

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 OS²

Guillaume Giot¹, Isabelle Cousin¹

Résumé. Des sondes de mesures de la teneur en eau ont été installées sur le site atelier OS² (Observatoire Spatialisé Orléanais des Sols) de l'UR SOLS d'Orléans pour caractériser le fonctionnement hydrique des sols puis modéliser les flux de protoxyde d'azote à l'échelle de la parcelle. La mesure de teneur en eau est délicate lorsque l'on veut atteindre un niveau de précision de $\pm 2\%$ car elle dépend de caractéristiques du milieu stables dans le temps telle que la texture du sol et de variables conjoncturelles telles que la température, la teneur en eau, la salinité et la structure. Cette étude a été conduite afin d'étudier d'une part l'influence de la température et de la masse volumique apparente du sol sur la mesure de teneur en eau effectuée par des sondes CS616 (Campbell Scientific) et d'autre part de proposer un mode opératoire d'étalonnage des sondes à partir des informations recueillies manuellement *in situ*. Les essais effectués avec des sondes insérées dans des colonnes de sol reconstituées au laboratoire, à teneur en eau et masse volumique prédéterminées, montrent un effet important de la température sur les réflectomètres. Un coefficient de correction en température (α) doit être appliqué aux mesures brutes des sondes CS616. On constate également une influence importante de la masse volumique apparente pour des valeurs supérieures à $1,50 \text{ g.cm}^{-3}$. Après correction de l'effet de la température et étalonnage des sondes CS616 à partir des prélèvements gravimétriques, les valeurs de teneur en eau sont conformes à l'erreur maximale tolérée (EMT) de $\pm 2\%$ préalablement définie pour nos besoins. L'étalonnage des sondes CS616 est donc une étape indispensable avant l'exploitation des données de teneur en eau volumique obtenues sur le terrain.

Mots clés : teneur en eau volumique, réflectomètre, température, thermistance, masse volumique apparente, sol, étalonnage

Introduction

L'estimation de la teneur en eau est essentielle pour l'étude du fonctionnement des sols. Il existe de nombreuses méthodes permettant de mesurer la teneur en eau : la méthode gravimétrique (par pesées), les méthodes diélectriques par sondes TDR - Time Domain Reflectometry - (Topp et al., 1980) ou sondes capacitives (domaine fréquentiel) et les méthodes par sondes à neutrons (Gardner et Kirkham, 1952). Des méthodes géophysiques telles que la mesure de la résistivité électrique, la résonance magnétique de protons (Legchenko et al., 2002) ou l'utilisation du radar GPR - Ground Penetrating Radar (Huisman et al., 2003) permettent également d'avoir accès à la teneur en eau.

La méthode gravimétrique est l'unique méthode directe mais elle est destructive et ne permet pas des mesures en continu. La méthode par sonde à neutrons, bien que non destructive, est également discontinue et présente des risques liés à la présence d'une source radioactive. Les méthodes diélectriques sont non destructives et permettent d'effectuer un suivi *in situ* de la teneur en eau du sol.

Dans le cadre de ses travaux sur le fonctionnement hydrique spatialisé des sols, l'UR Science du Sol d'Orléans réalise des suivis temporels de la teneur en eau volumique des sols sur son site atelier OS² (Observatoire Spatialisé Orléanais des Sols, Eure et Loir, Gu et al., 2011). Les

¹INRA, UR272 SOLS (Science du Sol), F-45075 Orléans Cedex 2, France

mesures sont ensuite utilisées dans des modèles de transfert d'eau dans les sols afin d'étudier le fonctionnement hydrique des sols selon différentes échelles spatiales et temporelles. Plus récemment, ces mesures de teneurs en eau sont également utilisées dans des modèles d'émission du gaz à effet de serre protoxyde d'azote (N_2O). Les simulations de transfert d'eau dans les sols et d'émissions de N_2O par les sols étant très sensibles à la caractérisation de l'humidité du sol, nous avons besoin de mesures de teneur en eau précises à $\pm 0,02 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$.

Pour mener à bien ce suivi temporel de la teneur en eau des sols, nous mettons en œuvre des réflectomètres de teneur en eau CS616 Campbell Scientific. Ces sondes utilisent la permittivité diélectrique du sol pour estimer la teneur en eau : la méthode consiste à mesurer le temps de propagation d'une impulsion électromagnétique envoyée le long d'un guide d'onde enfoncé dans le sol. Une équation empirique fournie par le constructeur permet ensuite de convertir la période du signal de sortie en une teneur en eau.

Etant donné la précision que nous recherchons sur la mesure, l'objectif de ce travail est de définir des équations d'étalonnage et/ou des corrections à appliquer aux mesures enregistrées par les différentes sondes TDR en vue d'obtenir des données de teneur en eau, *in situ*, fiables et précises dans le temps. Pour cela, des colonnes de sols ont été reconstituées à partir d'échantillons prélevés sur le site atelier OS². Les colonnes de sols fabriquées à masse volumique et teneur en eau prédéterminées sont ensuite instrumentées de sondes CS616 et de thermistances.

L'étude des réponses des réflectomètres en fonction de la température, de la teneur en eau et de la masse volumique apparente du sol permet de déterminer les corrections à appliquer pour atteindre une précision de $\pm 0,02 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ sur la mesure de teneur en eau volumique. Les réponses obtenues sont également comparées aux courbes d'étalonnage fournies par le constructeur.

On analyse enfin l'effet de ces corrections sur des suivis temporels de teneurs en eau *in situ* par sonde CS616.

1. Matériel et méthode

1.1. Sondes utilisées

Les réflectomètres de teneur en eau CS616 Campbell Scientific (**Figure 1**) sont composés de deux tiges parallèles en acier de trente centimètres de longueur connectées à un circuit imprimé, moulé dans un bloc d'époxy. Les sondes, alimentées en 12 V, sont connectées directement à une entrée unipolaire d'une centrale d'acquisition Campbell Scientific CR1000. Un port de contrôle est utilisé afin de mettre la sonde CS616 en état de fonctionnement durant la mesure. L'oscillateur présent dans le circuit imprimé génère une impulsion électromagnétique qui se propage le long des guides d'ondes insérés dans le sol. Une fois l'impulsion réfléchi, l'oscillateur émet une nouvelle impulsion, et ainsi de suite pendant toute la durée de la mesure, dont la fréquence est de 175 MHz. Le signal de sortie obtenu est un signal périodique carré dont la fréquence est convertie en période P (en microsecondes) mesurable par la centrale d'acquisition. Un calibrage permet ensuite de convertir la période P en teneur en eau volumique. Campbell Scientific propose une courbe de calibrage sous forme de polynôme de second degré pour accéder à la teneur en eau :

$$\theta = -0,0663 - 0,0063 \times P + 0,0007 \times P^2. \quad (1)$$

La période P du signal est de 14 microsecondes dans l'air et de 42 microsecondes lorsque la sonde est plongée dans l'eau.

La précision annoncée du réflectomètre de teneur en eau est de $\pm 0,025 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$ dans la plage de mesure $[0 - 0,50 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}]$ en utilisant la courbe d'étalonnage standard du constructeur sur des sols avec une conductivité électrique $\leq 0,5 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ et une densité apparente $\leq 1,55 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$. L'erreur de répétabilité est inférieure à $0,001 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$.

Différentes études (Western and Siegfried, 2005 ; Benson and Wang, 2006 ; Rüdiger et al., 2010) ont montré un effet non négligeable de la température sur la période P mesurée par les réflectomètres de teneur en eau CS616.



Model CS616 (c) 2002 Campbell Scientific (Canada) Corp.

Figure 1. Réflectomètre de teneur en eau CS616 Campbell Scientific.

1.2. Mise en œuvre des sondes au laboratoire en conditions contrôlées, sur des échantillons de masse volumique et teneur en eau connues

1.2.a Préparation du sol

Les sols ont été prélevés sur le site atelier de l'Unité, OS², localisé en Eure et Loir à la limite des petites régions naturelles de la Beauce Chartraine et du Faux-Perche. Les parcelles sur lesquelles le sol a été prélevé (parcelle de « La Gouethière » et parcelle de « La Morie ») se caractérisent par des Luvisols dégradés battants et très hydromorphes occupés principalement par des grandes cultures (blé, colza, pois). Trois horizons de sol à trois profondeurs ont été échantillonnés : 0-20 cm, 20-30 cm et 30-40 cm. Les caractéristiques granulométriques et chimiques de ces sols sont présentées dans le **Tableau 1**.

Tableau 1. Caractéristiques chimiques et granulométriques des sols étudiés

Site	Argile	Limons fins	Limons grossiers	Sables fins	Sables grossiers	C	pH	CEC
	%	%	%	%	%	g/kg		cmol/kg
La Morie 2	12,5	37,5	45,6	3	1,4	10,5	6,2	6,81
La Gouethière	13,6	35,1	46,8	2,8	1,7	8,97	6,2	6,6

Dès leur arrivée au laboratoire, les échantillons de sol ont été répartis dans des barquettes sur une épaisseur d'environ 2 cm puis séchés dans une étuve à 30°C pendant 8 jours.

Après séchage, le sol est broyé puis tamisé à 2 et 5 mm. On fabrique ainsi deux fractions, des fragments terreux de diamètre < 2 mm (terre fine) ou compris entre 2 et 5 mm (mottes), dont le mélange permettra de fabriquer des échantillons dont la structure se rapproche de celle d'un lit de semence.

1.2.b Fabrication des colonnes

Afin d'obtenir un volume de sol à caractériser, adapté à la géométrie des réflectomètres de teneur en eau, les sondes sont installées dans des colonnes de sol de 140 mm de diamètre et 350 mm de hauteur. Le choix de la dimension des colonnes s'inspire des expérimentations conduites par Rüdiger et al. (2010).

Ces colonnes sont fabriquées à partir d'un tube en PVC, fermé à une extrémité par collage d'une plaque PVC, et utilisé ainsi comme conteneur. Le but est d'éviter ainsi les transferts d'eau hors de la colonne de sol.

La masse d'eau et la masse de sol sec à introduire dans la colonne sont déterminées à partir de la masse volumique apparente (D_a) recherchée et de la teneur en eau pondérale (W) souhaitée. D_a étant fixée à une valeur recherchée et le volume du conteneur étant connu, on en déduit la masse de sol sec à apporter dans le conteneur par la relation suivante :

$$D_a = m_{\text{sec}} / \text{volume}_{\text{colonne}} \quad (2)$$

avec D_a : la masse volumique apparente recherchée (en g.cm^{-3})
 m_{sec} : la masse de sol sec à insérer dans la colonne (en g)
 $\text{volume}_{\text{colonne}}$: le volume de la colonne (en cm^3)

La teneur en eau volumique (θ) est le produit de la teneur en eau pondérale (W) par la masse volumique :

$$\theta = W \times D_a. \quad (3)$$

W est également le rapport entre la masse d'eau et la masse de sol sec

$$W = m_{\text{eau}} / m_{\text{sec}}. \quad (4)$$

On détermine la masse d'eau à insérer dans la colonne à partir de la relation (4) et de la teneur en eau pondérale souhaitée.

Une fois que l'on a déterminé la masse de sol sec et la masse d'eau à introduire dans la colonne, on réhumecte lentement le sol sec dans un grand bac. La quantité d'eau prévue est ajoutée avec un vaporisateur. Pendant cette phase de réhumectation, on homogénéise constamment le sol et l'eau avec une fourchette.

Une fois la réhumectation terminée, on vérifie la masse totale à l'aide d'une balance. Si cette masse est différente de la masse totale théorique ($m_{\text{eau}} + m_{\text{sec}}$) (perte d'eau par évaporation au cours de la vaporisation), on complète alors avec le volume d'eau nécessaire jusqu'à obtention de la masse totale théorique. On laisse ensuite le sol humide s'équilibrer pendant environ 24 h en bloquant l'évaporation avec un film plastique.

Pour fabriquer les colonnes de sol de masse volumique apparente homogène, on introduit dans le conteneur 500g du sol précédemment préparé puis on le tasse à l'aide d'une presse manuelle (**Figure 2**) sur une hauteur de 2 ou 3 cm (en fonction de la masse volumique souhaitée). On renouvelle l'opération jusqu'à ce que le conteneur soit rempli de la totalité du sol préparé. On obtient ainsi une colonne de sol avec une teneur en eau volumique et une masse volumique apparente homogènes sur toute sa hauteur.

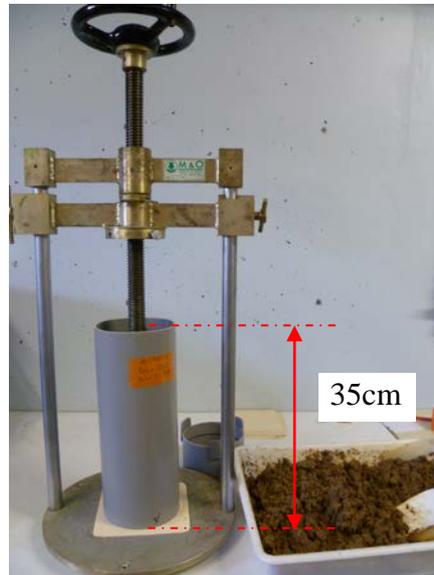


Figure 2. Presse manuelle pour fabrication des colonnes de sol.

Au cours de cette étude, trente colonnes de sol avec des combinaisons différentes de teneur en eau, de masse volumique apparente et de texture ont ainsi été fabriquées (**Tableau 2**). Certaines colonnes sont utilisées pour caler des modèles de calibrage et les autres sont utilisées pour valider les lois obtenues.

1.2.c Instrumentation et mesure des colonnes de sol

Un film plastique est déposé sur la face supérieure de la colonne afin de bloquer l'évaporation : aucun transfert d'eau hors de la colonne de sol n'est possible, ce qui garantit une teneur en eau constante tout au long de l'expérimentation.

Chaque colonne étudiée est équipée d'une sonde CS616 connectée à une centrale d'acquisition Campbell Scientific CR1000 (**Figure 3**). Une thermistance est également installée dans la colonne pour le suivi de la température du sol. La température et la période P sont enregistrées toutes les 20 min.

Il est admis que la température et la teneur en eau volumique sont constantes et homogènes le long des guides d'onde du réflectomètre.

Tableau 2. Caractéristiques des colonnes de sol fabriquées pour l'étude

Texture	N° colonne	Masse volumique (g.cm ⁻³)	Teneur en eau volumique θ (m ³ .m ⁻³)	P ₂₀ (µs)
La Gouethière 0-20 cm	9	1,32	0,132	21,88
	1	1,32	0,198	23,80
	8	1,32	0,260	26,42
	3	1,32	0,320	28,44
	12	1,32	0,360	31,21
La Gouethière 20-30 cm	10	1,32	0,132	21,74
	2	1,32	0,198	23,86
	7	1,32	0,260	25,92
	4	1,32	0,340	29,28
	13	1,32	0,366	31,46
La Gouethière 30-40 cm	22	1,32	0,132	23,75
	23	1,32	0,198	24,74
	24	1,32	0,264	27,18
	5	1,32	0,340	31,10
La Morie 0-20 cm	16	1,30	0,130	22,32
	17	1,30	0,195	24,73
	18	1,30	0,260	27,96
	20	1,30	0,325	29,87
	21	1,30	0,352	30,90
La Gouethière 30-40 cm	11	1,40	0,140	23,06
	15	1,40	0,220	26,23
	19	1,40	0,238	26,38
	14	1,40	0,297	28,25
	6	1,40	0,360	30,49
La Gouethière 30-40 cm	25	1,50	0,219	27,65
	26	1,50	0,300	30,14
	27	1,50	0,380	33,08
La Gouethière 30-40 cm	31	1,60	0,240	28,92
	28	1,60	0,320	31,37
	29	1,60	0,387	32,35

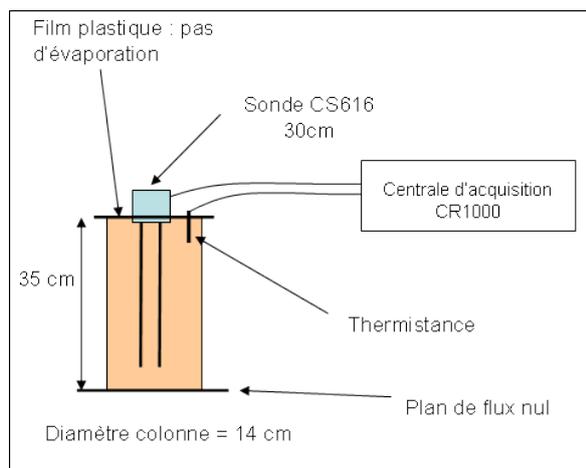


Figure 3. Instrumentation et mise en place des sondes CS616.

Les colonnes de sols sont ensuite placées pendant 8 jours dans une enceinte climatique afin de faire varier le paramètre TEMPERATURE, dans les colonnes de sol, selon le schéma suivant : entre 5°C et 25°C : un palier de 24 h à 5°C, une rampe de montée à 15°C, un palier de 24 h à 15°C, une rampe de montée à 25°C, un palier de 24 h à 25°C, une rampe de descente à 5°C, un palier de 24 h à 5°C. Ces températures correspondent au domaine des températures de sol couramment enregistrées sur le site expérimental OS².

Pour chaque colonne de sol à densité et teneur en eau connue, on dispose donc d'un suivi temporel de la période P (en μ s) en fonction de la température du sol.

1.3. Mise en œuvre des sondes sur le terrain

Des sondes CS616 ont été installées horizontalement dans une fosse pédologique sur le site « La Gouethière » pour effectuer un suivi de la teneur en eau à quatre profondeurs : 5 cm, 15 cm, 25 cm et 35 cm. Des thermistances ont été installées aux mêmes profondeurs pour suivre l'évolution de la température du sol.

Les mesures de périodes brutes des sondes CS616 ont été enregistrées par une centrale d'acquisition CR1000 toutes les deux heures, du 19 janvier 2011 au 15 juin 2011.

Des prélèvements d'échantillons de sol à proximité des sondes permettent de déterminer la teneur en eau gravimétrique et la masse volumique apparente du sol à des dates précises. L'équation (3) permet d'avoir accès à la teneur en eau volumique réelle.

Pour une date donnée et une profondeur précise, on dispose donc de la teneur en eau volumique réelle et de la période P mesurée par la centrale d'acquisition.

2. Résultats et discussion

2.1. Tests des sondes au laboratoire en conditions contrôlées

2.1.a Effet de la température

Six colonnes de sol instrumentées chacune d'une sonde CS616 et d'une thermistance sont placées dans une enceinte climatique pour étudier l'effet de la température entre 5° et 25°C. Seul le paramètre TEMPERATURE varie au cours de cette expérimentation. Une acquisition de la période P des sondes CS616 et de la température du sol est effectuée toutes les 20 min par la centrale d'acquisition CR1000 (**Figure 4**).

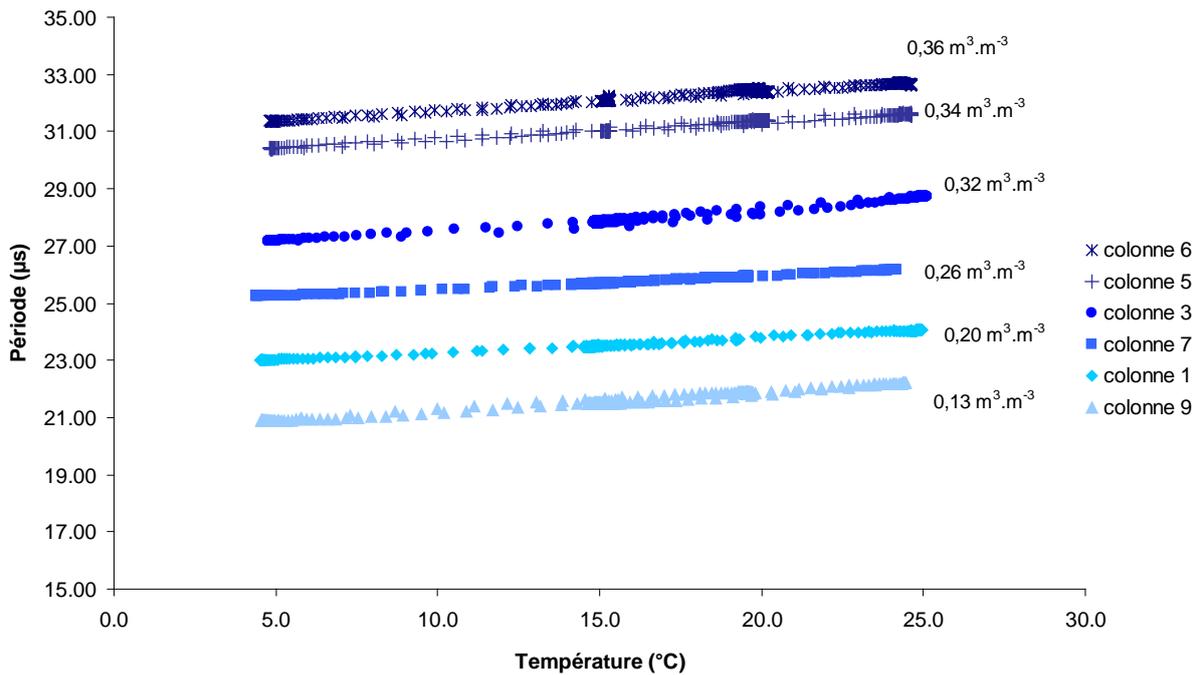


Figure 4. Influence de la température sur la période P à différentes teneurs en eau.

A teneur en eau constante, on peut constater une augmentation linéaire de la période P en fonction de la température. L'amplitude de cette variation peut atteindre 1,5 µs. Cette augmentation de la période peut se traduire en cinq points de teneur en eau si l'on applique l'équation d'étalonnage standard (1) préconisée par le constructeur (voir **Figure 5**). Cette erreur due uniquement à la température n'est donc pas négligeable et doit être réduite pour augmenter la justesse des mesures de teneur en eau effectuées à partir des sondes CS616.

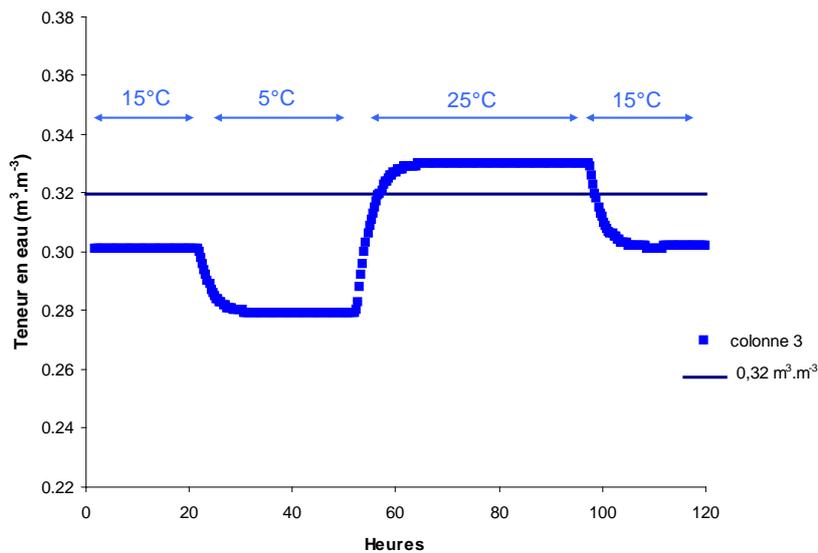


Figure 5. Evolution de la teneur en eau modélisée par l'équation constructeur (équation 1) en fonction de la température. Calculs réalisés pour la colonne 3 dont la teneur en eau de référence est égale à $0,32 \text{ m}^3 \cdot \text{m}^{-3}$.

On propose ainsi de corriger l'effet de la température sur la période brute (P) mesurée par le capteur à la température T pour obtenir une période corrigée à 20°C (P_{20}). Par analogie avec l'équation de Campbell (1948) qui permet de corriger l'effet de la température sur les mesures de résistivité électrique, on introduit un coefficient α tel que l'équation de correction de la période brute s'écrive selon l'équation suivante :

$$P = P_{20} (1 + \alpha\Delta T) \quad (5)$$

avec $\Delta T = T_{\text{mesurée}} - 20^{\circ}\text{C}$.

Une régression linéaire sur les données expérimentales permet de déterminer, pour chaque colonne de sol, la pente (αP_{20}) et l'ordonnée à l'origine (P_{20}) de l'équation (7). On obtient un coefficient α pour chaque colonne de sol ; sa valeur moyenne sur six colonnes (**Figure 4**) est de $2,1 \cdot 10^{-3} \mu\text{s} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$ avec une erreur standard de $2 \cdot 10^{-4} \mu\text{s} \cdot ^{\circ}\text{C}^{-1}$.

Pour valider ce coefficient α , on l'applique aux mesures de périodes (P) acquises pendant 8 jours par quatre sondes CS616 installées dans 4 colonnes de sols ayant subi les cycles de variations de température entre 5°C et 25°C dans l'enceinte climatique.

La période corrigée à 20°C est calculée en appliquant la relation suivante à la période mesurée par les CS616 :

$$P_{20} = P / (1 + \alpha\Delta T). \quad (6)$$

On obtient pour les quatre colonnes, fabriquées à teneur en eau et masse volumique prédéterminées, un suivi temporel de la période corrigée P_{20} en fonction de la température (voir **Figure 6**).

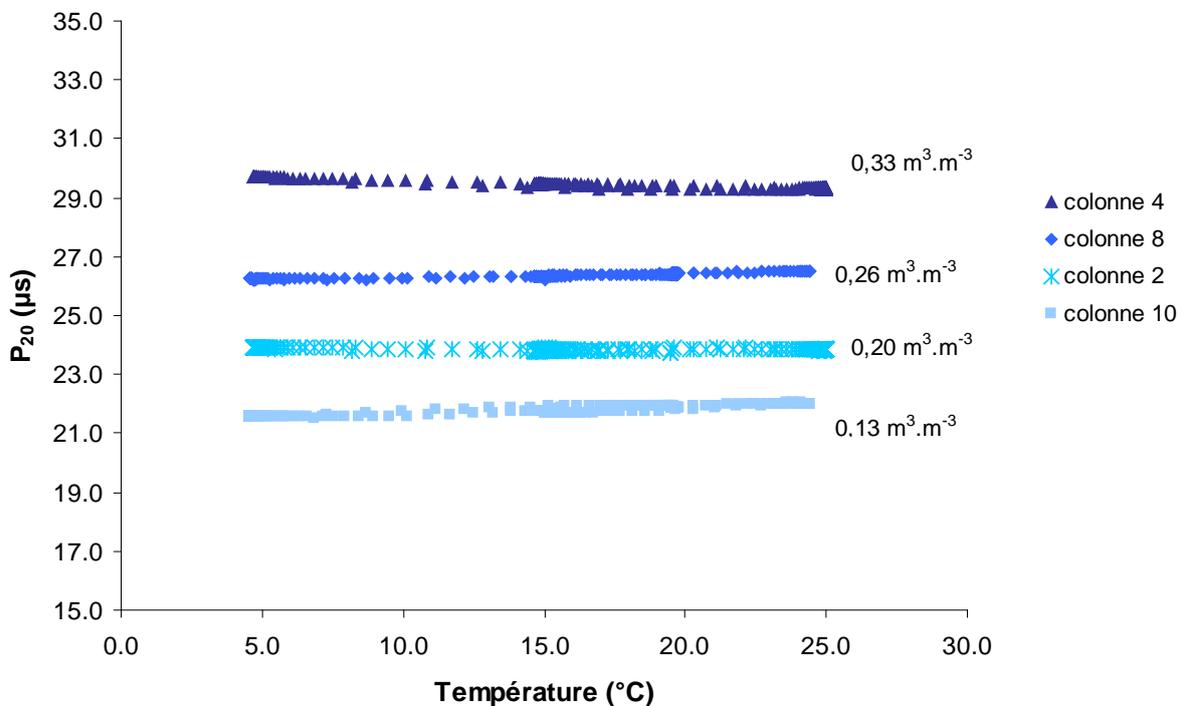


Figure 6. Application du coefficient de correction en température à la période brute enregistrée par les sondes CS616.

On constate que l'application du coefficient α à la période brute permet de réduire l'effet de la température. La dépendance des sondes CS616 à la température diminue : l'amplitude des variations de la période corrigée ne dépasse pas 0,35 μs sur la plage de température [5°C – 25°C], ce qui peut se traduire en des variations de $\pm 1\%$ de teneur en eau volumique si on applique l'équation standard corrigée du constructeur :

$$\theta = -0,0663 - 0,0063 \times P_{20} + 0,0007 \times P_{20}^2. \quad (7)$$

Cette erreur de $\pm 1\%$ de teneur en eau volumique due à l'effet de la température est tolérable pour le suivi *in situ* de la teneur en eau des sols.

2.1.b Effet de la masse volumique apparente

On étudie dans un premier temps la relation teneur en eau volumique réelle - période corrigée - en fonction de la masse volumique apparente des échantillons.

Pour chaque sonde CS616, la période P_{20} est déterminée selon la procédure décrite au paragraphe 2.1.a (équation 6).

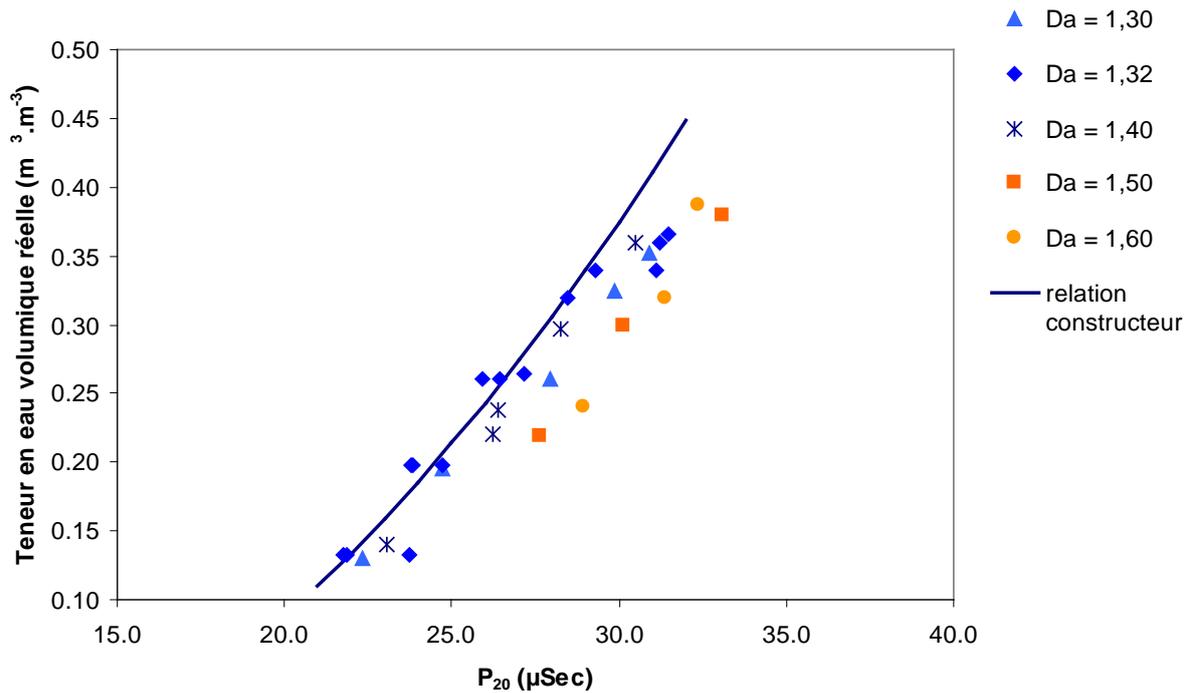


Figure 7. Relation entre la teneur en eau volumique réelle et la période P_{20} des sondes CS616 pour les quatre masses volumiques apparentes étudiées.

Le graphique de la **Figure 7** montre que pour les horizons de sol étudiés et après correction de l'effet de la température, la relation (1) définie par le constructeur permet d'estimer convenablement la teneur en eau volumique pour les masses volumiques apparentes (D_a) les plus faibles, inférieures à 1,50 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$. Pour des masses volumiques apparentes supérieures à

1,50 g.cm⁻³, l'équation constructeur surestime systématiquement la teneur en eau. Les écarts entre la teneur en eau réelle des colonnes de sol et la teneur en eau estimée par l'équation (1) peuvent ainsi atteindre 10 points de teneur en eau. La relation du constructeur n'est donc pas acceptable pour des masses volumiques apparentes élevées.

On se propose donc de regrouper les points à fortes masses volumiques apparentes (1,50 et 1,60 g.cm⁻³) et d'étudier leur position par rapport à la relation (1) du constructeur (**Figure 8**). On constate qu'en effectuant une translation vers la droite, la relation constructeur estime très bien la teneur en eau volumique. Cette correction d'offset montre que la sensibilité des sondes à la masse volumique est importante.

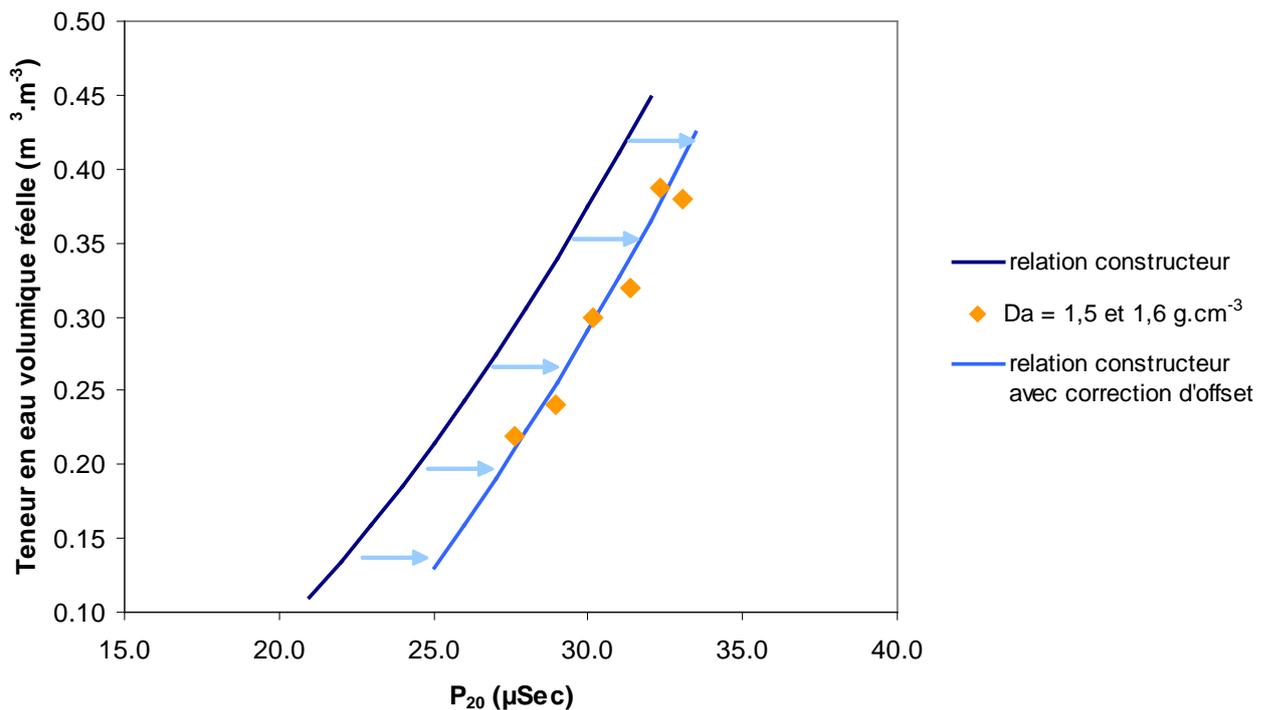


Figure 8. Offset de la relation constructeur dans le cas de masses volumiques apparentes supérieures ou égales à 1.5 g.cm⁻³.

Dans le cas des fortes masses volumiques, la relation (7) du constructeur devient :

$$\theta = -0,150 - 0,0063 \times P_{20} + 0,0007 \times P_{20}^2. \quad (8)$$

On peut constater, qu'à période P_{20} égale, des teneurs en eau volumique différentes peuvent être obtenues selon la relation utilisée : pour une période mesurée de 28 µs par exemple, la relation (7) estime la teneur en eau à 31% alors que la relation (8) l'estime à 22%.

Cette correction d'offset, pour les fortes masses volumiques, est donc indispensable pour obtenir une mesure de teneur en eau dont l'écart à la teneur en eau réelle est inférieur à 0,02 m³.m⁻³.

Pour évaluer les performances du modèle translaté, des valeurs de teneur en eau ont été estimées à partir de la relation (8). La valeur de l'erreur moyenne (ME) et de la racine carrée de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) révèlent que le modèle n'est pas biaisé et que sa précision est conforme à l'écart maximal

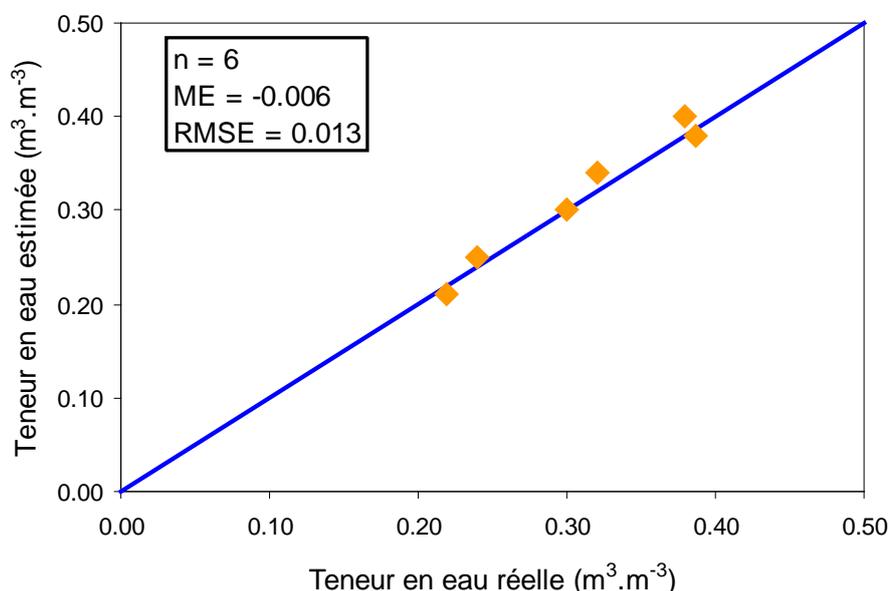


Figure 9. Evaluation des performances de la relation avec correction d'offset (cas des fortes masses volumiques).

Au final, l'application de l'équation générale Campbell Scientific (équation 1) n'est pas suffisante dès que l'on souhaite estimer la teneur en eau volumique du sol avec une justesse de $\pm 2\%$. Une correction systématique de l'effet de la température suivie d'une correction de l'effet de la masse volumique apparente (pour des masses volumiques $> 1,50 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$) apparaît donc indispensable pour atteindre ce niveau de justesse (équations 6 et 7/8).

2.2. Mise en œuvre des sondes CS616 sur le terrain

Les résultats obtenus au paragraphe précédent ont montré qu'il était important de prendre en compte la température et la masse volumique du sol pour atteindre un niveau de précision suffisant sur la mesure de teneur en eau volumique. Un étalonnage *a posteriori* des sondes CS616 à l'aide des mesures de teneur en eau gravimétrique et de masse volumique *in situ* est effectué pour chaque sonde CS616 afin d'obtenir des mesures fiables de teneur en eau.

Tout d'abord, les mesures de périodes brutes enregistrées par une centrale d'acquisition CR1000 sont corrigées en température comme décrit au paragraphe 2.1 et sont donc ramenées à une période P_{20} .

L'ajustement d'un polynôme du second degré entre la teneur en eau volumique réelle (déterminées à partir des mesures de teneur en eau gravimétrique et de masse volumique, voir équation 3) et P_{20} permet de déterminer les coefficients d'étalonnage de chaque sonde CS616.

2.2.a Cas des faibles masses volumiques

On étudie dans cet exemple les valeurs obtenues avec une sonde CS616, installée horizontalement sur une fosse du site, à une profondeur de 15 cm (**Tableau 3**). La masse volumique locale est de $1,30 \text{ g.cm}^{-3}$.

Tableau 3. Période corrigée à 20°C en fonction de la teneur en eau volumique calculée à différentes dates

Date	P ₂₀ mesurée à 15 cm de profondeur (μs)	Teneur en eau volumique calculée à partir des mesures gravimétriques (m ³ .m ⁻³)
19/01/2011	28,71	0,366
27/01/2011	29,26	0,368
11/02/2011	28,18	0,347
22/02/2011	29,5	0,357
08/03/2011	28,23	0,322
12/04/2011	25,57	0,219
21/04/2011	23,45	0,148
04/05/2011	21,42	0,128
10/05/2011	21,27	0,116
17/05/2011	20,76	0,102
15/06/2011	19,82	0,081

L'ajustement d'un polynôme du second degré sur les données nous permet de déterminer la relation suivante :

$$\theta = 0,0008 \times (P_{20})^2 - 0,0086 \times (P_{20}) - 0,0663 \text{ avec } R^2 = 0,99. \quad (9)$$

On applique ensuite cette relation aux données de période P_{20} acquises toutes les 2 h au cours du suivi temporel (**Figure 10**).

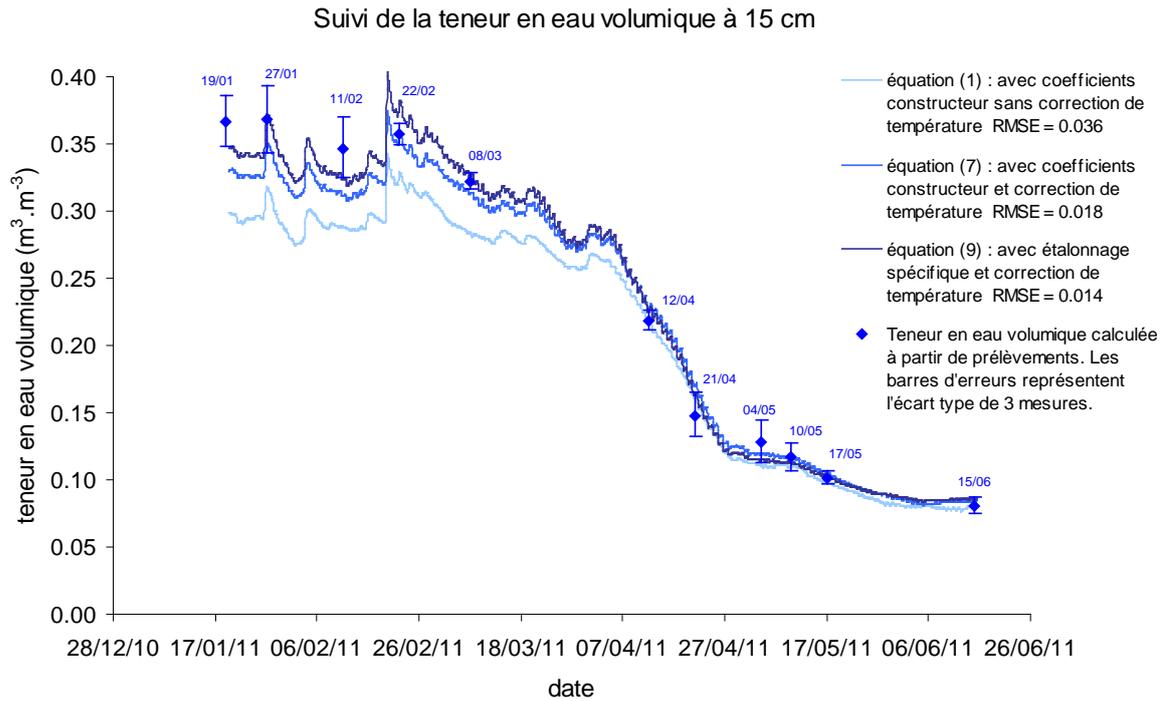


Figure 10. Comparaison des trois modèles de teneur en eau avec les données mesurées ($D_a = 1,30 \text{ g.cm}^{-3}$).

On constate que l'application de l'équation (1) du constructeur aux mesures de périodes brutes des sondes ne permet pas d'estimer convenablement la teneur en eau volumique pour des teneurs en eau élevées : en période humide, la teneur en eau mesurée est sous-estimée jusqu'à 7% par rapport à la teneur en eau *in situ*.

L'application des coefficients d'étalonnage du constructeur cumulée à une correction de l'effet de la température permet une meilleure estimation de la teneur en eau (RMSE = 1,8% de teneur en eau) mais ne permet pas d'atteindre un écart maximal toléré de $\pm 2\%$ sur la teneur en eau.

Après correction de l'effet de la température et étalonnage spécifique, les mesures de teneur en eau volumique réalisées avec la sonde CS616 sont proches des points de teneur en eau calculés à partir des informations recueillies sur le terrain (teneur en eau gravimétrique et masse volumique apparente) : la différence n'excède pas 2 % de teneur en eau, ce qui est satisfaisant.

Un étalonnage spécifique au site expérimental, réalisé *a posteriori* et intégrant une correction de l'effet de la température est donc indispensable pour obtenir des données de teneur en eau fiables et précises dans le temps.

2.2.b Cas des fortes masses volumiques

On étudie ici les teneurs en eau estimées avec une sonde CS616, installée à une profondeur de 35 cm. La masse volumique locale est de $1,50 \text{ g.cm}^{-3}$.

Comme pour l'exemple des faibles masses volumiques, on ajuste un polynôme du second degré entre la période P_{20} mesurée par la sonde et la teneur en eau volumique calculée à partir des mesures gravimétriques. Etant donné, les résultats obtenus au cours des expérimentations en laboratoire (paragraphe 2.1.b), on décide d'ajuster uniquement l'offset du polynôme (9).

On obtient la relation suivante :

$$\theta = 0,0008 \times (P_{20})^2 - 0,0086 \times (P_{20}) - 0,164 \text{ avec } R^2 = 0,99. \quad (10)$$

On applique ensuite cette relation aux données de période P_{20} acquises au cours du suivi temporel (**Figure 11**).

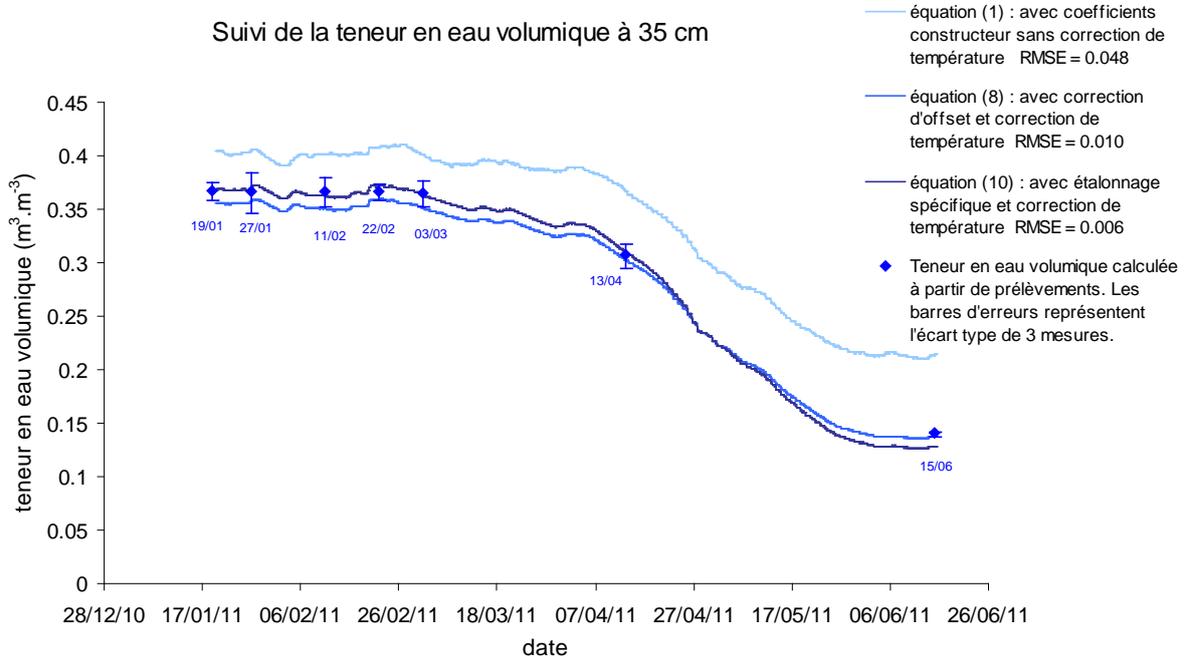


Figure 11. Comparaison des trois modèles de teneur en eau avec les données mesurées ($D_a = 1,50 \text{ g.cm}^{-3}$).

L'application de l'équation (1) du constructeur aux mesures de périodes brutes des sondes surestime systématiquement la teneur en eau : jusqu'à 8% par rapport à la teneur en eau *in situ* mesurée par la méthode gravimétrique.

Lorsqu'on applique l'équation (7) (correction due à l'effet de la masse volumique élevée) et une correction de l'effet de la température, l'évolution de la teneur en eau est estimée convenablement, à $\pm 2\%$, y compris pour les teneurs en eau élevées.

Un étalonnage des sondes à partir des mesures gravimétriques intégrant une correction de température reste plus prudent et plus robuste : la RMSE déterminée en appliquant l'équation (10) est inférieure à 1% de teneur en eau.

Conclusions

Les résultats présentés montrent une influence importante de la température du sol sur la réponse des sondes CS616. Cette sensibilité à la température s'explique notamment par le fait que les sondes CS616 opèrent dans un domaine fréquentiel d'environ 100 MHz contrairement à des sondes TDR du type TRASE qui fonctionnent à des fréquences de 1GHz et qui seront de fait moins sensibles à la température.

Une correction de l'effet de la température est indispensable lorsque l'on utilise des sondes CS616 pour estimer la teneur en eau *in-situ*. Il est proposé ici un coefficient α à appliquer à la période brute mesurée par les sondes CS616 pour atténuer l'effet de la température.

La masse volumique apparente du sol a également une influence importante sur la mesure de teneur en eau avec les capteurs étudiés. On constate un changement de réponse important pour une masse volumique supérieure à $1,50 \text{ g.cm}^{-3}$. Une correction de l'effet de la masse volumique doit être appliquée pour maintenir un niveau de précision inférieur à $\pm 2 \%$ de teneur en eau.

L'application de l'équation d'étalonnage générale Campbell Scientific aux mesures de périodes brutes des sondes CS616 ne permet pas d'estimer convenablement l'évolution de la teneur en eau *in situ*. Dans le cas d'un suivi de la teneur en eau dans des sols de faibles masses volumique, l'application de l'équation Campbell Scientific, après correction de l'effet de la température améliore la qualité des mesures mais ne permet pas d'atteindre la précision obtenue avec un étalonnage à partir de mesures gravimétriques.

Pour les fortes masses volumiques (supérieures à $1,50 \text{ g.cm}^{-3}$), une correction d'offset de l'équation constructeur est indispensable et permet d'estimer convenablement la teneur en eau après correction de l'effet température. Néanmoins, un étalonnage spécifique à partir des mesures gravimétriques semble plus prudent.

Remerciements

Ce travail a été réalisé dans le cadre du projet Spatioflux (CPER 2007-2013) financé par l'Inra, la région Centre et le FEDER. Nous remercions Solenne Tonneau, stagiaire en métrologie qui a contribué à la réalisation de cette étude.

Références bibliographiques

Benson CH, Wang X (2006) Temperature-compensating calibration procedure for water content reflectometers, Proc. TDR 2006, Purdue University, West Lafayette, USA, Sept. 2006, Paper ID 50, 16p.

Blonquist JM, Jones SB, Robinson DA (2005) Standardizing Characterization of electromagnetic water content sensors: Part 2. Evaluation of seven sensing systems. *Vadose Zone J* 4 : 1059-1069.

Campbell RB, Bower CA, Richards LA, 1948. Change of electrical conductivity with temperature and the relation of osmotic pressure to electrical conductivity and ion concentration for soil extracts. *Soil Sci Soc Amer Proc*, **13** : 66-69.

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

Gardner W, Kikham D (1952) The determination of soil moisture by neutron scattering. *Soil Sci* 73 : 391-401.

Gu J, Nicoullaud B, Rochette P, Pennock DJ, Hénault C, Richard G., 2011. Effect of topography on nitrous oxide emissions from winter wheat fields in central France. *Environ Pollut* 159 : 3149-3155.

Huisman JA, Hubbard SS, Redman JD, Annan AP (2003) Measuring soil water content with ground penetrating radar : A review. *Vadose Zone J* 2 : 476-491.

Legchenko A, Baltassat JM, Beauce A, Bernard J (2002) Nuclear magnetic resonance as a geographical tool for hydrogeologists. *J Appl Geophys* 50 : Special issue, pp. 21-46.

Kelleners TJ, Seyfried MS, Blonquist JM, Bilskie J, Chandler DG (2005) Improved interpretation of water content reflectometer measurement in soils. *Soil Sci Soc Amer J* 69 : 1684-1690.

Rüdiger C, Western AW, Walker JP, Smith AB, Kalma JD, Willgoose GR (2010) Towards a general equation for frequency domain reflectometers. *J Hydrol* 383 : 319-329.

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

Western AW, Seyfried MS (2005) A calibration and temperature correction procedure for the water content reflectometer. *Hydrol Processes* 19 : 3785-3793.