

# CS616 et CS625

# Réfectomètres de teneur en eau

## Manuel d'utilisation

*Issued: 7.8.06*

*Traduction du 15.10.2007*



# GARANTIE

---

Cet équipement est garanti contre tout vice de matériau, de façon et de logiciel. Cette garantie demeurera en vigueur pendant une période de douze mois à compter de la date de livraison. Nous nous engageons à réparer ou à remplacer les produits jugés défectueux pendant la période de garantie, à condition qu'ils nous soient renvoyés port payé. Cette garantie ne pourra être appliquée :

- A aucun équipement modifié ou altéré de quelque manière que ce soit sans une autorisation écrite de Campbell Scientific.
- Aux batteries.
- A aucun produit soumis à une utilisation abusive, un mauvais entretien, aux dégâts naturels ou endommagements lors du transport.

Campbell Scientific renverra les équipements sous garantie par voie de terre, frais de transport payés. Campbell Scientific ne remboursera ni les frais de démontage ni les frais de réinstallation du matériel. Cette garantie et les obligations de la société citées ci-dessous remplacent toute autre garantie explicite ou implicite, y compris l'aptitude et l'adéquation à une utilisation particulière. Campbell Scientific décline toute responsabilité en cas de dommages indirects.

Avant de renvoyer un équipement, veuillez nous en informer pour obtenir un numéro de référence de réparation, que les réparations soient effectuées ou non dans le cadre de la garantie. Veuillez préciser la nature du problème le plus clairement possible et, si l'appareil n'est plus sous garantie, joindre un bon de commande. Un devis pour les réparations sera fourni sur demande.

Le numéro de référence de réparation doit être indiqué clairement à l'extérieur du carton utilisé pour renvoyer tout équipement.

Veuillez noter que les produits envoyés par avion sont sujets à des frais de dédouanement que Campbell Scientific facturera au client. Ces frais sont bien souvent plus élevés que le prix de la réparation proprement dite.



Campbell Scientific Ltd,  
1, rue de Terre Neuve  
Miniparc du Verger  
Bât. H - Les Ulis  
91967 COURTABOEUF CEDEX, FRANCE  
Tél. : (+33) 1 69 29 96 77  
Fax : (+33) 1 69 29 96 65  
Courriel : [contact@campbellsci.fr](mailto:contact@campbellsci.fr)  
<http://www.campbellsci.fr>



# Sommaire

---

<b>1. Description générale</b>	<b>1</b>
<b>2. Caractéristiques</b>	<b>2</b>
2.1 Dimensions	2
2.2 Poids	2
2.3 Caractéristiques électriques	2
2.4 Fonctionnement	3
<b>3. Installation</b>	<b>4</b>
3.1 Orientation	4
3.2 Problèmes potentiels avec une insertion incorrecte	4
<b>4. Câblage</b>	<b>5</b>
<b>5. Programmation de la centrale de mesure</b>	<b>5</b>
5.1 Introductions de mesure pour les CS616/CS625	5
5.2 Mesure de la CS616 avec l'instruction 138	5
5.3 Mesure de la CS616 avec l'instruction 27, sur les CR10X et CR23X	7
5.4 Exemples de programmes pour la CS616	8
5.4.1 Exemple n°1	8
5.4.2 Exemple n°2	9
5.4.3 Exemple n°3	11
5.4.4 Exemple n°4	12
5.4.5 Exemple n°5	14
5.5 Mesure de la CS625 sur la CR200, avec l'instruction PeriodAvg	17
5.6 Exemple de programmes pour la CS625	18
5.6.1 Exemple n°1	19
5.6.2 Exemple n°2	20
5.7 Exemple de programme pour CR8xx et autres CRxxx	21
<b>6. Méthode de mesure de la teneur volumique en eau, pour les réflectomètres</b>	<b>22</b>
6.1 Description de la méthode de mesure	22
6.2 Courbes de réponse	23
6.3 Equation d'étalonnage	25
6.4 Etendue de fonctionnement	27
6.4.1 Pour la conductivité électrique du sol	27
6.4.2 Matière organique du sol, teneur en argile et densité apparente	28
6.5 Sources d'erreur dans la mesure réflectométrique de teneur en eau	28
6.5.1 Erreur de variabilité entre capteurs	28
6.5.2 Erreur d'insertion	29
6.5.3 Erreur d'atténuation du signal	29
6.6 Dépendance à la température et correction	29
<b>7 Etalonnage du réflectomètre par l'utilisateur</b>	<b>30</b>
7.1 Atténuation du signal dans les sols conducteurs, et nécessité d'effectuer un étalonnage spécifique	30
7.2 Equation d'étalonnage de l'utilisateur	31
7.3 Récupération de données de laboratoire pour l'étalonnage	32
7.4 Récupération de données de terrain pour l'étalonnage	34
7.5 Calculs	36
<b>8 Entretien</b>	<b>37</b>
<b>9. Références</b>	<b>37</b>
<b>10 Annexe</b>	<b>37</b>
Discussion à propos de la teneur volumique en eau	37

## Figures

Figure 1 Réflectomètre de teneur en eau CS616 .....	2
Figure 2 Étalonnage linéaire et quadratique dérivé d'un sol argileux.....	24
Figure 3 Réponse de la CS616/CS625 pour un sol de densité apparente de 1,4g cm-3 et à faible CE, un sol sablo-argileux de densité apparente de 1,6g cm-3 et à faible CE, et un sol sablo-argileux de densité apparente de 1,6g cm-3 mais avec une CE plus forte.....	25
Figure 4 Différence d'étalonnage (en %) selon que l'on utilise l'équation linéaire ou quadratique .....	26
Figure 5 Erreur de pourcentage de teneur en eau volumique corrigée par l'équation de correction de température.....	30

## Tables

Tableau 1 Codes pour le câblage des CS616/CS625.....	5
Tableau 2 Exemple de programme pour CS616.....	8
Tableau 3 Exemple de programme pour CS625.....	18
Tableau 4 Coefficients d'étalonnage standard pour les formes linéaires et quadratiques.....	26
Tableau 5 Coefficients d'étalonnage pour un sol sablo-argileux avec une densité apparente de 1,6g cm-3 et une conductivité électrique à saturation de 0,4 dS m-1 pour les formes linéaires et quadratiques.....	27
Tableau 6 Coefficients d'étalonnage pour un sol sablo-argileux avec une densité apparente de 1,6g cm-3 et une conductivité électrique à saturation de 0,75 dS m-1 pour les formes linéaires et quadratiques.....	27

# Réflexomètres de teneur en eau CS616 et CS625

---

## 1. Description générale

La sonde CS616 est une version améliorée du réflexomètre de teneur en eau CS615. La CS625 est une version modifiée de la CS616, permettant de l'utiliser avec les CR200. La différence entre la CS616 et la CS625 réside dans la différence de niveau de tension en sortie. Voir les caractéristiques techniques du capteur pour plus de détails.

Les deux sondes servent à mesurer la teneur volumique en eau du sol ou d'autres milieux poreux. L'information sur la teneur en eau est déterminée grâce à la sensibilité du capteur vis à vis de la constante diélectrique du milieu entourant les tiges de la sonde.

Le signal en sortie du capteur CS616, est un signal carré qui peut être branché sur une centrale d'acquisition CR510, CR10X, CR23X ou CR800/850, CR1000, CR3000 et CR5000 de Campbell Scientific. Une instruction de mesure dédiée à la CS616 (la P138) est utilisée afin de mesurer la période du signal en sortie, période qui est ensuite convertie en teneur volumique en eau grâce à des courbes d'étalonnage. Des instructions de mesure de période moyenne peuvent aussi être utilisées.

Le signal en sortie du capteur CS625, est un signal carré qui peut être branché sur une centrale d'acquisition de la série CR200/216. On utilise alors un programme CRBasic utilisant une instruction de période moyenne (Period Averaging) afin de mesurer la période du signal en sortie et de la convertir en teneur volumique en eau grâce à des courbes d'étalonnage.

La sonde réflexométrique est composée de 2 tiges en acier connectées à un circuit imprimé. Un câble blindé à 4 fils est connecté à ce circuit imprimé afin d'alimenter le capteur, de commuter l'alimentation et de mesurer le signal en sortie. Le circuit imprimé est enrobé dans un bloc d'époxy.

Des composants électroniques à intégration rapide, présents sur le circuit imprimé, sont configurés de façon à être des multivibrateurs bistables. La sortie du multivibrateur est connectée à la tige du capteur, qui se conduit alors comme un guide d'onde. Le temps de parcours du signal le long des tiges du capteur, dépend de la permittivité diélectrique du milieu entourant les tiges, et la permittivité diélectrique dépend de la teneur en eau. Ainsi la fréquence d'oscillation du multivibrateur dépend de la teneur volumique en eau du matériau mesuré. Un circuit numérique convertit le signal du multivibrateur en une fréquence compatible avec une centrale de mesure. Le signal de sortie est presque exclusivement un signal carré. La période du signal varie entre environ 14 microsecondes pour des tiges dans l'air, et 42 microsecondes pour des tiges immergées dans un sceau d'eau du robinet. L'équation d'étalonnage convertit la période en teneur en eau.

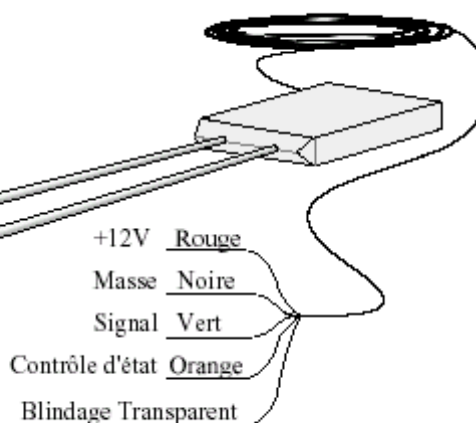


Figure 1 Réfectomètre de teneur en eau CS616

## 2. Caractéristiques

### 2.1 Dimensions

Tiges : 300mm de long, 3,2mm de diamètre, 32mm d'espacement  
Tête : 85 x 63 x 18mm

### 2.2 Poids

Capteur : 280g (sans câble)  
Câble : 35gm<sup>-1</sup>

### 2.3 Caractéristiques électriques

#### **Signal en sortie**

CS616 : Signal carré de +/- 0,7V, dont la fréquence dépend de la teneur en eau.

CS625 : Signal carré de 0 à 3,3V, dont la fréquence dépend de la teneur en eau.

#### **Consommation de courant**

65 milliampères à 12V CC lorsque le capteur est en fonctionnement, et 45 microampères lorsqu'il est en état de veille.

#### **Tension d'alimentation**

Minimum de 5V CC, maximum de 18V CC.

#### **Tension de mise en fonctionnement**

Tension minimum de 4V CC, tension maximum de 18V CC.



### **Longueur maximum pour le câble**

305 mètres (100 pieds).

### **Compatibilité électromagnétique**

La CS616/CS625 est compatible CE avec les critères de performance sur test, dont les résultats sont disponibles sur demande spéciale. Les émissions RF sont inférieures aux limites de la norme EN55022 si la sonde est en fonctionnement moins de 0,6ms, et si les mesures sont effectuées à 1 Hz (une fois par seconde) ou moins souvent. L'instruction de mesure P138 disponible pour les CR510, CR10X, et CR23X, limite le temps de fonctionnement à 0,6ms. La CS616/CS625 est conforme à la norme EN61326 relative à la protection contre la charge et décharge électrostatique. Une conséquence inévitable vis à vis du principe de fonctionnement, est que des fréquences RF externes peuvent perturber les mesures de la CS616. Par conséquent les circuits de la CS616 devront être situés à distance des aires de transmission radio, ou bien les mesures devront être ignorées lors de ces transmissions.

### **Interférence entre les capteurs**

Les tiges des réflectomètres, sont des antennes qui émettent et reçoivent des signaux électromagnétiques. Des capteurs mis en fonctionnement en même temps, et se trouvant à moins de 230mm les uns des autres (9 pouces), peuvent causer des mesures erratiques. Si les capteurs doivent être proches les uns des autres, configurez les lignes de mise en route des capteurs de telle sorte qu'ils ne soient pas activés en même temps.

## **2.4 Fonctionnement**

La caractéristique de **précision** annoncée pour la mesure de TVE (Teneur Volumique en Eau) à l'aide de la CS616 / CS625, est basée sur des mesures en laboratoire, avec différents sols, et une étendue de mesure allant du sec au saturé en eau. Les sols étaient typiquement des sols de limon sableux et de sable grossier. De l'argile et de la vase étaient présents dans certains sols afin de les prendre en compte dans la précision.

La précision du réflectomètre de teneur en eau est de +/-2,5% de TVE en utilisant l'étalonnage standard avec une conductivité électrique apparente inférieure ou égale à 0,5deciSiemen par mètre ( $\text{dS m}^{-1}$ ) et une densité apparente inférieure ou égale à  $1,55\text{g cm}^{-3}$  dans l'étendue de mesure de 0 à 50% de TVE.

La **résolution** est le changement minimum de permittivité diélectrique que peut détecter le réflectomètre de façon fiable. Les CS616 / CS625 sont généralement utilisées afin de mesurer des teneurs volumiques en eau du sol. La résolution de la CS616/625 est meilleure que 0,1% de TVE.

La **répétitivité** de la mesure, est déterminée par une prise de mesures répétées dans un même matériau. L'erreur de répétitivité de la CS616 / 625 est meilleure que 0,1% de TVE.

**Variabilité** de capteur à capteur : +/- 0,5% de TVE (Teneur Volumique en Eau) en sol sec, +/- 1,5% de TVE dans un sol typiquement saturé.

### **Propriétés du sol**

Le fonctionnement du réfectomètre peut être affecté si le signal qui est appliqué aux tiges, est un signal atténué. Le capteur fournira une réponse au comportement bien établi, même dans des sols atténués ou d'autres supports, mais la réponse peut être différente de l'étalonnage standard. Par conséquent, un étalonnage individualisé sera nécessaire. Le changement de réponse du capteur peut se produire lorsque la conductivité électrique apparente du sol est supérieure à  $0,5 \text{ dS m}^{-1}$ . La contribution majeure à la conductivité électrique, est la présence d'ions libres en solution, provenant de la dissolution de sels. La matière organique du sol ou bien certains argiles peuvent aussi atténuer le signal.

## **3. Installation**

### **3.1 Orientation**

Le capteur peut être installé verticalement depuis la surface du sol, ou enterré et orienté de façon variable par rapport au sol. Un capteur installé verticalement depuis la surface du sol donnera une indication sur la teneur en eau dans les 300 premiers mm du sol. Vous pouvez aussi installer le capteur à l'horizontal par rapport à la surface du sol, et détecter ainsi le passage de fronts humides ou d'autres flux verticaux ; vous pouvez aussi donner un angle aux sondes. Un capteur inséré dans le sol avec un angle de  $30^\circ$  par rapport à sa surface, donnera alors une indication sur la teneur en eau dans les 15 premiers cm du sol.

### **3.2 Problèmes potentiels avec une insertion incorrecte**

La méthode utilisée pour installer le capteur, peut affecter la précision de la mesure. Les tiges des capteurs devront être gardées le plus proche possible de la parallèle lors de leur mise en place, afin de garder la géométrie des guides d'onde. La sensibilité de cette mesure est plus forte dans les régions proches de la surface des tiges, qu'à quelques distances de cette surface. Les capteurs insérés avec de l'air autour des tiges, réduira d'autant plus la précision des mesures. Dans la plupart des sols, la structure du sol reprendra sa place après l'insertion du capteur.

Dans certains cas, l'installation peut être améliorée grâce à l'utilisation d'outils de guide d'insertion. Campbell Scientific propose les outils de référence 14383 ou 14384. L'outil 14383 est un guide d'insertion du capteur qui permet de garder les tiges parallèles durant la mise en place. L'outil 14384 est mis en place dans le sol, puis retiré. Ceci permet de faire des installations dans des sols compactés, où il est difficile de mettre en place les réfectomètres de teneur en eau.

## 4. Câblage

Tableau 1 Codes pour le câblage des CS616/CS625		
Couleur	Fonction	Liaison à la centrale d'acquisition
Rouge	+12V	+12V
Vert	Sortie	Entrée analogique unipolaire (SE)
Orange	Mise en fonctionnement	Port de contrôle
Noir	Masse	G
Clair	Blindage (masse)	G

**NOTE** Les fils noir et clair doivent être branchés à la masse tous les deux.

## 5. Programmation de la centrale de mesure

### 5.1 Introductions de mesure pour les CS616/CS625

Le signal en sortie de la CS616, est un signal carré avec une amplitude de +/-0,7V et une fréquence qui dépend de la constante diélectrique du matériau entourant les tiges du capteur. L'instruction de mesure 138 est spécialement appropriée pour la mesure des fréquences en microsecondes issues de la CS616, avec les CR510, CR10X et CR23X. La valeur de la période est utilisée dans l'équation de étalonnage pour la teneur en eau. La période dans l'air, et d'environ 14,7  $\mu$ s, et la période dans un sol saturé ayant une porosité de 0,4, est approximativement de 31  $\mu$ s. L'instruction 27, *Period Average*, peut aussi être utilisée afin de mesurer la période en sortie des CS616.

Le signal en sortie de la CS625, est un signal carré avec une amplitude de 3,3V et une fréquence qui dépend de la constante diélectrique du matériau entourant les tiges du capteur. L'instruction de programme CRBasic « PeriodAvg » est utilisée afin de mesurer la période en sortie des CS625, sur les centrales de la série CR200. La valeur de la période est utilisée dans l'équation d'étalonnage pour la teneur en eau. La période dans l'air, et d'environ 14,7  $\mu$ s, et la période dans un sol saturé ayant une porosité de 0,4, est approximativement de 31  $\mu$ s.

Pour les CR800/850, CR1000, CR3000 et CR5000 il existe une instruction spécifique « CS616 ». Voir l'exemple simple au paragraphe 5.7.

### 5.2 Mesure de la CS616 avec l'instruction 138

Voir le paragraphe 5.4.1 pour un exemple d'utilisation de la P138.

```
1: CS616 Water Content Reflectometer (P138)
1: 1     Reps
2: 00   SE Channel
3: 00   Control Port Code
4: 0000 Loc [ _____ ]
5: 1.0  Mult
6: 0.0  Offset
```

**Reps** : Entrez le nombre de CS616 qui seront mesurées par cette instruction (répétitions). Les capteurs doivent être connectés à des voies consécutives. Chaque mesure utilise le même multiplicateur et le même offset. L'option choisie pour le paramètre 3, déterminera si des répétitions consécutives seront contrôlées par le même port de contrôle ou par des ports de contrôle consécutifs.

**SE Channel** : Entrez le numéro de voie analogique unipolaire auquel est relié le fil vert du capteur. Quand le paramètre de répétitions est supérieur à 1, ce numéro correspond à la voie de la première CS616 connectée.

**Control Port Code** : Entrez un entier, afin d'indiquer le port de contrôle qui sera utilisé pour mettre la CS616 en état de fonctionnement. Pour la CR510, seul C1 peut être utilisé pour faire cela.

Code	Option du port de contrôle
X	X indique le premier port de contrôle qui sera utilisé. Plusieurs répétitions utiliseront des ports de contrôle consécutifs pour mettre les sondes en état de fonctionnement. Le port de contrôle n° 1 suit le port de contrôle n°8.
1X	Toutes les répétitions utiliseront le même port de contrôle pour faire fonctionner les CS616. Le fait de faire fonctionner plusieurs CS616 en même temps, peut engendrer une demande trop importante en énergie.

**Loc** : Entrez l'espace mémoire (*Location*) de la centrale de mesure, qui sera utilisé pour stocker la mesure. La période est fournie en  $\mu$ s.

Un espace mémoire est une place de la mémoire de la centrale de mesure, qui est utilisée pour un stockage intermédiaire, avant qu'un calcul intermédiaire, ne ré-écrive par-dessus elle ou un stockage en mémoire finale, ne soit effectué. Un espace mémoire est alloué à chaque mesure effectuée par le programme de la centrale d'acquisition. Des espaces supplémentaires peuvent être créés par l'utilisateur.

**Mult** : Ceci est le facteur par lequel la valeur mesurée est multipliée (*multiplicateur*). Entrez 1 si vous souhaitez avoir le résultat de la période en  $\mu$ s.

Le multiplicateur est souvent utilisé dans un but de mise à l'échelle, ou pour convertir une valeur à une grandeur physique différente.

**Offset** : Ceci est une constante qui est ajoutée à la valeur de l'espace mémoire. Un offset de 0 n'a donc aucun effet sur la valeur de l'espace mémoire.

L'offset est souvent utilisé dans un but de mise à l'échelle, ou pour convertir une valeur à une grandeur physique différente.

Avec un multiplicateur de 1 et un offset de 0, la P138 donne un résultat en  $\mu$ sec.

### 5.3 Mesure de la CS616 avec l'instruction 27, sur les CR10X et CR23X

Voir le paragraphe 5.4.2 pour un exemple d'utilisation de la P27.

```

1: Period Average (SE) (P27)
1: 1      Reps
2: 00     Range Option
3: 00     SE Channel
4: 0000   No. of Cycles
5: 0000   Timeout (units = 0.01 seconds)
6: 0000   Loc [ _____ ]
7: 1.0    Mult
8: 0.0    Offset

```

**Reps** : Entrez le nombre de CS616 qui seront mesurées par cette instruction (répétitions). Les capteurs doivent être connectés à des voies consécutives. Chaque mesure utilise le même multiplicateur et le même offset.

**Range Option** : Entrez un entier à 2 chiffres afin de choisir un format de sortie de période qui soit en  $\mu\text{sec}$ , et une étendue de mesure de 2V, soit le code 04.

Code	Fréquence maximum
x1	8 kHz @ 2mV pic à pic
x2	20 kHz @ 3mV pic à pic
x3	50 kHz @ 12mV pic à pic
x4	200kHz @ 2V pic à pic

Avec : x = 0 la valeur en sortie est une période en microsecondes  
x = 1 la valeur en sortie est la fréquence en kHz

**SE Channel** : Entrez le numéro de voie analogique unipolaire auquel est relié le fil vert du capteur. Quand le paramètre de répétitions est supérieur à 1, ce numéro correspond à la voie où la première CS616 est reliée.

**No. of Cycles** : Entrez le nombre de cycle du signal d'entrée, que l'instruction utilise pour déterminer la période. Une valeur de 100 est recommandée.

**Timeout** : Entrez le maximum de temps que le nombre de cycles spécifiés, prend pour être comptabilisé. Une valeur de 1 (10 msec) est recommandée.

**Loc** : Entrez l'espace mémoire (*Location*) de la centrale de mesure, qui sera utilisé pour stocker la mesure. La période est fournie en  $\mu\text{s}$ .

Un espace mémoire est une place de la mémoire de la centrale de mesure, qui est utilisée pour un stockage intermédiaire, avant qu'elle ne serve pour un calcul intermédiaire, une ré-écriture (sur cette même mémoire d'entrée) ou un stockage en mémoire finale. Un espace mémoire est alloué à chaque mesure effectuée par le programme de la centrale d'acquisition. Des espaces mémoire supplémentaires peuvent être créés par l'utilisateur.

**Mult** : Ceci est le facteur par lequel la valeur mesurée est multipliée (*multiplicateur*).

Le multiplicateur est souvent utilisé dans un but de mise à l'échelle, ou pour convertir une valeur à une grandeur physique différente.

**Offset** : Ceci est une constante qui est ajoutée à la valeur de l'espace mémoire. Un offset de 0 n'a donc aucun effet sur la valeur de l'espace mémoire.

L'offset est souvent utilisé dans un but de mise à l'échelle, ou pour convertir une valeur à une grandeur physique différente.

Avec un multiplicateur de 1 et un offset de 0, la P27 donne un résultat en période en µsec ou en fréquence en kHz, selon l'option choisie au paramètre 2.

## 5.4 Exemples de programmes pour la CS616

Tableau 2 Exemple de programme pour CS616	
Numéro de l'exemple de programme	Description du programme
1	Lire le signal en sortie de la CS616 quand le drapeau 1 est activé, en utilisant l'instruction 138 de la CS616, puis convertir la valeur en TVE (Teneur Volumique en Eau).
2	Toutes les 5 minutes, ce programme mesure la période en sortie de la CS616 avec l'instruction 27, puis convertit la valeur en TVE. Il sauvegarde la moyenne des valeurs en mémoire finale une fois par heure.
3	Lecture de la tension batterie et de 3 CS616, une fois par heure. Convertit la période des CS616 en TVE. Sauvegarde la moyenne des valeurs horaires en mémoire finale toutes les 4 heures.
4	Mesure la température du sol et le signal en sortie d'une CS616 toutes les 4 heures. Le programme corrige la valeur du signal de la CS616 en fonction de la température, et sauvegarde le résultat en mémoire finale.
5	Mesure une fois par heure la tension de la batterie et la température interne de la centrale de mesure, ainsi que 48 CS616 connectées à un AM16/32A.

### 5.4.1 Exemple n°1

Le drapeau 1 est utilisé afin de lire le signal en sortie de la CS616 via l'instruction 138, et pour convertir la période en teneur volumique en eau.

CS616	CR10X
Vert	Voie unipolaire n° 1 (SE 1)
Orange	Port de contrôle n° 1 (C1)

Le fil rouge est relié au 12V, et le fil noir et le blindage sont connectés à la masse.

```

;{CR10X}
;
; Mettre le drapeau 1 à l'état haut afin de lire la teneur en eau
; Le résultat est visible en mémoire d'entrée uniquement
*Table 1 Program
01 :1      Execution interval (seconds)

1: If Flag/Port (P91)
1: 11      Do if Flag 1 is High
2: 30      Then Do

2: CS616 Water Content Reflectometer (P138)
1: 1       Reps
2: 1       SE Channel
3: 1       C1 ;C1 est le premier port de contrôle utilisé
4: 1       Loc [ periode ]
5: 1.0     Mult
6: 0.0     Offset

3: Polynomial (P55)
1: 1       Reps
2: 1       X Loc [ periode ]
3: 2       F(X) Loc [ TVE ]
4: -0.0663 C0
5: -0.0063 C1
6: 0.0007 C2
7: 0.0     C3
8: 0.0     C4
9: 0.0     C5

4: Do (P86)
1: 21      Set Flag 1 Low

5: End (P95)

*Table 2 Program
02 :0      Execution Interval (seconds)

*Table 3 Subroutines

End Program

-Input Locations-
1 periode  1 0 1
2 TVE      1 0 1

```

### 5.4.2 Exemple n°2

Toutes les 5 minutes, il y aura la mesure de la CS616 avec l'instruction 27, puis conversion en TVE (Teneur Volumique en Eau). Chaque heure, la centrale d'acquisition enregistre la moyenne de la valeur mesurée.

CS616	CR10X
Vert	Voie unipolaire n° 1 (SE 1)
Orange	Port de contrôle n° 1 (C1)

Le fil rouge est relié au 12V, et le fil noir et le fil de blindage sont connectés à la masse.

```

;{CR10X}
;
*Table 1 Program
01 :300      Execution interval (seconds)

1: Do (P86)          ; On active la sonde CS616
1: 41      Set Port 1 High

2: Period Average (SE) (P27)
1: 1      Reps
2: 4      200 kHz Max Freq @ 2 V Peak to Peak, Period Output
3: 1      SE Channel
4: 100    No. of Cycles
5: 1      Timeout (units = 0.01 seconds)
6: 1      Loc [ periode ]
7: 1.0    Mult
8: 0.0    Offset

3: Polynomial (P55)
1: 1      Reps
2: 1      X Loc [ periode ]
3: 2      F(X) Loc [ TVE ]
4: -0.0663 C0
5: -0.0063 C1
6: 0.0007 C2
7: 0.0    C3
8: 0.0    C4
9: 0.0    C5

4: Do (P86)          ; Désactivation de la sonde CS616
1: 51      Set Port 1 Low

5: If time is (P92); Enregistrement des données toutes les heures
1: 0      Minutes (Seconds --) into a
2: 60     Interval (same units as above)
3: 10     Set Output Flag High (Flag 0)

6: Real Time (P77)
1: 1220   Year,Day,Hour/Minute (midnight = 2400)

7: Average (P71)
1: 1      Reps
2: 2      Loc [ TVE ]

```



\*Table 2 Program  
02 :0 Execution Interval (seconds)

\*Table 3 Subroutines

End Program

-Input Locations-  
1 periode 1 1 1  
2 TVE 1 1 1

### 5.4.3 Exemple n°3

Ce programme lit la valeur de la tension batterie ainsi que celle de 3 CS616. Les fils de mise en fonctionnement des CS616 sont reliés à des ports de contrôle consécutifs afin d'utiliser l'incrément automatique. Le programme convertit les valeurs de période en teneur volumique en eau, et sauvegarde la moyenne des valeurs horaires, une fois toutes les 4 heures.

CS616	CR10X
Vert	Voie unipolaire n° x (SE x)
Orange	Port de contrôle n° y (C y)

x = 1, 2, 3 pour les signaux en sortie des 3 CS616

y = 6, 7, 8 pour les fils de mise en fonctionnement des 3 CS616

Les fils rouges sont reliés au 12V, et les fils noirs et les blindages sont connectés à la masse.

```
;{CR10X}
```

```
;
```

```
*Table 1 Program  
01 :3600 Execution interval (seconds)
```

```
1: Batt Voltage (P10)
```

```
1: 7 Loc [ Batterie ]
```

```
2: CS616 Water Content Reflectometer (P138)
```

```
1: 3 Reps
```

```
2: 1 SE Channel
```

```
3: 6 C6 is first of sequential Control Ports used
```

```
4: 1 Loc [ periode_1 ]
```

```
5: 1.0 Mult
```

```
6: 0.0 Offset
```

```

3: Polynomial (P55)
  1: 1    Reps
  2: 1    X Loc [ periode_1 ]
  3: 4    F(X) Loc [ TVE_1 ]
  4: -0.0663 C0
  5: -0.0063 C1
  6: 0.0007 C2
  7: 0.0   C3
  8: 0.0   C4
  9: 0.0   C5

4: If time is (P92)
  1: 0000  Minutes (Seconds --) into a
  2: 240   Interval (same units as above)
  3: 10    Set Output Flag High (Flag 0)

5: Average (P71)
  1: 4    Reps
  2: 4    Loc [ TVE_1 ]

*Table 2 Program
02 :0    Execution Interval (seconds)

*Table 3 Subroutines

End Program

-Input Locations-
1 periode_1  5 1 1
2 periode_2  9 1 1
3 periode_3 17 1 1
4 TVE_1      5 1 1
5 TVE_2      9 1 1
6 TVE_3     17 1 1
7 batterie   1 0 1
    
```

#### 5.4.4 Exemple n°4

On mesure la température du sol avec une 107, et la période en sortie de la CS616 toutes les 4 heures. On corrige la période de la sonde en fonction de la température, et on enregistre les résultats en mémoire finale.

Fil du capteur	CR10X
Vert de la CS616	Voie unipolaire n°2 (SE 2)
Orange de la CS616	Port de contrôle n°4 (C4)
Rouge de la 107	Voie unipolaire n° 1 (SE 1)
Noir de la 107	Excitation 1 (E1)
Violet de la 107	Masse analogique (AG)
Clair de la 107	Masse (G)

Les fils rouges sont reliés au 12V, et les fils noirs à la masse.

```
};{CR10X}
```

```
;
```

```
*Table 1 Program
```

```
01 :60 Execution interval (seconds)
```

```
1: Z=F (P30) ;Configuration de la température de référence pour la
```

```
1: 20 F ; correction en température
```

```
2: 0 Exponent of 10
```

```
3: 2 Z Loc [ Tref ]
```

```
2: If time is (P92)
```

```
1: 0 Minutes (Seconds --) into a
```

```
2: 240 Interval (same units as above)
```

```
3: 30 Then Do
```

```
3: Temp (107) (P11)
```

```
1: 1 Reps
```

```
2: 1 SE Channel
```

```
3: 1 Excite all reps w/E1
```

```
4: 1 Loc [ Tsol ]
```

```
5: 1.0 Mult
```

```
6: 0.0 Offset
```

```
4: CS616 Water Content Reflectometer (P138)
```

```
1: 1 Reps
```

```
2: 2 SE Channel
```

```
3: 4 C4 is first of sequential Control Ports used
```

```
4: 3 Loc [ CS616 ]
```

```
5: 1.0 Mult
```

```
6: 0.0 Offset
```

```
5: Polynomial (P55)
```

```
1: 1 Reps
```

```
2: 3 X Loc [ CS616 ]
```

```
3: 4 F(X) Loc [ TempCS616 ]
```

```
4: 0.526 C0
```

```
5: -0.052 C1
```

```
6: 0.00136 C2
```

```
7: 0.0 C3
```

```
8: 0.0 C4
```

```
9: 0.0 C5
```

```
6: Z=X-Y (P35)
```

```
1: 2 X Loc [ Tref ]
```

```
2: 1 Y Loc [ Tsol ]
```

```
3: 5 Z Loc [ TFacteur ]
```

```

7: Z=X*Y (P36)
1: 5    X Loc [ TFacteur ]
2: 4    Y Loc [ TempCS616 ]
3: 4    Z Loc [ TempCS616 ]

8: Z=X+Y (P33)
1: 3    X Loc [ CS616 ]
2: 4    Y Loc [ TempCS616 ]
3: 6    Z Loc [ NvlCS616 ]

9: Polynomial (P55)
1: 1    Reps
2: 6    X Loc [ NvlCS616 ]
3: 7    F(X) Loc [ TenEau ]
4: -0.0663 C0
5: -0.0063 C1
6: 0.0007 C2
7: 0.0  C3
8: 0.0  C4
9: 0.0  C5

10: Do (P86)
1: 10   Set Output Flag High (Flag 0)

11: Real Time (P77)
1: 0220 Day,Hour/Minute (midnight = 2400)

12: Sample (P70)
1: 1    Reps
2: 7    Loc [ TenEau ]

13: End (P95)

*Table 2 Program
02 :0   Execution Interval (seconds)

*Table 3 Subroutines

End Program

-Input Locations-
1 Tsol      1 1 1
2 Tref      1 1 1
3 CS616     1 2 1
4 TempCS616 1 2 2
5 Tfacteur  1 1 1
6 NvlCS616  1 1 1
7 TenEau    1 1 1

```

### 5.4.5 Exemple n°5

Mesure une fois par heure la tension de la batterie et la température interne de la centrale de mesure, ainsi que 48 CS616. L'interrupteur (Switch) de L'AM16/32A est configuré en « 4x16 ». On peut déclencher la prise de mesure manuellement en activant le drapeau 1.

Côté fil des capteurs	AM16/32A	CR10X
Fil vert CS616_1	1H	
Fil vert CS616_2	1L	
Fil vert CS616_3	2H	
Fil orange CS616 1 à 3	2L	
Fil vert CS616_4	3H	
Fil vert CS616_5	3L	
Fil vert CS616_6	4H	
Fil orange CS616 4 à 6	4L	
...	...	
Fil vert CS616_46	31H	
Fil vert CS616_47	31L	
Fil vert CS616_48	32H	
Fil orange CS616 46 à 48	32L	
	RES	C1
	CLK	C2
	COM ODD H	SE1
	COM ODD L	SE2
	COM EVEN H	SE3
	COM EVEN L	C3

```
};{CR10X}
```

```
;
```

```
*Table 1 Program
```

```
01 :60 Execution interval (seconds)
```

```
1: Batt Voltage (P10)
```

```
1: 1 Loc [ batterie ] ; mesure de la tension batterie
```

```
2: Internal Temperature (P17)
```

```
1: 2 Loc [ tempInt ] ; mesure de la température interne
```

```
3: If time is (P92)
```

```
1: 0 Minutes (Seconds --) into a
```

```
2: 60 Interval (same units as above)
```

```
3: 11 Set Flag 1 High ; active la boucle du multiplexeur une fois par heure
```

```
4: If Flag/Port (P91)
```

```
1: 11 Do if Flag 1 is High
```

```
2: 30 Then Do ; permet d'activer le multiplexeur via le drapeau 1
```

5: Do (P86)  
1: 41 Set Port 1 High ; port de contrôle (Reset) activé

6: Beginning of Loop (P87)  
1: 0 Delay  
2: 16 Loop Count ; répète 16 fois les instructions de la boucle

7: Step Loop Index (P90)  
1: 3 Step ; incrémentation des espaces mémoire de "+3" par boucle

8: Do (P86)  
1: 72 Pulse Port 2 ; impulsion (clock) pour changer de block

9: CS616 Water Content Reflectometer (P138)  
1: 3 Reps  
2: 1 SE Channel  
3: 13 All reps use C3  
4: 3 -- Loc [ Period\_1 ]  
5: 1.0 Mult  
6: 0.0 Offset ; mesure de 3 CS616 par bloc  
; A noter l'importance des «--» en face de la Loc (mémoire d'entrée)!  
; Utilisez « F4 » dans Edlog !

10: End (P95) ; fin de la boucle

11: Do (P86)  
1: 21 Set Flag 1 Low ; désactivation du drapeau 1

12: End (P95) ; fin de l'instruction « Do » / « End »

13: Do (P86)  
1: 51 Set Port 1 Low ; on désactive le drapeau 1

14: Polynomial (P55)  
1: 48 Reps  
2: 3 X Loc [ Period\_1 ]  
3: 52 F(X) Loc [ TVE1 ]  
4: -0.0663 C0  
5: -0.0063 C1  
6: 0.0007 C2  
7: 0.0 C3  
8: 0.0 C4  
9: 0.0 C5 ; conversion des 48 mesures de période, en TVE

15: If time is (P92)  
1: 0000 Minutes (Seconds --) into a  
2: 240 Interval (same units as above)  
3: 10 Set Output Flag High (Flag 0) ; enregistrement toutes les 4 heures

16: Real Time (P77)  
1: 1220 Year,Day,Hour/Minute (midnight = 2400) ; horodatage

17: Average (P71)  
1: 2 Reps  
2: 1 Loc [ batterie ] ; moyenne des espaces mémoire 1 & 2

18: Average (P71)  
 1: 48 Repts  
 2: 52 Loc [ TVE1 ] ; moyenne des espaces mémoire 52 à 99

\*Table 2 Program  
 02 :0 Execution Interval (seconds)

\*Table 3 Subroutines

End Program

-Input Locations-

1 batterie	1 1 1
2 tempInt	1 1 1
3 Period_1	7 1 1
4 Period_2	11 1 1
.	.
.	.
50 Period_48	19 1 1
51 _____	0 0 0
52 TVE1	5 1 1
53 TVE2	9 1 1
.	.
.	.
99 TVE48	17 1 1

## 5.5 Mesure de la CS625 sur la CR200, avec l'instruction PeriodAvg

L'instruction PeriodAvg est utilisée afin de mesurer la période (en microsecondes) ou le fréquence (en kHz) du signal d'une voie unipolaire. Cette instruction peut être utilisée pour mesurer la sonde CS625.

PeriodAvg (Dest, SEChan, Option, Cycles, Timeout, Port, Mult, Offset)

**Dest** : Le paramètre de destination est la variable dans laquelle on stocke la mesure.

**SE Channel** : La valeur de l'argument de SEChan, est le numéro de la voie unipolaire sur lequel est effectué la mesure. Les options valides sont comprises entre 1 et 4. C'est alors le fil vert qui est connecté à la voie unipolaire.

**Option** : Le code d'Option permet de spécifier un signal de sortie en fréquence ou en période.

Code	Description
0	Le signal retourné est la période (en µsec)
1	Le signal retourné est la fréquence (en Hz)

Le code 0 est le plus souvent utilisé avec la CS625, avec un multiplicateur égal à 1 (voir plus bas).

**Cycles** : Le nombre de cycles entré ici, spécifie le nombre de cycles à moyenner lors de chaque scrutation. Le nombre de cycles spécifié est temporisé par une résolution de 70ns, ce qui donne une résolution de mesure de période qui est égale à 70ns, divisé par le nombre de cycles mesurés. Pour la CS625, on recommande un nombre de 10 cycles.

**Timeout** : Le paramètre de Timeout est la durée maximum, en milisecondes, que la centrale de mesure attendra, pour que le nombre de cycles soient mesurés afin de calculer la moyenne. Une valeur de « hors étendue de mesure » (*overrange*) sera enregistrée, si le Timeout est dépassé. Si on a entré 10 cycles au dessus, il est recommandé de mettre 1 comme Timeout.

**Port** : Le paramètre de Port est le port de contrôle ou la voie analogique qui sera utilisée afin de commuter la sonde CS625. Les options valides sont :

Code	Description
0	Aucun
C1	Port ce contrôle C1
C2	Port ce contrôle C2
3	Voie analogique 3
4	Voie analogique 4
5	Voie analogique 5
P_SW	Voie analogique 6/P_SW

**Mult, Offset** : Les paramètres de multiplicateur et d'Offset sont des constantes, des variables, des lignes de données ou des expressions permettant de mettre à l'échelle la mesure brute. Il est recommandé d'utiliser un multiplicateur de 1 afin de garder la période de la CS625 en microsecondes.

## 5.6 Exemple de programmes pour la CS625

Tableau 3 Exemple de programme pour CS625	
Numéro de l'exemple de programme	Description du programme
1	Mesure horaire de la température avec la sonde 109 et de 4 sondes CS625. On stocke la moyenne des mesures une fois toutes les 4 heures.
2	On mesure la température d'une 109 et on s'en sert pour corriger la période d'une CS625. Un utilise l'équation de étalonnage standard afin de convertir la période corrigée en température, en teneur volumique en eau. Les capteurs sont lus de façon horaire et les moyennes de la teneur en eau et de la température sont enregistrées en mémoire finale toutes les 4 heures.



### 5.6.1 Exemple n°1

Mesure horaire de la température avec la sonde 109 et de 4 sondes CS625. On stocke la moyenne des mesures une fois toutes les 4 heures.

<b>Fils de la CS625</b>	<b>CR200</b>
Vert(s)	Voies unipolaires 1 à 4 (SE1 à SE4)
Noir(s)	Bornes de terre associées aux voies SE
Orange(s)	Port de contrôle 1 (C1)
Rouge(s)	Borne SW Battery
Clair(s)	Borne G
<b>Fils de la sonde 109</b>	<b>CR200</b>
Noir	Excitation commutée n° 1 (EX1)
Rouge	Voie unipolaire 5 (SE5)
Violet	Borne G
Clair	Borne G

'Programme de CR200 afin de lire 4 CS625s et 1 109 (sonde te température).  
 'Étalonnage standard afin de convertir le signal de période en sortie de la CS625,  
 'en teneur volumique en eau  
 'Les capteurs sont lus toutes les heures et la moyenne de la teneur en eau  
 'et de la température, sont sauvegardées toutes les 4 heures.

' Déclaration des variables

Public temperature  
 Dim period(4),vwc(4)  
 Dim i

'Déclaration des constantes

Const a0=-0.0663  
 Const a1=-0.0063  
 Const a2=0.0007

'On définit les tableaux de sauvegarde ( Data Tables)

DataTable (ofile,1,10)  
 DataInterval (0,4,hr)  
 Average(1,temperature,0)  
 Average (1,vwc,0)  
 EndTable

```
'Programme principal
BeginProg
  Scan (1,hr)
  Therm109 (temperature,1,5,Ex1,1.0,0)
  SWBatt (1 )
  For i=1 To 4
    PeriodAvg (period(i),1,0,10,10,C1,1,0)
    vwc(i) = a0 + a1*period(i) + a2*period(i)^2
  Next i
  CallTable ofile
  NextScan
EndProg
```

### 5.6.2 Exemple n°2

On mesure la température d'une 109 et on s'en sert pour corriger la période d'une CS625. On utilise l'équation d'étalonnage standard afin de convertir la période corrigée en température, en teneur volumique en eau. Les capteurs sont lus de façon horaire et les moyennes de la teneur en eau et de la température sont enregistrées en mémoire finale toutes les 4 heures.

<b>Fils de la CS625</b>	<b>CR200</b>
Vert	Voies unipolaires 1
Noir	Bornes de terre associées à SE1
Orange	Port de contrôle 1 (C1)
Rouge	Borne SW Battery
Clair	Borne G
<b>Fils de la sonde 109</b>	<b>CR200</b>
Noir	Excitation commutée n° 1 (EX1)
Rouge	Voie unipolaire 5 (SE5)
Violet	Borne G
Clair	Borne G

'Programme de CR200 afin de lire 1 CS625s et 1 109 (sonde de température).  
 'On utilise la température afin de corriger la période de la CS625.  
 'L'étalonnage standard est utilisé afin de convertir le signal de période en sortie  
 'de la CS625, en teneur volumique en eau  
 'Les capteurs sont lus toutes les heures et la moyenne de la teneur en eau  
 'et de la température, sont sauvegardées toutes les 4 heures.

```
' Déclaration des variables
Public Tsoil
Public uncorrected,corrected
Public vwc
```

```

'Déclaration des constantes
'Constantes de étalonnage pour la teneur en eau
Const a0=-0.0663
Const a1=-0.0063
Const a2=0.0007

'Constantes de correction de la température
Const t0=0.526
Const t1=-0.052
Const t2=0.00136

'Température de référence
Const Tref=20

'Définition des tableaux de données
DataTable (ofile,1,10)
    DataInterval (0,4,hr)
    Average(1,Tsoil,0)
    Average (1,vwc,0)
EndTable

'Programme principal
BeginProg
    Scan (1,hr)
    Therm109 (Tsoil,1,5,Ex1,1.0,0)
    SWBatt (1)
    PeriodAvg (uncorrected,1,0,10,10,C1,1,0)
    SWBatt (0)
    corrected=uncorrected+(Tref-Tsoil)*(t0+t1*uncorrected+t2*uncorrected^2)
    vwc = a0 + a1*corrected + a2*corrected^2
    CallTable ofile
NextScan
EndProg

```

## 5.7 Exemple de programme pour CR8xx et autres CRxxx

Avec les CR800/850 et autres CR1000, CR3000, CR5000, on utilise l'instruction dédiée appelée « CS616 ».

Cette instruction mesure par défaut la période en milliseconde. On appliquera le polynôme de régression pour convertir la variable mesurée en TVE.

L'exemple qui suit est directement extrait de Short Cut, le logiciel d'aide à la programmation de Campbell Scientific. Il est valable pour une sonde CS616 connectée sur le bornier de la CR3000. Des adaptations sont nécessaires lors d'utilisation du multiplexeur AM16/32A.

```

'CR3000
'Created by Short Cut (2.5)

'Declare Variables and Units
Public Batt_Volt
Public VW
Public PA_uS

Units Batt_Volt=Volts
Units PA_uS=uSec

```

```
'Define Data Tables
DataTable(Table2,True,-1)
DataInterval(0,1440,Min,10)
Minimum(1,Batt_Volt,FP2,False,False)
Sample (1,VW,FP2)
EndTable

'Main Program
BeginProg
Scan(5,Sec,1,0)
    'Default Datalogger Battery Voltage measurement Batt_Volt:
    Battery(Batt_Volt)
    'CS616 Water Content Reflectometer measurements VW and PA_uS:
    CS616(PA_uS,1,1,1,1,0)
    VW=-0.0663+(-0.0063*PA_uS)+(0.0007*PA_uS^2)
    'Call Data Tables and Store Data
    CallTable(Table2)
NextScan
EndProg
```

## 6. Méthode de mesure de la teneur volumique en eau, pour les réfectomètres

### 6.1 Description de la méthode de mesure

La méthode utilisée pour la mesure de la teneur volumique en eau, est une mesure indirecte qui est sensible à la permittivité diélectrique de matériau qui entoure les tiges du capteur. Si on assume que l'eau est le seul constituant du sol qui (1) a une forte valeur de permittivité diélectrique, et (2) est le seul composant différent de l'air, qui change de concentration, et bien on aboutit au fait qu'un appareil sensible à la permittivité diélectrique, peut être utilisé afin d'estimer une teneur en eau.

Le principe de fonctionnement fondamental des CS616 et CS625, est d'avoir une impulsion électromagnétique qui se propage sur la tige du capteur, à une vitesse qui dépend de la permittivité diélectrique du matériau qui entoure le capteur. Lorsque la teneur en eau augmente, la vitesse de propagation diminue car la polarisation des molécules d'eau nécessite du temps. Le temps de parcours du signal appliqué à deux fois la longueur de la tige, est essentiellement mesuré.

Le signal appliqué parcourt la longueur de la tige du capteur, est réfléchi par l'extrémité de la tige, et retourne à la tête du capteur. Une partie du circuit détecte la réflexion de l'onde, et renvoie une nouvelle impulsion.

La fréquence mesurée avec le capteur mis dans l'air, est d'environ 70 MHz. Cette fréquence est mise à l'échelle afin d'être rentrée dans la gamme des mesures de la Teneur Volumique en Eau, et afin d'être facilement mesurées par la centrale de mesure. Le signal de sortie du capteur, qui est en fréquence ou en période, est reliée de façon empirique à la teneur en eau, via une équation de étalonnage.

## 6.2 Courbes de réponse

La figure 2 montre les données d'étalonnage collectées pendant des mesures de laboratoire dans un sol avec densité apparente de  $1,4 \text{ g cm}^{-3}$  et une conductivité électrique apparente à saturation, de  $0,4 \text{ dS m}^{-1}$ . La conductivité électrique apparente de saturation de  $0,4 \text{ dS m}^{-1}$ , correspond à une conductivité électrique de laboratoire utilisant des méthodes d'extraction d'environ  $2 \text{ dS m}^{-1}$ .

La réponse est décrite de façon précise à travers toute l'étendue de mesure de la teneur en eau, par une équation quadratique. Cependant, dans l'intervalle de teneur en eau allant de 10 à 35%, la réponse peut être décrite avec un petit peu moins de précision, par une équation linéaire. L'équation quadratique fournie par le fabricant, donne une précision de +/- 2,5% de TVE pour des sols de conductivité électrique inférieure ou égale à  $0,5 \text{ dS m}^{-1}$  et une densité apparente inférieure ou égale à  $1,55 \text{ g cm}^{-3}$  dans une étendue de mesure allant de 0 à 50% de TVE.

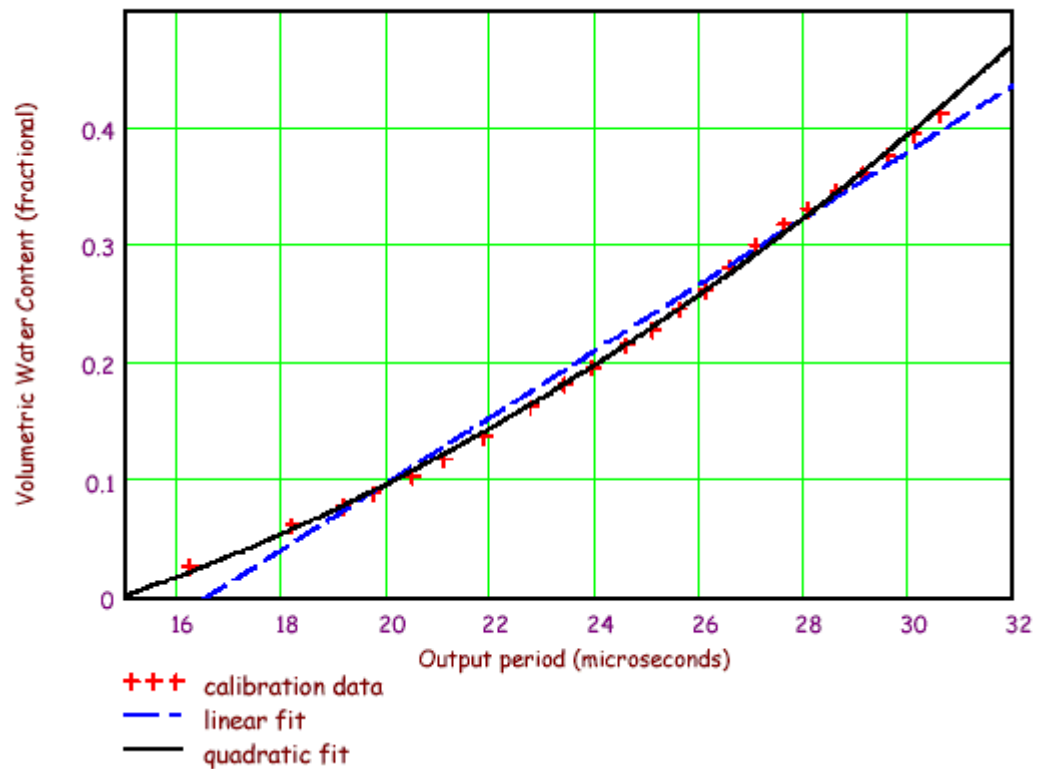


Figure 2 Étalonnage linéaire et quadratique dérivé d'un sol argileux

La figure 3 compare la réponse d'une CS616/CS625 mise dans le sol de la figure 2, à celle d'un autre sol, sablo-argileux et de densité plus forte, pour deux conductivités électriques différentes. La densité apparente des deux sols est de  $1,6 \text{ g cm}^{-3}$ . La conductivité électrique à saturation du sol marqué comme sol compacté « *compacted soil* », est de  $0,4 \text{ dS m}^{-1}$ . Le sol « *compacted soil, High EC* » avait une conductivité électrique à saturation de  $0,75 \text{ dS m}^{-1}$ .

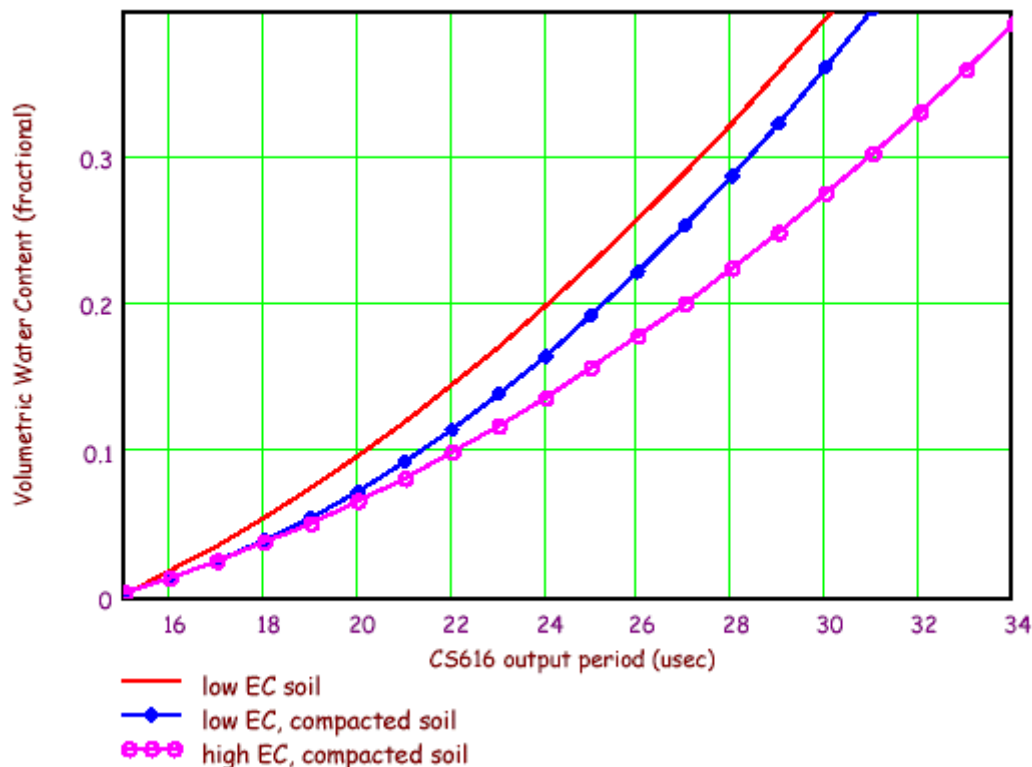


Figure 3 Réponse de la CS616/CS625 pour un sol de densité apparente de  $1,4g\text{ cm}^{-3}$  et à faible CE, un sol sablo-argileux de densité apparente de  $1,6g\text{ cm}^{-3}$  et à faible CE, et un sol sablo-argileux de densité apparente de  $1,6g\text{ cm}^{-3}$  mais avec une CE plus forte

La réponse du « *compacted soil* » montre l'effet du compactage et de la forte teneur en argile. L'atténuation du signal due au compactage ou à la plus forte teneur en argile, induit un offset dans la réponse, comme cela est montré par les courbes quasi parallèles au-delà de 10% de teneur en eau.

L'effet de l'augmentation la conductivité électrique pour le même sol, est montré par la courbe « *compacted soil, high EC* ». Une conductivité électrique plus importante induit une décroissance de la dérive de la courbe de réponse. Ceci est l'effet de l'atténuation par la phase en solution.

### 6.3 Equation d'étalonnage

Le tableau 4 liste les coefficients d'étalonnage déterminés à partir du sol de laboratoire de Campbell Scientific. Les formes quadratique et linéaire sont présentées toutes les 2. Le choix du type de coefficient à utiliser, dépend de l'étendue de mesure attendue, et de la précision souhaitée. Ces coefficients doivent fournir des valeurs précises de teneur volumique en eau dans des sols ayant une conductivité électrique apparente inférieure à  $0,5\text{ dS m}^{-1}$ , une densité inférieure à  $1,55\text{ g cm}^{-3}$ , et une teneur en argile inférieure à 30%.

Tableau 4 Coefficients d'étalonnage standard pour les formes linéaires et quadratiques				
Linéaire		Quadratique		
C0	C1	C0	C1	C2
-0,4677	0,0283	-0,0663	-0,0063	0,0007

L'équation linéaire est :

$$TVE = -0,4677 + 0,0283 * \text{période} (\mu\text{secondes})$$

L'équation quadratique est :

$$TVE = -0,0663 - 0,0063 * \text{période} + 0,0007 * \text{période}^2$$

Le résultat de ces deux équations, donne une teneur volumique en eau, sous forme de fraction. Multipliez ce résultat par 100 afin d'obtenir un pourcentage de la teneur volumique en eau.

La figure 4 montre la différence entre l'équation linéaire et l'équation quadratique, pour l'étendue de mesure habituelle. Un signal de période de CS616 / CS625 de 16µsec donne une valeur de 2% de TVE, et 32 µs donne 47,25%. La étalonnage linéaire est proche à ±1,25%, de la étalonnage quadratique, sauf pour les extrémités humides et sèches où les valeurs sont sous estimées ; au contraire à 20% de TVE, les valeurs sont surestimées autour de 1,2%.

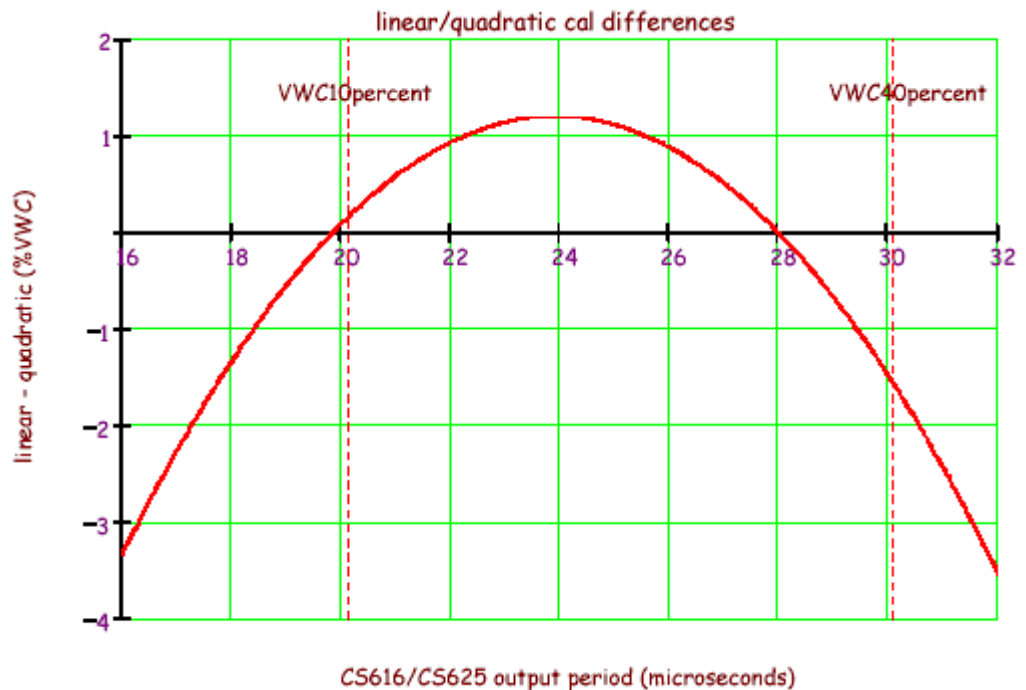


Figure 4 Différence d'étalonnage (en %) selon que l'on utilise l'équation linéaire ou quadratique



Les coefficients quadratiques et linéaires du sol sablo-argileux de la figure 3, sont données ci-dessous et peuvent être utilisés dans des sols similaires.

<b>Tableau 5 Coefficients d'étalonnage pour un sol sablo-argileux avec une densité apparente de 1,6g cm-3 et une conductivité électrique à saturation de 0,4 dS m-1 pour les formes linéaires et quadratiques</b>				
Linéaire		Quadratique		
C0	C1	C0	C1	C2
-0,6200	0,0329	0,0950	-0,0211	0,0010

<b>Tableau 6 Coefficients d'étalonnage pour un sol sablo-argileux avec une densité apparente de 1,6g cm-3 et une conductivité électrique à saturation de 0,75 dS m-1 pour les formes linéaires et quadratiques</b>				
Linéaire		Quadratique		
C0	C1	C0	C1	C2
-0,4470	0,0254	-0,0180	-0,0070	0,0006

## 6.4 Etendue de fonctionnement

### 6.4.1 Pour la conductivité électrique du sol

La qualité des mesures de teneur en eau du sol basées sur des champs électromagnétiques appliqués à des guides d'onde, est affectée par la conductivité électrique de sol. La propagation des champs électromagnétiques, pour le cas de la CS616 / CS625, est principalement affectée par le changement de la constante diélectrique due à la modification de la teneur en eau, mais elle est également affectée par la conductivité électrique. Les ions libres en solution dans le sol fournissent les chemins électriques de conduction qui ont comme conséquence l'atténuation du signal appliqué aux guides d'ondes. Cette atténuation réduit l'amplitude du signal haute fréquence sur les tiges de la sonde, et affecte la forme du signal d'oscillation. L'atténuation réduit la fréquence d'oscillation à une teneur en eau donnée parce que cela prend plus de temps pour atteindre le seuil de l'oscillateur.

Il est important de distinguer la conductivité électrique apparente du sol et la conductivité électrique de la solution du sol. La conductivité électrique de la solution du sol est la conductivité de la phase liquide du sol. La conductivité électrique de la phase en solution dans le sol,  $s_{\text{solution}}$ , peut être déterminé en laboratoire en utilisant des méthodes d'extraction pour séparer la solution du solide, puis en mesurant la conductivité électrique de la solution.

Le rapport entre la conductivité électrique apparente et en solution, peut être décrite par (Rhoades et autres, 1976)

$$s_{\text{apparente}} = s_{\text{solution}} \theta_v T + s_{\text{solide}}$$

avec  $s_{\text{apparente}}$  la conductivité électrique du sol,  $s_{\text{solution}}$  la solution du sol, et  $s_{\text{solide}}$  la partie solide du sol,  $\theta_v$  la teneur en eau volumétrique et  $T$  un coefficient de transmission spécifique au sol, sensé prendre en compte la tortuosité du chemin d'écoulement de l'eau lorsque la teneur en eau change. Voir Rhoades et al., 1989 pour une forme de cette équation qui prend en compte l'eau mobile et l'eau immobile. Cette publication discute également des propriétés du sol liées au fonctionnement de la CS616 / CS625, telles que la teneur en argile ou le tassement. L'équation ci-dessus est présentée ici pour montrer le rapport entre la conductivité électrique en solution dans le sol, et la conductivité électrique apparente du sol.

La plupart des expressions de la conductivité électrique de sol sont données en termes de conductivité de la solution ou de conductivité électrique à partir d'extrait, puisqu'elle est constante pour un sol. Les changements de conductivité électrique apparente augmentent avec la teneur en eau, de façon à ce que la comparaison de la conductivité électrique de différents sols doivent être faite à une même teneur en eau. La discussion des effets de la conductivité électrique du sol, sur les résultats de la CS616, se fera par rapport à la partie en solution dans le sol ou par rapport à un extrait de solution du sol, sauf si cela est spécifié.

Quand les valeurs de conductivité électrique de solution de sol excèdent  $2 \text{ dS m}^{-1}$ , la réponse du signal en sortie de la CS616 commence à changer. La pente diminue quand la conductivité électrique augmente. La sonde continuera à répondre aux changements de teneur en eau avec une bonne stabilité, mais l'étalonnage devra être modifié. (voir le paragraphe à propos du étalonnage.) A une conductivité électrique supérieure à  $5 \text{ dSm}^{-1}$ , le signal en sortie de la CS616 peut devenir instable.

#### **6.4.2 Matière organique du sol, teneur en argile et densité apparente**

La quantité de matière organique et d'argile contenus dans un sol, peuvent altérer la réponse de la méthode diélectrique, et modifier alors la teneur en eau. Ceci est observé lorsqu'on utilise des modèles mécaniques pour décrire cette méthode de mesure.

L'énergie électromagnétique introduite par le capteur agit de telle sorte qu'il ré-orienté ou encore polarise les molécules d'eau polaires. Si d'autres forces agissent sur les molécules d'eau polaires, la force employée par le signal appliqué sera moins à même de la polariser. Ceci a pour effet de 'cacher' une partie de l'eau au capteur. De plus, certains argiles absorbent l'eau dans les parties interstitielles, ce qui inhibe la polarisation par le champs appliqué.

La matière organique et la plupart des argiles sont fortement polarisées. Ces constituants solides peuvent influencer la réponse du capteur vis à vis de la teneur en eau, et nécessiter que l'on fasse un étalonnage spécifique. Il serait préférable que l'étalonnage du signal de sortie de teneur en eau de la CS616 / CS625 soit ajusté en prenant en compte certains paramètres du sol, reflétant alors les effets des forces intrinsèques du sol. Cependant, l'identification d'un tel paramètre n'a pas été effectuée.

On a montré que le changement de la réponse de la CS616 vis à vis de la teneur en eau, se faisait quand la densité apparente excédait  $1,5 \text{ g cm}^{-3}$ . La réponse au changement de la teneur en eau se déroule toujours bien, mais la courbe décroît lorsque la densité apparente augmente.

### **6.5 Sources d'erreur dans la mesure réflectométrique de teneur en eau**

#### **6.5.1 Erreur de variabilité entre capteurs**

Toutes les CS616s / CS625s fabriquées sont vérifiées dans un milieu standard. Les limites de la réponse du capteur dans ce milieu standard, est de +/-2% de teneur volumique en eau.

### 6.5.2 Erreur d'insertion

La méthode utilisée pour l'insertion, peut influencer la précision de la mesure. Les tiges du capteur doivent être gardées le plus proche possible de la parallèle lors de l'insertion, afin de garder la géométrie du guide d'onde. La sensibilité de cette mesure est plus grande dans la région proche de la surface des tiges, qu'à des distances éloignées de la surface. Des capteurs insérés de telle sorte qu'il y ait des bulles d'air à proximité des tiges, indiqueront des teneurs en eau inférieures à la réalité. Pour certaines applications, l'installation peut être améliorée si l'on utilise des guides d'insertion ou un outil pilote. Campbell Scientific propose les outils d'insertion 14383 ou 14384.

### 6.5.3 Erreur d'atténuation du signal

Le paragraphe 6.1 donne une description détaillée du fonctionnement de la CS616 / CS625. Pour résumer, la CS616 / CS625 est principalement sensible à la permittivité diélectrique du matériau entourant les tiges. La propagation de l'énergie électromagnétique le long des tiges du capteur, dépend des propriétés diélectriques du milieu. Quand la réflexion en bout de tiges du signal appliqué est détecté par le circuit de la CS616 / CS625, une autre impulsion est envoyée. Le temps entre les impulsions dépend du temps de programmation, et la période associée est relative à la teneur volumique en eau.

Le signal appliqué est sujet à l'atténuation du à des pertes dans le milieu mesuré. Même si cela n'affecte pas proprement dit le temps de propagation, cela engendre un délai dans la détection du signal réfléchi. L'atténuation du signal se produira s'il y a des ions libres en solution dans le sol, si des constituants polaires tels la matière organique ou l'argile, ou encore des minéraux conducteurs sont présents.

L'équation d'étalonnage générale de la CS616 / CS625 donne de bons résultats avec une atténuation équivalente à environ  $0,5 \text{ dSm}^{-1}$  de conductivité électrique apparente. Entre  $0,5$  et  $5 \text{ dS m}^{-1}$ , la CS616 continuera à donner un bon comportement en réponse aux changements de teneur en eau, mais un étalonnage pour ce sol spécifique est nécessaire. Voir le chapitre 10 pour plus d'information.

## 6.6 Dépendance à la température et correction

L'erreur de mesure sur la teneur volumique en eau due à la dépendance à la température de la CS616 / CS625, est montrée sur la figure 5. L'ampleur de la sensibilité à la température change en fonction de la teneur en eau. Des mesures en laboratoire ont été effectuées à différents taux de teneur en eau sur la plage de  $10$  à  $40$  °C, afin de déterminer une correction en température applicable sur le signal en sortie du capteur. L'équation suivante peut être appliquée afin de corriger la période brute de la CS616 / CS625,  $t_{\text{brute}}$ , et la ramener à  $20$ °C, si l'on connaît la température du sol,  $T_{\text{sol}}$ . Voir les exemples de programme de centrale de mesure. La correction en température prend pour hypothèse que la teneur en eau aussi bien que la température ne varient pas le long des tiges des capteurs.

$$t_{\text{corrigée}}(T_{\text{sol}}) = t_{\text{brute}} + (20 - T_{\text{sol}}) * (0,526 - 0,052 * t_{\text{brute}} + 0,00136 * t_{\text{brute}}^2)$$

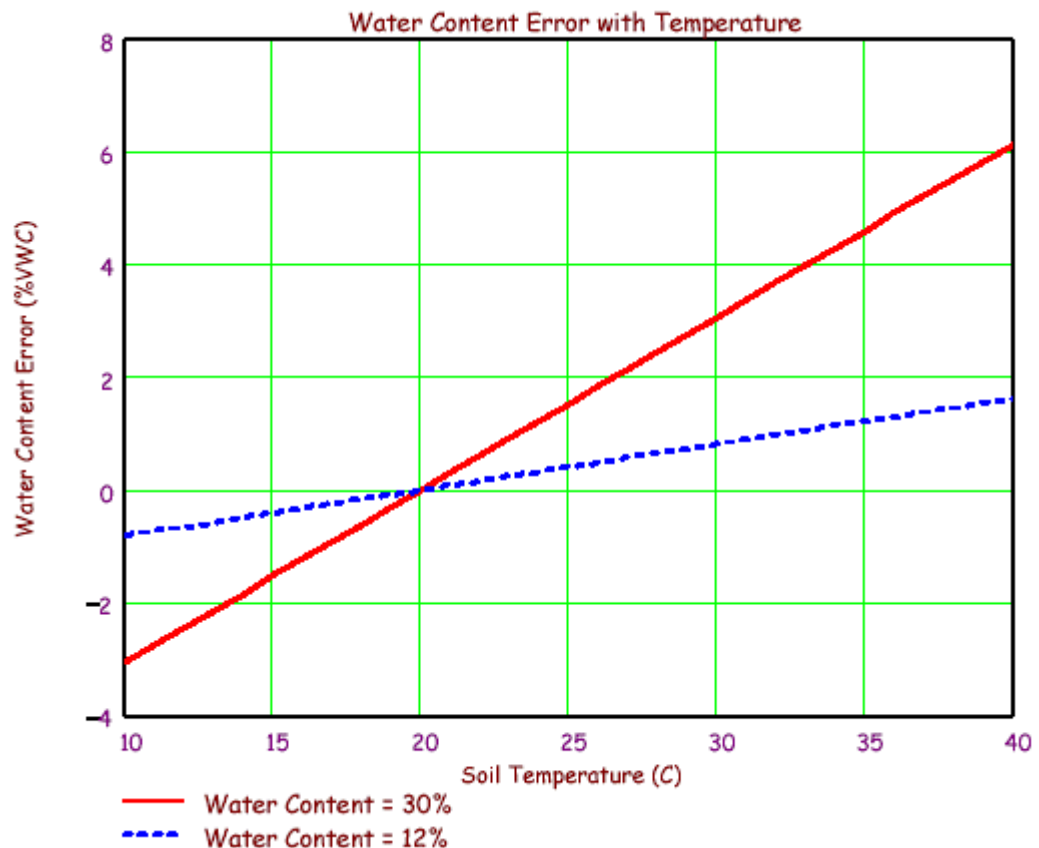


Figure 5 Erreur de pourcentage de teneur en eau volumique corrigée par l'équation de correction de température

## 7 Etalonnage du réflectomètre par l'utilisateur

### 7.1 Atténuation du signal dans les sols conducteurs, et nécessité d'effectuer un étalonnage spécifique

Un décalage de la réponse du réflectomètre survient si le signal est atténué de façon significative. Il y a un potentiel électrique entre les tiges du capteur lorsqu'une impulsion leur est appliquée. Si le matériel présent entre les tiges, est un conducteur électrique, alors le signal est atténué. Etant donné que la forme parallèle des tiges dessine un milieu dans lequel il y a des pertes de façon inhérente, et vu que l'atténuation dépend de la fréquence, l'amplitude de la réflexion ainsi que le temps de montée de la bande passante sont tous les deux affectés. Donc à la place d'un temps relativement court pour le retour de l'impulsion, le temps de montée est supérieur et l'amplitude est moindre.

Le signal réfléchi doit excéder l'amplitude fixée avant que l'impulsion suivante ne soit induite. Les réflexions qui sont atténuées ou qui ont un temps de montée plus long, prendront plus de temps à être détectées et à déclencher la prochaine émission d'onde, induisant une fréquence plus faible ou une période plus importante à l'intérieur du matériau conducteur.

Certaines argiles naturelles sont très polarisables et/ou conductrices, et atténueront aussi le signal appliqué. De plus, si le sol argileux est compacté, la conductivité apparente est augmentée et la réponse est atténuée.

Vu la description ci-dessus de la modification de la réponse, pour la CS616 / CS625 mise à l'intérieur d'un milieu qui atténue le signal, la précision de la teneur volumique en eau mesurée peut être optimisée en caractérisant la réponse du capteur à l'intérieur du milieu mesuré. Le résultat est une équation d'étalonnage spécifique pour un capteur particulier à l'intérieur d'un milieu particulier.

La précision et la résolution du réflectomètre ne sont pas affectés par l'atténuation du milieu. La précision et la résolution sont toutes deux meilleures que 0,1% de la teneur volumique en eau.

## 7.2 Equation d'étalonnage de l'utilisateur

La réponse en sortie du capteur, en fonction de la teneur en eau, est bien décrite par une équation quadratique, et dans beaucoup de cas, une équation linéaire donne une précision acceptable.

La forme quadratique est :  $\theta_v(\tau) = C_0 + C_1 * \tau + C_2 * \tau^2$

Avec ( $\theta_v$ ) la teneur volumique en eau ( $m^3 m^{-3}$ ),  $\tau$  la période de la CS616 (en microsecondes),  $C_n$  le coefficient d'étalonnage (avec n allant de 0 à 2). Les coefficients d'étalonnage sont dérivés par rapport à une courbe étalonnée, de teneurs en eau et de périodes de CS616 connues.

La forme linéaire est :  $\theta_v(\tau) = C_0 + C_1 * \tau$

Avec ( $\theta_v$ ) la teneur volumique en eau ( $m^3 m^{-3}$ ),  $\tau$  la période de la CS616 (en microsecondes),  $C_0$  l'ordonnée à l'origine, et  $C_1$  coefficient de la courbe.

Deux points de mesure pris avec soin peuvent être suffisant pour déterminer un étalonnage linéaire. Un minimum de 3 points est nécessaire pour une équation quadratique. Avec 3 points de mesure espacés de façon régulière sur l'étendue de mesure attendue, le point de mesure du milieu de la gamme indiquera si l'équation quadratique ou l'équation linéaire est nécessaire.

Remarquez, qu'à partir des figures 2 et 3, que la fonction de étalonnage décrivant la réponse de la CS616 / CS625 vis à vis de la teneur en eau, est toujours concave. Si les données d'étalonnage suggèrent une forme différente, il est fort possible qu'il y ait un problème avec les données ou bien la méthode utilisée.

## 7.3 Récupération de données de laboratoire pour l'étalonnage

Les données nécessaires pour l'étalonnage des CS616 / CS625, sont la période de la CS616 / CS625 (en microsecondes), et la teneur en eau déterminée de façon indépendante. A partir de ces données, la réponse du capteur vis à vis du changement de la teneur en eau, peut être décrit par une équation quadratique de la forme :

$$\theta_v(\tau) = C_0 + C_1 * \tau + C_2 * \tau^2$$

Avec ( $\theta_v$ ) la teneur volumique en eau ( $m^3 m^{-3}$ ),  $\tau$  la période de la CS616 (en microsecondes),  $C_n$  le coefficient de étalonnage (avec n allant de 0 à 2).

La forme linéaire est :  $\theta_v(\tau) = C_0 + C_1 * \tau$

Avec ( $\theta_v$ ) la teneur volumique en eau ( $m^3 m^{-3}$ ),  $\tau$  la période de la CS616 (en microsecondes),  $C_0$  l'ordonnée à l'origine, et  $C_1$  coefficient de la courbe.

Le matériel nécessaire est :

- 1- Une CS616 / CS625 reliée à une centrale de mesure programmée afin de mesurer la période du signal.
- 2- Un appareil pour prendre un échantillon de sol afin de déterminer le volume de l'échantillon et d'en déduire la densité apparente.
- 3- Un conteneur et une balance afin de mesurer le poids de l'échantillon.
- 4- Un four pour sécher l'échantillon (un four micro-ondes peut aussi être utilisé).

Les coefficients d'étalonnage sont déduits à partir de la courbe de teneur en eau, et de la période du capteur. Le nombre de points de mesure nécessaires pour établir l'équation, dépend de la précision que l'on souhaite avoir (au choix de l'utilisateur : la régression linéaire ou quadratique). Regardez sur les figures 2 et 3, la plage de mesure dans laquelle vous vous attendez à avoir des mesures. Si la réponse attendue est dans la partie linéaire, moins de points de mesure en laboratoire, seront nécessaire pour déterminer l'équation d'étalonnage. Une réponse linéaire est mieux décrite par des points de mesure pris aux extrémités attendues (pour la valeur sèche et humide) de teneur en eau.

Le volume sensible à la mesure entourant la sonde, doit être entièrement occupé par le sol à étalonner. Seul ce sol devrait être présent dans les 65 mm autour de la surface des tiges. Les tiges du capteur peuvent être enterrées dans une colonne de sol qui est sec ou quasiment sec. Le sol sera homogène autour des tiges du capteur, s'il est mis en place autour des tiges lorsqu'il est sec. Ainsi, un tube fermé, en PVC, de diamètre de 10cm et de longueur de 35cm, peut alors être utilisé comme conteneur.

Il est important que la densité apparente du sol utilisé pour l'étalonnage, soit similaire à la densité apparente du sol non perturbé. Quand on utilise un sol sec sans le compacter, on obtient une densité apparente généralement comprise entre 1,1 et 1,4  $g cm^{-3}$ . Il est important que la densité apparente du sol utilisé pour l'étalonnage, soit similaire à celle du sol non perturbé, surtout pour des densités apparentes supérieures à 1,55  $g cm^{-3}$ . Il peut être alors nécessaire de compacter le sol afin d'obtenir une densité apparente similaire à celle du sol non perturbé.

La méthode généralement utilisée pour remplir un conteneur de sol, afin d'uniformiser la densité apparente, consiste à séparer le sol de façon grossière en 3 parties, et d'ajouter une portion de sol pour la compaction. On place dans le conteneur la première partie de la couche du sol, de façon uniforme. On compacte le sol en tapotant la surface, pour l'amener au niveau attendu pour la densité apparente souhaitée. On fait de même pour les couches 2 et 3 ; avant de mettre une couche supérieure de sol, on fait des stries à la surface de la couche précédente.

Le conteneur rempli de sol lors d'étalonnage, doit être assez large pour que les tiges de la sonde soient séparées de la surface du conteneur, d'au moins 2cm.

Fermez le conteneur aussi uniformément que possible vis à vis de la densité apparente, avec un sol relativement sec (moins de 10% de teneur volumique en eau).

Les tiges du capteur peuvent être enterrées dans une couche de terre ou dans une colonne. Si vous utilisez une colonne, insérez doucement les tiges de la sonde depuis la surface, jusqu'à ce qu'elles soient entièrement entourées de sol. Des mouvements latéraux utilisés durant la mise en place des sondes, peuvent former une couche d'air autour de la surface des tiges, et induire une erreur de mesure.

On mesure la période de la sonde. On répète l'étape précédente et cette étape 3 ou 4 fois.

On détermine la teneur en eau en échantillonnant la colonne de sol après avoir retiré la sonde ou après avoir pesé la colonne. Si l'échantillonnage est utilisé, il faut retirer du sol de la colonne, et le re-mélanger avec les échantillons utilisés afin de déterminer la teneur volumique en eau. On referme ensuite la colonne.

De l'eau peut être ajoutée à l'extrémité supérieure du conteneur. On doit lui laisser assez de temps pour s'équilibrer avec le milieu ; on couvre le conteneur durant cette période, afin d'éviter l'évaporation. Le temps nécessaire pour équilibrer la mesure, dépend de la quantité d'eau ajoutée ainsi que des propriétés hydrauliques du sol. L'équilibre peut être observé suite à la mesure de la période de la CS616 / CS625 ; quand elle est constante, c'est que l'équilibre est atteint. On récupère alors un jeu de données d'étalonnage et on répète la procédure d'ajout d'eau si cela est nécessaire.

Quand le sol est à l'équilibre, on enregistre la valeur de la période en sortie de la CS616 / CS625.

Pour prendre des échantillons de la colonne, il faut utiliser des conteneurs de volume connu. Cela est nécessaire si l'on veut connaître la densité apparente. Des tubes de cuivre de diamètre supérieur ou égal à 1'', et de longueur d'environ 2'', sont tout à fait appropriés. Ces tubes peuvent être pressés à partir de la surface du sol.

Il est bon de prendre plusieurs échantillons dans une couche de terre, proche de la surface. 3 échantillons pris avec soin, donneront de bons résultats.

Les tubes d'échantillonnage doivent être insérés dans la surface du sol de façon uniforme. On retire le tube contenant du sol et on enlève délicatement le surplus de sol présent.

On retire tout le sol du tube et on le met sur une plaque ou un récipient qui passe au four ou au micro-onde, afin d'en connaître le poids. On pèse et on enregistre alors le poids du sol humide.

L'eau est éliminée de l'échantillon par chauffage ou passage au four à micro-ondes. Un séchage au four demande 24 heures à 105°C. Un séchage au micro-onde prend 20 minutes environ, en fonction de la puissance du four et de la teneur en eau de l'échantillon. La méthode ASTM D4643-93 demande de chauffer au micro-onde pendant 3 minutes, de refroidir dans un dessiccateur et de peser, jusqu'à ce que le poids devienne constant.

La teneur gravimétrique en eau est calculée après que le poids du conteneur soit pris en compte

$$\text{Pour } \theta_g = (m_{\text{humide}} - m_{\text{sec}}) / m_{\text{sec}}$$

$$\text{Pour la densité apparente } \rho_{\text{apparente}} = m_{\text{sec}} / \text{volume}_{\text{conteneur}}$$

Le poids sec du volume, est divisé par le volume du tube contenant l'échantillon.

La teneur volumique en eau est le produit de la teneur gravimétrique en eau par la densité apparente

$$\theta_v = \theta_g * \rho_{\text{apparente}}$$

La moyenne de teneur en eau des différents échantillons, et la période enregistrée pour la CS616, sont un couple de données à utiliser pour déterminer les coefficients de l'équation d'étalonnage.

## 7.4 Récupération de données de terrain pour l'étalonnage

Equipement nécessaire

- 1) Une CS616 / CS625 reliée à une centrale d'acquisition programmée afin de mesurer la période de la sonde
- 2) Un appareil à échantillonner cylindrique afin de déterminer le volume pour la densité apparente, soit par exemple un tube de diamètre supérieur à 1'' et de longueur d'environ 2''.
- 3) Des récipients et des plateaux afin de mesurer le poids du sol.
- 4) Un four pour sécher les échantillons (on peut utiliser un four à micro-ondes).

Les données nécessaires pour l'étalonnage de la CS616 / CS625, sont la période en sortie de la sonde ( $\mu\text{sec}$ ) et la teneur en eau déterminée de façon indépendante. A partir de ces données, la réponse du capteur en fonction de la teneur en eau, peut être décrite par une équation quadratique de la forme

$$\theta_v(\tau) = C_0 + C_1 * \tau + C_2 * \tau^2$$

Avec ( $\theta_v$ ) la teneur volumique en eau ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ),  $\tau$  la période de la CS616 / CS625 (en microsecondes),  $C_n$  le coefficient d'étalonnage (avec n allant de 0 à 2).

La forme linéaire est : 
$$\theta_v(\tau) = C_0 + C_1 * \tau$$

Avec ( $\theta_v$ ) la teneur volumique en eau ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ),  $\tau$  la période de la CS616 / CS625 (en microsecondes),  $C_0$  l'ordonnée à l'origine, et  $C_1$  coefficient de la courbe.

Les coefficients d'étalonnage sont déduits de la courbe reliant une teneur en eau connue à une période de la CS616 / CS625.



Le nombre de données nécessaire afin de déterminer la courbe, dépend de votre exigence concernant la précision de l'équation linéaire ou quadratique. Regardez la teneur en eau que l'on s'attend à avoir par rapport aux figures 2 et 3. Si elle est quasiment linéaire, il sera nécessaire d'effectuer moins de points de mesure afin de déterminer l'équation d'étalonnage. La réponse linéaire est mieux décrite lorsqu'on prend en compte les points de mesure pour la teneur en eau la plus faible et le plus forte qui sont attendus.

La récupération de mesures de périodes de CS616 / CS625, et d'échantillons correspondant à l'endroit où le capteur est présent, donneront le meilleur étalonnage possible en fonction du sol. Cependant il peut être difficile de changer intentionnellement la teneur en eau dans le profil d'un sol.

Un bloc vertical de terre peut être extrait avec à une pelle. Si la CS616 / CS625 doit être installée à 0,5 mètres de la surface, le capteur peut être mis en place dans ce bloc de terre, et de l'eau peut alors être ajoutée par percolation depuis la surface. Une fois qu'on a ajouté l'eau, on surveille la période de la CS616 / CS625 afin de déterminer si le sol environnant les tiges, est à l'équilibre.

Une fois que le sol est à l'équilibre, on enregistre la période de la CS616 / CS625.

Les propriétés hydrauliques du sol sont variables dans l'espace. Pour obtenir des mesures qui sont représentatives d'un sol à une grande échelle, il faut faire de multiples lectures et échantillonnages. La moyenne de plusieurs échantillons devrait alors être utilisée afin de calculer la teneur volumique en eau. Sinon, la CS616 / CS625 doit être mise en place au moins 3 fois dans le sol, en relevant les valeurs et en les moyennant.

Retirez la CS616 / CS625 et prenez les échantillons au niveau de là où les tiges étaient insérées. Ceci est nécessaire pour la mesure de la conductivité apparente. Vous pouvez utiliser des tubes en cuivre de diamètre 1'' et de longueur 2''. Les tubes peuvent être enfoncés depuis la surface du sol.

Il est bon de prendre plusieurs échantillons à des endroits proches de la surface de la couche de terre. Trois échantillons pris proprement donnent de bons résultats.

Les tubes d'échantillons doivent être insérés de façon uniforme à l'intérieur de la surface de sol. On enlève le tube contenant l'échantillon, et on retire délicatement l'excès de sol des extrémités. On enlève le sol présent à l'extérieur du tube.

On retire le sol présent dans le tube et on le met sur un plateau ou un récipient de poids connu, qui passe au four ou au micro ondes. On pèse et on note le poids du sol humide.

L'eau est éliminée de l'échantillon par chauffage ou passage au four à micro-ondes. Un séchage au four demande 24 heures à 105°C. Un séchage au micro-onde prend 20 minutes environ, en fonction de la puissance du four et de la teneur en eau de l'échantillon. La méthode ASTM D4643-93 demande de chauffer au micro-onde pendant 3 minutes, de refroidir dans un dessiccateur et de peser, jusqu'à ce que le poids devienne constant.

La teneur gravimétrique en eau est calculée après que le poids du conteneur soit prise en compte

$$\text{Pour } \theta_g = (m_{\text{humide}} - m_{\text{sec}}) / m_{\text{sec}}$$

Pour la densité apparente  $\rho_{\text{apparente}} = m_{\text{sec}} / \text{volume}_{\text{containeur}}$

Le poids sec du volume, est divisé par le volume du tube contenant l'échantillon.

La teneur volumique en eau est le produit de la teneur gravimétrique en eau par le densité apparente

$$\theta_v = \theta_g * \rho_{\text{apparente}}$$

La moyenne de teneur en eau des différents échantillons, et la période enregistrée pour la CS616 / CS625, sont un couple de données à utiliser pour déterminer les coefficients de l'équation d'étalonnage.

## 7.5 Calculs

Le cylindre vide utilisé pour l'échantillonnage doit être propre, et son poids ainsi que son volume doivent être mesurés. Pour un cylindre, le volume est de :

$$\text{Volume} = \Pi * (d / 2)^2 * h$$

« d » étant le diamètre interne du cylindre, et « h » étant la hauteur du cylindre.

Pendant que l'on échantillonne le sol, il est important que le support d'échantillonnage soit entièrement rempli par le sol, mais que le sol ne s'étende pas au-delà du cylindre.

Une fois que l'échantillon est pris, on met le cylindre sur un plateau dont on connaît le poids à vide. Ce plateau contiendra l'échantillon de sol durant son séchage au four. On mesure par ce biais  $m_{\text{humide}}$ .

On soustrait le poids du cylindre vide et le poids du plateau de la balance, au poids mesuré pour le cylindre rempli de terre sur la balance. On enlève toute la terre présente dans le cylindre, que l'on met sur le plateau. On sèche l'échantillon à l'aide du four ou du micro ondes, comme décrit précédemment.

Pour avoir  $m_{\text{sec}}$ , il faut peser le plateau contenant le sol après séchage. On soustrait alors le poids du plateau. On calcule la teneur gravimétrique en eau,  $\theta_g$ , à l'aide de l'équation :

$$\theta_g = (m_{\text{humide}} - m_{\text{sec}}) / m_{\text{sec}}$$

Pour obtenir la densité apparente, on utilise :

$$\rho_{\text{apparente}} = m_{\text{sec}} / \text{volume}_{\text{cylindre}}$$

La teneur volumique en eau est calculée à l'aide de :

$$\theta_v = \theta_g * \rho_{\text{apparente}}$$

## 8 Entretien

La CS616 / CS625 ne nécessite pas d'entretien périodique.

## 9. Références

Rhoades, J.D., P.A.C. Raats, and R.J. Prather. 1976. Effects of liquid-phase electrical conductivity, water content and surface conductivity on bulk soil electrical conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 40: 651-653.

Rhoades, J.D., N.A. Manteghi, P.J. Shouse, W.J. Alves. 1989. Soil electrical conductivity and soil salinity: New formulations and étalonnages. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 53:433-439.

## 10 Annexe

### Discussion à propos de la teneur volumique en eau

Le réflectomètre à teneur en eau mesure la teneur volumique en eau. La teneur en eau du sol est exprimée sur une base gravimétrique et volumétrique. Pour obtenir la teneur volumique en eau obtenue de façon indépendante, la teneur en eau gravimétrique doit être en accord avec la mesure. La teneur en eau gravimétrique ( $\theta_g$ ) est le poids en eau par poids en sol sec. Elle est calculée en pesant un échantillon de sol ( $m_{\text{humide}}$ ), en séchant cet échantillon afin de lui retirer son eau, puis en le pesant à nouveau ( $m_{\text{sec}}$ ).

$$\theta_g = m_{\text{eau}} / m_{\text{sol}} = (m_{\text{sec}} - m_{\text{humide}}) / m_{\text{sec}}$$

La teneur en eau volumique  $\theta_v$  est le volume d'eau liquide par volume de sol. Le volume est le rapport entre le poids et la densité ( $\rho_{\text{apparente}}$ ), ce qui donne :

$$\theta_v = (\text{volume}_{\text{eau}} / \text{volume}_{\text{sol}}) = (m_{\text{eau}} / \rho_{\text{eau}}) / (m_{\text{sol}} / \rho_{\text{sol}}) = (\theta_g * \rho_{\text{sol}}) / \rho_{\text{eau}}$$

La densité de l'eau est proche de 1, et elle est souvent ignorée.

La densité apparente du sol ( $\rho_{\text{apparent}}$ ) est utilisée à la place de  $\rho_{\text{sol}}$  et est le rapport du poids de l'échantillon de sol sec, sur son volume.

$$\rho_{\text{apparent}} = m_{\text{sec}} / \text{volume}_{\text{échantillon}}$$

Une autre propriété intéressante, est que la porosité du sol ( $\varepsilon$ ), est liée à la densité apparente du sol indiquée par l'expression suivante :

$$\varepsilon = 1 - (\rho_{\text{apparent}} / \rho_{\text{solide}})$$

Le terme  $\rho_{\text{solide}}$  est la densité de la fraction solide du sol et est approximativement égale à  $2.65 \text{ g cm}^{-3}$ .