Mesure de l'humidité du sol en continu en sols caillouteux à l'aide de capteurs capacitifs

P. Thiébeau, Isabelle Bertrand

▶ **To cite this version:**

P. Thiébeau, Isabelle Bertrand. Mesure de l'humidité du sol en continu en sols caillouteux à l'aide de capteurs capacitifs. Cahier des Techniques de l'INRA, 2016, 87, 17 p. hal-02629655

HAL Id: hal-02629655
https://hal.inrae.fr/hal-02629655

Submitted on 27 May 2020

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

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

Distributed under a Creative Commons Attribution - ShareAlike 4.0 International License

Mesure de l'humidité du sol en continu en sols caillouteux à l'aide de capteurs capacitifs

Pascal Thiébeau[1], Isabelle Bertrand [1,2]

Résumé. Nous avons utilisé des capteurs capacitifs en sols possédant une forte proportion de graviers (2 à 13%) et de cailloux (18 à 44%), afin de disposer de mesures d'humidité du sol en continu. Les deux types de matériels testés ont été mis en œuvre sur deux types de sols contrastés : sablo-limoneux en région Centre (Loiret) et argilo-limoneux en région Champagne-Ardenne (Aube). Les résultats d'étalonnage obtenus au cours de quatre années d'utilisation au champ montrent de bons résultats par rapport à l'humidité de référence : l'humidité massique du sol. Au regard des capteurs utilisant le principe de la réflectance temporelle (TDR), ces résultats sont obtenus en faisant abstraction de la mesure de la densité apparente du sol et de sa température, ce qui simplifie beaucoup les conditions d'emploi au champ. Dans nos conditions de travail, nous avons pu utiliser une seule et même équation pour l'obtention de l'humidité massique à partir de données initiales délivrées en millivolt.

Mots clés : humidité massique du sol, capteur capacitif, étalonnage, champ, cailloux, graviers

Introduction

La mesure de l'humidité du sol est une composante agronomique indispensable au suivi de la croissance des cultures, très utilisée en agriculture de précision (Camilli et al., 2007 ; Garcia-Sanchez et al., 2011). C'est également une variable indispensable au fonctionnement de nombreux modèles de simulation de la décomposition de la matière organique, du suivi de la dynamique du stock d'eau du sol (Gabriel et al., 2010). Plusieurs matériels permettant le suivi permanent de la mesure de la teneur en eau du sol existent sur le marché ; mais peu d'entre eux sont adaptés à une utilisation en sols caillouteux. Or, dans le cadre de la production de biomasse destinée à la fabrication de carburants de seconde génération, les cultures destinées à cette production sont avant tout implantées sur des parcelles intéressant peu ou plus le monde agricole. Ces sols de faible qualité agronomique sont parfois très caillouteux. Dans ces conditions, la majorité des matériels de mesures de l'humidité du sol en continu présents sur le marché ne peuvent être utilisés. Dans le cadre d'un travail sur le suivi de croissance d'arbres cultivés en taillis à courte ou très courte rotation (Thiébeau et al., 2013), en sols particulièrement riches en graviers et cailloux, nous nous sommes équipés de sondes ECH$_2$O (Decagon Device Inc.) dont les performances sont censées être adaptées à ces conditions de sols difficiles. Ce travail présente, pour deux sols distincts, les résultats de leur étalonnage et utilisation pendant 4 années.

[1]UMR Fractionnement des AgroRessources et Environnement, INRA, 51100 Reims, France
thiebeau@reims.inra.fr

[2] UMR Eco & Sols, INRA, F-34060 Montpellier, France

Pascal Thiébeau, Isabelle Bertrand

Matériels et méthode

Présentation du matériel utilisé

Dans le cadre de nos expérimentations sur les Taillis à Courte ou Très Courte Rotation (Thiébeau et al., 2013), et compte tenu de la forte charge en graviers et cailloux des sols sur lesquels ces cultures étaient implantées, nous avons été amenés à nous doter d'autres matériels que les sondes TDR CS616 (Giot et Cousin, 2012) que nous utilisions habituellement en grandes cultures. En effet, la longueur des broches (30 cm) les rend plus sensibles à toute déviation de parallélisme lorsqu'elles rencontrent un obstacle lors de leur mise en place dans le sol. De ce fait, cela impacte directement la qualité de mesure et la qualité d'étalonnage qui en résultent. En sols chargés en éléments grossiers (> 2 mm), les sondes ECH$_2$O (Decagon Device® Inc.) paraissent plus adaptées car elles sont plus courtes et plus rigides que les sondes CS616 (Campbell Scientific®), donc moins sensibles à une éventuelle déviation de parallélisme qui ne peut s'exercer que dans un seul sens : celui du plat des broches par très légère inflexion, de l'ordre du millimètre, de la résine constitutive.

Deux matériels ont fait l'objet d'une utilisation en conditions expérimentales de plein champ. Il s'agit des sondes Echo-5 (EC5) et Echo-10HS (10HS), dont les caractéristiques techniques sont présentées au **Tableau 1**. Il s'agit de sondes à deux broches, en fibre de verre, qui diffèrent significativement par leurs dimensions (EC5 = broches de 5 cm de long, 10HS = broches de 10 cm de long). Ce sont des capteurs capacitifs : ils mesurent la permittivité

***Tableau 1**. Caractéristiques techniques des sondes utilisées données par le constructeur*

Sonde	**EC5**	**10HS**
Durée d'une mesure	10 ms	
Gamme de mesure	0-100% VWC (0-50% linéaire)	0-100% VWC (0-60% linéaire)
Précision	±3% (±1% avec étalonnage spécifique)	±3% (±2% avec étalonnage spécifique)
Résolution	0,1% (minéral), 0,25% (organique)	0,08% (minéral)
Dimensions/Poids	5 cm x 1,5 cm x 1,65 mm / 132 g (5m)	10 cm x 3,3 cm x 1,65 mm / 141 g (5m)
Signal de sortie tension	10 à 40% alimentation. Au-delà de 50% VWC, utiliser les calibrations polynomiales spécifiques aux types de sol	300-1250 mV (indépendant de l'alimentation)
Alimentation	2,5V…3,6V stabilisée non continue (préchauffage de 10 ms) 3 VDC @ 10mA	3…15V DC @ 12…15 mA
Salinité	< 800 mS.m^{-1}	< 1000 mS.m^{-1}
Température d'utilisation	de -40 à +60°C	
Centrales d'acquisition	CSI, EM50/EM50R et autres centrales pouvant délivrer une alimentation par relais entre 3 et 15 V, et mesurer en signal tension non différentiel sous une résolution mini de 12 bits.	

diélectrique (ou constante diélectrique) du milieu, qui est une propriété physique qui décrit la réponse d'un milieu donné à un champ électrique appliqué. Dans les sols, cette grandeur est très corrélée à la teneur en eau volumique (Volumétrique Water Content en anglais, VWC). Les capteurs ont été testés avec leur longueur de câble standard (5 m), équipés d'une prise jack, connectés à une centrale de mesure du constructeur (EM50) (**Figure 1**).

***Figure 1**. Présentation du matériel utilisé : centrale EM50, capteur EC5 et capteur 10HS ; (Photo : P.Thiébeau).*

Préconisations d'usage du constructeur

Pour obtenir des mesures de qualité, le constructeur préconise d'éviter : les poches d'air autour de la sonde, les éléments grossiers (cailloux, racines, morceaux de bois ou d'écorce), la proximité d'un objet métallique. Lorsque le sol est très sec, il conseille de l'humidifier afin de faciliter la pénétration de la sonde. Il ne faut en aucun cas forcer pour la mettre en place.

La forme et la taille des sondes permettent de les positionner directement si le sol est assez meuble. Pour des mesures en profondeur, il est possible d'enfouir les sondes au niveau souhaité. Pour retirer la sonde, ne pas tirer sur le câble.

Nota :

1) compte tenu des caractéristiques physiques de la sonde, et malgré les préconisations du constructeur, nous avons souhaité tester cet équipement sur nos dispositifs expérimentaux riches en cailloux ;

2) contrairement à d'autres constructeurs de ce type de sonde, celui-ci ne préconise aucune correction vis-à-vis des variables densité apparente des sols et température.

Pascal Thiébeau, Isabelle Bertrand

Conditions expérimentales des sites sur lesquels nous les avons mis en œuvre

Les deux sites supports de nos travaux se situent à Saint Cyr en Val (Loiret, 45 ; 47.80°N, 1.97°E) et à Gyé sur Seine (Aube, 10 ; 48.02°N, 4.44°E). Dans notre plan expérimental nous avons croisé la comparaison de deux types de sonde sur un même site, avec celle d'un même type de sonde sur deux sites (**Tableau 2).**

***Tableau 2**. Tableau récapitulatif des comparaisons possibles*

Type de sonde	Gyé sur Seine	Saint Cyr en Val
10HS	X	X
EC5	X	

Le dispositif expérimental de Gyé sur Seine est positionné sur un sol peu épais (18 à 25 cm de profondeur), assis sur plateau calcaire de la fin du Kimméridgien inférieur, qui forme les plateaux dominant la vallée de la Seine. Ces formations géologiques sont constituées de calcaires lithographiques à débit en plaquette de la formation des calcaires à Astartes. Le **Tableau 3** montre que la charge en cailloux y est très importante ; leur nature calcaire se reflète sur le pH de la fraction terre fine (< 2 mm). On notera la proportion particulièrement importante d'argiles dans la composition de sa texture.

Le dispositif de Saint Cyr en Val se situe sur des alluvions des hautes terrasses de la Loire (+ 20 m). Ces formations géologiques datent du Quaternaire ancien. Il s'agit de matériaux siliceux et argileux : argiles, sables, graviers et cailloux. *In situ*, le sol peut facilement être colonisé par les racines jusqu'à 45 cm de profondeur. Ensuite, les racines rencontrent une zone d'encroûtement d'environ 10 cm d'épaisseur, liée à de l'oxydation ferrique, très difficile à pénétrer, avant d'accéder à une zone sableuse, humide. Le **Tableau 3** montre que la charge en graviers et cailloux de ce site est également importante. Sa texture comporte une fraction importante de sables.

***Tableau 3**. Constitution granulométrique et chimique des sols supports de cette étude*

	Gyé sur Seine	**Saint Cyr en Val**
Constitution du sol brut		
Cailloux (> 5 mm)	44,0%	18 à 28%
Graviers (2 à 5 mm)	2,7%	11 à 13%
Terre fine (< 2 mm)	53,3%	58 à 70%
Constitution de la terre fine (< 2 mm)		
Argiles (g/kg)	602	95
Limons (g/kg)	282	253
Sables (g/kg)	21	653
Matière organique (g/kg)	106,6	15,0
pH eau	8,08	5,53
Calcaire total (g/kg)	90,51	<1
CEC Cobaltihexamine (cmol+/kg)	43,69	3,31

Données recueillies

La centrale EM50 peut être programmée pour produire les fichiers de sorties en eau volumique ou en millivolt. Quelle que soit l'option choisie, la centrale génère sur chaque fichier (format Excel), un onglet de données brutes dont il est difficile de savoir à quoi correspondent les valeurs recueillies. Néanmoins, le constructeur produit des ajustements de calibration qui permettent de retrouver la donnée élaborée à partir de cette donnée brute. Les ajustements sont spécifiques au type de capteur pour la donnée eau volumique et unique pour la donnée millivolt :

pour retrouver la teneur en eau volumique (VWC) à partir de la donnée brute, le constructeur propose les équations suivantes :

sonde EC5 : $VWC = 8{,}5x10^{-4} \times \text{Donnée brute} - 0{,}481$ **(1)**

sonde 10HS : $VWC = 5{,}7 \times 10^{-4} \times \text{Donnée brute} - 0{,}376$ **(2)**

Pour une sortie en mV, une seule équation est proposée : Millivolt = Donnée brute x (3000/4096) **(3)**

Nous avons testé la corrélation des données ainsi recalculées aux données produites directement dans le fichier de sortie dans l'unité sélectionnée : mV.

Méthode de mesure de l'humidité du sol de référence

Les mesures réalisées à l'aide des sondes EC5 et 10HS sont comparées à des mesures d'humidité massique (ou gravimétrique), sur échantillons bruts d'une part, puis sur échantillons tamisés à 2 mm d'autre part. Cette méthode de référence est la seule à pouvoir être réalisée dans ces conditions expérimentales. Elle est très largement employée car elle peut être mise en œuvre sur tout type de sol. Cependant, c'est une méthode de mesure de l'humidité qui n'est pas continue et qui se révèle destructrice de l'échantillon prélevé (Giot et Cousin, 2012).

Pour réaliser l'étalonnage des sondes, nous prélevons quatre échantillons de sols sur/sous et autour de la zone de mesure du capteur. Après avoir enregistré les valeurs diélectriques du capteur (mV), nous dégageons le sol au-dessus de son implantation pour se positionner à 2 ou 3 cm des broches et nous prélevons au-dessus, en-dessous et sur la longueur de mesure des broches. La sonde est ensuite remise en place jusqu'au prochain point d'étalonnage. Si le sol est trop sec pour les enfoncer sans forcer, nous l'humidifions.

Au laboratoire, les échantillons de sols frais sont pesés, puis placés 24h en étuve ventilée à 105°C (Afnor, 1981). Ils sont de nouveau pesés « sec » ; puis tamisés à l'eau à 2 mm afin de recueillir les graviers (2-5 mm) et cailloux (> 5 mm), qui sont de nouveau séchés, puis pesés « sec ». Nous pouvons donc déterminer :

1/ l'humidité gravimétrique sur échantillon de sol brut en % de la terre sèche (T.S.) :

$$= [\ (PSBF - PSBS) / (PSBS)\ ] \times 100$$

avec : PSBF = poids de sol brut frais ; PSBS = poids de sol brut sec

Ce calcul comprend les graviers et cailloux de chaque échantillon ;

2/ l'humidité gravimétrique sur échantillon de « terre fine » en % de la terre sèche (T.S.) :

$$= [((PSBF – PSCG) – (PSBS – PSCG)) / (PSBS – PSCG)] \times 100$$

avec : PSBF = poids de sol brut frais ; PSBS = poids de sol brut sec ; PSCG = poids sec des cailloux et graviers

A Gyé sur Seine, les échantillons ont été collectés au cours de 11 dates de mesures réparties entre avril 2013 et mai 2015 ; tandis qu'à Saint Cyr en Val, le travail présenté correspond à neuf dates de mesures réparties entre les mois de mars à novembre 2012.

Effet de la température sur la qualité du signal observé

Contrairement à d'autres constructeurs d'appareils de mesure de l'humidité du sol en continu, celui-ci ne propose aucune correction par rapport aux variables environnementales, notamment la température, pour corriger la qualité du signal obtenu. Compte tenu des données recueillies au champ, nous ne pouvons pas conclure à l'effet de celle-ci sur la qualité du signal. Nous avons donc testé l'hypothèse d'un effet de la température en laboratoire.

Nous avons testé les deux type de sonde : 1 sonde 10HS, pour lequel nous avons déjà des mesures de répétabilité au champ, et 2 sondes EC5, en reconstituant 3 colonnes de sols à la densité apparente de 1,3 g/cm^3 ; tel que précisé par Giot et Cousin (2012). L'humidité massique du sol est portée à 25%, calculée sur échantillon de sol sec. Elle est maintenue à cet état par la pose d'un couvercle rendant étanche à l'air et à l'évaporation chaque colonne équipée d'un capteur d'humidité et d'un capteur de température : thermistance de type U de Grant Instruments Ltd, avec précision de ±0,2°C (Thiébeau, 2003). Les trois colonnes sont placées dans un même incubateur ventilé, permettant de faire varier la température de 0 à 40°C (**Figure 2**). Pour rester cohérent avec les températures observées au champ, nous réalisons les mesures de 2 à 28°C. Nous avons testé les sondes aux températures et paliers suivants : 2, 5, 8, 10, 13, 15, 18, 20, 23, 25 et 28°C. Nous avons attendu au moins 24h entre chaque palier avant d'en programmer un autre. Le signal des sondes s'est stabilisé dans le délai maximal de 8h.

***Figure 2**. Test de l'effet température sur la qualité du signal en conditions contrôlées ; (Photo : P. Thiébeau).*

Traitement statistique

Les quatre mesures d'humidité du sol réalisées *in situ* et à une même date, pour un capteur donné, sont moyennées afin de ne retenir qu'une seule donnée d'humidité gravimétrique par capteur étalonné. L'ensemble de ces points moyenné forme un nuage dont l'ajustement non linéaire est calculé à l'aide du module statistique du logiciel SigmaPlot v.12 (SystatSoftware®, Inc.). La qualité de ces ajustements est appréciée au regard de deux critères : le coefficient de détermination (R^2) et l'erreur quadratique moyenne au modèle (RMSE). Pour être retenus, ces critères doivent être les plus proches de la valeur de 1 pour R^2, et de 0 pour RMSE. Le seuil de significativité minimal accepté est $P<0,05$.

Résultats

Comparaison des données de sortie de la centrale d'acquisition aux données recalculées à partir du fichier de données brutes

Le traitement des données des deux types de capteurs testés à Gyé sur Seine montre que la confrontation des valeurs demandées à l'affichage de la centrale (mV) à celles obtenues en appliquant l'équation de conversion **(3)** à partir du fichier de données brutes généré, dénommé « unprocessed data », sont très proches de la première bissectrice (**Figure 3**). Le test de confrontation réalisé à partir de données de mesures d'humidité massique acquises au laboratoire, en maîtrisant les conditions environnementales, produit strictement les mêmes résultats.

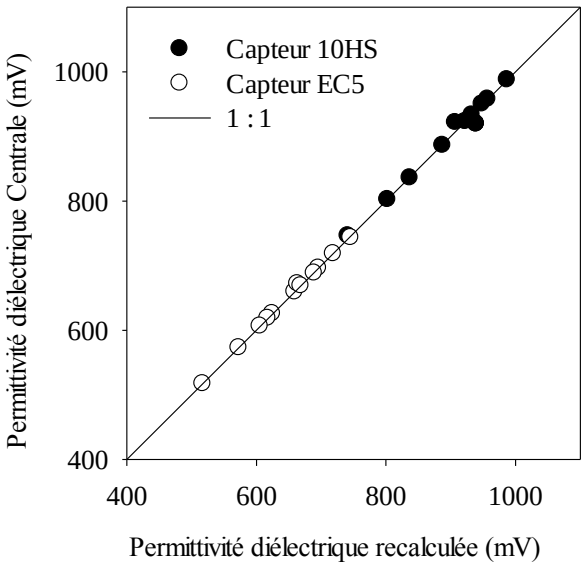


***Figure 3**. Relation entre les données de permittivité diélectrique recalculées à partir du fichier de données brutes et les données de permittivité diélectrique de sorties produites par la centrale pour les capteurs 10HS et EC5 testés.*

Il en résulte donc d'une part, que la relation proposée par le constructeur est quantitativement valide, et d'autre part, que l'acquisition de ces données brutes suffit à obtenir les données de sortie souhaitées, moyennant l'utilisation de l'équation correspondante du constructeur.

Utilisation des capteurs au champ

Compte tenu de la difficulté que nous avons rencontrée à mesurer correctement et finement la densité apparente des sols très caillouteux dans lesquels nous avons testé ces matériels, nous faisons le choix de présenter nos résultats en humidité massique.

Effet du type de capteur sur les mesures réalisées

Les sondes EC5 et 10HS ont été utilisées dans les mêmes conditions pédo-climatiques sur le site de Gyé sur Seine. La **Figure 4** montre que les dynamiques de mesures de chacun des capteurs sont similaires. Néanmoins, les sondes EC5 présentent, en moyenne, un signal de mesure 25% plus bas que les sondes 10HS d'une part, et d'autre part, les mesures des sondes EC5 sont beaucoup plus sensibles aux variations d'humidité que ne le sont celles des sondes 10HS. Ce dernier point n'est pas forcément un défaut : il est lié au fait que la surface de mesure est significativement différente (plus petite pour la sonde EC5) que celle de la sonde 10HS, qui intègre par conséquent, une surface de mesure avec le sol atténuant les pics observés avec la sonde EC5. Les données de températures du sol, mesurées à côté de chaque sonde, et des pluies horaires observées sur le site, nous permettent de distinguer trois séquences : A, B et C, correspondant aux périodes d'arrêt végétatif (séquences A et C) et de végétation (séquence B). Hors période végétative, le signal des sondes semble plus impacté par la succession des épisodes pluvieux que les variations de températures, qui oscillent entre 2 et 15°C. Cependant, cette plage de variation n'est pas suffisante pour conclure sur l'effet de cette variable ; c'est pourquoi nous l'avons testé en conditions de laboratoire.

La construction d'une courbe d'étalonnage pour relier ces mesures brutes à l'humidité massique du sol présent au contact de chaque sonde montre, en présence de graviers et cailloux (> 2 mm), un nuage de points dispersés (**Figure 5A**) ; néanmoins, le calcul de cette humidité sur la fraction de terre fine (< 2 mm) de chaque échantillon permet d'obtenir un nuage de points qui se situe plus haut sur l'échelle de graduation de l'humidité massique, mais qui présente surtout moins de variabilité de mesure qu'en présence des cailloux et graviers : l'erreur standard associée à chaque point de mesure est plus resserrée (**Figure 5B**). Les proportions de graviers et cailloux des échantillons supports à ce travail sont compris entre 6 et 77%, avec une moyenne qui s'établie à 26,3% et une médiane à 23,9% (n = 128). Ceci constitue une charge élevée en ces éléments et ajoute une variabilité d'estimation de l'humidité du sol du fait qu'ils ne contiennent pas ou très peu d'eau. En effet, des mesures d'estimation de leur teneur en eau, au cœur de l'hiver, ont montré que ces cailloux de calcaire très dur contenaient en moyenne 2,15 ±0,14 % d'eau. Leur présence interfère donc plus ou moins sur l'estimation de la teneur en eau du sol sec, selon leur proportion dans l'échantillon prélevé. En les retirant de chaque échantillon, le nuage de point qui s'en dégage est plus précis, et permet le calcul d'un ajustement pour chaque modèle de capteur : EC5 et 10HS.

Nota : les humidités massiques élevées observées pour le sol très argileux et très riche en matières organiques de Gyé sur Seine sont cohérentes avec les valeurs observées par Al Majou et al. (2007).

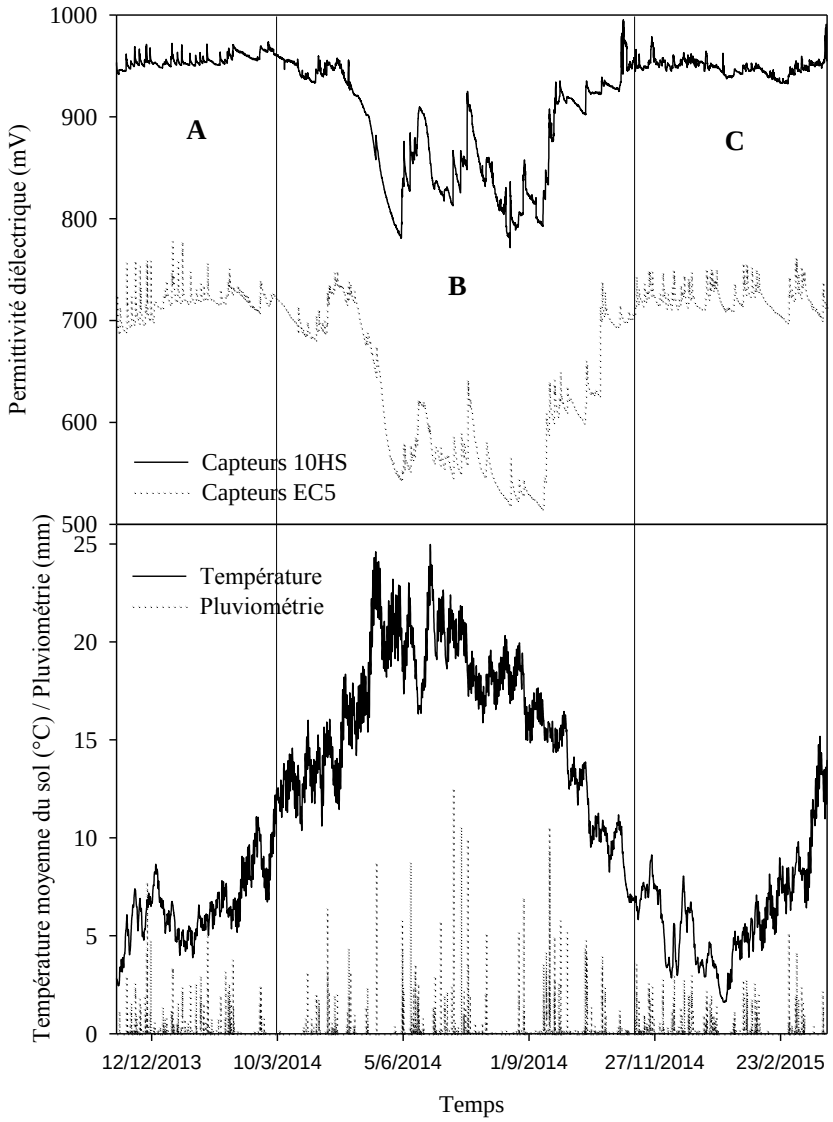
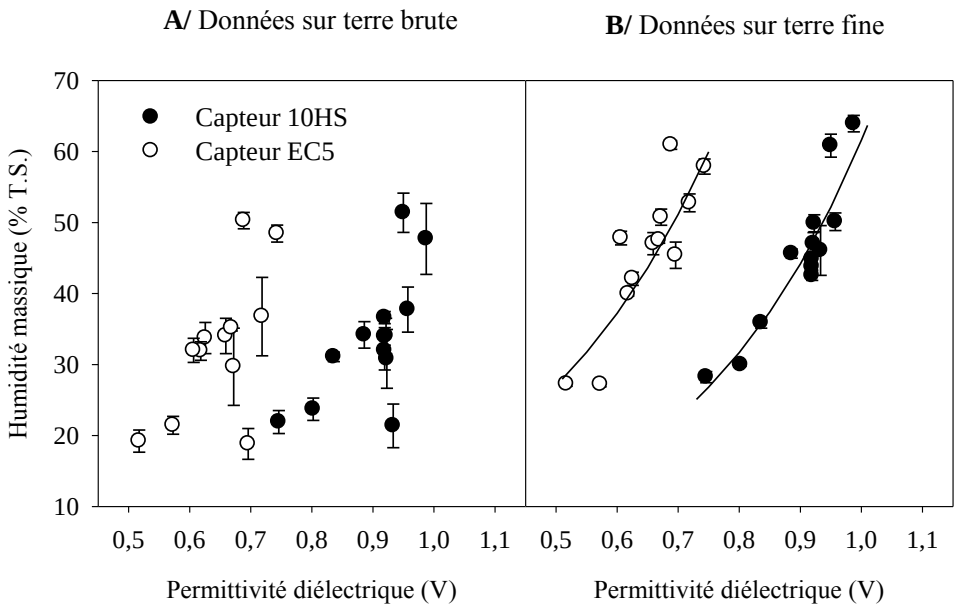


Figure 4. *Exemples de dynamiques de mesures de permittivité diélectrique présentées par les sondes 10HS et EC5 dans les mêmes conditions d'utilisation sur le site de Gyé sur Seine (Aube, 10) ; et correspondances avec les enregistrements de la pluviométrie et de la température du sol (mesurée autour des sondes d'humidité).*



***Figures 5**. Relation entre la permittivité diélectrique (V) et l'humidité massique (% terre sèche) établie à l'aide des capteurs 10HS et EC5 sur le site de Gyé sur Seine (Aube, 10), sur terre brute (A) et sur terre fine (B). Chaque point de mesure est accompagné de son erreur standard (n=4).*

Les ajustements réalisés sur terre fine obtenant les meilleures précisions statistiques sont, comme pour Gabriel et al. (2010), des ajustements non-linéaires. Pour cela, nous avons utilisé le logarithme népérien de l'humidité massique.

L'ajustement est de type : $Y = \text{Exp}[(a \times V) + b]$ **(4)**

avec : Y = humidité massique (%) ; V = signal du capteur en Volt ; a et b = coefficients d'ajustements

Pour le capteur EC5, nous avons a = 3,182 et b = 1,707, avec R^2= 0,71 (P<0,01), RMSE = 0,131

Pour le capteur 10HS, nous avons a = 3,325 et b = 0,796, avec R^2= 0,89 (P<0,001), RMSE = 0,075

Ces ajustements sont de très bonne qualité. Le capteur 10HS présente les meilleurs résultats d'ajustement. Il paraît donc plus adapté aux mesures d'humidité *in situ* que le capteur EC5.

Répétabilité des mesures pour un même type de capteur

Pour cette analyse, nous nous appuyons sur les données acquises uniquement à l'aide de capteurs 10HS.

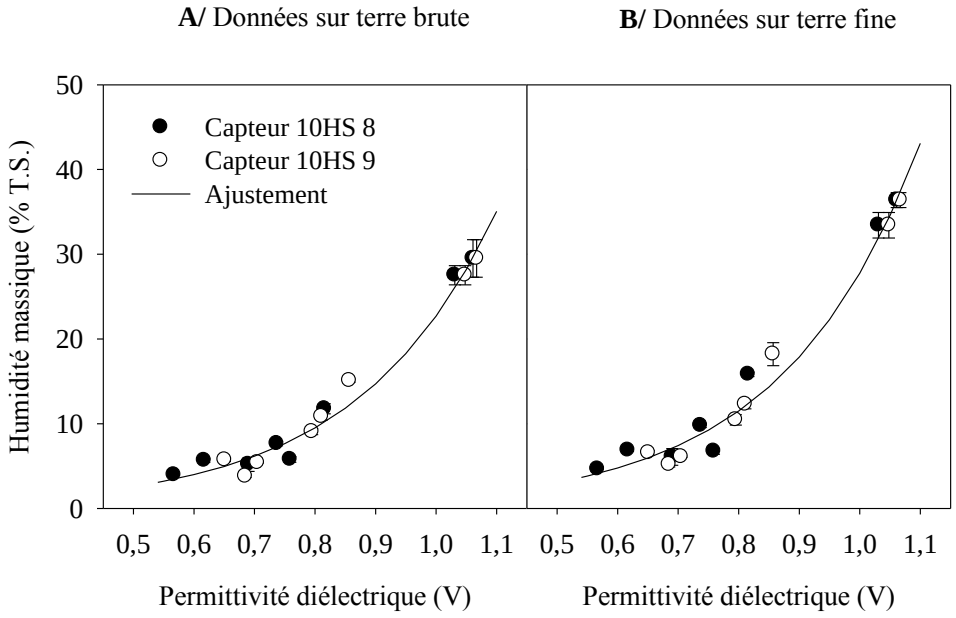
Nous avons réalisé des mesures et construit la courbe d'étalonnage correspondante sur le site de Saint Cyr en Val. Nous nous sommes appuyés sur deux capteurs, afin de tester l'hypothèse selon laquelle les mesures sont répétables pour ces capteurs pour un site identique. Les données présentées par la **Figure 6** nous montrent des nuages de points similaires, permettant d'utiliser les données des deux capteurs de type 10HS pour ne construire qu'une seule

et même courbe d'étalonnage pour ce site d'étude. Par ailleurs, les données recueillies à partir du sol brut (**Figure 6A**) montrent qu'il est possible de construire une droite d'ajustement à partir de ce sol non tamisé, ce qui est surprenant puisque les taux de cailloux et graviers sont élevés. En effet, les échantillons support de ce travail avaient des quantités de cailloux et graviers variant entre 8 et 52%, avec une moyenne établie à 21,5% et une médiane à 19,8% (n = 164) ; cette charge, bien que moins élevée que sur le site de Gyé sur Seine, reste importante et aurait dû interférer sur la qualité du signal des capteurs pour produire un jeu de données similaire à celui présenté par la **Figure 4A**.

La courbe d'étalonnage, construite à partir du sol tamisé à 2 mm (**Figure 6B**), s'établie sur un nuage de points qui se trouve légèrement plus élevé que celle issue du sol brut, comme observé également pour le site de Saint Cyr en Val. L'utilisation de l'équation (**4**) est une nouvelle fois celle qui permet de minimiser l'écart au modèle. Les valeurs des paramètres d'ajustement sont les suivants :

Ajustement sur sol brut : a = 4,348 et b = -1,225, avec R^2= 0,937 (P<0,001), RMSE = 0,179

Ajustement sur terre fine : a = 4,401 et b = -1,078, avec R^2= 0,938 (P<0,001), RMSE = 0,179



***Figures 6**. Relation entre la permittivité diélectrique (V) et l'humidité massique (% terre sèche) établie à l'aide de deux capteurs 10HS sur le site de Saint Cyr-en-Val (Loiret, 45), sur terre brute (A) et sur terre fine (B). Chaque point de mesure est accompagné de son erreur standard (n=4).*

Ces résultats obtenus à l'aide de deux capteurs qui produisent chacun les mêmes résultats démontrent, dans cette situation, qu'un opérateur pourrait se contenter de réaliser des étalonnages sur échantillons de sol brut (non tamisé) ; ce qui réduirait considérablement la charge de travail au laboratoire. Mais cela doit être vérifié dans d'autres conditions d'emploi que les nôtres, les résultats de la **Figure 5** correspondant davantage à une logique des choses : graviers et cailloux sont des éléments perturbateurs du signal de mesure.

Effet du type de sol

Pour cette analyse, nous nous appuyons sur les résultats d'ajustement obtenus à partir des sols tamisés à 2 mm, dont les relations entre la réponse du signal des capteurs et les mesures d'humidité sur terre sèche offrent des mesures fiables. En comparant les résultats des ajustements produits à Saint Cyr et Gyé sur Seine (**Figure 7**), nous constatons d'une part, que ces capteurs permettent de réaliser des mesures d'humidité du sol dans une large plage d'humidité massique, et d'autre part, qu'il est nécessaire de réaliser ces courbes pour chaque site étudié. Cela est également le cas pour chaque matériel présent sur le marché. Dans nos situations, nous avons obtenu les meilleurs ajustements en utilisant l'équation **(4)** ; ce qui peut limiter les investigations pour les travaux d'étalonnages à venir.

Nous avons porté sur chaque donnée, la température du sol (n=4) mesurée à côté de la sonde au moment de la mesure d'humidité par le capteur. Le constructeur ne prévoit pas de correction par rapport à cette variable climatique. Les résultats de ce travail ne permettent pas de constater une dérive particulière vis-à-vis de ce facteur. Les humidités les plus fortes sont observées pendant l'hiver où les températures sont les plus fraîches ; et les humidités les plus faibles, au cours de la période estivale.

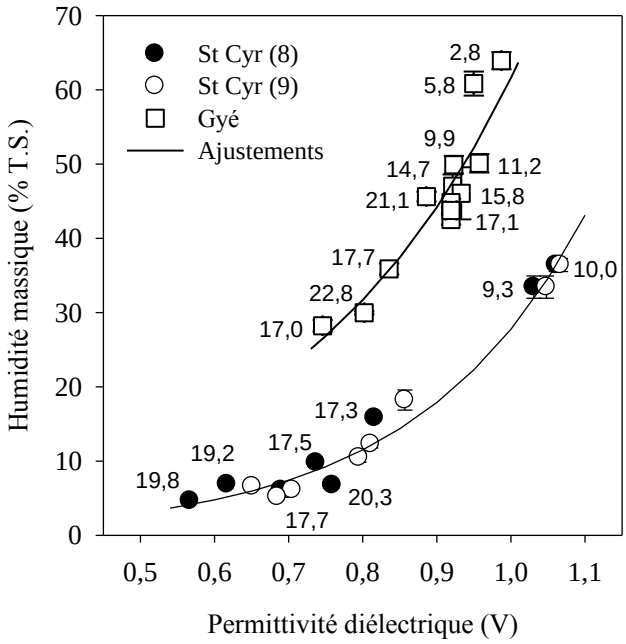


***Figure 7**. Comparaison des deux courbes d'étalonnages établies à partir des capteurs 10 HS sur les sites de Gyé sur Seine (Aube, 10) et de Saint Cyr-en-Val (Loiret, 45). Chaque point de mesure est accompagné de son erreur standard (n=4). Les chiffres mentionnés correspondent à la température du sol (°C) à côté du capteur au moment de la mesure.*

Effet de la température sur la qualité du signal

Les résultats de l'étude conduite en conditions contrôlées montrent que l'on a un léger effet de la température sur la qualité du signal mesuré. On constate également, comme nous l'avions observé au champ, que des sondes de même type ont un signal qui évolue de façon similaire avec un léger décalage entre-elles (**Figure 8A**). En faisant abstraction de ce décalage constant avec la température, on obtient une superposition des points de mesures entre sondes de même type. Cependant, il persiste un décalage par rapport au type de sonde : EC5 vs 10HS (**Figure 8B**). Il faut donc établir un ajustement pour chaque type de sonde. Les critères statistiques les meilleurs sont obtenus en utilisant une fonction de type quadratique :

$$Y = a + (b \times T°) + (c \times T°^2) \qquad \textbf{(5)}$$

avec : Y = signal mesuré exprimé en volt ; a = constante propre à chaque capteur, elle correspond à la valeur du signal obtenue à faible température (1,7°C dans nos situations) ; b et c = variables d'ajustements de chaque type de capteur (EC5 vs 10HS) ;

pour les sondes EC5, nous avons, de manière générique, a = 0 (valeur propre à chaque capteur), b = $8{,}02.10^{-4}$ et c = $0{,}15.10^{-4}$, avec R^2 = 0,9916 (P<0,001), RMSE = 0,001 ;

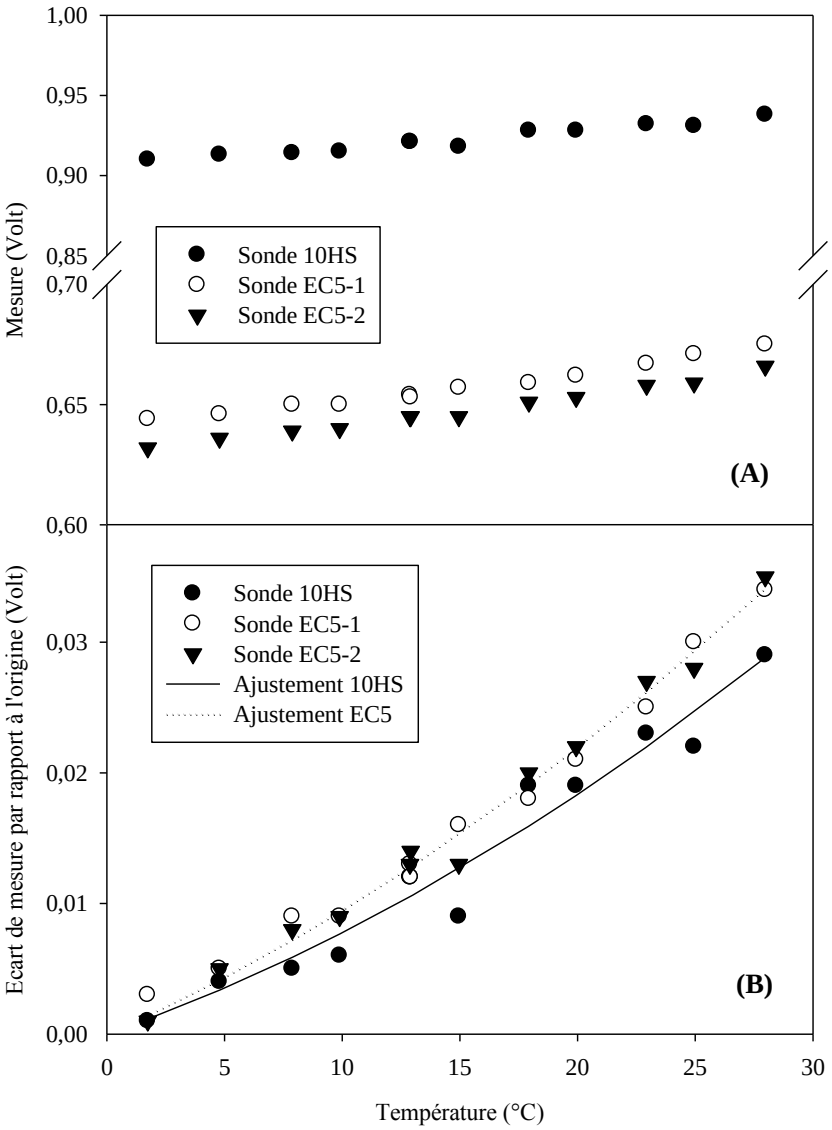
pour les sondes 10 HS, nous avons a = 0 (cf note de la sonde EC5 ci-dessus), b = $6{,}35.10^{-4}$ et c = $0{,}14.10^{-4}$, avec R^2 = 0,9521 (P<0,001), RMSE = 0,001.

Ces ajustements sont de bonne qualité (R^2 élevé, et faible RMSE). Les sondes EC5 semblent indiquer des ajustements de meilleurs qualité que les sondes 10HS, mais ce travail de vérification s'est appuyé sur deux sondes au lieu d'une seule pour le type 10HS, ce qui double le nombre de points de mesures pris en compte et peut justifier cette différence.

Lorsque l'on transforme ces écarts de mesures en valeurs d'humidités massiques, les valeurs maximales d'erreurs sont de 1,4 point d'humidité pour un sol initial comprenant 25,4% de teneur en eau calculé sur échantillon de sol sec pour les sondes EC5, et de 0,8 point pour la sonde 10HS. Il faut noter que ces valeurs maximales sont enregistrées à la température maximale testée de 28°C. Cela représente donc une erreur maximale de mesure de 5,1% pour les sondes EC5 et de 3,1% pour la sonde 10HS ; ce qui reste acceptable. Comme le montre la **Figure 4**, la température d'utilisation au champ est plus régulièrement sous les 20°C qu'au-dessus ; ce qui réduit l'effet de cette variable.

Lorsqu'on observe la distribution de ces écarts de mesures liés à la température autour de l'ajustement proposé par l'équation (**5**), exprimé en humidité massique (**Figure 9**), nous constatons que leur distribution est aléatoire, mais aussi qu'elle oscille entre ±0,2% pour les sondes EC5 et ±0,4% pour la sonde 10HS.

L'application de ces ajustements correctifs aux valeurs de permittivité diélectriques utilisées pour le calcul des courbes d'étalonnages présentées aux **Figures 5B** et **6B**, montre que l'on dégrade légèrement la qualité de prédiction des ajustements proposés initialement, qui faisaient abstraction de l'effet « température » (**Tableau 4**).



***Figures 8**. Effet de la température sur la qualité du signal mesuré pour chaque type de sonde (A), et déduction faite de la valeur « origine » de chacune d'elles (B).*

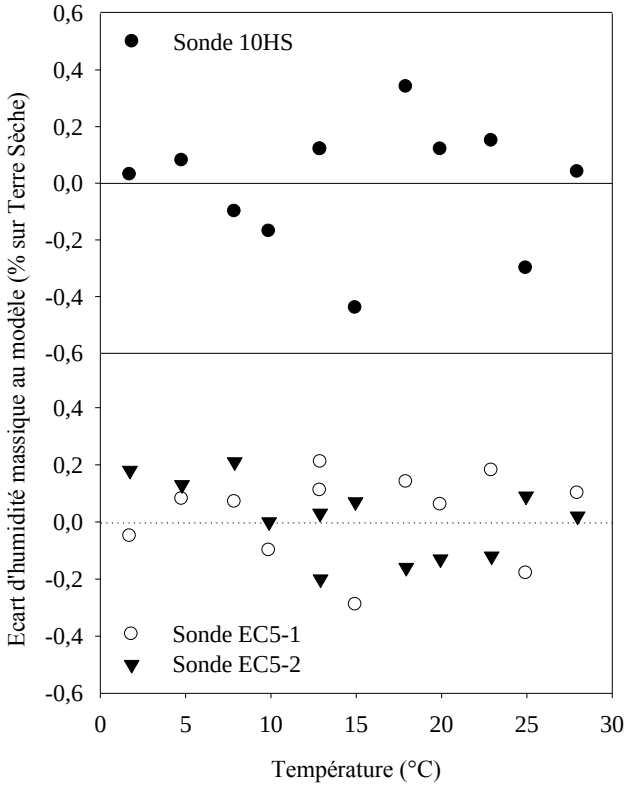


***Figure 9**.Transformation de l'écart de signal lié à l'effet « température » exprimé en humidité massique ; comparaison des valeurs obtenues à l'ajustement proposé (équation **5**).*

***Tableau 4**. Impact de la correction, ou non, de l'effet « température » sur la qualité d'ajustement de la courbe d'étalonnage*

	Correction	R^2	**RMSE**
Sonde 10HS (Saint Cyr en Val)	Non	0,9388	0,179
	Oui	0,9368	0,182
Sonde 10HS (Gyé sur Seine)	Non	0,8905	0,075
	Oui	0,8594	0,085
Sonde EC5 (Gyé sur Seine)	Non	0,7156	0,131
	Oui	0,7133	0,132

En repositionnant les ajustements ainsi corrigés de l'effet de la température sur les données de la **Figure 7**, nous visualisons ce léger décalage de courbes (**Figure 10**).

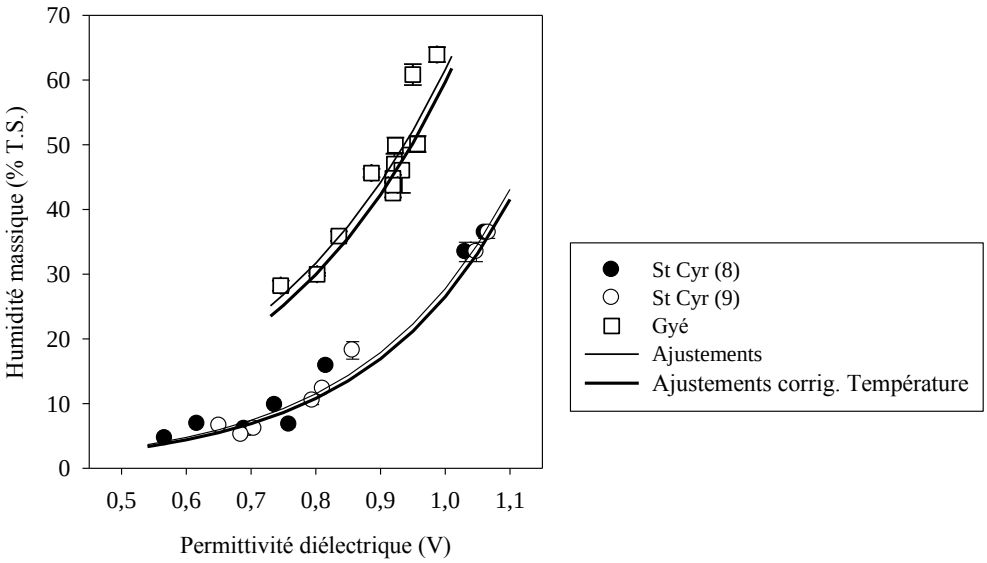


***Figure 10**. Impact de la correction de l'effet de la température sur le signal de permittivité diélectrique par rapport aux ajustements réalisés sans la prise en compte de cette variable.*

Dans nos conditions d'emploi au champ, la légère dérive du signal lié à la température du sol est intégrée à l'ajustement proposé permettant de déterminer l'humidité massique du sol selon le signal mesuré. Au vu des conditions d'emploi admises face à la légère dérive du signal perçue lors de variations de températures, il s'avère plus important de veiller à construire une courbe d'étalonnage propre à chaque site d'étude que de vouloir absolument corriger le biais lié à la température. C'est sans doute pour cela que le constructeur n'a pas proposé de modèle correctif par rapport à cette variable climatique, ce que confirment nos résultats. Nous pouvons donc considérer que ces préconisations sont correctes.

Conclusion

Pour des mesures d'humidité au champ, les deux modèles de sonde testés (10HS et EC5), donnent de bons résultats de mesures ; le modèle 10HS intégrant une surface de mesure plus importante que le modèle EC5. Les résultats obtenus en sols caillouteux sont bons si on les exprime sur sols tamisés à 2mm plutôt que sur sol brut. D'une manière générale, ces capteurs gagneraient à être connus plus largement dans les milieux de la mesure physique, en agronomie, parce que la qualité de leurs mesures permet une utilisation en sols plus variés que les matériels utilisant le principe TDR pour des mesures d'humidité des sols en continu. En novembre 2014, leur coût unitaire d'achat était 35% inférieur à celui d'une sonde CS616 (Campbell Scientific®). Ils sont également plus simples d'utilisation parce que les données produites n'ont pas à être corrigée de la densité apparente du sol, ni de sa température. Il serait cependant intéressant de les tester en comparaison d'autres matériels disponibles sur le marché dans ces mêmes conditions de sols difficiles, telles que des sondes de type Delta-T Devices® ; mais ce n'était pas l'objet des expérimentations présentées.

Remerciements

Ce travail a été réalisé dans le cadre des projets Futurol et EPRC (Etude pluridisciplinaire du robinier et de ses coproduits) porté par l'entreprise CARBONEX®, financé par la région Champagne-Ardenne (2007-2013). Les auteurs remercient Francis Millon pour son aide technique lors de la collecte des échantillons de sols aux champs, ainsi que Monsieur Gonzague Alavoine et Madame Sylvie Million pour leur aide technique au laboratoire lors du test de l'effet de la température sur la qualité du signal obtenu.

Références bibliographiques

Afnor (1981) Norme expérimentale X 31-102 *: Qualité des sols : détermination de l'humidité résiduelle d'échantillons de sols préparés pour analyse*. Edition Afnor, Paris.

Al Majou H, Bruand A, Duval O, Josière O (2007) Etudes des propriétés de rétention en eau des sols argileux. *5è colloque du Groupe Français des Argiles* ; 18-19 avril 2007, Mulhouse (https://hal-insu.archives-ouvertes.fr/insu-00145739/file/Al_Mjou_5eme_GFA.pdf): dernière consultation le 06/05/2016

Camilli A, Cugnasca CE, Saraiva AM, Hirakawa AR, Corrêa PLP (2007) From wireless sensors to field mapping : Anatomy of an application for precision agriculture. *Comput Electron Agric* **58** : 25-36.

Decagon Devices®, Inc. (2010) *EM50/EM50R Data collection System*, User's manual. 75 p.

Gabriel JL, Lizaso JI, Quemada M (2010) Laboratory versus Field calibration of capacitance probes *Soil Sci Soc Am J* **74** (2) : 593-601.

Garcia-sanchez AJ, Garcia-Sanchez F, Garcia-Haro J (2011) Wireless sensor network deployment for integrating video-surveillance and data-monitoring in precision agriculture over distributed crops. *Comput Electron Agric* **75** : 288-303.

Giot G, Cousin I (2012) Méthode d'étalonnage des réflectomètres de teneur en eau CS616 pour la mesure et le suivi de l'humidité du sol sur le site atelier OS^2. *Cahier Tech INRA* **77**: 1-17.

SigmaPlot 12 (2010) Systat Software, Inc*, SigmaPlot Statistics*, User's guide. 259 p.

Thiébeau P (2003) Définition d'une procédure d'étalonnage de capteurs de température de type thermistance, à l'aide d'un calibrateur de température à bain sec. *Cahier Tech INRA* **48** : 7-16.

Thiébeau P, Millon F, Guénon R, Bertrand I (2013) Dispositif de collecte de feuilles sénescentes de jeunes arbres cultivés en taillis à courte rotation. *Cahier Tech INRA* **80** : 1-9.