Mesure de l'humidité des sols par une méthode TDR. Utilisation de la sonde de type TRIME pour la réalisation des profils hydriques : analyse des problèmes rencontrés

M. Krol

▶ **To cite this version:**

M. Krol. Mesure de l'humidité des sols par une méthode TDR. Utilisation de la sonde de type TRIME pour la réalisation des profils hydriques : analyse des problèmes rencontrés. [Stage] Faculté des Sciences. Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse (UAPV), FRA. 1999, 35 p. hal-02843105

HAL Id: hal-02843105
https://hal.inrae.fr/hal-02843105

Submitted on 7 Jun 2020

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

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

LICENCE « GESTIONNAIRES DE L'EAU »
UNIVERSITE D'AVIGNON

INRA
Unité de Science du Sol
Domaine Saint Paul
AVIGNON

Mesure de l'humidité des sols par une méthode TDR

Utilisation de la sonde de type TRIME pour la réalisation des profils hydriques :

analyse des problèmes rencontrés.

Septembre 1999

Marc KROL

Maître de stage : M. André CHANZY

TH - BD18

TH-BD18

LICENCE « GESTIONNAIRES DE L'EAU »
UNIVERSITE D'AVIGNON

INRA
Unité de Science du Sol
Domaine Saint Paul
AVIGNON

Mesure de l'humidité des sols par une méthode TDR

Utilisation de la sonde de type TRIME pour la réalisation des profils hydriques :

analyse des problèmes rencontrés.

INRA
STATION DE SCIENCE DU SOL
- 7 SEP. 1999
Domaine Saint Paul - Site Agroparc
84914 AVIGNON CEDEX 9

Septembre 1999

Marc KROL

Maître de stage : M. André CHANZY

TABLE DES MATIERES

Introduction p1

I) Généralités et objectifs du stage p2

1) Généralités p2

1.1) Mesure directe de la teneur en eau du sol : mesure gravimétrique p2

1.2) Mesures indirectes de la teneur en eau des sols p2
1.2.1) L'humidimètre neutronique p2
1.2.2) Mesures diélectriques p3

2) Objectif du stage p3

2.1) Analyse des problèmes dus à l'utilisation de la sonde coulissante TDR TRIME

2.2) Examen des diverses hypothèses p4

II) Expériences : Matériel et méthodes p5

1)Première expérience p5

1.1) Présentation du site de mesure p5

1.2) Appareils de mesures p6
1.2.1) TDR enterrées tri-tiges
1.2.2) Sonde à neutron
1.2.3) Sonde TDR TRIME
1.2.4) Endoscope

1.3) Déroulement et dates des tournées de mesures p7

2) Expérience 2 p7

2.1) Dispositif de mesure p7

2.2) Matériel de mesure p8

2.3) Protocole d'humectation p9

2.4) Protocole de mesures p9

3) Expérience 3 : échantillon p9

3.1) Matériel utilisé p9

3.2) Protocole expérimental p9

4) Protocole de traitement TDR p10

4.1)Principe de détermination de la permittivité p10

4.2) Détermination du début du guide d'onde p10

4.3) Détermination de la fin du guide d'onde p11
4.3.1) Méthode des tangentes
4.3.2) Méthode du seuil

III) Résultats p12

1) Expérience1 p12

1.1) Etalonnage spécifique de la sonde à neutron dans le tube en técanate
1.1.1) Choix des données gravimétriques p13
1.1.2) Méthode générale d'étalonnage
1.1.3) Relation d'étalonnage

1.2) Profil réalisé à l'endoscope p14

1.3) Comparaison de courbes : Exemple du 28 juillet p15
1.3.1) Comparaison des profils d'humidité TRIME et des valeurs d'humidité obtenues après un étalonnage de la sonde à neutron p15
1.3.2) Evolution temporelle pour une profondeur de sol donnée de la relation humidité TRIME / humidité neutron. p17

2)Expérience 2 p23

2 .1) Comparaison des constantes diélectriques buriable et TRIME p24

2.2) Comparaison de l'humidité TRIME et des constantes diélectriques buriable

3)Expérience 3 p25

3.1) Relation d'étalonnage eau volumique – constante diélectrique p25

Introduction :

L'eau intervenant dans le comportement mécanique et hydrologique des sols, la mesure de la teneur en eau des sols devient indispensable dans de nombreux domaines (hydrologie, environnement). En agriculture la mesure de teneur en eau sert a connaître l'état hydrique du sol. La connaissance de la situation des réserves en eau du sol à un moment donné permet d'orienter judicieusement les irrigations.

La sonde à neutron permet de réaliser des profils hydriques. Cette sonde a été très utilisée dans le passé et permet d'avoir des résultats fiables après un étalonnage de terrain. Toutefois les contraintes liées à la manipulation de sources radioactives empêche l'extension de cette méthode.

Les techniques TDR (Time Domain Reflectometry) et capacitive (deux techniques utilisant la constante diélectrique du sol) sont susceptibles de remplacer la sonde à neutron pour réaliser des profils hydriques. En ce qui concerne la TDR trois alternatives sont possibles. On peut :

- Insérer des guides d'onde bifilaires ou trifilaires à différentes profondeurs de sol. Leur mise en place pose cependant des problèmes d'ouverture de fosses (artefacts associés).
- Utiliser des guides d'ondes présentant plusieurs segments séparés par des diodes commutables.
- Analyser la forme du signal délivré par la TDR (Todoroff 1998, Dos Santos 1997). Cette méthode est encore en cours de développement.
- Utiliser des guides d'onde dont la forme permet la mesure dans des tubes d'accès.

Dans le dernier de ces cas on utilise une sonde « tube » (de type TRIME) qui une fois descendue dans le tube d'accès permet des mesures de teneur en eau aux différentes profondeurs. Dans le cadre de ce stage on va effectuer des mesures de teneur en eau à l'aide de cette sonde et les comparer à des mesures réalisées à l'aide d'autres techniques (gravimétrie, neutron) de façon à apprécier la qualité des mesures de teneur en eau réalisées avec cette sonde.

I) Généralités et objectifs du stage

1) Généralités:

1.1) Mesure directe de la teneur en eau du sol: mesure gravimétrique

Cette méthode permet d'obtenir des teneurs en eau pondérales et volumique. Elle consiste à peser les échantillons avant et après séchage pendant 24h à 105 ° C. L'humidité volumique peut être obtenue de deux façons différentes:

Si on connaît le volume des échantillons prélevés on a :

Hv = (mh-ms) / volume de l'échantillon

Si on ne connaît pas les volumes prélevés , on utilise la teneur en eau pondérale(Hp). Pour relier la teneur en eau pondérale à la teneur en eau volumique, il est indispensable de connaître la masse volumique sèche des échantillons prélevés (appelée également densité apparente da). On peut mesurer cette densité apparente grâce à différentes méthodes, notamment les méthodes gammamétriques (sonde à transmission et sonde à rétrodiffusion).

$Hv = Hp * da$
$Hp = (mh-ms)/(ms-mb)$

avec
Hp = humidité massique(Kg/Kg)
Mh = masse de l'échantillon de sol humide (Kg)
Ms =masse de l'échantillon de sol sec (Kg)
Mb = masse de la boite(Kg)
ρ d = masse volumique (sans dimension)

1.2) Mesures indirectes de la teneur en eau des sols

1.2.1) L'humidimètre neutronique

Une source radioactive émet des neutrons qui se propagent dans le sol. Ces neutrons sont ralentis principalement par collision avec des atomes d'hydrogène, dont la teneur varie avec celle de l'eau du sol. Les neutrons ralentis sont détectés par un compteur placé dans la sonde.

La mesure s'effectue dans un volume dit sphère d'influence, dont le rayon, variable selon la teneur en eau, est de l'ordre de 10 à 20 cm.

« Les mesures par l'humidimètre se font à partir d'un tube d'accès installé verticalement dans le sol ; on fait coulisser la source et le détecteur pour les placer à différentes profondeurs. » Ainsi en répétant les mesures au cours du temps, on peut obtenir l'évolution de l'état hydrique d'un sol.

1.2.2) Mesures diélectriques

« La constante diélectrique du sol dans le domaine des hautes fréquences électromagnétiques est une fonction de la nature des constituants du sol. Ainsi la constante diélectrique relative des constituants minéraux varie entre 4 et 8 alors que celle de l'eau libre est voisine de 80. La dépendance en humidité de la constante diélectrique résulte du contraste important entre l'eau libre et les autres constituants. Les capteurs de mesure de la constante diélectrique vont donc être sensibles à la quantité d'eau présente dans le volume de mesure et donne ainsi accès à la quantité d'eau présente dans le volume de mesure et donnent ainsi accès à l'estimation de l'humidité volumique du sol. » (CHANZY et al . ,1997).

Il existe deux méthodes de caractérisation de la constante diélectrique :

- La technique capacitive : la constante diélectrique est déterminée en mesurant la capacité d'un condensateur composé d'électrodes et du sol comme milieu diélectrique. La conversion analogique du signal délivré par un humidimètre capacitif est relativement standard et ne nécessite pas d'équipement spécifique d'enregistrement. Par conséquent, une telle technique se prête particulièrement bien à l'automatisation des mesures de teneur en eau.

- La technique TDR (Time Domain Reflectometry Topp et Davis, 1985) : elle est basée sur la mesure du temps de propagation d'une impulsion électromagnétique le long d'un guide d'onde enfoui dans le sol. La mesure intègre la constante diélectrique sur toute la longueur du guide d'onde .

2) Objectifs du stage

2.1) Analyse des problèmes dus à l'utilisation de la sonde coulissante TDR TRIME

Cette sonde est constituée d'un tube en matière plastique portant deux plaques métalliques latérales celles-ci sont connectées à un circuit électrique et forment la partie terminale d'un guide d'onde. Par analogie aux sondes TDR classiques ces plaques correspondent aux tiges des sondes bifilaires ou trifilaires servant de guides d'ondes. La sonde trime s'utilise de la même manière que la sonde à neutron. On fait coulisser cette sonde dans un tube d'accès installé verticalement dans le sol pour la placer à différentes profondeurs. Généralement les profils d'humidité obtenus avec cette méthode ne sont pas facilement interprétables et présentent des différences avec ceux obtenus avec les méthodes gravimétriques et neutroniques. Ces deux dernières méthodes de mesures étant fiables, les écarts existant entre les valeurs d'humidité sont certainement imputables aux mesures TDR TRIME.

Les problèmes liés à la méthode sont les suivants:

A) La sonde TRIME mesure l'eau présente dans les premiers centimètres du sol en contact avec le tube. Le volume de mesure n'a donc rien a voir avec celui de la sonde a neutron dont la sphère d'influence est de l'ordre de 20 cm . Les contacts entre le sol et le tube doivent être de bonne qualité pour que la mesure de permittivité diélectrique soit correcte. Au problème du contact entre le tube d'accès et le sol vient s'ajouter le tube lui-même. Etant en matière plastique (técanate), ce tube constitue un diélectrique. Il provoque une baisse de la sensibilité

des mesures aux variations d'humidité du sol . Ce qui amplifie l'influence des artefacts et des erreurs de mesures.

B) La courbe d'impulsion du signal TDR est recueillie par le boîtier électronique connecté à la sonde TRIME. Ce boîtier fourni uniquement en sortie l'humidité volumique. La détermination de la permittivité du sol ne s'effectue pas de la manière habituellement utilisée pour les autres appareils TDR (méthodes des tangentes). Et cette permittivité diélectrique, bien qu'elle soit utilisée par le boîtier pour le calcul de l'humidité volumique, n'est pas affichée sur ce boîtier trime. Au final on est en droit de se demander si le programme traitant le signal TDR n'a pas une responsabilité importante dans les écarts d'humidité observés .

C) Le principal problème auquel on se trouve confronté, lorsque l'on compare des valeurs d'humidité obtenues par différentes méthodes sur une même parcelle, est celui de la variabilité spatiale. Les différences d'humidité sont principalement dues:
- à l'hétérogénéité de la nature du sol (composition, structure, texture)
- à la rétention de l'eau par les plantes (ici sur la parcelle l'humidité a l'aplomb des pieds de mais (rang) est supérieur à l'humidité de l'inter-rang).

D) La relation liant la permittivité à l'humidité volumique a été établie pour des sols « standards » , cette relation n'est peut être pas adaptée au sol sur lequel on a travaillé durant le projet.

2.2) Examen des diverses hypothèses:

A) Pour avoir une idée précise de la qualité des contacts établis entre le tube et le sol on va utiliser à la fois un tube d'accès transparent et un endoscope. Cet appareil est utilisé à l'INRA pour l'observation des racines des plantes. Le tube d'accès de la TDR étant transparent , l'utilisation de l'endoscope nous permettra d'évaluer la qualité du contact sol/tube. Ces contacts sol/tube de mauvaise qualité, principalement dus à la fracturation et au décollement, sont susceptibles d'influencer les mesures de teneur en eau faite par la sonde TRIME.

B) Pour s'assurer de la fiabilité du logiciel du TRIME donnant les valeurs d'humidité (notées Soil Moisture à l'affichage et que l'on nommera dans la suite de l'exposé Humidité TRIME), on va connecter la sonde trime à une autre unité d'acquisition du signal d'impulsion TDR : le TRASE . Le TRASE est utilisé pour les sondes TDR enterrées. Il permet de recueillir les courbes d'impulsion du signal TDR. A partir de ces courbes plusieurs méthodes graphiques pourront être envisagées afin d'obtenir les permittivités. On va ainsi procéder systématiquement à l'acquisition des données TRIME et TRASE afin d'avoir des outils de comparaison.

C) Pour nous affranchir des problèmes de variabilité spatiale on va effectuer les mesures neutroniques et TDR dans le même tube d'accès. Les mesures TDR TRIME nécessitent un tube en matière plastique. Les tubes utilisés habituellement pour les mesures neutroniques sont en aluminium. On va cependant effectuer les mesures neutroniques dans ce tube plastique tout en sachant qu'un étalonnage spécifique sera nécessaire pour ce tube.

D) Pour établir la relation liant les permittivités données par les sondes TDR à l'humidité volumiques pour le sol que nous sommes en train d'étudier. Une sonde TDR conçue

spécialement va être utilisée. Cette sonde de part la forme cylindrique de son guide d'onde permet de faire des mesures de permittivité d'un échantillon de sol dans un volume parfaitement connu. Ainsi par simple pesée on va pouvoir à chaque instant connaître la teneur en eau de l'échantillon.

Pour examiner ces hypothèses on va réaliser trois expériences :

Première expérience

Sur une parcelle, on réalise :

- des mesures de teneur en eau du sol à l'aide de la sonde à neutron et de la sonde TDR TRIME dans le même tube d'accès (pour s'affranchir de la variabilité spatiale)
- une observation à l'endoscope dans ce tube d'accès pour analyser la qualité des contacts sol/tube
- les mesures avec la sonde TRIME reliée à la fois a son boîtier et au TRASE

Deuxième expérience

On réalise une expérience de mesures de teneur en eau avec la sonde TRIME et des TDR enterrées dans un récipient contenant du sable. Ceci afin d'établir une relation humidité TRIME / K TDR.

Troisième expérience

On mesure à l'aide de la sonde cylindrique TDR l'humidité d'un échantillon de sol soumis à des phases de réhumectation / dessèchement. Cet échantillon ayant été prélevé sur la parcelle, ceci nous permettra d'établir une relation humidité/constante diélectrique pour ce sol.

II) Expériences : Matériel et méthodes

1) Première expérience

1.1) Présentation du site de mesure

La parcelle étudiée est située dans le domaine de Saint Paul à Monfavet. Sur cette parcelle on a mis en culture du mais. Concernant le sol on peut observer des différences de constitution selon la profondeur. Le pourcentage de sable par rapport à l'argile est plus important à 100 cm de profondeur. A partir de cette profondeur il existe ce que l'on nommera un niveau sableux.

Plusieurs sites de mesures existent sur cette parcelle, celui dont on s'occupera dans cette étude est proche d'un mat météo servant aux mesures du laboratoire de bioclimatologie. On utilisera donc la dénomination de «site mat météo » pour le désigner. Sur ce site se trouvent

deux tubes d'accès neutroniques en aluminium et le tube d'accès pour le TRIME en técanate (composé plastique transparent).

1.2) Appareils de mesures

1.2.1) TDR enterrées tri-tiges

Sur le site de mesure on trouve des sondes TDR enterrées tri-tiges. Les guides d'ondes de ces sondes font 20 cm. Les sondes sont enterrées aux profondeurs suivantes 2.5 ; 7.5 ; 12.5 ; 17.5 ; 22.5 ; 27.5 ; 2.5 ; 35-50 cm. Ces sondes sont connectées lors des mesures au système d'acquisition TRASE. Celui-ci détermine les permittivités par la méthode classique des tangentes dont on reparlera dans la suite de l'exposé.

1.2.2) Sonde à neutron

L'appareil utilisé est un humidimètre Nardeux modèle SOLO 25. Les mesures neutroniques sont réalisées à la fois dans les tubes en aluminium classiques et dans le tube en técanate. Les tubes en aluminium ont des profondeurs de 165 cm (site mat météo). Le tube en técanate a une profondeur de 110 cm (site mat météo).

On change l'origine du compteur selon la hauteur du tube pour pouvoir lire la profondeur directement. On fait descendre la sonde à neutron à l'intérieur des tubes, puis on effectue les comptages de la manière suivante:

- de 5cm à 165 cm avec un pas de 10cm pour les tubes en aluminium
- de 10cm à 110 cm avec un pas de 10cm pour le tube en técanate

Pour les mesures effectuées à l'aide de cet humidimètre neutronique nous avons utilisé un temps de comptage de 80 secondes. Un tel temps permet de réduire l'erreur de comptage liée à l'émission aléatoire de neutron à 0.5%.

1.2.3) Sonde TDR TRIME

Des repères sont pris le long du câble de liaison de la sonde trime, ils tiennent compte de la hauteur du tube d'accès et permettent de positionner la sonde aux différentes profondeurs. On fait coulisser la sonde trime dans le tube en técanate. On effectue les mesures aux profondeurs suivantes:

10; 20; 30; 40; 50; 60; 70; 80; 90; 100; 110 cm.

La sonde trime est utilisée de deux manières différentes :

- reliée à son boîtier TRIME, dans ce cas on note les valeurs d'humidité (par contre les valeurs de constantes diélectriques ne sont pas données par celui-ci).
- reliée au TRASE, on sauvegarde les courbes complètes des mesures en mode « TDR SREEN ».

1.2.4) Endoscope

L'endoscope est un appareil utilisé habituellement pour observer les racines en place dans le sol. Le 28 juillet on a fait descendre l'endoscope dans le tube en técanate qui est transparent et on a observé si par endroits le sol en contact avec le tube est légèrement décollé ou fissuré. On fait ces observations de 10 cm à 110cm par pas de 5 cm. L'appareil permet de réaliser des observations avec un angle de vision restreint. On a donc fait quatre observations à 90 degrés

l'une de l'autre, et évalué pour chaque secteur la qualité du contact en évaluant le pourcentage de surface du tube ayant un mauvais contact avec le sol.

1.3) Déroulement et dates des tournées de mesures

Ces mesures TDR TRIME, TDR enterrées, neutron ont été effectuées les jours suivants: les 5, 9, 12, 16, 19, 23, 28, 30 juillet et les 2, 6, 9 août 1999.

On a effectué les mesures sur le terrain dans l'ordre suivant :

- mesures TRIME en connectant la sonde à son boîtier d'acquisition du signal TDR
- mesures TRIME en connectant la sonde au TRASE
- mesures avec le TRASE des 8 TDR enterrées
- mesures neutroniques dans le tube en técanate
- mesures neutroniques dans les 2 tubes en aluminium

2) Expérience 2

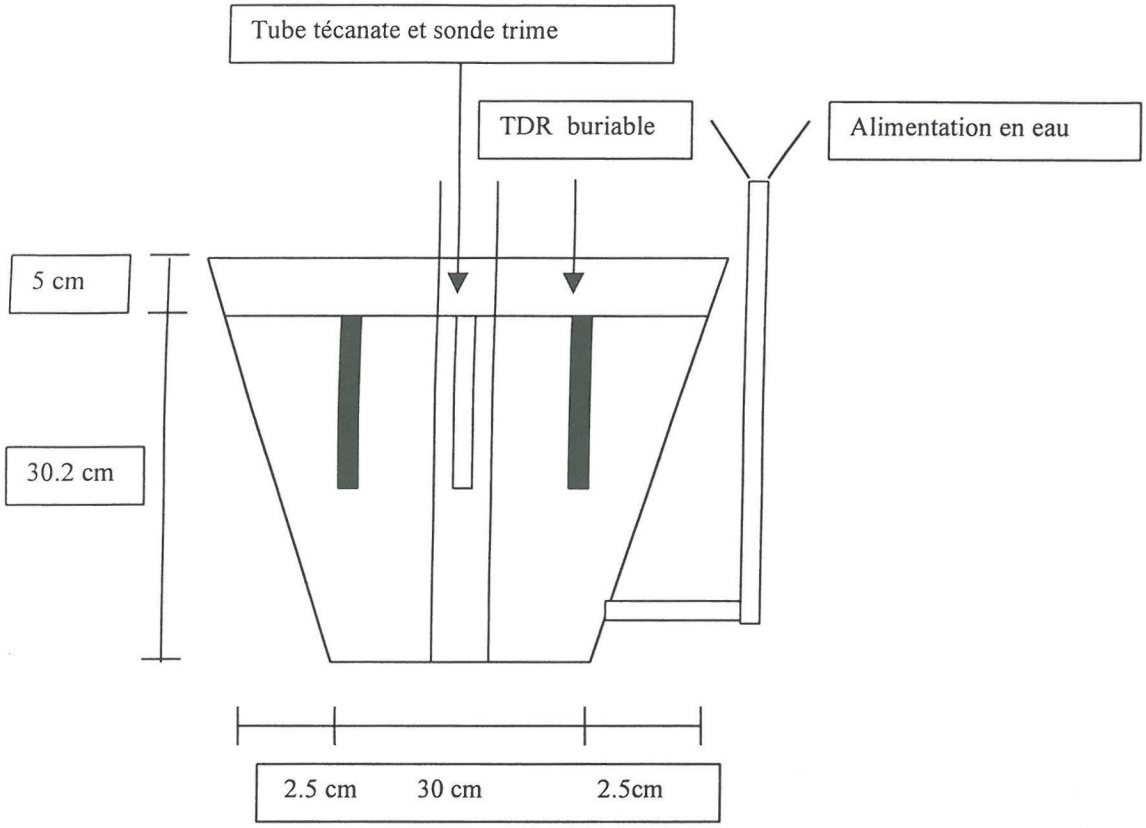
Cette manipulation a deux objectifs :

- relier les mesures TRIME (humidité) aux constantes diélectriques réelles fournies par les sondes TDR enterrées (K apparent).
- relier les constantes diélectriques fournies par la sonde TRIME (pseudo K) à celles fournies par les sondes TDR enterrées (K apparent).

2.1) Dispositif de mesure : (fig.1)

Un récipient en plastique est percé à sa base et raccordé à un tuyau en plastique souple afin d'être alimenté en eau par le bas. On utilise pour remplir ce récipient du sable grossier. Au milieu du récipient on installe un tube en técanate servant aux mesures TDR TRIME. Autour de ces tubes quatre TDR enterrables sont installées afin de donner une valeur de référence de K. Le sable a été choisi car c'est un matériau homogène. Il permet également d'avoir un bon contact autour du tube en técanate.

Figure 1 : Dispositif expérimental utilisé dans l'expérience 2



2.2) Matériel de mesure

Les quatre sondes TDR enterrées sont positionnées en surface. La longueur de leur guide d'onde étant de vingt centimètres elles mesurent l'humidité présente entre 0 et 20 cm de profondeur. Ces sondes sont reliées au logiciel TRASE. On relèvera les valeurs d'humidité volumique et de constante diélectrique données par les appareils.

Pour la sonde TRIME on a effectué des mesures de deux manières différentes:

- raccordée au boîtier TRIME, on relève les valeurs d'humidité
- raccordée à l'unité d'acquisition TRASE, on sauvegarde les graphes réalisés en « TDR SCREEN », puis on obtient les constantes diélectriques après un dépouillement des courbes (cf procédure de traitement).

2.3) Protocole d'humectation

On ajoute les volumes d'eau de 500 ml en début d'expérience puis pour affiner les mesures on passe à des volumes de 250 ml. Volumes ajoutés (en ml) :
500, 1000, 1500, 2500, 2750, 3000, 3250, 3500,3750, 4000, 4250, 4500, 4750, 5000, 5250, 5500, 5750, 6000, 6250, 6500, 6750, 7000, 7400.

Chaque ajout de volume d'eau entraîne la montée du niveau d'eau (surface libre) dans le sable contenu dans le récipient. On attend la stabilisation du niveau de l'eau dans le tuyau souple avant d'effectuer les mesures TDR.

2.4) Protocole de mesures

On effectue dans un premier temps les mesures sur les quatre TDR enterrées. Les valeurs d'humidité connaissent de légères variations, puis elles se stabilisent. C'est alors que l'on effectue les mesures d'humidité trime de 0à 18 cm. Puis on connecte la sonde trime au TRASE et on effectue les mesures de constantes diélectriques pour les mêmes profondeurs.

3) Expérience 3: échantillon

3.1) Matériel utilisé

La sonde TDR utilisée à été réalisée spécialement pour cette expérience. Elle est composée d'un cylindre et d'une tige centrale. Ces deux éléments sont en fait les guides d'ondes. Le diamètre interne du cylindre est de 10 cm , pour une longueur de 15.3 cm. Sa masse est de 511.05 g ; son volume est de 1201.6 cm3. De part sa forme ce cylindre va permettre de prélever un échantillon de sol puis de faire des mesures TDR sur celui-ci.

3.2)Protocole expérimental

Sur la parcelle étudiée (champ de maïs), on a creusé un trou de 10 cm avant de prélever l'échantillon de terre, puis on enfonce le cylindre dans le sol. De cette manière on va travailler sur une colonne de sol qui se trouvait à des profondeurs situées entre 10 cm et 25.3 cm. L'échantillon n'a pas été directement prélevé en surface car le sol à cet endroit est trop hétérogène.

On fait subir à cet échantillon une phase de dessèchement puis une phase de réhumectation puis une nouvelle phase de dessèchement. Au cours des deux phases de dessèchement on va effectuer des mesures de constantes diélectriques et des pesées de cet échantillon.

En fin d'expérience on procède à la pesée de l'échantillon (après passage à l'étuve à 104 C pendant 24 heures), ainsi on connaît sa masse sèche(Ms = 1920.4 g). Les pesées au cours du temps nous fournissent l'humidité volumique (Hv = volume d'eau / Volume de sol). C'est à dire dans ce cas précis Hv = (Mht - Ms - M sonde) / Volume de la sonde
Avec :
Mht = masse humide à l'instant t (g)
Ms = masse sèche de l'échantillon (g)

M sonde (g)
Volume (g / cm3)

Les mesures de constante diélectrique sont effectuées en branchant la sonde sur le TRASE. Les courbes d'impulsion TDR sont recueillies en mode « MEASURES SCREEN » en réglant le paramètre guide d'onde à 15.3. Il est donc possible à tous les stades de l'expérience de faire correspondre les constantes diélectriques à l'humidité volumique.

4) Protocole de traitement TDR

On effectue un traitement spécifique du signal TDR car avec les sondes que l'on utilise (sonde TRIME dans les expériences 1 et 2, sondes cylindrique pour l'expérience 3) le TRASE ne peut calculer les constantes diélectriques et l'humidité. Le traitement standard qu'effectue le TRASE sert uniquement dans le cas des TDR enterrées.

La sonde TRIME et la sonde cylindrique sont connectées au système d'acquisition TRASE. Avec un programme de transfert on récupère les courbes d'impulsion du signal TDR sur un PC sous la forme d'un fichier texte. Puis un tableur nous permet d'effectuer un travail graphique sur ces courbes. On utilise les mêmes méthodes graphiques que celles utilisées par les systèmes d'acquisition TRIME et TRASE pour obtenir les valeurs de constantes diélectriques. Le TRASE utilise la méthode dite «des tangentes » alors que le TRIME utilise la méthode « du seuil ». La différence entre ces deux méthodes se situe au niveau de la détermination de la fin du guide d'onde. On obtient les constantes diélectriques que seraient susceptibles de nous donner les deux types d'appareil (TRIME et TRASE) s'il étaient configurés pour les sondes utilisées.

4.1) Principe de détermination de la permittivité

La constante diélectrique apparente (K) du sol est déterminée grâce à la formule suivante :
$K=(t * c / l)^2$
avec :
l= longueur du guide d'onde en cm
t = temps de transit en nanosecondes
c= la vitesse de la lumière en nanosecondes par centimètres

Pour mesurer la constante diélectrique du sol (K), il faut donc mesurer le temps de parcours de l'impulsion électromagnétique dans le guide d'onde. Pour mesurer le temps de transit, il faut connaître le moment où l'impulsion est réfléchie aux deux extrémités du guide d'onde.

4.2) Détermination du début du guide d'onde

Le début du guide d'onde a été déterminé en comparant les courbes obtenues avec la sonde trime en cours circuit et dans l'air. Le début du guide d'onde correspond au point ou les deux courbes se séparent (fig.2 et3).

Figure 2 : Début du guide d'onde de la sonde TDR cylindrique

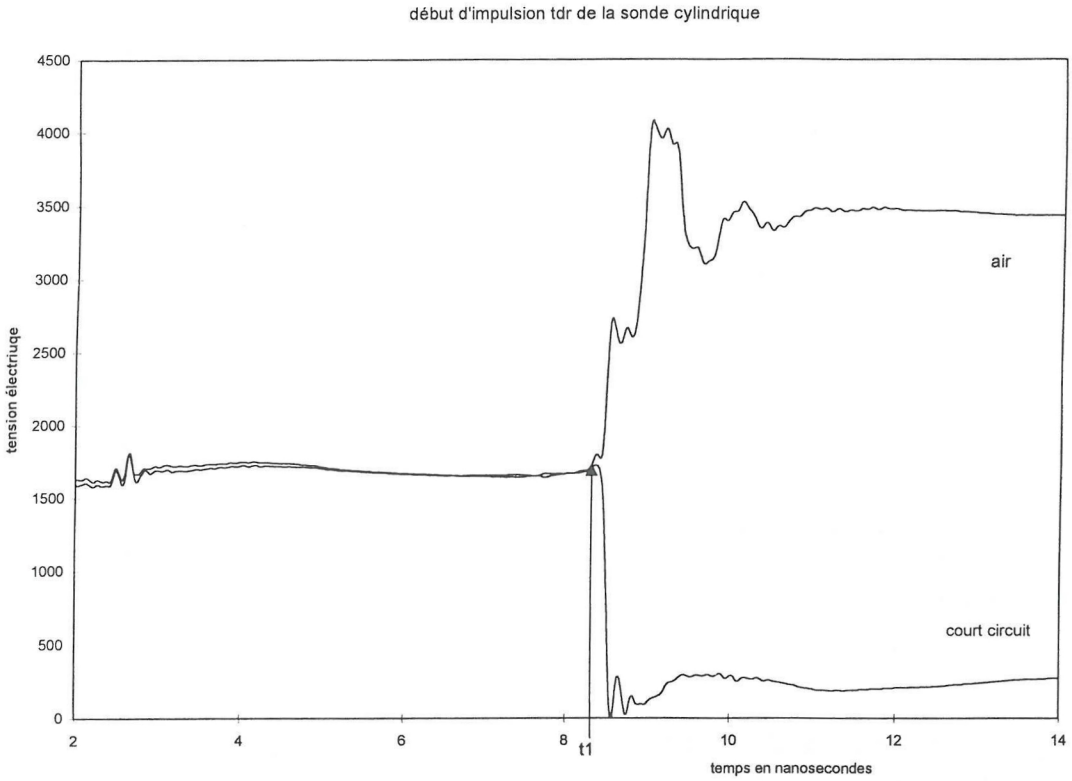
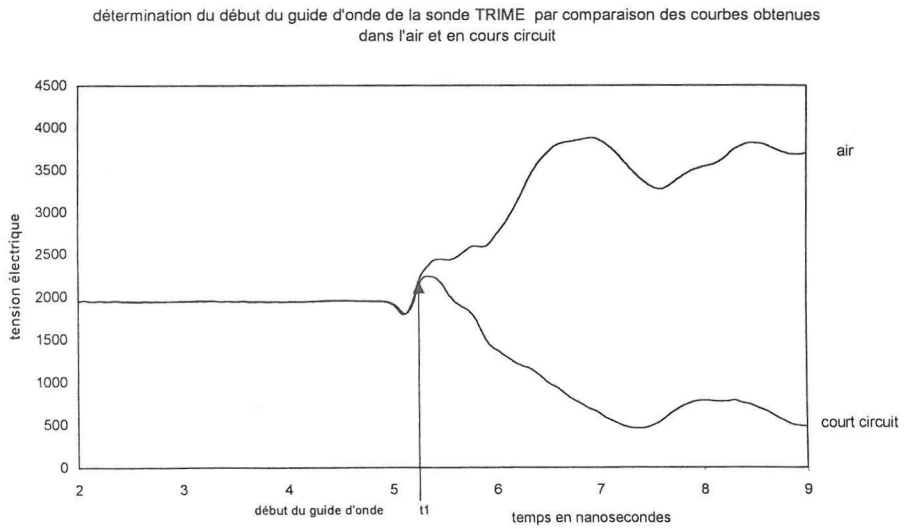


Figure 3 : Début du guide d'onde de la sonde trime :



1 .2.3)détermination de la fin du guide d'onde (fig. 4)

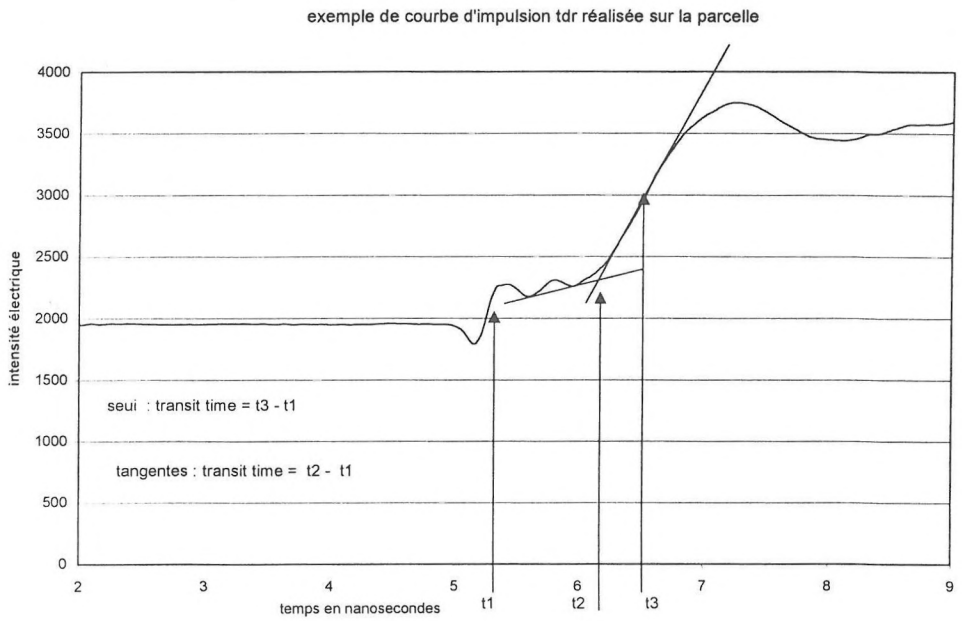
- méthode des tangentes :

Le TRASE détermine la fin du guide d'onde en construisant la tangente de la courbe d'impulsion juste avant le point de réflexion ainsi que la tangente de la courbe d'impulsion juste après la réflexion. L'intersection des deux tangentes est le point de réflexion sur le guide d'onde.

- méthode du seuil

Le TRIME procède d'une autre façon il ne repère pas le moment de l'arrivée de l'onde électromagnétique à l'extrémité du guide d'onde, il fixe un seuil d'intensité électrique (en ordonnée) et prends le temps correspondant en abscisses. Le seuil utilisé par le TRIME n'est pas donné dans la notice de l'appareil. On a pris un seuil à 3000. Une relation existe entre ce temps et la constante diélectrique. Il nous semble malgré tout que cette méthode soit peu fiable dans le cas où les sols présentent une résistance électrique importante. En effet les pertes électriques vont avoir une influence sur l'intensité du signal réfléchi à la fin du guide d'onde. Aussi pour un même temps de transit de l'onde dans le guide, nous pouvons avoir des différences sur le temps correspondant à un seuil donné.

Figure 4 : Détermination de la fin du guide d'onde du TRIME



II) Résultats

1) Expérience1

1.1) Etalonnage spécifique de la sonde à neutron dans le tube en técanate

1.1.1) Choix des données gravimétriques

Le 17 juin les personnes s'occupant de l'installation du tube en técanate ont procédé à des mesures gravimétriques et des comptages neutroniques. Afin de posséder plus de points pour établir une droite de régression linéaire on a rajouté les données d'étalonnage ultérieures en effectuant des mesures gravimétriques le 9 juillet le 28 juillet et le 6 août.
L'échantillonnage pour ces journées a été le suivant :

- 2 des profils proches du tube (nature du sol identique)
- 3 des profils éloignés du tube mais dans se trouvant dans la même rangée de maïs (condition d'humidité inhérente aux pieds de maïs identique).

Pour établir la droite d'étalonnage nous avons rajouter aux mesures du 17 juin celles du 9 juillet effectuées à proximité du tube. On a pas utiliser les mesures éloignées du tube réalisées le 9 juillet car du fait de la variabilité spatiale elles ne sont pas suffisamment représentatives. Les mesures du 8 juillet et du 6 août ne sont pas utilisables car le tassement aux abords du tube commençait à devenir trop important.

1.1.2) Méthode générale d'étalonnage

On met en relation les comptages neutroniques avec l'humidité volumique estimée sur la couche de mesure. L'humidité volumique est estimée à partir des mesures d'humidité pondérale et du profil de densité (voir tableau ci-dessous).
On a donc $Hv = a^* Cpt + b$
avec :
Cpt: comptage neutroniques (coups/s)
Hv :humidité volumique

Les donnés de profils de densité sèche suivantes :

Prof	5	15	25	35	45	55	65	75	85	95	105	115
ρ d	1.34	1.4	1.4	1.39	1.515	1.581	1.636	1.662	1.662	1.655	1.629	1.619

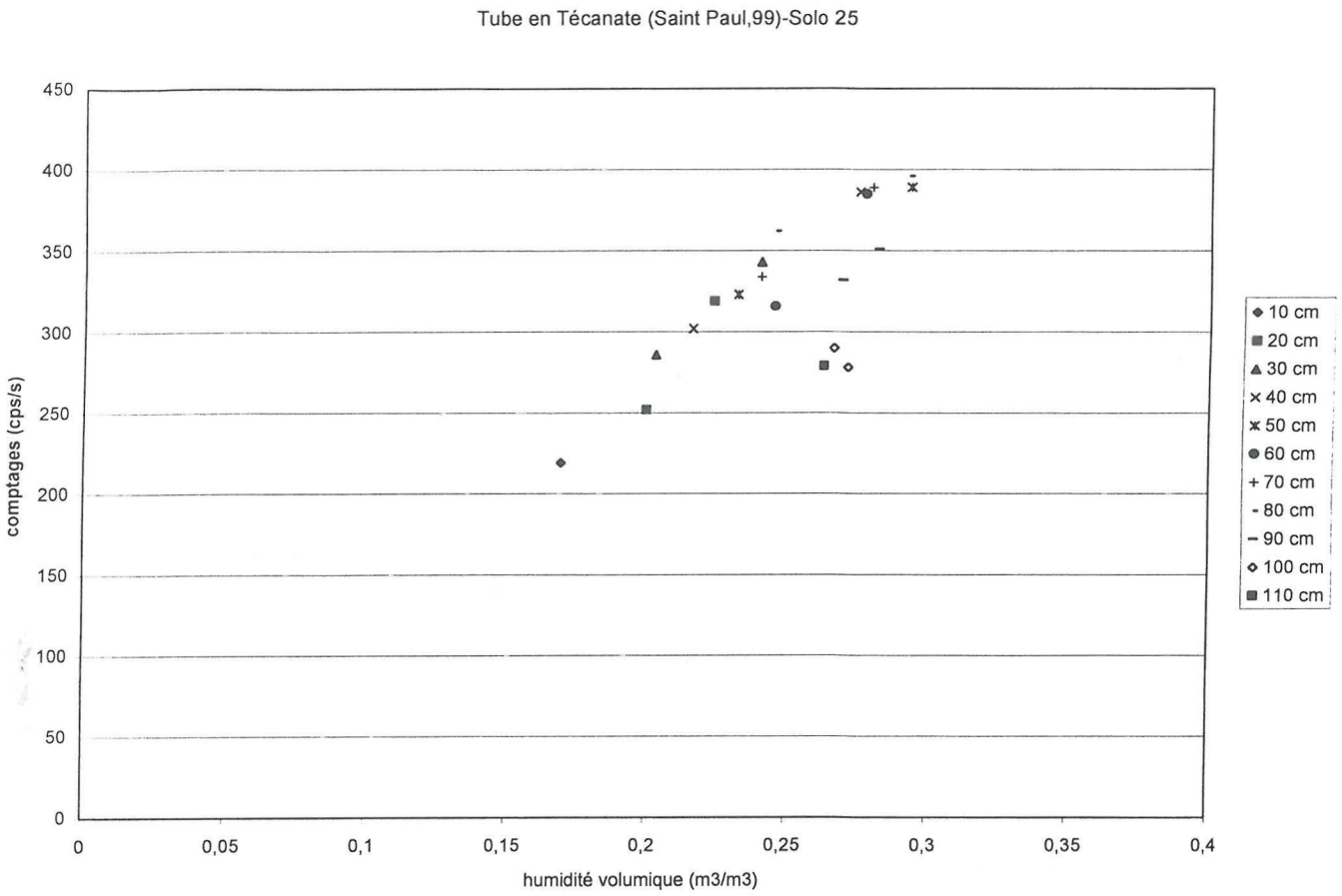
ρ d = masse volumique (sans dimension)

1.1.3) Relation d'étalonnage

On a distingué sur le graphique (fig.5) les différentes profondeurs. Les points représentant les profondeurs allant de 20 cm à 90 cm sont alignés. On peut donc faire passer une droite de régression linéaire d'équation :
$Hv = 0.0007*Cps+0.0209$ avec $R^2 = 0.8259$

Pour les séries 100 et 110 cm il faut utiliser d'autres droites d'étalonnage, le sol correspondant à un horizon différent plus sableux. On a établit une relation d'étalonnage spécifique. Les points ne couvrent pas une gamme d'humidité suffisante pour appréhender la pente de la relation d'étalonnage. On a donc tracé une droite parallèle à celle de l'étalonnage précédant (pente identique) et passant par les points de profondeurs 100 et 110 cm . L'équation est la suivante :
$Hv = 0.0007*Cps + 0.072$

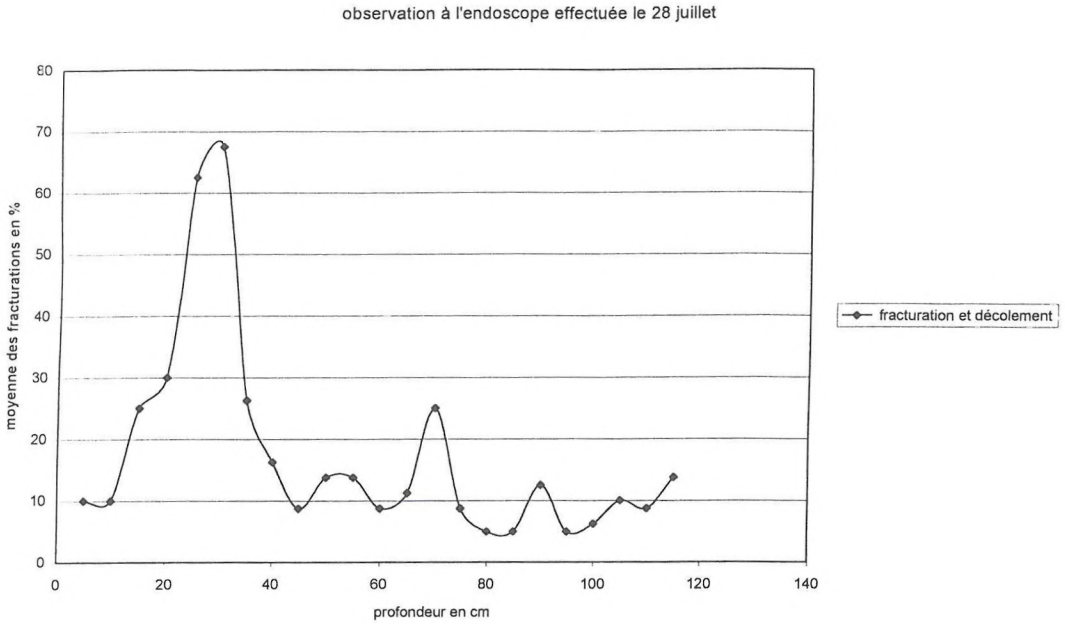
Figure5 : étalonnage du tube en técanate



1.2) Profil réalisé à l'endoscope

Les résultats des observations sont représentés sur la figure 6. Malgré les observations plutôt qualitatives, il apparaît très nettement qu'a la base de la couche labourée (20 à 40 cm) il y a une dégradation du contact sol / tube. Cela est confirmé par certaines mesures de densité et l'observation des profils culturaux.

Figure 6 : Pourcentage de contact sol/tube de mauvaise qualité en fonction de la profondeur



1.3) Comparaison de courbes : Exemple du 28 juillet

1.3.1) Comparaison des profils d'humidité TRIME et des valeurs d'humidité obtenues après un étalonnage de la sonde à neutron (fig.7)

L'étalonnage de la sonde à neutron permet d'avoir des valeurs d'humidité directement comparables avec les valeurs d'humidité fournies par la sonde TRIME. On a pris dans cet exemple les valeurs d'humidité du 28 juillet. C'est une des dates où les valeurs d'humidité mesurées par le TRIME coïncident le mieux avec celles obtenues par la méthode neutronique.

On distinguera trois zones distinctes dans l'évolution des deux courbes :

Zone 30 cm à 50 cm :

L'humidité TRIME augmente régulièrement, elle passe de 25.2 % à 30 cm à 29.8 % à 50 cm. De 30 à 50 cm l'humidité neutron reste stable, les valeurs d'humidité sont proches de 27 %. Cette zone ou il existe une différence de comportement des deux courbes (augmentation de l'humidité et stabilité des comptages neutroniques) correspond parfaitement à la zone ou les contacts tube/sol sont de très mauvaise qualité (cf profil réalisé à l'endoscope).

Zone 50 cm à 80 cm :

L'évolution des courbes d'humidité TRIME et comptages neutrons est identique (forme de cuvette). L'humidité TRIME passe de 29.8 % à 27.1 %. L'humidité neutron passe

de 26.7 à 24 %. A ces profondeurs les deux types d'appareils décèlent des variations identiques d'humidité.

Zone 100 cm à 110 cm :

Les variations d'humidité TRIME et neutron sont de sens opposé. L'humidité TRIME baisse de manière très importante, les valeurs passent de 20.7% à 5%. L'humidité neutron passe de 22 à 25%. Ces différences de valeurs d'humidité donnée par les deux sondes peuvent avoir deux explications :

A partir de 90 cm il existe un horizon nettement plus sableux. On pourrait croire que ce changement de la constitution du sol influe sur le niveau de réflexion du signal. De ce fait la méthode du seuil serait susceptible de provoquer une erreur dans la détermination de la constant diélectrique. Sur les figures 8 et 9 la forme des courbes exclue ce type d'explication.

Le TRIME se sert de la même relation Hum = f (K) quel que soit la constitution du sol. Cette relation n'est pas nécessairement bonne pour les horizons profonds de notre sol. Cette hypothèse peut être vérifiée en reproduisant l'expérience 3 avec un échantillon provenant de cet horizon.

Figure 7 : profils d'humidité TRIME et neutron du 28 juillet

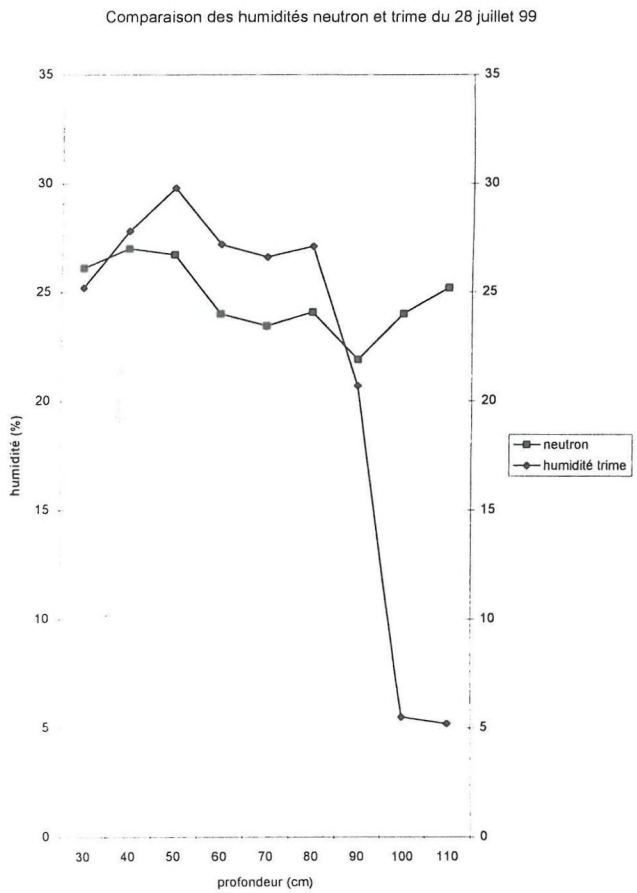


Figure 8 : courbe d'impulsion TDR à 70 cm

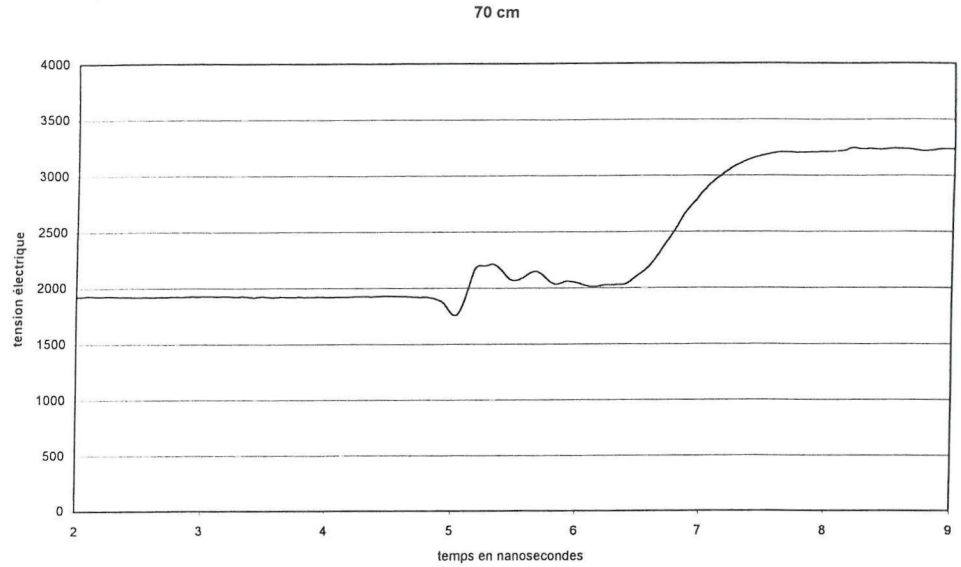
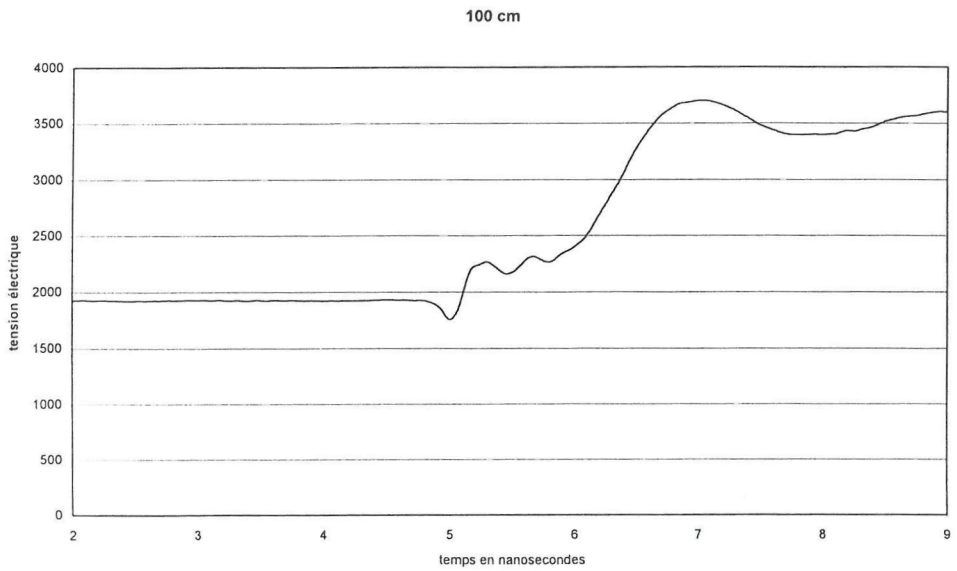


Figure 9 courbe d'impulsion TDR à 100 cm



1.3.2) Evolution temporelle pour une profondeur de sol donnée de la relation humidité TRIME / humidité neutron

Les différents points représentent les mesures trime-neutron faites à différentes dates (les 9, 12, 16, 19, 23, 26, 28, 30 juillet et les 2, 6, 9 août).

Figure 10 : 10 cm de profondeur

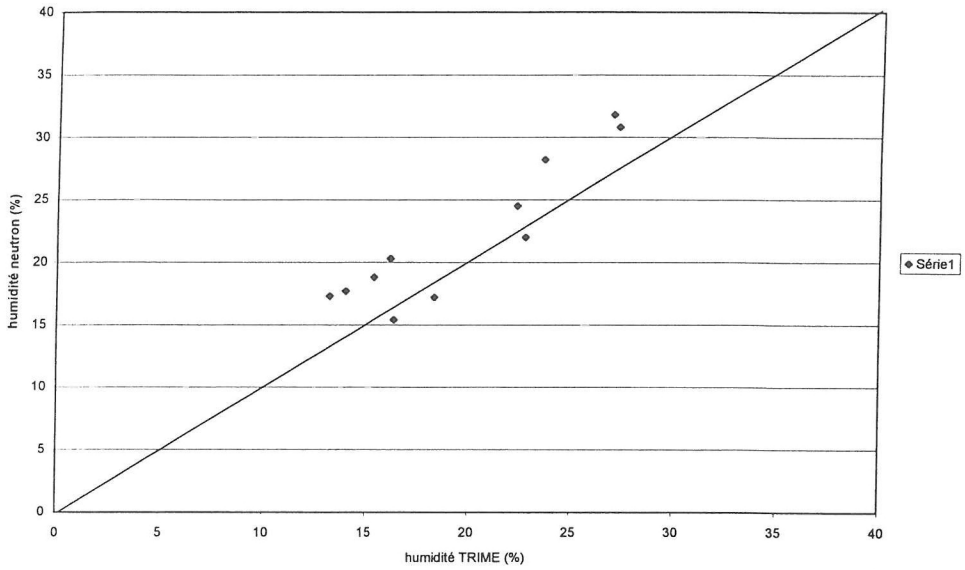


Figure 11 : 20 cm de profondeur

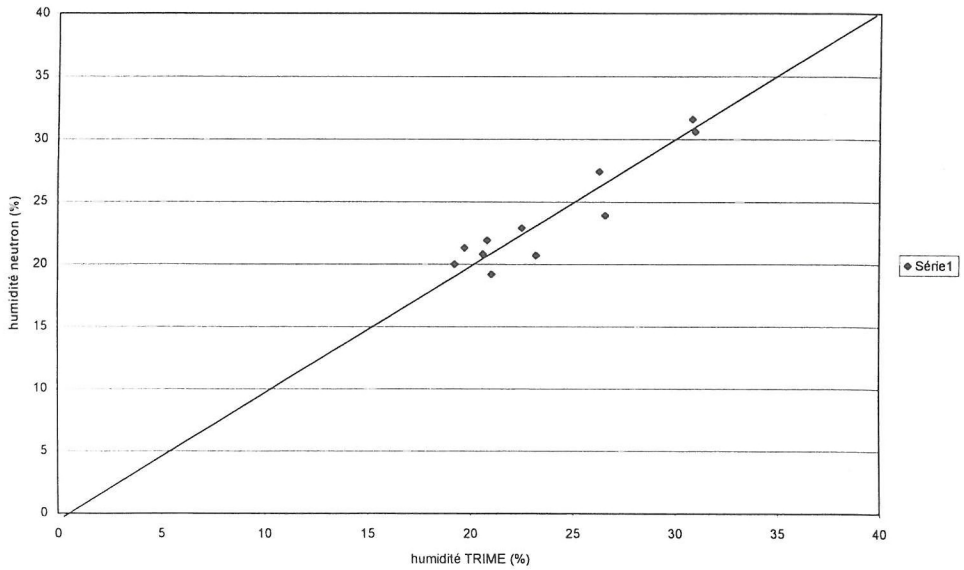


Figure 12 : 30 cm de profondeur :

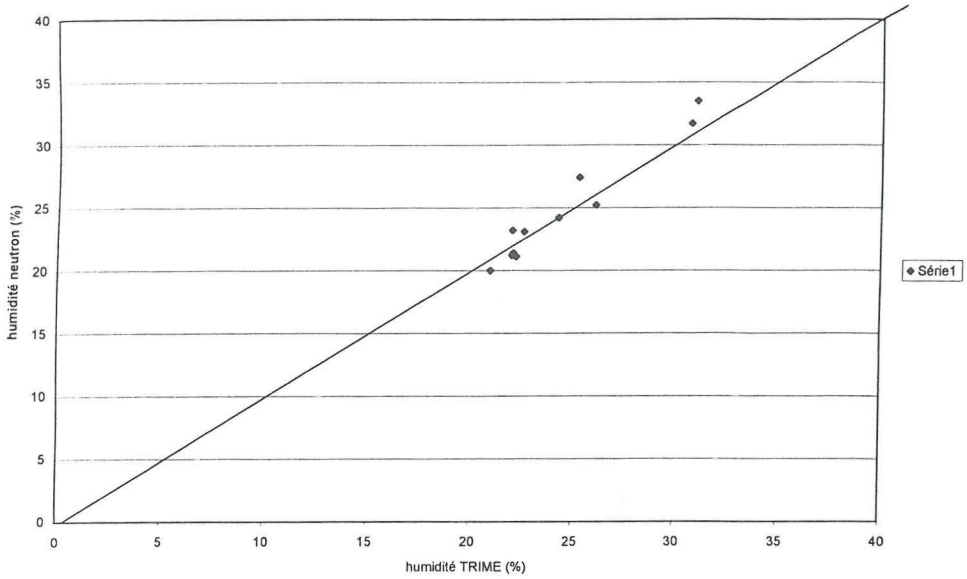


Figure 13 : 40 cm de profondeur

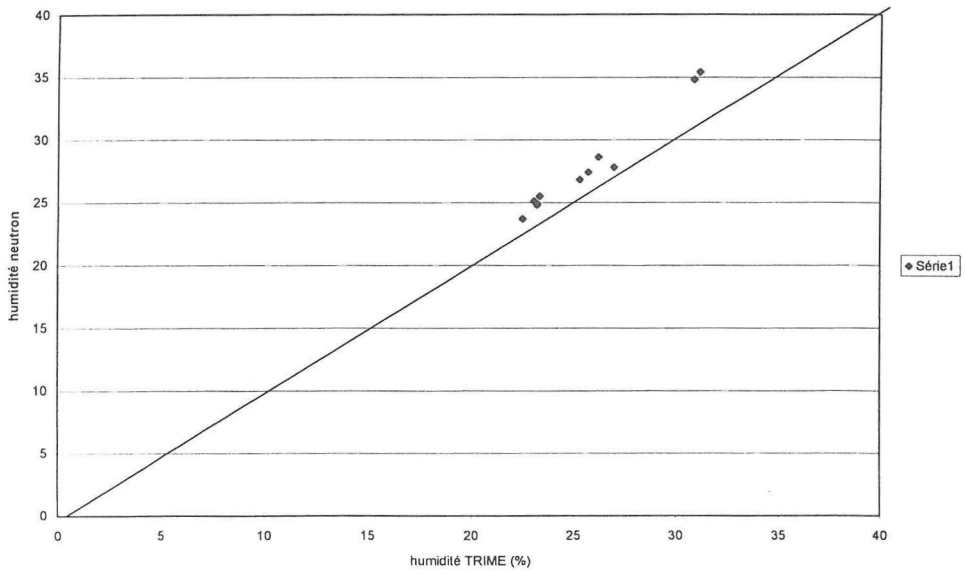


Figure 14 : 50 cm de profondeur

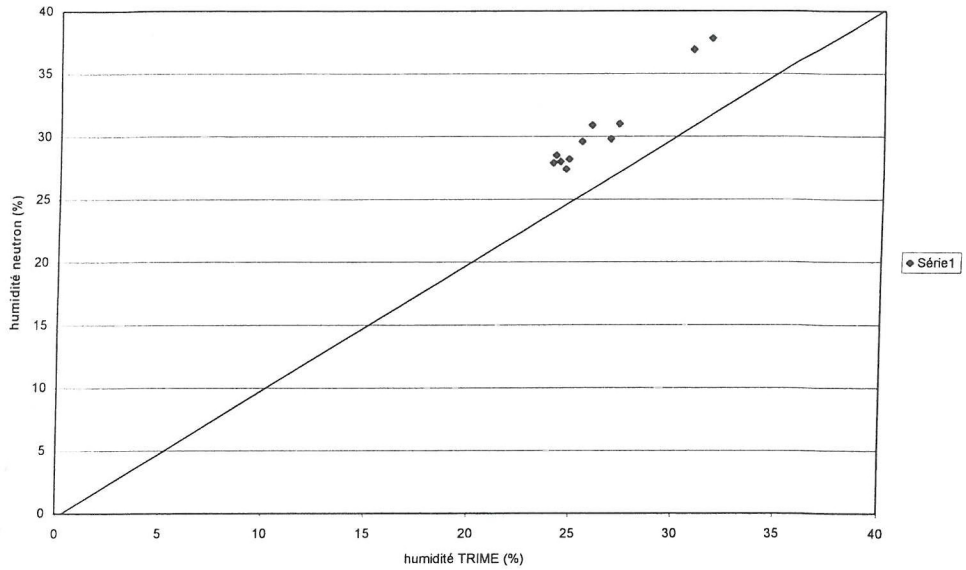


Figure 15 : 60 cm de profondeur

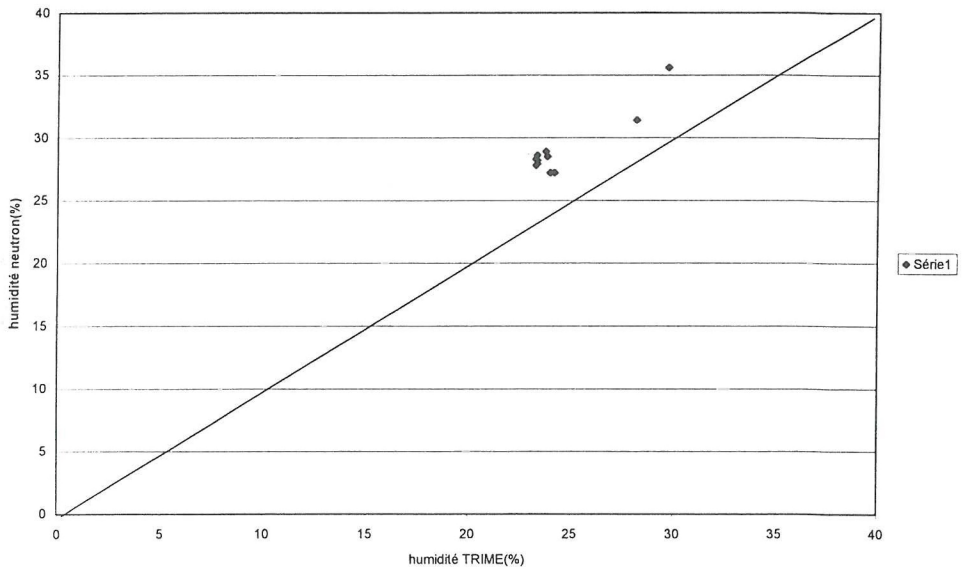


Figure 16 : 70 cm de profondeur

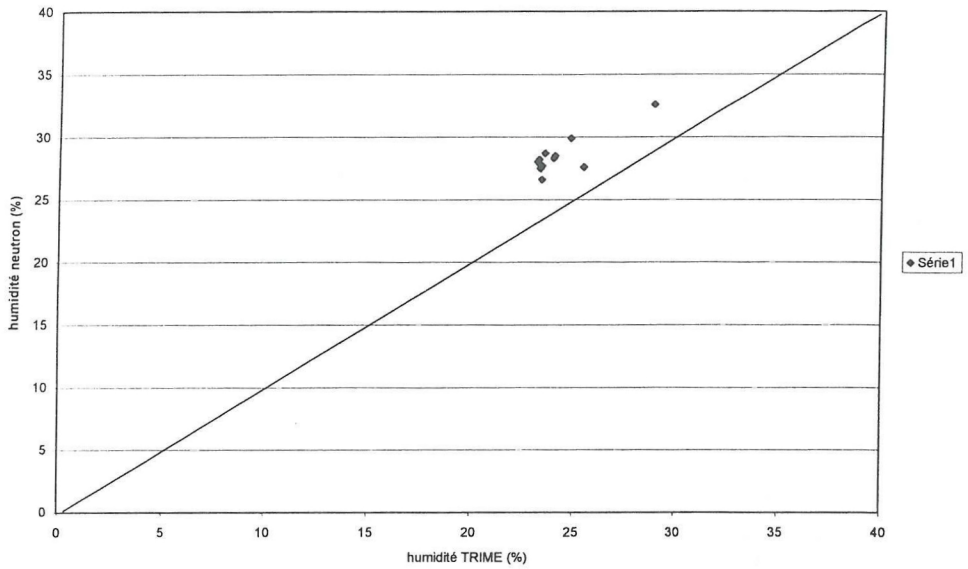


Figure 17 : 80 cm de profondeur

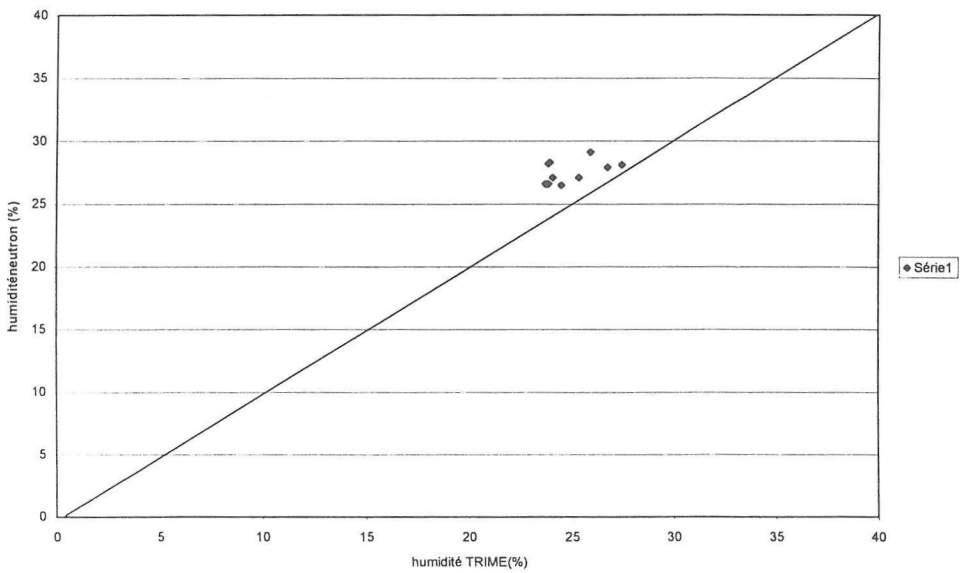


Figure 18 : 90 cm de profondeur

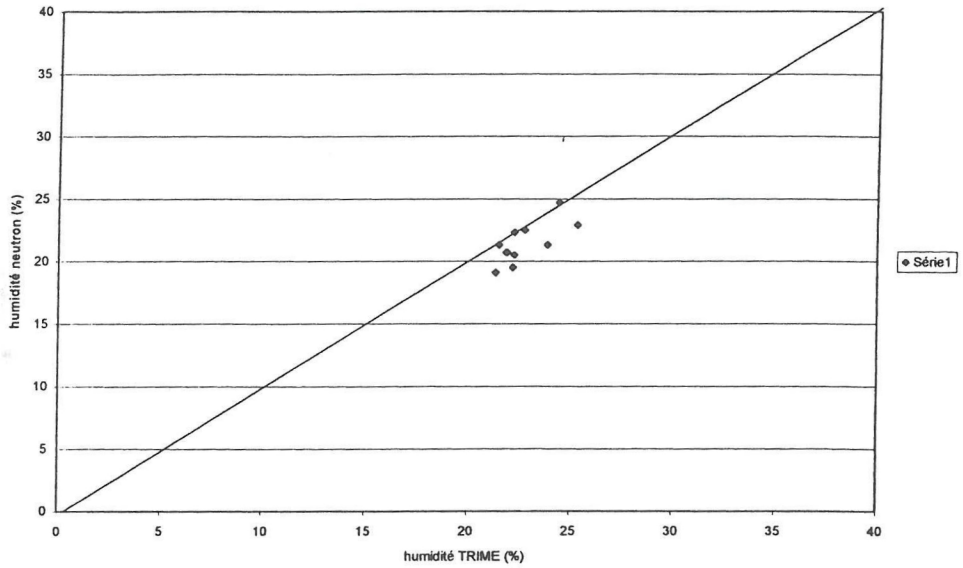


Figure 19 : 100 cm de profondeur

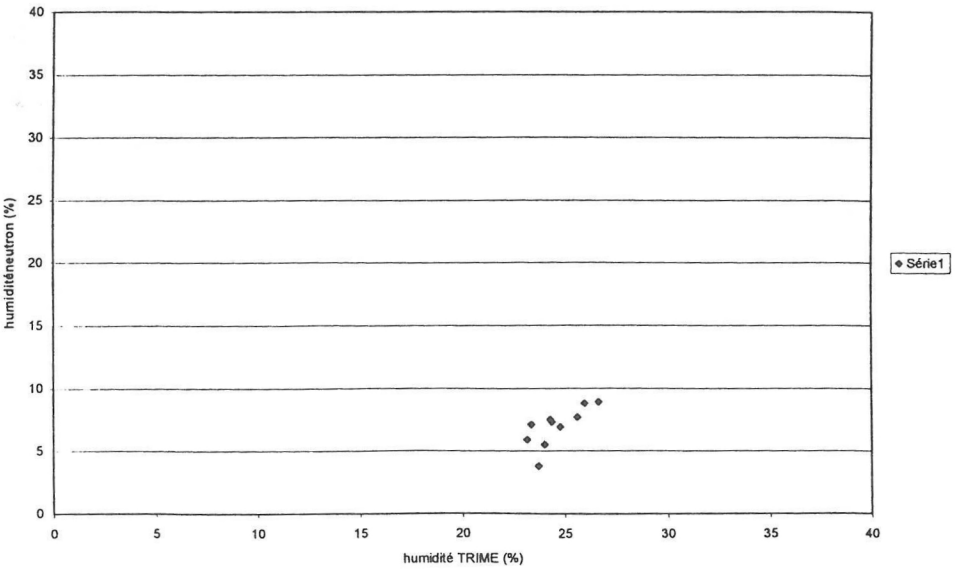
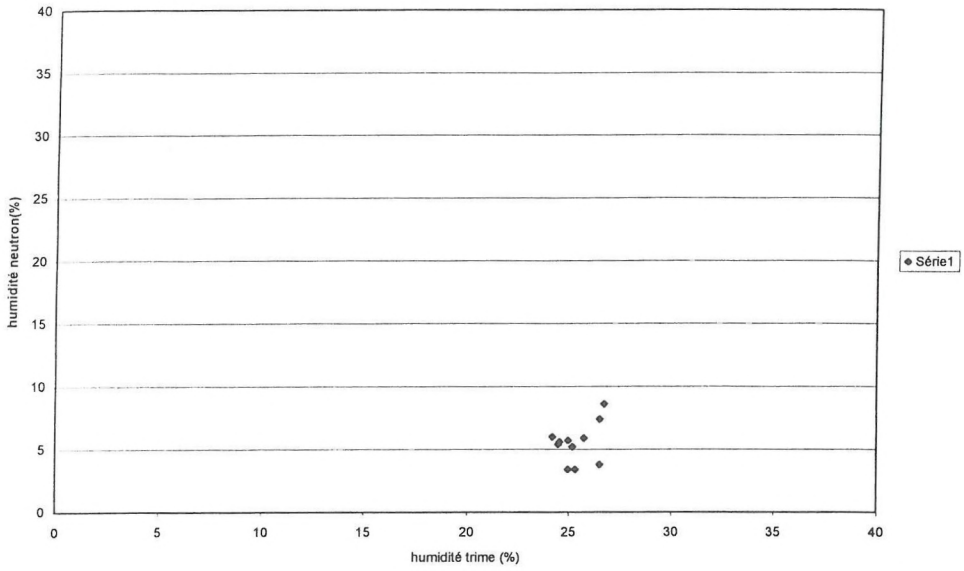


Figure 20 : 110 cm de profondeur



Analyse des courbes (fig. 10 à 20)

Pour l'ensemble des couches on constate que les points sont alignés selon une droite plus ou moins parallèle à la première bissectrice. La relation existant entre les valeurs l'humidité TRIME et neutron est donc globalement linéaire. A certaines profondeurs les points sont éloignés de la bissectrice. Cela signifie que même si le TRIME est sensible aux variations d'humidité, il ne permet pas de déterminer l'humidité de manière absolue avec l'étalonnage standard. On a d'ailleurs des écarts importants.

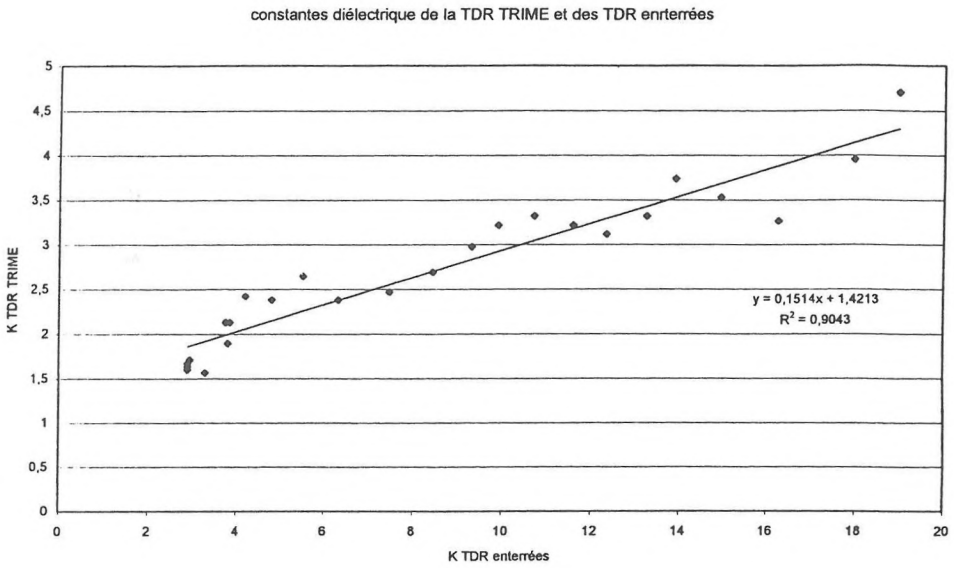
La dispersion du nuage de points est plus ou moins importante et a des origines diverses selon les profondeurs. De 10 à 20 cm la dispersion est importante car il s'agit d'une zone affectée par les irrigations et le tassement. Les hétérogénéités d'humidité et de densité sèche peuvent empêcher les variations neutron / TRIME du fait des différences de volume prospecté. De 30 à 70 cm les points sont peu dispersés. Les variations d'humidité TRIME et neutron sont identiques. Au-delà on a une dégradation des mesures difficilement explicables.

2) Expérience 2

2 .1) Comparaison des constantes diélectriques buriable et TRIME (fig.21)

Sur ce graphique (représentant les K TDR enterrables en fonction des K TRIME, on constate que la droite de régression que l'on peut faire passer par ces points est excellente. Le coefficient de corrélation est très proche de 1 ($R^2 = 0.9043$). L'équation est de la forme :
K (TDR buriable) = K (trime)* 0.1514 + 1.4213

Figure 21 : Constantes diélectriques TRIME et TDR enterrées



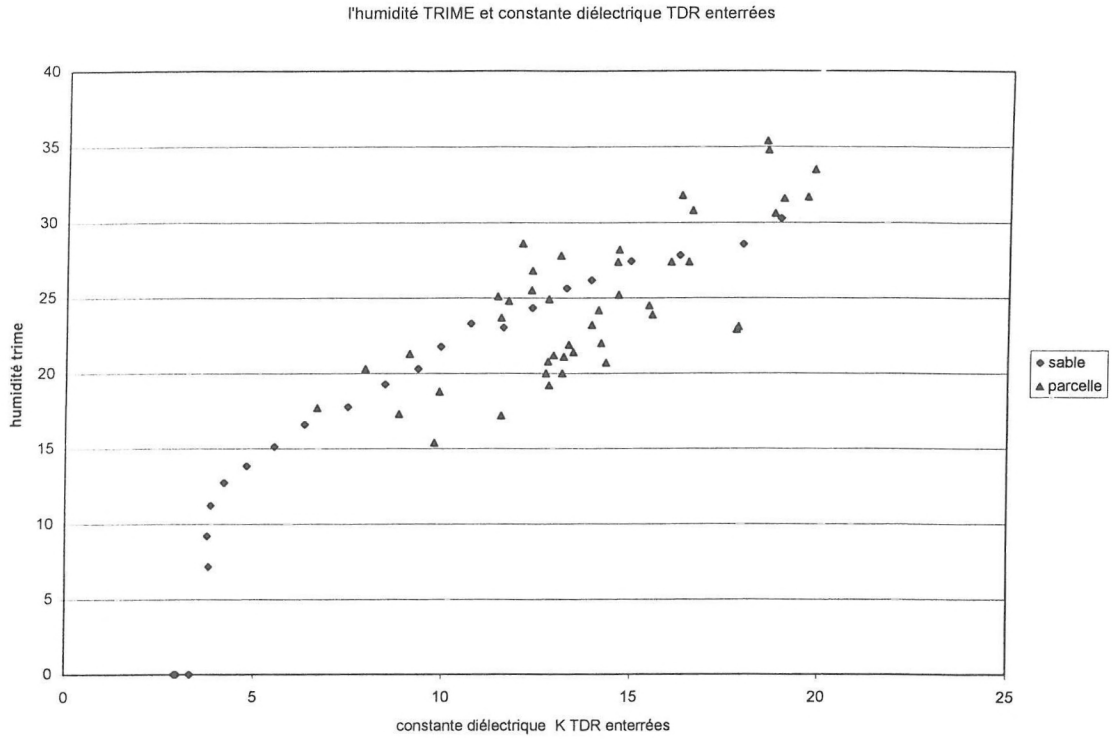
2.2)Comparaison de l'humidité TRIME et des constantes diélectriques buriable (fig.22) :

Pour les faibles valeurs d'humidité (inférieures à 10 %) la constante diélectrique est peu sensible aux variations d'humidité. Ceci s'explique par la présence d'eau liée diminuant le contraste de constante diélectrique entre le sable et l'eau. Lorsque l'humidité dépasse 10 % ce phénomène devient négligeable. Les valeurs de constante diélectrique augmentent de manière plus importante. On peut établir une relation entre les deux valeurs une méthode de régression. Ici on a utilisé une régression logarithmique dont l'équation suivante :

$Hv = 11.646 \ln(K) - 4.7767$ avec $R^2 = 0.9908$

On a ajouter à ces données celles provenant des mesures effectuées sur la parcelle. Les points ne se positionnent pas exactement sur la droite mais le décalage est faible. Ce décalage peut s'expliquer par la variabilité spatiale. Les mesures étant faites à quelques mètres d'intervalle, nous accorderons une plus grande confiance à la relation obtenue dans le sable. La relation que l'on a établit semble valable et peut être utiliser dans un premier temps si l'on a besoin de convertir l'humidité TRIME en constantes diélectriques.

Figure 22 : Humidité TRIME et constante diélectrique TDR enterrées



3) Expérience 3

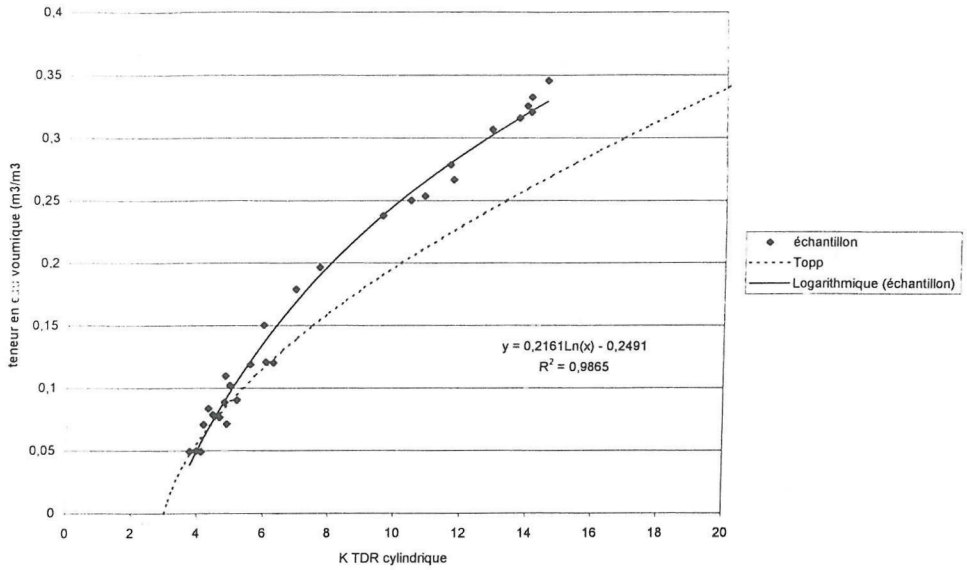
3.1) Relation d'étalonnage eau volumique – constante diélectrique(fig.23) :

Les points ont une évolution caractéristique. Ils évoluent en suivant une courbe. On a choisi d'utiliser une régression logarithmique pour établir la relation humidité volumique = f (K).

Hv = 0.2161 Ln (K)-0.2491 avec $R^2 = 0.9865$

Sur ce graphe représentant l'humidité volumique en fonction des constantes diélectriques, nous avons placer la relation de Topp (1980). Cette relation est établie pour un sol dit « standard ». Les points de mesure provenant du sol prélevé sur la parcelle sont décalés par rapport à la courbe de Topp. Pour une humidité en eau volumique identique le sol de la parcelle a une constante diélectrique plus faible.

Figure 23 : Humidité volumique et constante diélectrique TDR enterrées



Conclusion :

La comparaison des valeurs d'humidité obtenues par les méthodes TDR TRIME et neutron nous a permis de montrer que le TRIME réagit correctement aux variations d'humidité. Mais cet appareil ne permet pas de déterminer l'humidité du sol de manière absolue.
La qualité des contacts sol / tube expliquent uniquement les écarts d'humidité observés de 20 à 50 cm de profondeur. Entre 50 et 110 cm les écarts existants entre les valeurs d'humidité sont importants alors que les contacts sols / tube sont de bonne qualité.
La méthode de détermination de la constante diélectrique utilisée par le TRIME ne semble pas être la cause déterminante des écarts d'humidité.
Le fait d'effectuer les mesures neutroniques et TDR TRIME dans le même tube d'accès nous a permis de nous affranchir du problème de variabilité spatiale. Les profils d'humidité TRIME et neutron ont gardé malgré cela des différences importantes. La variabilité spatiale ne peut être la cause de telles différences.
La relation d'étalonnage utilisée par le TRIME explique certaines erreurs de mesures d'humidité (cas de l'horizon sableux).

BIBLIOGRAPHIE

Chanzy, A . , et al . , 1997 - Mesure de la teneur en eau et du potentiel hydrique dans le sol, L'eau dans l'espace rural : production végétale et qualité de l'eau, INRA éditions, pp. 143 - 152.

Topp, G.C., et al., 1980 - Electromagnetic determination of soil water content : measurement in coaxial transmission lines, water ressources research, vol. 16, no. 3, pages 574 - 582.

Todoroff, P. , 1998 - Modélisation de la propagation des micro-ondes dans le sol afin d'obtenir un profil hydrique par réflectométrie temporelle, Thèse, Université de la Réunion, 129 pp. , CIRAD.

ANNEXES

EXPERIENCE 1

date	*profondeur*	*comptage*	*humidité*	*humidité inter rang*	*humidité*	*K vrai*	*T trime*	*T ' trime*	*K obtenu*	*K'*
julien	*en cm*	*neutron(cps/s)*	*neutron (%)*	*gravimétrique (m3/m3)*	*trime (%)*	*TDR*	*nanosecondes*	*nanosecondes*	*graphiquement*	
169	10	219	17,42	0,1698	17,8	8,8				
169	20	319	24,42	0,2237	19	10,2				
169	30	343	26,1	0,2407	21	10,1				
169	40	386	29,11	0,2752	27,3	7,7				
169	50	389	29,32	0,2932	36,7					
169	60	385	29,04	0,2776	31,6					
169	70	389	29,32	0,2797	31,9					
169	80	396	29,81	0,2924	29,3					
169	90	351	26,66	0,2820	21,2					
169	100	290	27,5	0,2668	7					
169	110			0,2499	9					
187	10	186	15,11		18,7	9,9	0,7460	1,2300	1,5459	4,2025
187	20	269	20,92		21,1	13,3	0,8660	1,3660	2,0832	5,1832
187	30	294	22,67		21,8	14,1	0,8340	1,3660	1,9321	5,1832
187	40	316	24,21		25	12,9	0,9180	1,6020	2,3409	7,1289
187	50	340	25,89		30		1,0520	1,8020	3,0742	9,0200
187	60	341	25,96		32,1		1,0360	1,7520	2,9814	8,5264
187	70	360	27,29		33,3		1,0180	1,7020	2,8787	8,0467
187	80	385	29,04		34,5		1,0360	1,7020	2,9814	8,0467
187	90	352	26,73		25,8		0,8020	1,3340	1,7867	4,9432
187	100	289	27,43		9,8		0,6660	0,9340	1,2321	2,4232
187	110	288	27,36		7,6		0,6860	0,9520	1,3072	2,5175
191	10	170	13,99	0,4206	17,7	6,7	1,0010	1,5020	2,7833	6,2667
191	20	252	19,73	0,2000	21,3	9,1	1,0250	1,5760	2,9184	6,8994
191	30	286	22,11	0,2031	21,4	13,4	1,1430	1,5940	3,6290	7,0579
191	40	302	23,23	0,2162	24,9	12,8	1,2100	1,7520	4,0669	8,5264
191	50	323	24,7	0,2324	28,2		1,2840	1,9010	4,5796	10,0383
191	60	316	24,21	0,2455	27,2		1,1930	1,8100	3,9535	9,1003
191	70	334	25,47	0,2405	27,6		1,2760	1,8850	4,5227	9,8701
191	80	362	27,43	0,2457	28,1		1,2770	1,9940	4,5298	11,0445
191	90	332	25,33	0,2694	22,9		1,0680	1,7190	3,1684	8,2082
191	100	278	26,66	0,2716	8,9		0,7260	1,1600	1,4641	3,7378
191	110	279	26,73	0,2631	8,6		0,7850	1,1020	1,7117	3,3733

194	10	159	13,22		17,3	8,8	0,9680	1,4180	2,6028	5,5853
194	20	245	19,24		20	12,7	1,0430	1,5270	3,0218	6,4770
194	30	270	20,99		20	13,2	1,1090	1,5430	3,4163	6,6135
194	40	292	22,53		23,7	11,5	1,1770	1,6850	3,8481	7,8867
194	50	312	23,93		27,9		1,2180	1,8600	4,1209	9,6100
194	60	303	23,3		27,8		1,2520	1,9850	4,3542	10,9451
194	70	314	24,07		28,5		1,2770	2,0110	4,5298	11,2337
194	80	340	25,89		29,1		1,2350	1,9940	4,2367	11,0445
194	90	319	24,42		24,7		1,0420	1,7430	3,0160	8,4390
194	100	268	25,96		8,8		0,8520	1,2260	2,0164	4,1752
194	110	276	26,52		7,4		0,7930	1,0850	1,7468	3,2701
198	10	308	23,65		28,2	14,6	1,1940	1,6850	3,9601	7,8867
198	20	346	26,31		27,4	16,0	1,1510	1,7100	3,6800	8,1225
198	30	331	25,26		27,4	14,6	1,1920	1,6760	3,9468	7,8027
198	40	345	26,24		28,6	12,1	1,1920	1,8680	3,9468	9,6928
198	50	339	25,82		30,9		1,2420	1,8930	4,2849	9,9540
198	60	311	23,86		28,5		1,2090	1,8850	4,0602	9,8701
198	70	313	24		28,3		1,3180	1,9770	4,8253	10,8570
198	80	332	25,33		27,1		1,2100	1,9770	4,0669	10,8570
198	90	311	23,86		21,3		1,0590	1,7350	3,1152	8,3617
198	100	263	25,61		7,7		0,9170	1,2420	2,3358	4,2849
198	110	276	26,52		3,8		0,9090	1,1010	2,2952	3,3672
201	10	190	15,39		18,8	9,9	0,9680	1,4260	2,6028	5,6485
201	20	265	20,64		20,8	12,8	1,0750	1,5010	3,2101	6,2583
201	30	285	22,04		21,2	12,9	1,0680	1,5180	3,1684	6,4009
201	40	300	23,09		25,1	11,4	1,1430	1,6350	3,6290	7,4256
201	50	314	24,07		28,5		1,2180	1,8270	4,1209	9,2720
201	60	303	23,3		28,3		1,2010	1,7770	4,0067	8,7715
201	70	307	23,58		28,7		1,1520	1,7600	3,6864	8,6044
201	80	320	24,49		26,5		1,1010	1,8020	3,3672	9,0200
201	90	295	22,74		22,5		0,9590	1,5090	2,5547	6,3252
201	100	251	24,77		6,9		0,7760	1,0840	1,6727	3,2640
201	110	265	25,75		5,9		0,8430	1,1010	1,9740	3,3672
205	10	289	22,32		24,5	15,5	1,1100	1,6600	3,4225	7,6544
205	20	292	22,53		22,9	17,8	1,0930	1,6020	3,3185	7,1289
205	30	293	22,6		23,1	17,9	1,0590	1,5430	3,1152	6,6135
205	40	338	25,75		27,4	16,5	1,1340	1,7510	3,5721	8,5167
205	50	358	27,15		31		1,2260	1,9850	4,1752	10,9451
205	60	310	23,79		28,9		1,1840	1,8840	3,8940	9,8596
205	70	305	23,44		27,7		1,2180	1,9180	4,1209	10,2187
205	80	311	23,86		26,6		1,1600	1,9520	3,7378	10,5842
205	90	287	22,18		19,5		1,0090	1,5680	2,8280	6,8295
205	100	245	24,35		7,3		0,8420	1,1500	1,9693	3,6736
205	110	259	25,33		3,4		0,7970	1,1050	1,7645	3,3917

208	10	201	16,16		20,3	7,9	1,0430	1,4270	3,0218	5,6565
208	20	268	20,85		21,9	13,3	1,1010	1,5600	3,3672	6,7600
208	30	285	22,04		23,2	13,9	1,0590	1,5430	3,1152	6,6135
208	40	304	23,37		25,5	12,3	1,0920	1,6340	3,3124	7,4165
208	50	321	24,56		27,4		1,2260	1,8270	4,1752	9,2720
208	60	304	23,37		28,6		1,2680	1,8940	4,4662	9,9645
208	70	303	23,3		28,2		1,1930	1,9020	3,9535	10,0489
208	80	311	23,86		28,2		1,2260	1,9190	4,1752	10,2293
208	90	288	22,25		22,3		1,0510	1,5850	3,0683	6,9784
208	100	244	24,28		7,5		0,8430	1,1100	1,9740	3,4225
208	110	254	24,98		5,7		0,7590	1,0850	1,6002	3,2701
210	10	295	22,74	0,2255	22	14,2	1,0510	1,6680	3,0683	7,7284
210	20	350	26,59	0,2253	23,9	15,6	1,0430	1,7350	3,0218	8,3617
210	30	343	26,1	0,2413	25,2	14,6	1,0760	1,7350	3,2160	8,3617
210	40	356	27,01	0,2808	27,8	13,1	1,1010	1,8940	3,3672	9,9645
210	50	352	26,73	0,3087	29,8		1,1680	1,9770	3,7895	10,8570
210	60	313	24	0,2991	27,2		1,0760	1,8520	3,2160	9,5275
210	70	305	23,44	0,2927	26,6		1,0510	1,8100	3,0683	9,1003
210	80	314	24,07	0,2956	27,1		1,0930	1,8430	3,3185	9,4351
210	90	283	21,9	0,2880	20,7		0,9590	1,5180	2,5547	6,4009
210	100	240	24	0,2859	5,5		0,7600	1,1430	1,6044	3,6290
210	110	257	25,19	0,2831	5,2		0,8100	1,1010	1,8225	3,3672
212	10	232	18,33		17,2	11,6	0,9260	1,4270	2,3819	5,6565
212	20	302	23,23		20,7	14,3	0,9340	1,5600	2,4232	6,7600
212	30	317	24,28		24,2	14,1	1,0430	1,6190	3,0218	7,2810
212	40	332	25,33		26,8	12,3	1,0840	1,8100	3,2640	9,1003
212	50	332	25,33		29,6		1,1770	1,9110	3,8481	10,1442
212	60	304	23,37		27,9		1,1590	1,9520	3,7313	10,5842
212	70	304	23,37		27,5		1,1430	1,9690	3,6290	10,7693
212	80	310	23,79		26,6		1,1350	1,9270	3,5784	10,3148
212	90	282	21,83		20,7		1,0260	1,5600	2,9241	6,7600
212	100	228	23,16		5,9		0,8100	1,1350	1,8225	3,5784
212	110	254	24,98		3,4		0,7670	1,1340	1,6341	3,5721
215	10	204	16,37		15,4	9,8	0,9760	1,3930	2,6460	5,3901
215	20	271	21,06		19,2	12,8	1,0090	1,4930	2,8280	6,1918
215	30	288	22,25		21,1	13,2	1,0590	1,5850	3,1152	6,9784
215	40	302	23,23		24,8	11,7	1,0930	1,7350	3,3185	8,3617
215	50	317	24,28		28		1,1770	1,8690	3,8481	9,7032
215	60	304	23,37		28,2		1,1930	1,8930	3,9535	9,9540
215	70	302	23,23		28		1,1680	1,9350	3,7895	10,4006
215	80	309	23,72		26,6		1,1770	1,9440	3,8481	10,4976
215	90	275	21,34		19,1		0,9760	1,5180	2,6460	6,4009
215	100	236	23,72		3,8		0,7510	1,1090	1,5667	3,4163
215	110	248	24,56		5,6		0,7670	1,1010	1,6341	3,3672

219	10	360	27,29	0,2955	30,8	16,6	1,2340	1,8930	4,2299	9,9540
219	20	413	31	0,2781	30,6	18,8	1,1930	1,8930	3,9535	9,9540
219	30	410	30,79	0,2635	31,7	19,7	1,2600	1,8600	4,4100	9,6100
219	40	412	30,93	0,2813	34,8	18,6	1,2270	2,0020	4,1820	11,1333
219	50	410	30,79	0,2904	36,9		1,2340	2,0520	4,2299	11,6964
219	60	373	28,2	0,2535	31,4		1,2510	1,9520	4,3472	10,5842
219	70	325	24,84	0,2176	29,9		1,1930	1,9180	3,9535	10,2187
219	80	312	23,93	0,2051	28,3		1,2100	1,8940	4,0669	9,9645
219	90	277	21,48	0,2011	21,3		1,0340	1,5600	2,9699	6,7600
219	100	231	23,37	0,1995	7,1		0,8010	1,1010	1,7822	3,3672
219	110	243	24,21		6		0,7760	1,1100	1,6727	3,4225
222	10	356	27,01		31,8	16,3	1,2760	1,8930	4,5227	9,9540
222	20	411	30,86		31,6	19,0	1,1930	1,8430	3,9535	9,4351
222	30	414	31,07		33,5	19,8	1,2260	1,8600	4,1752	9,6100
222	40	416	31,21		35,4	18,6	1,2260	2,0180	4,1752	11,3120
222	50	423	31,7		37,8		1,2090	2,0680	4,0602	11,8795
222	60	395	29,74		35,6		1,1850	2,0690	3,9006	11,8910
222	70	383	28,9		32,6		1,2350	2,0190	4,2367	11,3232
222	80	352	26,73		27,9		1,1520	1,9020	3,6864	10,0489
222	90	288	22,25		20,5		1,0420	1,5260	3,0160	6,4685
222	100	232	23,44		6,2		0,7670	1,0590	1,6341	3,1152
222	110	247	24,49		5,4		0,8010	1,0680	1,7822	3,1684

date	heure	nom	t1	t2	t (transit time	K	eau vol	expérience 2 protocole
	5-juil 17h30	eau 3	2,535	4,270	1,735	11,573	0,278	
	9h30	eau 4	2,502	3,753	1,251	6,017	0,121	
		eau 5	2,535	3,786	1,251	6,017		
		eau 6	2,568	3,869	1,301	6,508		
	5-juil 17h13	ech1	2,618	3,894	1,276	6,260	0,120	
	6-juil 11h11	ech2	2,535	3,736	1,201	5,546	0,119	
	6-juil 18h17	ech 3						élastique et plast de 2 g
	7-juil 9h08	ech4	2,535	3,694	1,159	5,164	0,090	
	7-juil 11h30						0,087	séchage à 40°C
	7-juil 16h20							sechage a l'air
	7-juil 17h24	ech5	2,585	3,711	1,126	4,875	0,071	mesure puis séchage à 40
	8-juil 10h10	ech6	2,577	3,594	1,017	3,977	0,050	mesure sechage à l'air 24h
	8-juil 17h29	ech7	2,544	3,536	0,992	3,783	0,049	sous plastique
	9-juil 17h30	ech8	2,568	3,603	1,035	4,119	0,049	mise en eau, terre 2-3g
	15-juil 10h31							table succion à 50 cm
	19-juil 11h							table succion 20 cm
	23-juil 17h							table succion 0 cm
	29-juil							sortie de la table de succio
	29-juil 11h37	ech 9 et10						
	11h56	ech 11	2,543	4,487	1,944	14,530	0,346	
	16h20	ech 12	2,542	4,453	1,911	14,040	0,332	
								sous plastique
	30-juil 12h12							
								sechage a l'air
	13h47	ech 13	2,535	4,437	1,902	13,909	0,325	
	15h40	ech 14	2,510	4,420	1,910	14,026	0,320	
	17h40	ech 15	2,518	4,403	1,885	13,661	0,316	
								sous plastique
	2-août 11h10							
								sechage a l'air
	12h43	ech 16	2,543	4,370	1,827	12,833	0,307	sechage a l'air
	17h20	ech 17						sechage a l'air
	3-août 9h26	ech 18	2,510	4,253	1,743	11,680	0,267	sechage a l'air
	12h48	ech 19						sechage a l'air
	16h55	ech 20	2,518	4,195	1,677	10,812	0,254	sechage a l'air
								sous plastique
	4-août 9h							
								sechage a l'air
	10h10	ech 21	2,493	4,137	1,644	10,391	0,250	sechage a l'air
	17h	ech 22						sechage a l'air
								sous plastique
	5-août 10h							sechage a l'air
	11h	ech23	2,502	4,078	1,576	9,549	0,238	sechage a l'air
	17h08	ech24						sechage a l'air
	6-août 13h30	ech25	2,527	3,936	1,409	7,633	0,196	sechage a l'air
	18h	ech26						sechage a l'air
								sous plastique
	9-août 11h							sechage a l'air
	13h	ech27	2,527	3,868	1,341	6,914	0,179	sechage a l'air
	17h	ech28						sechage a l'air
	10-août 9h30	ech29	2,585	3,828	1,243	5,940	0,150	sechage a l'air
	11-août 9h							sechage a l'air
	11h							sous plastique
	12-août 10h	ech30	2,585	3,703	1,118	4,806	0,110	sechage a l'air
	17h	ech31	2,535	3,669	1,134	4,944	0,102	sechage a l'air
	13-août 11h30	ech32	2,502	3,619	1,117	4,797	0,089	sechage a l'air
		ech33	2,560	3,619	1,059	4,312	0,084	
	16-août 13h30	ech34	2,518	3,594	1,076	4,451	0,079	sechage a l'air
	17h06	ech35	2,502	3,603	1,101	4,661	0,077	sechage a l'air
	17-août 10h	ech36	2,493	3,536	1,043	4,182	0,071	sechage a l'air

EXPERIENCE 3

		buriable 1	*buriable 2*	*buriable 3*	*buriable 4*		*buriable 1*	*buriable 2*	*uriable*	*buriable 4*		*trime*						
volume	aute	HUM	HUM	HUM	HUM	um mo	K	K	K	K	K mo	1	2	3	rime mo	t1	t2	transit time	k trime
0		2,6	2,7	2,5	2,7	2,625	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	0	0	0	0,00	5,3040	6,0630	0,7590	1,6002
500		2,7	2,7	2,5	2,7	2,65	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	0	0	0	0,00	5,3370	6,1130	0,7760	1,6727
1000		2,7	2,7	2,5	2,7	2,65	2,9	2,9	2,9	2,9	2,9	0	0	0	0,00	5,3620	6,1300	0,7680	1,6384
1500		2,6	2,9	2,6	3	2,775	2,9	3	2,9	3	2,95	0	0	0	0,00	5,3620	6,1470	0,7850	1,7117
2000	-5,5	2,8	4,6	3,2	4	3,65	3	3,6	3,1	3,5	3,3	0	0	0	0,00	5,3790	6,1300	0,7510	1,5667
2500	-3,5	5	5,3	4,9	5	5,05	3,8	3,9	3,7	3,8	3,8	3,9	7,6	10	7,17	5,3790	6,2050	0,8260	1,8952
2750	-2,4	4,9	5,5	4,8	4,6	4,95	3,7	4	3,7	3,6	3,75	6,6	9,8	11	9,20	5,3870	6,2630	0,8760	2,1316
3000	-1,2	5	5,5	5	5,2	5,175	3,8	4	3,8	3,8	3,85	9,9	11	13	11,23	5,3950	6,2710	0,8760	2,1316
3250	0	6,1	6,1	5,6	5,9	5,925	4,3	4,3	4	4,2	4,2	11,7	13	14	12,73	5,3870	6,3210	0,9340	2,4232
3500	1,2	6,9	8,5	6,6	7,4	7,35	4,6	5,3	4,5	4,8	4,8	12,8	14	15	13,83	5,3950	6,3210	0,9260	2,3819
3750	2,1	8,4	11,2	7,7	8,9	9,05	5,3	6,4	4,9	5,5	5,53	13,7	15	17	15,13	5,3870	6,3630	0,9760	2,6460
4000	3,1	11	12,4	9,7	11,1	11,05	6,3	6,8	5,8	6,4	6,33	15,2	17	18	16,60	5,3870	6,3130	0,9260	2,3819
4250	4	14,4	14,6	12,6	15,1	14,175	7,6	7,6	6,9	7,8	7,48	16,4	18	19	17,77	5,3870	6,3300	0,9430	2,4701
4500	5,1	16,9	16,9	15,7	16,7	16,55	8,6	8,6	8,1	8,5	8,45	17,9	19	21	19,27	5,3870	6,3710	0,9840	2,6896
4750	6	19	19	18,1	18,3	18,6	9,5	9,5	9,1	9,2	9,33	19,2	20	22	20,30	5,3870	6,4220	1,0350	2,9756
5000	7,1	20,4	18,7	19,8	20,5	19,85	10,2	9,4	9,9	10,2	9,93	20,6	22	23	21,77	5,3790	6,4550	1,0760	3,2160
5250	8,1	22,3	19,2	21,6	22	21,275	11,3	9,6	10,9	11,1	10,7	22,3	23	24	23,30	5,3870	6,4800	1,0930	3,3185
5500	9,5	24,3	20,7	23,1	23,4	22,875	12,4	10,4	11,7	11,9	11,6	21,7	23	24	23,03	5,3200	6,3960	1,0760	3,2160
5750	10,7	25,7	20,9	24,8	24,9	24,075	13,5	10,5	12,7	12,7	12,4	23	25	25	24,33	5,3370	6,3960	1,0590	3,1152
6000	11,3	26,8	21,9	25,9	26,1	25,175	14,5	11	13,7	13,8	13,3	25,4	25	26	25,63	5,3370	6,4300	1,0930	3,3185
6250	12,2	27,8	21,7	26,9	27,3	25,925	15,3	10,9	14,5	14,9	13,9	25	26	27	26,17	5,3370	6,4970	1,1600	3,7378
6500	13,3	28,8	24,4	27,7	28,2	27,275	16,3	12,4	15,3	15,8	15	27	27	28	27,43	5,3450	6,4720	1,1270	3,5281
6750	15	29,9	27,4	28,8	29,1	28,8	17,3	15	16,3	16,5	16,3	27,2	28	28	27,83	5,3540	6,4380	1,0840	3,2640
7000	20,1	31,5	31,4	29,9	30,4	30,8	18,5	18,4	17,3	17,7	18	28,5	29	28	28,57	5,3370	6,5300	1,1930	3,9535
7400	20,1	32,5	33,4	31,1	31,3	32,075	19,3	20	18,2	18,4	19	29,8	30	31	30,27	5,3290	6,6300	1,3010	4,7017