ceci dès lors qu'on est capable d'observer l'humidité à différentes profondeurs, au-delà du système racinaire de la plante. En effet si de l'humidité apparaît, alors c'est que cette eau est perdue... sauf pour la nappe phréatique !

L'idée défendue ici est de pouvoir sonder la teneur en humidité de l'eau par une mesure simultanée à plusieurs profondeurs. Pour information, sur les cultures saisonnières, et en particulier celle du maïs, les racines sont peu profondes, environ 50cm au maximum. Pour se faire, on place plusieurs transducteurs à différentes hauteurs, on multiplexe la mesure, avec comme principal avantage de pouvoir mesurer la diffusion de l'eau dans le sol en ne creusant qu'un seul trou pour l'insertion.

L'électronique associée qui va concentrer les mesures et les transmettre à la station connectée au cloud va proposer d'autres fonctions comme la position GPS (utile pour retrouver le capteur dans un champ) ou un système de stockage des données sur carte SD pour l'apprentissage du comportement pour différents types de sols.

5.2.1 Association des capteurs

Un des verrous à soulever est de vérifier l'absence de toutes interactions parasites entre des électrodes trop proches pour cette approche multi mesure. Quatre profondeurs sont définies en concertation avec les professionnels :

- 10cm : mesure de surface qui permet de détecter rapidement un apport d'eau et donc le début d'une irrigation ;
- 30cm : mesure au niveau des racines des plantes qui donne une information moyenne sur le taux d'humidité autour de la culture ;
- 50cm : mesure à l'extrémité des racines pour vérifier si l'irrigation a bien été absorbée par le sol et est donc disponible pour toutes les racines de la culture ;
- 70cm : mesure en dessous de la plante pour contrôler la sur-irrigation et donc un gaspillage des ressources.

Pour faciliter la manipulation et l'insertion dans le sol, la canne dépassera du sol. De plus, cela permettra de la repérer parmi les cultures. Les connexions aux électrodes sont réalisées à l'aide d'un câble gainé contenant des paires torsadées pour chacun des transducteurs élémentaires.

Etudions si cette association a un effet sur la sensibilité de chaque corps :

- jusqu'à présent le transducteur était évidé sans aucune présence d'élément,
- dans cette canne, les transducteurs sont parcourus par plusieurs fils de cuivre ce qui pourrait avoir un effet sur la capacité créée.

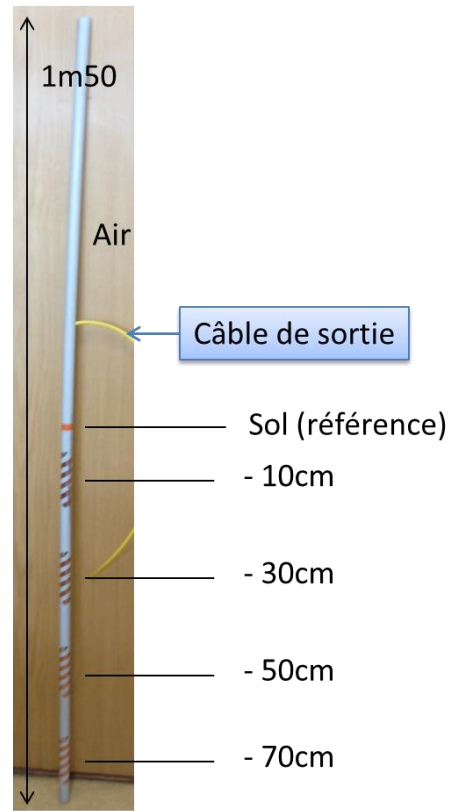


Figure 66 : Réalisation de la canne multi capteur

On mesure donc la capacité de ces transducteurs en plaçant des fils en son centre. Les résultats sont présentés en Figure 67.

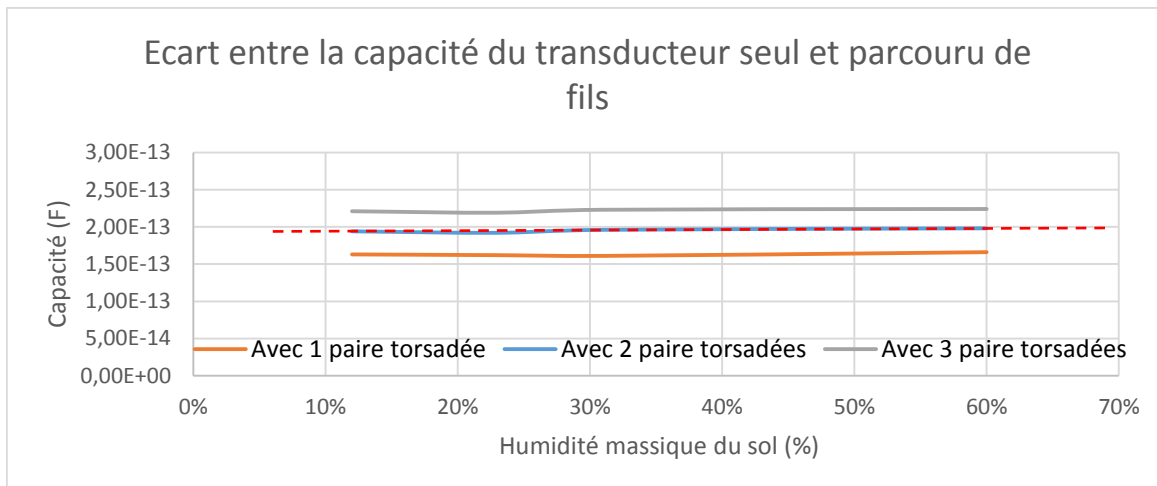


Figure 67 : Ecart entre la capacité du corps seul et du corps parcouru de fils

Quels enseignements déduire de cette approche :

- l'écart maximum de capacité entre le passage d'une paire torsadée et trois paires est de 0.224pF soit une différence de 2% sur la capacité soit une erreur de lecture de 0.5% d'humidité ;
- l'écart est constant suivant l'humidité comme le montre la ligne rouge (Figure 67) en pointillé, on peut donc facilement compenser cette erreur dans l'intelligence embarquée.

Dans cette canne il est impossible de placer l'électronique au plus près des électrodes, on va donc placer l'électronique en extérieur. Il y aura donc une longueur de fils à considérer en paire torsadées reliant le transducteur à l'électronique.

Or chaque capteur étant placé à une profondeur différente, la longueur de fil sera différente. On va donc évaluer l'effet de la longueur des fils vis-à-vis de la capacité vue par l'électronique. On choisit de laisser 20 cm de câble en sortie de la canne pour faciliter la connexion, on aura donc une longueur de fil comprise entre 30cm et 100cm (Figure 68).

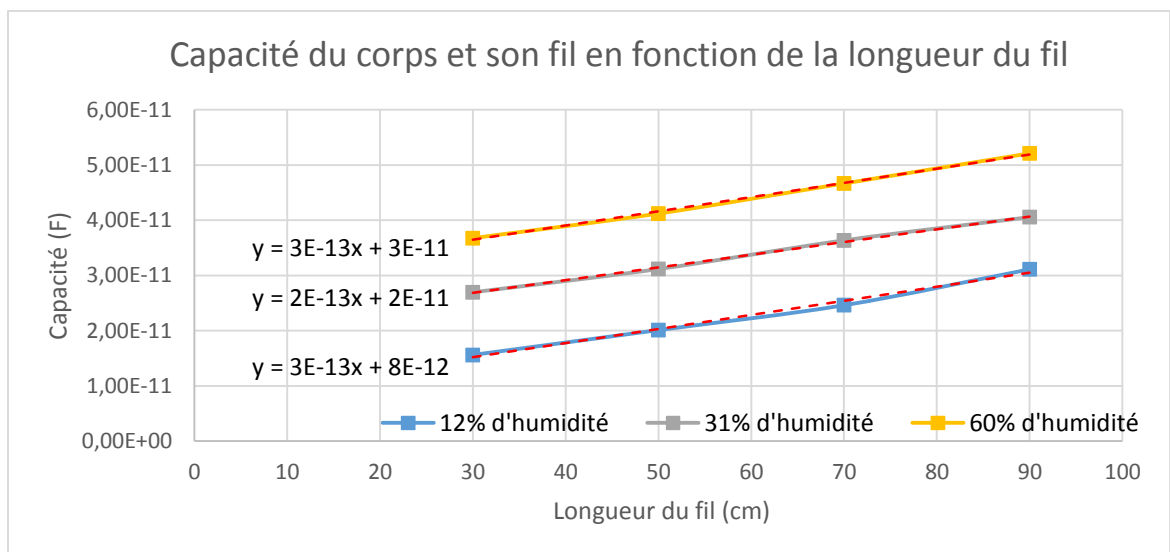


Figure 68 : Capacité du transducteur plus son fil en fonction de la longueur du fil pour différentes humidité

L'analyse de cette courbe montre que :

- la longueur du fil a un effet sur la capacité mesurée. On notera que cet effet est linéaire de coefficient $0.3\text{pF}\cdot\text{cm}^{-1}$ quelle que soit l'humidité. Cependant, cet effet n'est pas négligeable.
- il est possible de corriger cela par la programmation. Chaque corps étant à une profondeur bien définie, la longueur est constante. Il suffit d'introduire un offset à la mesure pour corriger cette erreur.

En conclusion, on peut donc associer plusieurs électrodes sur une même canne pour concevoir un multi capteur. Reste à multiplexer l'électronique pour pouvoir partager la mesure des quatre transducteurs.

5.2.2 Mutualisation de l'électronique de mesure

On doit maintenant modifier l'électronique vue au chapitre 4 pour mesurer les quatre transducteurs avec comme objectif de mutualiser des composants pour réduire le coût de cette carte.

Dans ce paragraphe, nous allons évaluer la lecture de la variation de capacité à l'aide de la solution de mesure analogique (cf. 4.3.2.1). Dans le cas de la canne multi capteur, il est possible de mutualiser le convertisseur fréquence/tension ainsi que le diviseur de fréquence (compteur). Cela a pour but de réduire le coût et l'encombrement de cette électronique. Toutefois, l'oscillateur Colpitts étant un élément critique de cette solution, il est préférable de garder un oscillateur par transducteur.

On observe donc le schéma fonctionnel de cette électronique sur la Figure 69.

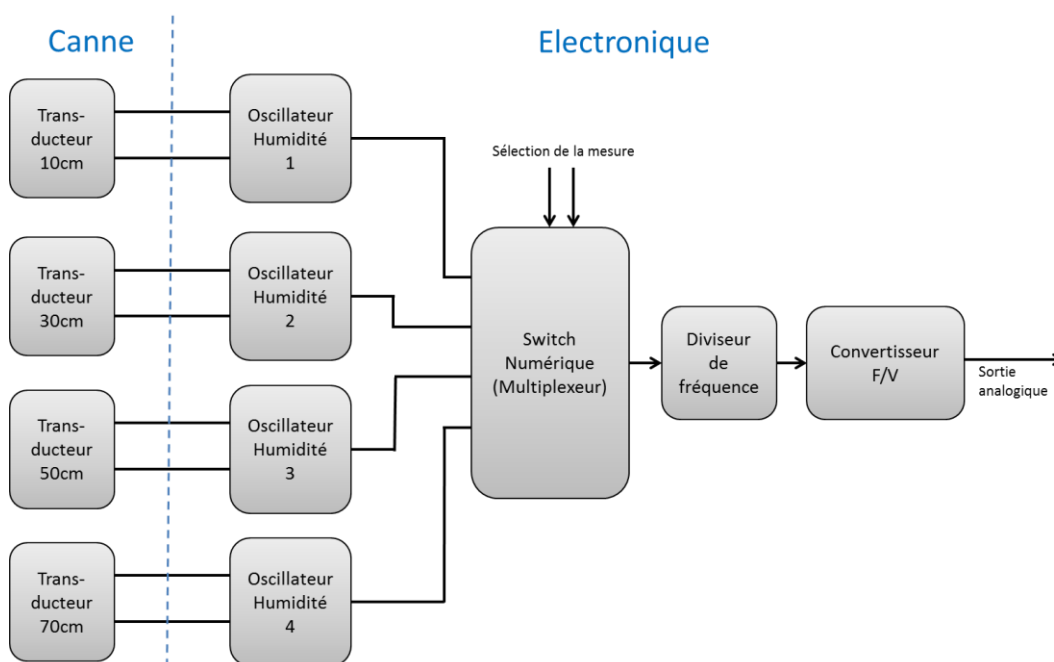


Figure 69 : Schéma fonctionnel de l'électronique de la canne multi capteur

Cette solution offre la possibilité de n'avoir qu'une seule sortie analogique. Cette sortie étant connectée à un seul CAN pour effectuer le traitement, cela permet d'utiliser directement l'entrée d'un CAN intégré à un microcontrôleur simple. La sélection du transducteur à mesurer se fait par logiciel à l'aide de 2 sorties de sélection. Après réalisation, on obtient la carte électronique présentée en Figure 70.

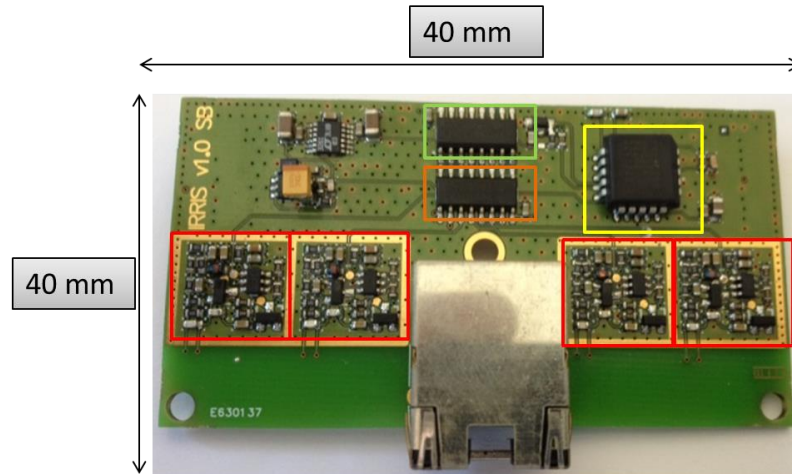


Figure 70 : Carte électronique de mesure de la canne multi capteur

On identifie les fonctions du schéma fonctionnel :

- les oscillateurs Colpitts (en rouge),
- le diviseur de fréquence (en orange),
- le multiplexeur (en vert),
- le convertisseur fréquence/tension (en jaune),

mais aussi deux fonctions supplémentaires :

- l'alimentation en haut à gauche pour alimenter le convertisseur,
- un connecteur d'entrée/sortie situé sous la carte,
- le connecteur en bas au centre. Ce connecteur est un connecteur Ethernet qui fournit une liaison sûre avec la carte car verrouillée par clip.

Cette carte n'intègre pas le microcontrôleur. Pour permettre la gestion de fonctions supplémentaires, celui-ci sera placé dans la carte concentrateur.

5.2.3 Le concentrateur communicant

On associe maintenant à la carte de mesure, une carte réalisant la fonction de concentrateur et transmetteur de données (Figure 71).

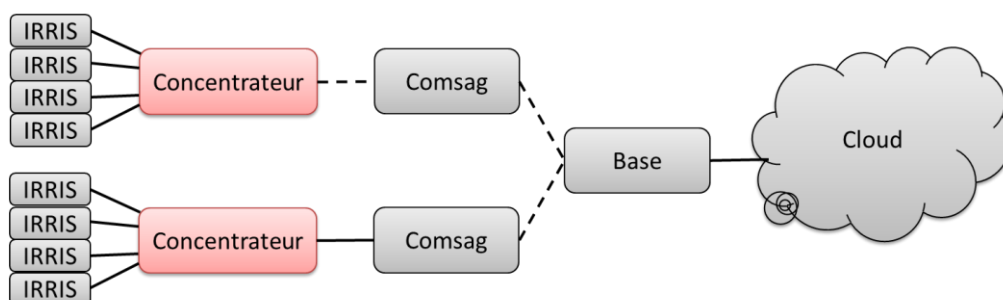


Figure 71 : Organisation du système avec le concentrateur IRRIS

Sur cette figure, les traits pleins représentent les connexions filaires et les traits en pointillé, les connexions sans fil. Le concentrateur peut alors se connecter au système

Comsag en filaire par une liaison filaire numérique ou sans fil. Dans le cas du sans fil, plusieurs concentrateurs pourront être connectés au même Comsag.

Le caractère configurable de cette carte concentrateur offre la possibilité de plusieurs fonctions optionnelles (Figure 72) :

- en violet, l'alimentation;
- en bleu, le microcontrôleur qui va gérer la carte entière
- en vert, la liaison radio 868MHz. Nous avons choisi cette fréquence dans la bande ISM pour sa portée d'environ 500m;
- en orange, la liaison Bluetooth à l'aide du NRF51822. Cette liaison permet à l'utilisateur de se connecter à l'aide de son smartphone pour obtenir les données en temps réel;
- en jaune, le lecteur de carte SD. Ce stockage permet d'enregistrer les données pendant une longue période (plusieurs mois) pour garder une trace des mesures effectuées ;
- en rouge, la liaison GPS. Dans certaines cultures difficiles d'accès et hautes comme le maïs, il est difficile de localiser le capteur ;
- en blanc, un accéléromètre. Cette fonction permet de mettre à jour les coordonnées GPS automatiquement en cas de déplacement ;
- en gris, la connexion à la carte mesure. On a choisi de placer la carte directement sur le concentrateur pour optimiser le facteur de remplissage mais elle reste amovible pour permettre le test d'autres solutions techniques pour le front end ;
- en noir, les connectiques externes. Ces connecteurs permettent de se connecter à un système externe en liaisons numériques (SDI-12, RX/TX), de connecter un pluviomètre pour mesurer les précipitations et de s'alimenter par fil. Cependant sous la carte, il y a deux emplacements de piles LR20 pour garantir l'autonomie énergétique.

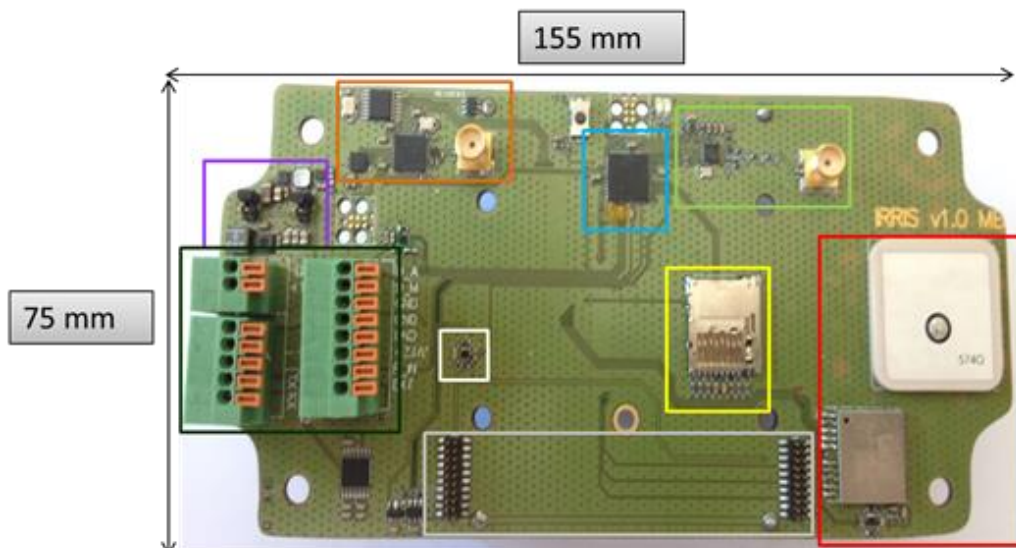


Figure 72 : Carte électronique du concentrateur communicant

Le système final est constitué de la canne multi capteur relié par un fil à la carte concentrateur + front end. Ce système pourra être alors connecté au système Comsag par fil ou sans fil (Figure 72).

On veille à placer l'électronique dans une boîte étanche (Figure 73) pour mieux résister aux agressions extérieures (chocs, arrosage, cyclage thermique,...).

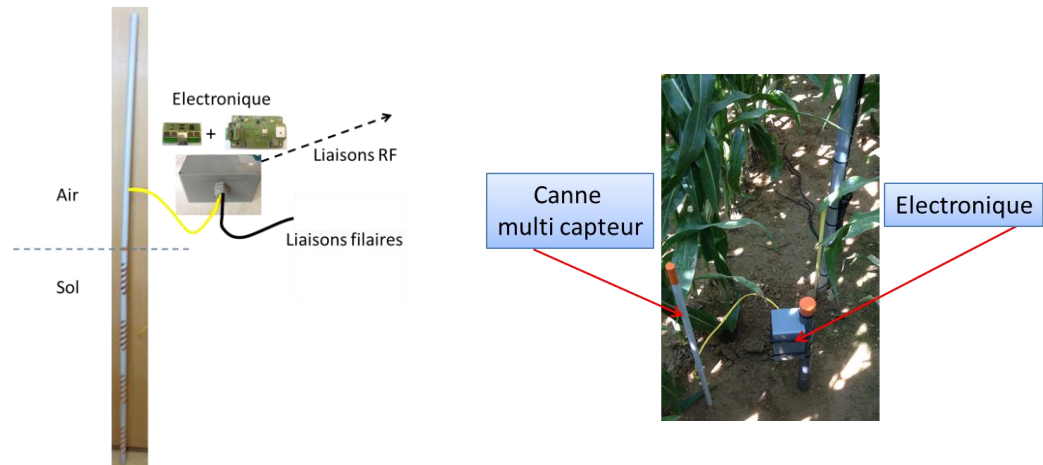


Figure 73 : Exemple d'installation du multi capteur

5.3 Vers l'industrialisation du capteur

Dans cette partie, nous allons voir comment transférer le capteur prototype en un capteur industrialisable pour une production grande échelle.

5.3.1 Le partenaire industriel

Le partenaire industriel du projet se nomme Gilbert Polytech SA. Il s'agit d'une entreprise spécialisée dans le moulage industriel de pièces plastiques. Elle possède un parc de presses à injection pour couvrir des besoins d'injection thermoplastiques ou de surmoulage. Cette entreprise est basée à Reyniès dans le Tarn et Garonne. Cette proximité a grandement facilité les échanges et les nombreuses interactions partenariales.

Leur présence est capitale dans le projet puisqu'ils ont la charge de la réalisation des transducteurs ainsi que dans le moulage du capteur final.

Leur première action est de mouler le tube plastique. Pour cela, ils utilisent des grains de plastiques qui sont fondus pour obtenir un liquide. Celui-ci est ensuite moulé dans une machine (Figure 74) pour former le tube.



Figure 74 : Machine-outil de moulage plastique

Le dépôt de cuivre pour former les électrodes est ensuite sous-traité. La fabrication est réalisée selon les étapes technologiques suivantes, construites à partir d'une préforme cylindrique creuse en plastique qui constitue le tube support (de diamètre 20mm et de longueur 130mm) :

- On applique une résine de type polymère sur le tube ;
- On vient activer au laser les zones où le cuivre ne doit pas se déposer pour rendre la résine non adhérente ;
- On effectue un dépôt électrochimique de cuivre de $20\mu\text{m}$ pendant environ 30 minutes;
- Pour terminer on dépose un alliage nickel/or (environ $2\mu\text{m}$) sur le cuivre pour le protéger de l'oxydation. On utilise l'alliage avec le nickel pour éviter la diffusion de l'or dans le cuivre.

L'électronique est ensuite associée au tube capteur réalisé. La dernière étape est le surmoulage total du capteur à l'aide d'un moule et d'une presse à injection (Figure 75) pour étanchéifier le système.



Figure 75 : Presse à injection (à gauche) et moule en métal (à droite)

5.3.2 Le transducteur industriel

Tout d'abord, nous allons réaliser un transducteur unitaire constitué des deux électrodes en hélice (Figure 76).

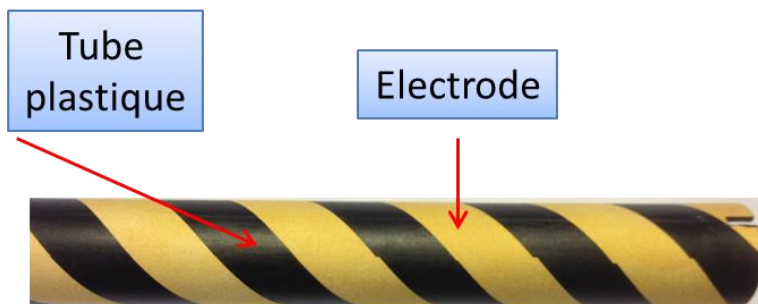


Figure 76 : Transducteur réalisé industriellement

Contrôlons à présent le dépôt pour déterminer son épaisseur et l'uniformité de l'épaisseur (Figure 77).

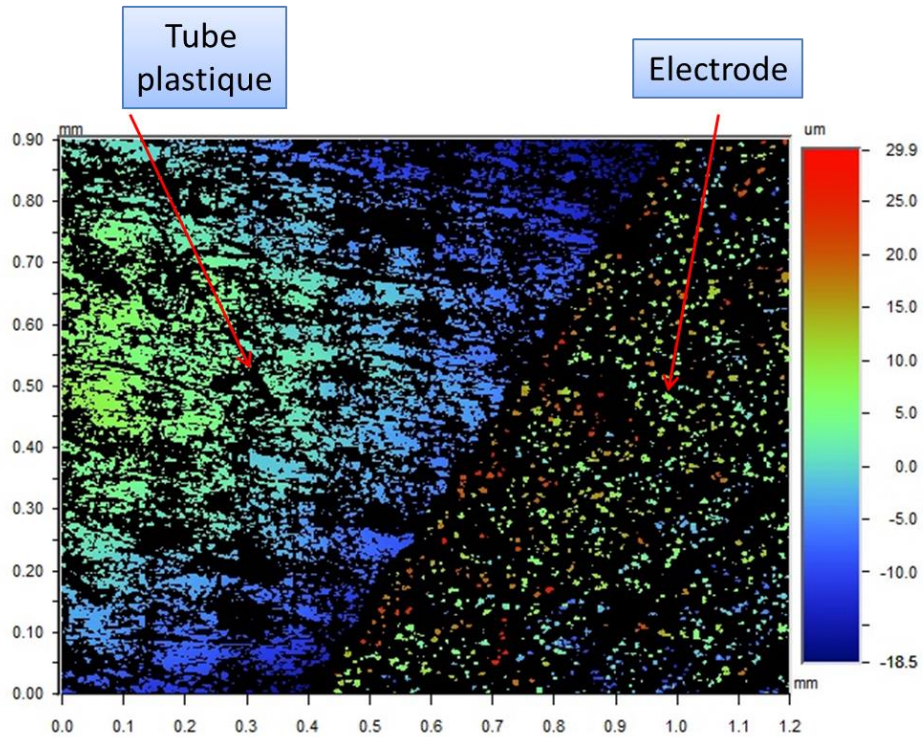


Figure 77 : Vue de la surface du transducteur au microscope optique 3D

On observe sur cette figure :

- à gauche, le tube plastique qui est quasiment lisse car toutes les mesures sont à la même hauteur (autour de $0\mu\text{m}$),
- à droite, l'électrode qui est granuleuse dû au dépôt électrochimique non constant.

Si on moyenne les hauteurs de l'électrode, on obtient une épaisseur de dépôt de $24\mu\text{m}$. Cela correspond bien au $20\mu\text{m}$ de cuivre plus l'épaisseur de la protection nickel/or. Le dépôt est donc conforme au cahier des charges.

Caractérisons électriquement ces électrodes en les comparant avec les valeurs électriques d'un scotch cuivre d'épaisseur $50\mu\text{m}$ utilisé pour le développement de notre prototypage (Figure 78).

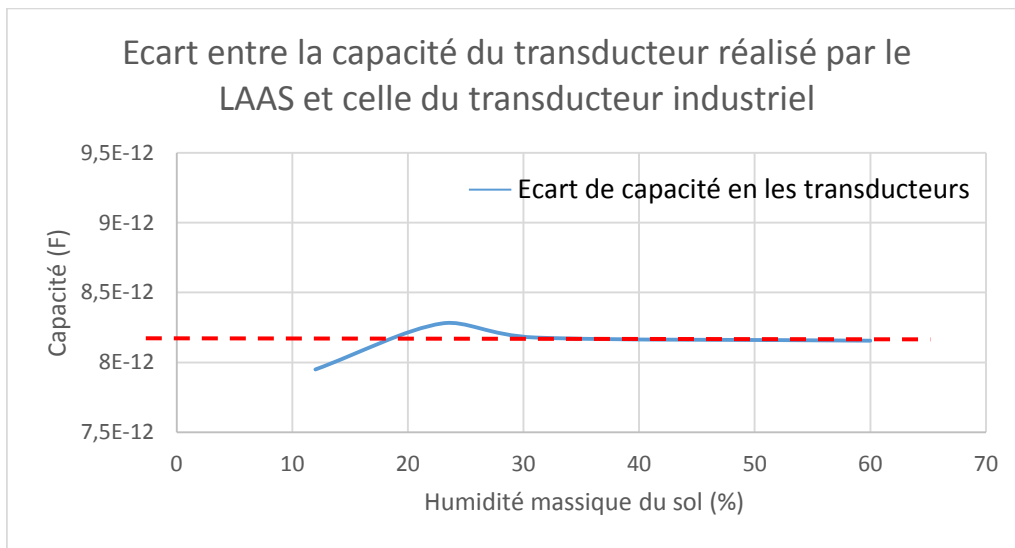


Figure 78 : Différence de capacité entre le transducteur réalisé par le LAAS et le transducteur industriel en fonction de l'humidité du sol

Il existe un écart entre les deux fabrications. Cette écart est quasi stable (moins de 2% de variation) et indépendant de l'humidité du sol. Le comportement des capacités des transducteurs en fonction de l'humidité sont par conséquent semblables hormis un offset fixe. Ce transducteur peut être utilisé dans notre capteur en corrigeant cet offset dans le microcontrôleur.

5.3.3 Vers un capteur industriel

Utilisons à présent ces nouvelles électrodes dans la configuration multi capteur. De par la méthode de moulage plastique, il est très difficile voire impossible de créer un tube de plus de 200mm de long pour un diamètre 20mm. Les machines sont limitées mécaniquement en longueur. Il est donc impossible de créer la canne multi capteur en un seul tenant. Il faut donc la découper en plusieurs transducteurs unitaire.

Si on veut ensuite assembler les morceaux, on peut imaginer un système de filetage sur les bords du tube pour les emboîter les uns dans les autres. Cela est faisable mais nuit grandement à la solidité mécanique. Il n'est donc pas préférable de les assembler.

Autre contrainte sur l'industrialisation, il faut faire passer les fils à l'intérieur du tube et cette opération est impossible à réaliser mécaniquement avec une exigence de reproductibilité pour chaque canne, il est donc difficile de résoudre ces contraintes de fabrication en série.

Rappelons enfin qu'il faut pouvoir mouler le capteur dans une protection plastique pour l'isoler du sol. Or cette opération présente également une contrainte mécanique supplémentaire compte tenu de la longueur de moulage maximale, ce qui rend la canne impossible à mouler.

Aux vues de ces contraintes industrielles, on décide d'abandonner la canne multi capteur pour s'orienter vers des capteurs individuels. Le protocole de conception retenu est le suivant :

- quatre capteurs individuels composés chacun :
 - d'un transducteur industriel,
 - d'une électronique de mesure simplifiée (oscillateur, microcontrôleur et alimentation),
 - d'un câble de connexion vers l'extérieur avec l'alimentation (impossible de transmettre des données en RF dans le sol [10] [11]) ;
- d'un concentrateur placé en surface assurant les liaisons externes et l'autonomie énergétique.

5.4 Le mono capteur

Nous allons maintenant étudier le système mono capteur composé de capteur individuel et de la carte concentrateur assurant le lien.

5.4.1 Le capteur individuel

On réalise donc l'assemblage d'une seule paire d'électrodes en spirale en plaçant la carte électronique placée au-dessus du tube (Figure 79).

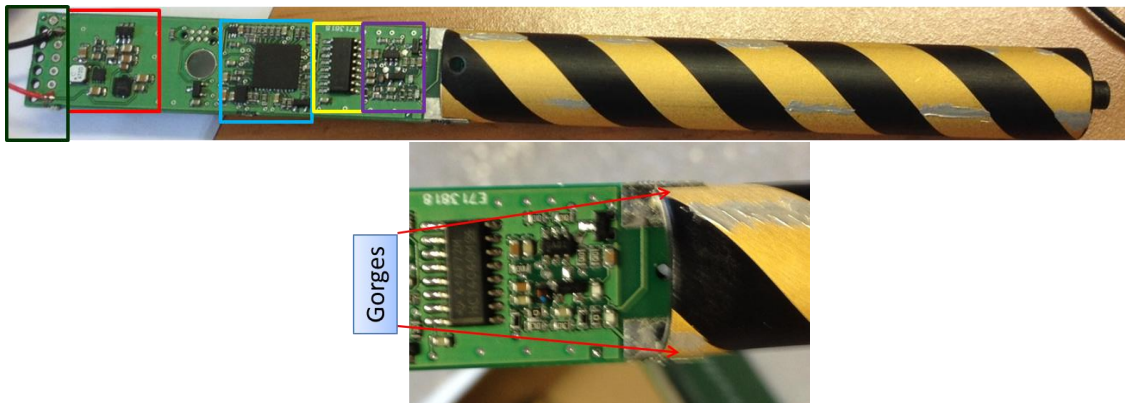


Figure 79 : Assemblage du capteur individuel

On identifie sur l'assemblage les fonctions :

- à gauche, la carte électronique composée des fonctions de l'électronique de mesure (alimentation en rouge, intelligence en bleu, diviseur de fréquence en jaune et oscillateur en violet),
- en vert, tout à gauche, la zone de câblage des fils de sorties (alimentation, sortie analogique, sortie numérique, bootloader),
- à droite, le transducteur industriel connecté à la carte électronique,
- la connexion est réalisée par une gorge dans le haut du corps où vient s'insérer la carte électronique présentant des plages d'accueil pour réaliser le contact électrique par brasure.

La dernière étape de fabrication est le moulage. Les cartes sont programmées avant assemblage mais le reprogrammation reste possible à l'aide des fils présents sur la connectique de sortie. Pour cela, on utilise un bootloader (reprogrammation par liaison série).

Le trou présent au centre de la carte permet de consolider la liaison entre la carte et le plastique de surmoulage en venant bloquer la carte en translation dans le plastique de

moulage. On dote enfin le capteur d'un câble de 6m de long pour faciliter le placement pour le point de mesure. Après surmoulage, on obtient le capteur de la Figure 80.



Figure 80 : Vue d'ensemble du capteur individuel moulé

5.4.2 Effet du moulage sur le comportement du transducteur

On va maintenant modéliser l'effet de l'enrobage plastique autour du transducteur. On représente sur la Figure 81, un zoom sur la coupe du capteur final pour observer l'interaction entre les deux électrodes, l'enrobage et le sol.

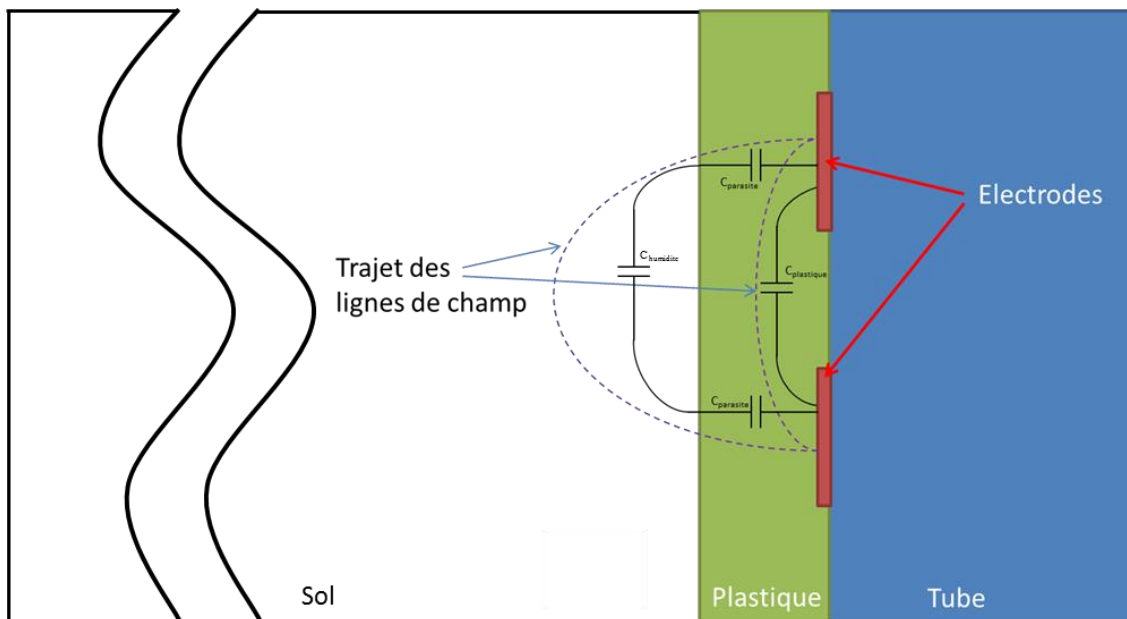


Figure 81 : Interactions du transducteur avec le moulage plastique

On représente sur cette figure, le trajet des lignes de champ. On peut noter deux trajets supplémentaires dus au moulage :

- Premièrement, les lignes proches du capteur ne traversent que le plastique et non le sol. Cela crée donc une capacité parasite dont le diélectrique est le plastique. Ce plastique étant étanches, ses paramètres sont indépendants de l'humidité.
- Ensuite, les lignes de champ lointaines traversent le sol mais doivent aussi traverser une couche de plastique ce qui induit une capacité parasite en série supplémentaire à notre capacité de mesure du sol.

On peut donc modéliser notre nouveau système par la figure ci-dessous (Figure 82).

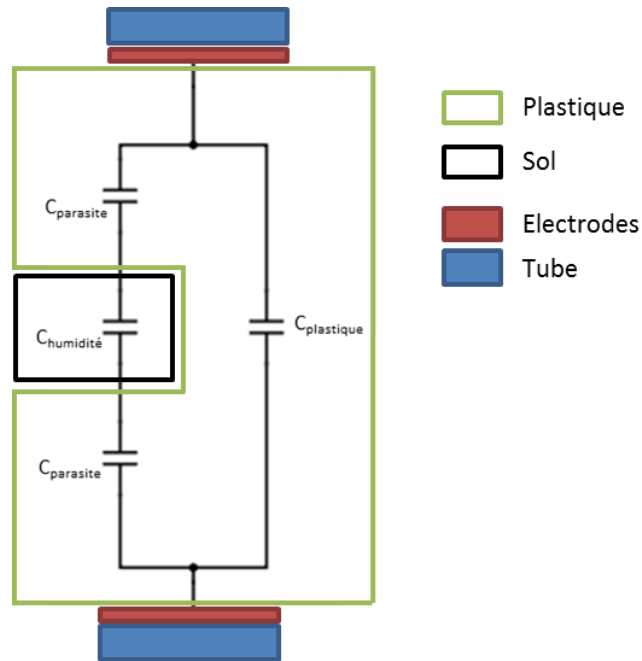


Figure 82 : Modèle électrique de mesure induit par le moulage

Ce modèle induit alors deux effets sur la capacité du transducteur :

- La capacité minimale sera donc augmentée. La capacité parallèle $C_{plastique}$ vient se sommer à la capacité de mesure.
- La capacité de mesure $C_{humidité}$ est affectée par les capacités parasites $C_{parasites}$. Elle se retrouve donc en association série avec la capacité $C_{parasites}/2$. Comme l'association série de deux condensateurs est inférieure à la capacité la plus faible, la nouvelle capacité de mesure sera inférieure à celle du modèle précédent.

On obtient donc en simplifiant le modèle, une capacité de la forme :

$$C'_{humidité} = \Delta C'_{hum} + C'_{hum_0} \text{ avec } \begin{cases} C'_{hum_0} \approx C_{hum_0} + C_{plastique} \\ \Delta C'_{hum} \approx \Delta C_{hum} // \frac{C_{parasite}}{2} \end{cases}$$

On trace maintenant le nouveau comportement de la capacité du transducteur (Figure 83).

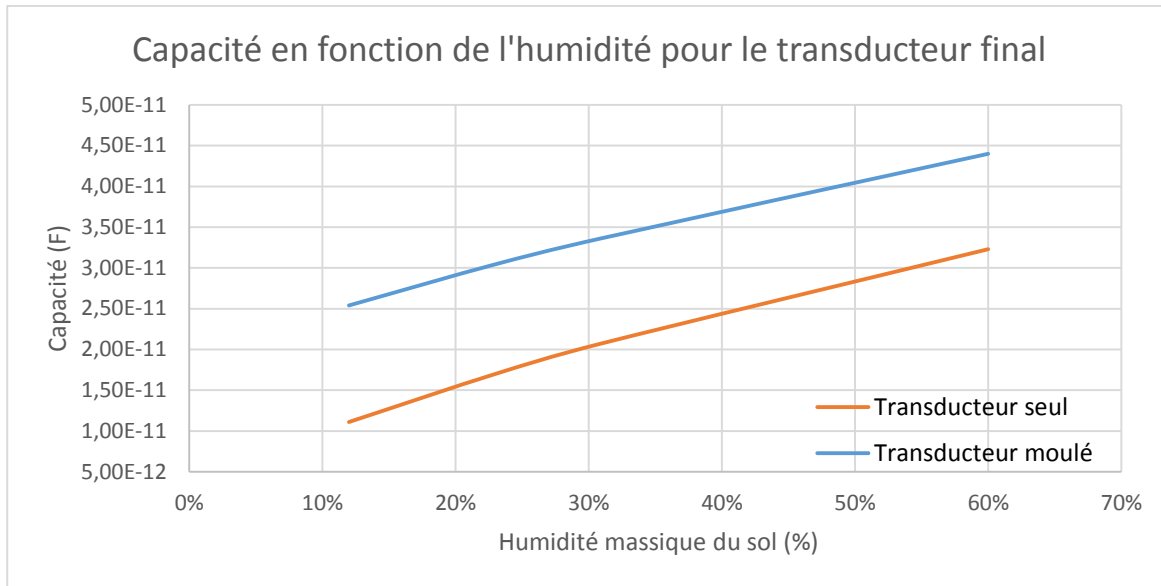


Figure 83 : Comparaison du transducteur moulé et du transducteur seul

On observe deux effets sur le modèle précédent :

- La courbe du transducteur moulé est supérieure en tout point au transducteur seul donc on observe bien l'augmentation de C'_{hum0} . On peut l'estimer à $C'_{hum0} = 14.7\text{pF}$.
- La sensibilité est réduite de 12%. Elle est maintenant de $0.3875\text{pF}\cdot\%^{-1}$. Cela donne donc en sortie de l'oscillateur Colpitts une sensibilité de 24.2kHz, valeur toujours mesurable par notre système pour une précision de 1%.

L'effet du moulage est alors présent sur notre capteur. Cependant, cette caractérisation nous permet de l'intégrer dans notre intelligence embarquée et donc de toujours mesurer l'humidité avec une précision de 1%.

5.4.3 Le concentrateur transféré industriellement

Pour des raisons de coûts, épurons l'architecture de notre précédent concentrateur afin de ne conserver que les fonctions essentielles (Figure 84).

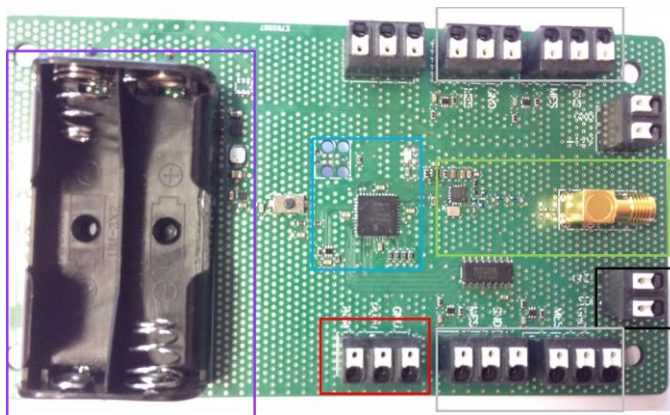


Figure 84 : Réalisation de la carte concentrateur pour le mono capteur

- en violet, l'alimentation soit par piles pour être autonome soit par un connecteur relié à une balise ;
- en bleu, l'intelligence embarquée, ici le PIC24FJ64GB004 comme pour l'électronique de mesure ;
- en vert, la liaison radio 868MHz pour créer un réseau de capteurs ;
- en noir, une liaison SDI-12 pour se connecter à une balise en filaire ;
- en gris, les connecteurs de liaison aux capteurs individuels (on peut en connecter 4) ;
- en rouge, un connecteur pour relier un pluviomètre.

Remarque : On a donc supprimé la fonction GPS car elle était très énergivore et encombrante. La fonction Bluetooth a été supprimée de cette version car la liaison 868MHz permet d'atteindre un système Comsag. C'est ce système qui est déjà connecté à Internet à l'aide d'une base et permet la consultation en temps réel des valeurs.

On caractérise maintenant la liaison RF 868MHz en terme de portée selon plusieurs configurations de débit et de déviation fréquentielle. Le paradoxe étant que plus le débit sera élevé, plus les données seront transmises rapidement. Cela réduit le coût énergétique de la communication mais réduit sa portée. Il est donc nécessaire de fixer le meilleur compromis entre vitesse et portée à partir des configurations radio présentées dans le Tableau 12.

Configuration	Porteuse	Déviaton	Data Rate
Conf 1	869MHz	30kHz	50kbauds
Conf 2	69MHz	30kHz	50kbauds
Conf 3	69MHz	100kHz	50kbauds
Conf 4	69MHz	15kHz	50kbauds
Conf 5	869MHz	10kHz	2.4kbauds
Conf 6	869MHz	10kHz	2.4kbauds
Conf 7	869MHz	30kHz	2.4kbauds
Conf 8	869MHz	30kHz	9.6kbauds
Conf 9	869MHz	30kHz	20kbauds
Conf 10	869MHz	30kHz	100kbauds
Conf 11	869MHz	30kHz	200kbauds

Tableau 12 : Résumé des différentes configurations radio en bande ISM

On observe dans ce tableau les trois paramètres de la configuration radio :

- le premier est la fréquence de la porteuse qui est la fréquence centrale de la liaison radio. Ici, elle est réglée à 869MHz pour l'ensemble des configurations testées.
- Le second paramètre est la déviation fréquentielle. Le codage des données binaires nécessite une largeur spectrale (équivalente au double de cette déviation) pour coder les niveaux 0 et 1, ce paramètre détermine donc la largeur de la bande nécessaire à la transmission. Une largeur plus grande permet donc de mieux distinguer les niveaux logiques et permet donc d'améliorer la qualité de la communication.
- Le dernier est le débit de données. Ce paramètre est le plus déterminant pour assurer la portée de la liaison radio.

On détermine maintenant la portée de ces configurations en observant la qualité de la transmission en champ libre. Pour cela, dans un espace dégagé, on place un émetteur qui envoie des trames en continu avec un compteur s'incrémentant à chaque trame, selon une configuration choisie. On déplace ensuite le récepteur et on évalue le nombre de trames réceptionnées sur les 100 dernières envoyées. Cela donne, en pourcentage, la qualité de la transmission. On répète l'opération pour chaque configuration et on obtient les résultats présentés sur la Figure 85.

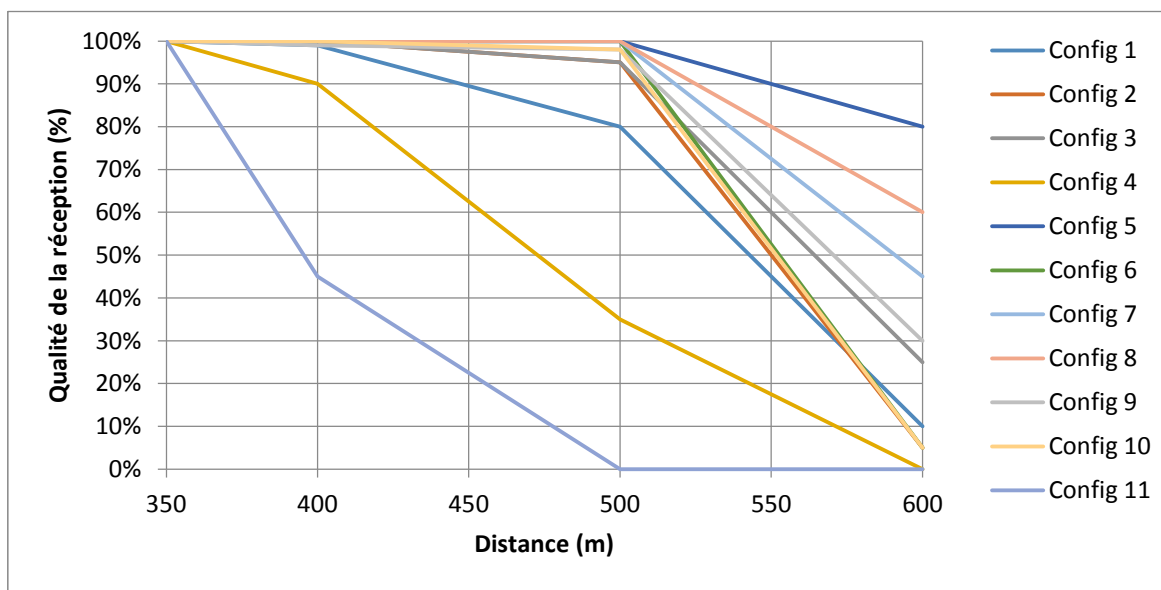


Figure 85 : Qualité de la réception radio en fonction de la distance pour différentes configurations

On observe sur cette figure :

- Toutes les configurations ont une qualité de réception supérieure à 80% pour une distance de 450m sauf les configurations 10 et 11 (les plus rapides en termes de débit).
- Les meilleures configurations sont les configurations 8 et 5 avec une qualité de plus de 60% à 600m de distance.

Ces observations montrent bien que le débit affecte la portée. Les configurations rapides sont celles avec le moins de portée. Le capteur a besoin d'une portée maximale proche de 500m. En prenant une marge (50m), les configurations 5 et 8 conviennent (qualité

supérieure à 80%). La configuration 8 étant la plus rapide, on conservera cette configuration, soit :

- porteuse à 869MHz,
- largeur spectrale de 30kHz
- débit de 9.6kbits/s.

5.5 Conclusion

Dans un premier temps, nous avons associé plusieurs capteurs pour élaborer une canne multi capteur. Son but est de faciliter la mise en place en concaténant plusieurs niveaux de profondeurs en un seul point. Dans cette configuration, les profondeurs de mesures sont fixées par la fabrication (10cm, 30cm, 50cm, 70cm).

La réalisation de cette canne a permis de réduire le coût de l'électronique associée en mutualisant certaines fonctions. De plus, le concentrateur associé possédait deux liaisons sans fil (868MHz et Bluetooth) et une liaison filaire pour communiquer les mesures ainsi qu'un positionnement GPS pour localiser le point de mesure.

Dans le but d'industrialiser le capteur, nous avons mené avec le plasturgiste l'étude de faisabilité des différentes étapes de fabrication du capteur prototype. De notre expérience, il s'est avéré que le format canne multi capteur n'est pas réalisable, nous avons donc redimensionné le capteur pour conserver les quatre profondeurs de mesure mais en les distribuant sur quatre capteurs individuels filaires. Le concentrateur a lui aussi été modifié pour ne garder que deux liaisons externes (868MHz et SDI-12) et la lecture des capteurs. Ce concentrateur garde tout de même son autonomie énergétique grâce aux piles.

Maintenant que les capteurs ont été assemblés, il faut les tester dans les champs pour valider leur fonctionnement.

Chapitre 6 : Les tests effectués

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats métrologiques obtenus par trois campagnes. Ces campagnes de mesures se sont principalement déroulées durant des périodes de culture du maïs avec des phases de pluie mais surtout des phases d'irrigation :

- la première campagne a été réalisée sur la période d'août à octobre 2014. Elle a pour but de valider le fonctionnement des versions multi capteur dans les cultures. Cette campagne a mis en exergue certains problèmes de cette version et a conduit à la version mono capteur.
- La deuxième, réalisée de juillet 2015 à septembre 2015, a pour but de valider le fonctionnement de la version mono capteur. Grâce à ces retours d'expériences, nous avons amélioré cette version mono capteur et avons développé une seconde version.
- La dernière, d'août 2016 à septembre 2016, a pour but de valider le bon fonctionnement de la nouvelle version du mono capteur.

6.1 Les sites implantés

Le comportement d'un capteur doit vérifier différentes fonctionnalités, il doit être :

- sensible aux variations d'humidité, c'est-à-dire aussi bien du point de vue de l'apport en eau ainsi que l'assèchement du sol par le système racinaire de la plante ou bien encore par l'évaporation thermique.
- adapté à différents types de sol avec une irrigation par aspersion.

Le premier site implanté est une culture de pomme. Il s'agit donc d'un verger dont la nécessité de surveiller l'état hydrique du sol est permanente (été comme hiver car c'est une culture persistante). Le site choisi pour le test est un verger situé près de Montauban (82) géré par la société Gaec Du Cart. Son sol est de type argileux et l'irrigation se fait par asperseur (Figure 86).



Figure 86 : Photo du verger près de Montauban

Le second type de « champ expérimenté » est une culture de maïs située dans le Gers à Masseube. Son exploitation est gérée par la CACG, avec un sol argilo-limoneux et nécessite une irrigation par asperseur (Figure 87).



Figure 87 : Photo de la culture de maïs à Masseube

Le troisième type de culture est une culture de carotte. Pour ce type de culture , le sol doit être sablonneux et nécessite une irrigation par asperseur. Ces quatre sites situés dans les Landes, et gérés par Maïs Adour, ont été implémentés :

- dans la commune de Rion-des-Landes (Figure 88),
- dans la commune de Poursiuges-Boucoue,
- dans la commune de Renung,
- et dans la commune de Souprosse.



Figure 88 : Site de culture de carotte à Rion

Grâce à ces sites, différents types de sols sont testés. On notera que toutes ces cultures sont irriguées par asperseur puisqu'il s'agit de la technique d'irrigation la plus utilisée dans ces types de cultures.

Nous présentons une carte des cultures instrumentées sur la Figure 89.

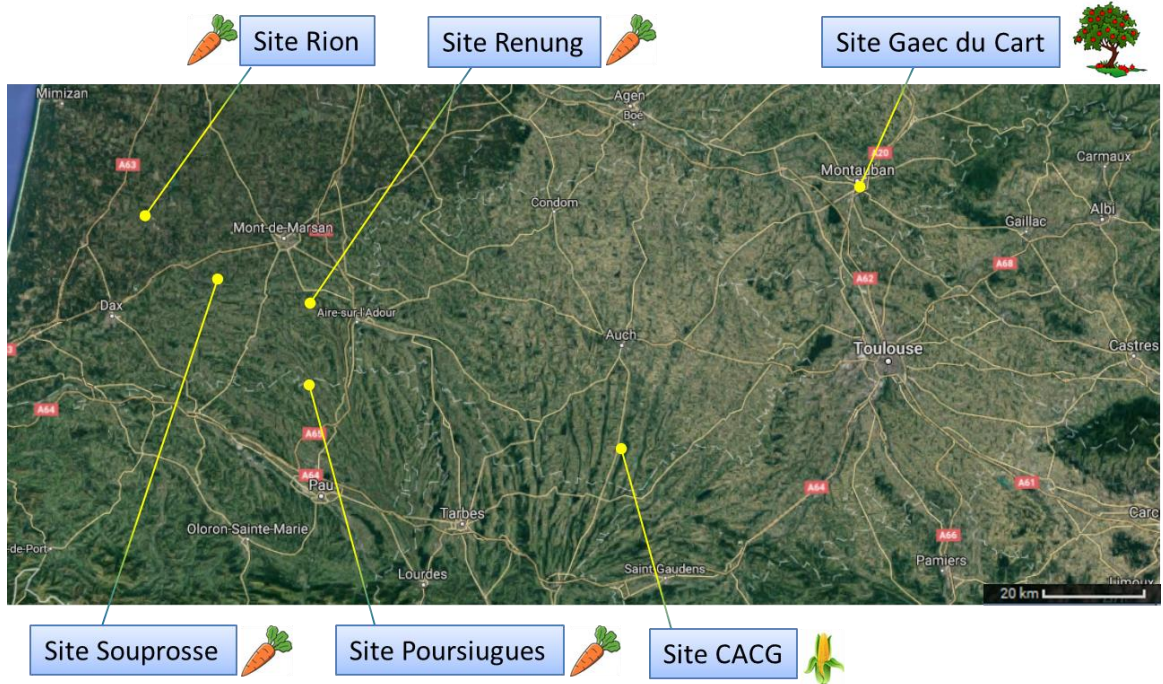


Figure 89 : Carte des sites de tests

6.2 Test du multi capteur

La première campagne de tests a entièrement été réalisée avec des cannes multi capteur sur les sites Gaec du Cart et CACG. Ces systèmes se composent d’une canne associée à la carte électronique permettant la mesure et la transmission des données. Le but de cette campagne étant de valider le fonctionnement de la mesure d’humidité par les capteurs. Les données sont collectées par le système Comsag pour être transmises sur Internet. La fonction réseau de capteur est donc assurée par ce système. La liaison entre le système Comsag et notre capteur est une liaison filaire équipé d’un protocole SDI12. La Figure 90 montre l’installation de notre système sur le site Gaec du Cart.

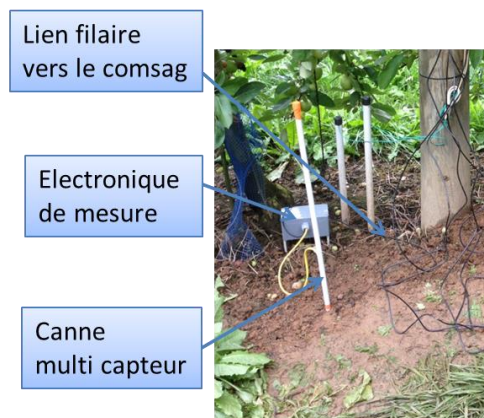


Figure 90 : Installation de la canne multi capteur

Grâce à cette installation, on récupère les informations suivantes :

- l'humidité lue par les quatre capteurs (10cm, 30cm, 50cm, 70cm),
- l'humidité de trois capteurs Decagon (10cm, 30cm, 70cm),
- la pluviométrie,
- et la température.

Le système Comsag permet de lire les données issues de la carte de mesure. Pour cela, le système n'alimente pas en permanence la carte. Elle n'est alimentée que pendant les périodes de mesure. Le protocole SDI-12 permet de transférer les mesures sur le bus filaire. Ce protocole permet au système Comsag de choisir les instants de mesures. De plus, pour plus de précision dans la mesure, on effectue en réalité 8 mesures et on renvoie la moyenne de ces mesures. La mesure ne s'effectue que toutes les 15 minutes car la dynamique de l'eau dans le sol n'impose pas de mesures plus rapides.

On observe tout d'abord les données relevées sur le site CACG sur la Figure 91.

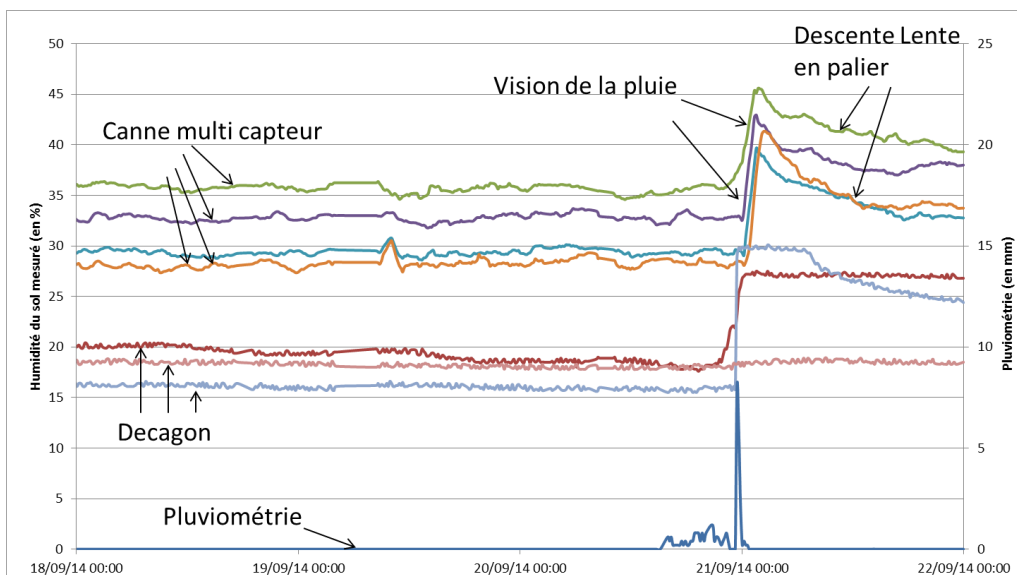


Figure 91 : Relevés de la première campagne de mesure sur le site CACG

On remarque sur cette figure un fonctionnement correct de la canne :

- la stabilité de l'humidité sans apport d'eau (variation de 2% en l'absence d'apport d'eau)
- la réaction à l'apport d'eau du 21/09 (+15% pour les capteurs IRRIS et +14% pour le capteur Decagon)
- la descente lente après l'apport d'eau (-4% en 1 jour pour la canne IRRIS),
- la même réactivité des capteurs que Decagon à l'apport d'eau du 21/09.

Ce relevé permet donc de valider le fonctionnement de cette canne. La réponse est cohérente avec celle du Decagon en termes de dynamique et de réactivité. Cependant, on relève pendant cette campagne trois principaux problèmes :

- le premier est un problème de réalisation (Figure 92),
- le deuxième concerne l'installation (Figure 93),

- le troisième est un problème de comportement dégradé avec deux causes identifiées :
 - déstructuration du sol autour du capteur (Figure 94).
 - Saturation du capteur par phénomène de ruissellement le long de la canne.

Recherchons (Figure 92) les causes du dysfonctionnement : le boîtier protégeant l'électronique doit être étanche pour garantir le bon fonctionnement de celle-ci. Or sur un site, le boîtier s'est détérioré et les mesures se sont donc arrêtées.

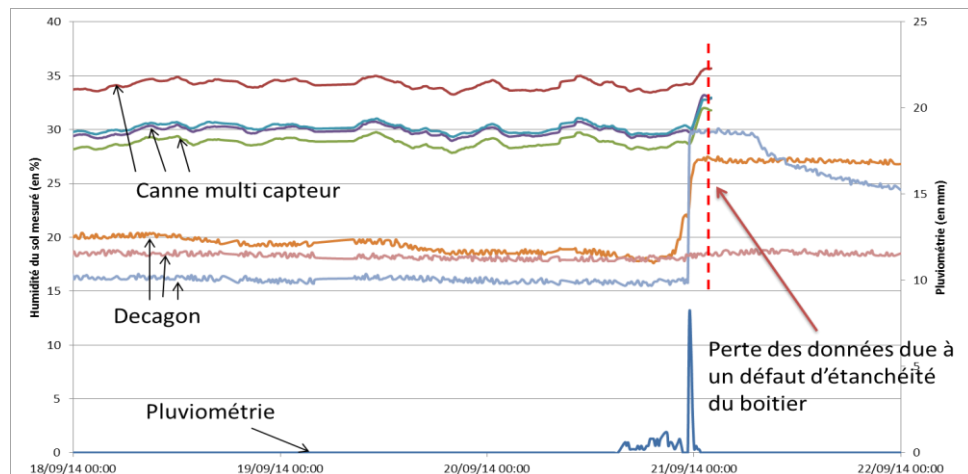


Figure 92 : Observation du défaut d'étanchéité du boîtier protégeant l'électronique

Le défaut d'étanchéité apparaît à la date du 21/09, les données concernant la canne multi capteur sont coupées alors que les données des autres capteurs se poursuivent. L'analyse faite à posteriori démontre que c'est la carte électronique qui a cessé de fonctionner en raison de ce problème. L'humidité accumulée dans le boîtier a créé des courts-circuits qui ont grillé plusieurs composants. On a résolu ce problème en changeant la carte électronique et le boîtier.

- Le second problème concerne l'installation. En effet, pour fonctionner le capteur doit être en contact avec le sol l'entourant. Si une poche d'air se forme, la mesure n'est plus assurée et le capteur ne fournit plus de données cohérentes. Sur l'installation d'une canne, on a pu observer ce phénomène plusieurs jour après l'installation. On a relevé les données sur la Figure 93.

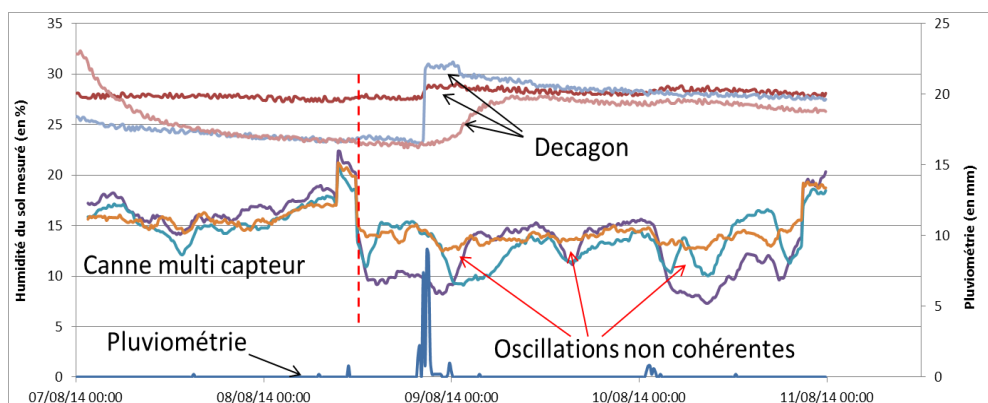


Figure 93 : Observation d'une poche d'air proche de la canne multi capteur

Sur cette figure, on observe deux zones distinctes :

- avant 12h le 8/08, le fonctionnement des capteurs est nominal. En effet, ils suivent tous la même dynamique et ne présente pas d'oscillations.
- après 12h le 8/08, les capteurs présentent un comportement anormal, l'humidité relevée augmente puis chute brutalement. Ensuite sur deux des capteurs, des oscillations de 5% d'humidité apparaissent. Ces oscillations ne sont pas dues à un changement d'humidité car un capteur ne varie pas comme les capteurs Decagon. Elles révèlent donc un problème sur ces capteurs.

Notre expertise sur le site a démontré un défaut de structuration du sol autour du capteur par une galerie de taupe (Figure 94) !



Figure 94 : Photo d'une galerie de taupe proche de la canne multi capteur

Une taupe a creusé sa galerie près de la canne en créant donc une poche d'air à côté des capteurs. Cette poche rendant incohérente et fausse les mesures relevées. Les capteurs Decagon placé plusieurs mètres plus loin n'étaient pas affectés. Un simple déplacement de la canne a permis de résoudre le problème.

- Le dernier problème rencontré est un problème fonctionnel. On observe sur la Figure 95 la réaction de notre capteur à une forte pluie.

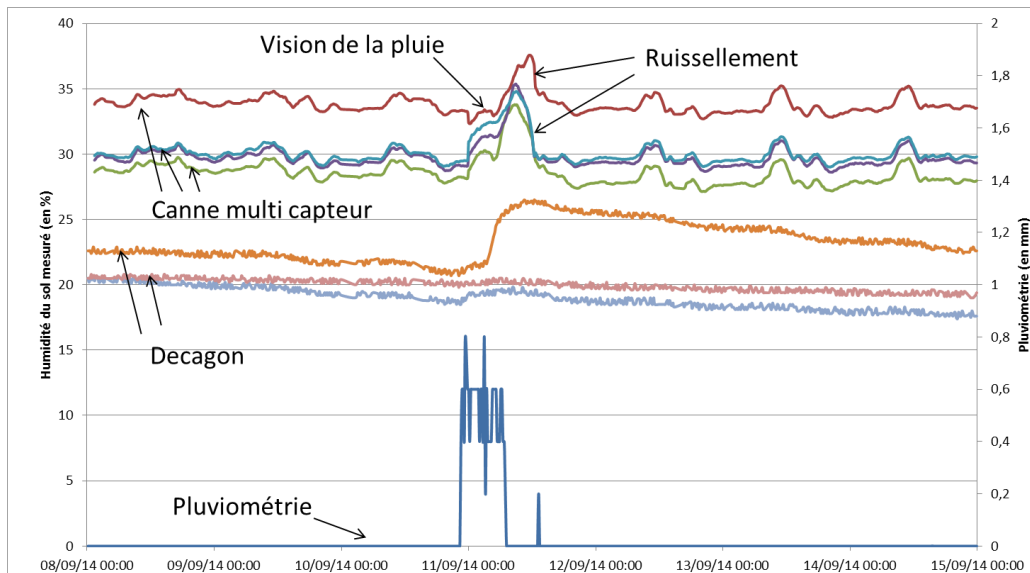


Figure 95 : Observation d'une forte pluie sur la canne multi capteur

On peut remarquer sur cette figure la réponse rapide de la mesure de l'humidité à une forte pluie. Tout d'abord en l'absence de précipitations, le capteur est fonctionnel, le niveau d'humidité est stable comme celui des capteurs Decagon. Cependant en réaction à l'apport d'eau, l'humidité du sol augmente et diminue ensuite lentement (1% par jour) puisque absorbé par les cultures, ce que l'on observe sur les capteurs Decagon. Sur les capteurs de la canne, la descente est plus rapide (5% en moins d'un jour).

Cela traduit en fait le ruissellement de l'eau sur la canne. Comme cette canne est un cylindre dépassant du sol, le trajet le plus simple de l'eau pour pénétrer dans le sol est donc de glisser le long de la canne jusqu'à son extrémité. L'eau est donc vue par les capteurs mais elle glisse le long de la canne et ne pénètre donc pas le sol pour le nourrir. Ce phénomène explique donc cette descente soudaine de la valeur mesurée de l'humidité pour revenir à la valeur précédente l'apport d'eau. Pour résoudre ce problème, un cône a été placé au-dessus de la canne pour limiter le ruissellement de l'eau.

Après avoir résolu ces problèmes, on relève les données sur les deux sites. On observe les données du site du verger près de Montauban sur la Figure 96.

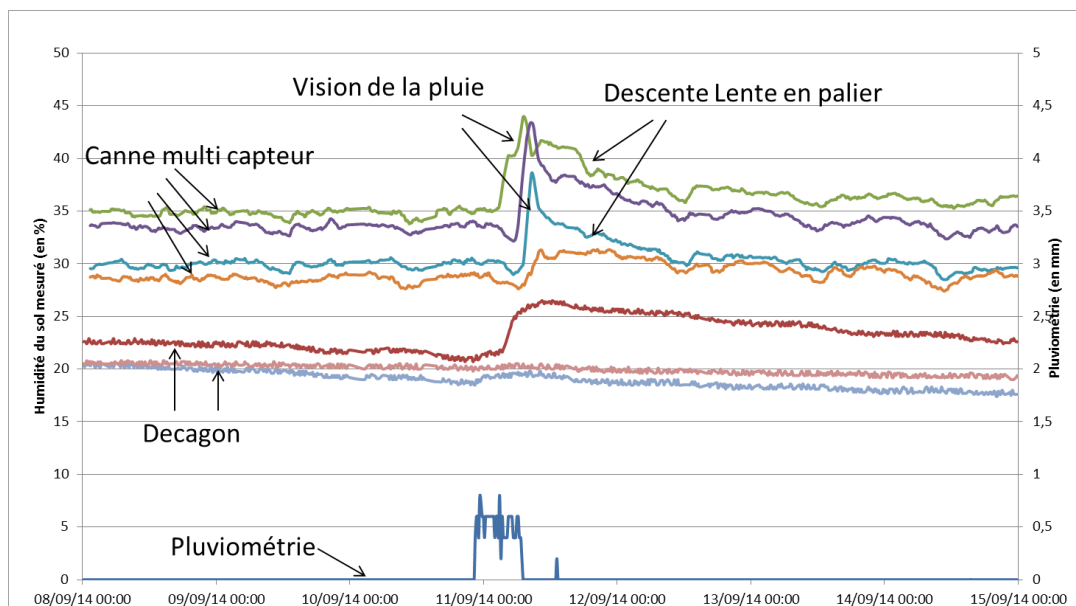


Figure 96 : Relevés de la première campagne de mesure sur le site Gaec du Cart

On peut observer sur ce graphique plusieurs points remarquables :

- la valeur de l'humidité est stable en absence d'apport d'eau,
- l'apport d'eau est bien vu par les capteurs (montée le 11/09),
- le capteur le plus profond (en orange) diffère des autres capteurs plus proches de la surface,
- l'eau apportée est bien absorbée par le sol puisque la descente est lente (2% par jour),
- la dynamique des capteurs de la canne réalisée par le LAAS et la dynamique des capteurs Decagon sont semblables (réactivité au même instant vis-à-vis de l'apport d'eau du 11/09),

- cependant le phénomène de ruissellement est présent puisque trois capteurs (+8% à 10cm, +7% à 30cm et +5% à 50 cm) de la canne réagissent alors que seul le Decagon de surface réagit (en rouge, +5%) et la descente de l'humidité (-4%/jour) reste deux fois plus rapide que le capteur Decagon(-2%/jour) ce qui signifie que moins d'eau a été absorbé par le sol.

Pour conclure sur cette campagne de mesure, on retiendra que :

- le fonctionnement de ces capteurs est validé. En effet, la dynamique de réaction à un apport d'eau est conforme à celle du capteur Decagon de référence.
- Cependant, le problème de ruissellement de l'eau sur la canne n'est pas totalement résolu. Le chapeau conique atténue les effets mais l'eau coule tout de même le long de la canne et le sol ne l'absorbe pas comme attendu.
- De plus, des éléments externes (conditions climatiques, animaux) peuvent dégrader le fonctionnement du capteur lesquelles nécessite une intervention.

L'impossibilité de réalisation industrielle de cette canne (cf. Chapitre 5) ajoutée à ces raisons, nous ont conduit à ne pas conserver la canne multi capteur. La nouvelle solution, mono capteur, a pour but de limiter les problèmes rencontrés.

6.3 Notre solution : le mono capteur

6.3.1 Première campagne de mesures

On remplace donc les cannes multi capteur par les systèmes mono capteur. Cela multiplie donc le nombre de capteurs à réaliser. Pour chaque point de mesures, il faut maintenant 4 capteurs pour obtenir les mêmes profondeurs que la canne multi capteur. Chaque capteur sera relié au système Comsag par une liaison analogique. Pour équiper l'ensemble des sites choisis (quatre sites des Landes pour la culture des carottes, site de la CACG pour la culture du maïs et le site de Gaec du Cart pour la culture des pommes), on déploie près de 50 capteurs. On présente le capteur sur la Figure 97.



Figure 97 : Photo du mono capteur pour la deuxième campagne de mesure

Ce capteur est donc celui présenté dans le chapitre 5. Il se compose d'un transducteur industriel et d'une carte électronique de mesure (figure de gauche). En pratique le capteur est surmoulé pour assurer l'étanchéité du système. Un câble de connexion d'une longueur de 6m (figure de droite) est associé.

On installe les capteurs et on relève les premières mesures, comme celle de la Figure 98.

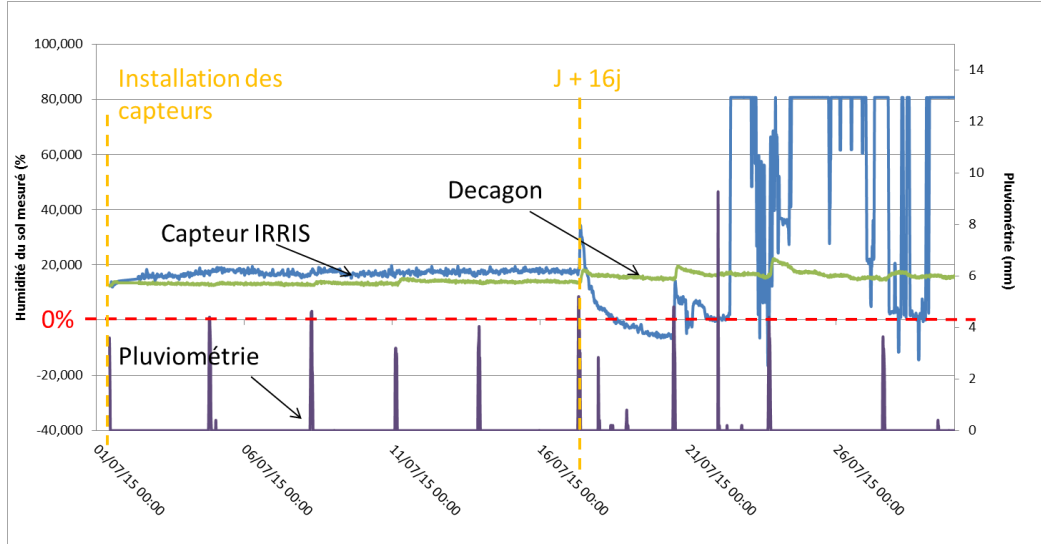


Figure 98 : Relevés des premiers jours de la deuxième campagne de mesures

On observe deux phases comportementales sur cette courbe :

- La première entre 0 et 16 jours, où les courbes du capteur LAAS sont superposées à celle du Decagon (en termes de dynamique). Le fonctionnement est correct.
- La seconde phase après 16 jours le capteur IRRIS ne fonctionne plus, il indique même des humidités inférieures à 0% !

Il découle de notre analyse, la conjugaison de deux effets. Le premier est un défaut d'étanchéité des capteurs. Comme le montre la Figure 99, le surmoulage révèle la présence de trous nécessaires à l'injection. Certes ces trous sont rebouchés par une colle silicone mais la colle se détériore avec le temps. Le capteur n'est donc plus étanche à long terme et les valeurs mesurées ne sont plus significatives. Cet effet est également combiné à un fenêtrage des données. En effet, pour exploiter au mieux la pleine échelle de la sortie analogique, on choisit des bornes maximales et minimales pour l'humidité mesurée. Il en résulte que la relation appliquée par le serveur lors de la conversion tension/humidité fait apparaître des valeurs négatives sur la courbe.



Figure 99 : Zoom sur les trous laissés par les injecteurs et la colle silicone appliquée

Ce problème est apparu sur plus de 95% des capteurs implantés avec des temps de défauts compris en 15 et 20 jours. Pour résoudre ce problème, la totalité des capteurs a été retirée puis étuvée pendant une période de 12h à 80°C pour évacuer l'eau présente. Les trous ont ensuite été rebouchés à l'aide de colle étanche comme le montre la Figure 100.

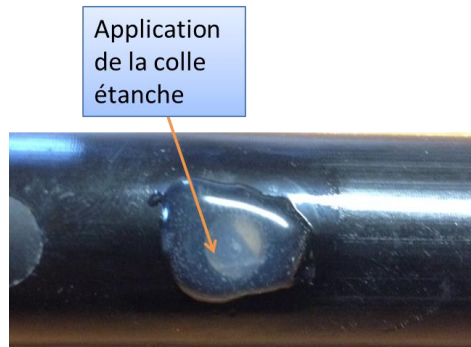


Figure 100 : Zoom sur l'application de la colle étanche

On réimplante ensuite les capteurs et on relève les données de la Figure 101.

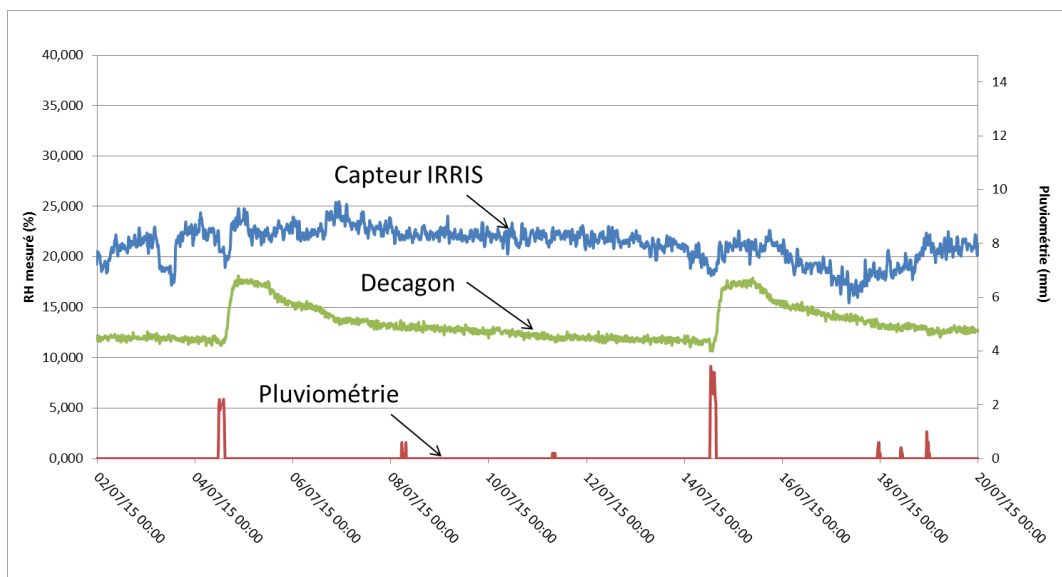


Figure 101 : Relevés de la deuxième campagne de mesures après réimplantation

On observe sur ce graphe l'évolution de deux capteurs situés à la même profondeur, le Decagon et le capteur IRRIS. Le Decagon fonctionne correctement entre le 04/07 et le 14/07 alors que le capteur IRRIS n'affiche que du bruit sans réelle corrélation avec l'humidité du sol.

On retire le capteur IRRIS pour identifier le problème. Selon nos tests en laboratoire, le capteur ne réagit plus à l'humidité. Sachant que le capteur est surmoulé, il est impossible d'observer les signaux internes cependant nous privilégions une observation aux rayons X pour inspecter la structure interne du capteur. On relève l'image de la Figure 102.

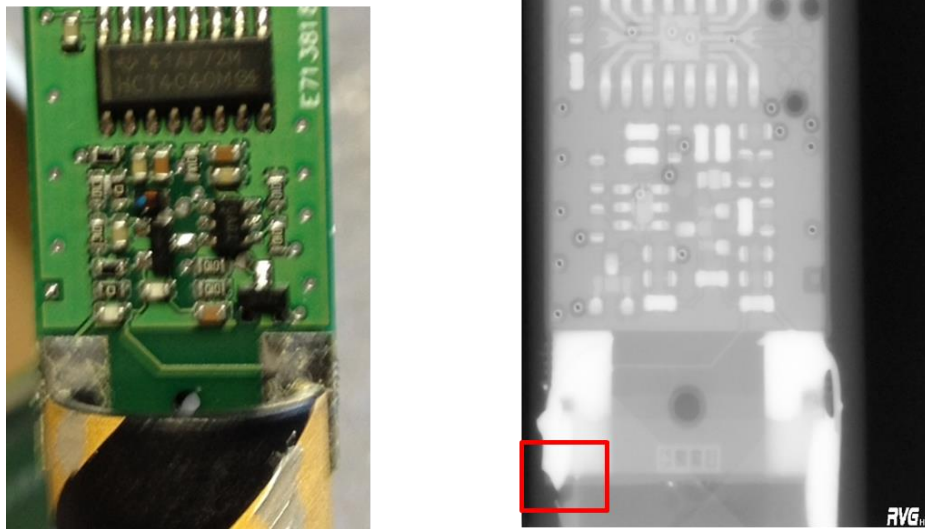


Figure 102 : Visualisation aux rayons X de l'intérieur d'un capteur moulé

On visualise sur l'image la carte électronique, le tube capteur situé sur la partie inférieure et les liaisons au centre. On peut remarquer que la liaison de droite est intacte alors que celle de gauche a cédé. Le transducteur n'est donc plus relié à l'électronique, et la mesure ne s'effectue plus.

Ce phénomène a été observé sur plus de 90% des capteurs. La position de la liaison entre la carte électronique et le tube capteur crée un point de flexion au centre du capteur. La longueur du capteur conjugué à la non rigidité du surmoulage impose de fortes contraintes mécaniques en ce point. Cette liaison étant fragile, les brasures se cassent. Il est donc impossible de pouvoir utiliser ces capteurs en l'état.

6.3.2 Nouveau design de l'assemblage mono capteur

On décide donc de modifier cet assemblage pour conférer plus de rigidité mécanique. On décide alors de positionner la carte électronique à l'intérieur du transducteur pour s'affranchir de tout point de flexion. Le nouveau facteur de forme de la carte électronique est présenté sur la Figure 103.

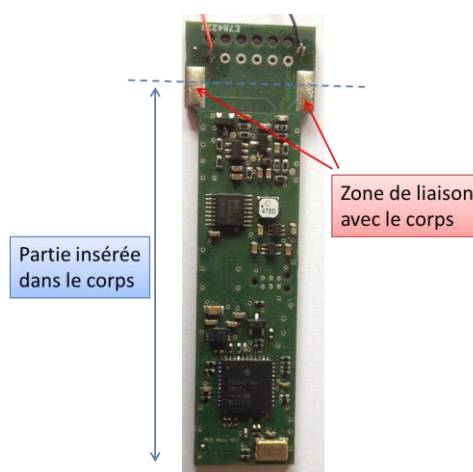


Figure 103 : Nouvelle forme de l'électronique du mono capteur

Pour pouvoir positionner la carte dans le transducteur, on place sur le haut deux extensions. Ces plages rentrent dans les gorges du tube et centrent la carte tout en la bloquant en rotation et en translation. On observe sur la Figure 104 le capteur ainsi réalisé après surmoulage transparent.



Figure 104 : Nouveau design du capteur surmoulé

La carte électronique ne dépasse plus du corps et le point de flexion se trouve localisé au centre du transducteur. Cette approche confère plus de rigidité à l'ensemble transducteur/carte électronique.

On relance donc une nouvelle campagne de mesures pour valider le fonctionnement.

6.3.3 Troisième campagne de mesures

On choisit les trois types de sites pour cette campagne, les sites de culture de maïs et les sites de culture de la carotte et la culture en verger.

On observe les résultats d'un site des Landes en Figure 105.

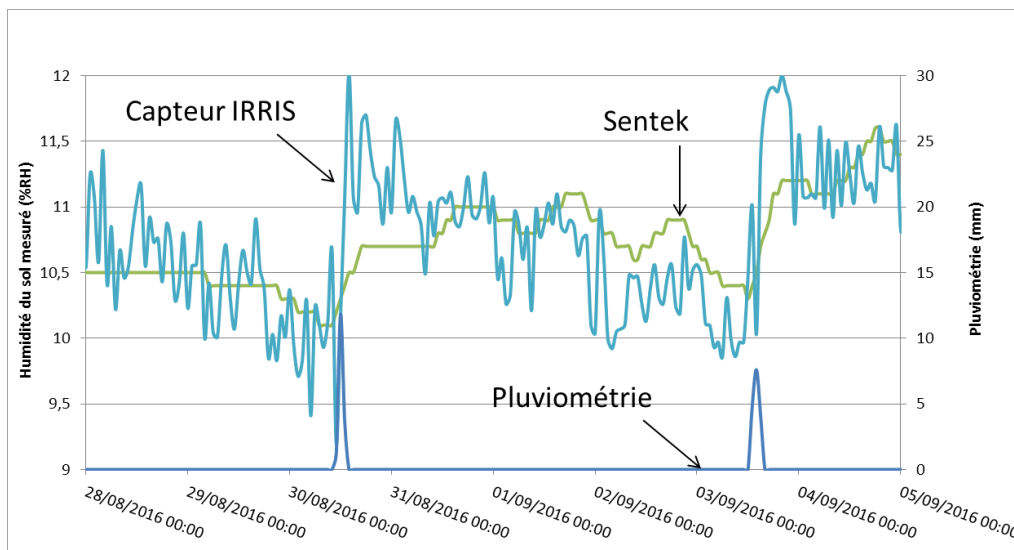


Figure 105 : Relevés de la troisième campagne de mesures sur le site Rion

Sur ce graphique, on ne compare plus notre capteur au Decagon mais au capteur Sentek utilisé dans cette parcelle. On observe sur les valeurs du capteur IRRIS, un bruit important (autour de 0.5% d'humidité du sol). Cependant la dynamique du capteur est correcte. On observe bien la montée de l'humidité mesurée après un apport d'eau puis une lente descente en palier. La dynamique de descente est équivalente à celle sur capteur Sentek. L'effet de ruissellement de la canne multi capteur est totalement absent. La quantité d'eau tombée près du capteur est bien absorbée par le sol, la mesure n'est plus faussée.

Toutefois le bruit persistant est problématique, les mesures révèlent un niveau d'erreur de lecture jusqu'à 1%. On décide donc d'appliquer un filtre numérique interne au capteur sur la mesure pour lisser les valeurs de sorties. Pour ce faire, on effectue 16 mesures et on prend la moyenne des valeurs comme valeur lue. On observe maintenant les résultats sur le site CACG de culture du maïs en Figure 106.

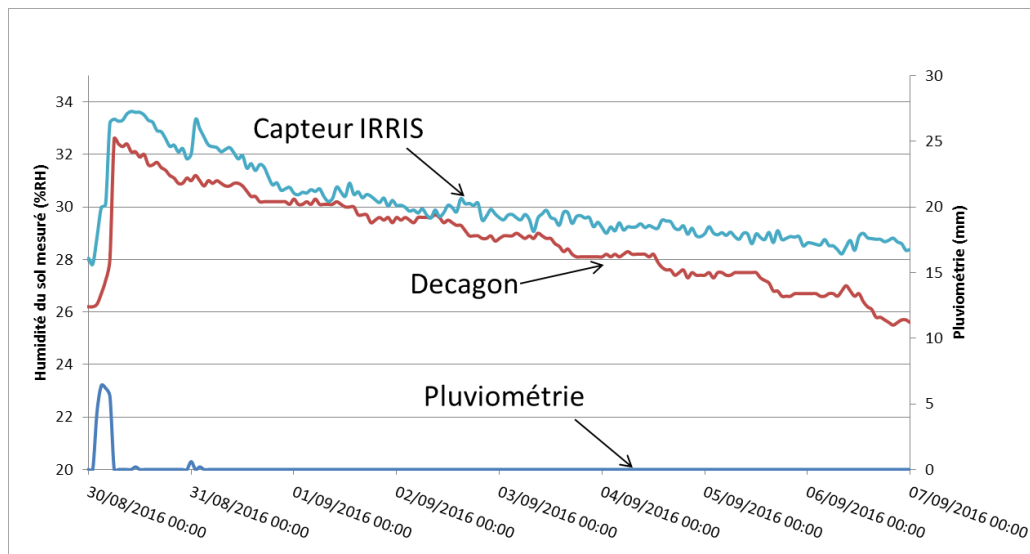


Figure 106 : Relevés du mono capteur sur le site CACG

Sur cette figure, on compare la dynamique et la réactivité de notre capteur face au capteur Decagon, la référence industrielle. En termes de réactivité, notre capteur réagit 30min avant le Decagon face à la présence d'eau. Concernant, la dynamique, la montée d'humidité mesurée due à l'apport d'eau est la même pour les deux capteurs (+7%). La dynamique de descente est plus rapide pour le Decagon car il est placé plus près des cultures et donc l'eau est plus absorbée par la plante que celle proche du capteur IRRIS. On peut donc conclure sur le bon fonctionnement du capteur.

On observe ensuite les résultats sur le site avec les vergers sur la Figure 107.

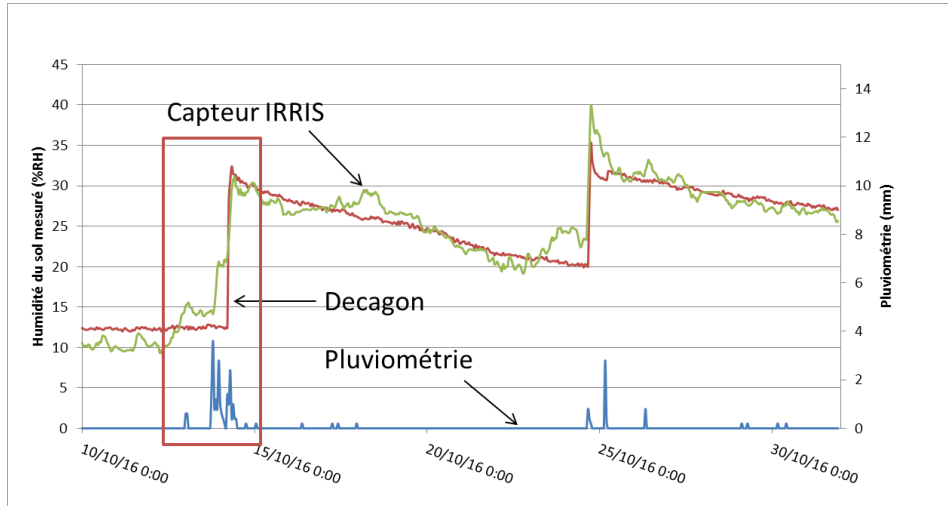


Figure 107 : Relevés sur le site Gaec du Cart pour la troisième campagne de mesures

On observe sur ce graphe, les relevés d'un capteur Decagon et d'un capteur IRRIS enfouis à 30cm. On remarque une meilleure sensibilité du capteur IRRIS. En effet, l'humidité mesurée augmente dès la première présence d'eau pour le capteur IRRIS cependant le capteur Decagon ne détecte cette présence que plusieurs heures après. La détection est donc meilleure sur le capteur IRRIS. La dynamique de montée (+20%) et la dynamique de descente (-2% par jour) est ensuite la même pour les deux capteurs, ce qui valide le bon fonctionnement de notre capteur.

6.4 Conclusion

Les sites sélectionnés sont représentatifs des types de cultures et de sols présentes dans le sud-ouest français. Le premier site est un site de culture en verger sur du sol argileux, le deuxième est un site de culture céréalière (maïs) sur un sol limoneux et le dernier est une culture de carotte dans un sol sablonneux.

La première campagne de mesure permet de tester la version multi capteur sur les différents sites. Elle a mis en exergue plusieurs problèmes de cette intégration. La mise en place est délicate du fait de la longueur de la canne, il faut pouvoir répartir au mieux la terre sur toute la longueur de la canne. Elle est de plus soumise aux éléments extérieurs comme la présence d'animaux. De plus, un effet de ruissellement se crée le long de celle-ci ce qui fausse l'absorption du sol et la mesure. Ce type de format n'est pas adapté pour assurer une mesure précise.

La deuxième campagne permet de tester la nouvelle version, le mono capteur. Cette campagne a souligné la fragilité mécanique de cette version. Les capteurs ont montré un défaut d'étanchéité qui a été résolu. Ces capteurs présentent aussi une grande fragilité qui a conduit à la détérioration de plus de 90% des capteurs implantés. Cette campagne n'a donc pas apporté d'éléments de réponse pour valider le capteur.

La troisième campagne permet de tester le nouveau design du mono capteur, plus résistant. Après une reprogrammation pour moyenniser les mesures, le capteur assure la mesure de l'humidité en répondant aux conditions établies. Il a une réaction immédiate à l'apport d'eau avec une plus grande sensibilité que la référence industrielle. La dynamique mesurée par le capteur IRRIS est semblable à celle du Decagon. Le bruit de mesure est inférieur à 0.1%. Ces éléments nous permettent de valider ce capteur.

Conclusion Générale

Dans cette thèse, nous avons tout d'abord listé les nouvelles technologies présentes dans l'agriculture moderne. Les tracteurs autonomes, la modernisation des machines agricoles et la mise en place de nouveaux systèmes d'irrigation sont autant de solutions innovantes au service d'une agriculture raisonnée.

En se focalisant sur l'irrigation, l'utilisation des données satellites et météorologiques est en constante évolution pour l'optimisation de l'arrosage des parcelles. Cependant cette méthode reste relativement imprécise et peu performante. Le déploiement d'une instrumentation distribuée dans les champs permet d'obtenir les données au plus près des cultures

Cette instrumentation apporte des contraintes au niveau énergétique pour l'autonomie, au niveau des communications pour la portée et au niveau de capteurs qui sont soumis aux conditions climatiques.

C'est dans ce cadre que le projet IRRIS a pour ambition de fournir aux agriculteurs des stations pour apporter une solution d'instrumentation distribuée innovante. Après avoir observé les capteurs d'humidité du sol présents dans l'industrie, la décision d'engager le développement d'une filière technologique a été retenue. En raison d'un coût trop élevé de certains capteurs industriels (Sentek), cela ne permet pas la distribution d'un nombre important de capteurs. De plus, les capteurs à faible coût (Decagon, Watermark) ne permettent pas une installation facile. Cela augmente donc le temps de pose ainsi que les erreurs de manipulation.

Mais avant d'initier ce travail et pour bien comprendre nos choix technologiques, nous avons tout d'abord exploité l'idée d'adapter un capteur d'humidité dans l'air mais pour la mesure de l'humidité dans le sol. Pour cela, le capteur a été enfermé dans une chambre séparée de la terre par une membrane. Cette solution a été abandonnée car la chambre se saturait en eau et rendait la mesure impossible.

Comme les variations d'humidité dans le sol modifient les paramètres électriques de celui-ci, notre première méthode s'est naturellement focalisée sur la mesure de la variation de résistance du sol. Ces relevés nous ont permis de quantifier les variations d'humidité et de valider cette première approche. A priori, cette solution semblait simple à réaliser toutefois, dans notre expérience, nous avons démontré que la résistivité, en plus de l'humidité, était largement influencée par la nature du sol (sablonneux, argileux, calcaire, ...). De plus, le contact des électrodes avec le sol engendrait une accélération prématurée de vieillissement du capteur. Ceci nous a conduit à investiguer une nouvelle solution.

La seconde solution s'appuyait sur la mesure de la capacité du sol. Cette méthode plus complexe à mettre en œuvre présente l'avantage de s'affranchir de la grandeur d'influence qu'est la nature du sol. De plus, l'isolation des électrodes permettait de protéger le capteur de l'attaque chimique du sol. Pour finir, en choisissant une autre gamme pour la fréquence de travail, il était possible de mesurer la salinité du sol. On a choisi cette méthode pour notre capteur.

Le transducteur a été conçu pour former un capteur capacitif. Pour vérifier le bon comportement des transducteurs réalisés, on a étudié leurs impédances. Comme attendu, les transducteurs se comportaient comme des capacités. Nous avons ensuite modélisé nos transducteurs par un schéma électrique prenant en compte plusieurs éléments, l'ESR, l'ESL et les parasites. Ce modèle a pu être simplifié jusqu'à obtenir un condensateur unique variant avec l'humidité. Le comportement est équivalent pour la mesure de la salinité.

Nous avons choisi un premier format pour notre transducteur adapté aux contraintes du projet, la forme cylindrique. Les premières électrodes étaient des anneaux positionnés à la périphérie du cylindre. Le capteur ainsi créé était fonctionnel et validé. Une optimisation du facteur de forme des électrodes a été engagée.

Une paire d'électrodes hélicoïdales a été pensée pour optimiser la sensibilité du capteur et une paire d'électrodes à branches a été testée dans le but optimiser le volume sondé. On a choisi finalement la forme hélice pour conserver une réponse linéaire et faciliter le traitement.

La conception de l'électronique de mesure a commencé par la partie lecture de la capacité. La méthode par capacités commutées était trop complexe à mettre en œuvre. La solution du pont de Sauty ne garantissait pas une réponse linéaire. L'architecture de l'oscillateur Colpitts était simple à mettre en œuvre et conservait la linéarité de la réponse, on a choisi cette solution pour le front end.

Deux solutions distinctes permettaient de mesurer la variation de fréquence. L'utilisation de composants discrets, dont l'AD650 un convertisseur fréquence/tension, était la première. Cette solution simple à mettre œuvre permettait de limiter la puissance du microcontrôleur à embarquer pour effectuer le traitement. La seconde consistait à coder un fréquencemètre dans le microcontrôleur ce qui augmente sa charge mais réduisait le nombre de composants externes.

On a effectué des tests thermiques pour observer le comportement des deux solutions en conditions réelles. Seule la solution logicielle permettait de s'affranchir d'une loi de compensation thermique. Cette solution a été retenue pour notre capteur. De plus cette solution permettait d'intégrer différents types de connexions. La sortie du capteur pouvait être analogique (tension) ou numérique (SDI12, UART, SPI).

Dès lors, on a assemblé le transducteur et l'électronique pour réaliser le capteur final. La première idée consistait à assembler plusieurs capteurs pour une seule électronique. Cette solution permettait de réduire le coût de l'électronique en mutualisant les fonctions de diviseur de fréquence et conversion fréquence/tension. Un seul convertisseur analogique/numérique assure le traitement numérique de la mesure. Cependant les profondeurs de lectures relatives à chaque capteur étaient figées.

L'étude de l'industrialisation de la fabrication a été initiée. Les transducteurs étaient facilement industrialisables mais les cannes multi capteur ne pouvaient pas l'être. Le passage de fils à l'intérieur du tube n'était pas reproductible. De plus, la longueur de la canne (1.5m) ne permettait pas la fabrication industrielle pseudo-monolithique. C'est pour

ces raisons et pour conserver un degré de placement des capteurs que la solution mono capteur a remplacé la canne multi capteur.

Dans cette nouvelle solution, chaque capteur possédait son électronique de mesure et était indépendant. Chaque capteur a été ensuite moulé pour assurer l'étanchéité. On a adjoint à ces capteurs un concentrateur permettant une mesure autonome (sur piles) de quatre capteurs ainsi qu'un lien RF pour la transmission. Ce lien était en bande 868MHz et possédait une portée de 600m en champ libre.

Nous avons initié les campagnes de mesures pour valider le fonctionnement des capteurs en conditions réelles. Tout d'abord, nous avons testé les cannes multi capteur. Le fonctionnement a été validé car la détection d'apport d'eau fonctionnait. Toutefois, une problématique de ruissellement d'eau inhérente à la forme de cette canne persistait. Nous testions par la suite les versions mono capteur. Le fonctionnement a été validé, l'apport d'eau était détecté et le comportement de la terre a été visualisé et était comparable à la référence industrielle, le Decagon.

Cependant sur cette première version, les tenues mécaniques se sont avérées insuffisantes. Les capteurs n'étaient pas étanches et leur fonctionnement s'arrêtait au bout de 20 jours. De plus, le positionnement de la carte avec le transducteur induisait une contrainte mécanique qui résultait à une cassure de 90% des capteurs fabriqués. Un nouveau design a donc été créé pour supprimer cette faiblesse, la carte était insérée dans le transducteur pour s'affranchir de tout point de flexion.

La dernière campagne de mesure a montré un bon fonctionnement du capteur même si un traitement des données (moyenne) a été implémenté pour optimiser l'observation des données.

Pour conclure, on valide que le capteur d'humidité créé par le LAAS répond aux contraintes demandées :

- une insertion facile grâce à sa forme cylindrique,
- un coût faible grâce à une électronique de mesure simplifiée,
- une industrialisation réalisable et déjà lancée,
- un comportement équivalent au capteur industriel Decagon.

Aux termes des activités de recherches, les travaux ont abouti à un capteur fonctionnel dont la *datasheet* est la suivante :

Fiche technique du capteur IRRIS



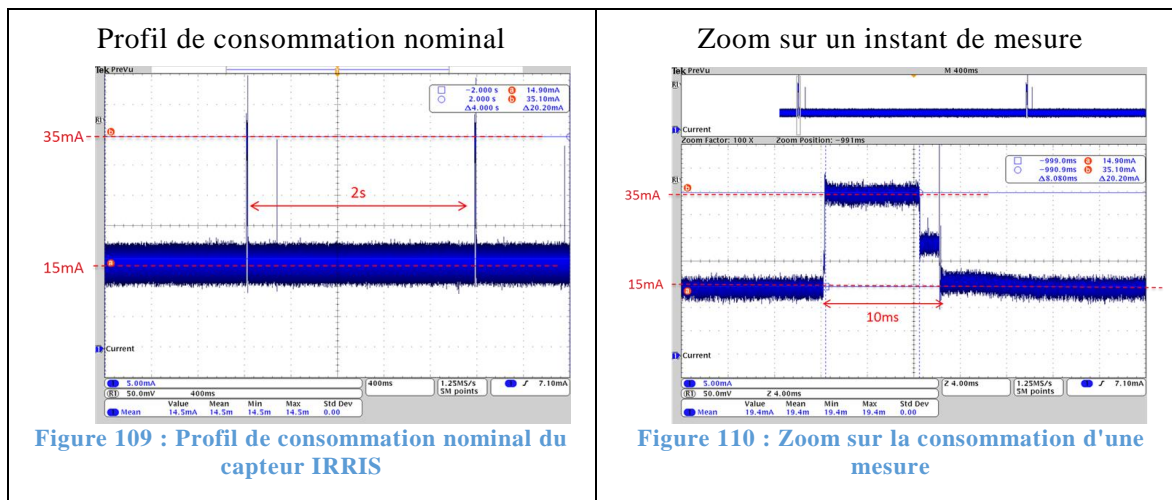
Figure 108 : Vue du capteur IRRIS final

Le capteur IRRIS est un nouveau capteur d'humidité du sol. Avec un design cylindrique innovant, il facilite son insertion dans le sol à l'aide d'une simple tarière. Il possède un câble de connexion de 6m pour être déployé autour d'un concentrateur autonome.

Caractéristiques Electriques

Tension d'alimentation	+3.15V ; +5V
Courant consommé nominal	15mA

Tableau 13 : Caractéristiques électriques du capteur IRRIS



Connexions

Le capteur IRRIS possède 6 fils de sortie.

Couleur du fil	Nom	Fonction
Rouge	V _{CC}	Permet l'alimentation du capteur
Orange	V _s	Sortie analogique du capteur
Vert	Boot	Active la reprogrammation par bootloader (actif à 0)
Blanc	Rx _{boot}	Réception de la reprogrammation par bootloader
Bleu	Tx _{boot}	Transmission de la reprogrammation par bootloader
Noir	GND	Masse

Tableau 14 : Connectique de sortie du capteur IRRIS

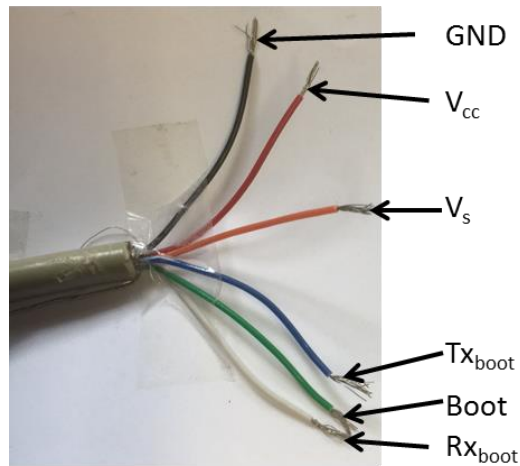


Figure 111 : Connectique de sortie du capteur IRRIS

Caractéristiques électriques de la sortie

Plage de variation	0 ; +3V
Impédance	100Ω
Temps de réponse	15ms

Tableau 15 : Caractéristiques électriques de la sortie du capteur IRRIS

Equation de conversion de la tension de sortie du capteur V_s en humidité du sol H :

$$H_{(\%RH)} = 33.043 * V_{s(V)} + 2.4754$$

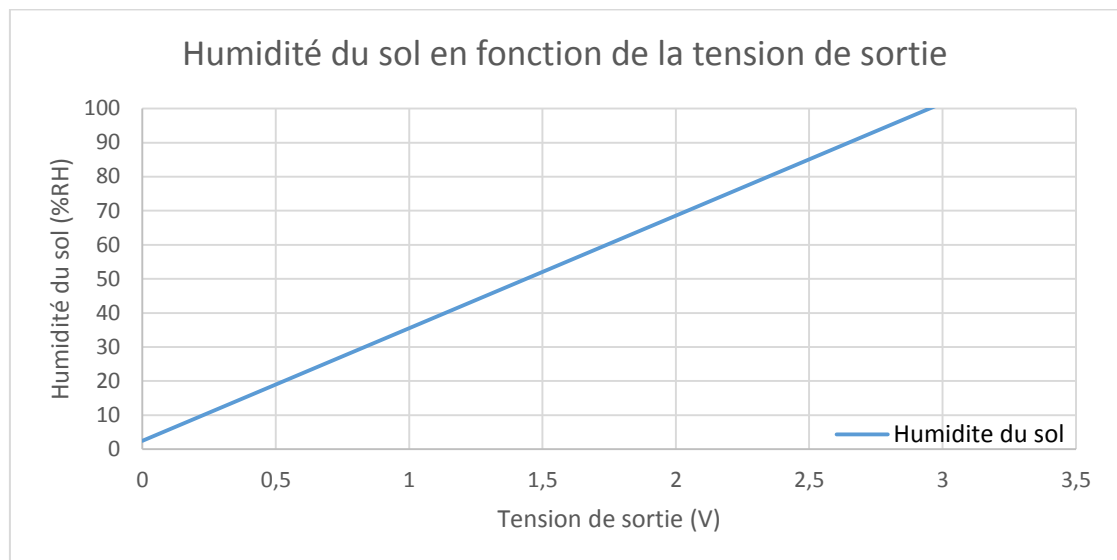


Figure 112 : Humidité du sol mesurée en fonction de la tension de sortie

Dimensions

Diamètre	24mm
Longueur	150mm
Longueur du câble	6m

Tableau 16 : Dimensions du capteur IRRIS final



Figure 113 : Dimensions (photo) des dimensions du capteur IRRIS

Nos perspectives

Le capteur IRRIS actuel répond aux attentes définies en début de projet cependant plusieurs points restent encore à améliorer.

A court terme

Premièrement, la mesure de salinité a été étudié et conçu mais aucun tests en situation réelle n'a été réalisé. L'étude préliminaire a permis de concevoir la fonction de lecture et les tests en laboratoire ont confirmé la faisabilité. Il reste donc à déployer ces capteurs sur les sites pour valider leur utilisation et leur fonctionnement dans le système global.

Le bootloader doit être aussi modifié. Pour permettre la reprogrammation in situ de ce capteur, un système de bootloader a été intégré. Cependant, il ralentit le temps de mise en route du capteur puisqu'il se place au démarrage du capteur avec une attente de 1s. La solution envisagée est de transformer la sortie numérique actuelle en entrée de commande de ce bootloader. En cas de mise à la masse de cette entrée, le système entre en mode reprogrammation sinon il démarre en mode mesure. Cela permet de réduire le temps de mise en route de 1s à moins de 200 μ s.

Ensuite, le capteur est entré en phase d'industrialisation. Une présérie de 100 éléments est actuellement en cours de réalisation pour valider le protocole de fabrication. Certains points, comme le surmoulage plastique du capteur, sont également en cours de révision pour minimiser les pertes durant la fabrication (destruction du capteur pendant l'injection de plastique).

Pour finir, un transfert technologique est en cours vers la société TCSD pour la fabrication des capteurs IRRIS. Tous les éléments permettant la conception (schématique, routage, fichier GERBER) et la programmation (IDE, code source) vont leur être transmis pour leur permettre de prendre le relais pour l'évolution de ce capteur.

A long terme

Pour commencer, une optimisation énergétique doit être réalisée. En effet, même si la consommation du capteur IRRIS est compatible avec le système Comsag, il est encore possible de réduire sa consommation. Le mode veille implantée ne permet actuellement que d'économiser la consommation du microcontrôleur mais pas la totalité des fonctions implémentées dans la carte. Il faut maintenant concevoir un système pour inhiber les alimentations des fonctions analogiques pour augmenter cette économie.

De plus, une redondance matérielle est envisageable. Le switch analogique permettant la sélection entre mesure de l'humidité et mesure de la salinité est double. Actuellement, seule la moitié est utilisée. Pour optimiser la fiabilité de notre capteur, il est possible de doubler les connexions et utiliser la totalité de ce switch.

Pour optimiser l'installation du capteur, une procédure de self test peut s'avérer intéressante. Durant l'installation certains problèmes peuvent apparaître :

- Défauts mécaniques, casse du capteur
- Mauvais contact avec le sol
- Mauvaise connexions des fils

Une procédure de mesure interne permettra de détecter ces défauts et prévenir l'utilisateur du mauvais fonctionnement.

Ensuite, la technologie sans fil utilisée est la bande ISM. Sa portée est limitée à 500m. Pour pouvoir étendre cette portée et limiter le nombre de système Comsag à placer dans la parcelle, il faut permettre au capteur de jouer le rôle de répéteur. En mettant en place un nouveau protocole de communication, il est alors possible de créer un réseau de capteur sur la parcelle avec un seul système Comsag relié à Internet (GPRS ou base).

La technologie sans fil peut aussi être modifiée. Actuellement, la bande ISM nous permet de communiquer au système Comsag. En plaçant une communication LoRa, on peut augmenter la portée actuelle tout en restant compatible avec les contraintes énergétiques de nos capteurs. Toutefois cette technologie est à privilégier pour les lieux difficiles d'accès car ce type de communication, dans notre application, réduit le nombre de données à transmettre ainsi que le débit.

Outre la solution LoRa, nous pouvons recourir à la technologie Sigfox. Dans ce cas, les données (de mesures, de défaut du capteur, d'alerte de sur-arrosage et d'autres données à caractère urgent) ne sont plus envoyées sur le système in-situ mais à des antennes relais permettant le stockage direct en ligne. Il faut cependant faire attention à la couverture réseau proposé par l'entreprise. Il faut aussi limiter le nombre de données car chaque trame est payante.

Enfin il nous semble pertinent de recourir à l'utilisation d'un drone pour assurer le télé-relevé des données. On peut remplacer les stations Comsag implantées dans les parcelles par un drone survolant les cultures et relevant les données des capteurs présents. Les coordonnées GPS de chaque capteur devra être connu pour planifier le parcours de ce drone. Du fait de l'importance donnée à cette amélioration, des projets ont été initiés. Le drone utilisé est le Mikrokopter Okto XL (Figure 114). Le travail sur le protocole de communication entre le drone et le capteur ainsi que le guidage GPS du drone pour survoler les capteurs a débuté.



Figure 114 : Un drone au service d'une agriculture intelligente

Annexes

Annexe 1 : BOM de la carte de mesure du capteur IRRIS

Designator	Description	Constructor	Ref	Footprint	Quantity
C1, C3, C12, C13, C14, C30, C33, C37, C50, C53, C57, C62	Capacitor 100nF 50V 10% XFR 0603	Walsin	0603E104K500CT	0603	12
C2	Capacitor 10µF 25V 10% XSR 0805	Walsin	0805X106K250CT	0805	1
C29, C47	Capacitor 10µF 25V 20% XSR 0603	kenet	CG03CL10G19PACTU	0603	2
C31, C51	Capacitor 2.2µF 10V 10% XFR 0603	Murata	GRM188R71A225KE15D	0603	2
C32, C34, C52, C54	Capacitor 1µF 25V 10% XFR 0603	TDK	C1608X5R1H105K080A8	0603	4
C35	Capacitor 100µF 50V 1% NPO 0603	Multicomp	MCM18N101F500CT	0603	1
C36	Capacitor 47µF 50V 1% NPO 0603	Multicomp	MCM18N47F500CT	0603	1
C41, C42, C43, C44	Capacitor 100nF 25V 10% XFR 0402	Walsin	0402B104K250CT	0402	4
C45	Capacitor 10µF 10V 10% XSR 0603	Murata	GRM188R61A106KE9D	0603	1
C55	Capacitor 1nF 50V 1% NPO 0603	Murata	GRM1885C1H102FA0J	0603	1
C56	Capacitor 680µF 50V 1% NPO 0603	AVX	0603S4681FA72A	0603	1
C130, C131	Capacitor 1µF 25V 20% XSR 0603	Walsin	0603X106K250CT	0603	2
D30, D31	Schottky barrier 200mA 30V	Fairchild	BAT54S	SOT_23_3	2
J1	Plage accueil capteur PCB			Connecteur capteur	0
J4	6+1-pins, plage d'accueil PCB			Connecteur fils	0
L8	Inductance de puissance CMS 4.7µH 90mA 0.1750µm	Collcraft	LPS3314-472MRB	INDUCTOR_COILCRAFT_LPS3314	1
L30	Inductance haute fréquence CMS, Série AEC-Q200 0603LS, 7.81	Collcraft	0603LS-782XGLB	0603	1
L31	Inductance haute fréquence CMS, Série NLV, 82 µH, 45 mA, 121	TDK	NLV32T-820-PF	1210	1
Q20, Q31	300MHz, Single, N-Channel, SOT-23	Fairchild	MMBT2222A	SOT_23_3	2
R12, R14	Resistor 6.8k 1% 75V 100mW 0402	Panasonic	ERJ2RF6803X	0402	2
R13, R15, R101, R102, R103, R104, R106, R107, R108, R109, R111, R112, R113, R114, R115, R119, R120, R121, R123, R124	Resistor 10k 1% 75V 100mW 0402	Panasonic	ERJ2RF1002X	0402	20
R30, R50	Resistor 100R 1% 75V 100mW 0603	Panasonic	ERJ3EF1000V	0603	2
R31, R39, R51, R59	Resistor 0R0 1% 100mW 0603	Vishay	CRCW0603000Z06A	0603	4
R32, R37, R52, R57	Resistor 10k 1% 75V 100mW 0603	Vishay	CRCW060310K0FREA	0603	4
R33, R34, R35, R36, R53, R54, R55, R56	Resistor 100k 1% 75V 100mW 0603	BOURNS	CR0603-FX-1003ELF	0603	8
R38	Resistor 1.5k 1% 75V 100mW 0603	Panasonic	ERJ3EF1501V	0603	1
R40, R60	Resistor 10R 1% 75V 100mW 0603	Vishay	CRCW060310R0FREA	0603	2
R58	Resistor 680R 1% 75V 100mW 0603	Panasonic	ERJ3EF6800V	0603	1
R99, R116, R117	Resistor 100k 1% 50V 100mW 0402	Panasonic	ERJ2RF1003X	0402	3
U1	Microcontrôleur PIC - Nmano Watt Technology	Microchip	PIC24FJ64GB004-ML	QFN-ML44_N	1
U2	8-Bit DAC with SPI Interface, 8-Pin DFN, Extended Temperature	Microchip	MCP4901-EMC	DFN-MC8	1
U4	Buck Step Down Regulator with 3 to 17V Input and 0.9 to 6V	Texas Instrument	TPS61222DCRT	MCHP-SC70-L16_L	1
U5	Single Output High PSRR LDO, 150 mA, Fixed 3V Output, 2.5 t	Texas Instrument	TPS71730DCCT	T1-DO45_V	1
U7	Precision Temperature-to-Voltage Converter, 3-Pin, SOT-23, Exte	Microchip	TC1047AVN8TR	SOT-23-NB3_N	1
U8	Commutateur analogique, Deux canaux, DPDT, 2 Canal(aux), 12	Microchip	DC2018DN-T1-EH	QFN-16	1
U10	Multiplexeur, Famille LVC, 1 canal, 2:1	ANP	74VLC1G157GV-Q100H	SC-74-6	1
U11	4-Bit Synchronous Binary Counter	Texas Instrument	SN74HC163PW	SSOP16A	1
U30, U31	Rail-to-Rail I/O, CMOS Operational Amplifier with Shutdown	Texas Instrument	OPA357ADBVTG4	SOT_23_6	2
X5	Oscillateurs TCVCXO 16MHz 3V	Abricon	ASVTX-09-16.000MHZ-T	CSMD	1
	PCB	Eurocircuit			0

Figure 115 : Liste des composants de la carte de mesure

Liste des figures

Figure 1 : Vue du capteur Decagon EC-5	16
Figure 2 : Vue de la sonde Sentek EnviroSCAN	17
Figure 3 : Vue de la sonde SMEC300 Waterscout	18
Figure 4 : Vues d'une sonde Watermark	19
Figure 5 : Présentation du système Gardena	20
Figure 6 : Capteur d'humidité Gardena Smart sensor	21
Figure 7 : Présentation du Parrot Pot	21
Figure 8 : Graphe de suivi sur l'application Parrot Pot	22
Figure 9 : Zoom sur le capteur d'humidité du Parrot Pot	22
Figure 10 : Répartitions de l'eau dans le sol	25
Figure 11 : Pots de stockage des échantillons de sols	27
Figure 12 : Tests d'un capteur dans un pot calibré	27
Figure 13 : Modélisation d'un capteur simple	29
Figure 14 : Modélisation d'un capteur complexe	30
Figure 15 : Photographie du capteur HTG	31
Figure 16 : Système d'adaptation pour la mesure d'humidité du sol	31
Figure 17 : Tests en condition réelle du capteur HTG	32
Figure 18 : Sous fonctions du capteur IRRIS	33
Figure 19 : Différentes formes du transducteur	36
Figure 20 : Mesure de l'impédance en décibels du capteur en fonction de la fréquence	37
Figure 21 : Tracé de l'impédance pour différentes formes et différentes humidités en fonction de la fréquence	38
Figure 22 : Mesure de la capacité en fonction de la fréquence pour différentes humidités	39
Figure 23 : Mesure de la capacité en fonction de la fréquence pour différentes salinités...	40
Figure 24 : Fréquences de mesures	40
Figure 25 : Tracé de la capacité en fonction de la fréquence	41
Figure 26 : Modélisation schématique du transducteur	41
Figure 27 : Modèle simplifié du transducteur pour l'humidité	42
Figure 28 : Modèle simplifié du transducteur pour la salinité	42
Figure 29 : Comparaison du modèle expérimental et du modèle simulé	43
Figure 30 : Représentation du dipôle capacitif	44
Figure 31 : Permittivité du sol en fonction de son humidité	45
Figure 32 : Premier design du capteur en forme de tube	48
Figure 33 : Dimension du capteur inspiré d'un condensateur	48
Figure 34 : Courbe de variation de capacité du capteur cylindre	49
Figure 35 : Densité du champ électrique crée par le capteur en vue de face	49
Figure 36 : Comparaison des variations de capacité pour un changement de diamètre du transducteur	50
Figure 37 : Répartition du champ électrique autour du transducteur Ø20mm pour différentes humidité du sol	51
Figure 38 : Variation des capacités pour différentes dimensions des électrodes	52
Figure 39 : Dimensions finales du transducteur cylindrique	53
Figure 40 : Variation de la capacité en fonction du matériau des électrodes	53
Figure 41: Format du transducteur avec des électrodes en hélices	55
Figure 42 : Comparaison des variations de capacité entre les électrodes cylindriques et les électrodes hélicoïdales	55

Figure 43 : Densité du champ électrique créée par l'élément à double spirale en vue de dessus.....	56
Figure 44 : Forme du transducteur avec électrodes à branches	56
Figure 45 : Variation de la capacité du transducteur à électrodes à branches	57
Figure 46 : Forme finale du transducteur	58
Figure 47 : Réponse du transducteur final en fonction à l'humidité du sol	59
Figure 48 : Réponse du transducteur en fonction de la salinité du sol.....	59
Figure 49 : Schéma d'un montage amplificateur inverseur à capacités commutées	62
Figure 50 : Schéma d'un pont de Sauty	63
Figure 51 : Tracé de la tension en sortie du pont de Sauty en fonction de plusieurs capacités du transducteur	64
Figure 52 : Amplitude de la tension de sortie du pont de Sauty en fonction de l'humidité du sol.....	65
Figure 53 : Schéma d'un oscillateur Colpitts base commune	66
Figure 54 : Tracé de la tension en sortie de l'oscillateur Colpitts en fonction de plusieurs capacités du transducteur	67
Figure 55 : Tracé de la FFT de la tension en sortie de l'oscillateur Colpitts en fonction de plusieurs capacités du transducteur.....	68
Figure 56 : Variation de la fréquence de sortie de l'oscillateur en fonction de l'humidité du sol.....	68
Figure 57 : Schéma fonctionnel du multiplexage de fréquence.....	70
Figure 58 : Schéma fonctionnel du DG2018 extrait de la documentation constructeur	71
Figure 59 : Schéma d'utilisation de l'AD650 en convertisseur fréquence/tension	72
Figure 60 : Caractéristique du convertisseur fréquence/tension en fonction de la fréquence d'entrée.....	73
Figure 61 : Algorithme de mesure numérique de la fréquence.....	74
Figure 62 : Effet de la température sur l'oscillateur Colpitts	75
Figure 63 : Effet de la température sur le convertisseur fréquence/tension	76
Figure 64 : Effet de la température sur la chaîne numérique de lecture de fréquence	77
Figure 65 : Schéma fonctionnel de la carte de mesure	78
Figure 66 : Réalisation de la canne multi capteur	82
Figure 67 : Ecart entre la capacité du corps seul et du corps parcouru de fils	82
Figure 68 : Capacité du transducteur plus son fil en fonction de la longueur du fil pour différentes humidité.....	83
Figure 69 : Schéma fonctionnel de l'électronique de la canne multi capteur	84
Figure 70 : Carte électronique de mesure de la canne multi capteur	85
Figure 71 : Organisation du système avec le concentrateur IRRIS	85
Figure 72 : Carte électronique du concentrateur communicant.....	86
Figure 73 : Exemple d'installation du multi capteur.....	87
Figure 74 : Machine-outil de moulage plastique.....	87
Figure 75 : Presse à injection (à gauche) et moule en métal (à droite)	88
Figure 76 : Transducteur réalisé industriellement.....	88
Figure 77 : Vue de la surface du transducteur au microscope optique 3D	89
Figure 78 : Différence de capacité entre le transducteur réalisé par le LAAS et le transducteur industriel en fonction de l'humidité du sol	90
Figure 79 : Assemblage du capteur individuel.....	91
Figure 80 : Vue d'ensemble du capteur individuel moulé.....	92
Figure 81 : Interactions du transducteur avec le moulage plastique	92
Figure 82 : Modèle électrique de mesure induit par le moulage	93

Figure 83 : Comparaison du transducteur moulé et du transducteur seul	94
Figure 84 : Réalisation de la carte concentrateur pour le mono capteur	94
Figure 85 : Qualité de la réception radio en fonction de la distance pour différentes configurations	96
Figure 86 : Photo du verger près de Montauban	99
Figure 87 : Photo de la culture de maïs à Masseube	100
Figure 88 : Site de culture de carotte à Rion	100
Figure 89 : Carte des sites de tests	101
Figure 90 : Installation de la canne multi capteur.....	101
Figure 91 : Relevés de la première campagne de mesure sur le site CACG	102
Figure 92 : Observation du défaut d'étanchéité du boîtier protégeant l'électronique.....	103
Figure 93 : Observation d'une poche d'air proche de la canne multi capteur	103
Figure 94 : Photo d'une galerie de taupe proche de la canne multi capteur	104
Figure 95 : Observation d'une forte pluie sur la canne multi capteur	104
Figure 96 : Relevés de la première campagne de mesure sur le site Gaec du Cart.....	105
Figure 97 : Photo du mono capteur pour la deuxième campagne de mesure	106
Figure 98 : Relevés des premiers jours de la deuxième campagne de mesures.....	107
Figure 99 : Zoom sur les trous laissés par les injecteurs et la colle silicone appliquée	108
Figure 100 : Zoom sur l'application de la colle étanche	108
Figure 101 : Relevés de la deuxième campagne de mesures après réimplantation.....	108
Figure 102 : Visualisation aux rayons X de l'intérieur d'un capteur moulé	109
Figure 103 : Nouvelle forme de l'électronique du mono capteur	109
Figure 104 : Nouveau design du capteur surmoulé.....	110
Figure 105 : Relevés de la troisième campagne de mesures sur le site Rion	110
Figure 106 : Relevés du mono capteur sur le site CACG	111
Figure 107 : Relevés sur le site Gaec du Cart pour la troisième campagne de mesures ...	112
Figure 108 : Vue du capteur IRRIS final	118
Figure 109 : Profil de consommation nominal du capteur IRRIS	118
Figure 110 : Zoom sur la consommation d'une mesure	118
Figure 111 : Connectique de sortie du capteur IRRIS.....	119
Figure 112 : Humidité du sol mesurée en fonction de la tension de sortie	119
Figure 113 : Dimensions (photo) des dimensions du capteur IRRIS.....	120
Figure 114 : Un drone au service d'une agriculture intelligente.....	124
Figure 115 : Liste des composants de la carte de mesure	127

Liste des tables

Tableau 1: Fiche technique du capteur Decagon EC-5.....	17
Tableau 2 : Fiche technique du Sentek EnviroSCAN	18
Tableau 3: Fiche technique du capteur SMEC300	18
Tableau 4: Fiche technique de la sonde Watermark.....	19
Tableau 5 : Matrice de Hadamard du système	46
Tableau 6 : Plan composite du système	47
Tableau 7 : Dimensions des électrodes pour un transducteur Ø20mm	52
Tableau 8 : Sensibilité du transducteur cylindrique en fonction du matériau des électrodes	54
Tableau 9 : Comparaison des sensibilités pour différentes tensions de mesures.....	54
Tableau 10 : Comparaison de différentes formes d'électrodes.....	58
Tableau 11 : Comparaison des montages de mesures de capacité.....	69
Tableau 12 : Résumé des différentes configurations radio en bande ISM	95
Tableau 13 : Caractéristiques électriques du capteur IRRIS.....	118
Tableau 14 : Connectique de sortie du capteur IRRIS	118
Tableau 15 : Caractéristiques électriques de la sortie du capteur IRRIS	119
Tableau 16 : Dimensions du capteur IRRIS final	120

Bibliographie

- [1] J.-M. Bournigal, F. Houiller, P. Lecouvey, et P. Pringuet, « 30 projets pour une agriculture compétitive & respectueuse de l'environnement », oct-2015.
- [2] L. Nouvelle, « Comment les agriculteurs vont passer au tracteur autonome », *usinenouvelle.com/*, févr. 2017.
- [3] « L'avenir de l'agriculture est déjà là avec des tracteurs autonomes », *La boîte verte*, 26-juin-2015. .
- [4] R. Decourt, « Les satellites au service de l'agriculture », *Futura Science*, 02-mars-2017.
- [5] W. G. B. Bastiaanssen, M. Ahmad, et Y. Chemin, « Satellite surveillance of evaporative depletion across the Indus Basin », *AGU Publication*, p. 9-1-9-9, 06-déc-2002.
- [6] « Robots agricoles Naïo Technologies », *Naïo Technologies*. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.naio-technologies.com/>. [Consulté le: 12-mai-2017].
- [7] « Comsag, système de surveillance et de gestion de parcelles agricoles », *Comsag et son univers*. [En ligne]. Disponible sur: <http://www.comsag.fr/comsag-et-son-univers/>. [Consulté le: 12-mai-2017].
- [8] « Courbes de propagation de l'onde de sol entre 10 kHz et 30 MHz », Union Internationale des télécommunications, Recommandations UIT-R P.368-9, févr. 2007.
- [9] « EC-5 Lowest Cost VWC | Soil Moisture Sensor | Decagon Devices ». [En ligne]. Disponible sur: <http://www.decagon.com/en/soils/volumetric-water-content-sensors/ec-5-lowest-cost-vwc/>. [Consulté le: 12-mai-2017].
- [10] « Soil Moisture Measuring, Soil Moisture Measurement – Sentek ». [En ligne]. Disponible sur: <http://www.sentek.com.au/products/enviro-scan-probe.asp#enviroscan>. [Consulté le: 12-mai-2017].
- [11] Challenge Agriculture, « Qu'est-ce que la tensiométrie ? », *L'eau et les minéraux maîtrisés*.
- [12] A. AIRIAU, « Les outils d'aide au pilotage de l'irrigation: Les sondes tensiométriques et capacitives ». Chambres d'agriculture des Pays de la Loire, janv-2015.
- [13] « Caractéristiques électriques du sol », ITU, Recommandation UIT-R P.527-3, 1992.

- [14] V. Shevnin, A. Mousatov, A. Ryjov, et O. Delgado-Rodriguez, « Estimation of clay content in soil based on resistivity modelling and laboratory measurements », *Geophys. Prospect.*, vol. 55, n° 2, p. 265-275, mars 2007.
- [15] S. Visacro, R. Alipio, M. H. M. Vale, et C. Pereira, « The Response of Grounding Electrodes to Lightning Currents: The Effect of Frequency-Dependent Soil Resistivity and Permittivity », *IEEE Trans. Electromagn. Compat.*, vol. 53, n° 2, p. 401-406, mai 2011.
- [16] J. R. Wang et T. J. Schumge, « An Empirical Model for the Complex Dielectric Permittivity of Soils as a Function of Water Content », *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, vol. GE-18, n° 4, p. 288-295, oct. 1980.
- [17] « Frequency domain analysis of time domain reflectometry waveforms: 1. Measurement of the complex dielectric permittivity of soils - Heimovaara - 1994 - Water Resources Research - Wiley Online Library ». [En ligne]. Disponible sur: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/93WR02948/full>. [Consulté le: 06-juin-2017].
- [18] M. Mukhlisin et A. Saputra, « Performance Evaluation of Volumetric Water Content and Relative Permittivity Models », *Sci. World J.*, vol. 2013, p. e421762, oct. 2013.
- [19] W. E. Patitz, B. C. Brock, et E. g. Powell, « Measurement of Dielectric and Magnetic Properties of Soil ». Sandia National Laboratories, nov-1995.
- [20] G. Asch, *Les capteurs en instrumentation industrielle - 7ème édition*. Dunod, 2010.
- [21] C. Bissières, « Cours Thème I: ACQUISITION D'UNE GRANDEUR PHYSIQUE (Capteurs) ».
- [22] K. Kneifel, S. Nowak, W. Albrecht, R. Hilke, R. Just, et K.-V. Peinemann, « Hollow fiber membrane contactor for air humidity control: Modules and membranes », *J. Membr. Sci.*, vol. 276, n° 1-2, p. 241-251, mai 2006.
- [23] S. U. Jeong, E. A. Cho, H.-J. Kim, T.-H. Lim, I.-H. Oh, et S. H. Kim, « Effects of cathode open area and relative humidity on the performance of air-breathing polymer electrolyte membrane fuel cells », *J. Power Sources*, vol. 158, n° 1, p. 348-353, juillet 2006.
- [24] F. Opekar et D. Svozil, « Electric resistance in a Nafion® membrane exposed to air after a step change in the relative humidity », *J. Electroanal. Chem.*, vol. 385, n° 2, p. 269-271, avril 1995.
- [25] « Qu'est-ce qu'un tissu GORE-TEX® ? », *GORE-TEX®*. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.gore-tex.fr/technologie/qu-est-ce-que-gore-tex>. [Consulté le: 06-juin-2017].

-
- [26] JC Gaudu *et al.*, « Mesure de l'humidité des sols par une méthode capacitive : analyse des facteurs influençant la mesure », *Agronomie*, vol. 13, n° 1, p. 57-73, 1993.
- [27] C. S. Campbell, « Theory and practice of dielectric moisture measurement ».
- [28] A. Hedayat et W. D. Wallis, « Hadamard Matrices and Their Applications », *Ann. Stat.*, vol. 6, n° 6, p. 1184-1238, nov. 1978.
- [29] F. M. L. V. D. Goes et G. C. M. Meijer, « A novel low-cost capacitive-sensor interface », *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, vol. 45, n° 2, p. 536-540, avril 1996.
- [30] N. Delorme, C. Condemine, et M. Belleville, « Capacitive measuring sensor and associated measurement method », US20060273804 A1, Décembre-2006.
- [31] E. H. Colpitts, « Oscillation generator », US1624537 (A), 12-avr-1927.
- [32] « Low Voltage, Dual DPDT and Quad SPDT Analog Switches ». 11-2008.
- [33] Analog Devices, « AN 279 - Using the AD650 Voltage-to-Frequency Converter As a Frequency-to-Voltage Converter Application Note ». .
- [34] Analog Devices, « AD650 - Voltage-to-Frequency and Frequency-to-Voltage Converter ». 2013.

Liste des publications

Journaux

Hajjine, B. , Escriba, C. , Charlot, S. , Hemeryck, A. , Roux, J. , Zedek, S. and Fourniols, J. (2016) Development of a Printed Coil for Wirelessly Charging a Tracking Elderly Patch. *Wireless Engineering and Technology*, 7, 83-95. doi: 10.4236/wet.2016.72009

Conférences internationales

J. Roux, C. Escriba, A. Hemeryck, G. Soto-Romero, J.L. Boizard, M. Contardo, R. Floquet, J.Y. Fourniols « Network of distributed soil moisture sensors for culture irrigation 2.0: Design and data analysis », in 2016 IEEE Technological Innovations in ICT for Agriculture and Rural Development (TIAR), 2016, p. 71-76.